

관세무역연구

제2권 제3호 (통권 제7호, 2025년 9월)

연구논문

소진경·소막 지속 가능한 항만을 위한 디지털 생태 지표
: 오염 방지 및 근로자 안전에 대한 통합적 접근 방안

오 진 제조업 전문화 집적이 수출 무역에 미치는 영향에 관한 연구

김영주 우주산업에 관한 수출통제 - 미국의 수출통제 제도를 중심으로 -

한낙현 AI 기술을 활용한 통관서류업무의 자동화에 대한 대응책에 관한 연구



한국관세무역개발원

Korea Customs and Trade Development Institute

관세무역연구

Korea Customs Review

제2권 제3호·통권 제7호(2025년 9월)

Vol. 2 No. 3 September 2025

한국관세무역개발원

Korea Customs and Trade Development Institute

목차

■ 연구논문

소진경·소막 지속 가능한 향만을 위한 디지털 생태 지표 : 오염 방지 및 근로자 안전에 대한 통합적 접근 방안	1
오 진 제조업 전문화 집적이 수출 무역에 미치는 영향에 관한 연구	47
김영주 우주산업에 관한 수출통제 - 미국의 수출통제 제도를 중심으로 -	65
한낙현 AI 기술을 활용한 통관서류업무의 자동화에 대한 대응책에 관한 연구	107

■ 부록

「관세무역연구」 투고 안내

Contents

■ ARTICLES

| Zhenqing Su·Miao Su

Digital-enabled ecological indicators for sustainable ports
: An integrated approach to pollution control and worker health protection 1

| Zhen Wu

Study on the Impact of Manufacturing Specialization Agglomeration on Export Trade 47

| Young-Ju Kim

A Review of Export Controls on the Space Industry
: Focusing on the United States Export Control Regime 65

| Nak-Hyun Han

A Study on the Countermeasures for Automating Customs Clearance Documentation
using AI Technology 107

■ APPENDIX

Submission Guidelines

Digital-enabled ecological indicators for sustainable ports: An integrated approach to pollution control and worker health protection

Zhenqing Su*·Miao Su**

목 차

I. Introduction	IV. Results and Discussion
II. Literature review	V. Conclusion
III. Research methodology	References

Rising global trade and port automation have enhanced operational efficiency but exacerbated environmental pollution and health risks for port workers. This study explores how digital technologies can mitigate these impacts by managing pollution, optimizing operations, and protecting worker health. Grounded in the Resource-Based View (RBV) and Stakeholder Theory (ST), 18 core factors were identified through expert interviews and literature review. Using the integrated Decision Making Trial and Evaluation Laboratory-Interpretive Structural Modeling-Matrix of Cross-Impact Multiplications Applied to Classification (DEMATEL-ISM-MICMAC) approach, the analysis highlights the pollutant source digital management system, electrified port equipment, and occupational health monitoring and early warning systems as key enablers. Additionally, the carbon footprint tracking and optimization platform significantly enhances system effectiveness. This research provides a practical digital framework for green, sustainable port development and improved worker health.

Keywords Digital Technology, Environmental Pollution, Port, Worker Health, DEMATEL-ISM-MICMAC

* First author, The Graduate School of Global Business Kyonggi University,
E-Mail: suzhenqing@kyonggi.ac.kr

** Corresponding author, Department of Global Business Administration Kyung Hee University
-Global Campus, E-Mail: marksu@khu.ac.kr

I. Introduction

The rapid development of international trade has significantly enhanced the efficiency of port operations. However, the associated environmental pollution problems are becoming increasingly severe, posing a direct risk to the health of workers (Puig et al., 2020; Argüello; Gu et al., 2024; Cao et al., 2021; Fang et al., 2025). Significant emissions of exhaust gases and particulate matter from port equipment, vessel operations, and cargo transportation substantially contribute to air pollution, leading to prolonged occupational exposure to hazardous substances. This exposure may elevate the risk of adverse health outcomes, including respiratory disorders and cardiovascular diseases (Clemente et al., 2021; García-Onetti et al., 2021; Kong et al., 2025). Although port automation technology has played a significant role in reducing direct worker engagement in high-risk tasks and improving operational efficiency, the ongoing increase in port cargo throughput and the diversification of pollution sources have intensified health risks for workers (Alamouch et al., 2022; Mueller et al., 2023; Yu et al., 2023). As critical hubs within the global transportation network, ports are compelled to not only confront the environmental challenges associated with carbon emissions but also to rigorously address the direct health impacts of environmental pollution on frontline workers (Castellano et al., 2020; Calan et al., 2025; Zhang et al., 2023).

In response to this escalating health risk, policymakers and environmental experts have advocated for stricter environmental regulations to effectively mitigate port pollution emissions and improve worker health (Di Francesco et al., 2016; Carlo et al., 2014; Lin et al., 2025; Zhou et al., 2023). Digital technologies are integral to this process. Real-time air quality monitoring, intelligent traffic management systems, and the electrification of port equipment provide innovative methods to reduce workers' exposure to harmful pollutants (Progiou et al., 2021;

Nogué-Algueró, 2020; Bhattacharya et al., 2024; Calan et al., 2025; Yan et al., 2022). Nevertheless, despite the demonstrated efficacy of these technologies in mitigating pollution, the challenges associated with the complexity of technological integration and the prevention of unintended environmental burdens—while concurrently safeguarding worker health—remain pressing concerns that demand prompt and coordinated intervention (Spieler, 1994). Systematically identifying and comprehensively evaluating the key success factors that mitigate the effects of port environmental pollution on employee health is imperative for advancing the greening initiatives of port sectors and improving protective measures for workers. This undertaking holds substantial academic and practical relevance.

Current studies regarding the health effects of environmental pollution on workers focus on three main areas. First, research in environmental and occupational health has focused on the long-term effects of air pollutants, including particulate matter and exhaust gases on workers' respiratory and cardiovascular health, particularly the acute and chronic health risks in highly polluted environments (Clemente et al., 2021; Argüello, 2020; García-Onetti et al., 2021; Alamoush et al., 2022; Široka et al., 2021). However, there is a paucity of research in this field on the application of emerging digital technologies for real-time monitoring and health risk assessment. Second, research in supply chain and logistics management has predominantly focused on air pollution generated during the transportation of goods and port operations. However, limited research has been conducted on the application of digital technologies to optimize logistics processes, reduce pollution sources, and mitigate their impacts on workers' health (Sornn-Friese et al., 2021; Merico et al., 2021; Fameli et al., 2020; Cammin et al., 2020). In the domain of environmental policy and management, scholarly discourse has predominantly focused on regulatory strategies and environmental standards aimed at mitigating corporate emissions. Nevertheless, there remains a notable gap in systematic analyses concerning the deployment of smart

technologies by enterprises for pollution prevention and the protection of worker health (Nunes et al., 2020; Clemente et al., 2021; Puig et al., 2020; Lopes et al., 2013). Notably, there remain gaps in the research on key success factors.

Although existing research on port digitization and environmental pollution control has advanced, most studies still focus on macro development paths and lack in-depth analysis of the complex health risk control mechanisms (Jiang et al., 2024; Zhang et al., 2024; Wang et al., 2019). Notably, significant gaps persist in the existing literature regarding the application of digital technologies to alleviate the health impacts of port-related pollution on workers. Moreover, the incorporation of interdisciplinary perspectives remains insufficient, thereby hindering a comprehensive understanding of the underlying mechanisms through which digital technologies enhance the health and safety conditions of port workers (Progiou et al., 2021). Current evaluations predominantly emphasize the operational effectiveness of technologies such as the Internet of Things and artificial intelligence within port environments (Herrero et al., 2022; Guibing et al., 2021; Li et al., 2024). Despite these technologies demonstrating a positive impact on operational efficiency and reducing pollution emissions, deficiencies persist in the systematic analysis of long-term health risk prevention and control for port workers, sustained health impacts, and comprehensive technical measures.

This study addresses the aforementioned research deficiencies by utilizing a comprehensive framework of the RBV and ST. Quantitative and qualitative analyses were conducted by combining expert evaluation with the decision-making trial and evaluation laboratory, interpretive structural modeling, and matrix impacts cross-reference multiplication applied to a classification (DEMATEL-ISM-MICMAC) integrated approach. Eighteen key success factors for digital technology in mitigating air pollution's impact on the health of port workers were systematically identified. To the best of our knowledge, this study is the first to investigate the role of digital technologies in mitigating the health impacts of air pollution on

port workers. The findings identify the pollutant source digital management system, electrified port equipment, occupational health monitoring and early warning systems, and the localization of international green port standards as critical factors in leveraging digital technologies to reduce the adverse effects of environmental pollution on the health of port personnel. Additionally, the pollutant source digital management system and carbon footprint tracking and optimization platform significantly contribute to the system's efficacy. These factors are vital in protecting the health of port workers and substantially contribute to the sustainable development of ports.

This study highlights the economic and strategic significance of digital technologies in mitigating the health impacts of environmental pollution on port workers. It further delineates the broad implications of these technologies across environmental, social, and policy domains. By advancing the theoretical framework of digital technology application in port management and fostering the integration of multidisciplinary perspectives, this research contributes to the existing body of literature. The identified key factors and their interrelationships offer a scientifically grounded foundation for policy formulation and managerial decision-making, serving as both a practical reference and theoretical guide for the green and sustainable transformation of ports globally.

II. Literature review

1. Latest developments in digital technology and port environmental governance

The rapid development of port automation and international trade has significantly enhanced the efficiency of port operations. However, the environmental pollution

problems associated with the rapid expansion of international trade are becoming increasingly severe, posing a direct risk to the health of workers (Merico et al., 2021; Cammin et al., 2020). As concentrated hubs of carbon and pollutant emissions, ports are required to optimize resource utilization and strengthen pollution control through the adoption of advanced technologies (Merico et al., 2021; Nogué-Algueró, 2020). In this context, digital technologies—including electrified equipment, intelligent traffic management systems, clean fuel technologies, and air quality monitoring systems—have become essential tools in port environmental governance (Castellano et al., 2020; Nunes et al., 2020). The implementation of these advanced digital solutions not only enables ports to substantially reduce carbon emissions and improve operational efficiency but also contributes to safeguarding employee health (Mueller et al., 2023; Argüello, 2020).

For instance, intelligent traffic management systems mitigate traffic congestion and idling emissions by optimizing vehicle scheduling, thereby reducing the concentration of harmful pollutants in the air (Nogué-Algueró, 2020; Nunes et al., 2020). Additionally, relevant studies reveal that automated equipment and drone monitoring technology can more efficiently monitor air quality and achieve real-time detection and control of pollution sources (Yang et al., 2024). Natalucci (2019) identifies the Internet of Things as a foundational component of smart ports, emphasizing the critical role of advanced technologies in driving their evolution. The incorporation of smart technologies has been shown to significantly improve port operational efficiency, minimize delays, and enhance both transparency and safety in port activities (Merico et al., 2021; Puig et al., 2020; Zio et al., 2024). Furthermore, the implementation of digital technologies mitigates labor shortages, supports the sustainable operation of port organizations, and plays a vital role in safeguarding employee health and safety (Yang et al., 2024).

The development of smart ports is simultaneously closely associated with environmental protection and green concepts and is committed to creating a more

sustainable operating model (Nunes et al., 2020; Sornn-Friese et al., 2021). By optimizing information flows, smart ports can integrate transport routes, select the optimal route, and reduce road congestion around the port area, thereby increasing transport efficiency, minimizing vehicle waiting times and emissions, and achieving environmental protection goals (Tsiulin et al., 2020; Heilig et al., 2017). Heikkilä et al. (2022) propose four developmental pathways—fragmented innovation, port ecosystem, logistics chain alliance, and global closed platform—to explore the evolution of smart ports, with a comparative focus on automation, sustainability, and collaboration. Yen et al. (2023) identify the key factors influencing smart port design across the dimensions of automation, environmental impact, and intelligence. Hsu et al. (2024) employ the Analytic Hierarchy Process (AHP) in conjunction with the DEMATEL method to systematically assess the key indicators of intelligent port service quality and to elucidate their underlying causal interrelationships. The authors determine that the success of intelligent ports depends on the assurance of accurate and secure cargo delivery, the facilitation of efficient electronic document exchange, the minimization of ship turnaround times, the streamlining of logistics and customs processes, and the application of big data analytics to improve container transportation optimization.

2. Relevance of environmental pollution to employee health

Research indicates that air pollutants in port environments pose a direct threat to employee health (Clemente et al., 2021). Pollutants such as particulate matter, nitrogen oxides, and sulfur oxides have been shown to substantially elevate the risk of respiratory and cardiovascular diseases (Argüello, 2020; Vrignat et al., 2022;). Port workers, particularly those subjected to prolonged exposure in highly polluted environments, are especially susceptible to the adverse health effects of these substances (García-Onetti et al., 2021; Alamoush et al., 2022). The

operational environment within ports is inherently complex, with pollution sources extending beyond maritime emissions to include activities such as cargo handling and vehicular transportation (Argüello, 2020). Thus, effective air quality monitoring and pollution control measures are critical to mitigating these health risks.

In recent years, technologies such as intelligent air monitoring systems and health monitoring and early warning systems have enabled ports to better track pollutant concentrations and respond swiftly to health risks. These systems provide real-time air quality data and integrate it with employees' health status to issue timely alerts, facilitating the implementation of effective health protection measures. For instance, Caballini and Paolucci (2022) proposed a risk-awareness-based mixed-integer programming model to optimize work shift scheduling in maritime container terminals, aiming to minimize worker risks while enhancing task allocation efficiency. Their findings showed that this approach reduced maximum monthly worker risk by 33.9%, demonstrating its broad applicability in port environments.

In addition to air pollution, a range of occupational hazards within port environments poses substantial threats to employee health and safety. Workers are routinely exposed to chemical, physical, and psychological risks associated with production technologies, operational settings, and labor processes. These risks include exposure to hazardous substances, extreme temperatures, noise, and high stress levels (Wang et al., 2017). A thorough understanding of these occupational hazards, combined with systematic hazard identification, risk assessment, and the implementation of targeted preventive measures, is essential for ensuring the protection of employee health in port environments.

Furthermore, the evolution of port operations, particularly the shift to containerization, has introduced additional workplace risks. For example, at the Genoa port, the rapid increase in container traffic significantly altered workforce composition and job tasks, leading to a notable rise in occupational injuries,

especially among inexperienced workers (Fabiano et al., 2010). Over two decades, the frequency index of injuries more than doubled, underscoring the need for improved safety protocols and training programs to address the risks posed by technological advancements and evolving job demands.

Innovative approaches such as the risk assessment framework proposed by Gul (2020) and the preventive measures summarized by Wang et al. (2017) offer practical solutions for mitigating occupational hazards. Gul's methods, which integrate fuzzy AHP and VIKOR techniques, provide a systematic approach to evaluating and prioritizing risks, while Wang et al.'s comprehensive hazard identification strategies emphasize the importance of addressing both physical and systemic safety factors. Together, these approaches deliver strong theoretical and practical support for improving employee health and safety in port environments. By integrating air quality management with comprehensive occupational hazard mitigation and leveraging advanced risk assessment and monitoring technologies, ports can better protect their workers' health while achieving greater operational efficiency.

3. Theory development and critical success factors

The RBV and ST provide essential theoretical foundations for analyzing the key drivers of digital technologies in the transformation of ports toward sustainable development. RBV asserts that a firm's competitive advantage stems from its ability to acquire and utilize rare, inimitable, and non-substitutable resources (Khanra et al., 2022). In recent years, RBV has gradually expanded into the field of green technology and sustainable development, serving as a crucial instrument for analyzing how companies can attain environmental and social benefits through resource integration (Gerhart et al., 2021). In port operations, electrified equipment, shore power systems, solar and wind power supply systems,

multi-pollutant monitoring and data analysis systems, and digital implementation platforms for international green port standards are regarded as key strategic resources. These technological resources not only improve environmental governance capabilities by reducing carbon emissions and air pollution but also substantially bolster the international competitiveness of ports in environmental governance. For example, the shore power system effectively diminishes auxiliary engine emissions by supplying clean electricity to moored ships, significantly improving air quality in the port area and thereby mitigating adverse effects on employee health (Khanra et al., 2022; Zhang et al., 2021). Similarly, solar and wind energy supply systems offer sustainable energy options for ports, reducing reliance on traditional power grids while improving the stability of energy supply. Additionally, multi-pollutant monitoring and data analysis systems furnish decision-makers with refined pollution control support via real-time data collection and analysis. Simultaneously, the digital implementation platform for international green port standards augments the environmental governance efficiency and international competitiveness of ports by integrating green technologies and standardization frameworks. Furthermore, the integration of these digital technologies has established imitable green competitive barriers, which have not only augmented the operational efficiency of the port but also bolstered its comprehensive advantages in environmental governance and employee health protection (Khanra et al., 2022; Freeman et al., 2020; Guibing et al., 2021). Therefore, RBV underpins this study, demonstrating how these technological resources can serve as core resources in port operations to advance the dual goals of environmental protection and health protection (Khanra et al., 2022).

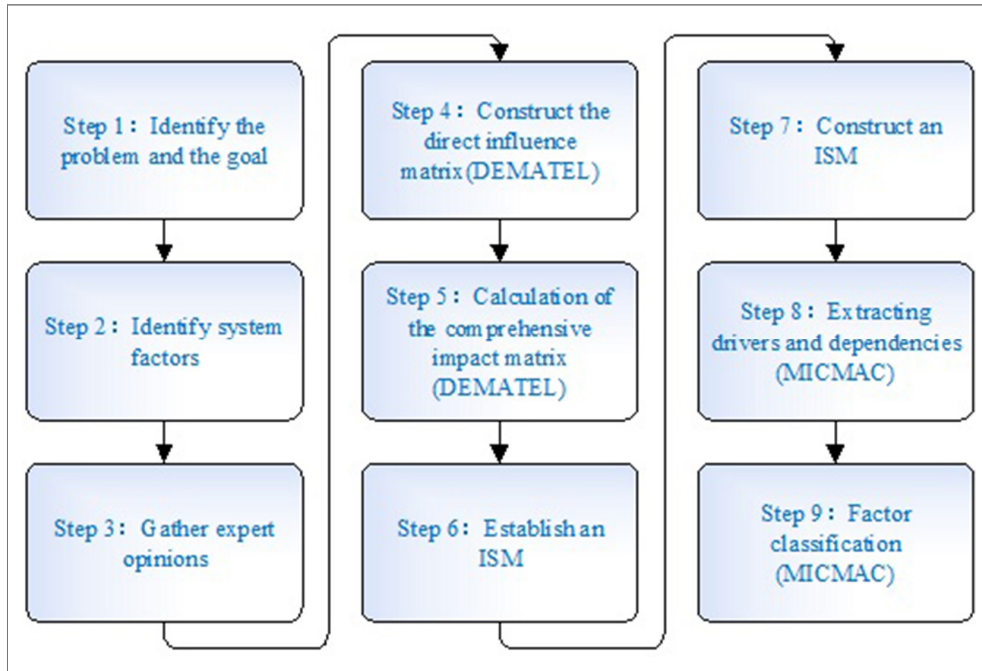
ST asserts that firms must not only meet shareholder interests but also balance the needs of other stakeholders (Freeman et al., 2020). As the concept of corporate social responsibility evolves, the application of this theory in green port management is becoming more prevalent (Barney et al., 2020). Within the context

of environmental governance and health protection in port settings, key stakeholders encompass employees, governmental authorities, supply chain partners, customers, and local communities (Dmytriiev et al., 2021). This theoretical perspective provides a framework for examining how digital technologies facilitate multi-party collaboration through the balancing of interests. For example, occupational health monitoring and early warning systems and intelligent occupational disease risk assessment systems provide real-time health monitoring and risk assessment support for employees via digital platforms, thereby enhancing employees' trust in health protection measures and effectively reducing the incidence of occupational diseases. Simultaneously, air filtration and purification systems have significantly enhanced the working environment by diminishing the direct impact of environmental pollution on employees. Additionally, policy incentives and tools such as a digital pollution management system have enabled the port to comply with regulatory requirements while bolstering stakeholders' trust in the transparency of port operations. Freeman et al. (2020) demonstrate that the application of these digital technologies has facilitated effective collaboration between the port and stakeholders in addressing environmental pollution and jointly promoting the sustainable development of green ports. An ST approach offers a better understanding of how digital technologies can balance the needs of multiple parties and guarantee the comprehensive benefits of ports in terms of environmental pollution control and employee health protection (Hörisch et al., 2020).

III. Research methodology

Figure 1 illustrates the flowchart of the research framework, outlining the detailed procedural steps of the DEMATEL-ISM-MICMAC methodology.

〈Figure 1〉 Overall research process map



1. Selection of key factors and expert survey

At the initial stage of the study, a systematic literature review was conducted to identify research on the application of digital technologies in environmental governance and employee health protection within port environments. This review utilized academic databases including Google Scholar, Web of Science, SCOPUS, IEEE Xplore, SpringerLink, and Elsevier's ScienceDirect. To ensure a comprehensive understanding of current advancements, international regulations, policies, and technical standards were also examined. Subsequently, pre-interviews were conducted with four senior experts in port management and logistics, each with over 15 years of professional experience in port operations, environmental governance, and occupational health. The experts were affiliated with Hanyang University, Kyung Hee University, and the Ministry of Oceans and Fisheries of

Korea. Their expertise ensured that the evaluation of the scientific validity and practical relevance of the initially identified 18 key success factors was both rigorous and practice-oriented. Based on their consensus, these 18 key success factors were confirmed (see Table 1).

◀Table 1◀ Critical success factors

Code	CSFs	Definition	Resource-Based View (RBV)	Stakeholder Theory (ST)
S1	Electrified Port Equipment	Electrification of port cranes, vehicles, and other machinery to reduce reliance on fossil fuels and reduce greenhouse gas emissions. Digital systems enable energy consumption monitoring and optimization.	√	
S2	Shore Power System Application	Implementation of shore power systems to supply electricity to docked vessels, reducing emissions from auxiliary engines and improving air quality in port areas.	√	√
S3	Solar and Wind Power Supply Systems	Deployment of renewable energy sources, such as solar panels and wind turbines, integrated with digital energy management platforms to optimize clean energy usage in ports.	√	√
S4	Intelligent Operation Scheduling System	Digital platforms for optimizing port operations, reducing idle time for equipment and vehicles, and enhancing energy efficiency through real-time scheduling.	√	√
S5	Automated Storage and Cargo Handling Systems	Automation of warehousing and cargo handling supported by digital systems to streamline processes, reduce energy use, and minimize human exposure to hazardous environments.	√	√
S6	Remote Operation and Automated Equipment Management Systems	Digitalized remote control systems for managing automated port equipment, improving safety, and mitigating operational risks.	√	
S7	Multi-Pollutant Monitoring and Data Analysis Systems	Digital systems for real-time monitoring and analysis of air, water, and soil pollutants to guide targeted pollution control measures.	√	√
S8	Digitalized Air Filtration and Purification Systems	Smart filtration systems integrated with sensors and digital platforms to improve air quality by removing pollutants effectively.	√	
S9	Smart Technology Application Regulatory Platform	Digital platforms to oversee and regulate the application of intelligent technologies in port operations, ensuring compliance with safety and environmental standards.	√	√
S10	Carbon Footprint Tracking and Optimization Platform	Digital tools to calculate, monitor, and reduce carbon emissions from port operations, supporting sustainability goals.	√	√

Code	CSFs	Definition	Resource-Based View (RBV)	Stakeholder Theory (ST)
S11	Occupational Health Monitoring and Early Warning Systems	Digital systems for tracking employees' health indicators and providing early warnings for potential occupational hazards.		✓
S12	Smart Occupational Disease Risk Assessment System	Digital platforms for evaluating and predicting occupational disease risks, enabling proactive management.	✓	✓
S13	Employee Health Digital Records System	Centralized digital records of employees' health data to track trends, support personalized interventions, and facilitate efficient healthcare delivery.		✓
S14	Pollutant Source Digital Management System	Application of digital tools to identify, monitor, and manage pollution sources, enabling better control and mitigation strategies.	✓	✓
S15	Digital Implementation Platform for International Green Port Standards	Development of digital tools to implement and monitor adherence to international standards for green ports.	✓	✓
S16	Localization of International Green Port Standards	Tailored digital solutions for adapting and implementing global green port standards to local contexts.	✓	✓
S17	Collaborative Platforms With External Medical Systems	Digital integration of port health systems with external healthcare providers to ensure timely and efficient medical services.		✓
S18	Green Subsidies and Policy Incentive Mechanisms	Digital tools to manage and promote government subsidies and incentives for green port technologies and practices.		✓

Source: Mueller et al., 2023; Castellano et al., 2020; Progiou et al., 2021; Nogué-Algueró, 2020; Sornn-Friese et al., 2021; Merico et al., 2021; Fameli et al., 2020; Cammin et al., 2020; Nunes et al., 2020; Clemente et al., 2021; Argüello, 2020; García-Onetti et al., 2021; Alamoush et al., 2022; Caballini and Paolucci, 2022; Gul, 2020; Li et al., 2024; Guibing et al., 2021; Khanra et al., 2022; Zhang et al., 2021; Dmytriyev et al., 2021; Hörisch et al., 2020; Tsiulin et al., 2020; Heikkilä et al., 2022; Yen et al., 2023; Yang et al., 2024; Natalucci, 2019; Jiang et al., 2024; Zhang et al., 2024; Progiou et al., 2021; Zhang et al., 2019; Jia & Cui, 2021; Zarbakhshnia & Ma, 2024)

In the second phase of the investigation, more than 100 maritime institutions in South Korea were involved, leading to the identification of 56 potential collaborative partners. Following correspondence via email, 16 institutions expressed affirmative interest, with 27 subject matter experts affirming their willingness to contribute to the research. Ultimately, owing to schedule conflicts with some experts, a total of 20 experts with over 7 years of industry experience completed the survey (see Table 2).

◀Table 2◀ Expert demographics

Profile Information	Number of Respondents	Percentage (%)
Sex Distribution		
Male	14	70
Female	6	30
Work Experience		
7–10 years	6	30
11–15 years	10	50
16+ years	4	20
Sector of Employment		
Shipping Companies	12	60
Port Authorities	4	20
Logistics Providers	4	20
Job Role		
Senior Leadership	8	40
Mid-level Management	6	30
Technical/Operations	6	30
Total Respondents=20		

The investigation gathered expert insights using a multifaceted approach that included email correspondence, in-depth interviews, and structured questionnaires. Initially, data collection was conducted via a matrix completion technique; however, some experts encountered challenges with the intuitive alignment of codes and corresponding names, which compromised the ease and precision of the data entry process. Therefore, the research team optimized the questionnaire by converting it to a Likert scale format with detailed concept descriptions (Feng and Ma, 2020) to simplify the filling process and improve data reliability. Twenty questionnaires were distributed, with a 100% response rate. After screening, one questionnaire was invalidated because of the obvious diagonal distribution of the scores, resulting in the final count of 19 valid questionnaires. Table 3 presents an example of one of the expert's scores.

〈Table 3〉 Standardized questionnaire completed by an expert

Factors	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
S1	0	3	4	4	1	0	2	2	0	4	3	1	2	1	4	3	0	0
S2	4	0	1	1	3	1	0	3	0	4	1	4	1	1	1	0	3	4
S3	0	2	0	0	2	0	2	0	3	1	2	0	1	4	0	4	4	0
S4	1	2	0	0	2	3	1	3	0	2	4	0	2	4	0	2	2	1
S5	0	1	1	3	0	4	1	4	0	3	1	4	3	1	4	3	1	0
S6	3	1	2	0	0	0	0	2	4	2	2	0	2	3	4	0	2	3
S7	4	4	1	1	1	3	0	2	1	4	1	4	3	1	1	3	1	4
S8	0	2	2	1	1	1	2	0	2	0	0	1	1	0	2	3	1	0
S9	3	1	1	3	2	3	1	2	0	1	2	4	4	3	2	4	2	3
S10	4	0	0	3	3	0	1	1	4	0	3	3	0	0	2	3	3	4
S11	4	3	3	1	3	4	3	3	0	3	0	0	0	2	1	0	2	4
S12	2	3	3	4	0	0	0	0	3	0	2	0	0	2	0	3	1	2
S13	2	4	2	0	0	1	4	1	3	4	2	0	0	3	2	2	3	2
S14	4	0	2	2	4	0	1	1	2	1	3	2	3	0	0	4	1	4
S15	1	3	3	4	1	0	1	2	0	1	4	1	0	3	0	1	1	1
S16	4	4	1	2	0	2	1	0	4	0	4	3	4	2	2	0	4	4
S17	0	4	3	2	4	0	3	0	4	1	0	0	3	4	1	2	0	0
S18	2	4	4	1	0	3	4	3	3	2	3	1	3	0	3	3	1	2

2. DEMATEL-ISM-MICMAC method

In the third phase, the DEMATEL-ISM-MICMAC methodology was employed to analyze how digital technologies mitigate health impacts from port-related air pollution. This method was selected over alternatives such as the Analytic Hierarchy Process (AHP), Analytic Network Process (ANP), fuzzy logic, and Structural Equation Modeling (SEM), owing to its superior capacity for analyzing complex systems and effectively addressing information uncertainty (see Table 4).

〈Table 4〉 Comparison of the DEMATEL–ISM–MICMAC integrated method with traditional methods

Model	Application area	Advantages	Disadvantages	Complexity of calculation	Applicability
DEMATEL–ISM	System analysis, evaluation of critical success factors	Can reveal cause–effect relationships and hierarchical structures, suitable for analyzing complex systems	Highly dependent on input data, and the results may be subjective	Medium	High
Analytic Network Process	Decision support, multi-criteria decision making	Considers the interactions between decision-making factors, suitable for complex decision-making issues	Complex model construction and calculation and high requirements for decision-makers' expertise	High	Medium
Analytic Hierarchy Process	Single-objective decision-making, multi-criteria decision-making	Simple to use, with a clear structure, suitable for hierarchical issues	Unable to deal with the interaction between factors and highly dependent on subjective weights	Low	High
Fuzzy Logic	Fuzzy decision-making, fuzzy control	Handles ambiguity and uncertainty, suitable for complex, non-linear systems	Complex rule setting and adjustment, and highly dependent on parameters in practical applications	Medium	High
Fuzzy DEMATEL	System analysis, uncertainty analysis	While dealing with cause–effect relationships, it combines fuzzy logic to quantify uncertainty	The model is complex, and the results may be less interpretable	High	High
Structural Equation Modeling	Causal research, analysis of relationships between variables	Simultaneously analyzes the relationships between multiple variables and can verify theoretical models	Data requirements are high, and interpretation of results requires a certain level of statistical and modeling knowledge	High	Medium
DEMATEL–ISM–MICMAC	System analysis, evaluation of critical success factors, strategic planning, policy formulation, optimization of complex systems	Integrates causal relationship analysis (DEMATEL), hierarchical structure decomposition (ISM), and driving-dependence analysis (MICMAC) to systematically reveal the complex relationships between factors such as strategic planning, policymaking, and optimization of complex systems	Data dependency is high, and results may be subjectively influenced by expert opinion	High	High

The DEMATEL-ISM-MICMAC integrated approach provides a robust framework for analyzing complex systems, especially in strategic contexts . DEMATEL quantifies causal relationships, simplifying the analysis of systems with limited data (Ebrahimi et al., 2024; Yorulmaz et al., 2022; Gan et al., 2022; Braga et al., 2021; Mubarik et al., 2021). ISM builds on this by converting the direct relationship matrix into a multi-level hierarchical structure, revealing dependencies and influence paths between elements, thereby assisting decision-makers in prioritizing key drivers and strategic planning(Wang et al., 2018; Shakerian et al., 2019). MICMAC further refines the analysis by categorizing elements based on their driving forces and interdependencies, enabling differentiated management strategies and identifying high-impact factors for system optimization (Agarwal et al., 2023). This comprehensive approach provides a multi-perspective analysis of complex systems, facilitating the mitigation of port environmental pollution's impact on employee health through digital technology. Recent applications of DEMATEL-related methods in maritime research are delineated in Table 5.

〈Table 5〉 Recent studies incorporating the DEMATEL method

Author	Industry	Method	Number of factors
Wan et al., 2021	Shipping	Fuzzy DEMATEL	10
Kuzu, 2021	Shipping	Fuzzy DEMATEL	18
Kuzu et al., 2023	Shipping	Fuzzy DEMATEL	18
Feng et al., 2024	Manufacturing	DEMATEL-ISM-MICMAC	19
Sheykhani et al., 2024	Service	Fuzzy-DEMATEL-ISM-MICMAC	16

3. DEMATEL-ISM-MICMAC Calculation Procedure

This study adopts an integrated DEMATEL-ISM-MICMAC approach to systematically identify and analyze the interrelationships and hierarchical structure of the CSFs involved in port environmental pollution control and employee health protection. The procedure begins with the construction of a direct influence

matrix, based on expert evaluations of pairwise influence between factors. In this matrix, each element represents the degree to which factor influences factor, with the diagonal elements set to zero, indicating no self-influence.

To ensure numerical stability and facilitate further calculations, the matrix is normalized using the row maximum method, generating the normalized matrix as follows:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\max_i \sum_{j=1}^n a_{ij}}$$

Subsequently, both the direct and indirect effects among factors are captured by computing the total influence matrix, using a geometric series expansion:

$$T = B(I - B)^{-1}$$

where I is the identity matrix. The element t_{ij} denotes the overall influence that factor j exerts on factor i across the system.

From matrix T , the core attributes of each factor are derived. The influence degree defined as the sum of the i -th row in matrix T , quantifies the total impact exerted by factor i on the system. Conversely, the influenced degree obtained from the sum of the i -th column, represents the total influence received by factor i . The centrality, indicating the systemic importance of a factor, is computed as $C_i = \frac{1}{2}(I_i + F_i)$, while the causality (or cause degree), distinguishing driving versus result factors, is given by $C_i = \frac{I_i - F_i}{I_i + F_i}$. To determine the relative importance of each factor, the centrality values are normalized to produce the weights:

$$w_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$$

These metrics form the basis for constructing the causal diagram, where each factor is plotted on a two-dimensional graph with centrality as the x -axis and causality as the y -axis, thereby visually representing the system's structure of interactions.

To further explore the hierarchical relationships among factors, the study

proceeds with Interpretive Structural Modeling (ISM). The total influence matrix is first augmented with the identity matrix to yield the overall influence matrix . A threshold value, typically the average of the elements in, is then applied to transform into a binary reachability matrix, where:

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } h_{ij} \geq \lambda \\ 0, & \text{if } h_{ij} < \lambda \end{cases}$$

Based on matrix, the reachability set, the antecedent set , and their intersection are computed for each factor. A factor satisfying is identified as a top-level factor. This factor is then removed from the matrix, and the process is repeated iteratively to determine the full multi-level hierarchical structure of the system.

Finally, MICMAC analysis is employed to assess the driving power and dependence of each factor. The driving power is computed as the row sum of matrix, representing the extent to which a factor influences others. The dependence is calculated as the column sum, reflecting how much a factor is influenced by others. These values are used to create a two-dimensional driving-dependence diagram, where factors are distributed across four quadrants: autonomous factors (low driving, low dependence), linkage factors (high driving, high dependence), independent drivers (high driving, low dependence), and dependent outcomes (low driving, high dependence). This analysis enables a clear identification of core drivers, dependent variables, and the structural stability of the governance framework. Thereby supporting evidence-based strategic planning.

IV. Results and Discussion

1. Results and discussion of the DEMATEL method

First, the comprehensive influence matrix was computed according to the formula (Table 6).

◀Table 6▶ Comprehensive impact matrix

Factors	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
S1	0.1464	0.2166	0.2116	0.1879	0.1878	0.1807	0.2299	0.2435	0.1601	0.1971	0.1803	0.1558	0.2324	0.2855	0.2140	0.2080	0.2520	0.1728
S2	0.1484	0.1211	0.2109	0.1001	0.0993	0.1812	0.1156	0.1243	0.1653	0.2203	0.1797	0.1468	0.1238	0.2425	0.1215	0.1859	0.1862	0.0987
S3	0.0921	0.1790	0.1103	0.1204	0.1387	0.0872	0.1306	0.1149	0.1324	0.1158	0.1380	0.0956	0.1556	0.1674	0.0818	0.1821	0.1098	0.1299
S4	0.1030	0.0933	0.1792	0.0728	0.1355	0.0730	0.1678	0.1523	0.1558	0.1100	0.1054	0.1226	0.1111	0.1181	0.1149	0.0934	0.0941	0.0656
S5	0.1019	0.1262	0.1761	0.1480	0.0887	0.1366	0.1477	0.1701	0.1157	0.1198	0.1314	0.0786	0.1863	0.1793	0.1709	0.1541	0.1930	0.0746
S6	0.1967	0.1682	0.2208	0.1478	0.1803	0.1254	0.1799	0.2125	0.1672	0.2219	0.2248	0.1235	0.1675	0.2711	0.2051	0.2317	0.1637	0.1720
S7	0.1820	0.1775	0.2053	0.1153	0.1141	0.1201	0.1051	0.1754	0.1234	0.1473	0.1544	0.1454	0.1139	0.2092	0.0966	0.1999	0.1263	0.1318
S8	0.1169	0.0813	0.1276	0.0904	0.0910	0.1343	0.0844	0.0862	0.0919	0.0941	0.1253	0.0598	0.1455	0.1506	0.1157	0.1074	0.1489	0.0615
S9	0.1878	0.1575	0.1908	0.1354	0.1361	0.1009	0.1748	0.1276	0.1036	0.2086	0.1145	0.1049	0.1998	0.2364	0.1388	0.1236	0.1857	0.0865
S10	0.1297	0.1353	0.1866	0.0988	0.0994	0.0863	0.1082	0.1783	0.1106	0.1075	0.0975	0.0688	0.1802	0.2054	0.0812	0.1415	0.1277	0.1104
S11	0.1435	0.1743	0.1887	0.1893	0.1509	0.1557	0.1877	0.1842	0.1219	0.2097	0.1349	0.1586	0.1883	0.2546	0.1739	0.1626	0.1838	0.1609
S12	0.1064	0.1927	0.1257	0.0939	0.1285	0.1406	0.1418	0.1738	0.1383	0.1743	0.1731	0.0829	0.1109	0.2120	0.1358	0.1605	0.1679	0.1637
S13	0.1740	0.1585	0.1544	0.1015	0.1380	0.1661	0.1565	0.1669	0.1629	0.1965	0.1795	0.1063	0.1231	0.2240	0.1461	0.1649	0.1717	0.0915
S14	0.1693	0.1400	0.2126	0.1781	0.1381	0.1751	0.1577	0.2251	0.1983	0.2361	0.2130	0.1210	0.1674	0.1858	0.1795	0.1652	0.2291	0.1627
S15	0.2132	0.2207	0.1838	0.1813	0.1571	0.1875	0.2198	0.2106	0.1450	0.2026	0.2227	0.1119	0.1454	0.2520	0.1240	0.2119	0.2346	0.1280
S16	0.1731	0.1856	0.1782	0.1396	0.1223	0.1627	0.1590	0.1275	0.1678	0.2224	0.1779	0.1339	0.1667	0.1888	0.1045	0.1299	0.1894	0.1341
S17	0.0952	0.1391	0.1117	0.0970	0.0987	0.1299	0.1521	0.1269	0.0909	0.1953	0.1232	0.1324	0.1755	0.1933	0.1024	0.1650	0.1040	0.0770
S18	0.1395	0.1913	0.1427	0.1289	0.1273	0.0975	0.1055	0.1314	0.1391	0.2105	0.1266	0.1232	0.1353	0.1873	0.1104	0.1942	0.2026	0.0788

Subsequently, the multiple attributes of the 18 factors (C1 to C28) were systematically detailed, encompassing their influence on other factors, degree of influence, centrality, rationality, weight, as well as their rankings and attribute classifications (i.e., causal or resultant factors) within the analysis framework (see Table 7 for details).

◀Table 7▶ Results of Factor Analysis: Influence, Centrality, and Weighted Ranking

Factor	Influence	Affected	Centrality	Cause	Weight	Sort	Factor attributes
S1	3.66231	2.61896	6.28127	1.04335	0.06401	2	Cause factor
S2	2.77124	2.85812	5.62936	-0.08688	0.05737	7	Result factor
S3	2.2816	3.11668	5.39828	-0.83508	0.05501	10	Result factor
S4	2.06762	2.32626	4.39388	-0.25864	0.04478	18	Result factor
S5	2.49893	2.33166	4.83059	0.16727	0.04923	15	Cause factor
S6	3.38018	2.44068	5.82086	0.9395	0.05932	5	Cause factor
S7	2.64288	2.72407	5.36695	-0.08119	0.05469	12	Result factor
S8	1.91288	2.9313	4.84418	-1.01842	0.04937	14	Result factor

Factor	Influence	Affected	Centrality	Cause	Weight	Sort	Factor attributes
S9	2.713	2.49013	5.20313	0.22287	0.05303	13	Cause factor
S10	2.25304	3.18972	5.44276	-0.93668	0.05547	9	Result factor
S11	3.12331	2.80205	5.92536	0.32126	0.06039	3	Cause factor
S12	2.62275	2.072	4.69475	0.55075	0.04784	16	Cause factor
S13	2.78221	2.82867	5.61088	-0.04646	0.05718	8	Result factor
S14	3.25408	3.76332	7.0174	-0.50924	0.07151	1	Result factor
S15	3.35196	2.41674	5.7687	0.93522	0.05879	6	Cause factor
S16	2.86344	2.98174	5.84518	-0.1183	0.05957	4	Result factor
S17	2.30953	3.07029	5.37982	-0.76076	0.05483	11	Result factor
S18	2.57188	2.10044	4.67232	0.47144	0.04762	17	Cause factor

After systematically analyzing the 18 key success factors for environmental pollution control and employee health protection in ports and combining the weight and centrality of each factor in Table 5, the four most important core factors are identified. They are as follows: Pollutant Source Digital Management System (S14, weight 0.07151, centrality 7.0174), Electrified Port Equipment (S1, weight 0.06401, centrality 6.28127), Occupational Health Monitoring and Early Warning Systems (S11, weight 0.06039, centrality 5.92536), and Localization of International Green Port Standards (S16, weight 0.05957, centrality 5.84518). These factors play a central role in the system with their significant weights and centralities and serve as key drivers of the green transformation of ports and the protection of employee health.

S14 is the central driver in the system, with a weight of 0.07151 and a centrality of 7.0174, thus establishing its prominent position in the system. The core function of S14 is to comprehensively and, in real-time, digitally monitor the primary sources of pollution in the port and its surrounding areas. This monitoring method aids managers in accurately locating pollution sources, optimizes pollution control strategies, and provides a basis for scientific decision-making (Argüello, 2020; Puig et al., 2020; Gul, 2020; García-Onetti et al., 2021). Furthermore, by integrating multidimensional environmental data, S14 plays a vital role in

synergizing with other health management and environmental governance measures. For example, it can support the implementation of health monitoring systems (such as S11) and provide environmental data support for precision health interventions.

S1 constitutes a key factor in advancing environmental governance in ports, ranking second with a weight of 0.06401 and a centrality value of 6.28127. The core value of S1 is demonstrated by the replacement of traditional fuel-powered equipment with electrified alternatives (such as electric cranes and electric vehicles), which markedly diminishes carbon emissions and the generation of air pollutants (Castellano et al., 2020; Zhang et al., 2021; Hörisch et al., 2020). Additionally, S1 also optimizes resource utilization efficiency and reduces energy consumption using a digital energy management system. This multidimensional collaborative governance approach improves the quality of the port environment, directly increases employee comfort, and serves as an important infrastructure for promoting the development of green ports.

S11 monitors the health status of employees in real time, integrates environmental data to preemptively identify potential health risks, and issues early warnings (Gul, 2020; García -Onetti et al., 2021). S11 emerges as a core factor in health management with a weight of 0.06039 and a centrality of 5.92536. Its functions encompass real-time data collection, health risk assessment, and the formulation of personalized health intervention plans. This data-driven management approach has significantly reduced the incidence of occupational diseases while bolstering employee trust and satisfaction, offering a crucial human resources assurance for the port's green transformation.

S16 is a strategic factor in green port governance, with a weight of 0.05957 and a centrality of 5.84518. The main function of S16 is to localize and adapt international green port standards to the actual needs of the port. This process improves the practicality and operability of the standards while also reducing costs

through flexible implementation. Additionally, the implementation of S16 fosters collaboration among multiple stakeholders (such as port managers, governments, and international organizations), providing an institutional guarantee for the port's green transformation.

In addition to the core factors abovementioned, other factors also play a vital supporting role in the system, establishing a multidimensional collaborative health management and environmental governance framework. For example, S10 provides comprehensive carbon emission monitoring and optimization strategies to support ports in attaining efficient carbon emission reduction targets (Dmytriiev et al., 2021; Tsiulin et al., 2020). The multidimensional data analysis capabilities of S10 offer a scientific basis for resource optimization and pollution control, significantly enhancing governance efficiency. Alternatively, S9 provides a vital guarantee for technology promotion and collaboration by improving the transparency and management efficiency of digital technology. S6 significantly diminishes equipment operation risks while improving operational efficiency through intelligent scheduling and real-time monitoring. This system is crucial in high-risk, high-pollution operating scenarios, and its precise management capabilities provide essential technical support for health management and environmental governance. S18 facilitates the widespread adoption of clean technologies and green management measures by providing financial assistance (Dmytriiev et al., 2021; Hörisch et al., 2020; Castellano et al., 2020; Zhang et al., 2021). For example, the promotion of green energy equipment and digital management platforms via incentive mechanisms has effectively lowered the threshold for the popularization of green technologies, hence facilitating the green transformation of ports.

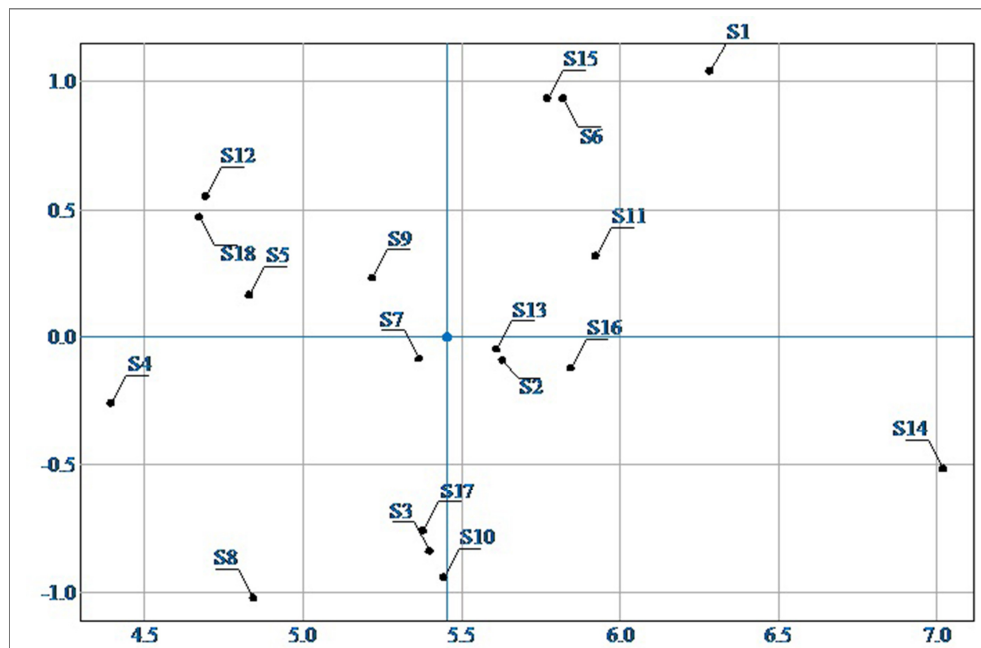
In health management, S13 and S12 provide a scientific basis for personalized health management by comprehensively collecting and analyzing employee health data. These two systems work in synergy with S11 to improve health management efficiency and significantly decrease the incidence of occupational diseases (Zhang

et al., 2024; Yang et al., 2024; Heikkilä et al., 2022). S17 further augments the comprehensive capabilities of the port health management system by integrating with external medical systems.

In pollution control, S7 and S8 extend the real-time monitoring capabilities of pollutants, offering key data support for the formulation of comprehensive control measures. For example, S7 optimizes pollution control strategies by capturing data on pollutants in the air and water using intelligent sensors, whereas S8 further refines the accuracy and efficiency of air quality management. S4 and S5 markedly reduce energy waste and pollution emissions while optimizing the efficiency of port operations (Castellano et al., 2020; Sheykhhan et al., 2024). Through intelligent technology, these systems improve resource utilization and provide operational support for the development of green ports.

The cause-effect relationship is visualized by plotting centrality on the x-axis and causality on the y-axis (Figure 2).

◀Figure 2▶ Centrality-cause degree scatter plot



2. ISM results and discussion

The interrelationships among the system factors were further examined through the construction of the ISM total influence matrix (see Table 8) and the reachability matrix (see Table 9). Based on the reachability matrix, the reachability set, antecedent set, and intersection set for each factor were determined (see Table 10). Thereby elucidating the hierarchical structure and interaction dynamics among the identified factors. This process provided key support for constructing the ISM and revealed the driving paths and dependencies between factors.

〈Table 8〉 Overall impact matrix

Factors	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
S1	1.1464	0.2166	0.2116	0.1879	0.1878	0.1807	0.2299	0.2435	0.1601	0.1971	0.1803	0.1558	0.2324	0.2855	0.2140	0.2080	0.2520	0.1728
S2	0.1484	1.1211	0.2109	0.1001	0.0993	0.1812	0.1156	0.1243	0.1653	0.2203	0.1797	0.1468	0.1238	0.2425	0.1215	0.1859	0.1862	0.0987
S3	0.0921	0.1790	1.1103	0.1204	0.1387	0.0872	0.1306	0.1149	0.1324	0.1158	0.1380	0.0956	0.1556	0.1674	0.0818	0.1821	0.1098	0.1299
S4	0.1030	0.0933	0.1792	1.0728	0.1355	0.0730	0.1678	0.1523	0.1558	0.1100	0.1054	0.1226	0.1111	0.1181	0.1149	0.0934	0.0941	0.0656
S5	0.1019	0.1262	0.1761	0.1480	1.0887	0.1366	0.1477	0.1701	0.1157	0.1198	0.1314	0.0786	0.1863	0.1793	0.1709	0.1541	0.1930	0.0746
S6	0.1967	0.1682	0.2208	0.1478	0.1803	1.1254	0.1799	0.2125	0.1672	0.2219	0.2248	0.1235	0.1675	0.2711	0.2051	0.2317	0.1637	0.1720
S7	0.1820	0.1775	0.2053	0.1153	0.1141	0.1201	1.1051	0.1754	0.1234	0.1473	0.1544	0.1454	0.1139	0.2092	0.0966	0.1999	0.1263	0.1318
S8	0.1169	0.0813	0.1276	0.0904	0.0910	0.1343	0.0844	1.0862	0.0919	0.0941	0.1253	0.0598	0.1455	0.1506	0.1157	0.1074	0.1489	0.0615
S9	0.1878	0.1575	0.1908	0.1354	0.1361	0.1009	0.1748	0.1276	1.1036	0.2086	0.1145	0.1049	0.1998	0.2364	0.1388	0.1236	0.1857	0.0865
S10	0.1297	0.1353	0.1866	0.0988	0.0994	0.0863	0.1082	0.1783	0.1106	1.1075	0.0975	0.0688	0.1802	0.2054	0.0812	0.1415	0.1277	0.1104
S11	0.1435	0.1743	0.1887	0.1893	0.1509	0.1557	0.1877	0.1842	0.1219	0.2097	1.1349	0.1586	0.1883	0.2546	0.1739	0.1626	0.1838	0.1609
S12	0.1064	0.1927	0.1257	0.0939	0.1285	0.1406	0.1418	0.1738	0.1383	0.1743	0.1731	1.0829	0.1109	0.2120	0.1358	0.1605	0.1679	0.1637
S13	0.1740	0.1585	0.1544	0.1015	0.1380	0.1661	0.1565	0.1669	0.1629	0.1965	0.1795	0.1063	1.1231	0.2240	0.1461	0.1649	0.1717	0.0915
S14	0.1693	0.1400	0.2126	0.1781	0.1381	0.1751	0.1577	0.2251	0.1983	0.2361	0.2130	0.1210	0.1674	1.1858	0.1795	0.1652	0.2291	0.1627
S15	0.2132	0.2207	0.1838	0.1813	0.1571	0.1875	0.2198	0.2106	0.1450	0.2026	0.2227	0.1119	0.1454	0.2520	1.1240	0.2119	0.2346	0.1280
S16	0.1731	0.1856	0.1782	0.1396	0.1223	0.1627	0.1590	0.1275	0.1678	0.2224	0.1779	0.1339	0.1667	0.1888	0.1045	1.1299	0.1894	0.1341
S17	0.0952	0.1391	0.1117	0.0970	0.0987	0.1299	0.1521	0.1269	0.0909	0.1953	0.1232	0.1324	0.1755	0.1933	0.1024	0.1650	1.1040	0.0770
S18	0.1395	0.1913	0.1427	0.1289	0.1273	0.0975	0.1055	0.1314	0.1391	0.2105	0.1266	0.1232	0.1353	0.1873	0.1104	0.1942	0.2026	1.0788

〈Table 9〉 Up to 4-Matrix

[illegible]

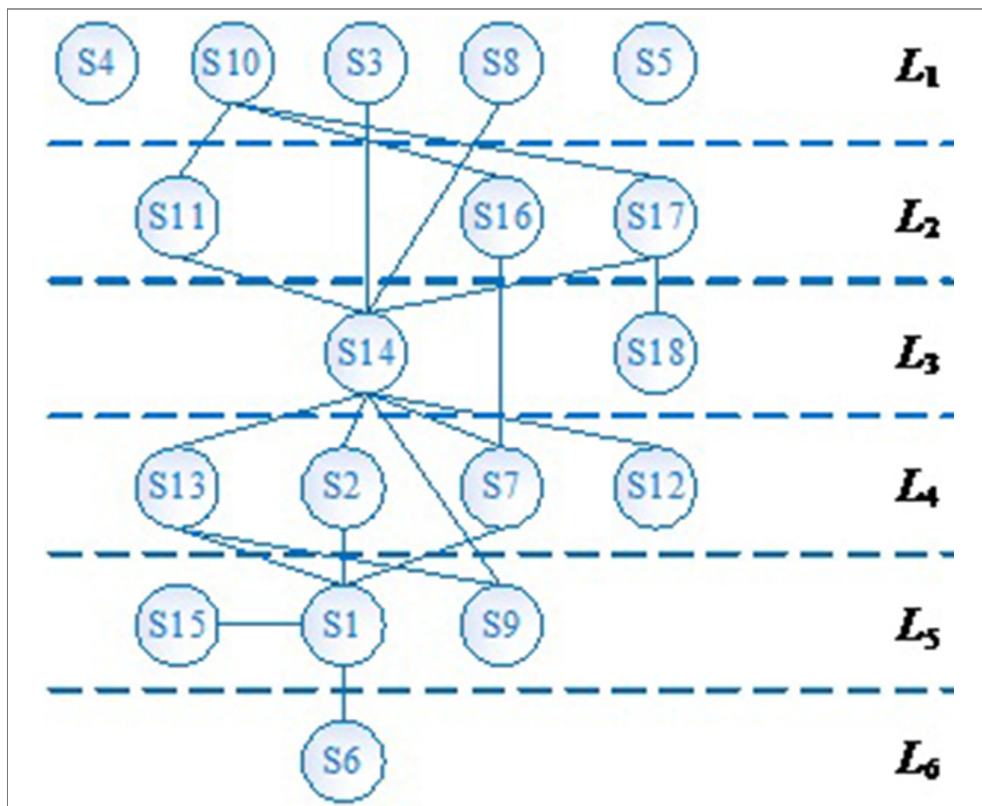
Factors	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
S4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S6	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
S7	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
S10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
S11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
S13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
S14	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0
S15	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0
S16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
S17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
S18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1

◁Table 10▷ Computing the reachability set, antecedent set, and intersection set

Factor S	Reachability Set $R_i = \{f_i F_{ij} = 1\}$	Antecedent Set $S_i = \{f_i F_{ji} = 1\}$	Intersection Set $R_i \cap S_i$
S1	1,2,3,7,8,10,13,14,15,16,17	1,6,15	1,15
S2	2,3,10,14	1,2,15	2
S3	3	1,2,3,6,7,14	3
S4	4	4	4
S5	5	5	5
S6	1,3,6,8,10,11,14,15,16	6	6
S7	3,7,14,16	1,7,15	7
S8	8	1,6,8,14,15	8
S9	9,10,13,14	9,14	9,14
S10	10,14	1,2,6,9,10,11,13,14,15,16,17,18	10,14
S11	10,11,14	6,11,14,15	11,14
S12	12,14	12	12
S13	10,13,14	1,9,13	13
S14	3,8,9,10,11,14,17	1,2,6,7,9,10,11,12,13,14,15	9,10,11,14
S15	1,2,7,8,10,11,14,15,16,17	1,6,15	1,15
S16	10,16	1,6,7,15,16	16
S17	10,17	1,14,15,17,18	17
S18	10,17,18	18	18

Through an in-depth analysis of the reachability sets, antecedent sets, and their intersections, the hierarchical distribution of the various system factors was systematically identified, as illustrated in Figure 3. These findings provided a robust foundation for constructing the hierarchical structure of the system and facilitated a clear delineation of the roles and positions of key factors within the overall framework. Consequently, we employed the ISM method to hierarchically classify key factors and then systematically examined the hierarchical role and functional relationship of these factors in the process of utilizing digital technology to mitigate the impact of environmental pollution in ports on employee health.

〈Figure 3〉 Hierarchical structure of factors (ISM method)



Note: The numbers in the circles represent the 18 key success factors (S1 to S18).

The ISM hierarchy diagram clearly shows the logical path of each factor from the basic layer to the core strategy layer, revealing a hierarchical and synergistically efficient governance system. Every factor at each layer plays a distinct and indispensable role within the system, collaborating to facilitate the achievement of the top-level strategic objectives (Figure 3). S6, as a basic layer factor, is the fundamental component of the entire system. S6 focuses on the basic guarantee of system operation, providing the most basic support for system stability. Above the basic layer, S1, S9, and S15 serve as transitional factors in the middle and lower layers, playing a bridging role. S1 mitigates greenhouse gas emissions and improves energy efficiency via the electrification of port equipment, S9 augments the efficiency and transparency of technological collaboration through a smart technology supervision platform (Tsiulin et al., 2020; Heikkilä et al., 2022; Heilig et al., 2017; Nogué-Algueró, 2020), and S15 consolidates individual health data through a health digital record system to inform decision-making for scientific interventions (Yen et al., 2023; Alamoush et al., 2022). These factors collectively strengthen the system's implementation capabilities and establish a solid foundation for higher-level factors.

In the middle layer, S2, S7, S12, and S13 serve as driving factors, covering key areas, including environmental governance, health protection, and policy incentives. S2 directly improves port air quality by reducing pollution from moored ships via shore power systems, S7's multi-pollutant monitoring system offers data support for scientific governance measures, S12 provides additional support for employee health protection through collaboration with external medical systems, and S13 establishes a scientific basis for managing employee health data through a health digital file system. These drivers directly enhance the operational efficiency of the governance system while offering policy and technical support to higher-level factors. At the intermediate and advanced levels, S14 and S18 function as strategic elements that effectively bridge policy measures with the core

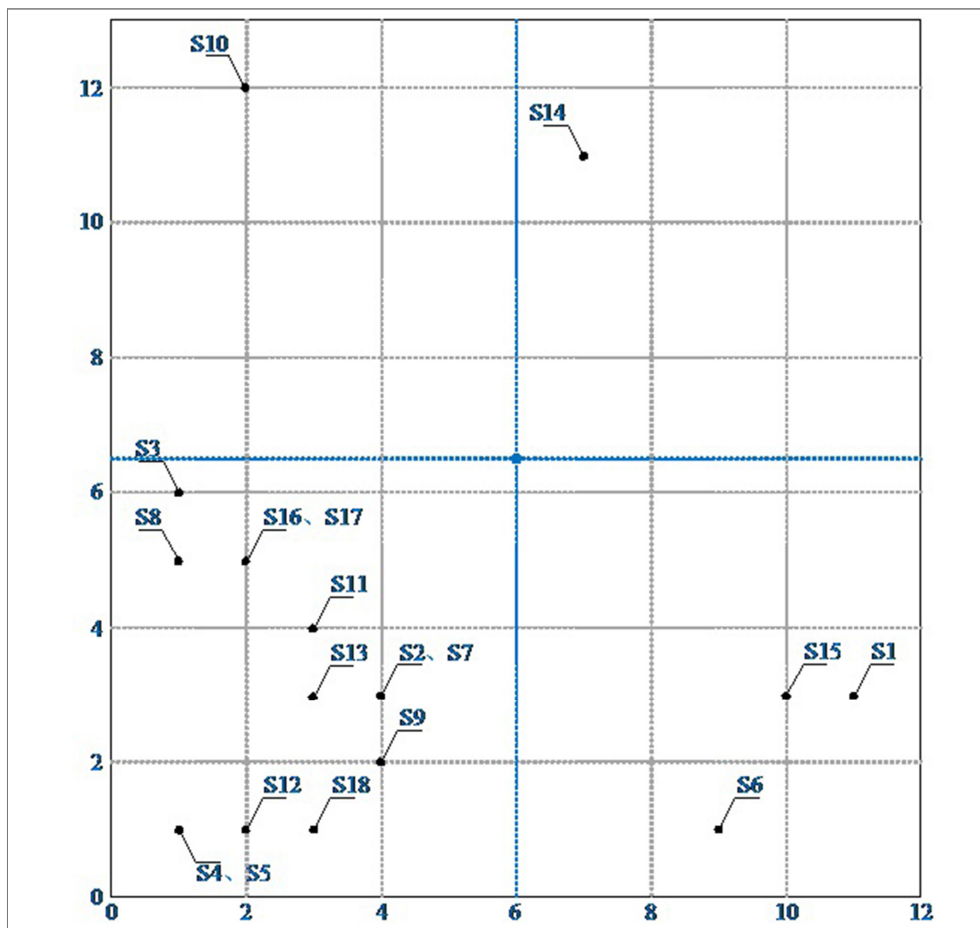
objectives of governance. S14 strengthens the governance capabilities of the system through a digital pollution source management system (Progiou et al., 2021; García -Onetti et al., 2021), whereas S18 promotes the widespread adoption of green management measures through policy incentives (Caballini and Paolucci, 2022; Hörisch et al., 2020; Sornn-Friese et al., 2021). These factors possess a high driving force in the governance system and are crucial in achieving the overall strategic objectives. At a higher level, S11, S16, and S17, as overarching factors, collectively represent resource integration and synergies. S11 facilitates real-time monitoring of employee health status and risk warnings via occupational health monitoring and early warning systems, S16 enhances compliance by advocating the localized application of international green port standards, and S17 offers supplementary support for employee health protection through collaborations with external medical systems. These factors further enhance the resilience and synergy of the port's environmental governance system.

At the top level, S3, S4, S5, S8, and S10 serve as strategic level factors that coordinate and guide the entire governance system. These factors integrate the underlying technologies and middle-level drivers and directly address the core objectives of port governance. For example, S3 markedly diminishes port carbon emissions through a green energy supply system (Merico et al., 2021; Zhang et al., 2024), S8 improves the accuracy and responsiveness of air quality monitoring through a digital air purification system, and S4's intelligent operation scheduling system optimizes operational efficiency and minimizes energy waste (Dmytriiev et al., 2021; Sornn-Friese et al., 2021; Freeman et al., 2020; Hörisch et al., 2020). Additionally, the carbon footprint tracking platform provided by S10 provides vital support for the port's emission management. Through synergy, these top-level factors construct an efficient governance framework that comprehensively supports the strategic goals of the port's green transformation and employee health protection.

3. MICMAC results and discussion

By examining the driving force and dependence relationships among the 18 factors, we plotted a driving force-dependence diagram (Figure 4). In the figure, the abscissa represents the driving force, whereas the ordinate represents the dependence. This analysis illustrates the functional characteristics of each factor within the system, aiding in the identification of key factors that drive system dynamics and weak links that are highly dependent on other factors. It provides data support for optimizing system design and decision-making.

◁Figure 4▷ Driving force-dependency analysis of 18 key factors



The factor in the upper right quadrant (high driving force, high dependence) includes S14, which has a central driving role in the system. S14 integrates multi-source data via a digital pollution source management system to facilitate real-time monitoring and precise governance of pollution sources, which has a significant synergistic and driving effect on other system modules (Puig et al., 2020; Progiou et al., 2021; Alamoush et al., 2022). The high driving force of this factor ensures the technical implementation and policy support of pollution control and health protection, whereas its high dependence reflects its close connection with the underlying support factors. S14's functions are directly related to the attainment of the system's goals, necessitating the prioritization of investing resources to ensure their efficient operation. Factors in the upper left quadrant (high driving force, low dependence) include S10. As an independent technology-driven module, S10 delivers accurate monitoring and data support for port carbon emissions via a carbon footprint tracking and optimization platform (Freeman et al., 2020; Alamoush et al., 2022). It plays a critical role in reducing carbon emissions and optimizing pollution control decisions while also enhancing the autonomy and adaptability of the system. S10's high driving force makes it a core technical guarantee for the development of environmental governance and green technology in ports, whereas its low dependence guarantees its stability and independence in system operation. Factors in the lower right quadrant (low driver, high dependence) include S1, S15, and S7. These factors play a supporting role, and their effectiveness is highly dependent on the support of core drivers. S1's electrification of port equipment directly supports the port's green transformation by decreasing greenhouse gas and noise emissions; however, its further optimization necessitates a combination of policy incentives and technological advancements (Sornn-Friese et al., 2021; Yang et al., 2024). S15 implements international green port standards through digitalization, connecting governance measures with a standardized framework. Its implementation relies on the support of data collection

and analysis modules (such as S14 and S10) (Tsiulin et al., 2020; Clemente et al., 2021). S7, as a multi-pollutant monitoring system, enhances the timeliness and accuracy of pollution control data; nevertheless, its scope of action is limited and requires the collaboration of core driver modules to improve its functions (Heilig et al., 2017; Yang et al., 2024). The factors in the lower left quadrant (low driving force, low dependence) comprise basic support modules, including S3, S8, S16, and S17. These factors have a limited role in the system, but by maintaining the underlying capabilities, they ensure the stability and resilience of the system's operation. S3 offers stable energy support through a clean energy system, establishing a basis for the promotion of green technology. S8, as an air filtration and purification system, enhances the air quality of the working environment and is a key technical support for safeguarding employee health (Natalucci, 2019; Gul, 2020). S16 promotes the operability and practical effectiveness of standard implementation by localizing and adopting international green port standards (Dmytriiev et al., 2021; Hörisch et al., 2020). S17 provides the necessary technical support for the implementation of employee health protection measures through collaboration with external medical systems.

V. Conclusion

The rapid advancement of digital technology has emerged as a critical factor in mitigating the health impacts of environmental pollution in port settings, functioning as a key driver in advancing the green transformation and sustainable development of the port industry. This study systematically examines 18 key success factors that affect the management of port environmental pollution and the protection of employee health through expert evaluation combined with the DEMATEL-ISM-MICMAC method. A comprehensive analytical framework that

integrates RBV and ST is constructed, revealing the complex interactions and synergies among the factors.

The study reveals that Pollutant Source Digital Management System (S14), Electrified Port Equipment (S1), Occupational Health Monitoring and Early Warning Systems (S11), and Localization of International Green Port Standards (S16) are the core key factors of digital technology in mitigating the impact of port environmental pollution on employee health. These factors not only have a high weight and centrality in the system but also serve as the core driving force for its efficient operation. Additionally, the study identified S6 as a core factor in the basic layer that provides a fundamental guarantee of the operational stability of the governance system. The top-level core factors (e.g., Solar and Wind Power Supply Systems (S3), Intelligent Operation Scheduling System (S4), Automated Storage and Cargo Handling Systems (S5), Digitalized Air Filtration and Purification Systems (S8), and Carbon Footprint Tracking and Optimization Platform (S10)) coordinate and lead the strategic direction of the system. Through functions such as green energy supply, intelligent scheduling, and carbon footprint tracking, they strongly promote the realization of the goals of green port transformation and employee health protection. Furthermore, S14 and S10 are significant technological drivers, with innovative digital solutions driving improvements in pollution control efficiency and employee health protection. This study comprehensively reveals the core key factors and synergistic mechanisms of digital technology in mitigating the impact of environmental pollution in ports on employee health. It provides an important theoretical basis and practical guidance for advancing the green transformation of ports and the protection of employee health, as well as serving as a strong reference for the formulation of industry environmental protection policies and the application of digital technology.

1. Theoretical significance

This study investigates the role of digital technology in alleviating the health impacts of environmental pollution in port contexts and offers theoretical contributions from multiple perspectives. Firstly, it substantially enhances the theoretical framework concerning the application of digital technology in port governance by systematically elucidating the synergistic mechanisms through which digital technologies operate within complex systems. Unlike previous studies (e.g., Caballini and Paolucci, 2022; Gul, 2020), which primarily focused on pollution control, efficiency improvement, or health management from a single perspective, this study constructs a comprehensive analytical framework based on 18 key success factors, integrating RBV and ST, to elucidate how digital technology can mitigate the adverse impact of environmental pollution on employee health through multidimensional synergies. This theoretical framework fills the theoretical gap from a multidimensional and systematic perspective, establishing a solid theoretical basis for digital technology to enhance port governance and health protection. Second, this study deepens the understanding of the dual benefits of digital technology in the management of port environmental pollution and employee health protection. This study employs the collaborative application of key technologies, including the Pollutant Source Digital Management System (S14), Electrified Port Equipment (S1), and Occupational Health Monitoring and Early Warning Systems (S11), to elucidate the direct effect of a single technology on pollution control and systematically explore how these technologies can be used in collaboration to optimize employee health protection measures. Particularly, the combination of S14 and S11 facilitates the dynamic linkage from environmental data to health early warning, providing a new theoretical basis for precise governance and health intervention strategies. Additionally, this study expands on the strategic significance of digital technology in port environmental governance.

The ISM hierarchical analysis revealed that top-level strategic factors (such as S14, S1, and S16) play a central leading role in the governance system, systematically coordinating pollution control and employee health protection goals. Unlike existing theoretical frameworks that only focus on single-dimensional issues, this study proposes from a strategic level that the successful application of digital technology necessitates a comprehensive integration of technology, policy, and management, providing an important reference for future complex governance issues in ports. Finally, this study proposes theoretical innovations from a multidisciplinary viewpoint. This study integrates RBV and ST by starting from the internal mechanism of resource allocation and technology application and moving on to discussing the interaction between policy drivers, employee needs, and corporate responsibility through the lens of external collaboration (Dmytriiev et al., 2021; Hörisch et al., 2020). This innovative theoretical framework offers novel insights into understanding the systematic role of digital technology in health protection and pollution control and lays the foundation for theoretical development in related fields.

2. Management applications

This study explores the application of digital technology in mitigating the health impacts of environmental pollution in port environments. It offers managerial recommendations for port operators, governmental bodies, and shipping enterprises aimed at achieving synergistic outcomes between environmental governance and employee health protection. First, port operators should emphasize employee health protection and environmental governance as their core management objectives, prioritizing the deployment of digital technology solutions. For example, the Pollutant Source Digital Management System (S14) can monitor pollution emissions in real time and optimize pollution control strategies; Electrified Port

Equipment (S1) can mitigate greenhouse gas and hazardous substance emissions while improving the operating environment; and the Occupational Health Monitoring and Early Warning Systems (S11) combined with the Employee Health Digital Records System (S13) can accurately identify health risks and formulate personalized interventions. The long-term deployment and optimization of these technologies will significantly improve port operational efficiency while safeguarding employee health. Second, government agencies need to promote the widespread use of digital technology via policy and financial support. Green Subsidies and Policy Incentive Mechanisms (S18) encourage Shore Power System Application (S2) and Solar and Wind Power Supply Systems (S3), thereby reducing dependence on traditional energy sources and mitigating pollution. Additionally, the government can promote the establishment of Localization of International Green Port Standards (S16) and Digital Implementation Platform for International Green Port Standards (S15), standardizing the processes of port environmental governance and health protection. It can concurrently improve governance efficiency through Multi-Pollutant Monitoring and Data Analysis Systems (S7) to provide more scientific policy support for employee health and pollution control. Finally, shipping companies should leverage digital technology and management innovation to attain health protection and pollution control objectives. Remote Operation and Automated Equipment Management Systems (S6) and Automated Storage and Cargo Handling Systems (S5) can optimize work processes, minimize energy waste, and lower pollution emissions. Simultaneously, Occupational Health Monitoring and Early Warning Systems (S11) and Employee Health Digital Records System (S13) can enable companies to proactively manage health risks, increase employee productivity, and diminish losses attributable to health-related issues. These measures can bolster the company's social responsibility in environmental and health governance and augment its competitiveness in port management.

3. Limitations and future research

Our study has certain limitations. First, the extraction and weighting of key success factors mainly rely on expert evaluation methods, which may be influenced by the experts' backgrounds and subjective biases. This limitation may result in the underestimation or overestimation of some key factors in specific contexts. Future research should employ empirical analysis methods based on big data, combined with quantitative assessment of resources based on RBV and multi-stakeholder feedback informed by ST, to verify and refine the reliability and applicability of existing frameworks. Second, this study's theoretical framework focuses on the current effects of digital technology application and lacks the prediction of dynamic changes in technology and the examination of long-term evolutionary laws. For example, the rapid iteration of digital technology may result in different characteristics of resource integration and stakeholder relationships in the future. Future research can employ dynamic system modeling to analyze the evolving significance of key success factors at different time scales, thereby revealing the timeliness of resource utilization in RBV and the dynamic changes in stakeholder needs in ST. Additionally, although this study primarily examines the role of digital technologies in port governance, it inadequately addresses the applicability of different scales, technological maturity, and regional characteristics. Different types of ports exhibit significant differences in resource endowments and stakeholder structures, potentially leading to different implementation paths and effects of digital technologies. Future research should combine specific case studies to investigate how small and medium-sized ports or ports with limited resources can optimize the allocation of key technologies while balancing the benefits of resources against the costs of technology implementation. Finally, this study fails to fully account for the potential impact of external environmental changes on the research results. For example, climate change, fluctuations in

global supply chains, and policy changes may significantly alter the resource requirements and stakeholder dynamics of port governance. Future research should expand the RBV theory to explore the impact of external resource shocks on the integration of technological resources in ports and examine the response mechanisms of multiple parties in an uncertain environment using the ST theory. In summary, this study offers a critical theoretical foundation and practical insights into the role of digital technologies in alleviating the health impacts of environmental pollution in ports, grounded in the frameworks of the RBV and ST. However, future research must further deepen the analysis from a dynamic, diversified, and cross-regional perspective, refine research methods and models, and offer more comprehensive theoretical support and practical solutions for the health protection and sustainable development of the port industry.

References

- Agarwal, R., Bhadauria, A., Kaushik, H., Swami, S., & Rajwanshi, R. (2023). ISM-MICMAC-based study on key enablers in the adoption of solar renewable energy products in India. *Technology in Society*, 75, 102375.
- Alamoush, A. S., Ölçer, A. I., & Ballini, F. (2022). Port greenhouse gas emission reduction: Port and public authorities' implementation schemes. *Research in Transportation Business & Management*, 43, 100708.
- Alzahrani, A. I., Al-Samarraie, H., Eldenfria, A., Dodoo, J. E., & Alalwan, N. (2022). Users' intention to continue using mHealth services: A DEMATEL approach during the COVID-19 pandemic. *Technology in society*, 68, 101862.
- Argüello, G. (2020). Environmentally sound Management of Ship Wastes: challenges and opportunities for European ports. *Journal of shipping and trade*, 5(1), 12.
- Barney, J. B., & Harrison, J. S. (2020). Stakeholder theory at the crossroads. *Business & Society*, 59(2), 203-212.
- Bhattacharya, S., Govindan, K., Dastidar, S. G., & Sharma, P. (2024). Applications of artificial intelligence in closed-loop supply chains: Systematic literature review and future research agenda. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 184, 103455.
- Braga, I. F., Ferreira, F. A., Ferreira, J. J., Correia, R. J., Pereira, L. F., & Falcão, P. F. (2021). A DEMATEL analysis of smart city determinants. *Technology in Society*, 66, 101687.
- Caballini, C., & Paolucci, M. (2020). A rostering approach to minimize health risks for workers: An application to a container terminal in the Italian port of Genoa. *Omega*, 95, 102094.
- Calan, C., Sobrino, N., Vassallo, J. M., & Alvarez, S. (2025). Do shared e-mopeds contribute to reduce GHG emissions? Insight from Spanish cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 142, 104706.
- Cammin, P., Yu, J., Heilig, L., & Voß, S. (2020). Monitoring of air emissions in maritime ports. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102479.
- Cao, J., Li, S., Noland, R. B., & Ge, Y. E. (2021). The first 25 years of transportation research part D: transport and environment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 100, 103078.
- Carlo, H. J., Vis, I. F., & Roodbergen, K. J. (2014). Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme. *European journal of operational research*, 236(1), 1-13.

- Castellano, R., Ferretti, M., Musella, G., & Risitano, M. (2020). Evaluating the economic and environmental efficiency of ports: Evidence from Italy. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122560.
- Clemente, Á., Yubero, E., Galindo, N., Crespo, J., Nicolás, J. F., Santacatalina, M., & Carratala, A. (2021). Quantification of the impact of port activities on PM10 levels at the port-city boundary of a mediterranean city. *Journal of Environmental Management*, 281, 111842.
- Coutanceau, C. (2022). La documentation des expositions cancérogènes dans les métiers portuaires: Histoire d'une mobilisation ouvrière et scientifique. P. Depoorter, N. Frigul, T. Venet & S. Vignon (éd.), *Les mondes ouvriers: Figures de (dé) mobilisations*, 111-138.
- del Carmen Carnero, M., & Pedregal, D. J. (2013). Ex-ante assessment of the Spanish Occupational Health and Safety Strategy (2007-2012) using a State Space framework. *Reliability Engineering & System Safety*, 110, 14-21.
- Di Francesco, M., Llorente, N. D. M., Zanda, S., & Zuddas, P. (2016). An optimization model for the short-term manpower planning problem in transshipment container terminals. *Computers & Industrial Engineering*, 97, 183-190.
- Dmytriiev, S. D., Freeman, R. E., & Hörisch, J. (2021). The relationship between stakeholder theory and corporate social responsibility: Differences, similarities, and implications for social issues in management. *Journal of Management Studies*, 58(6), 1441-1470.
- Ducruet, C., Prete, M. L., Martin, B. P., & Séné, M. A. (2024). Environnement et santé dans les villes portuaires: quelles données pour une analyse comparative au niveau mondial?. *L'intelligence portuaire: opération, innovation, projection*, 265-286.
- Ebrahimi, H., Zarei, E., Ansari, M., Nojoumi, A., & Yarahmadi, R. (2024). A system theory based accident analysis model: STAMP-fuzzy DEMATEL. *Safety science*, 173, 106445.
- Fameli, K. M., Kotrikla, A. M., Psanis, C., Biskos, G., & Polydoropoulou, A. (2020). Estimation of the emissions by transport in two port cities of the northeastern Mediterranean, Greece. *Environmental Pollution*, 257, 113598.
- Fang, Z., Luo, N., Xiao, Q., & Chiu, Y. H. (2025). The performance and input congestion of 19 listed port companies in China. *Transport Policy*.
- Freeman, R. E., Phillips, R., & Sisodia, R. (2020). Tensions in stakeholder theory. *Business & Society*, 59(2), 213-231.
- Gan, X., Liu, L., Wen, T., & Webber, R. (2022). Modelling interrelationships between barriers to adopting green building technologies in China's rural housing via grey-DEMATEL. *Technology in Society*, 70, 102042.

- García-Onetti, J., Scherer, M. E., Asmus, M. L., Sanabria, J. G., & Barragán, J. M. (2021). Integrating ecosystem services for the socio-ecological management of ports. *Ocean & Coastal Management*, 206, 105583.
- Gerhart, B., & Feng, J. (2021). The resource-based view of the firm, human resources, and human capital: Progress and prospects. *Journal of management*, 47(7), 1796-1819.
- Gu, B., Liu, J., Ye, X., Gong, Y., & Chen, J. (2024). Data-driven approach for port resilience evaluation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 186, 103570.
- Guibing, G. A. O., Dengming, Z. H. O. U., Hao, T. A. N. G., & Xin, H. U. (2021). An intelligent health diagnosis and maintenance decision-making approach in smart manufacturing. *Reliability Engineering & System Safety*, 216, 107965.
- Gul, M. (2020). A fuzzy-based occupational health and safety risk assessment framework and a case study in an international port authority. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 19(4), 161-175.
- Heikkilä, M., Saarni, J., & Saurama, A. (2022). Innovation in smart ports: Future directions of digitalization in container ports. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1925.
- Heilig, L., Lalla-Ruiz, E., & Voß, S. (2017). Digital transformation in maritime ports: analysis and a game theoretic framework. *Netnomics: Economic research and electronic networking*, 18(2), 227-254.
- Herrero, A., Ortega Piris, A., Diaz-Ruiz-Navamuel, E., Gutierrez, M. A., & Lopez-Diaz, A. I. (2022). Influence of the implantation of the onshore power supply (OPS) system in Spanish medium-sized ports on the reduction in CO2 emissions: the case of the Port of Santander (Spain). *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1446.
- Hörisch, J., Schaltegger, S., & Freeman, R. E. (2020). Integrating stakeholder theory and sustainability accounting: A conceptual synthesis. *Journal of Cleaner Production*, 275, 124097.
- Hsu, C. T., & Liu, H. H. (2024). Evaluating critical success factors and their causal relationships in ocean freight forwarding using service quality assessment. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, 8(9), 7282.
- Jia, X., & Cui, Y. (2021). Examining interrelationships of barriers in the evolution of maritime port smartification from a systematic perspective. *Transport Policy*, 114, 49-58.
- Jiang, X., Zhong, M., Shi, J., & Li, W. (2024). Optimization of integrated scheduling of restricted channels, berths, and yards in bulk cargo ports considering carbon emissions. *Expert Systems with Applications*, 255, 124604.

- Khanra, S., Kaur, P., Joseph, R. P., Malik, A., & Dhir, A. (2022). A resource-based view of green innovation as a strategic firm resource: Present status and future directions. *Business Strategy and the Environment*, 31(4), 1395-1413.
- Kong, Y., Tian, X., Sun, J., & Zhou, H. (2025). Charting sustainable vistas: Analysis of internal and external sustainability performance of Chinese ports. *Transport Policy*, 161, 31-43.
- Li, D., Wong, Y. D., Chen, T., Wang, N., & Yuen, K. F. (2024). An ensemble method for investigating maritime casualties resulting in pollution occurrence: Data augmentation and feature analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 251, 110391.
- Lin, B., Cheng, Y., & Lu, B. (2025). Green Signal Addresses the Financing Dilemmas in Port Development. *Transport Policy*.
- Lin, H. J., Chen, P. C., Lin, H. P., & Hsieh, I. Y. L. (2025). Quantifying carbon emissions in cold chain transport: A real-world data-driven approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 142, 104679.
- Lopes, C., Antelo, L. T., Franco-Uría, A., Botana, C., & Alonso, A. A. (2013). Sustainability of port activities within the framework of the fisheries sector: Port of Vigo (NW Spain). *Ecological indicators*, 30, 45-51.
- Merico, E., Cesari, D., Gregoris, E., Gambaro, A., Cordella, M., & Contini, D. (2021). Shipping and air quality in Italian port cities: state-of-the-art analysis of available results of estimated impacts. *Atmosphere*, 12(5), 536.
- Mubarik, M. S., Kazmi, S. H. A., & Zaman, S. I. (2021). Application of gray DEMATEL-ANP in green-strategic sourcing. *Technology in Society*, 64, 101524.
- Mueller, N., Westerby, M., & Nieuwenhuijsen, M. (2023). Health impact assessments of shipping and port-sourced air pollution on a global scale: A scoping literature review. *Environmental Research*, 216, 114460.
- Natalucci, M., 2019. What is a Smart Port?. <https://www.porttechnology.org/news/>
- Nogué-Alguero, B. (2020). Growth in the docks: Ports, metabolic flows and socio-environmental impacts. *Sustainability Science*, 15(1), 11-30.
- Nunes, R. A., Alvim-Ferraz, M. C., Martins, F. G., Calderay-Cayetano, F., Durán-Grados, V., Moreno-Gutiérrez, J., ... & Sousa, S. I. (2020). Shipping emissions in the Iberian Peninsula and the impacts on air quality. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(15), 9473-9489.
- Progiou, A. G., Bakeas, E., Evangelidou, E., Kontogiorgi, C., Lagkadinou, E., & Sebos, I. (2021). Air pollutant emissions from Piraeus port: External costs and air quality levels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 91, 102586.

- Puig, M., Raptis, S., Wooldridge, C., & Darbra, R. M. (2020). Performance trends of environmental management in European ports. *Marine pollution bulletin*, 160, 111686.
- Shakerian, M., Jahangiri, M., Alimohammadlou, M., Nami, M., & Choobineh, A. (2019). Individual cognitive factors affecting unsafe acts among Iranian industrial workers: An integrative meta-synthesis interpretive structural modeling (ISM) approach. *Safety Science*, 120, 89-98.
- Široka, M., Piličić, S., Milošević, T., Lacalle, I., & Traven, L. (2021). A novel approach for assessing the ports' environmental impacts in real time-The IoT based port environmental index. *Ecological Indicators*, 120, 106949.
- Song, P., Zhao, J., Mubarak, S. M., & Tareh, S. M. (2022). Critical success factors for epidemic emergency management in colleges and universities during COVID-19: A study based on DEMATEL method. *Safety science*, 145, 105498.
- Sornn-Friese, H., Poulsen, R. T., Nowinska, A. U., & de Langen, P. (2021). What drives ports around the world to adopt air emissions abatement measures?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90, 102644.
- Spieler, E. A. (1994). Perpetuating Risk Workers' Compensation and the Persistence of Occupational Injuries. *Hous. L. REv.*, 31, 119.
- Tsiulin, S., Reinau, K. H., Hilmola, O. P., Goryaev, N., & Karam, A. (2020). Blockchain-based applications in shipping and port management: a literature review towards defining key conceptual frameworks. *Review of International Business and Strategy*, 30(2), 201-224.
- Vrignat, P., Kratz, F., & Avila, M. (2022). Sustainable manufacturing, maintenance policies, prognostics and health management: A literature review. *Reliability Engineering & System Safety*, 218, 108140.
- Wang, C., Chen, J., Li, Z., Nasr, E. S. A., & El-Tamimi, A. M. (2019). An indicator system for evaluating the development of land-sea coordination systems: A case study of Lianyungang port. *Ecological Indicators*, 98, 112-120.
- Wang, L., Cao, Q., & Zhou, L. (2018). Research on the influencing factors in coal mine production safety based on the combination of DEMATEL and ISM. *Safety science*, 103, 51-61.
- Yan, R., Mo, H., Guo, X., Yang, Y., & Wang, S. (2022). Is port state control influenced by the COVID-19? Evidence from inspection data. *Transport Policy*, 123, 82-103.
- Yang, Y., Xue, X., Gao, Y., Zhang, H., & Du, X. (2020). Constructing sustainable coastal ecological environment: A hierarchical structure for sustainable smart ports. *Journal of Coastal Research*, 99(SI), 358-363.

- Yen, B. T., Huang, M. J., Lai, H. J., Cho, H. H., & Huang, Y. L. (2023). How smart port design influences port efficiency-A DEA-Tobit approach. *Research in Transportation Business & Management*, 46, 100862.
- Yorulmaz, M., & Karabulut, K. (2022). Analyzing the factors determining the effectiveness of the international safety management code applied on ships through the fuzzy DEMATEL method. *Safety science*, 155, 105872.
- Yu, C., Deng, Y., Qin, Z., Yang, C., & Yuan, Q. (2023). Traffic volume and road network structure: Revealing transportation-related factors on PM_{2.5} concentrations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 124, 103935.
- Zarbakhshnia, N., & Ma, Z. (2024). Critical success factors for the adoption of AVs in sustainable urban transportation. *Transport Policy*, 156, 62-76.
- Zhang, L., Zeng, Q., & Wang, L. (2024). How to Achieve Comprehensive Carbon Emission Reduction in Ports? A Systematic Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(5), 715.
- Zhang, M., Liu, C., Zhang, C., Zhu, H., Wan, J., & Liu, X. (2023). Response of macrofaunal assemblages to different pollution pressures of two types of ports. *Ecological Indicators*, 146, 109858.
- Zhang, Q., Zheng, S., Geerlings, H., & El Makhoulfi, A. (2019). Port governance revisited: How to govern and for what purpose?. *Transport Policy*, 77, 46-57.
- Zhang, Y., Hou, Z., Yang, F., Yang, M. M., & Wang, Z. (2021). Discovering the evolution of resource-based theory: Science mapping based on bibliometric analysis. *Journal of Business Research*, 137, 500-516.
- Zhou, F., Wang, Y., Liu, J., Yang, X., Hu, Z., Guo, T., ... & Han, Y. (2023). Influence of ship emission control area policy on air quality at Shanghai Port—local and regional perspectives. *Ecological indicators*, 155, 110951.
- Zio, E., & Miqueles, L. (2024). Digital Twins in safety analysis, risk assessment and emergency management. *Reliability Engineering & System Safety*, 110040.

국문초록

지속 가능한 항만을 위한 디지털 생태 지표 : 오염 방지 및 근로자 안전에 대한 통합적 접근 방안

소 진경*·소 막**

글로벌 무역의 확대와 항만 자동화는 운영 효율성을 높였지만, 동시에 환경오염과 항만 노동자 안전의 위험을 심화시켰다. 본 연구는 오염 관리, 운영 최적화, 노동자 안전 보호를 통해 디지털 기술이 이러한 영향을 어떻게 완화할 수 있는지를 탐구한다. 자원기반관점(RBV)과 이해관계자 이론(ST)에 근거하여, 전문가 인터뷰와 문헌 검토를 통해 18개의 핵심 요인이 도출되었다. 통합적 의사결정시험 및 평가실험실-해석적 구조모형-교차영향배수분류(DEMATEL-ISM-MICMAC) 접근법을 활용한 분석 결과, 오염원 디지털 관리 시스템, 전동화 항만 장비, 직업 건강 모니터링 및 조기 경보 시스템이 핵심 촉진 요인으로 확인되었다. 또한, 탄소 발자국 추적 및 최적화 플랫폼은 시스템 효과성을 크게 향상시키는 것으로 나타났다. 본 연구는 친환경적이고 지속가능한 항만 개발 및 노동자 안전을 위한 실질적인 디지털 프레임워크를 제시한다.

| 주제어 디지털 기술, 환경오염, 항만, 노동자 건강, 평가실험실-해석적 구조모형-교차영향배수분류

* 경기대학교 글로벌비즈니스대학원, suzhenqing@kyonggi.ac.kr, 주저자
 ** 경희대학교 글로벌캠퍼스 글로벌경영학과, marksu@khu.ac.kr, 교신저자

제조업 전문화 집적이 수출 무역에 미치는 영향에 관한 연구

오진*

목 차

I. 서 론	IV. 분석 결과
II. 선행연구	V. 결 론
III. 분석 방법 및 변수 선정	참고문헌

본 연구는 2013년부터 2023년까지 한국 17개 지역의 패널 데이터를 활용하여, 제조업 전문화 집적이 수출 무역에 미치는 영향을 실증적으로 분석하였다. 먼저, 고정 효과 모형을 통해 전문화 집적이 국가 전체 수출에 유의한 정(+)의 영향을 미친다는 점을 확인하였으며, 이어서 개별 기울기 모형을 적용하여 지역 간 이질적인 영향을 분석하였다. 분석 결과, 대부분 지역에서 전문화 집적이 수출 증대에 이바지하는 것으로 나타났지만, 그 효과의 크기는 지역별로 달랐다. 본 연구는 제조업 집적이 수출에 미치는 긍정적 효과를 실증적으로 규명함과 동시에, 지역의 산업 구조 및 특성을 반영한 맞춤형 산업 및 수출 진흥 정책의 필요성을 제시한다.

Ⅰ 주제어 제조업 전문화 집적, 수출 무역, 패널 데이터

* 호남대학교 경영학부 조교수, E-Mail: 2022096@honam.ac.kr

I. 서론

수출 무역은 경제 발전에서 중추적인 역할을 하며, 제조업은 국민경제의 핵심 부문으로서 수출 성장의 주요 동력이다(Krugman, 1991; Lee and Yu, 2019). 특히, 글로벌 공급망 재편과 지역경제 통합이 가속화되는 상황에서, 제조업 경쟁력을 높여 수출 역량을 강화하는 방안은 정책 결정자와 학계의 주요 관심사로 부상하고 있다(Ellison and Glaeser, 1997; Devereux et al., 2007).

지역경제학 이론에 따르면, 산업 집적(industrial agglomeration)은 지역 경제 효율성과 생산성을 제고하는 핵심 메커니즘으로 간주한다(Porter, 1998; Marshall, 1920). 이 중 제조업의 전문화 집적(specialized agglomeration)은 유사 산업의 공간적 집중을 통해 규모의 경제, 지식 외부효과, 노동시장 매칭 효과 등을 실현하여 기업의 수출 효율성과 국제 경쟁력을 향상하게 시킬 수 있다(Combes and Duranton, 2006; Devereux et al., 2007). 그러나 지역별 산업 구조, 인프라 수준, 정책적 지원의 차이로 인해 산업 집적 효과가 수출에 미치는 영향이 지역별로 다르게 나타날 가능성을 시사한다.

기존 연구들은 산업 집적이 지역 경제 성과, 특히 생산성과 고용에 미치는 긍정적 영향을 입증해 왔다(Ellison et al., 2010; Combes and Gobillon, 2015). 하지만 제조업 전문화 집적이 지역 수출에 미치는 영향에 관한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 기존 문헌은 주로 국가 단위의 데이터를 활용하여 산업 집적과 수출 간의 관계를 분석하는 데 집중해 왔으며(Head and Ries, 1996; Koenig, 2009), 지역 내부의 이질성과 공간적 분포 특성에 대한 분석은 미흡하였다. 예를 들어, Koenig(2009)는 프랑스 데이터를 통해 기업의 수출 활동이 지역 산업 구조에 영향을 받는다는 점을 제시하였지만, 다양한 지역 간 산업 집적 효과의 차별성을 충분히 설명하지 못하였다. 이에 따라, 제조업 전문화 집적이 지역 수출에 미치는 구체적 영향을 분석하고, 산업 정책의 지역 적합성을 진단하기 위한 정교한 분석이 요구된다.

본 연구는 한국을 사례 연구 대상으로 삼았다. 한국은 빠른 산업화, 수출 지향적 경제 구조, 그리고 뚜렷한 산업의 지리적 집적으로 인해 연구 문제를 검토하기에 이상적인 사례라 할 수 있다. 1970년대 이후 한국은 서울 인근의 경기-인천 지역과 부산을 중심으로 한 동남 해안 지역을 대표적인 제조업 거점으로 발전시켜 왔다. 이들 지역에는 포항의 철강

산업, 울산의 자동차 산업, 구미의 전자 산업, 전라도의 비철금속 산업 등 특화된 산업 집적이 형성되었다(전상곤·공철·김용민·박한울, 2012; 정성훈, 2016; Wu et al., 2024; Wu et al., 2025). 더불어 제2차 국토종합개발계획(1982-1991)은 중소 도시의 빠른 성장을 촉진하여 산업 집적이 전국적으로 확산되는 계기를 마련하였다. 특히 이러한 산업 집적 지역은 한국 수출의 핵심 기반이 되고 있다. 예컨대, 경기-인천 지역과 부산을 중심으로 한 동남해안 지역은 2024년 한국 총수출의 각각 32%와 22%를 차지하였다(KOSIS, 2025). 그럼에도 불구하고 기존 문헌에서는 한국 제조업 집적이 수출 무역에 미치는 영향에 대한 논의가 부족하며, 나아가 집적 형태별로 수출 무역에 미치는 효과 또한 심층적으로 규명할 필요가 있다. 이 문제는 학문적으로도 중요할 뿐 아니라, 지역 맞춤형 수출 진흥 정책 수립에 유용한 시사점을 제공한다는 점에서 의미가 크다.

이에 본 연구는 2013년부터 2023년까지의 한국 17개 행정 지역의 패널 데이터를 활용하여, 제조업 전문화 집적이 수출 무역에 미치는 전반적 효과와 지역별 차이를 고정 효과 모형(Fixed Effects Model)과 개별 기울기(Individual-specific Slopes)를 고려한 패널 데이터 분석을 통해 규명하고자 한다. 본 연구는 지역 맞춤형 수출 및 무역 정책 수립에 기초자료를 제공하는 데 목적이 있다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 관련 이론 및 실증 연구에 대한 기존 문헌을 고찰한다. 제3장에서는 본 연구에서 활용한 분석 모형과 데이터에 관해 설명한다. 제4장에서는 실증 분석 결과를 제시하고 해석한다. 마지막으로 제5장에서는 연구의 주요 결론을 요약하고, 정책적 시사점과 함께 연구의 한계점을 제시한다.

II. 선행연구

수출 무역은 경제 성장을 이끄는 핵심 동력으로서, 개발도상국과 수출주도형 경제체제에서 중요한 역할을 하고 있다(Hausmann et al., 2007). 이러한 배경에서 제조업의 집적은 수출 경쟁력을 제고하는 중요한 요인으로 널리 인식되고 있으며, 특히 도시 또는 지역 차원에서의 제조업 전문화 집적은 그 효과가 더욱 두드러진다(Ellison and Glaeser, 1997; 임창호·김정섭, 2003; Combes et al., 2011).

산업 집적은 전문화 집적과 다양화 집적으로 구분할 수 있다. 전문화 집적은 동일 산업 내 기업들이 특정 지역에 집중되는 현상으로, 규모의 경제, 지식 외부효과, 전문 인력 시장의 형성 등을 통해 생산성과 수출 역량을 향상하게 시킨다(Marshall, 1920; Krugman, 1991). 특히 수출지향 산업에서는 전문화 집적의 긍정적 효과가 더욱 뚜렷하게 나타난다(Devereux et al., 2007). 반면, 다양화 집적은 이질적인 산업 간의 협력과 상호작용에 중점을 두며, 주로 혁신과 창업 활성화에 영향을 미친다(Glaeser et al., 1992). Ellison et al. (2010)은 산업 간 공동 집적(co-agglomeration) 패턴이 생산요소 수요, 기술 유사성, 노동 시장 특성에 의해 함께 결정된다고 지적한다.

산업 집적이 지역 경제에 긍정적 영향을 미치고 있음을 주장하는 다양한 연구들이 진행되었다. Ciccone와 Hall(1993)은 미국 주 단위의 데이터를 통해 노동 인구 밀도가 높은 지역일수록 1인당 산출이 높다는 사실을 밝혀내며, 집적을 통한 규모의 경제가 생산성을 높이는 데 이바지함을 보여주었다. Combes et al.(2011)은 프랑스의 데이터를 분석하여, 지역 간 생산성 격차가 대부분 지역 내 산업 집적에 기인함을 분석하였다.

기존 연구에 따르면 산업 집적은 생산성 향상뿐 아니라 거래비용 감소, 기술 확산, 인프라 공유 등을 통해 수출 증가를 유도하는 역할도 수행한다(Greenaway and Kneller, 2007). Krugman(1991)의 신경제 지리(New Economic Geography) 이론은 산업 집적을 무역 분석의 틀에 체계적으로 도입하며, 제조업이 중심지에 집중될수록 비교우위를 형성하고 수출 경쟁력이 강화됨을 주장하였다. Koenig(2009)는 프랑스 제조업체의 미시 데이터를 바탕으로, 높은 집적 지역에 있는 기업일수록 수출에 참여할 가능성이 높다는 실증 결과를 제시하였다. Hanson(2005) 역시 산업 집적이 수출 규모와 제품의 복잡도를 동시에 높이는 효과가 있다고 분석하였다.

제조업 전문화 집적의 수출 증대 효과는 최근 더욱 주목받는 연구 주제로 부상하고 있다. Brakman와 Marrewijk(2018)은 수출 활동의 지리적 분포가 제조업 집적 수준과 밀접하게 관련되어 있으며, 집적이 기업의 생산성 제고뿐 아니라 정보, 네트워크, 물류 측면에서도 수출을 지원한다고 주장하였다. 또한 Görg와 Strobl(2003)은 산업이 집적된 지역에 있는 외국인직접투자(FDI)가 현지 기업의 수출 활동에 더욱 긍정적인 외부효과를 미칠 수 있음을 발견하였다.

그러나 기존 연구는 몇 가지 한계를 안고 있다. 첫째, 대부분 국가 혹은 산업 단위에서

분석이 이루어졌으며, 지역별 제조업 집적이 수출에 미치는 실질적 효과를 충분히 조명하지 못하고 있다. 둘째, 기존 연구들은 대부분 횡단면 자료에 의존하고 있어, 시간에 따른 변화나 동태적 효과를 충분히 반영하지 못하고 있다. 이에 따라 지역별 제조업 집적의 수출에 대한 한계효과를 정확히 이해하는 데 제약이 있으며, 지역 맞춤형 산업 정책 수립에도 어려움이 따른다. 따라서 지역 패널 데이터를 활용하고, 더욱 유연한 계량 모형을 적용하여 제조업 전문화 집적이 수출 무역에 미치는 구체적 작용 메커니즘과 공간적 차이를 심층적으로 규명할 필요가 있다.

III. 분석 방법 및 변수 선정

1. 분석 방법

본 연구는 한국 제조업의 전문화 집적이 수출 무역에 미치는 영향을 심층적으로 분석하기 위해 2단계 분석 구조를 도입하였다. 첫째, 제조업 전문화 집적이 한국 전체 수출 무역에 미치는 영향을 평가한다. 둘째, 각 지역의 제조업 집적이 해당 지역의 수출 무역에 미치는 고유한 영향을 분석한다.

1) 고정 효과 모형(Fixed Effects Model)

본 연구는 먼저 고정 효과 모형(Fixed Effects Model)을 사용하여 한국 제조업의 전문화 집적이 한국 수출 무역량에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 고정 효과 모형은 주로 패널 데이터 분석에서 사용되며, 같은 단위에서 여러 시점에 걸친 데이터를 활용하여 분석한다. 고정 효과 모형은 개별 단위의 특성이 시간에 따라 변하지 않는다고 가정하여 이러한 특성의 영향을 통제하는 회귀 분석 기법이다. 이를 통해 개별 단위의 특성에 기인한 편향을 제거하고, 시간에 따른 변화의 영향을 분석할 수 있다(Hausman, 2015). 본 연구에서 사용한 고정 효과 모형은 다음과 같다.

$$Trade_{i,t} = \mu_i + \alpha Agg_{i,t} + \beta X_{i,t} + \epsilon_{i,t} \text{ ----- (1)}$$

$Trade_{i,t}$ 는 i 번째 지역의 t 번째 시점의 수출 무역량이다. μ_i 는 i 번째 지역의 고정 효과로, 시간에 따라 변하지 않는 효과이다. $Agg_{i,t}$ 는 i 번째 지역의 t 번째 시점에서의 제조업 전문화 집적 수준이다. α 는 회귀 계수로, $Agg_{i,t}$ 가 $Trade_{i,t}$ 에 미치는 영향을 보여준다. $X_{i,t}$ 는 i 번째 지역의 t 번째 시점에서의 통제 변수 행렬이다. β 는 통제 변수들의 회귀 계수이다. $\epsilon_{i,t}$ 는 오차항으로, $Trade_{i,t}$ 에 영향을 미치는 다른 설명되지 않은 요인을 설명한다.

2) 개별 기울기 패널 데이터 모형(Panel data model with individual-specific slopes)

고정 효과 모형에서 계수 α 는 한국 제조업 집적이 전체 수출 무역에 미치는 영향을 반영한다. 그러나 이 계수는 특정 지역의 제조업 집적이 해당 지역 수출에 미치는 영향력을 충분히 설명하지 못한다. 이러한 지역별 영향의 이질성을 반영하기 위해, 본 연구는 개별 기울기(Individual-specific Slopes)를 허용하는 패널 데이터 모형을 도입하였다. 이 모형은 각 개체에 대해 계수 α 가 다르게 설정될 수 있도록 허용함으로써, 더욱 정교한 지역별 분석이 가능하다. 모형의 수식은 다음과 같다.

$$Trade_{i,t} = \sum_{i=1}^I \alpha_i D_i Agg_{i,t} + \beta X_{i,t} + \epsilon_{i,t} \text{ ----- (2)}$$

식(2)에서 계수 α_i 가 지역별로 다르게 변화하는 것을 허용하면서도 다른 통제 변수들의 계수는 고정된 상태로 유지하여 추정해야 할 매개변수의 수와 자유도의 손실을 줄여준다(Ludwig, 2015). 이때 α_i 는 특정 지역의 제조업 전문화 집적이 해당 지역의 수출에 미치는 영향을 나타낸다. 모형 2의 추정에서는 LSDV(Least Squares Dummy Variable) 방법을 사용하였으며, 지역 더미 변수 D_i 와 $Agg_{i,t}$ 의 교호 작용 항을 회귀식에 도입한다.

2. 변수 선정

본 연구의 종속 변수는 각 지역의 수출 무역량(Trade)이다. 본 연구의 주요 독립 변수는 각 지역의 제조업 전문화 집적 지수(Agg)이다. 제조업 전문화 집적 지수는 지역 i 의 제조업 고용 비중을 전국 제조업 고용 비중으로 나눈 비율로, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$Agg_i = \frac{emp_{i,m}/emp_i}{emp_m/emp} \text{-----} (3)$$

여기서 $emp_{i,m}$ 와 emp_m 은 각각 지역 i 와 한국 전체의 제조업 고용자 수를 의미하며, emp_m 와 emp 은 각각 지역 i 와 한국 전체의 총고용자 수를 나타낸다(Combes, 2000).

본 연구는 네 가지 통제 변수를 도입하였다. 첫째, 지역의 총인구를 사용하여 인구 규모(Po)를 측정하였다. 둘째, 1인당 지역 내 총생산(Pergdp)을 사용하여 1인당 부유 수준을 측정하였다. 셋째, 산업 구조는 수출 무역에 큰 영향을 미치며, 경제 발전 단계에 따라 그 효과가 달라질 수 있다. 본 연구에서는 지역 총고용 인구 대비 제2차 산업 종사자 비율을 산업 구조(Second)의 지표로 사용하였다(Poumanyvong, 2010; Han, 2018). 넷째, 과학기술 혁신은 무역과 밀접한 관련이 있다. 과학기술 투자는 기업의 생산 방식과 구조를 최적화하는데 이바지하며, 특히 친환경 기술 혁신을 통해 환경오염을 줄일 가능성을 제공한다. 본 연구에서는 각 지역 주요 연구기관(대학과 연구소)의 R&D 지출이 지역 GDP에서 차지하는 비율을 과학기술 혁신 수준(Tecgdp)의 지표로 사용하였다(Zhou, 2016). 마지막으로, 해외 직접 투자(Fdi)는 지역 경제에 자본과 일자리를 제공할 뿐만 아니라, 기술 이전 및 확산의 효과적인 수단으로 간주하며, 지방 정부가 기술을 업그레이드하여 무역 성장을 실현하는 데 도움이 될 수 있다(Bwalya, 2006). 따라서 본 연구는 FDI의 영향도 고려하였다. 모형에는 관측되지 않은 시간 효과를 통제하기 위해 시간 추세 항(Time)을 추가하였다.

본 연구에서 검토된 표본은 2013년부터 2023년까지 관찰된 한국의 17개 주요 행정 구역을 기반으로 한다. 주요 데이터는 KOSIS 국가통계포털의 통계 데이터를 활용하였다.

모든 변수의 세부 사항은 <표 1>에 제시되어 있다. 변수들의 최솟값, 최댓값의 차이가 높은 것으로 나타났으며 표준편차가 큰 것으로 나타났다. 이 분산성을 완화하고 극단값의 영향을 줄이며 변수 간 관계의 해석력을 높이기 위해, 본 연구에서는 모든 연속형 변수에 자연로그 변환을 적용한 후 회귀 분석을 수행하였다.

<표 2>는 각 지역 주요 변수의 연간 평균값을 제시하며, 뚜렷한 지역 간 격차를 통해 발전의 불균형과 산업 구조의 차이를 드러낸다. 연간 평균 기준으로 수출 무역량은 경기, 충남, 울산, 서울에서 상대적으로 높고 제주도, 세종시, 강원도는 낮은 수준으로 보인다. 전문화 집적 지수는 울산, 충남, 경남, 경북, 충북이 높은 수준을 보이고 서울과 제주는 낮은

수준을 보인다. 이러한 이질성은 후속 계량 분석에서 지역 고정 효과의 통제가 필요함을 시사하며, 변수 간 규모 차이에 따른 왜곡을 줄이기 위해 연속형 변수에 대한 적절한 변환(예: 로그 변환)이 요구된다.

〈표 1〉 변수들의 기술 통계

변수	평균	표준편차	최솟값	최댓값
수출 무역량 (Export, 100만 달러)	32872.35	32883.73	103	143338
전문화 집적 지수 (Agg, %)	1.049	0.486	0.221	1.865
인구수 (Po, people)	3043536	3192458	122153	1.32e+07
1인당 GDP (Pergdp, 원)	3.49e+07	1.07e+07	1.90e+07	6.50e+07
산업 구조 (Second, %)	0.398	0.072	0.222	0.588
과학기술 투자 (Tec, %)	0.035	0.041	0.007	0.193
해외 직접 투자 (Fdi, 100만 달러)	789.975	1621.377	0	8339

〈표 2〉 지역별 변수들의 년도 평균값

Region	Export	Agg	Po	Pergdp	Secondrate	Tecgdp	Fdi
Seoul	59672	0.285	9845455	40700000	0.443	0.030	6674.723
Busan	14137	0.821	3472727	25300000	0.361	0.016	234.616
Daegu	7317	1.003	2490909	22200000	0.296	0.022	197.473
Incheon	36174	1.262	2927273	28800000	0.305	0.030	1469.224
Gwangju	15043	0.754	1500000	25700000	0.471	0.021	8.545
Daejeon	4463	0.539	1500000	26900000	0.374	0.183	35.182
Ulsan	73128	1.827	1190909	63500000	0.472	0.012	828.934
Sejong	1142	1.085	274175	41400000	0.440	0.045	13.545
Gyeonggi	117207	1.372	12800000	33200000	0.328	0.087	1649.041
Gangwon	2057	0.498	1518182	29100000	0.469	0.010	119.224
Chungbuk	19839	1.521	1600000	38900000	0.399	0.027	173.223
Chungnam	77590	1.676	2090909	51500000	0.385	0.025	541.274
Jeonbuk	7467	0.911	1872727	26900000	0.363	0.020	90.081
Jeonnam	34207	0.871	1900000	38900000	0.550	0.009	99.658
Gyeongbuk	43516	1.554	2700000	39300000	0.378	0.025	617.409
Gyeongnam	45724	1.618	3390909	32400000	0.348	0.024	123.197
Jeju	147	0.232	647751	28600000	0.382	0.009	554.228

모형을 구축하기 전에 주요 변수에 대한 상관관계 분석을 하고 변수 간 다중 공산성 존재 여부와 타당성을 검증하였다. 타당성 검증 결과, 〈표 3〉에 제시된 바와 같이 주요 변수 간의 상관계수는 분석에 활용되기에 문제가 없는 수준으로 나타났다.

〈표 3〉 상관분석

	lnAgg	lnPo	lnPergdp	lnSecond	lnTec	lnFdi
lnAgg	1					
lnPo	0.067	1				
lnPergdp	0.469	-0.1009	1			
lnSecond	0.184	0.286	-0.462	1		
lnTec	-0.115	0.095	-0.155	0.220	1	
lnFdi	-0.304	0.544	0.225	-0.046	-0.007	1

시계열 데이터 분석에서는 비정상 변수의 무작위 상관 패턴에서 발생할 수 있는 거짓된 결과를 방지하는 것이 중요하다. 분석 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 Panel Unit Root test 검정을 시행하였으며, 본 연구에서 사용한 패널 데이터의 경우 N>T이므로 HT (Harris and Tzavalis test) 검정을 채택하였다(Harris and Tzavalis, 1999). Unit Root 검증 결과 유의확률이 0.05 이하로 나타나고 모든 종속 변수는 Unit Root이 존재하지 않는 것으로 모든 종속 변수가 안정적인 변수인 것을 확인하였다.

IV. 분석 결과

1. 고정 효과 모형의 추정 결과

식(1)에 따라 본 연구는 고정 효과 모형을 추정하였으며, 결과는 〈표 4〉의 세 번째 열에 나와 있다. 본 연구는 또한 랜덤 효과 모형(Random effect model)을 추정하고, 고정 효과 모형이 최적의 모형인지 판단하기 위해 Hausman 검정을 수행했다. 결과는 Hausman 검정에서 5% 수준에서 귀무가설(랜덤 효과 모형의 추정치는 유효하다)을 기각하며, 고정 효과 모형을 사용해야 함을 나타냈다. 고정 효과 모형을 추정한 후, 본 연구는 F 검정을 시행하여 고정 효과 모형의 필요성을 검증했다. 결과는 F 검정의 P 값이 0.000으로 나타나, 모든 개체 효과가 0이라는 귀무가설을 강하게 기각했다. 이는 고정 효과 모형이 혼합 모형보다 명확히 우수하며, 각 개체가 고유의 절편 항을 가질 수 있도록 해야 함을 시사한다.

고정 효과 모형에서 제조업 전문화 집적 지수의 회귀 계수는 0.298이며, 1% 수준으로

통계적으로 유의하게 나타났다. 이는 제조업 전문화 집적이 1% 증가할 때, 해당 지역의 수출 무역량이 0.298% 증가함을 의미한다. 이는 제조업 전문화 집적 수준의 향상이 지역 수출에 긍정적인 영향을 미친다는 것을 시사한다. 또한, 인구의 회귀 계수는 유의하게 양수로 나타났으며, 이는 수출 무역량과 지역 인구 간의 긴밀한 관계를 보여준다. 1인당 GDP의 회귀 계수 또한 유의하게 양수로 나타나, 1인당 소득 증가가 수출 무역 발전에 이바지함을 나타냈다. 제2차 산업 비중은 수출 무역량에 유의한 정(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 지역 내 제2차 산업 종사자 비율이 높을수록 산업 기반이 견고해져 생산 및 공급 역량이 강화되며, 이는 결국 수출 활동을 촉진한다는 것을 의미한다.

결과의 신뢰성을 테스트하기 위해, 본 연구는 혼합 회귀와 랜덤 효과 모형의 추정 결과도 함께 제시했다. 결과는 제조업 전문화 집적의 회귀 계수가 큰 변동 없이 모두 1% 수준에서 통계적으로 유의하게 보여주어, 결과의 신뢰성을 입증했다.

〈표 4〉 고정효과 모형의 추정 결과

변수	혼합회귀	고정효과모형	랜덤효과모형
InAgg	0.496*** (16.45)	0.298*** (3.23)	0.330*** (7.26)
InPo	1.259*** (19.21)	1.190*** (6.05)	1.301*** (12.05)
InPergdp	-0.259 (-0.92)	0.695*** (2.89)	0.758*** (3.41)
InSecond	1.111*** (9.98)	0.777*** (2.94)	0.649** (2.42)
InTec	0.312*** (3.33)	0.130 (0.33)	0.252 (0.10)
InFdi	0.189*** (4.34)	0.183 (0.93)	0.199 (0.99)
Time	-0.029** (-2.44)	-0.002 (-0.62)	-0.005 (-1.14)
Constant	-11.469** (-2.29)	-21.506*** (-4.02)	-24.454*** (-5.60)
F-test	-	166.60***	-
Hausman test	-	-	11.30**
R-square	0.915	0.828	0.838
N.o.obs	187	187	187

주 1): 관측치 수는 187 (17개 지역*11년).

주 2): ()는 t-value.

주 3): *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 t 값이 통계적으로 유의함을 나타냄.

2. 개별 기울기 패널 데이터 모형의 추정 결과

고정 효과 모형의 분석 결과는 제조업 전문화 집적이 한국의 전체 수출 무역량에 대해 통계적으로 유의한 정(+)의 영향을 미친다는 것을 보여준다. 지역별 이질적인 영향을 더욱 정밀하게 분석하기 위해, 본 연구는 개별 기울기(Individual-specific slopes)를 허용하는 패널 데이터 모형을 적용하였다. 해당 모형의 추정 결과는 <표 5>에 제시되어 있다.

<표 5>에 따르면, 제주도를 제외한 대부분 지역에서 제조업 전문화 집적은 수출에 긍정적인 영향을 미치며, 그 영향력의 크기는 지역별로 다르게 나타난다. 특히, 제조업 전문화 집적의 영향 계수는 대부분 지역에서 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하며, 강원도에 대해서만 그 영향이 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다.

<표 5> 개별 기울기 패널 데이터 모형의 추정 결과

변수			
InPo	0.904*** (3.91)		
InPergdp	0.731*** (3.11)		
InSecond	0.808*** (3.08)		
InTec	0.094*** (0.25)		
InFdi	0.208*** (1.08)		
Time	0.001*** (-0.38)		
Constant	-17.95*** (-3.31)		
InAgg			
Seoul	0.758*** (3.26)	Gangwon	0.163 (1.24)
Busan	0.298*** (3.72)	Chungbuk	0.273*** (4.73)
Daegu	0.207*** (3.12)	Chungnam	0.348*** (6.01)
Incheon	0.326*** (5.63)	Jeonbuk	0.255*** (3.34)
Gwangju	0.489*** (5.54)	Jeonnam	0.508*** (5.79)

변수			
Daejeon	0.280** (2.29)	Gyeongbuk	0.300*** (5.38)
Ulsan	0.371*** (5.97)	Gyeongnam	0.287*** (5.56)
Sejong	0.181* (1.80)	Jeju	-0.639** (-2.11)
Gyeonggi	0.275*** (4.32)		
R-square	0.901		
N.o.obs	187		

주 1): 관측치 수는 187 (17개 지역*11년).

주 2): ()는 t-value.

주 3): *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 t 값이 통계적으로 유의함을 나타냄.

지역별 제조업 전문화 집적이 수출에 미치는 영향 차이를 비교하기 위해, 본 연구는 Agg 계수를 기준으로 내림차순 정렬하여 지역을 나열하였다. <그림 1>에 따라 서울특별시, 전라남도, 광주광역시의 Agg 계수가 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이는 해당 지역에서 제조업 전문화 집적이 수출에 더욱 뚜렷한 촉진 효과를 보이고 있음을 의미한다. 반면, 세종시, 강원도, 제주도의 Agg 계수는 낮거나 통계적으로 유의하지 않게 나타나, 해당 지역에서는 제조업 전문화 집적이 수출에 미치는 영향이 뚜렷하지 않음을 보여준다. 이는 이 세 지역의 산업 구조적 특성 과도 부합하는데, 즉 이들 지역에서는 제조업이 주요 산업 유형이 아니기 때문이다. 특히 제주도의 Agg 계수가 음(-)의 값을 보였다는 것이다. 이는 제주도에서 제조업 전문화 집적이 수출에 오히려 억제 효과를 미쳤음을 시사한다. 이는 제주도의 제조업 구조가 수출 지향적 산업과 맞지 않거나, 산업 집적 효과가 수출 경쟁력으로 전환되지 못했을 가능성을 반영할 수 있다. 또한 지리적 위치, 정책 방향, 물류비용 등 다양한 제약 요인도 이러한 결과에 영향을 미쳤을 수 있다.

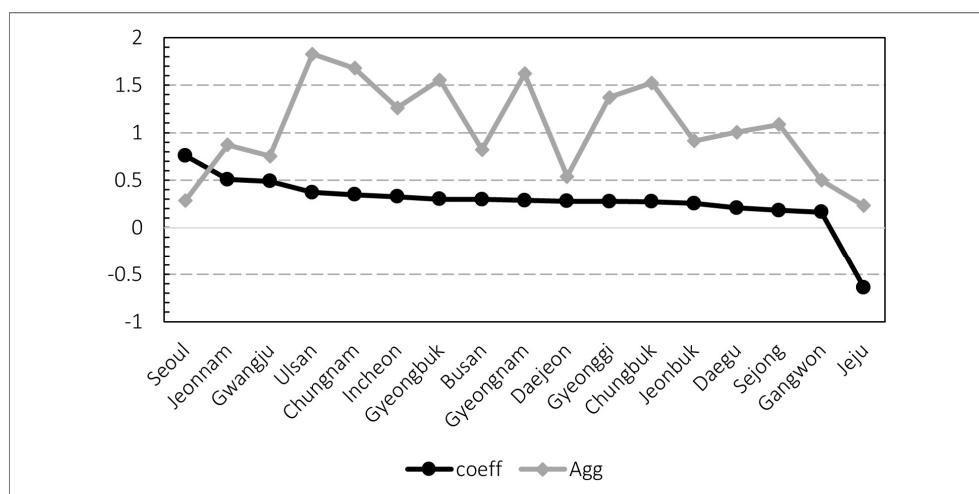
또한 본 연구는 각 지역의 Agg 연 평균값을 <그림 1>에 추가하여, Agg 계수와 실제 Agg 수준 간의 차이를 분석하였다.

분석 결과, 서울특별시는 Agg 계수가 높았지만, 실제 제조업 전문화 집적 수준은 낮게 나타났다. 주의할 점은, 서울과 같은 지역에서는 실제 생산은 지방에서 이루어지더라도 많은 대기업이 수출 활동을 서울 본사에서 신고하기 때문에 수출 수치가 과대 평가될 수 있다는 것이다. 이러한 상황은 전문화 집적이 수출 무역량에 미치는 영향을 과대 추정하게 만들

수 있다. 따라서 서울의 결과를 해석할 때는 신중할 필요가 있다.

전라남도, 광주광역시, 대전광역시에서도 Agg 계수가 높았지만, 실제 제조업 전문화 집적 수준은 낮게 나타났다. 이들 지역은 제조업 전문화 집적 수준이 낮지만, 수출을 유의하게 촉진하고 있는 것으로 나타났다. 이는 이러한 지역에서 수출이 산업 집적의 변화에 더욱 민감하게 반응하고 있음을 의미한다. 따라서 이들 지역에서는 전문화된 산업단지를 조성하고, 전문화 집적을 유도할 수 있는 정책을 시행하는 것이 지역 수출을 효과적으로 촉진하는데 도움이 될 수 있다.

〈그림 1〉 각 지역의 Agg 영향 계수 및 Agg 연 평균값



V. 결 론

본 연구는 2013년부터 2023년까지의 한국 17개 지역 패널 데이터를 바탕으로, 제조업 전문화 집적이 수출 무역에 미치는 영향을 실증적으로 분석하였다. 분석은 두 단계로 진행되었다. 첫째, 고정 효과 모형(Fixed Effects Model)을 통해 제조업 전문화 집적이 한국 전체 수출에 대해 유의한 정(+)의 영향을 미친다는 점을 확인하였다. 둘째, 지역별 이질성을 반영하기 위해 개별 기울기(Individual-specific Slopes)를 고려한 패널 데이터 모형을 적용하여, 제조업 집적이 지역별 수출에 미치는 차별적 영향을 규명하였다.

분석 결과, 대부분 지역에서 제조업 전문화 집적과 수출 간에는 정(+)의 관계가 나타났으나, 그 영향력의 크기는 지역마다 달랐다. 특히 서울특별시, 전라남도, 광주광역시 등 전문화 집적의 계수가 상대적으로 크고, 제조업 집적이 해당 지역의 수출을 강하게 전인하고 있는 것으로 나타났다. 반면, 제주도, 강원도, 세종시의 경우 계수가 낮거나 통계적으로 유의하지 않았으며, 제주도의 경우에는 음(-)의 영향을 보여 제조업 구조가 수출 경쟁력으로 전환되지 못하고 있음을 시사한다.

또한, 각 지역의 제조업 전문화 집적 수준의 연 평균값과 수출에 대한 영향 계수를 비교한 결과, 일부 지역에서는 전문화 집적 수준은 낮지만, 수출에 대한 기여도가 큰 것으로 나타났다. 이는 해당 지역에서 전문화된 산업 집적을 강화할 때 높은 한계효과를 기대할 수 있음을 시사한다. 따라서 이러한 지역을 대상으로 한 산업 클러스터 조성, 기반인프라 확충, 그리고 전문화 촉진을 위한 정책 지원이 지역 수출 역량 강화에 효과적으로 이바지할 수 있을 것이다.

종합적으로, 본 연구는 제조업 전문화 집적이 수출 증대에 긍정적인 영향을 미친다는 점을 실증적으로 확인함과 동시에, 지역 간 다른 효과를 고려한 맞춤형 정책의 필요성을 강조하였다. 향후 정책 수립 시에는 각 지역의 제조업 기반, 산업 구조, 입지 조건, 그리고 수출 특성 등을 종합적으로 고려하여, 산업 집적과 무역 간의 시너지를 극대화할 수 있는 지역 맞춤형 전략을 추진할 필요가 있다.

본 연구는 제조업 전문화 집적이 수출 무역에 미치는 영향을 실증적으로 분석하였지만, 몇 가지 한계점이 존재한다. 첫째, 본 연구는 제조업의 전문화 집적만을 고려하였으며, 다양화 집적(diversified agglomeration)이나 도시화 집적(urbanization economies)과 같은 다른 형태의 산업 집적은 분석 대상에 포함되지 않았다. 향후 연구에서는 다양한 산업 집적 유형을 함께 고려함으로써 산업 집적의 복합적인 메커니즘을 더욱 정밀하게 규명할 필요가 있다. 둘째, 수출의 질적 측면이나 제품 다양성 등은 고려되지 않았으며, 향후 연구에서는 수출의 구조적 변화나 산업별 특성을 반영한 분석이 이루어질 필요가 있다. 마지막으로, 본 연구는 지역 단위 분석에 한정되어 있어, 전문화 집적 지수와 수출 무역량의 측정 기준이 완전히 일치하지 않을 소지가 있다(예: 지방 공장의 수출이 서울 본사에 신고하는 경우). 앞으로는 기업 수준의 미시자료를 활용하여, 기업의 관점에서 산업 집적과 수출 간 관계를 더욱 정밀하게 규명할 필요가 있다.

참고문헌

- 전상곤·공철·김용민·박한울. (2012). 수도권과 동남권의 산업집적 효과 비교 분석. 한국지역개발학회지, 24(3), 125-142.
- 정성훈. (2016). 한국 지역산업정책에 대한 회고와 전망. 경관과 지리, 26(2), 57-66.
- 임창호·김정섭. (2003). 산업집적의 외부효과가 도시경제성장에 미치는 영향. 국토계획, 38(3), 187-201.
- Krugman, P. (1991). Geography and trade. Cambridge. MIT Press.. 1991b. Increasing returns and economic geography. Journal of Political Economy, 99(31), 483-99.
- Lee, J., & Bok-Keun, Y. (2019). The effects of export diversification on macroeconomic stabilization: Evidence from Korea. KDI Journal of Economic Policy, 41(1), 1-14.
- Ellison, G., & Glaeser, E. L. (1997). Geographic concentration in US manufacturing industries: a dartboard approach. Journal of political economy, 105(5), 889-927.
- Devereux, M. P., Griffith, R., & Simpson, H. (2007). Firm location decisions, regional grants and agglomeration externalities. Journal of public economics, 91(3-4), 413-435.
- Porter, M. E. (1998). Clusters and the new economics of competition (Vol. 76, No. 6, pp. 77-90). Boston: Harvard Business Review.
- Marshall, A. (1890). 1920. Principles of economics. London: Mac-Millan, 1-627.
- Combes, P. P., & Duranton, G. (2006). Labour pooling, labour poaching, and spatial clustering. Regional Science and Urban Economics, 36(1), 1-28.
- Ellison, G., Glaeser, E. L., & Kerr, W. R. (2010). What causes industry agglomeration? Evidence from coagglomeration patterns. American Economic Review, 100(3), 1195-1213.
- Combes, P. P., & Gobillon, L. (2015). The empirics of agglomeration economies. In Handbook of regional and urban economics, 5, 247-348. Elsevier.
- Head, K., & Ries, J. (1996). Inter-city competition for foreign investment: Static and dynamic effects of China's incentive areas. Journal of Urban Economics, 40(1), 38-60.
- Koenig, P. (2009). Agglomeration and the export decisions of French firms. Journal of Urban Economics, 66(3), 186-195.
- Wu, Z., Woo, S. H., Piboonrungrroj, P., & Lai, P. L. (2025). Manufacturing agglomeration and carbon emissions: an ensemble learning approach with evidence from South Korea. Humanities and Social Sciences Communications, 12(1), 1-14.
- Wu, Z., Woo, S. H., Oh, J. H., & Lai, P. L. (2024). Temporal and spatial effects of manufacturing agglomeration on CO2 emissions: evidence from South Korea. Humanities and Social Sciences Communications, 11(1), 1-14.
- Hausmann, R., Hwang, J., & Rodrik, D. (2007). What you export matters. Journal of economic growth, 12(1), 1-25.
- Ellison, G., & Glaeser, E. L. (1997). Geographic concentration in US manufacturing industries: a dartboard approach. Journal of political economy, 105(5), 889-927.

- Combes, P. P., Duranton, G., & Gobillon, L. (2011). The identification of agglomeration economies. *Journal of economic geography*, 11(2), 253-266.
- Devereux, M. P., Griffith, R., & Simpson, H. (2007). Firm location decisions, regional grants and agglomeration externalities. *Journal of public economics*, 91(3-4), 413-435.
- Glaeser, E. L., Kallal, H. D., Scheinkman, J. A., & Shleifer, A. (1992). Growth in cities. *Journal of political economy*, 100(6), 1126-1152.
- Ellison, G., Glaeser, E. L., & Kerr, W. R. (2010). What causes industry agglomeration? Evidence from coagglomeration patterns. *American Economic Review*, 100(3), 1195-1213.
- Ciccone, A., & Hall, R. E. (1993). Productivity and the density of economic activity.
- Greenaway, D., & Kneller, R. (2007). Firm heterogeneity, exporting and foreign direct investment. *The Economic Journal*, 117(517), F134-F161.
- Koenig, P. (2009). Agglomeration and the export decisions of French firms. *Journal of Urban Economics*, 66(3), 186-195.
- Hanson, G. H. (2005). Market potential, increasing returns and geographic concentration. *Journal of international economics*, 67(1), 1-24.
- Brakman, S., & van Marrewijk, C. (2018). Space and international business. In *The Routledge Companion to the Geography of International Business*, 27-42. Routledge.
- Görg, H., & Strobl, E. (2003). 'Footloose' multinationals?. *The Manchester School*, 71(1), 1-19.
- Hausman, J. (2015). Specification tests in econometrics. *Applied Econometrics*, 38(2), 112-134.
- Ludwig, V. (2015). XTFEIS: Stata module to estimate linear fixed-effects model with individual-specific slopes (FEIS).
- Combes, P.P. (2000). Economic structure and local growth: France, 1984-1993. *Journal of Urban Economics*. 47 (3), 329-355.
- Poumanyong, P., Kaneko, S. (2010). Does urbanization lead to less energy use and lower CO2 emissions? A cross-country analysis. *Ecological economics*. 70, 434-444.
- Han, F., Xie, R., Fang, J., & Liu, Y. (2018). The effects of urban agglomeration economies on carbon emissions: Evidence from Chinese cities. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1096-1110.
- Zhou, X.H., Fan, Q.Q. (2016). Mechanism of carbon intensity reduction and optimization design of its industrial allocation. *Journal of World Economic Research*. 7, 168-192 (In Chinese).
- Bwalya, S. M. (2006). Foreign direct investment and technology spillovers: Evidence from panel data analysis of manufacturing firms in Zambia. *Journal of development economics*, 81(2), 514-526.
- Harris, R. D., & Tzavalis, E. (1999). Inference for unit roots in dynamic panels where the time dimension is fixed. *Journal of econometrics*, 91(2), 201-226.

ABSTRACT

Study on the Impact of Manufacturing Specialization Agglomeration on Export Trade

Zhen Wu*

This study empirically investigates the impact of manufacturing specialization agglomeration on export trade using panel data from 17 regions in South Korea from 2013 to 2023. The fixed effects model confirms that specialization agglomeration has a significant positive effect on national export performance. To account for regional heterogeneity, the analysis further applies an individual-specific slopes model, revealing that the effect of specialization agglomeration on exports varies considerably across regions. While most regions show a positive relationship, the degree of influence differs. These findings highlight the overall benefits of manufacturing agglomeration for export growth and emphasize the importance of region-specific industrial and trade policies tailored to local economic structures and characteristics.

| **Keywords** Manufacturing specialization agglomeration, Export trade, Panel data

* Assistant Professor, Department of Business Administration, Honam University, 2022096@honam.ac.kr

우주산업에 관한 수출통제 - 미국의 수출통제 제도를 중심으로 -

김영주*

목 차

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| I. 서 론 | IV. 우리나라 제도 발전을 위한 정책 제언 |
| II. 뉴스페이스 시대의 우주산업 수출입 물품 | V. 결 론 |
| III. 미국의 우주산업 수출통제 체제 | 참고문헌 |

최근 우주산업은 국가 주도의 폐쇄적 구조에서 벗어나 민간 기업이 주도하는 ‘뉴스페이스’(New Space) 시대로 빠르게 전환되고 있다. 아울러, 위성체, 발사체, 지상국 장비, 위성데이터 등 우주산업 관련 물품의 무역거래도 활발해지고 있다. 이들 물품은 군사적 활용 가능성과 높은 기술 민감도를 지니고 있다는 점에서, 전략물자 또는 이중용도 품목으로 분류되는 경우가 많다. 그에 따라 수출통제의 필요성과 중요성 또한 크게 부각되고 있다.

그러나 우리나라의 현행 수출통제제도는 전통적 무기체계 및 일부 산업군 중심으로 운영되고 있어, 우주산업 특유의 기술 융복합성과 글로벌화된 공급망 구조를 충분히 반영하지 못하고 있다는 한계가 있다. 본 연구는 이러한 문제의식에서 출발하여, 미국의 수출통제 체제, 특히 ITAR과 EAR 제도를 중심으로 우주산업 물품 통제체계를 분석하였다. 이를 바탕으로 우주산업 관련 품목의 분류체계 정비, 신흥기술에 대한 기능 중심의 통합적 규제 체계 도입, 무형정보 이전에 대한 법제 보완 등 몇 가지 정책 개선방안들을 제시하였다.

수출통제는 국가안보와 기술주권을 보장하는 핵심 제도이지만, 동시에 민간 우주산업의 혁신과 성장 잠재력을 저해하지 않도록 균형 있게 운영되어야 한다. 기술 발전과 국제 산업구조의 변화 속도를 고려할 때, 유연하고 예측가능한 통제체계 구축이 필요하며, 국제사회와의 협력 속에서 우리나라 우주산업의 현실과 수준을 반영한 독자적 제도 정립이 이루어져야 할 것이다.

Ⅰ 주제어 우주산업, 수출통제, 국제무기거래규정, 수출통제개혁법, 대외무역법, 이중용도

* 부산대학교 무역학부 교수, E-Mail: yjkim333@pusan.ac.kr

I. 서론

최근 우주산업의 패러다임은 ‘뉴스페이스’(New Space)라 불리는 민간 중심의 상업우주 활동(commercial space activity)으로 급속히 전환되고 있다. 과거 우주산업은 정부의 독점적 자금 지원과 통제를 통해 주도되었으며, 주로 군사·과학 연구를 위한 제한적 목적에 초점이 맞추어져 있었다. 그러나 민간 기업·스타트업을 중심으로 한 혁신적 기술 개발과 투자 확대가 이루어지면서, 우주산업은 점차 전통적인 관료제적 구조를 벗어나 상업성과 시장 경쟁력을 중심으로 한 산업 생태계로 재편되고 있다(Doldriona and Wintermuth, 2023).

이러한 산업 전환은 글로벌 공급망의 형성과 국제기술거래의 확대를 촉진하고, 우주산업과 관련된 수요 및 수출입 양상에 근본적인 변화를 가져왔다. 특히, 우주산업 물품의 수출입 확대에 따라, 관련 기술 및 장비가 전략물자 또는 이중용도(dual-use) 물품으로 분류될 가능성이 높아지고 있고, 동시에 수출통제(export control)의 중요성 또한 날로 증가하고 있다. 위성 본체, 발사체, 탑재체, 지상국 장비, 위성데이터 등은 군사적 전용 가능성과 높은 기술 민감도를 지니고 있다는 점에서, 대부분의 국가에서 국가안보와 국제평화 유지를 위한 목적으로 엄격한 통제하에 관리되고 있다(김영주, 2024).

그럼에도 불구하고, 우리나라의 현행 수출통제제도는 전통적인 무기체계나 반도체·화학물질 산업을 중심으로 설계되어 있어, 우주산업 고유의 기술 특성과 융복합적 구조를 충분히 반영하지 못하고 있는 상황이다. 이에 우주산업 물품에 특화된 수출통제제도 구축 논의가 요구되고 있고, 관련 분석과 정책방안 및 제도개선 연구의 필요성이 커지고 있다.

수출통제제도에 관한 국내 선행연구를 살펴보면 다양한 범위에서 관련 연구가 축적되어 왔다. 김민재(2023)는 미국 주도의 새로운 수출통제체제 구축과 인도-태평양 경제프레임워크(IPEF)의 역할을 분석하며, 프렌드쇼어링을 통한 다자간 통제 체제 형성 가능성을 검토하고 한국의 중도적이고 능동적인 통상외교 전략을 제안하였다. 또한 수출통제를 보다 광범위한 통상안보 전략의 일환으로 이해할 필요성을 제시하고 있다. 박언경 외(2023)에서는 미국 수출통제개혁법의 주요 내용을 분석하고, 이를 바탕으로 우리나라 대외무역법의 개정 방향성을 검토하였다. 수출통제의 목적이 단순한 안보 목적을 넘어 외교·산업정책까지 포괄해야 함을 강조하였고, 첨단기술 통제를 위한 법제정비 필요성을 제기하였다. 송준현(2022)은

일본의 수출통제제도를 분석하고, 2019년 한국에 대한 수출규제 조치를 사례로 들며, 수출통제가 외교적 수단으로 활용된다는 점을 실증적으로 보여주었다.

최근에는 미국의 무기수출통제 및 FDPR 규제의 법적 구조와 그 파급효과에 주목하는 연구들도 다수 발표되고 있다. 이경령·이승택(2024)은 미국의 해외직접제품규칙(FDPR) 적용 사례인 Seagate 사건을 중심으로, 미국 수출통제의 규제강화 흐름을 고찰하고 국내 기업의 대응전략으로 내부 통제체계 구축의 필요성을 강조하였다. 이동은(2024)은 이중용도 물품 수출통제의 국제통상법적 측면을 검토하며, GATT 제21조 (b)(ii) 안보예외 조항의 해석을 중심으로 국제사회의 사법적 통제 가능성을 분석하였다. 이소영(2023)은 미사일기술통제체제(MTCR)에 의한 무인항공기 수출통제정책을 검토하고, 미국의 MTCR 해석 변화에 따른 무인기 수출통제 완화 경향을 정리하며 우리나라의 정책적 대응 필요성을 제안하였다. 임산호(2024)는 미국의 대중국 반도체 수출통제가 한국의 대중국 반도체 장비 수출에 미친 영향을 실증 분석하였으며, 중국의 자립화 수준에 따라 한국의 수출이 부정적인 영향을 받고 있음을 지적하고 이에 대한 전략적 대응을 강조하였다.

한편, 정인교·채수홍(2023)은 미국의 수출통제 수단으로서 FDPR의 법적 구조와 기능을 분석하고, 이 제도가 글로벌 공급망에 미치는 파급효과와 한국 기업의 대응 전략 필요성을 제시하였다. 조장현(2024)은 미국 무기수출통제법의 체계 및 구조를 반영하여 우리나라 무기수출 통제체계의 개선 방향으로 의회 중심 심의절차, FMS 모델 도입, 수출 후 모니터링 제도 등을 제안하였다. 최동준(2021)은 미국 수출통제개혁법과 중국 수출통제법의 내용을 비교하여, 통제범위, 운영방식, 벌칙규정 등을 분석하였다. 여기서는 양국의 통제 강화가 우리나라를 포함한 주요 교역국에 미치는 영향을 강조하고 있다. 마지막으로, 최서지(2024)는 우리나라 수출통제법제의 연혁적 문제점을 검토하고, 대외무역법에 편입된 구조적 한계를 지적한 후, 독립적이고 체계적인 입법체계 개선방안을 제안하였다.

이처럼, 국내 선행연구들은 수출통제제도의 국제적 동향, 주요 국가의 법제 변화, 기술통제와 안보전략의 연계, 국제적 통제규범의 적용과 그 파급효과, 국내 제도의 구조적 한계 및 개정방향 등 광범위한 관점에서 논의가 이루어지고 있다. 그러나 이들 연구는 대부분 무기류, 반도체, 무인기와 같은 일반적 이중용도 품목에 집중되어 있고, 해당 논의는 주로 통상·외교 전략을 중심으로 진행되었다는 점에서, 뉴스페이스 관련 우주산업이라는 특정 영역의 수출통제제도에 대한 분석은 제한적이라 볼 수 있다. 이에 본 연구는 우주산업에

관한 수출통제를 중심으로 기존 선행연구들에서는 미흡했던 위성 본체, 발사체, 지상국 장비, 위성데이터 등 우주산업 관련 물품의 통제 문제를 중심으로 미국의 수출통제 체계를 분석하고, 이를 바탕으로 우리나라 제도상의 시사점을 도출해 보고자 한다.

이하에서는 먼저 뉴스페이스 시대의 우주산업과 특성, 관련 수출입 물품에 대한 수출통제상의 대상 유형들을 구체적으로 살펴본다(II). 이어, 미국의 우주산업 수출통제 체계를 1976년의 무기수출통제법·국제무기거래규정 체제 및 2018년의 수출통제개혁법·수출관리규정 체제로 구분하여 검토해 본다(III). 이를 토대로, 우리나라 제도 발전을 위한 정책 제언 몇 가지를 피력해 보기로 한다(IV).

II. 뉴스페이스 시대의 우주산업 수출입 물품

1. 우주산업의 구조적 전환

뉴스페이스의 등장은 기존의 우주산업과는 뚜렷한 차이를 보인다. 전통적인 우주산업이 국가 간 정치적 경쟁과 군사적 필요성을 기반으로 발전하였다면, 뉴스페이스는 시장 메커니즘에 기반한 민간 기업의 주도적 참여와 다양한 이해관계자의 협력에 의해 성장하고 있다(Pečujlić, 2023). 특히 소형위성, 민간 발사 서비스, 위성데이터 활용 등은 민간 기업의 혁신과 비용 절감 기술에 의해 빠른 속도로 상업화되고 있다(Doldriona and Wintermuth, 2023). 이로 인해 우주부품의 국제거래는 과거와 비교할 수 없을 정도로 활발해졌으며, 상업위성의 부품이나 지상국 장비, 소프트웨어, 위성데이터 등 다양한 형태의 우주자산(space assets)이 국가 간에 이전되고 있다.

우주부품 거래의 수요 증가는 자연스럽게 글로벌 공급망의 확대와 복잡화로 이어졌다. 과거에는 국가 내 방산업체들이 폐쇄형 공급체계를 통해 우주부품을 공급하였지만(Damast, 2010), 이제는 부품(parts, P), 소프트웨어(software, SW), 소재(materials, M), 기술(technology, T)이 국경을 초월하여 조달되고 있고, 다국적 공동개발 및 생산체계가 일반화되고 있는 실정이다. 예컨대, 소형 위성 부품은 미국에서 설계되고, 유럽이나 아시아에서 생산된 후, 제3국에서 조립 및 발사되는 형태가 보편화되고 있는 것이다. 이처럼 우주기

술의 국경 간 이동이 빈번해짐에 따라, '수출입 통제'(export and import controls)의 대상과 범위 또한 과거에 비해 현저히 복잡해지고 있다(Harrington, 2017).

이와 같은 구조적 변화로 인해, 국가 중심의 전통적인 수출통제 제도의 작동 범위와 유효성은 크게 제한되고 있다. 기존 수출통제 체계는 주로 냉전시대 군사적 위협에 대응하기 위해 마련된 것으로, 무기류나 '이중용도' 품목에 대한 일방적 규제를 중심으로 설계되어 왔다(Paikowsky, 2024). 미국의 경우, 「국제무기거래규정」(International Traffic in Arms Regulations, 이하 'ITAR'이라 한다)과 「수출관리규정」(Export Administration Regulations, 이하 'EAR'이라 한다)을 통해 위성부품, 발사체 관련 부품, 고급 통신장비, 암호화 소프트웨어 등을 통제하고 있고, 이들 규정은 미국 내 기업뿐 아니라 미국 기술이 포함된 제품을 활용하는 외국 기업에도 영향을 미친다(Damast, 2010).

그러나 기술의 발전 속도, 민간 주체의 확산, 공급망의 급속한 글로벌화에 비해 이러한 규제체계는 여전히 경직적이고 예외 허용의 범위가 협소하다는 점에서, 민간 우주산업의 유연한 운용을 제약하는 요인으로 작용하고 있다. 또한 뉴스페이스 시대를 통해 우주부품의 수출입 구조가 양적·질적으로 변화하면서, 과거의 수출통제 정책과 통상 규범의 근본적인 재검토를 촉구하는 계기가 되고 있다.

2. 수출통제상의 우주물품 대상 유형

기존의 우주산업과는 달리, 현대적 의미의 우주산업은 기술 이전과 관련 물품의 거래 양상에서 과거와는 질적으로 다른 복잡성과 정밀성을 보이고 있다. 이에 따라 '우주산업 관련 물품'의 정의와 유형 구분이 수출통제의 핵심 개념으로 부상하고 있다.

일반적으로 '물품'(item)이란 물리적 장비뿐만 아니라 소프트웨어(software), 기술자료(technical data), 알고리즘, 설계도면 등 무형의 기술적 산출물까지 포함하는 넓은 개념이다. 우리나라 「대외무역법」 제19조는 산업통상자원부장관이 국제수출통제체제 등에 따라 수출허가 등 제한이 필요한 '물품등'을 지정·고시하도록 규정하고 있으며, 「전략물자수출입 고시」 제2조 제1호는 '물품등'을 물품(물질·시설·장비·부품), 소프트웨어 등 전자적 형태의 무체물 및 기술로 정의하고 있다. 따라서 통제대상은 유형의 하드웨어에 한정되지 않고, 소프트웨어와 기술 등 무형의 기술적 산출물도 포함된다(Damast, 2010). 수출통제 규범 내에서는

‘system’, ‘subsystem’, ‘subassembly’, ‘component’, ‘part’, ‘accessory’, ‘attachment’ 등 다양한 수준의 기술요소가 존재하며, 이들은 각기 ‘특별 설계 여부’(specially designed) 나 ‘군사적 전용 가능성’에 따라 통제 여부가 결정된다.

미국의 ITAR은 「군용물자 품목목록」(US Munitions List, 이하 ‘USML’이라 한다)에 따라 물품을 세분화하고, 일부는 ‘특별 설계’ 기준에 따라 통제 대상 여부를 구체적으로 정하고 있다. 상무부 관할의 EAR은 민간 및 이중용도 물품을 중심으로 ‘600 시리즈’와 ‘9x515 시리즈’를 통해 세부 규제를 하고 있으며, 최종사용자 및 최종용도에 따른 위험기반 평가에 기초하여 수출통제의 적용 여부를 판단하고 있다(Bartlett and Poling, 2016). 특히, 뉴스페이스 산업의 경우, 단일 완제품이 아니라 모듈형·조립형·혼합형 물품으로 구성된다는 특성과 맞물려 보다 복합적인 기준의 법적 판단이 요구되기도 한다.

이와 같은 우주산업의 구조와 기술 양상의 변화에 따라 수출통제의 적용 범위와 방식 또한 전면적인 재검토가 요구되고 있다. 수출통제는 각국 정부가 국가안보, 외교정책, 대량살상무기 확산 방지 등의 목표를 달성하기 위해 핵심 기술·정보·서비스의 국외 이전을 규제하는 법령 체계로, 민간 및 군사적 용도를 동시에 지닌 이중용도 품목을 대상으로 한다. 전통적으로는 무기체제나 장비의 물리적 수출이 주된 대상이었으나, 기술의 무형화와 융복합화가 진행된 오늘날에는 설계도, 소프트웨어, 위성데이터, 기술자료 등 무형의 산출물까지 포함하는 통합적 접근이 요구되고 있는 것이다.

최근의 주된 변화는 신흥기술(emerging technologies)을 중심으로 나타나고 있다.¹⁾ 인공지능(AI), 나노기술(nanotechnology), 로봇틱스(robotics), 양자컴퓨팅(quantum computing), 정보통신기술(information and communications technology, ICT) 등은 우주산업의 신제품 개발과정에서 필수적으로 활용되고 있으나, 공통된 기술표준의 부재와 불확실한 용도 특성으로 인해 기존의 목록 기반(list-driven) 통제방식으로는 효과적인 규율이 어렵다. 이에 수출통제의 초점은 “무엇을 통제할 것인가”에서 “왜 통제해야 하는가”, 즉 기술의 잠재적

1) 신흥기술은 기술표준이나 분류기준이 명확히 확립되어 있지 않아, 정의 중심의 통제목록(list-based control)에 포함시키는 데에는 상당한 어려움이 따른다. 이에 따라 수출통제 체계에서는 ‘무엇’을 통제할 것인가에 집중하기보다는, 기술의 ‘잠재적 용도’와 ‘위험’을 중심으로 규제의 방향을 재설정할 필요성이 대두되고 있다. 신흥기술의 5가지 속성으로는 ① 근본적 참신성(radical novelty), ② 비교적 빠른 성장속도(relatively fast growth), ③ 일관성(coherence), ④ 두드러진 영향력(prominent impact), ⑤ 불확실성 및 모호성(uncertainty and ambiguity)이 제시된 바 있고, 이러한 속성 중 특히 ‘불확실성’은 수출통제에 있어 신흥기술 규제를 어렵게 만드는 핵심 요소라는 지적이 있다(Rotolo et al., 2015).

용도와 위험성 중심의 기능적 규율로 전환될 필요가 있는 것이다(Creydt and Schulenburg, 2023). 이러한 흐름상 수출입의 중심이 되는 뉴스페이스 우주산업 관련 물품은 그 유형에 따라 다음과 같은 4가지 범주로 구분할 수 있다.

첫째, 위성체 및 탑재체 관련 물품은 가장 중요한 수출입 대상 중 하나이다.²⁾ 위성 본체(satellite bus), 탑재체(payload), 고해상도 센서(high-resolution sensor), 통신 모듈(communication module), 지향제어 장치(attitude control system) 등은 모두 민간과 군 사용도로 양용될 수 있는 특성을 지니며, 이로 인해 ITAR 및 EAR 양자의 규제 대상이 된다(Handelman, 2021). 예컨대, 2014년 미국의 수출통제 개혁 이후, 상업용 위성 관련 항목 중 상당수는 EAR의 '9x515 시리즈'로 이전되어 보다 탄력적인 규제가 가능해졌다. 물론, 고해상도 광학 센서나 레이더 모듈 등은 여전히 ITAR의 엄격한 통제를 받고 있다.

둘째, 발사체 관련 물품은 추진시스템(propulsion system), 연료공급장치(fuel feed system), 위성분리장치(separation mechanism), 유도제어장비(guidance and control equipment) 등으로 구성된다. 이러한 항목들은 대부분 ITAR 제IV류(Category IV)에 따라 군용물자로 분류되며, 「미사일기술통제체제」(Missile Technology Control Regime, MTCR)의 적용을 중복하여 받는 경우가 많다. 이들 물품이 기술자료 또는 설계정보 형태로 이전되는 경우에는 동일하게 수출통제 대상이 되며, 해당 기술이 외국 기업의 완제품에 통합되는 경우에도 미국 원천기술의 사용 여부에 따라 제3국 수출이 제한된다.

셋째, 지상국 장비 및 관련 소프트웨어도 수출통제 체계에서 그 중요성이 커지고 있다. 위성 운용 및 통신에 필수적인 지상국 제어 시스템(ground station control systems), 암호화 장비(encryption equipment), 안테나 제어 소프트웨어(antenna control software) 등은 국가안보 및 사이버 보안과 밀접한 관련이 있다. 암호기술이 포함된 소프트웨어는 EAR Part 740, 772에 따라 통제되며, 해당 물품의 수출에는 미국 정부의 라이선스가 필수적으

2) 인공위성(satellite)은 일반적으로 위성본체와 탑재체라는 2가지 주요 부분으로 구성된다. ① 위성 본체(satellite bus)는 전력 공급, 자세제어(attitude control), 열제어(thermal control), 통신, 컴퓨터 및 추진 시스템(propulsion system) 등 위성의 기본적인 운용 기능을 담당하는 하부구조이며, ② 탑재체(payload)는 과학탐사, 영상촬영, 통신전달 등 위성의 임무 목적에 따라 탑재되는 장비를 말한다. 위성은 임무 목적에 따라 다양한 형태와 크기로 설계되며, 우주 발사와 궤도 환경에서의 생존을 위해 엄격한 테스트 과정을 거친다. 위성은 지상과의 통신을 위해 전파(radio wave)를 사용하여 지상의 안테나와 데이터를 주고받는다. 이때 수신되는 정보는 과학데이터뿐만 아니라 위성의 상태, 위치 정보 등을 모두 포함한다(이에 관하여는 NASA, "What Is a Satellite?", <<https://www.nasa.gov/general/what-is-a-satellite>> (2025. 6. 20. 최종검색) 참조).

로 요구된다. 또한 해당 소프트웨어의 사용 방법에 관한 기술자료(technical data)나 설계 매뉴얼도 별개의 '수출'로 간주되어 통제되고 있다.

넷째, 위성데이터 및 분석정보와 같은 비물리적 산출물도 점차 수출통제의 중요한 대상으로 부상하고 있다.³⁾ 원격탐사를 통해 수집되는 고해상도 영상자료는 데이터 자체의 민감도, 군사적 활용 가능성 등에 따라 통제를 받는다. 미국의 경우, '해양대기청'((National Oceanic and Atmospheric Administration, 이하 'NOAA'라 한다)에서 민간 원격탐사 시스템의 운영 및 데이터 유통을 라이선스 방식으로 통제하며, 해외에 제공되는 고해상도 영상에 대해서는 사전허가 및 조건부 제한을 부과하고 있다(김영주, 2020). 2020년 개정된 NOAA 규정은 일정 수준까지 민간 상업활동을 촉진하는 방향으로 완화되었으나, 특정 지역이나 분쟁지역의 영상데이터는 여전히 수출 규제의 대상이다.

이처럼 뉴스페이스 시대의 우주산업 관련 물품은 단순한 기계적 부품의 수준을 넘어, 소프트웨어, 데이터, 기술자료 등 다양한 형태로 확장되고 있고, 이들 각각이 개별적 수출통제 대상으로 분류되고 있는 상황이다.

3. 우주산업 수출통제에 관한 쟁점

현대 우주산업은 단일한 물리적 제품이 아닌, 광범위한 기술요소와 무형 정보의 융합을 통해 구성되고 있으므로, 수출통제의 핵심 대상인 '물품'의 범위 설정이 과거보다 훨씬 복잡해졌다. 게다가 뉴스페이스에서의 상업성과 기술혁신 속도에 따른 급속한 변화가 이루어지

3) UN 총회가 1986년에 채택한 「우주공간으로부터의 지구 원격탐사에 관한 원칙」(Principles Relating to Remote Sensing of the Earth from Outer Space)에 따르면, 위성데이터는 그 처리 수준에 따라 다음과 같이 3가지 범주로 분류된다(김영주, 2020). ① 1차데이터(primary data)란 위성으로부터 직접 수신된 가공되지 않은 원시(raw) 데이터로, 영상이나 신호가 수신된 상태 그대로 존재하며 아직 어떠한 처리나 해석도 거치지 않은 형태이다. 이는 기계적으로만 해석 가능한 형태로 존재하며, 일반적인 활용을 위해서는 추가적인 사전처리가 필요하다. ② 처리데이터(processed data)는 위성에서 수신된 1차데이터에 대해 보정(correction), 변환(transformation), 필터링(filtering) 등 기술적 처리를 가한 것으로, 사용자가 해석 가능한 형태로 변환된 데이터이다. 이 단계의 데이터는 아직 분석 결과로서 정보적 의미를 부여받기 이전의 기술적 산물로 간주된다. ③ 분석정보(analysed information)란 처리된 데이터를 바탕으로 특정 목적에 따라 분석 및 평가를 수행하여 도출된 정보로, 재난 감지, 환경 변화 분석, 군사 감시, 도시 계획 수립 등 구체적인 활용 목적에 따라 해석된 결과물이다. 이는 고도의 정보적 가치가 부여된 최종 산출물로 간주된다. 이러한 분류는 미국 정부가 제안한 견해가 1970년대 후반 UN 논의 과정에서 반영되어 국제원칙으로 수용된 것으로, 위성데이터의 법적 성격과 수출통제 적용 범위를 해석하는 데 기준이 되고 있다.

고 있다는 점에서 수출입 관리 체계 역시 탄력적인 규율체계를 요구받고 있다. 이와 관련해서는 구체적으로 다음과 같은 논점들이 제기되고 있다.

첫째, 이중용도 품목의 식별과 해석 문제이다. 민·군 양용 가능성을 지닌 이중용도 품목은 그 용도에 따라 통제 여부가 달라지므로, ‘이중성’에 대한 해석은 국가마다 다르게 적용되는 경우가 많다. 예컨대, 고해상도 센서나 위성탑재 통신모듈은 기술적 사양이 유사하더라도 최종용도에 따라 통제 기준이 상이하게 적용될 수 있는 것이다. 무형적 기술이나 소프트웨어, 위성데이터의 경우, 그 잠재적 용도에 대한 판단은 모호하고 주관적일 수밖에 없어, 법규 운용의 명확성·일관성 확보가 중요한 과제로 떠오르는 것이다(Paikowsky, 2024).

둘째, 하드웨어와 소프트웨어·기술 결합에 따른 통제 범위 확대이다. 뉴스페이스 시대의 우주물품은 소프트웨어와 기술자료(technical data)들이 결합된 형태로 제공되는 경우가 많다. 고도의 통제기술이 소프트웨어 또는 펌웨어(firmware) 같은 형태로 구현되는 경우, 물리적 장비는 비통제 품목일지라도 소프트웨어 자체가 통제 대상이 될 수 있는 것이다(Creydt and Schulenburg, 2023). 이에 따라 수출통제의 대상은 하드웨어 중심의 규율에서 벗어나 소프트웨어, 기술자료, 설계도면 등 무형의 정보로 확장되고 있으며, 이러한 복합적 기술거래에 대한 규율 체계 정비가 필요하다.

셋째, ‘통합’ 또는 ‘분해가능성’에 따른 규제 유연성 논의이다. 수출통제 규범에서는 ‘특별 설계 여부’(specially designed), ‘최종용도’, ‘최종사용자’ 등에 따라 통제 여부를 판단하지만, 하나의 시스템이 여러 구성요소의 통합으로 이루어지거나, 역으로 분해 가능한 모듈형 제품으로 구성될 경우에는 규제의 실효성과 예측가능성이 저해될 수 있다(Zeitouni, 2021).

넷째, 국가별 라이선스 체계의 차이와 국제 협력의 필요성이다. 수출통제는 기본적으로 국가주권의 영역에 속하지만, 우주산업은 글로벌 공급망과 기술협력을 전제로 운영되는 산업이기 때문에, 각국 통제체계 간의 조화와 상호인정이 중요하다. 그러나 현실적으로 미국, 유럽연합(EU), 일본 등 주요국의 규제체계가 서로 다르게 설계되어 있다는 점에서, 동일 품목에 대한 수출입 가능성 역시 국가별로 개별적일 수밖에 없다. 이는 국제적인 공동개발이나 다국적 위성 프로그램 추진 등에 장애가 될 수 있는 바, 국제적 기준 마련과 법제 협력 체계 구축이 필요한 상황이다(Kimiagar et al., 2022).

III. 미국의 우주산업 수출통제 체제

1. 수출통제제도 개관

수출통제(export control)는 국가 안보, 외교, 경제적 이익을 보호하기 위해 특정 물품, 소프트웨어, 기술의 국외 이전을 제한하는 규제체계를 의미한다(Creydt and Schulenburg, 2023). 이중용도 기술이 확산되며, 민간용으로 개발된 기술이 군사적 용도로 전용될 수 있는 가능성이 높아진 현대적 기술환경에서는 수출통제의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 우주 산업은 민·군겸용성이 가장 두드러진 영역 중 하나로, 발사체, 위성체, 통신 시스템 등 대부분의 기술이 안보 관련 품목으로 분류될 수 있다는 점에서 수출통제의 핵심 적용 대상에 해당한다.

미국의 수출통제체계는 전술한 바와 같이, ITAR과 EAR이라는 2가지의 연방규정에 근거하고 있다. ① ITAR은 「무기수출통제법」(Arms Export Control Act of 1976)⁴⁾을 근거로 하고 있고,⁵⁾ 군수품, 방위서비스 및 관련 기술의 수출을 국무부(Department of State) 산하 '방위무역통제국'(Directorate of Defense Trade Controls, DDTC)이 관리하고 있다.⁶⁾ ② EAR⁷⁾은 1979년 제정된 「수출관리법」(Export Administration Act of 1979, 이하 'EAA'라 한다)을 근거로 제정되었으며, 민수용(civil use) 또는 이중용도(dual-use) 품목 및 기술을 통제하고 있다. 상무부(Department of Commerce) 산하 '산업안보국'(Bureau of Industry and Security, BIS)이 EAR의 관리주체로 기능한다.

ITAR은 군수품과 방위서비스를 규제 대상으로 삼고 있는데, 국가안보와 직결된 무기체계를 다루고 있다는 점에서 그 통제수준이 매우 엄격한 편이다. 반면에 EAR은 민간 목적의 기술이나 이중용도 품목을 주로 규제하고 있으므로, 통제강도가 비교적 완화되어 있고 특정 조건 하에서는 수출 허가가 훨씬 용이한 편이다. 과거에는 대부분의 우주 관련 기술이 ITAR의 대상이었으나, 2010년대 이후 일부 상업용 위성 기술은 EAR로 이관되어 규제 부담이 다소 완화되었다.

4) 22 U.S.C.A. Ch. 39. Arms Export Control (§ 2751 to § 2799aa-2).

5) 22 U.S.C.A. § 2778.

6) 22 C.F.R. Parts 123-130.

7) 15 C.F.R. §§ 730-780.

〈표 1〉 ITAR과 EAR 비교표

구분	ITAR	EAR
근거 법률	- 1976년 무기수출통제법(Arms Export Control Act of 1976, AECA)	- 1979년 수출관리법(Export Administration Act of 1979, EAA) : 실효 - 2018년 수출통제개혁법(Export Control Reform Act of 2018, ECRA)
관할 기관	- 국무부(State Department) 산하 방위무역통제국(DDTC)	- 상무부(Department of Commerce) 산하 산업안보국(BIS)
규제 대상	- 무기, 방위서비스, 군용 기술 (USML 등재 품목)	- 민수용 및 이중용도 품목 (CCL 등재 품목)
규제 수준	- 매우 엄격 (군수품 중심, 안보 우선)	- 비교적 완화 (조건부 허용 가능성 존재)
우주산업과의 관련성	- 위성, 발사체 등 우주기술 대부분이 전통적으로 포함되었음	- 최근 일부 통신위성, 원격탐사기술 등은 이관되어 EAR 적용 가능
통제 목록	- 군용물자품목목록(United States Munitions List, USML)	- 상용통제목록(Commerce Control List, CCL) - 수출통제분류번호(Export Control Classification Number, ECCN)

자료: 저자 작성

미국의 수출통제제도는 그 역사적 기원이 18세기 독립전쟁 시기로까지 거슬러 올라간다. 현대적인 제도의 출발점은 제1차 세계대전 중 제정된 1917년의 「적성국교역법」(Trading with the Enemy Act of 1917)이며, 제2차 세계대전을 앞두고 일본에 대한 전략물자 수출을 제한하기 위해 제정된 1940년의 「수출통제법」(Export Control Act)⁸⁾이 본격적인 제도 구축이라 할 수 있다(Chapman, 2013). 1940년 수출통제법은 제정 초기 군수물자 중심의 통제에 국한되어 있었으나, 제2차 세계대전 개입 이후인 1942년부터는 그 적용 범위가 모든 물품과 지역으로 확대되었다. 1948년까지 수차례 연장되면서 전쟁 종료 이후에는 남아 있는 통제조치들도 점차 폐지될 것으로 예상되었다. 그러나 미-소 냉전이 심화되면서 새로운 안보 상황에 대응하기 위해, 1949년 새로운 법률 형태로 「수출통제법」이 다시 제정(re-enacted)되었다. 이후, 한국전쟁 발발을 계기로, 수출통제가 단순한 경제적 물자 확보 차원을 넘어 국가안보 및 외교정책의 수단으로 기능하게 되었고, 냉전 시기에는 미국 정책

8) 1940년의 수출통제법은 미국 루즈벨트 행정부가 전쟁 이전 상황에서 전략물자의 국내 부족을 방지하고, 일본에 대한 군사물자 수출을 제한하기 위해 제정한 초기 수출통제 입법이다. 이 법은 원래 대통령 포고령의 형태로 시작되어, 항공기 부품·화학물질·광물 등의 수출을 허가제 대상으로 지정하였고, 일본의 인도차이나 침공 억제를 주요 외교 목표로 삼았다. 법령에 따르면, 대통령이 국가안보상 필요하다고 판단하는 경우, 군수품·공구·재료 등의 수출을 제한할 수 있도록 규정하고 있다.

에 비우호적인 국가들(공산권)에 대한 전략물자 수출을 차단하는 수단으로 활용되었다. 또한 1951년 제정된 「상호방위원조통제법」(Mutual Defense Assistance Control Act)은 미국의 경제·군사 원조를 연계하여, 제3국과의 공조 아래 수출통제를 다자적 체계로 확산시키는 계기가 되었다.

전후기에는 냉전 질서 하에서 미국과 서방국가들이 기술이전 통제를 목적으로 1948년 ‘다자간 수출통제조정위원회’(Coordinating Committee for Multilateral Export Controls, 이하 ‘CoCom’이라 한다)를 설립하였다. CoCom은 회원국 간 합의를 통해 민감 품목 목록을 설정하고, 공산권 국가에 대한 수출을 제한하는 역할을 수행하였다.

1970년대 미국은 급변하는 국제정세 속에서 자국의 전략적 자산인 기술과 물자의 해외이전을 통제하고, 이를 통해 국가안보, 외교정책, 국내 공급 안정이라는 목표를 실현하기 위해 1979년 EAA를 제정하였다. EAA는 냉전기 동서 진영 간 기술경쟁과, 제3세계로의 민감기술 확산 우려가 커지는 상황에서, 보다 종합적이고 체계적인 수출통제 권한을 연방정부에 부여하기 위한 목적에서 입법되었다. 이러한 미국의 수출통제 정책은 국제적 맥락 속에서 점차 다자간 조율체제로 확장되었다. 1990년대 공산권의 몰락과 함께 CoCom이 해체되었고, 보다 개방적이고 투명한 수출통제체제를 지향하는 움직임이 나타났다. 이에 따라 1996년 「바세나르 체제」(Wassenaar Arrangement)⁹⁾가 창설되었다.

한편, 1987년 미국을 비롯한 7개국은 대량살상무기 운반수단인 미사일 기술의 확산을 제한하기 위해 별도로 「미사일기술통제체제」(Missile Technology Control Regime, MTCR)라는 다자간 체제를 설립하였고, 이 MTCR에 의해, 로켓 시스템, 우주발사체, 무인항공기, 관련 소프트웨어, 우주산업에 관한 전반적인 기술 등이 주요 통제 대상에 포함되었다. 미국은 MTCR과 바세나르 체제의 기준을 EAR 및 ITAR에 적극 반영하고 있다. 예컨대, MTCR의 통제목록은 EAR 내 CCL(Category 9 등)에 상당수 반영되어 있으며, 바세나르 체제의 ‘민감’ 및 ‘매우 민감’ 품목 기준 역시 수출통제분류번호(ECCN)에 영향을 주고 있다.

미국의 기술패권 경쟁 심화와 중국 전체 전략이 본격화되면서, 제2기 트럼프 행정부에서는 우주산업을 포함한 전략기술 전반에 대한 수출통제를 안보 중심으로 전환하면서 강경기조를 채택하였다(Rahman, 2025). 중국의 우주기술 흡수 가능성에 대한 경계가 강화되었

9) 바세나르 체제는 CoCom의 후속체제로서 재래식 무기 및 이중용도 품목에 대한 수출을 통제하며, 회원국 간의 정보 교환 및 수출정책 조율을 통해 국제 안보와 지역 안정에 기여하는 것을 목표로 한다.

고, 위성, 센서, 통신장비 등 이중용도 우주기술에 대한 ECCN 재분류, 라이선스 심사 등이 구체적으로 시행되었다. 중국우주과학기술집단공사(CASC) 및 자회사를 포함한 다수의 중국 우주 관련 기업들이 BIS의 '수출제한 명단'(Entity List)에 등재되면서, 미국 기술이나 소프트웨어가 포함된 항목의 수출들은 사실상 차단되었다.¹⁰⁾ 이처럼 트럼프 행정부의 수출통제 정책은 「수출통제개혁법」, ITAR, EAR 등을 법적 기반으로 하여, 중국을 겨냥한 수출제한 수단으로 적극 활용되고 있다. 우주기술의 주도권 유지와 국가안보 중심의 기술통제 전략 강화라는 점에서 수출통제제도가 이용되고 있는 것이다.

2. 무기수출통제법 및 ITAR 체제

1) 의의 및 특성

우주산업 물품의 통제체제로 첫 번째는 1976년의 「무기수출통제법」¹¹⁾과 ITAR 체제이다. ITAR은 미 국무부가 제정·운용하는 연방규정(Code of Federal Regulations, 이하 'C.F.R.'이라 한다)으로, 방위산업과 군사기술에 해당하는 물품 및 정보 수출을 통제함으로써 국가안보를 보호하고 미국의 외교정책 목적을 실현하는 것을 주요 목표로 한다. ITAR은 「무기수출통제법」의 집행을 위한 시행규정으로, 연방규정 제22편 제I장 M절(22 C.F.R. Chapter I, Subchapter M, Part 120-130)에 규정되어 있다. 국무부 산하의 방위무역통제국에 의해 운용·집행되고 있다. 수출통제 집행에는 국토안보부(Department of Homeland Security, DHS)의 이민관세단속국(Immigration and Customs Enforcement, ICE) 소속 특수요원 및 국방부(Department of Defense, DoD)도 일부 관여한다(Hirschhorn, 2021).

ITAR은 USML에 등재된 방위물자(defense articles)와 방위서비스(defense services), 관련 기술자료(technical data)를 그 규제 대상으로 삼는다(Kimiagar et al., 2022).¹²⁾ USML은 발사체(launch vehicles), 미사일(missiles), 무기 등과 같은 물리적 물품은 물론,

10) 이미 2020년 발표된 MEU(Military End-User) 규칙을 통해 외국 군사 최종사용자 및 군사 목적 사용 가능성이 있는 해외 기업에 대한 기술이전이 제한되었고, 이는 우주발사체, 위성추진시스템, 센서 및 정밀부품 등을 포함한 광범위한 항목에 영향을 미쳤다. 트럼프 행정부는 이를 통해 상업적 민간 우주기업이라 하더라도 외국 군사기관과 연계된 경우에는 원칙적으로 수출을 불허하는 강력한 통제기조를 확립한 바 있다.

11) Arms Export Control Act of 1976, Pub. L. 94-329, 90 Stat 729, 22 U.S.C.A. § 2751 *et seq.*

12) 22 C.F.R. § 120.3.

관련 도면(drawings), 소프트웨어, 기술문서(technical documentation) 등 무형적 정보까지 포함한다. ITAR 제121.1조는 총 21개의 범주(Category I~XXI)로 세분하고 있는데, 이 중 제IV범주(로켓·미사일·폭탄 등) 및 제XV범주(우주선·우주장비 등)가 우주산업과 밀접한 관련을 가진 범주라 할 수 있다(Mirmina and Schenewerk, 2022).¹³⁾

ITAR에 따른 규제는 물리적 수출에 그치지 않는다. 미국 내에서 외국인에게 기술을 설명하거나 보여주는 ‘암묵적 수출’(deemed export)도 ITAR의 규제 대상이며, 외국인 직원이 USML 품목에 접근하는 것도 ‘재이전’(retransfer)으로 간주되어 허가가 필요하다(Klubera, 2001). 해외에서 발생하는 재수출·재이전뿐 아니라, 미국 내 기업의 네트워크 접근, 클라우드 저장소 접근, 외국인 방문자 접촉 등 모든 디지털·물리적 행위에 적용될 수 있다.

실제로, ITAR은 물리적 이전보다 정보와 기술 확산을 중심으로 규제 체계를 구성하고 있고, 이와 관련하여 다양한 유형의 수출승인 방식이 존재한다(Bartlett and Poling, 2016). 예컨대, 일회성 물품 수출에는 DSP-5 라이선스¹⁴⁾가 요구되며, 기술 논의나 훈련을 포함한 방위 서비스 제공에는 기술지원협정(Technical Assistance Agreement, TAA), 제조기술 이전에는 제조허가협정(Manufacturing License Agreement, MLA)이 요구된다. 고성능 또는 기밀등급 품목의 경우에는 DSP-83(비양도·비사용각서) 제출이 추가로 요구되기도 한다(Kimiagar et al., 2022).

ITAR은 협력사업(Armaments Cooperative Projects)을 통해 미국 정부와 외국 정부 간 공동개발·공동조달을 허용할 수 있고, 다국적 방위산업 프로젝트에도 조건부 수출 승인을 부여하는 구조를 갖추고 있다. 반면, ITAR 제126.1조에 따라 중국, 북한, 이란, 시리아, 쿠바 등 특정 국가에 대해서는 일체의 수출이 금지된다. 이들 국가에 대한 기술이

13) 22 C.F.R. § 121.1.

14) 미 국무부 방위무역통제국은 ITAR에 따라 무기목록에 해당하는 방위물자 및 기술자료의 수출입을 위한 다양한 허가양식(Form DSP)을 운영하고 있다. 크게 Form DSP-5, Form DSP-61, Form DSP-73 라이선스 양식으로 구분된다. 우선 ① DSP-5 라이선스는 USML에 등재된 비분류(unclassified)의 방위물자 및 기술자료를 외국인 또는 외국국가로 영구적으로(permanent export) 수출할 때 사용하는 기본적인 수출허가 양식이다. 방위서비스(defense services)는 포함되지 않으며, 영구적 이전(permanent transfer)에 한정된다. ② DSP-61 라이선스는 비분류 방위물자의 일시적 수입(temporary import)을 위한 허가 양식이다. 미국 내에서의 전시, 시험, 수리 등의 목적으로 일시 반입할 때 활용된다. ③ DSP-73 라이선스는 비분류 방위물자의 일시적 수출(temporary export)을 위한 허가 양식으로, 해외 전시, 시연, 시험 등을 위한 단기 반출 시 사용된다. 이러한 라이선스 양식은 각각 목적에 따라 구분되며, 모든 허가는 신청 기업이 사전에 방위무역통제국에 등록되어 있어야 신청 가능하다. 특히 DSP-5 라이선스는 우주산업에서 위성 본체, 구성품, 기술자료 등을 외국 사업자에게 이전할 때 핵심적으로 사용되는 수출 허가 형식이다.

전은 직접적인 수출은 물론, 제3국을 통한 우회 수출, 복수국적 외국인의 접근까지도 모두 제한된다.¹⁵⁾

ITAR의 광범위한 규제는 국가안전보장이라는 측면뿐만 아니라, 민간 우주기업의 활동에도 지대한 영향을 미쳐 왔다. 1996년 인텔샛(Intelsat) 708 위성발사 실패 사건¹⁶⁾ 후, 해당 위성의 제조사인 Space Systems/Loral은 중국과의 공동 사고조사 과정에서 민감한 기술자료를 이전한 혐의로 ITAR 위반 조사를 받았다. 이는 미국 내 수출통제 집행의 전환점을 이룬 사건으로 평가되고 있는데, 해당 사건을 계기로 상업용 위성기술은 다시 ITAR의 통제하에 편입되었고, 이로 인해 2013년까지 미국의 위성산업은 크게 위축되어 글로벌 시장점유율의 절반 이상을 상실했다는 평가를 받기도 하였다(Kimiagar et al., 2022).

2014년부터는 일부 상업용 위성과 관련 구성품을 EAR 체제로 재이관하는 규제 완화가 이루어졌고, 2024년의 「국방수권법」(National Defense Authorization Act, NDAA)을 통해 영국과 호주에 대해 일부 ITAR 품목의 라이선스 면제를 인정하는 제도적 변화도 있었다. 그럼에도 불구하고, ITAR은 여전히 미국 방위산업 기술의 대외 이전을 규율하는 핵심 체계로 유지되고 있고, 향후에도 우주산업 기술의 전략적 성격상 규제효과가 지속될 것으로 보여진다.

2) 우주산업물품에 관한 통제구조

우주산업에 있어 ITAR의 적용은 USML 중 제IV범주(Category IV)와 제XV범주(Category XV)를 중심으로 이루어진다. USML은 「무기수출통제법」에 따라 지정된 방위물자(defense articles), 방위서비스(defense services), 및 관련 기술자료(technical data)를 규율하며, 해당 품목 또는 서비스의 해외 이전은 원칙적으로 미 국무부의 수출허가(DSP

15) 22 C.F.R. § 126.1(d).

16) 인텔샛 708 위성 발사 실패 사건은 1996년 2월 15일, 중국 쓰촨성 시창(西昌) 위성발사센터에서 창정(长征, Long March) 3B 로켓을 이용해 발사된 미국제 통신위성 Intelsat 708이 이륙 직후 추락하여 폭발한 사고를 말한다. 발사체는 발사 약 22초 만에 궤도를 이탈하여 인근 마을에 추락하였고, 공식적으로는 수십 명의 사망자가 발생한 것으로 알려져 있다. 이 위성은 미국 위성 제조업체 Space Systems/Loral (SS/L)이 제작한 것으로, 사고 이후 SS/L은 중국 당국과 함께 발사 실패 원인을 분석하였으며, 이 과정에서 미국 정부는 방위 관련 기술자료가 중국 측에 이전되었을 가능성이 있다고 판단하였다. 이에 따라 미 국무부는 무기수출통제법 및 ITAR 위반 혐의로 SS/L에 대해 조사를 개시하였고, 이후 2002년 SS/L은 미화 2천만 달러의 민사 합의를 하게 되었다. 이 사건은 미국 정부가 상업용 위성기술을 ITAR 체제로 이관하도록 하는 결정적 계기가 되었으며, 1999년 의회의 '콕스 보고서'(Cox Report) 발간으로 이어져 수출통제 정책 전반에 중대한 영향을 미쳤다.

Form 등)를 필요로 한다. USML은 총 21개 범주로 구성되며, 그중 제IV범주는 발사체 관련 품목, 제XV범주는 우주선 및 관련 기술에 초점을 맞추고 있다. 이처럼 우주산업 관련 분야는 경우에 따라 상업적·민간 목적의 기술과 장비조차도 규제 대상이 되는 경우가 많다 (Creydt and Schulenburg, 2023).

첫째, USML 제IV범주는 로켓, 미사일, 발사체 등 군사적 응용 가능성이 높은 발사 시스템을 중심으로 규율하고 있다. 제IV범주에는 로켓, 우주발사체(space launch vehicles), 유도탄(guided missiles), 폭탄(bombs), 어뢰(torpedoes), 기뢰(mines), 수류탄(grenades) 등과 같은 주요 무기체계가 포함되며, 이들을 운용하기 위한 발사대 launchers, 점화장치(ignition devices), 제어기기(control systems) 등 보조장비도 함께 포함된다. 또한 발사체의 추진기관(power plants), 관련 부품·부속품·구성품, 이에 대한 기술자료(technical data)와 방위서비스(defense services) 역시 통제 대상에 속한다. 품목들 중 일부는 MTCR의 대상이 되거나, 중요군사장비(Significant Military Equipment, SME)로 분류되어 특별 표시(MT 또는 * 기호)를 통해 더욱 엄격한 규제를 받는다(OSC and OCST, 2017).

둘째, USML 제XV범주는 우주선(spacecraft) 및 관련 장비에 대한 포괄적인 규정을 담고 있고, 여기에는 군사·민간·상업 목적을 불문하고 일정 기준을 충족하는 우주 시스템을 모두 포함한다. 이 범주에는 위성(satellites), 우주탐사선(space vehicles), 기타 우주선(spacecraft)이 포함되며, 이를 제어하기 위한 지상통제시스템(ground control systems)이나 훈련시뮬레이터(training simulators), 부품·구성품·시스템 등도 해당된다. 더불어, 이들 항목에 관련된 기술자료와 방위서비스 역시 모두 규제 대상이 된다. 특히 제XV범주는 방사선 내성부품(radiation-hardened components), 정밀 영상처리 기능을 갖춘 원격탐사위성(remote sensing satellites) 등 상업용 위성기술까지도 포함할 수 있는 구조이기 때문에, 민간 우주기업의 활동 전반에 걸쳐 광범위한 ITAR 규제가 이루어지고 있다(OSC and OCST, 2017). 결과적으로는 미국산 기술 또는 구성품이 포함된 시스템 기술이전, 공동개발, 계약 체결 등 일련의 행위가 미 국무부의 수출허가 없이 이루어질 수 없는 법적 구조가 형성되고 있는 것이다.

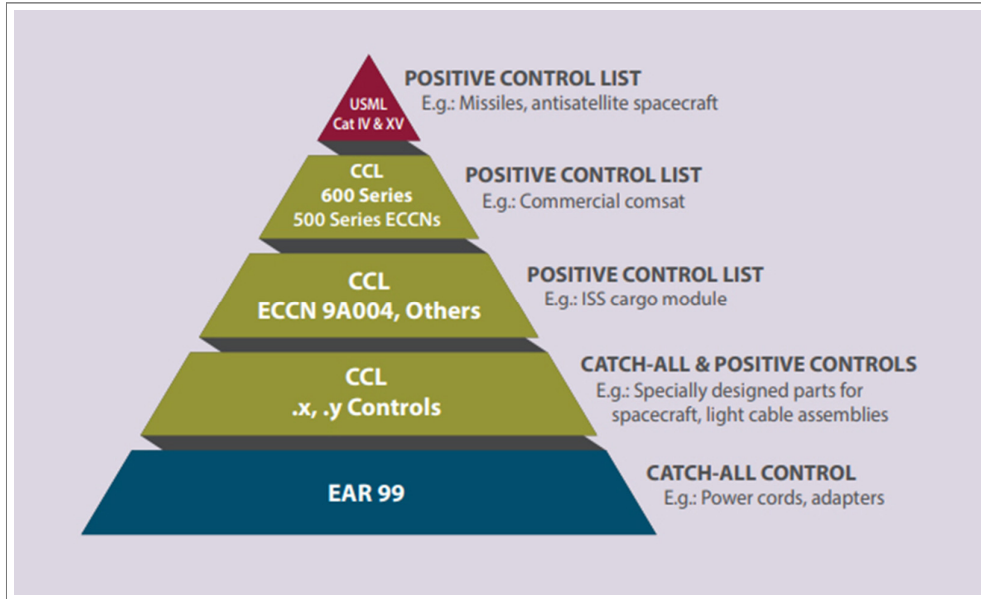
셋째, ITAR은 물리적 물품의 수출만을 규제하는 것이 아니라, 특정한 기술 서비스의 제공 자체도 방위서비스로 간주하여 규제하고 있다. 발사체 통합 지원이나 발사 실패 원인 분석 등은 USML 제IV 및 제XV 범주에서 규정된 방위서비스에 해당한다. 예컨대, 외국 기

업의 위성을 발사체에 통합하는 과정에서 기술지원을 제공하거나, 현장의 발사장 설치나 테스트 활동을 지원하는 경우, 또는 발사 실패에 대한 기술적 분석을 수행하는 경우에는 해당 기술자료가 실제로 이전되지 않더라도 수출행위로 간주된다(Kimiagar et al., 2022). 이러한 기술 서비스는 대상 장비의 관할이 ITAR 또는 EAR 해당 여부에 관계없이, 장비의 국적이나 소유 여부와 무관하게 수출허가가 요구되고 있다. 이에 국제우주발사 프로젝트에 참여하는 민간 기업들은 국무부의 사전허가 없이 외국 파트너에게 기술설명이나 훈련 등을 제공할 수 없고, 모든 협업 과정에서 사전적인 법률검토가 필수적으로 행해진다(OSC and OCST, 2017).

넷째, 2018년의 수출통제개혁법 제정 이후에는 기존의 관할 전환 규칙인 ‘전체관할 전환 규칙’(see-through rule)이 폐지되고, ‘통합규칙’(integration rule)이 도입되었다. 기존에는 ITAR 통제 품목이 위성에 통합되면 해당 위성 전체가 ITAR 관할로 전환되었으나, 새로운 규정하에서는 일정한 조건을 충족할 경우 위성이 EAR 관할로 유지될 수 있다. 즉, ITAR 통제 부품이 EAR 통제 우주선에 비가역적으로 통합되더라도, 해당 우주선이 USML 제 XV(a)항의 요건을 충족하지 않는다면 전체 시스템은 여전히 EAR 통제 대상으로 남는 것이다. 예컨대, USML 제XV(a) 주석에 따르면, “ECCN 9A004 또는 9A515에 해당하는 우주선은 USML 품목이 통합되었더라도 여전히 EAR의 적용을 받는다”고 명시하고 있고, 제XV(e) 주석에서는 ‘호스트 페이로드’(hosted payload)¹⁷⁾가 포함되어 있더라도 ECCN 9A004 또는 9A515.a에 해당하는 우주선은 EAR 관할로 유지된다”고 규정하고 있다. 민간기업이 미국산 부품을 사용하더라도 일정한 조건을 충족하면 까다로운 ITAR 규제를 피할 수 있어, 기술 개발과 국제 협력을 보다 자유롭게 추진할 수 있게 된 것이다.

17) 호스트 페이로드(hosted payload)란, 상업용 또는 정부용 위성 플랫폼에 제3자가 독립적으로 운용할 임무 장비(payload)를 추가로 장착하는 형태의 탑재 방식을 의미한다. 이는 위성의 주 임무(primary mission)와는 별도로, 다른 기관 또는 다른 목적을 위한 센서나 통신장비 등을 여유 공간에 공동 탑재하는 방식으로, 예컨대 상업통신위성에 미 국방부나 해양대기청의 탐지 장비 등을 함께 실어 발사하는 경우가 이에 해당한다. 이 경우, 위성 본체는 ‘호스트(host)’가 되고, 추가 장착되는 장비가 ‘호스트 페이로드(hosted payload)’로 구분된다.

〈그림 1〉 우주산업 물품통제 목록 구분



자료: OSC and OCST, 2017.

3) 제재 및 관리감독

ITAR 위반 시에는 민·형사상의 제재가 동시에 부과될 수 있고, 사안의 중대성에 따라 수출금지, 벌금, 규정준수 감시관 지정 등 다양한 조치가 강구되고 있다.¹⁸⁾ 예컨대, 2007년에는 ITT사가 ‘야간투시장비’(night vision technology)를 무단 재이전한 혐의로 미화 1억 달러의 제재를 받은 바 있다. ITT가 해당 기술을 중국 등으로 재이전하는 과정에서 승인 없이 기술자료를 공유하였다는 점에서 강력한 제재가 가해졌다.

ITAR은 해외 자회사나 협력사를 통한 우회적 기술이전도 동일하게 규제하며,¹⁹⁾ 제3국 국적자의 네트워크 접근조차도 재이전으로 간주한다.²⁰⁾ 이는 미국 내 기업뿐 아니라, 해외 기업에도 동일하게 적용되며, ITAR 품목이 포함된 외국산 완제품에 대해서도 재수출을 위해서는 DSP-5 라이선스와 같은 사전 승인 등이 요구된다.²¹⁾

이처럼 ITAR 체제는 미국의 국가안보 보장 및 군사기술 유출 방지라는 목적 하에 설계된

18) 22 C.F.R. § 127.1 & § 127.3.

19) 22 C.F.R. § 120.17(a)(4), § 124.13.

20) 22 C.F.R. § 120.17(a)(2), § 120.19.

21) 22 C.F.R. § 123.9, § 123.1.

수출통제 장치로서, 우주산업 분야에서도 핵심적인 법제도로 기능해 왔다. 그러나 민간 기술의 군사전용 가능성을 기준으로 하는 일괄 통제하는 방식은 상업활동에 있어 상당한 제약을 초래하고 있고, 글로벌 협력 기반의 위성개발 및 발사 프로젝트에 있어 실무적·경제적 부담을 증가시키는 요인이 되고 있다는 지적도 있다(Creydt and Schulenburg, 2023).

3. 수출통제개혁법 및 EAR 체제

1) 의의 및 특성

EAR은 상무부 산하 산업안보국(BIS)이 관할하는 이중용도(dual-use) 및 민감성이 낮은 군사물자 수출, 재수출(re-export), 이전(transfer) 등을 규율하는 수출통제 연방규정이다. 이는 원래 1979년에 제정된 EAA를 근거로 운용되어 왔다. 그러나 EAA는 본래 일정 기간 후 자동 종료되는 ‘일몰조항’(sunset provision)을 포함하고 있었고, 2001년 8월 20일을 끝으로 법적 효력이 공식적으로 만료되었다. 이후 미국 의회의 법률 갱신이 실패하여 EEA는 종국적으로 실효되었다. 다만, 미국 정부는 수출통제체제를 유지하기 위해 「국제비상경제 권한법」(International Emergency Economic Powers Act, IEEPA)에 근거하여 수출통제를 유지하였다.

2001년 9·11 테러 발생 이후, 테러조직과 불안정 국가로의 기술 이전을 차단하기 위한 수출통제가 대폭 강화되었으며, 중동 지역에 대한 전략물자 통제와 대량살상무기 관련 확산 방지 정책이 핵심 이슈로 부상하였다. 안보 중심의 이러한 통제 기조는 2010년대에도 이어졌고, 오바마 행정부는 기존 수출통제제도의 복잡성 및 비효율성을 해소하기 위해 ‘수출통제개혁계획’(Export Control Reform Initiative)을 추진하였다(오영해·김희준, 2019). 이는 수출허가 체계의 간소화, 군수품과 이중용도 품목 간의 합리적 재분류, 단일 통제목록 구축 등을 목표로 하였으며, 2018년 「수출통제개혁법」(Export Control Reform Act, ECRA)이 제정됨으로써 제도적으로 정착되었다. 수출통제개혁법은 기존의 EEA의 공백을 정식 입법으로 대체함으로써 미국의 이중용도 품목 및 민간 기술에 대한 수출통제의 법적 기반을 안정적으로 복원하였다. 아울러, EAA를 대체하며, EAR 운영의 상위 법령으로서 산업안보국의 권한을 명시적으로 규정하고 있다.²²⁾ 2018년 수출개혁법과 EAR 체제상의 특

22) 50 U.S.C.A. §§ 4801-4852.

정을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

첫째, EAR은 국경 간 이동만을 규율하는 것이 아니라, 미국 내 외국인에게 기술 또는 소스코드를 제공하는 행위인 ‘암묵적 수출’(deemed export)도 ‘수출’로 간주하고,²³⁾ 외국에서 미국산 기술을 이용해 제조된 제품의 제3국 이전에 대해서도 통제권을 행사할 수 있도록 ‘직접생산물규칙’(direct product rule)을 적용한다.²⁴⁾ 이는 미국 기술 기반 외국산 제품도 EAR의 적용 대상이 될 수 있음을 의미하는 것이다.

둘째, EAR은 수출통제의 실효성을 확보하기 위해 기술 통제, 최종용도 통제, 최종사용자 통제의 3가지 규제 원칙에 기반하여 설계되었다(Kimiagar et al., 2022). 이는 수출 대상 품목의 성질뿐 아니라, 그 사용 목적과 수취 주체에 따라 다층적 통제를 가하는 방식으로, 이중용도 기술의 유출을 방지하고 국가안보를 유지하기 위한 제도적 장치로 기능한다.

우선 ① 기술 통제(technology controls)는 특정 품목 또는 기술이 ‘상용통제목록’(Commerce Control List, 이하 ‘CCL’이라 한다)에 등재되어 있는지를 기준으로 수출허가 요건을 결정하는 방식이다. CCL은 0번부터 9번까지의 총 10개 분야(category)와, A부터 E까지의 5개 제품군(product group)으로 구성되며, 각 항목은 ‘수출통제분류번호’(Export Control Classification Number, 이하 ‘ECCN’이라 한다)를 부여받아 해당 품목의 통제 사유(reason for control) 및 허가요건이 규정된다. 우주산업과 관련된 주요 품목은 제9범주(Aerospace and Propulsion)에 집중적으로 포함되어 있다.²⁵⁾

다음으로, ② 최종용도 통제(end-use controls)는 수출 대상 물품·기술이 최종적으로 사용될 목적이 핵무기 개발, 미사일 제작, 화학·생물무기 제조 등 금지된 활동에 해당하는 경우, 그 수출을 원천적으로 제한하는 제도이다. 해당 통제는 수출자가 최종용도를 충분히 파악하고 확인할 의무를 부담하게 함으로써, 물품의 오용을 방지하는 사전 예방적 규율체계로 기능한다.²⁶⁾

마지막으로, ③ 최종사용자 통제(end-user controls)는 수출 물품의 최종 수취인이 미국 정부에 의해 제재 대상자로 지정된 경우, 해당 거래를 금지하는 통제 방식이다. 대표적으로 〈Entity List〉, 〈Denied Persons List〉, 〈Unverified List〉 등에 등재된 개인 또는 기관은

23) 15 C.F.R. § 734.13(b).

24) 15 C.F.R. § 734.9.

25) 15 C.F.R. §§ 738.2, 774.1.

26) 15 C.F.R. § 744.2-744.5.

사전에 명시된 라이선스를 취득하지 않는 한 수출·재수출의 상대방이 될 수 없다. 이러한 명단은 산업안보국이 지속적으로 갱신·공표하며, 수출자는 거래 상대방의 명단 해당 여부를 사전에 확인하여야 한다.²⁷⁾

셋째, EAR은 CCL에 등재되지 않은 일반 소비재 또는 상업용 품목에 대해서도 'EAR99'라는 별도 분류를 통해 포괄적인 통제 체계를 유지하고 있다. EAR99에 해당하는 품목은 일반적으로 수출허가 없이 자유롭게 수출이 가능하지만, 수출 대상이 금수조치 대상국, 예컨대, 북한, 이란, 쿠바 등의 국가이거나 미국 정부의 제재 대상 명단에 등재된 최종 사용자일 경우, 예외적으로 수출허가가 요구된다. 이를 통해 EAR은 CCL에 직접 포함되지 않은 광범위한 품목군에 대해서도 기본적인 규제 구조를 유지함으로써 통제의 사각지대를 최소화하고 있다.²⁸⁾

넷째, EAR 체제는 산업안보국의 관할 아래 독자적으로 운영되지만, 국무부, 재무부, 에너지부, 국방부 등 연방정부의 다른 부처가 소관하는 품목에 대해서는 명시적으로 관할권이 배제됨으로써 상호 간 권한 중복이 방지되어 있다. 예컨대, 무기류 및 방위서비스는 국무부가 관리하는 ITAR이 적용되며, 핵 관련 기술은 에너지부(Department of Energy, DOE) 또는 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC)의 통제를 받는다. 재무부(Department of the Treasury) 산하 '해외자산통제국'(Office of Foreign Assets Control, OFAC)이 관할하는 경제제재 품목도 EAR의 적용 대상에서 제외된다. 학술기관의 기초연구 결과, 공개된 출판물, 특허출원, 원격탐사 데이터 등의 경우에는 EAR 적용이 면제된다.²⁹⁾

다섯째 수출개혁법과 EAR 체제는 국가안보 보호와 민간기술의 국제경쟁력 확보라는 두 정책 간의 균형이 과제인데, 우주산업 분야에서 그러한 조율 기능의 중요성이 가중되고 있다. 예를 들어, 통신·항법·관측위성 등의 상업위성, 위성데이터 지상 수신기, 우주탐사 장비 등은 EAR에 따라 상대적으로 유연한 규제를 받고 있다(Kimiagar et al., 2022). 이는 상업 우주활동의 활성화와 기술 수출을 지원하기 위한 정책적 고려가 반영된 것이다. 반면에 자율추적 기능을 탑재하거나 군사적 목적성이 내재된 고성능 우주기술은 여전히 ITAR의 적용을 받아 엄격한 통제를 받고 있다.

27) 15 C.F.R. Part 744, Supplement No. 4.

28) 15 C.F.R. §§ 734.3(c), 738.1(d).

29) 15 C.F.R. §§ 734.3-734.5, 734.7.

2) 우주산업물품에 관한 통제구조

미국의 상업용 및 이중용도 우주기술에 대한 수출통제는 EAR에 근거하여 이루어진다(Ellzey, 2020). EAR의 통제 대상은 EAR의 부속서 형태로 제공되는 CCL에 등재된 품목으로 한정된다. 산업안보국의 인·허가 권한하에 수출 또는 재수출이 통제되는 품목, 소프트웨어, 기술 등을 포괄적으로 규정하고 있다.³⁰⁾

CCL은 총 10개의 기술 분야(Category 0~9)로 구성되며, 각 기술 분야는 다시 (A) 장비·부품, (B) 시험 및 생산장비, (C) 재료, (D) 소프트웨어, (E) 기술로 세분화된 5개의 제품군(product groups)으로 나뉜다(KOTRA·법무법인 광장, 2022). 이 가운데 우주산업 관련 품목은 제9범주(category 9: Aerospace and Propulsion)에 포함되며, 위성체, 우주발사체, 지상통제시스템, 우주선 부품 및 탑재체(payload) 등과 관련된 대부분의 항목이 이 범주에 해당한다(Ellzey, 2020). 각 품목은 ECCN이라는 고유번호로 분류되고, 이 번호를 통해 통제 사유(reason for control), 적용 국가, 허가 요건 및 예외 가능 여부가 결정된다.³¹⁾ 예컨대, ECCN 9A515의 경우, 일부 항목에 대해 미사일기술(missile technology, MT) 통제가 적용되며, 이는 해당 품목이 핵탄두 방호 목적의 미사일에 사용될 수 있는 경우를 포함한다. 이에 따라 해당 품목은 ‘라이선스 예외 STA’(Strategic Trade Authorization)³²⁾의 적용이 제한된다.³³⁾

수출통제개혁 정책의 일환으로, 미국은 기존 ITAR에 따라 통제되던 일부 군사물자 및 위성 관련 품목을 보다 유연한 통제가 가능한 EAR 체제로 이관하였는데, 이 과정에서 EAR 내에 ‘ECCN 600 시리즈(600 series)’와 ‘ECCN 500 시리즈(9x515 series)’라는 특수 ECCN 체계를 도입하였다.

우선, ECCN 600 시리즈는 기존의 USML에서 제거되었으나 여전히 일정 수준의 민감성을 지닌 군사물자를 대상으로 하는데, CCL 내에서도 다른 일반 품목에 비해 상대적으로

30) 15 C.F.R. § 774.

31) 15 C.F.R. § 738.

32) 라이선스 예외 STA는 EAR에 규정된 수출허가 면제 제도 중 하나로, 미국이 전략적 동맹관계를 유지하는 특정 국가들에 대해 일부 통제 품목을 라이선스 없이 수출하거나 재수출할 수 있도록 허용하는 제도이다(15 C.F.R. § 740.20). 이러한 예외는 국가안보 또는 지역안정 등 일정한 통제사유가 적용되는 품목에 대해 지정 국가로의 수출을 촉진하기 위해 도입된 것이다. 다만, STA 예외 적용을 위해서는 수출업자가 수출 대상 품목의 ECCN, 적용 가능성, 수입자의 인증 절차, 문서보관 의무 등을 충족해야 한다. 아울러, 모든 CCL 품목이 해당되는 것도 아니다. 예컨대, ECCN 9A515와 같이 미사일 기술 통제가 적용되는 민감 품목의 경우에는 STA 대상에서 제외될 수 있다.

33) 15 C.F.R. § 740.20(b)(2)(iii).

엄격한 통제 대상이 된다. 이들 품목은 캐나다를 제외한 대부분의 국가에 대한 수출 및 재수출에 있어 산업안보국의 라이선스가 요구되며, 대부분의 EAR 품목보다 엄격한 통제체계를 적용받는다.³⁴⁾

다음으로, ECCN 500 시리즈(9x515 시리즈)는 위성기술 관련 품목 중 상업적 또는 이중 용도로 간주되어 USML 카테고리 XV에서 삭제된 항목들을 EAR의 CCL로 이관하면서 생성된 별도의 통제체계이다. 여기에는 다음 표와 같은 ECCN 품목이 포함된다.

〈표 2〉 ECCN 500

ECCN	품목 상세
9A515	우주선(spacecraft), 지상통제시스템 및 훈련 시뮬레이터(ground control systems and training simulators), 마이크로전자회로 및 단일 전자부품(microelectronic circuits and discrete electronic components), 우주복(pressure suits), 원격탐사위성 구성품(remote sensing satellite components), 특수 설계 부품, 구성품, 액세서리 및 부착물(specially designed parts, components, accessories, and attachments)
9B515	관련 시험·검사·생산 장비(test, inspection, and production equipment)
9D515	관련 소프트웨어
9E515	관련 기술

자료: OSC and OCST, 2017.

9x515 시리즈는 상업용 우주산업 기술의 해외 이전을 보다 투명하고 예측가능하게 통제할 수 있도록 설계된 것으로, 민간 우주기업들이 직면하는 복잡한 국제협력 상황에서도 일정한 법적 안정성을 제공한다(Creydt and Schulenburg, 2023). 또한 CCL에는 ECCN 9A004도 존재하는데, 이 항목은 국제우주정거장(International Space Station, ISS) 및 제임스웹우주망원경(James Webb Space Telescope, JWST)과 같이 대규모 국제우주협력 프로젝트와 관련된 ‘특수설계부품 등’(specially designed parts, components, accessories, and attachments)을 포함한다. 9A004는 특정 우주발사체, 위성 본체(bus), 탑재체(payload), 지상장비 등을 세부적으로 규율하며, 다자간 수출통제체제인 바세나르 체제의 이중용도 품목 리스트와의 정합성을 맞추기 위한 조정 조치이다. 해당 품목 대부분은 실제 통제 목적상 9A515로 분류되어 관리된다.³⁵⁾

34) 15 C.F.R. § 738.2(d).

35) 15 C.F.R. § 774, Supplement No. 1, ECCN 9A004.

EAR하에서는 모든 품목에 대해 일률적인 수출허가가 요구되는 것은 아니며, (i) 통제 사유(reason for control), (ii) 수출 목적지(destination), (iii) 최종 용도(end use), (iv) 최종 사용자(end user)라는 4가지 요소를 종합적으로 고려하여 수출허가 여부가 결정된다.³⁶⁾ 동일한 품목이라도 이러한 요소의 조합에 따라 수출허가가 면제되거나, 일정한 라이선스 예외의 적용을 받을 수 있는 것이다.

한편, EAR은 CCL 내 특정 ECCN에 대한 새로운 통제 방식으로 ‘.x 단락’(paragraph .x) 및 ‘.y 단락’(paragraph .y) 방식을 도입하였다.³⁷⁾ 이는 기존 ECCN 번호 내에 명시되지 않았으나, 특정 품목에 대한 포괄적 통제를 강화하기 위해 도입된 조치라 할 수 있다. ① ‘.x 단락’은 해당 ECCN에서 별도로 열거되지는 않고, 특별히 설계된(specially designed) 부품, 구성품, 액세서리 및 부착물 등을 포괄하는 포괄적 통제 조항으로 기능한다. 예컨대, ECCN 9A515는 우주선(spacecraft) 및 관련 물품에 대해 .a부터 .e까지의 항목을 명시하고 있으며, 여기에 포함되지 않은 특별 설계 항목은 ‘9A515.x’로 분류되는 것이다. 이처럼 ‘.x 단락’은 포괄적 통제(catch-all control) 역할을 수행하며, 이중용도 기술의 비명시적 품목을 EAR의 통제 범위에 포함시키는 기능을 갖는다.

다음으로, ② ‘.y 단락’은 ‘.x 단락’의 통제 범위에 해당하나, 복수의 기관 간 협의를 거쳐 EAR99보다 높은 수준의 통제가 필요하다고 판단된 특정 품목을 별도로 열거한 목록이다. 예컨대, ‘ECCN 9A515.y’에는 우주선(flight)용 케이블 조립체(cable assemblies for spacecraft applications)와 같은 품목이 포함되어 있으며, 이는 통상적인 소비재와 달리 보다 정밀한 통제를 요하는 경우에 해당된다.³⁸⁾

우주발사체 또는 위성체에 부착되는 호스트 페이로드(hosted payload)에 대해서도 EAR상의 명시 규정이 있는데, ECCN 9A004 또는 9A515.a에 해당하는 우주선은, 비록 그 탑재체가 국무부의 USML 제XV(a)에 기재된 기능을 수행하더라도, EAR의 적용을 받는 품목으로 간주된다. 그러나 해당 우주선이 통신, 탐사 등 민간 목적의 기능만 수행하는 것이 아니라, USML 제XV(a)에서 규정한 군사통신, 감시, 정찰 등 국방 관련 기능을 일차적·이차적 탑재체(primary or secondary payload)를 통해 수행할 경우, 해당 우주선은 EAR이 아닌 ITAR에 따라 통제된다. 이는 해당 우주선이 ‘군용물자’로 간주되어 보다 엄격한 무기수출통제의

36) 15 C.F.R. § 738.4.

37) 15 C.F.R. § 774.

38) 15 C.F.R. § 774, Supplement No. 1.

적용 대상이 됨을 의미하며, 이 경우 수출, 재수출·이전은 반드시 ITAR 규정에 따라 국무부의 사전 허가를 받아야 한다.³⁹⁾ 이는 ECCN 9A004와 바세나르 협정의 이중용도 품목 리스트 간 정합성을 확보하기 위한 조정 조치의 일환이다. 다만, 실질적인 통제는 대부분 ECCN 9A515를 기준으로 이루어진다.

마지막으로, EAR의 통제 대상이 아니거나, CCL에 명시되지 않은 저위험·저기술 품목(low-technology items)은 'EAR99'라는 식별번호로 분류된다. EAR99는 일반적으로 민수용 소비재(low-technology consumer goods)로서, 대부분의 경우 수출허가 없이 수출이 가능하다. 다만, EAR99에 해당하더라도 수출대상국이 제재국(embargoed country)이거나, 최종사용자 또는 최종용도가 제한대상(end-user or end-use of concern)에 해당하는 경우, 별도의 수출허가가 요구된다.⁴⁰⁾ 이처럼 EAR99는 '무허가 원칙'이 적용되는 범주이나, 상황에 따라 허가 요건이 부과될 수 있다는 점에서 특정통제 품목과는 구분되고 있다.

3) 금지사항

EAR은 수출통제의 실효성을 제고하고 규제 회피 가능성을 사전에 방지하기 위해 총 10가지의 '일반 금지사항'(general prohibitions)을 명시하고 있다(Ellzey, 2020). 일반 금지사항은 15 C.F.R. Part 736에 규정되어 있는데, 구체적으로는 다음과 같다.

① ECCN에 따라 특정한 통제사유가 지정된 품목은, 지정된 국가로 수출·재수출하기 위해 반드시 사전 수출허가 또는 허가예외의 요건을 충족해야 하며 무허가 수출은 금지된다.⁴¹⁾ ② 미국의 원천 기술이 일정 비율 이상 포함된 외국산 제품을 제3국으로 이전하는 경우에도, EAR은 해당 이전을 통제하며 사전 허가를 요구한다.⁴²⁾ 이는 미국 기술이 내재된 외국산 제품이 우회적으로 재수출되는 것을 방지하기 위한 조치이다. ③ 미국 기술 또는 소프트웨어를 기반으로 생산된 제품, 또는 해당 기술의 직접 생산물인 공장에서 생산된 품목은 '직접생산물규칙'에 따라 특정 국가, 예컨대, 국가안보 우려국, 대테러지원국, 무기확산 우려국 등으로의 수출·재수출이 제한된다.⁴³⁾

39) 22 C.F.R. §§ 120.32-120.33.

40) 15 C.F.R. §§ 734.3(c), 738.1(d).

41) 15 C.F.R. § 736.2(b)(1).

42) 15 C.F.R. § 736.2(b)(2).

43) 15 C.F.R. §§ 736.2(b)(3), 734.9.

또한 ④ 수출특권제한 명령(denial order)에 따라 수출 또는 기타 관련 행위가 금지된 자와의 거래 또는 이전 행위는, 그 거래 주체가 당사자가 아니더라도 금지되며, 타인은 해당 명령을 위반하는 행위를 하지 않도록 주의의무를 부담한다. 수출특권제한은 연방관보(Federal Register)에 공식적으로 고시되며 법적으로 구속력을 가진다.⁴⁴⁾ ⑤ EAR에 따라 특정 최종사용자(end-user) 또는 최종용도(end-use)가 금지된 경우, 해당 품목은 예외사유나 허가 없이 수출·재수출될 수 없으며, 이를 위반하는 경우 행정적·형사적 제재가 부과될 수 있다.⁴⁵⁾ ⑥ EAR 적용 품목을 쿠바, 북한, 이란, 시리아, 러시아(석유·가스 산업 관련), 크림반도 등 특정 제재 국가 또는 지역으로 수출하거나 재수출하는 행위는 원칙적으로 금지되고, 수출·재수출을 위해서는 반드시 허가가 필요하다.⁴⁶⁾

⑦ 미국인은 핵폭발 장치, 미사일, 생화학무기, 특정 반도체 장비 등과 관련된 특정 기술 활동에 참여할 수 없으며, 해당 활동을 하는 경우 미국 내외 어느 지역에서라도 EAR의 적용을 받아 금지된다.⁴⁷⁾ 활동 주체가 미국인인 경우에도 기술이전, 자문, 실험 등 일체의 행위에 대해 수출규제로 간주될 수 있다. ⑧ EAR 적용 품목을 특정 국가를 경유하여 수출·재수출하는 경우, 해당 경유 국가가 지정된 경유금지국 목록에 포함되어 있다면 사전 수출허가 없이도 경유조차 허용되지 않는다. 대표적인 경유금지국으로는 아르메니아, 벨라루스, 러시아, 우즈베키스탄, 베트남 등이다.⁴⁸⁾ ⑨ EAR 체제하에서 부여된 수출허가, 예외규정 또는 산업안보국 명령에서 정한 조건을 위반하는 행위는 EAR 규정 위반으로 간주되며, 그에 대한 책임은 수출자 또는 이전자에게 전가된다. 특히 조건부 허가를 받은 경우에는 명시된 범위 내에서만 사용·이전이 가능하다.⁴⁹⁾ ⑩ EAR을 위반하여 수출된 품목은 이후 정비, 수리, 업그레이드 등의 서비스를 제공받을 수 없으며, 이미 철회되거나 정지된 수출허가 또는 예외는 효력을 상실하므로, 이에 근거한 어떠한 행위도 허용되지 않는다.⁵⁰⁾

44) 15 C.F.R. §§ 736.2(b)(4), 766.25.

45) 15 C.F.R. § 736.2(b)(5).

46) 15 C.F.R. § 736.2(b)(6).

47) 15 C.F.R. § 736.2(b)(7).

48) 15 C.F.R. § 736.2(b)(8).

49) 15 C.F.R. § 736.2(b)(9).

50) 15 C.F.R. § 736.2(b)(10).

4) 제재 및 관리감독

수출개혁법 및 EAR 체제상 수출통제 규정위반에 대한 제재는 민·형사적 책임을 모두 포함하는 조치로 이루어진다. EAR의 집행기관은 산업보안국으로서, EAR의 허가 위반, 허위 진술, 무허가 수출, 거래 금지 대상과의 거래 등 다양한 위반 행위에 대해 조사 및 제재 조치를 부과한다.

민사 제재로는 통상 건당 수십만 달러에서 수백만 달러에 이르는 벌금 부과가 가능하며, 이는 수출통제개혁법에 따라 상향 조정된 바 있다.⁵¹⁾ 산업안보국은 위반자에 대해 수출특권 제한(denial of export privileges), 준법감시관(compliance monitor) 지정, 시정조치 명령(order for corrective action), 향후 보고의무 부과 등의 조치를 함께 취할 수 있다. 고의성이 인정되거나 반복적인 위반이 확인된 경우, 형사 처벌로 최대 20년의 징역 또는 건당 최대 100만 달러의 벌금이 부과될 수도 있다.⁵²⁾ EAR 체제 위반은 행정 위반을 넘어, 국가안보 및 국제평화 유지를 위한 연방정부의 전략적 통제체계 위반으로 간주되고, 연방형 사범죄(federal criminal offense)로 취급된다(Bartlett and Poling, 2016).

산업안보국은 제재 대상 기업 또는 개인을 ‘Denied Persons List (DPL)’, ‘Entity List’, ‘Unverified List’ 등에 등재하고, 이를 기반으로 거래금지 조치를 공식화한다.⁵³⁾ 수출업자는 EAR 적용 대상 품목을 해외로 이전하거나 외국인에게 제공하기 전에, 상대방이 이러한 제재 명단에 포함되어 있는지를 사전 확인할 의무가 있다.

EAR의 관리감독 체계는 사전 예방 중심의 ‘자체준수 프로그램(Export Compliance Program, ECP)’을 권장하는 구조를 갖추고 있다. 산업안보국은 기업들이 EAR의 요구사항을 자율적으로 준수할 수 있도록 내부 지침, 교육자료, 사례 해설 등을 제공하고 있고, 대규모 우주기업이나 방산협력체계에 참여하는 기업들은 보통 독립된 수출통제 전담부서를 설치하여 운영하고 있다. 이와 같은 관리 체계는 우주산업과 같이 다국적 협력과 기술이전이 빈번한 분야에서 필수적인 제도인데, 수출통제의 실효성을 높이는 동시에 산업계의 자발적 준수를 유도하는 역할을 한다.

EAR 체제 위반 소지가 발생한 경우, 산업안보국뿐만 아니라 연방수사국(Federal Bureau of Investigation, FBI), 국토안보부(Department of Homeland Security, DHS), 국방수사

51) 50 U.S.C. § 4819(a).

52) 50 U.S.C. § 4819(b); 15 C.F.R. § 764.3.

53) 15 C.F.R. Part 744, Supplement No. 4.

국(Defense Criminal Investigative Service, DCIS), 법무부(Department of Justice, DoJ) 등 다양한 연방기관과의 공조하에 조사와 처벌이 병행되는 다기관적 집행 체계를 갖추고 있어, 단일 부처 중심의 대응을 넘어서 종합적 관리감독 시스템을 이루고 있다.

4. 수출통제개혁과 규제완화

2014년 5월 13일, 미 상무부는 「우주선 및 관련 품목의 통제를 조정하기 위한 최종 규칙」(Revisions to the Export Administration Regulations: Control of Spacecraft Systems and Related Items the President Determines No Longer Warrant Control Under the United States Munitions List)을 공표하였다. 이는 오바마 행정부가 주도한 수출통제개혁 계획의 일환으로, 상업용 우주품목에 대한 과도한 통제를 완화하고, 보다 효율적인 수출통제체계를 구축하기 위한 조치였다. 핵심 내용은 기존의 ITAR상 USML 제XV류에 포함되어 있던 통신위성, 원격탐사위성, 특수설계 부품 등을 상무부의 CCL 내 새로운 분류인 ECCN 9x515 시리즈로 이관하는 것이었다(Bartlett and Poling, 2016).

이 조치로 인해, ‘방사선 강화 마이크로전자 회로’(radiation-hardened microelectronic circuits)를 포함한 주요 인공위성 부품이 2014년 6월부터 순차적으로 EAR 통제체제로 전환되었으며, 특히 2014년 11월 10일부터는 본격적으로 CCL ‘500 시리즈’로 분류되기 시작하였다. 이는 과거 단일 부품이 ITAR의 적용 대상일 경우 전체 시스템이 동일하게 통제되던 ‘전체관할 전환규칙’(see-through rule)의 폐지로 이어졌고, 이에 따라 부품 단위별 수출관리의 유연성이 확보되었다(Ellzey, 2020).

오바마행정부의 수출통제개혁 배경에는 미국 우주산업의 글로벌 경쟁력 약화라는 위기의식이 자리하고 있었다. ITAR의 과도한 적용으로 인해, 미국의 민간 우주기업들은 국제거래 수주에서 배제되거나, 우회 조달이 유발되는 등 구조적 불이익을 겪고 있었다. 이에 정부는 상업적 민간 위성의 수출에 있어 보다 유연한 EAR 체제로의 전환이 필요하다는 정책하에, 2012년 ‘제1248조 보고서’(Section 1248 Report)를 공표하였다.⁵⁴⁾ 동 보고서는 성능이 낮

54) 2010년 회계연도 국방수권법(National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2010) 제1248조에 따라 상업용 위성 및 관련 품목의 수출통제체계 재검토를 의무화하였고, 이에 국방부와 국무부는 공동으로 ‘제1248조 보고서’를 작성하여 의회에 제출하였다. 본 보고서에서는 국가안보에 중대한 영향을 미치지 않는 상업용 위성과 관련 부품의 상당수가 ITAR 대신 보다 유연한 상무부의 EAR 체제 하에서 관리될 수 있음을 권고하였고, 미국 우주산업의 경쟁력 강화를 위해 관련 품목을 상무부의 CCL로 이관할 필요성을 강조하였다. 이 보고서는 이후 2014년 수출통제개혁의 기초 자료로 활용되었다.

고 이중용도성이 명확한 통신 및 원격탐사 위성은 ITAR보다는 EAR 체제에서 관리할 것을 권고하고 있다.

규제완화 조치에도 불구하고, 군사적 전용 가능성이 존재하는 고해상도 영상수집(high-resolution imagery collection), 자율추적(autonomous tracking), 미사일 탐지 기능(missile detection)을 갖춘 위성들은 여전히 ITAR의 적용 대상에 포함된다. 나아가, 중국, 이란, 북한 등 특정 국가에 대한 수출금지 조치도 유지되고 있다. 수출통제개혁의 이러한 흐름은 2018년 제정된 수출통제개혁법(ECRA)에 의해 제도적으로 뒷받침되었다. 수출통제개혁법은 “국가안보에 필수적인 신흥기술(emerging technologies) 및 기초기술(foundational technologies)”에 대한 포괄적 통제를 규정하고, 기술의 이전, 재이전, 암묵적 수출(deemed export) 및 암묵적 재수출(deemed re-export)까지 규제 범주에 포함시켰다(Ellzey, 2020). 디지털 전송이나 클라우드 기반 공유 등이 확산된 현실을 반영하여, 수출개혁법은 물리적 국경을 넘어선 기술의 흐름을 직접 규율하는 최초의 수출통제 법률로 평가되고 있다.

그러나 뉴스페이스 시대와 맞물리면서, 수출개혁법은 민간 기업에게 새로운 불확실성을 가져오고 있는 것이 현실이다. 산업안보국은 수출개혁법 시행 이후에도 통제대상 신흥기술의 정의 및 분류를 명확히 제시하지 못하고 있고, 이로 인해 민간 기업들은 수출허가 신청 과정에서 행정 부담과 규제 리스크에 직면하고 있다. 실제로 2020년 10월 산업안보국이 발표한 6개 분야 신흥기술 규정은 바이오기술, 인공지능, 고급소재 등 뉴스페이스와 직접적으로 관련된 기술군을 포함하고 있다(Creydt and Schulenburg, 2023).

우주산업의 급속한 성장에 비추어 볼 때, 현행 수출통제체계는 규제의 불명확성과 절차적 지연이라는 구조적 한계를 드러내고 있다. 기술의 편재성(omnipresence)과 범용성(omni-use)을 특징으로 하는 뉴스페이스 기술을 기존의 이중용도 규제틀에 단순 편입함으로써, 기술 발전의 속도와 복잡성에 효과적으로 대응하지 못하고 있는 것이다.

현행 수출통제체계의 구조적 한계는 규제의 모호함이나 절차적 지연에 그치지 않고, 기업의 과잉준수(over-compliance), 국제 공동연구의 위축, 신흥기술 이전의 지연 등 다양한 부작용들을 낳고 있다. 무형 이전(디지털 전송, 클라우드 기반 공유, 외국인 연구자 대상 기술 공개 등)의 확대와 경계품목 판정의 불확실성은 민간 기업과 연구기관에 상당한 행정 부담과 거래 비용을 가중시킨다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 통제목록 중심의 정태적

규제방식에서 벗어나, 성능기반 규제(performance-based control), 위험기반 허가 절차(fast-track/safe harbor), 동적 가이드라인(rolling guidance) 등 보다 기술친화적이고 유연한 규제 접근에 대한 논의가 필요하다.

그러나 규제개혁의 흐름 속에서도 미국은 여전히 중국, 인도, 러시아, 이란 등 전략적 경쟁국에 대해서는 다양한 형태의 수출통제와 제재조치를 유지하고 있다(오정미, 2025). 민·군융합(military-civil fusion)을 기조로 하는 국가에 대해서는 ‘군사 최종사용자’(military end users) 개념을 확장 적용하여, 보다 강력하고 포괄적인 통제를 부과하고 있다. 이는 수출통제의 유연성과 산업 경쟁력 제고라는 정책 목표와 동시에, 기술 유출 방지 및 국가안보 확보라는 전략적 목적을 병행 추구하고 있음을 보여준다.

IV. 우리나라 제도 발전을 위한 정책 제언

1. 우주산업 물품 정의 및 분류체계의 정비

지금까지 살펴본 바와 같이, 미국은 ITAR과 EAR 체계를 통해 위성, 발사체, 위성탑재체, 지상국 장비 등 우주산업 관련 물품들을 분류하고, 각 품목에 대한 통제수준과 허가요건을 설정함으로써 세분화된 수출통제제도를 운영하고 있다. 이는 급성장하는 우주산업의 특수성을 반영하여 기술 유출을 방지함과 동시에 민간 우주활동의 예측 가능성을 제고하는 데 중점을 둔 체제이다.

우리나라 역시 우주산업 물품을 포함한 민감 기술과 장비의 국외 이전을 규율하기 위한 법적 수단으로 ‘전략물자 수출통제제도’를 운영하고 있다. 전략물자 수출입 관리는 「대외무역법」 제19조 이하 및 그 하위 법령인 「전략물자수출입고시」에서 이루어지고 있고, 이를 통해 국제평화 및 안보유지를 위한 통제제도가 운영되고 있다(송선욱, 2018). 이는 대량살상 무기(Weapons of Mass Destruction, WMD)의 확산 방지와 관련된 국제의무 이행을 목적으로 하고 있고, 전략물자의 무분별한 해외 반출을 방지하기 위한 국가의 핵심적인 통제장치라 할 수 있다. 전략물자 정의는 WMD 또는 그 운반수단의 제조·개발·사용 등에 활용될 수 있는 ‘물품’, ‘소프트웨어’, ‘기술’을 포괄하는 개념으로 설정되어 있고, 이는 「대외무역법

시행령」 제32조에 따라 다자간 국제수출통제체제인 바세나르체제, 핵공급국그룹(Nuclear Suppliers Group, NSG), 미사일기술통제체제(MTCR), 오스트레일리아그룹(Australia Group, AG) 등에서 채택하고 있는 통제 기준을 준거로 삼고 있다(이지수·정재완, 2025).

전략물자는 전략물자수출입고시에 따라 [별표 2]의 ‘이중용도품목’과 [별표 3]의 ‘군용물자품목’으로 구분되며, 각각 국제적 통제체제의 범위에 따라 관리된다. 이중용도품목은 민간과 군사 양용으로 사용 가능한 품목을 의미하며, 통제번호는 5자리로 구성되어 있어 해당 품목이 속하는 품목군, 형태, 적용 통제체제를 구조적으로 파악할 수 있도록 설계되어 있다. 이 가운데 특히 ‘9번’으로 시작하는 품목군은 ‘항공우주 및 추진’(Aerospace and Propulsion) 분야에 해당하며, 우주발사체, 위성체 구성 부품, 터보제트 엔진, 고체연료, 항법장치, 추진제, 비행제어장비 등 우주산업 전반에 적용 가능한 핵심 품목들을 포함하고 있다.

그럼에도 불구하고, 우리나라의 현행 전략물자 통제체제는 제도 설계의 기원 자체가 재래식 무기와 WMD의 비확산에 중점을 두고 있어(이재영, 2020), 최근의 뉴스페이스 환경에서 등장하고 있는 융복합적 기술 구조와 민간주도의 우주기술 상용화 흐름을 충분히 반영하지 못하고 있다. 기존의 분류체계는 물리적 장비나 장치 중심의 목록 설정에 초점을 맞추고 있다는 점에서, 위성관측데이터, 상업용 위성영상, 소프트웨어 및 소스코드, 기술자료 등 무형 자산에 대한 통제 기준은 불분명하거나 단편적으로만 적용될 수밖에 없는 구조이다. 이는 우주산업의 디지털 전환(digital transformation, DX)과 데이터 중심화 경향(data-centric model)이 뚜렷해지는 상황에서 제도적 공백을 야기할 수 있는 것이다.

또한 다자간 국제수출통제체제의 국내 수용에 집중한 나머지, 우리나라의 산업적 특수성과 우주기술의 고도화 양상을 충분히 고려한 독자적 분류체계가 미흡한 상태이다. 예를 들어, 현행 전략물자 분류체계에서는 위성 본체와 탑재체, 지상국 장비에 대한 개별적 세분화가 부족하고, 상업적 민간위성(commercial civil satellite)에 탑재되는 영상처리장치, AI 기반 데이터 분석모듈, 클라우드 전송기술 등은 통제대상인지 여부 자체가 명확하게 규정되지 않아, 민간 기업의 자가판정 또는 사전판정 과정에서 불확실성을 유발하고 있다.

결국 국내 우주산업 기업이 전략물자 수출입과 관련하여 준법을 전제로 하는 자율적 규제준수를 실현하는 데 현행법 체계가 구조적 장애로 작용할 수 있고, 궁극적으로는 우주산업 활성화와 국제협력에 있어 비효율을 초래할 수 있다는 것이다. 따라서 뉴스페이스 시대의 기술 특성과 산업 환경을 반영한 ‘우주산업 물품의 정의 및 분류체계의 정비’가 필요할

것이다. 구체적으로는 미국의 ITAR 및 EAR 체제에서와 같이 우주산업 물품에 특화된 통제 분류체계의 구축이 요구된다 할 것이다. ITAR에서는 USML을 통해 상업용 위성과 군용 위성, 위성체 부품, 지상통제장비, 발사체 등 세부 항목을 규정하며, EAR은 이를 제외한 상업용 위성기술을 별도의 ECCN 코드로 관리하고 있다. 이러한 분류체계는 각 품목별로 통제 수준과 요건을 구분함으로써 기술 유출을 방지하면서 동시에 산업 활성화와 수출 실무의 예측 가능성을 제고하는 기능을 한다.

우리나라도 이러한 방향성을 반영하여, 위성체, 발사체, 탑재체, 지상국 장비, 위성 데이터 및 관련 소프트웨어·기술자료 등을 독립된 분류군으로 구분하고, 각 품목별로 통제의 필요성, 민감도, 국제수출통제체제 적용 여부, 수출허가 기준 등을 체계적으로 정비할 필요가 있다. 특히, 우리나라의 산업적 역량에 맞춘 우주비즈니스 기술 및 물품의 성격을 보다 구체화하여 반영하고, 민간 기업의 자가판정과 사전판정 절차적 예측 가능성 나아가 효율성을 높이도록 해야 할 것이다. 구체적으로는 단순 목록·사양 중심 접근을 보완하여 다음과 같은 원칙 중심의 설계구조를 확립해야 할 것이다. ① 경계품목 판정의 예측가능성을 높이기 위해 해상도, SNR, SWaP-F 등 성능 임계치를 명문화할 필요가 있다. ② 소프트웨어·기술·데이터 등 무형자산을 독립 분류군으로 설정하고, 기능·용도·전용 가능성에 따라 위험 등급을 부여해야 한다. ③ 자가판정·사전판정·유권해석에 처리기한과 거부사유 유형을 부여해 절차 지연을 완화해야 한다. ④ 혼합 시스템에서의 관할 혼선을 방지하도록 부품·시스템 연동 분류 체크리스트와 경계사례를 주기적으로 공개해야 할 것이다.

2. 신기술에 대한 통합적 규제체계 마련

우주산업은 융복합적 기술구조에 의해 급속하게 고도화되고 있다는 특징이 있다. 융복합적 기술구조는 예를 들어, 인공지능(AI), 양자컴퓨팅(quantum computing), 클라우드 기반 분석기술(cloud-based analytics), 소형위성 제작기술(small satellite manufacturing technologies), 첨단소재(advanced materials), 3D 프린팅(3D printing) 등 이종 기술들이 위성, 발사체, 지상국 운용시스템 등에 통합적으로 적용되는 구조를 의미한다. 이러한 기술 융합은 기존의 국방·항공 중심의 폐쇄적 개발환경과는 달리, 민간의 개방형 혁신 생태계 내에서 주로 구현되고 있다. 또한 그 범위와 응용 방식도 유동적이며, 물리적 장비에 국한되

지 않고 소프트웨어, 데이터 처리 알고리즘, 서비스 플랫폼 등 무형의 기술 요소로 확장되고 있다. 이에 따라 수출통제 대상 기술의 실체를 명확히 특정하기 어려운 문제가 발생하고 있고, 기존 전략물자 중심의 통제 프레임워크는 이러한 기술적 특성을 충분히 반영하지 못하고 있다는 한계가 있다.

현재의 우주산업은 민간주도의 우주기술 상용화가 광범위하게 이루어지고 있다. SpaceX, Planet Labs, OneWeb 등과 같은 민간 기업들은 자체적인 기술력과 자금조달을 통해 위성발사, 위성데이터처리, 우주서비스 운영 등을 수행함으로써, 우주기술이 독립적인 비즈니스 모델로 기능할 수 있도록 시장을 재편하고 있다. 이는 기존의 국가주도형 우주개발 패러다임에서 벗어난 시장기반의 구조적 전환을 의미하며, 그에 따라 관련 수출입 물품과 기술의 관리 필요성 또한 근본적으로 달라지고 있음을 의미한다.

반면에 우리나라 대외무역법상의 전략물자 통제체계는 '국제수출통제체제 이행'에 중점을 두고 있고, 통제기준 또한 명세적(specification-based) 분류에 치우쳐 있다. 이로 인해 신흥기술(emerging technologies)들이 통제대상 목록에 직접 열거되어 있지 않은 경우 규제 적용 여부 자체가 모호해지고 있고, 민간 기업의 기술이전이나 수출 과정에서 예측 가능성이 저하되는 구조적 문제가 발생하고 있는 것이다. 예를 들어, AI 기반의 위성영상(satellite imagery) 해석기술이나 위성 간 양자통신 알고리즘(quantum communication algorithms between satellites)은 그 민감도와 군사적 전용 가능성에도 불구하고, 기존 통제기준으로는 해당 여부를 판정하기 어렵다.

이에 신흥기술의 '정의'에 기초한 물리적 목록 중심의 규제체계에서 탈피하여, 기술의 '기능'과 '용도', '전용 가능성'에 따라 탄력적으로 적용될 수 있는 기능 중심(function-based) 또는 리스크 기반(risk-based)의 통합적 규제체계로의 전환이 요구된다 할 것이다. 앞서 살펴본 미국의 2018년 수출통제개혁법이 도입한 이른바 '기술 보류 리스트'(emerging and foundational technologies list)는 산업적 패러다임 전환의 대표적 사례로 참고할만하다. 이는 기술의 확정적 정의 이전에 그 전략적 민감도에 따라 수출통제를 선제적으로 적용할 수 있는 법적 근거를 마련한다는 점에서 중요한 의미가 있다.

우리나라도 기술 발전 속도에 대응한 유연한 제도 운용을 위해, 우주항공청이나 무역안보관리원 등 관련 기관 간의 협업을 기반으로 신흥기술에 대한 통합적 규제체계를 구축할 필요가 있다. 이를 위해 다음과 같은 제도적 개선이 필요하다.

첫째, 신항기술의 동향을 실시간으로 모니터링하고, 기술의 군사적 전용 가능성, 민감도, 공급망 통제 필요성 등을 종합적으로 평가할 수 있는 ‘기술 리스크 평가체계’를 도입해야 한다. 이는 기술의 ‘유형’(type)이 아니라 ‘속성’(attribute)을 중심으로 분석하는 접근이며, 기술 판정의 합리성과 정책 결정의 정당성을 확보할 수 있다.

둘째, 기술의 범정부적 판단 기준을 마련하기 위하여, 민간 기술전문가, 군사·안보 전문가, 법률가, 정부 부처가 공동 참여하는 ‘신항기술’ 심의를 종합적으로 수행할 수 있는 기구를 설치하여 기술의 수출통제 필요성을 사전 검토하고, 전략물자 여부에 대한 고도화된 판단체계를 마련해야 할 것이다.

셋째, 신항기술의 수출 여부에 대한 불확실성을 해소하기 위하여, 자가판정 및 사전판정 절차를 기술 중심 판정방식으로 개편하고, 필요한 경우 상황허가 제도와 연계하여 운용함으로써 규제 공백을 최소화해야 한다. 예를 들면, 디지털 기술에 특화된 통제 판정 가이드라인과 같은 지침 등을 별도로 수립할 필요가 있다.

넷째, 국제 공조와 기술 보호의 균형을 고려하여, 미국, EU, 일본 등 주요국의 신항기술 통제 정책과의 정합성을 확보하되, 국내 산업 생태계의 기술 수준과 수출 실무 특성을 반영한 독자적인 판단기준을 병행 구축하는 것이 중요하다. 또한 국제규범의 단순 수용을 넘어, 우리나라의 우주산업 보호와 동시에 우주산업 관련 신항기술 분야의 글로벌 협력을 도모하도록 해야 한다.

3. 무형정보 규제를 위한 법제 보완

우주산업의 디지털화와 기술서비스화는 물리적 장비에 국한되지 않는 ‘무형정보’(intangible information)의 국제이전 리스크를 부각시키고 있다. AI기반의 위성데이터 분석, 고정밀 궤도 계산소프트웨어, 암호화통신 모듈 등은 원천기술 혹은 핵심기술로서 국가 안보 및 산업경쟁력에 미치는 파급력이 상당함에도 불구하고, 현재 국내 법제는 이들의 해외이전, 재이전 또는 외국인 접근 등에 대한 포괄적 규제를 제공하지 못하는 측면이 있다.

앞서 살펴본 미국의 경우, 무형정보의 해외이전을 ‘암묵적 수출’(deemed export)로 간주하여 외국인이 해당 기술에 접근하거나 기술지식을 전수받는 경우에도 수출로 간주하여 통제하고 있으며, 나아가 ‘직접생산물 규칙’을 통해 외국에서 개발된 기술이 미국 원천기술에

기반한 경우에도 미국 규제의 적용을 받도록 하고 있다. 반면, 우리나라의 「대외무역법」 및 하위 법령에서는 무형정보의 통제가 원칙적으로 ‘기술’ 또는 ‘소프트웨어’의 형태로만 이루어지고 있어, 실제 정책적 작동 범위가 제한적이며, 이메일 전송, 클라우드 서버 접근, 국제 화상회의 등을 통한 기술 이전은 명시적 규제 대상으로 규정되지 않아 법적 공백이 존재한다.

이러한 점에서 무형정보의 ‘이전’ 개념을 확장하고, 무형정보가 외국인 또는 외국법인의 통제 하에 놓이게 되는 일체의 행위를 수출행위로 간주할 수 있도록 법령을 정비할 필요가 있다. 구체적으로는 다음과 같은 3가지 방향에서 제도적 보완이 요구된다.

첫째, 「전략물자수출입고시」 및 관련 법령에서 ‘기술이전’의 개념을 확대하고, 전자적 방식에 의한 전송(이메일, 클라우드 서버 업로드), 물리적 반출(USB 저장장치), 비형태적 교류(기술자 간 구술 협의, 화상회의 등을 통한 설명 제공) 등을 모두 포괄하는 통제 범위를 구체화해야 한다. 미국 ITAR 제120.50조 등에서 정의하는 ‘기술 데이터’ 및 EAR 제734.13조 등에서 규정하는 ‘재수출 및 암묵적 수출’ 개념을 참조하여, 국내 통제범위의 해석에 적용 가능한 기준을 제시할 필요가 있다.

둘째, 「산업기술의 유출방지 및 보호에 관한 법률(이하 ‘산업기술보호법’이라 한다)」과 연계가 필요하다. 동 법률은 국가핵심기술 또는 산업기술에 대한 해외유출을 방지하고자 제정되었으나, 해당 기술이 전략물자에 해당하는 경우에도 「전략물자수출입고시」와 별개의 규제체계로 운영되고 있어 규제 중복 또는 공백의 우려가 있다. 산업기술보호법과 대외무역법 모두 산업통상자원부 소관이지만, 적용 기술의 지정 기준과 통제 방식이 상이하여 실무상 연계가 원활히 이루어지지 않는 경우가 발생할 수 있다. 전략물자에 해당하면서도 산업기술보호법의 보호대상에 중복되는 기술에 대해서는 허가·판정 절차의 연계 부족으로 인해 기업 입장에서 중복규제 부담 또는 통제 사각지대가 발생할 수 있는 것이다. 따라서 두 제도 간 공동판정 기준이나 정보연동 체계의 구축을 통해 법령 간 정합성을 확보하고, 제재 수단의 실효성을 높이는 것이 필요하다.

셋째, 클라우드 기반 시스템의 기술접근 통제를 위한 지침과 판정절차를 별도로 마련할 필요가 있다. 글로벌 상용 클라우드 서비스(cloud services)⁵⁵⁾ 등은 기술자료의 저장과 전송 수단으로 널리 활용되고 있으며, 이 경우 해외 법인이 기술에 접근할 가능성이 존재한다.

55) 대표적으로 Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure, Google Cloud Platform (GCP) 등이 있다.

미국의 EAR 제734.18조는 이러한 클라우드 환경에서의 기술 저장·전송에 대해 일정 조건을 충족하면 수출로 보지 않는 예외를 인정하고 있으나, 이는 엄격한 보안 요건 등을 전제로 한다.⁵⁶⁾ 따라서 우리나라도 전략물자수출입고시 등 관련 규정에 클라우드 업로드 및 전자적 전송의 경우를 고려한 ‘조건부 수출 간주’ 또는 예외 요건을 명시하여, 실무상 판정의 기준과 예측 가능성을 제고할 필요가 있다.

결국 디지털 전환과 글로벌 협력이라는 두 가지 기준이 병존하는 우주산업 환경에서는 무형정보의 보안과 접근통제가 핵심적인 수출통제 과제이다. 미국과 같은 주요국 사례를 참고하여, 무형정보 이전 행위를 판단하는 기준을 설정하고, 그에 대한 규제적 실효성을 확보하기 위한 국내 법제 보완이 필요하다 할 것이다.

V. 결 론

뉴스페이스의 도래는 우주산업의 구조와 운영 방식에 근본적인 변화를 가져왔다. 기존에는 국가 주도의 폐쇄적 체제하에서 우주개발이 이루어졌지만, 오늘날에는 민간 기업이 주도하는 개방형 혁신 생태계로 빠르게 이행하고 있다. 이와 함께, 우주기술은 더 이상 과학탐사나 안보 목적에만 국한되지 않고, 통신위성·항법위성·관측위성을 비롯하여 우주관광, 자원 채굴, 우주의학, 우주제조업 등 다양한 산업 분야로 확장되고 있다. 아울러, 실생활과의 연계성 또한 뚜렷해지고 있다. 저궤도 통신위성은 6G 네트워크 및 자율주행 인프라 구축의 기초 요소로 작용하고 있으며, 항법위성은 스마트물류, 드론, 위치기반 서비스의 기반이 되고 있다. 관측위성은 기후감시, 재난대응, 농업·도시계획에 기여하고 있고, 우주관광과 자원개발은 새로운 소비 및 투자 시장을 창출하고 있다. 미세중력 환경을 활용한 우주의학 연구와 우주소재 제조기술은 차세대 바이오·반도체 산업의 혁신 가능성을 열고 있다.

뉴스페이스 우주산업은 이처럼 기술의 융복합화와 디지털 전환을 통해 빠르게 진화하고

56) EAR 제734.18조 (a)(5)에 따르면, 클라우드 서버를 통한 기술 또는 소프트웨어의 저장·전송이 수출로 간주되지 않는 예외를 인정하면서, 다음의 요건을 모두 충족할 것을 전제로 한다. ① 저장되거나 전송되는 기술은 미국 정부에 의해 기밀로 분류되지 않은 것(unclassified)이어야 하며, ② 해당 기술은 종단간 암호화(end-to-end encryption) 방식으로 보호되어야 하고, ③ 암호화에는 미국 연방정보처리표준(FIPS) 140-2 또는 그와 동등하거나 더 강력한 보안 수준의 암호화 모듈이 적용되어야 하고, ④ 해당 기술은 EAR이 지정한 우려효국가(Country Group D:5)에 의도적으로 저장되어서는 안 된다. 이러한 4가지 요건을 모두 충족할 경우에 한해, 해당 클라우드 저장행위는 수출로 간주되지 않는다.

있고, 그 결과 위성, 발사체, 지상국 장비, 소프트웨어, 위성데이터 등 다양한 형태의 물품과 기술이 무역통상의 중심에 놓이게 되었다. 이에 수출통제의 대상도 단순한 기계적 부품을 넘어 무형의 정보와 기술로까지 확대되고 있고, 기존의 통제체계에 대한 구조적 재검토 필요성이 지적되고 있다.

미국은 ITAR과 EAR이라는 이중의 수출통제 체제를 구축하고, 방위 목적과 상업 목적을 구분하여 수출규제를 운용함으로써 국가안보와 기술경쟁력 간의 균형을 도모해왔다. ITAR은 방위물자와 방위서비스의 수출을 엄격하게 통제하고 있으며, EAR은 민간 및 이중용도 품목을 중심으로 보다 유연한 규제체계를 제공하고 있다. 2018년의 수출통제개혁법 제정과 ECCN 9x515 시리즈의 도입 등은 우주산업의 특수성을 반영한 규제완화 및 예측가능성 확보의 일환으로 평가되고 있다. 그러나 중국, 러시아, 이란 등 전략경쟁국에 대해서는 여전히 강력한 통제 조치가 유지되고 있고, 신기술의 통제체계 정립 문제는 여전히 제도적 미비점으로 지적되고 있다.

이와 같은 관점에서 우리나라 역시 우주산업의 본격적인 성장과 뉴스페이스에 적극적인 대응을 위해 수출통제제도의 전면적인 정비가 요구된다 할 것이다. 우선, 위성, 발사체, 지상국 장비, 위성데이터, 관련 기술자료 등 우주산업 물품의 세부 유형을 반영한 정의 및 분류체계를 재정립하고, 기술의 민감도와 용도에 따른 차등 통제가 가능하도록 제도의 재설계가 필요하다. 나아가, 인공지능, 양자기술, 로봇틱스 등 신기술의 통제가 기존의 목록기반 접근방식으로는 한계가 있는 만큼, 기능 중심 및 리스크 기반의 통합적 규제체계로의 전환도 이루어져야 할 것이다. 마지막으로, 클라우드 전송, 이메일, 화상회의 등을 통한 무형정보의 해외 이전에 대한 법적 근거와 적용 범위도 구체화하여, 암묵적 수출이나 직접생산물 규칙 등을 반영한 국내법 정비도 필요하다.

수출통제는 국가안보를 위한 장치이자 기술주권을 보장하기 위한 제도이지만, 동시에 민간 우주산업의 성장을 과도하게 제약하는 규제로 작용하지 않도록 균형 있게 운용되어야 한다. 기술의 융복합화가 급속하게 진행되고 글로벌 공급망 및 국제산업구조가 다변화되는 상황을 고려하여 선제적이고 예측가능하게 대응할 수 있는 유연한 통제체계의 정비가 요구된다. 요컨대, 수출통제는 국제안보와도 직결되는 분야인 만큼, 국제사회와의 협력 및 규범 정합성을 유지하면서도 우리나라 우주산업의 기술 수준과 산업 현실을 충분히 반영한 제도 구축이 함께 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- 김민재. (2023). 신(新)수출통제제도의 구축과 한국의 인도-태평양 전략에 관한 고찰. *무역상무연구*, 99, 125-151.
- 김영주. (2024). 위성항법시스템에 관한 법적 문제. *통상법률*, 165, 3-47.
- 김영주. (2020). 위성원격탐사에 관한 비교법적 고찰. *항공우주정책·법학회지*, 35(1), 203-319.
- 박광서. (2023). 「무역법규」. 제4판. 탐복스.
- 박연경·정관선·왕상한. (2023). 수출통제제도 강화를 위한 대외무역법 개정 연구. *법학연구*, 72, 395-426.
- 송선욱. (2018). 「무역관계법규」. 개정4판. 두남.
- 송준현. (2022). 일본의 수출통제제도에 관한 연구. *통상법률*, 154, 3-42.
- 오영해·김희준. (2019). 미국의 수출통제개혁에 대한 분석. *무역경영연구*, 18, 1-26.
- 오정미. (2025). 미국, 방산협력 측면에서 수출통제 목록 정비 등 필요. *무역안보관리원 해외연구동향 Report*, 2025-22, 1-9.
- 이경령·이승택. (2024). 공급망 안보화 시대, 미국 수출통제 추이와 우리 업계의 전략 탐색. *무역상무연구*, 102, 63-85.
- 이동은. (2024). 이중용도 물품 수출통제에 관한 국제통상법적 고찰 - GATT 제21조(b)(ii)의 해석 및 적용을 중심으로. *통상법률*, 164, 103-145.
- 이소영. (2023). 미사일기술통제체제(MTCR)에 의한 무인항공기 수출통제 정책 연구. *국방연구*, 66(1), 55-86.
- 이재영. (2020). 전략물자 수출통제제도와 무역자유화에 관한 연구. *통상정보연구*, 22(2), 239-258.
- 이지수·정재완. (2025). 「대외무역법의 이해와 적용」. 제2판. 삼영사.
- 임산호. (2024). 미국의 반도체 수출통제가 한국의 對중국 반도체 장비 수출에 미친 영향 분석. *무역학회지*, 49(5), 237-256.
- 정인교·채수홍. (2023). 미국의 안보정책과 수출통제 수단으로서의 해외 직접제품 규칙(FDPR). *국제통상연구*, 28(1), 45-69.
- 조장현. (2024). 한국과 미국의 무기수출통제에 관한법적·제도적 고찰. *강원법학*, 77, 649-689.
- 최동준. (2021). 최근의 미국과 중국의 수출통제제도 강화경향에 대한 비교연구. *법학논집*, 25(3), 23-52.
- 최서지. (2024). 연혁적 고찰로 살펴본 수출통제법의 문제점과 개선방안. *국제법무*, 16(1), 109-137.
- KOTRA·법무법인(유) 광장 국제통상연구원. (2022). 「미국의 대러시아 수출통제 조치 해설서」. KOTRA.
- Bartlett, J. E. III & J. C. Poling. (2016). Defending the "Higher Walls" - the Effects of U.S. Export Control Reform on Export Enforcement. *Santa Clara Journal of International Law*, 14(1), 1-46.

- Chapman, B. (2013). *Export Controls: A Contemporary History*. University Press of America.
- Creydt, M. & L. G. von der Schulenburg. (2023). Export Control and NewSpace: Reciprocal Challenges. In L. J. Smith, I. Baumann & S.-G. Wintermuth (Eds.). *Routledge Handbook of Commercial Space Law*. Routledge, 439-449.
- Damast, D. (2010). Export Control Reform and the Space Industry. *Georgetown Journal of International Law*, 42(1), 211-232.
- Doldirina, C. & S.-G. Wintermuth. (2023). NewSpace Companies - Incorporating and Financing Operation. In L. J. Smith, I. Baumann & S.-G. Wintermuth (Eds.). *Routledge Handbook of Commercial Space Law*. Routledge, 67-80.
- Ellzey, Charles H. (2020). Promoting Globalization in Space Policy: A Look at United States Export Controls. *Journal of Space Law*, 44(1), 278-331.
- Handelman, J. (2021). Considerations on the Targeting of Satellites. *Washington University Global Studies Law Review*, 20(2), 469-489.
- Harrington, A. J. (2017). Legal and Regulatory Challenges to Leveraging Insurance for Commercial Space. *Journal of Space Law*, 41(1), 29-56.
- Hirschhorn, E. L., B. J. Egan & E. J. Krauland. (2021). *U.S. Export Controls and Economic Sanctions*. Oxford University Press.
- Kimiagar, S., C. C. Klaui, T. J. McCarthy & B. Powell. (2022). International Trade Aspects of Outer Space Activities. In Y. A. Failat & A. Ferreira-Snyman (Eds.). *Outer Space Law: Legal Policy and Practice*. 2nd ed. Globe Law And Business Ltd., 429-459.
- Klubera, B. C. (2001). Global Distributions: The Effect of Export Controls. *Houston Journal of International Law*, 23(3), 429-466.
- Mirmina, S. & C. Schenewerk. (2022). *International Space Law and Space Laws of the United States*. Edward Elgar Pub.
- Department of Commerce's Office of Space Commerce (OSC) & Federal Aviation Administration's Office of Commercial Space Transportation (OCST). (2017). *Introduction to U.S. Export Controls for the Commercial Space Industry*. 2nd ed. Department of Commerce & Federal Aviation Administration.
- Paikowsky, D. (2024). Dual Use of Space Technology: A Challenge or an Opportunity? Space Commercialization in the US After the Cold War. In B. C. Odom (Ed.). *The Rise of the Commercial Space Industry - Early Space Age to the Present*. Springer, 291-306.
- Pečujlić, A. N. (2023). *The Space Law Stalemate - Legal Mechanisms for Developing New Norms*. Routledge.
- Rahman, M. (2025). Tech Supremacy and Economic Warfare: The US-China Trade Battle in the 21st Century. *Multitech Journal of Applied Sciences*, 2(4), 249-274.

- Rotolo, D., D. Hicks & B. R. Martin. (2015). What is an Emerging Technology?. *Research Policy*, 44(10), 1827-1843.
- Zeitouni, S. (2021). Milling the f/loss: Export Controls, Free and Open Source Software, and the Regulatory Future of the Internet, *NYU Journal of Legislation and Public Policy*, 23, 905-952.

ABSTRACT

A Review of Export Controls on the Space Industry :
Focusing on the United States Export Control Regime.

Young-Ju Kim*

In recent years, the space industry has undergone a rapid transformation from a traditionally state-led and closed structure to a more open and dynamic ecosystem driven by private enterprises, often referred to as the era of New Space. In tandem with this structural shift, the international trade of space-related items (including satellites, launch vehicles, ground station equipment, and satellite data) has significantly increased. Owing to their potential military applications and high technological sensitivity, such items are frequently categorized as strategic goods or dual-use items, thereby elevating the significance and necessity of export control measures.

Nevertheless, Korea's current export control regime remains largely tailored to traditional weapons systems and select industrial sectors, and thus falls short of adequately accommodating the distinctive characteristics of the space industry—namely, its technological convergence and globally integrated supply chains.

This article begins with the recognition of these regulatory limitations and proceeds to examine the nature and features of the space industry in the New Space era, identifying the types of space-related goods that are subject to export controls. It then offers a detailed analysis of the United States' export control framework for the space sector, distinguishing between the regulatory regime established by the Arms Export Control Act and the International Traffic in Arms Regulations, and that introduced under the Export Control Reform Act and the Export Administration Regulations. Based on this comparative analysis, the article proposes a number of policy recommendations for the development of Korea's regulatory framework.

In conclusion, the article advances several policy reform measures, including the establishment of a refined classification system for space-related goods, the introduction of an integrated function-based regulatory framework for emerging technologies, and the legislative enhancement of controls over intangible technology transfers.

| Keywords Space Industry, Export Control, International Traffic in Arms Regulations (ITAR), Export Control Reform Act (ECRA), Foreign Trade Act, Dual-Use Items

* Professor, Department of International Trade, Pusan National University, yjkim333@pusan.ac.kr

AI 기술을 활용한 통관서류업무의 자동화에 대한 대응책에 관한 연구

한낙현*

목 차

I. 서 론	IV. AI 기반 통관서류업무의 자동화에 대한 대응책
II. 통관서류와 통관업무의 과제	V. 결 론
III. AI 기반 통관 절차의 과제 해결과 도입사례	참고문헌

무역실무는 송장이나 선하증권 등 방대한 서류가 관련되어 있으며 국가나 지역의 규제, 관세, 환율 리스크 등 다양한 요소를 항상 고려해야 하는 어려운 분야이다. 게다가 해외와의 무역거래에서는 시차나 언어의 장벽이 있어, 매일의 메일이나 전화 대응만으로도 상당한 노력을 필요로 한다. 최근에는 무역량의 증가에 더해, 각국의 규제 강화, 환경에 배려한 물류 구축 등, 대응해야 할 일은 증가하는 한편이다. 이러한 상황 속에서, 생성형 AI(Generative AI)라는 신기술이 실무 혁신의 강력한 수단으로 주목을 받고 있다. AI 기술을 활용한 통관서류업무의 자동화는 관세행정의 효율성을 높이고, 통관 시간을 단축시키는 데 기여하고 있다. AI는 수출입 신고서의 자동 분류, 원산지증명서(C/O)의 AI 인식 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이러한 AI 기술의 도입은 통관절차의 자동화와 간소화를 촉진하여 수출입 업무의 효율성을 크게 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 통관서류와 통관업무의 과제를 분석하고, 또한 AI를 활용한 통관절차의 과제 해결과 도입사례를 고찰한 후 이를 바탕으로 통관서류업무에 AI를 도입할 때의 대응책으로서, 관련 법규를 엄격하게 준수하는 시스템의 구축, 질 높은 학습 데이터의 확보 등을 중심으로 분석한다. 본 연구에서는 통관서류와 통관업무의 과제, AI를 활용한 통관 절차의 과제 해결과 도입사례를 살펴보고, 통관서류업무에 AI를 도입할 때의 대응책을 제시하였다는 점에서 기존의 연구들과 차별성을 가진다고 할 수 있다.

Ⅰ 주제어 수출입 신고서, 선하증권, 원산지증명서, 인공지능, 통관서류업무, 통관절차 자동화

* 경남대학교 무역물류학과 명예교수, E-Mail: nhhan@kyungnam.ac.kr

I. 서론

수입통관절차는 화물도착, 수입신고, 검사대상 화물 선정, 검사, 반출 등의 절차를 통해 이루어지고 있는데, 이 과정에서 전량검사를 할 수 없게 되어 정보, 통계 등을 통해 일부 무작위 지정 화물과 지정된 우범화물을 대상으로 검사해야 하는 문제점이 발생하고 있다(이명구·이은재, 2019). 그러나 빅데이터와 인공지능(artificial intelligence : AI), 블록체인 기술에 기반한 스마트 통관체제 구축으로 4차 산업혁명 시대의 관세행정이 실현될 수 있다(김종권·유광현, 2020). 이들 기술을 활용해 수출입자의 과거 전력, 화물성격과 관련한 우범성을 분석하면 우범화물 선별 정확도가 크게 향상되고 정확하고 빠른 X레이 판독이 가능해져, 더욱 효과적인 위험 관리가 가능해질 것이다(이명구·이은재, 2019; Cao and Zhang, 2024).

무역실무는 송장이나 선하증권(Bill of Lading : B/L) 등 방대한 서류가 관련되어 있으며 국가나 지역의 규제, 관세, 환율 리스크 등 다양한 요소를 항상 고려해야 하는 분야이다. 게다가 해외와의 무역거래에서는 시차나 언어의 장벽이 있어, 메일이나 전화 대응만으로도 상당한 노력을 필요로 한다. 최근에는 무역량의 증가에 더해, 각국의 규제 강화, 친환경적인 물류 구축 등, 여러 가지로 대응해야 할 일은 계속적으로 증가하고 있다. 이러한 상황 속에서, 생성형 AI(Generative AI)라는 신기술이 실무 혁신의 강력한 수단으로 부상되고 있다. 생성형 AI는 입력 트레이닝 데이터의 구조와 패턴을 학습한 다음 유사 특징이 있는 새로운 데이터를 만들어낸다(Krzan et al., 2024). 지금까지의 로봇프로세스자동화(Robotic Process Automation : RPA)나 인공지능-광학문자인식(AI-Optical Character Recognition: AI-OCR)을 한층 더 고도화해, 인간과 가까운 수준으로 문장의 판독·번역, 요약 등을 할 수 있는 점이 특징이다. 실제로 무역 현장에서는 서류 작성의 자동화, 외국어 커뮤니케이션의 신속화 등 다양하게 활용되고 있다.

AI 기술을 활용한 통관서류업무의 자동화는 관세행정의 효율성을 높이고, 통관 시간을 단축시키는 데 기여하고 있다. AI는 수출입 신고서의 자동 분류, 원산지증명서(Certificate of Origin : C/O)의 AI 인식 등 다양한 분야에서 활용되고 있다(Bhatt, 2022). 이러한 AI 기술의 도입은 통관절차의 자동화와 간소화를 촉진하여 수출입 업무의 효율성을 크게 높일 수 있다. 또한, AI 기반의 스마트 통관체제는 자동화된 문서 처리와 함께, 반복적인 수작업

을 줄여 인적 오류를 최소화할 수 있다. 수출입 관련 서류의 검증, 관세 계산, 품목 분류 등이 자동으로 이루어져 처리 과정의 정확도를 높일 수 있으며, 이는 기업들이 통관절차에서 겪는 불확실성을 줄여준다(Stoyanova, 2023). 또한 AI 시스템은 법규 변경이나 새로운 규제에 빠르게 적응할 수 있어, 최신 정보를 바탕으로 효율적인 절차를 진행할 수 있다(AI Market, 2025). 이는 거래의 신뢰성을 높이고, 국제 무역의 원활한 진행을 지원하게 된다. 이러한 변화는 전반적인 통관체제의 효율성을 높이고, 글로벌 무역 환경에서의 경쟁력을 강화하는 데 중요한 역할을 하고 있다.

그러나 AI 시스템 도입에 따른 새로운 과제도 발생할 수 있다. 데이터의 품질과 보안 문제, AI 알고리즘의 투명성과 설명 가능성 확보, 그리고 AI 시스템 운영을 위한 전문 인력 양성 등이 중요한 과제가 될 것이다. 또한 국가 간 AI 기술 격차로 인한 새로운 무역장벽 발생 가능성에 대비한 국제적 협력과 표준화 노력도 필요할 것이다.

본 연구에서는 통관서류와 통관업무 특유의 과제를 분석하고, 또한 AI를 활용한 통관절차의 과제 해결과 도입사례를 고찰한다. 이를 바탕으로 통관서류 업무에 AI를 도입할 때의 대응책으로서, 법규준수 시스템의 구축, AI 학습 데이터의 확보, 보안대책의 강구, AI 거버넌스의 확립, AI 인력 양성을 위한 전략적 접근 등을 중심으로 분석한다. 또한, 본 연구에서는 통관서류업무에 AI를 도입할 때의 대응책을 제시하였다는 점에서 기존의 연구들과 차별성을 가진다고 할 수 있다.

II. 통관서류와 통관업무의 과제

1. 통관서류

통관서류는 화물의 수출입 시 세관에 제출하는 일련의 서류를 가리키며, 화물의 내용, 가격, 거래조건 등을 명확하게 하고 관세의 적정한 과세와 법령 준수를 목적으로 하고 있으며, 통관절차는 국제물류에 필수적인 공정·정확하고 신속한 대응이 요구되는 분야이다(Maideen, 2023). 주요한 통관서류에는 송장(Invoice), 포장명세서(Packing List : P/L), B/L 또는 항공화물운송장(Air Waybill : AWB), C/O, 보험증권, 수출신고필증, 수입신고필증 등이 있다.

일반적으로 화물이 한국의 항구 또는 공항에 도착하기 전에 통관업자에게 의뢰해, 수입(납세) 신고의 준비를 하고, 관세사 또는 수입자가 UNI-PASS를 통해 전자 신고한다. 여기에는 품목별 HS코드, 과세가격, 거래조건 등이 포함되며, 오류가 있으면 통관 지연의 원인이 된다. 그리고 화물 도착 후, 세관에 수입신고를 하고 이 때 입수한 통관서류를 제출한다. 수입시에 불가결한 통관서류로서는 송장을 들 수 있으며, 또한 화물의 내용을 시각적으로 확인하기 위한 P/L도 필요하며, P/L에는 품목별로 포장 명세가 명기된다. 게다가 운송서류로서 B/L이나 AWB, 화물보험을 증명하는 보험증권, 나아가 C/O나 검사증명서 등도 제출 대상이 된다.

한편 수출자는 매수인과 무역계약을 체결한 후, 물품을 준비하고 수출용 포장을 완료한 후 포워더를 통해 선박이나 항공 일정을 예약하고, 기본 서류를 준비한다. 수출시의 통관 절차에서도 송장과 P/L은 필수적이며(Maideen et al., 2023), 또한 수출신고서나 C/O, 각종 계약서, 수출신고필증 등의 제출이 요구된다. 일반적으로는 통관업자에게 의뢰해 수출신고를 행한 후 이 때 작성한 통관서류를 제출하고, 세관의 승인을 받은 후 선적이 이루어진다.

한편 수출입 모두 통관절차를 정확히 이행하지 못하면 화물의 지연, 벌금, 과세 오류 등 여러 가지 문제가 발생할 수 있다. 통관서류의 미비는 화물의 지연이나 추가 비용, 최악의 경우는 벌칙의 대상이 되기 때문에, 담당자에게는 서류의 내용 이해와 관리에 높은 정확도를 요구할 수 있다.

2. 통관업무의 과제

1) 법규제 대응의 복잡화

통관업무에서는 수출입과 관련된 법규제의 변화에 대응하여야 한다. 최근에는 국제적인 안보강화와 무역마찰의 영향으로 관계법령의 개정과 새로운 고시가 빈번하게 이루어지고 있다. 특히 자유무역협정(Free Trade Agreement : FTA)과 포괄적 경제동반자협정(Comprehensive Economic Partnership Agreement : CEPA) 등에 근거한 특혜세율의 적용에 있어서는 원산지규칙의 엄격한 확인이 요구되고 있지만, 경우에 따라 관세와 벌칙이 부과될 우려도 있다(AI Market, 2025).

또한, 수출입 규제 품목에 관한 고시나, 안보무역관리에 근거하는 전략물자 해당 여부의 판정의 운용에 대해서도, 해마다 엄격해지고 있는 것이 현실이다. 이러한 법령의 복잡화에 따라 고시 실무에서의 확인업무가 복잡화되고 법규준수 위반의 리스크도 높아지고 있다. 게다가 국가마다 다른 규제기준이나 통관요건에도 대응해야 하기 때문에 글로벌하게 전개하는 기업일수록 체제 정비가 어려워지고 있다.

2) 서류 미비나 오류에 의한 지연

수입통관 지연은 무역회사에 시간적 손실은 물론, 금전적 손해로도 이어지는 심각한 이슈이다. 통관절차의 실무 현장에서는 입력 오류나 기재 누락 등의 인적 오류가 발생하는 리스크가 있어, 세관 심사가 지체되는 것에서 화물의 인수가 지연되는 경우도 적지 않다(KlearNow. AI, n.d.). 특히 송장이나 P/L에서의 품명, 수량의 차이는 과세가격의 판단에 직접 영향을 미치기 때문에 세관에서 수정지시가 내려지는 경우도 있다. C/O가 부정확하게 작성되었거나 송장, P/L, B/L 등의 정보가 실제와 다른 경우, 잘못된 정보가 기재되어 있다면 통관이 지연될 수 있다.

또한, 여러 장의 전표를 맞추어 확인하는 작업은 시간이 소요되기 때문에 속인적인 체크 체제에서는 그 실수를 완전히 방지할 수 없다. 통관서류의 미비가 초래하는 지연은 국제 물류의 일정 전체에 영향을 미칠 수 있으며 거래처와의 신뢰 관계에도 영향을 미칠 가능성이 있다. 화물이 세관에 도착하지 않았거나 물량이 많아 반입 작업이 늦어져 물류와 관련하여 지연이 발생할 수 있다(AI Market, 2025).

물품이 수입될 때 개인통관고유부호상의 명의자와 수취인 정보가 다르거나, 휴대전화번호가 맞지 않는 등 수취인 정보 검증 오류가 발생할 수 있다. 또한 수입신고 과정에서 요건이 충족되지 못하거나 서류 제출이 미흡한 경우에도 통관이 보류될 수 있다.

3) 인재 부족과 양성의 어려움

통관·물류는 글로벌 공급망 핵심 요소이자 국가경제의 지속가능성을 좌우하는 전략적 인프라로서 미·중 패권경쟁, 디지털 전환(digital transformation : DX) 등 글로벌 환경변화 속에서 그 중요성이 더욱 부각되고 있다. 미래 환경변화에 대응하여 데이터 분석과 첨단기술 활용 역량, 공급사슬 최적화와 통합 관리능력, 그리고 사회변화와 신기술 도입에 유연하

게 대응하는 혁신적 사고를 갖춘 인재가 요구된다. 이러한 역량을 갖춘 인재양성을 저해하는 국내적 요인으로 학령인구 감소, 지역적 불균형, 임금 격차와 인재유출, 통관업·물류업에 대한 낮은 인식, DX 및 기술변화에 대한 대응 부족 등이 지적되고 있으며, 이는 물류산업의 경쟁력 강화와 지속가능성을 위협하고 있다(여영준·한철환, 2024).

한편 통관업무는 전문성이 높고 법령지식과 실무경험이 불가결한 분야이며, 또한 관세법과 관련법규, 품목분류(HS코드), FTA/CEPA 등의 전문지식도 필요하다. 그러나 최근에는 그 업무를 담당하는 인재의 확보가 커다란 과제가 되고 있다. 또한 경험 풍부한 담당자의 퇴직·이동에 의해, 노하우의 계승이 단절되는 경우도 볼 수 있어 업무의 숙인화가 리스크로서 현재화하고 있다. 단기간에 복잡한 통관업무를 습득하게 하는 것은 어렵고, 교육비나 양성 기간의 장기화는 현장의 부담이 되고 있다. 이러한 인재의 불균형이나 양성의 어려움에 따라 업무가 특정의 베테랑 담당자에 집중해, 숙인화가 진행되고 있다. 따라서 업무의 표준화나 효율화가 진행되지 않아, 통관처리의 지연이나 오류가 발생하고 있는 것이 실정이다.

4) 디지털화 대응에의 지연

국제운송에 수반되는 운송장, 송장, 통관 양식 및 기타 문서의 양은 수작업으로 처리하기에는 너무 방대하다. 연간 4,500만 개 이상의 B/L이 발행되고 있는데(ICC, 2024), 워크플로에서 직원을 빈번하고 반복적인 수동 데이터 입력에 할당하는 경우 이미 뒤처지게 되며 출시 기간도 길어질 가능성이 높다(KlearNow. AI, n.d.). 또한 통관업무의 현장에서는 여전히 종이 매체에 의한 서류 관리나 수작업에 의한 데이터 입력이 많이 남아 있어 업무 전체의 디지털화가 늦어지고 있는 상황이 계속되고 있다. 특히 중소기업에서는 기존의 아날로그 수법에서 벗어나지 못하고 있으며 업무효율과 데이터의 일원적 관리에 과제를 안고 있는 상태에서 운용하고 있는 사안도 종종 있다(Bhatt, 2022).

또한 송장이나 P/L, B/L 등 대개의 서류가 여전히 PDF와 종이로 교환되는 경우가 많아, 시스템의 운용설계와 연계가 필요하고, 그 정비에는 상당한 비용과 전문 지식이 필요하다. 이로 인해 통관업자의 DX는 일부에 그치게 되어 전체의 최적화가 달성되지 못하고 있는 것이 실정이다.

3. 통관제도의 선행연구 분석

통관제도와 관련된 선행연구로서, 곽은현(2020)은 해외 국가의 간이통관절차를 비교하여 우리나라의 해외직구 통관절차상 문제점들과 개선방안에 대해 분석하고 있으며, 김종권·유광현(2020)은 수출입통관에 있어 블록체인 기술의 적용에 따른 효율성 제고의 가능성에 대한 논의의 근거를 제시하고 있다. 김종덕·김울성(2019)은 간이통관이 배제되는 해외직구물품에 대한 관세 등의 납세신고 방법 개선, 물품신고시 전자상거래에 적합하도록 신고항목 축소, 그리고 서류보관 의무 면제 등의 방안을 제시하고 있으며, 라공우(2022)는 ASEAN 주요국과 우리나라와의 무역관계를 살펴보고 비관세장벽으로 활용될 수 있는 제도와 표준 인증, 수입통관 관리 등을 고찰하고 있다. 송선욱(2020)은 블록체인 기술을 활용한 관세행정 효율화 방안을 제시하고 있으며, 안태건·김태환(2020)은 디지털 콘텐츠에 대해 수입의 형태와 방식에 따라 관세의 과세여부가 달라지는 등의 문제에 대해서 국내외 관세 통관과 관련된 법령을 고찰하고 있으며, 이명구·이은재(2018)는 우리나라 관세행정에 4차 산업혁명 기술을 어떻게 적용할 것인가 하는 방법론을 제시하고 있다. 이은재·이지수(2020)은 4차 산업혁명 시대 무역원활화 제고를 위한 단일창구의 개선방안 및 시사점을 고찰하고 있으며, 이현균(2024)은 자유무역지역 내 통관과 관련된 법 집행과정에서의 문제점을 살펴보고, 이에 대한 개선방안 및 법 집행기준에 대해서 구체적으로 분석하고 있다. 조원길(2022)은 국내 전자상거래통관체제의 문제점 파악과 재해석을 통해 향후 체제개편에 요구되는 방안을 고찰하고 있으며, 최철호·송인방(2022)은 주요 전자통관체제의 최근 현황과 각 체제가 추구하는 전자통관시스템시장의 수출전략을 분석하고 있으며, 한낙현(2024)은 디지털 무역 통관에 있어 발생하고 있는 문제점을 고찰한 후 국내 디지털 무역 통관체제의 개선방안을 고찰하고 있다.

〈표 1〉 선행연구 정리

구분	연구자(년도)	연구내용(분석방법)
일반적인 전자통관체제의 분석	라공우(2022)	수출물품 인증과 통관절차에서 야기될 수 있는 유의점 분석(문헌분석)
	안태건·김태환(2020)	국내외 관세 통관과 관련된 법령을 살펴보고 관련된 법원판례와 조세심판사례 등을 고찰(문헌분석)
	이현균(2024)	자유무역지역 내 통관에 관한 적용 법률 검토 및 개선방안 연구(문헌분석)
	조원길(2022)	국내 전자상거래통관체제의 문제점 파악과 재해석을 통해 향후 체제 개편에 요구되는 방안의 고찰(문헌분석)

구분	연구자(년도)	연구내용(분석방법)
	최철호·송인방(2022)	전자통관시스템의 최근 현황과 각 시스템이 추구하는 전자통관시스템시장의 수출전략 분석(문헌분석)
	한낙현(2024)	디지털 무역 통관에 있어 발생하고 있는 문제점을 고찰한 후 국내 디지털 무역 통관체제의 개선방안을 고찰(문헌연구)
해외직구 물품의 통관 분석	곽은현(2020)	우리나라의 해외직구 통관절차상 문제점들과 개선방안에 대한 분석(문헌분석)
	김종덕·김율성(2019)	해외직구물품에 대한 관세와 서류보관 의무 면제 등의 방안을 제시(문헌분석)
	김중호(2017)	특송물품의 통관제도에 대한 분석·검토(문헌분석)
통관행정의 효율화 방안 분석	김종권·유광현(2020)	수출입통관에 있어 블록체인 기술의 적용에 따른 효율성 제고 가능성에 대한 분석(문헌분석, 실증분석)
	송선욱(2020)	블록체인 기술을 활용한 관세행정 효율화 방안 제시(문헌분석)
	이명구·이은재(2018)	우리나라 관세행정에 4차 산업혁명 기술을 어떻게 적용할 것인가 하는 방법론을 제시(문헌분석)
	이은재·이지수(2020)	4차 산업혁명 시대 무역원활화 제고를 위한 단일창구의 개선방안 및 시사점을 고찰(문헌분석, 실증분석)

자료 : 한낙현(2024)을 참조하여 저자 재작성.

선행연구의 분석형태를 보면 일반적인 전자통관체제의 법·제도적 고찰, 통관체제에 대한 개선방안 등을 검토하고 있는데 비해, 본 연구에서는 통관서류와 통관업무의 과제, AI를 활용한 통관절차의 과제 해결과 도입사례를 살펴보고, 통관서류업무에 AI를 도입할 때의 대응책을 제시하였다는 점에서 기존의 연구들과 차별성을 가진다고 할 수 있다.

III. AI 기반 통관절차의 과제 해결과 도입사례

1. AI를 활용한 통관 절차의 과제 해결

1) AI-OCR에 의한 문자 인식의 정확도 향상

OCR은 기술을 이용해 사람이 손으로 직접 쓴 필기 문자나 폰트 등의 인쇄, 웹용 글자 이미지를 스캔하여 텍스트로 변환하는 소프트웨어를 의미하지만(Bhatt, 2022), AI-OCR은 여기에 AI 기술을 더하여 인식률을 높이고, 기존 OCR 기술의 한계를 극복하고 있다. AI-OCR은 단순한 문자 인식을 넘어 기계학습(machine learning : ML), 딥러닝, 자연어 이해를 사용하는 것을 의미한다(민기현 외, 2022).

〈표 2〉 AI-OCR과 OCR의 차이

항목	OCR	AI-OCR
인식기술	규칙 기반 패턴 인식	AI·머신러닝을 활용한 인식
인식대상	활자 중심	손글씨, 흐트러진 문자, 비정형 형식에도 대응
학습능력	없음(고정된 규칙)	지속적으로 학습·정확도 향상
정확도	비교적 낮음(환경에 따라 오인식 발생)	고정확도로 인식 가능
주요 용도	전표나 문서의 디지털화	계약서, 청구서, 손글씨 문서의 데이터화

자료 : Krzen et al. (2024) 참조하여 저자 작성.

한편 송장이나 P/L과 같은 통관서류에는 필기 문자나 스캔에 의한 화상 데이터, PDF 파일 등의 다양한 형식의 정보가 포함되어 있어, 이들을 디지털 데이터로서 처리하는 것이 요구된다. 수출입물류와 관련된 운송, 통관, 보관, 선복예약, 물류진행관리 등의 업무에는 B/L, 송장, P/L 등의 다양한 통관서류가 수반되는데, 업체마다 고유한 특징이 있기 때문에 업무자동화를 위해서는 AI-OCR 기술이 뒷받침되어야 한다(Stoyanova, 2023). 즉, 대부분의 무역서류는 PDF파일이나 엑셀문서, 워드문서 형태로 첨부되어 제공되기 때문에, 수출입 물류업무를 자동화하기 위해서는 OCR이 필수적이며, OCR은 상당한 노하우와 데이터 축적이 필요한 영역이다(최광민, 2024).

〈그림 1〉 SaaS형 RPA+OCR 기반 무역서류 처리 자동화



자료 : 최광민, 2024.

또한 통관서류, 무역계약서, 보험 서류 등에 대해서도 AI-OCR 및 자연어처리(Natural Language Processing : NLP) 기술을 활용하여 자동 생성 및 검토를 할 수 있다. NLP를

조합한 AI-OCR은 복수의 포맷이나 기재 내용의 불통일에 대응할 수 있다. AI-OCR이 이용될 경우 문맥을 이해하면서 문자를 판독하는 것이 가능하게 되어, 어구의 전후관계를 해석하면서 구조화 데이터를 생성할 수 있다(Bhatt, 2022). AI-OCR은 오기와 약어, 다른 문자가 포함되어 있더라도 AI가 문의(文意)를 보완하기 때문에 통관서류의 판독 정확도는 향상된다. 결과적으로 AI-OCR이 이용될 경우 서류 확인에 걸리는 단계를 대폭 절감할 수 있어 인적 체크에 의지하지 않고도 높은 정확도의 신고 준비를 실현할 수 있다.

생성형 AI의 NLP 모델은 방대한 서류 데이터세트를 기반으로 학습이 가능하며, 다양한 유형의 통관서류의 템플릿을 생성할 수 있다. 제품의 설명, 배송세부정보, 매도인과 매수인의 정보 등 특정 데이터를 입력하면, AI는 이러한 템플릿을 정확하게 입력할 수 있다. 자동서류 작성의 실제 사례로는 iCustoms가 지능형 문서처리(intelligent document processing : IDP) 모듈에서 생성형 AI를 사용하는 것을 들 수 있다. 이 모듈은 통관서류에서 데이터를 스캔, 추출, 처리하여 몇 초 만에 99%의 정확도로 세관 신고서를 자동으로 입력한다(Yazid, 2024). 이를 통해 수동 데이터 입력, 교차 참조, 오류 수정에 소요되는 시간이 크게 줄어들게 된다.

〈그림 2〉 IDP의 처리 과정



자료 : Stoyanova (2023)을 참조하여 저자작성.

IDP는 종이 문서 또는 문서 이미지의 수동 데이터 입력 프로세스를 자동화하여 다른 디지털 비즈니스 프로세스와 통합하는 것을 말한다. 즉, IDP는 AI·ML·NLP·OCR 등의 기술로 문서 데이터를 자동인식-분류-추출-처리해, 대량의 문서를 지능형으로 자동화·효율화하는 기술이다. 이 기술은 매일 상당한 양과 다양한 종류의 서류를 관리해야 하는 물류 기업에 유용하다(Shamout et al., 2022). 기업은 ML을 기반으로 한 서류처리 자동화를 활용하면 모든 유형이나 출처의 문서에서 관련 데이터를 추출할 수 있게 된다. 이것에는 송장, B/L,

주문 세부 정보, 더욱이 고객 피드백 설문 조사까지 포함된다. 이를 통해 비즈니스 환경에 대한 귀중한 통찰력을 추출하는 데 도움이 되며, 마케팅, 판매, 위험 관리, 재무, 생산 계획, 공급망 운영 등의 분야에 대해 의사결정 프로세스가 개선된다(Helo and Hao, 2022).

상업송장은 AI-OCR 데이터 추출 툴을 활용하는 좋은 사례이다. 상업송장은 매도인이 매수인에게 제공하는 상업 문서로, 거래된 상품이나 서비스에 대한 자세한 정보와 결제 내역을 명시하는 역할을 한다. 상업송장은 사업 거래에서 중요한 법적 문서로, 매수인이 비용을 지불해야 할 금액, 지불 기한, 제공된 상품 또는 서비스의 설명 등이 포함된다. AI-OCR 데이터 추출 툴이 활용되면 품목 설명, 가격, 수량, 매수인과 매도인의 상세한 정보 등 필요한 데이터를 신속하게 추출할 수 있다. 이와 유사한 프로세스는 운송인이 화물 수량을 확인하는 문서인 B/L에도 적용할 수 있다. 이를 통해 통관절차는 개선되고, 창고 보관 비용이 절감되고, 정시 배송이 보장되고, 고객 만족도도 향상되어 급변하는 국제 무역 환경에서 경쟁 우위를 확보할 수 있다.

결론적으로, AI-OCR을 통한 통관서류업무 자동화는 국제무역과 관련된 기업의 판도를 바꾸는 것이다. 이 프로세스가 자동화하면 정확성과 효율성을 높이고, 비용을 절감하고, 규정 준수를 향상시키며, 고객 만족도를 향상시킬 수 있다.

2) AI 기반 검증 자동화

최근 통관 및 무역 관리 분야에서는 AI 기술 도입에 대한 관심이 높아지고 있으며, ML, NLP, 예측 분석 기술을 활용하여 통관업무의 효율성, 정확성 및 의사결정 역량을 향상시키는 방안을 모색하고 있다(Chen, 2024). Koushizadeh et al.(2021)은 AI 기반 위험 평가를 중심으로 분석하고 있는데, 이는 ML 알고리즘을 사용하여 무역 데이터를 분석하고 원산지, 신고 가격, 과거 규정 준수 기록 등의 요소를 기반으로 고위험 화물을 식별하는 것을 포함하고 있다. 세관에서 AI가 널리 활용되는 분야 중 하나는 NLP 기술을 활용한 서류의 자동처리이다. 통관절차에는 송장, C/O, 신고서 등 방대한 양의 무역서류를 검토하고 검증하는 과정이 포함된다(라공우, 2022). NLP 모델은 비정형 무역서류에서 관련 정보를 자동적으로 추출하기 위해 이용되며, 수작업에 의한 처리에 필요한 시간과 노력을 절감하고 있다(Saberi et al., 2019). 이러한 자동화는 통관업무의 효율성을 향상하고 수동 데이터 입력과 관련된 오류 위험을 최소화한다.

전자문서 시스템은 통관 절차의 DX를 가속화하는 핵심 기술이다. 기존에는 수입신고서, 송장, C/O 등 각종 서류를 수기로 작성하거나 출력한 후 스캔하여 제출하는 번거로운 절차가 필요했지만, 전자문서를 활용하면 이 모든 과정을 클릭 한 번으로 간소화할 수 있다. 특히 전자자료교환(EDI) 시스템을 통해 통관 관련 정보가 수출자, 수입자, 관세사, 세관 등의 이해관계자 간에 실시간으로 공유되면서, 불필요한 대기 시간을 줄이고 오류 발생 가능성도 대폭 낮아지고 있다(곽은현, 2020). 또한, 전자문서는 사전 작성 및 자동 저장 기능을 제공하기 때문에 수입자가 과거 제출 이력을 바탕으로 간편하게 서류를 생성할 수 있어 업무 편의성이 크게 향상된다.

한편 AI는 송장과 P/L의 상품명이나 수량의 일치를 비롯한, 각 서류간의 정합성이나 기재 필수 항목의 누락 등을 자동적으로 점검한다. 이것에 의해 신고 전의 미비발견율을 높이고 뒤돌아오는 것을 방지한다. DHL은 송장 및 통관 양식에서 AI 지원 캡처, 분류, 데이터 추출을 활용하여 그 효율성을 70% 높이고 124개 공급업체의 수천 장의 송장 처리를 자동화했다(Vermeir, 2024). 마찬가지로, 중동의 선도적인 해양 및 물류 회사인 Milaha는 매일 종이와 디지털 형식으로 접수되는 수백 개의 송장을 자동화하여 비슷한 성공을 거두었다. Milaha는 IDP를 RPA 플랫폼과 통합함으로써 송장 처리 시간을 64% 단축하고, 또한 오류도 줄이게 되어 직원의 생산성을 향상시키게 되었다(Vermeir, 2024).

3) 화물의 HS코드 분류·리스크 판정의 자동화

AI 기술은 방대한 데이터를 분석하고, 패턴을 파악하며, 예측 모델을 구축하는 능력을 갖추고 있어, 관세행정에서 다양한 방식으로 활용될 수 있다. 특히, AI 기반의 위험 관리 시스템(Risk Management System)은 불법 거래, 테러 위험, 세금 회피 등 위험 요소를 사전에 탐지하고 대응하는 데 중요한 역할을 한다. 또한, AI는 통관 심사 절차를 자동화하고, 관세 평가 시스템의 정확도를 높이는 데도 기여할 수 있다. 예를 들어, AI 기반의 이미지 인식 기술이 활용되면 X-ray 검사 시스템에서 밀수품을 보다 정밀하게 식별할 수 있으며, 자동화된 관세분류시스템을 통해 HS 코드 분류의 오류를 최소화할 수 있다.

통관절차의 경우 화물에 적절한 HS 코드(관세분류번호)를 할당하는 작업은 관세액의 산출과 수출입 규제 확인에 직결되는 공정이다. 그러나 이 프로세스는 속인화하기 쉬우며 판단 실수와 해석의 불통일이 발생하는 리스크도 있다. 이러한 과제에 대해서는 AI를 활용하

여 HS 코드의 자동분류를 실시하는 기술이 주목받고 있다. NLP와 ML 모델이 통합되게 됨으로써 통관서류에 기재된 상품설명을 해석하고 최적의 HS 코드를 높은 정확도로 추정할 수 있다. 또한 리스크 판정 기능이 통합됨으로써 수출입규제품 및 안보 무역 관리 대상에 해당할 수 있는 화물을 감지하여 사전에 경고를 발하는 것도 가능하게 된다.

게다가 각 물품에 대해 HS 코드를 수동으로 식별하고 할당하는 일은 노동 집약적이다. 또한 수동 HS 분류에는 오류가 발생할 가능성이 높아진다. 잘못 분류된 물품은 세관 당국의 감사, 벌금 및 과태료로 이어질 수 있다.

생성형 AI는 이 과정을 자동화하고 제품 설명과 기능을 글로벌 데이터베이스내의 정확한 HS 코드와 일치시킬 수 있다. 예를 들어, 세계관세기구(WCO)의 후원으로 조직된 전문가 그룹인 BACUDA(BAse CUstoms DAta의 약자) 팀은 HS 분류를 자동화할 수 있는 AI 툴을 개발하였다(Yazid, 2024). 이 툴은 물품의 상업적 설명을 분석하고 해석한 다음, 이를 과거 물품의 유사한 입력 데이터와 비교하여 HS 코드를 정확하게 예측할 수 있다. 생성형 AI 알고리즘은 현재 규제와 무역 협정을 고려하여 다양한 물품에 적용되는 관세 및 세금을 예측하고 계산할 수도 있다. 예를 들어 어떤 회사가 태국에서 미국으로 도정된 쌀을 운송할 계획이라고 가정해 본다. AI 기술이 HS 코드(이 경우 1006.30.10(반도정 또는 통도정 쌀))를 특정하면 이러한 유형의 물품에 대한 미국의 최혜국대우(MFN)관세율을 조회할 수 있다(Yazid, 2024).

이 데이터를 사용하면 AI가 생성한 상업 송장에서 추출한 상업적 가치를 기반으로 해당 물품에 적용되는 추정 관세를 계산할 수 있게 된다.

4) 챗봇과 AI 에이전트에 의한 문의 대응

AI 챗봇은 기업이 고객 응대 업무를 자동화하고, 보다 신속하고 정확한 답변을 제공할 수 있도록 도와준다. 기업의 특성과 고객의 요구를 고려해 최적의 AI 챗봇을 구축하면, 고객 만족도 향상과 운영 효율성 증대를 동시에 달성할 수 있다(이철승·백혜진, 2023). AI 챗봇은 단순한 고객 응대 도구를 넘어, 기업의 서비스 품질을 향상하는 핵심 요소로 자리 잡고 있다. 기존에는 고객이 문의할 때마다 상담원이 직접 응대해야 했지만, AI 챗봇이 등장하면서 업무 부담이 크게 줄었다. 한편 AI 에이전트는 다양한 업무에서 인간 능력을 보강하도록 설계된 고급 AI 어시스턴트이다. AI 에이전트는 기업의 목표를 달성하기 위해 데이터를 처리하고, 의사결정을 내리며, 실제 업무를 자동화하는 AI 시스템이다. 최근 ChatGPT, 오픈 AI가

GPT-3 및 GPT-4 대규모 언어 모델(Large Language Model : LLM)로 개발한 챗봇, 그리고 구글이 LaMDA 모델로 개발한 챗봇인 Gemini 등이 인기를 끌면서, AI 에이전트도 함께 주목받고 있다. 더 제한된 챗봇과 달리, AI 에이전트는 자연어를 이해 및 생성하고, 대량의 정보를 처리 및 분석하고, 복잡한 활동(예: 글쓰기, 코딩, 문제 해결, 크리에이티브 업무)을 지원할 수 있다(천수경·연명흠, 2020). 이러한 시스템은 일반적으로 방대한 양의 데이터로 훈련된 LLM에서 구축되기 때문에 컨텍스트를 인식하는 상호 작용을 보다 잘 수행할 수 있다.

한편 통관절차에 관한 사내에서의 기본적인 문의에 대해 AI 챗봇이 24시간 365일 대응함으로써 담당자의 부담을 경감한다. 통관절차에 관한 복잡한 문의에 대해서는 관련 법규와 과거의 사례를 순식간에 검색·조회하여 인간이 이해하기 쉬운 형태로 회답 및 자문을 생성한다. 보다 고도의 문의 대응으로서는 특정 품목에 있어서의 관세율이나, 이용가능한 FTA/CEPA 등의 적용 조건 등을 AI 에이전트가 조사해, 최적의 선택지를 제안하는 등의 활용도 고려할 수 있다.

2. AI 도입의 사례

1) Flexport

미국의 테크포워더(디지털화된 국제물류중개업자)로 급성장한 Flexport는 방대한 수출입 서류와 공급망 정보를 독자적인 온라인 플랫폼으로 관리해 왔다. 국제물류에서는 선사·항공회사·트럭업자·세관 등 다양한 이해관계자가 관련되며 의사소통 비용과 서류의 인적 오류가 항상적인 과제였다(Mudness Partners, 2025).

Flexport는 기존의 OCR뿐만 아니라 생성형 AI를 이용하여 문장 전체의 내용을 자동적으로 해석하고 있다. 계약서와 송장에서 품명·수량·배송경로 등을 요점 추출하여 맞춤형된 클라우드 시스템에 즉시 등록하고 있다. AI가 추출한 정보를 담당자가 2차 점검하는 구조이며 입력 실수를 격감시킴과 동시에 처리시간을 대폭으로 단축했다.

Flexport는 채팅봇 형식으로 24시간 언제라도 문의에 대응하는 기능을 제공하고 있다. 특히 영어가 제2언어의 고객에게는 장벽이 낮아, 서류나 재고 상황의 조회가 신속하게 이루어지는 것이 평가되고 있다. 사내 운영자가 항상 대응하지 않아도 일정한 문제해결이 가능하게 되었다.

2) 오므론

제조업인 오므론은 해외 공장이나 현지 공급업체와의 거래가 많아 FTA를 활용하기 위한 원산지증명이 중요하다. 그러나 품목이나 원재료의 방대한 정보를 확인하고 원산지 판정을 실시하는 과정은 속인적이며, 담당자에게 과부하가 되는 것이 과제로 되었다(Mudness Partners, 2025).

과거의 신청 사례나 규칙 해석을 LLM에 학습시켜 담당자가 AI 채팅에 질문하면 최적의 조언이나 관련 조항이 제시되는 시스템을 시험 운영하고 있다. 이로 인해 경험이 적은 직원도 실수 없이 판단할 수 있게 되었다. 또한 장래적으로는 계약 정보나 부품표의 데이터를 입력하여, AI가 C/O를 자동 생성하는 구상도 진행 중이다. 오므론은 원산지 판정이라는 특정 분야에 도입하여 성공 사례를 축적한 후 사내에 전개하는 전략을 취했다. 종래의 FAX 문화나 종이 서류가 많은 현장에 대해서도, 단계적으로 디지털화를 진행하는 것으로 저항감을 완화하고 있다.

3) Shippio

디지털 포워더로서 주목받는 Shippio는 온라인으로 운송 의뢰나 통관 수배, 서류 관리를 일괄 지원하는 서비스를 제공하고 있다. Shippio는 전통적으로 종이기반이나 전화연락이 일반화되고 있었던 물류 프로세스를 철저하게 디지털화함으로써 급속하게 사용자를 확대하고 있다. Shippio는 송장이나 P/L을 업로드하면, AI가 필요 정보를 추출·시스템에 등록하는 기능을 개발 중이다. 이를 통해 기존 아날로그 프로세스와 온라인 관리를 중개하여 담당자의 전기(転記) 실수를 줄일 수 있게 된다. 또한 AI 챗봇이 화주·물류사업자 간의 커뮤니케이션을 일원 관리해, 기본적인 문의에 즉시 회답한다. 심야·휴일에도 질문이 가능하게 되어, 실수나 분쟁을 신속하게 해결하는 지원 체제가 정비되어 있다(Mudness Partners, 2025). 또한 디지털화가 지연되기 쉬운 물류업계에서도 최신 기술을 실용 수준에서 도입할 수 있는 사례로서 주목받고 있다.

4) LG CNS 햄프킹

관세법인은 기업이 해외에서 물품을 들여올 때 통관업무를 처리해주는 업체다. 관세법인 세인이 보유한 2000여곳 기업고객에게 전달되는 물품 통관업무에 LG CNS와 햄프킹이 국

내 최초로 RPA와 AI 기술을 적용하고 있다.

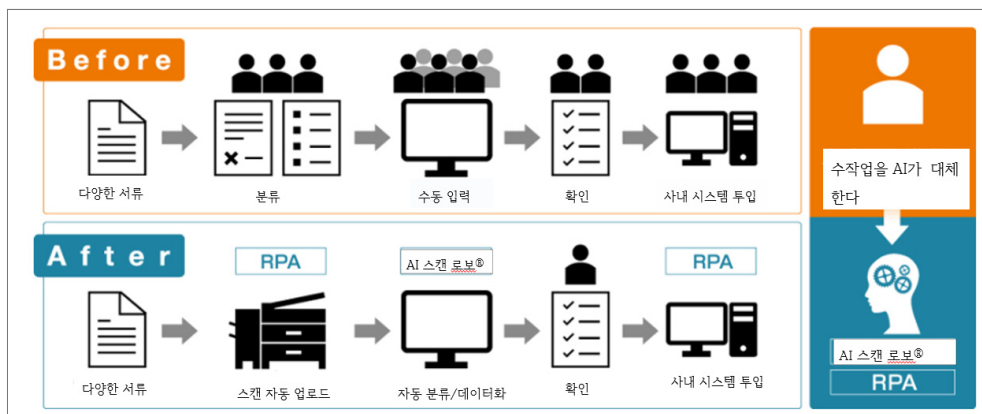
RPA·AI 수입 통관자동화 기술은 해외에서 들어오는 컨테이너 1개 물량 기준으로 통관 처리 시간을 5시간에서 5분으로 줄여준다(KITA, 2020). 먼저 전 세계 각지에서 접수되는 송장을 OCR로 판독한다. LG CNS 햄프킹은 AI 이미지 인식 기술을 활용해 송장 문서의 물품번호, 보험료, 도착일 등 필요 없는 항목은 제외하고, 관세 시스템에 입력하는 필수 정보인 품목·수량·단가·금액 등을 추출하고 있다(김태인·김중권, 2020).

추출된 정보를 관세 시스템에 입력하는 업무는 햄프킹이 자체개발한 통관용 RPA 솔루션이 담당한다. 햄프킹은 AI를 도입해 RPA가 관세 시스템에 입력한 정보의 데이터를 분석하고 비용을 산정하는 작업을 자동화할 계획이다. 현재 RPA·AI는 관세법인 세인의 통관 업무 30%를 자동화했으며, 햄프킹은 관세 비용 산정과 최종 작업인 관세청 신고까지 RPA·AI로 가능하게 해 통관업무 100% 자동화를 구현한다는 계획이다(KITA, 2020).

5) 스미토모창고

주식회사 스미토모 창고에서는 넷스마일사의 AI-OCR 서비스 “AI스캔 로보®”를 도입하여 서류 처리를 효율화하고 있다. 이 기업에서도 무역 전표를 종이매체로 관리하고 있으며 수작업에 의한 점검과 입력에 의해 작업시간의 증가와 실수의 리스크가 과제가 되고 있었다(AI Market, 2025).

〈그림 3〉 AI-OCR에 의한 서류의 데이터화



자료 : AI Market, 2025.

“AI스캔 로보®”는 복잡한 포맷의 전표에 대응 가능하고, 사용자가 마우스 조작으로 간단하게 판독 개소를 설정할 수 있는 점이 평가되고 있다. 도입 후는 전표의 판독정확도가 향상되고 작업시간의 단축에 의해 업무효율이 대폭으로 개선되었다. 또한 영어나 필기문자의 인식에도 대응하고 있어 글로벌한 물류 업무에 있어서도 활용할 수 있게 되었다.

〈표 3〉 사례의 비교

회사명	주요 내용
Flexport	국제 물류×생성형 AI로 서류 업무를 일원화
오므론	FTA C/O 업무에 생성형 AI의 도입
Shippio	스타트업이 도전하는 국제 물류 DX
LG CNS 햄프킹	AI 도입해 컨테이너 1개 통관처리 5시간→5분
스미토모창고	AI-OCR에 의한 서류의 데이터화

자료 : 관련자료를 활용하여 저자작성.

IV. AI 기반 통관서류업무의 자동화에 대한 대응책

1. 법규준수 시스템의 구축

AI 규정 준수는 기업이 AI 시스템 사용에 적용되는 법률과 규정을 준수할 수 있도록 하는 결정과 관행을 말한다. 이러한 표준에는 조직이 책임감 있게 AI 모델과 알고리즘을 개발하도록 돕기 위해 고안된 법률, 규정 및 내부 정책이 포함된다.

유럽의 일반개인정보보호법(General Data protection Regulation : GDPR)은 AI가 자동으로 내린 결정에 대해 사용자가 이의를 제기할 수 있도록 보장하고 있다. 이는 AI 기술 사용자가 자신의 데이터가 어떻게 처리되는지를 알 권리를 갖는다는 점에서 의미가 크다. 한국 또한 개인정보보호법과 AI 기본법을 연계하여 유사한 권리를 보장하고 있다(김성현·이창무, 2018).

AI 규제는 기업의 기술 개발 방향에도 상당한 영향을 미친다. 고위험군 AI를 개발하거나 사용하는 기업은 사전 신고, 외부 평가, 내부 감시 체계 등 다양한 의무를 수행해야 한다. 비용과 시간이 더 소요될 수 있지만, 규제에 부합하는 시스템은 사회적 신뢰를 얻는 데 유리한 위치에 설 수 있다. 또한 글로벌 기업은 각국의 규제가 상이하다는 점에서 대응 전략이

필요하다. 한 국가에서 허용된 기술이 다른 국가에서는 금지될 수 있으므로, 국제 법규를 사전에 충분히 분석해야 한다(김경민 외, 2024).

한편 통관업자에게 변화하는 국제무역 규정을 최신 상태로 유지하는 것은 확실히 번거로운 일이며, 끊임없이 변화하는 법률과 협정을 수동으로 검색하는 것은 어려운 과정이 될 수 있다. 다행히도 생성형 AI 시스템은 정부 데이터베이스, 공식 저널, 국제 무역 플랫폼을 포함한 광범위한 소스를 지속적으로 스캔하고 모니터링하여 수출입 규정에 대한 업데이트를 확인할 수 있도록 설계되어 있다(Yazid, 2024).

통관업무에서는 관세법, 대외무역법, 전략물자수출입고시와 같은 법령이 적용된다. 이를 제대로 반영한 AI 시스템이 아니면 잘못된 처리나 위법한 수출입을 초래할 위험이 높아진다. 그 중에서도 안보무역에 관한 규제는 엄격하기 때문에 시비의 판정의 자동화와 수출허가정보의 관리에서도 최신의 법개정에 대응한 체제가 불가결하다.

2. AI 학습 데이터의 확보

AI 학습 데이터는 AI의 심장과 같은 존재이며, 이 데이터의 질과 양에 따라 AI 모델의 성능과 신뢰도가 좌우된다. AI 학습 데이터 확보는 단순히 데이터를 많이 모으는 것만으로 충분하지 않다. 이것에는 데이터의 품질, 다양성, 대표성 등을 고려해야 하며, 윤리적, 법적 문제 또한 신중하게 고려해야 한다(이용 외, 2022). 효과적인 데이터 확보 전략은 다음과 같다.

1) 자체 데이터 수집

기업이 직접 데이터를 수집하는 방법으로, 웹 크롤링, 센서 데이터 수집, 사용자 인터페이스를 통한 데이터 수집 등 다양한 방법을 활용할 수 있다. 이 방법은 데이터에 대한 통제력이 높지만, 시간과 비용이 많이 소요될 수 있다.

2) 외부 데이터 구매

이것은 데이터 제공 업체로부터 필요한 데이터를 구매하는 방법이다. 이 방법은 다양한 종류의 데이터를 빠르게 확보할 수 있지만, 비용이 상당할 수 있으며 데이터 품질에 대한 검증이 필요하다. 또한 데이터의 라이선스 및 저작권 문제도 확인해야 한다.

3) 공공 데이터 활용

이것은 정부기관이나 연구기관에서 제공하는 공개 데이터를 활용하는 방법이다. 그런데 이 방법은 비용이 저렴하고 접근성이 높지만, 필요한 데이터가 부족하거나 품질이 낮을 수 있다.

4) 데이터 생성 기술의 활용

최근에는 생성적 적대 신경망(Generative Adversarial Networks : GAN) 같은 모델을 통해 합성 데이터를 생성할 수 있다. GAN은 신경망에 뿌리를 두고 있으나 비지도 학습으로 정의되며, 두 개의 신경망이 서로 경쟁하며 학습하게 된다. GAN은 경쟁하여 최적화를 수행하는 생성형 신경망이다. GAN은 모델 내부에 있는 Generator(생성망)과 Discriminator(판별망)가 서로 경쟁하면서 학습하는 원리로 동작한다. 이러한 기술은 특히 현실에서는 획득하기 힘든 데이터를 만들어 낼 수 있어 매우 유용하다(조영주 외, 2020).

한편 AI에 의한 통관업무의 자동화에는 입력 데이터의 질을 높게 유지할 필요가 있다. 학습 데이터에 오류나 표기의 불통일, 불완전한 정보가 포함되어 있으면, AI의 출력 결과에 오류가 발생하기 쉬워진다. 또한 오인식을 방지하기 위해서는 표준화된 입력 포맷의 정비나 기재 룰의 통일이 불가결하다. 또한 과거의 통관 실적이나 신고 이력 등 정확한 데이터를 학습시키는 것으로, AI의 판단 정확도를 제고할 수 있다.

3. 보안 대책의 강구

AI는 ML과 딥러닝 같은 하위 기술을 포함하며, 데이터를 기반으로 스스로 학습하고 점점 더 정확한 결과를 도출할 수 있다. AI는 다양한 기술과 응용 분야를 포함하며, 대표적인 기술로는 NLP, 컴퓨터 비전, 데이터 마이닝, 지능형 로봇 등이 있다. AI 기술은 다양한 분야에서 경제적, 사회적 혜택을 제공하고 있다. 그런데 AI의 확산은 대량의 알고리즘의 활용과 데이터 수집으로 인해 발생하는 AI의 역기능 및 윤리적, 사회적 문제에 대한 우려도 존재한다. 더욱이 새로운 AI 형태인 생성형 AI 및 초거대 AI 등이 대두되면서 그에 따른 안전성과 신뢰성 문제, 프라이버시의 침해 및 데이터 유출에 대한 우려, AI 모델공격 등의 보안위협에 대한 우려도 더욱 증가하고 있다(김지연 외, 2023).

여기서 제기되고 있는 다양한 AI 보안 위험은 AI 시스템의 설계, 개발, 배포 및 운용하는 여러 단계의 과정에서 발생할 수 있기 때문에, 안전한 AI 생태계의 발전과 활용을 위한 정책 방향을 수립하는 것 이외에도 프라이버시 정책도 함께 고려되어야 한다. AI 도입으로 인해 안전한 AI 활용을 위한 기술적 보안과 법·제도 등 정책적 대응방안을 강구해야 할 뿐만 아니라 다양하게 발생하는 보안 위험도 고려할 필요가 있을 것이다(김지연 외, 2023).

한편 통관서류에는 송장, 계약서, 수출입처의 기업 정보, 가격 정보와 같은 기밀성이 높은 데이터가 포함되어 있다. 이들이 외부로 유출되는 경우, 거래처와의 신뢰 관계나 기업의 신용에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에, 보안 대책은 철저히 강화될 필요가 있다(AI Market, 2025). 또한 AI 시스템을 클라우드 기반으로 운용하는 경우에는 통신경로의 암호와 접속 권한의 세분화, 로그 감시의 강화 등 기술적인 대책이 필수적이다. 통관업무에 특화된 AI이더라도 정보관리의 느슨함이 하나라도 있으면 업무정지와 법적 책임으로 연결될 우려가 있다. 또한, 인적 오류나 내부 부정에 대한 대비로서는 조작 로그의 기록이나 감사 체제의 정비, 정기적인 보안 교육의 실시도 효과적이다.

4. AI 거버넌스의 확립

AI는 인간이 수작업으로 데이터를 분석하는 데 드는 시간과 노력을 획기적으로 절감하는 명백한 이점을 제공한다. 그러나 이러한 기계적 판단이 인간의 고유한 의사결정 영역을 점진적으로 대체하는 상황에서, 여러 새로운 문제에 직면하고 있다. AI가 도출한 결과를 비판적인 사고 없이 수용할 경우, 인간의 본질적인 창의성과 통찰력이 약화될 수 있으며, 더 나아가 예상치 못한 윤리적 논란을 야기할 수 있는 판단이 내려질 위험성도 내포하고 있다.

AI 거버넌스는 AI 시스템과 톨이 안전하고 윤리적임을 보장하는 데 도움이 되는 프로세스, 표준 및 보호 장치를 의미한다. AI 거버넌스 프레임워크는 안전, 공정성 및 인권 존중을 보장하기 위해 AI의 연구, 개발 및 적용을 감독한다(Papagiannidis et al., 2025).

효과적인 AI 거버넌스는 혁신과 신뢰를 촉진하면서 편향, 개인정보 침해 및 오용과 같은 위험을 해결하는 감독 메커니즘을 포함한다. AI 거버넌스에 대한 윤리적 AI 중심 접근법은 AI 개발자, 사용자, 정책 입안자 및 윤리학자를 포함한 광범위한 이해관계자들이 참여해야 하며 AI 관련 시스템이 사회의 가치에 맞게 개발되고 사용되도록 보장한다(고준성, 2024).

AI 거버넌스는 인간 개입으로 인해 AI 생성 및 유지 관리에 발생하는 내재적 결함을 해결한다. AI는 사람이 만든 고도로 엔지니어링된 코드와 ML의 산물이기 때문에 인간의 편견과 오류에 취약하며, 이로 인해 개인에게 차별과 기타 피해가 발생할 수 있다(박선형, 2024). 거버넌스는 이러한 잠재적 위험을 완화하기 위한 구조화된 접근 방식을 제공한다. 이러한 접근 방식에는 건전한 AI 정책, 규제 및 데이터 거버넌스가 포함될 수 있다. 또한 거버넌스는 잠재적인 부정적인 영향으로부터 보호하기 위해 AI 행동을 윤리적 기준 및 사회적 기대에 맞추는 데 필요한 감독을 확립하는 것을 목표로 한다(Papagiannidis et al., 2025).

한편 AI는 통관업무의 효율화를 기대할 수 있다고는 해도, 최종적인 판단을 인간이 실시하는 공정은 여전히 중요하다. 법령의 해석이 나누어지는 경우와 예외적인 사안에서는 AI에 의한 고속의 처리가 아니라 인간의 판단력과 경험이 필요하게 된다(AI Market, 2025). 예를 들어, 수출입 규제의 대상 품목이나 특수한 거래 조건이 관련되는 신고에서는, 기계적인 처리만으로는 적절히 대처할 수 없는 경우가 있다.

또한 AI의 출력 결과를 맹목적으로 신용하게 되면 오처리나 신고 오류를 놓칠 가능성이 있기 때문에, 더블 체크 체제의 정비가 필수적이다. 인간에 의한 리뷰 공정을 설정함에 따라 오판정의 발견율을 높이고, 신고의 정확성을 담보할 수 있다. AI와 인간이 상호 보완하는 운영 체제를 구축함으로써 업무의 신뢰성과 유연성을 제고할 수 있다.

5. AI 인력 양성을 위한 전략적 접근

전 세계가 AI 주도권을 두고 치열한 경쟁 중인 지금, 기술 이해력과 활용 능력은 더 이상 선택이 아닌 생존의 조건이다. 특히 우리나라는 제조업·의료·금융·콘텐츠 등 다양한 산업군에서 AI 기술 융합이 폭발적으로 증가하고 있어, 이에 대응할 인재 수요가 급증하고 있다.

따라서 통관서류업무를 담당할 AI 인력양성을 위한 전략적 접근 방안으로서, AI 시대에 적합한 교육 커리큘럼을 개발하는 것은 인력 양성에서 가장 핵심적인 요소 중 하나이다. AI 기술의 발전 속도가 빠른 만큼, 교육과정 역시 그에 맞춰 지속적으로 업데이트되어야 한다. 또한, 프로그래밍 언어, 알고리즘, 데이터베이스 관리 등 실질적인 기술을 가르치는 부분에서 실습 중심의 커리큘럼 개발이 필요하다(Goover, 2025). 더 나아가, AI와 ML의 기초 이론에 대한 교육뿐만 아니라, 윤리적 고려와 법적 책임에 대한 교육도 강화해야 한다.

이는 기술 발전과 함께 증가하는 AI 윤리에 대한 사회적 요구에 부응하기 위한 것이다.

AI 기술은 특정 직무와 업무에 변화와 영향을 미치기 때문에, 기존 노동자들의 직무 재교육과 역량 강화가 필수적이다. 대개의 산업에서 AI의 도입이 진행되고 있는 가운데, 직원들이 AI 기술을 활용할 수 있는 능력을 갖추지 않으면 일자리에서 소외될 위험이 커진다. 따라서 기업들은 임직원들에게 AI 교육 프로그램을 제공하고, 그들이 새로운 기술을 습득할 수 있도록 지원해야 할 것이다(Goover, 2025).

통관서류업무를 담당한 AI 인력 양성을 효과적으로 수행하기 위해서는 산업계와 교육기관 간의 긴밀한 협력이 필요하다. 기업들은 무엇을 필요로 하는지에 대한 명확한 피드백을 교육기관에 제공해야 하며, 교육기관은 그 피드백을 바탕으로 커리큘럼을 조정할 필요가 있다. 이러한 협력은 교육의 질을 높이고, 실제 산업에서 요구하는 기술과 지식을 습득할 수 있도록 하는 데 중요한 역할을 한다(Goover, 2025). 또한, 기업이 교육기관에 필요한 장비나 소프트웨어를 지원함으로써 실제 산업 현장에서 다루는 도구와 환경을 경험할 수 있는 기회를 제공해야 할 것이다. 향후 이러한 협력 관계를 통해, 기업과 교육기관 모두가 실질적인 이익을 거둘 수 있는 시스템을 구축해야 할 것이다.

기업은 사회적 책임을 다함으로써 지속 가능한 인력 양성에 기여해야 할 것이다. AI 및 자동화로 직무가 변화하는 상황에서 정부와 기업은 협력하여 학습 기회를 제공하고, 취업을 위한 제도적 지지를 마련해야 할 것이다. 특히, 기술 발전으로 인해 상대적으로 더 많은 영향을 받는 저숙련 인력의 재교육과 직업 전환을 위한 프로그램을 개발하는 것이 필요하다. 또한, 사회적 기업과의 협력을 통해 취약 계층을 위한 고용 기회를 확대하고, 이것이 지속 가능한 경제로 나아가는 데 기여할 수 있을 것이다.

V. 결론

통관 자동화 시스템은 세관 내 심사 및 물류 연결 과정을 빠르고 효율적으로 전환하는데 중심적인 역할을 한다. 특히 대형 물류 창고나 항만에서 자동화 설비와 통합된 통관시스템은 수입 화물이 도착하자마자 자동으로 스캔, 분류, 이동되는 프로세스를 가능하게 한다. 이를 통해 세관 심사와 물류 이송 간의 시간 간격이 최소화되며, 화물이 물류창고에 오래

머무는 비효율적인 상황을 방지할 수 있다.

AI 통관, 전자문서 시스템, 자동화 설비의 통합은 통관 시간을 획기적으로 단축할 수 있는 현실적인 해결책이다. 각 기술은 단독으로도 충분한 효과를 발휘하지만, 이들을 유기적으로 결합할 경우 시너지 효과는 더욱 커진다. 특히 전자문서 기반의 사전 신고, AI의 고위험 식별, 자동화 시스템과의 물류 연계는 통관 전후의 전 과정을 단축하고 효율화하는 데 필수적이다. 글로벌 무역의 경쟁이 점점 치열해지는 상황에서, 신속한 통관은 기업의 수익성과 신뢰도에 직결되는 중요한 요소이다. 따라서 기업과 정부는 이러한 기술 도입을 적극적으로 추진해 나가야 할 것이다.

국제거래의 원활한 수행에 빠뜨릴 수 없는 통관서류의 관리·처리 업무에는 높은 전문성과 엄격한 법령 준수가 요구된다. 이로 인해 현장에서는 법규제의 복잡화와 디지털화의 지연이 문제가 되고 있으며 대응의 한계가 지적되어 왔다. 이러한 배경 중 화상 인식을 비롯한 AI 기술의 도입이 주목 받고, 문자 인식, HS 코드 분류, 외관 검사 등의 공정에서 실용이 진행되고 있다.

그러나, AI 도입을 성공시키기 위해서는, 자사의 업무 프로세스에 맞춘 시스템의 선정, 최신 법규에의 대응, 질 높은 학습 데이터의 확보, 그리고 무엇보다 보안 대책이 불가결하다. 그런데 AI는 만능이 아니고, 최종적인 판단이나 복잡한 사안에의 대응에는 여전히 인간의 전문 지식이 요구된다. 컴퓨터가 도입되면서 행정 업무가 효율화된 것처럼, AI 역시 관세 행정의 보조 도구로 활용될 뿐이다. 그것이 얼마나 효과적일지는 도구 자체가 아니라, 사용자가 도구를 어떻게 사용하는가에 달려 있다.

또한, AI 기반의 스마트 통관시스템은 자동화된 문서 처리와 함께, 반복적인 수작업을 줄여 인적 오류를 최소화할 수 있다. 수출입 관련 서류의 검증, 관세 계산, 물품 분류 등이 자동으로 이루어져 처리 과정의 정확도를 높일 수 있으며, 이는 기업들이 통관 절차에서 겪는 불확실성을 줄여준다. 또한 AI 시스템은 법규 변경이나 새로운 규제에 빠르게 적응할 수 있어, 최신 정보를 바탕으로 효율적인 절차를 진행할 수 있다.

AI 기술을 활용한 통관서류업무의 전자화는 관세행정의 효율성을 높이고, 통관 시간을 단축시키는 데 기여하고 있다. AI는 수출입 신고서의 자동 분류, 위험 물품 및 부정 수입품의 식별, C/O의 AI 인식 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이러한 AI 기술의 도입은 통관 절차의 자동화와 간소화를 촉진하여 수출입 업무의 효율성을 크게 높일 수 있다.

본 연구에서는 기존 선행연구들을 바탕으로 AI 기술을 활용한 통관서류업무의 자동화에 대한 대응방안과 관련하여 주로 문헌연구를 통해 분석했지만, 향후 연구에서는 선행연구를 바탕으로 새로운 가설이나 이론을 세우고, AI 관계자 및 사용자의 설문과 의견을 통해 구체적인 현장의 의견수렴과 문제점에 대한 분석이 필요하다. 본 연구가 정부의 관련정책과 사업자들의 사업계획 수립에 반영될 수 있는 필요한 자료를 제공함으로써 AI 도입의 리스크를 최소화하고 그 도입의 재고에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 고준성. (2024). 국제 차원에서의 인공지능(AI) 거버넌스 논의 동향과 평가 및 시사점. *제간 외교*, 150, 87-110.
- 곽은현. (2020). 특송물품 중 간이통관절차의 문제점과 개선방안에 관한 연구-해외직구를 중심으로. *무역보험연구*, 21(1), 183-199.
- 김경민, 이용준, 강장묵. (2024). 인공지능 발전에 따른 책임과 법적 규제에 대한 연구. *한국산학기술학회논문지*, 25(7), 490-496.
- 김성현, 이창무. (2018). EU GDPR과 국내 개인정보보호 법제 비교분석. *융합보안논문지*, 18(5), 83-92.
- 김중권, 유광현. (2020). 수출입통관에서의 블록체인 기술 활용 증대 가능성에 관한 연구. *관세학회지*, 21(4), 51-69.
- 김종덕, 김율성. (2019). 해외직구물품 급증에 따른 통관제도 개선방안에 연구. *해사법연구*, 31(1), 181-206.
- 김지연, 석병진, 김역, 이창훈. (2023). 안전한 AI 서비스를 위한 국내정책 및 가이드라인 개선방안 연구. *정보보호학회논문지*, 33(6), 975-987.
- 김태인, 김중권. (2020). RPA 도입이 관세사 업계에 미치는 영향과 대응 전략. *관세학회지*, 21(3), 43-66.
- 라공우. (2022). 아세안 주요국의 인증제도와 통관절차에 관한 연구. *관세학회지*, 23(1), 169-190.
- 민기현, 이아람, 김거식, 김정은, 강현서, 이길행. (2022). 딥러닝 기반 광학 문자 인식 기술 동향. *전자통신동향분석*, 37(5), 22-32.
- 박선형. (2024). AI 거버넌스의 정의와 쟁점 및 발전 과제: 비판적 관점. *교육정치학연구*, 31(1), 89-117.
- 송선욱. (2020). 블록체인 기술 활용을 통한 관세행정 효율화 방안. *관세학회지*, 21(2), 3-22.
- 안태건, 김태환. (2020). 디지털 콘텐츠 수입의 관세 통관에 대한 연구. *무역보험연구*, 21(2), 79-87.
- 여영준, 한철환. (2024). 첨단 스마트 물류 시대 물류 산업 글로벌 경쟁력 강화를 위한 물류인재 양성 전략과제 탐색. *국회미래의제*, 24(5), 1-48.
- 이명구, 이은재. (2018). 4차 산업혁명기술을 적용한 관세행정 개선방안에 관한 연구. *관세학회지*, 19(1), 3-24.
- 이용, 최명석, 김성찬, 이진우, 장래영, 이승우, 이상환. (2022). 인공지능 학습 데이터 공유·활용 현황과 서비스 구축 방향. *KISTI Issue Brief*, 51, 1-20.
- 이은재, 이지수. (2020). 4차 산업혁명 시대 무역원활화 제고를 위한 싱글윈도우 개선방안 및 시사점. *중장기통상전략연구*, 20(4), 1-140.
- 이철승, 백혜진. (2023). 인공지능 챗봇 발전에 따른 AI 리터러시 필요성 연구. *한국전자통신학회논문지*, 18(3), 421-426.
- 이현균. (2024). 자유무역지역 내 통관에 관한 적용 법률 검토 및 개선방안 연구. *관세무역연구*, 1(1), 91-109.

- 조영주, 배강민, 박종열. (2020). GAN 적대적 생성 신경망과 이미지 생성 및 변환 기술 동향. 전자통신 동향분석, 35(4), 91-102.
- 조원길. (2022). 디지털무역 시대 전자상거래 통관체제 개편방안에 관한 연구. 관세학회지, 23(1), 83-104.
- 천수경, 연명흠. (2020). 인공지능 에이전트의 사용 시나리오 분석을 통한 인터랙션 속성 유형화. 한국융합학회논문지, 11(11), 63-74.
- 최철호, 송인방. (2022). 주요 전자통관시스템의 분석을 통한 UNI-PASS 수출활성화 방안. 인문사회 21, 13(4), 2539-2550.
- 한낙현. (2024). 디지털 전환 시대 디지털 무역의 통관체제 개선방안에 관한 고찰. 관세무역연구, 1(1), 51-86.
- Bhatt, A. (2022). Document Automation Using Artificial Intelligence. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 10(9), 1365-1369.
- Cao, Q. and X. Zheng. (2024). Application of Artificial Intelligence Technology in the Supervision of Customs Clearance Machine Inspection. *World Customs Journal*, 18(2), 51-76.
- Chen, Z. (2024)., AI-Powered Customs Clearance: Optimizing Trade Compliance and Border Management. *Journal of AI-Driven Trade Facilitation Engineering and Single Window Systems*, 1(1), 79-98.
- Helo, P. and Y. Hao. (2022). Artificial intelligence in operations management and supply chain management: An exploratory case study. *Production Planning & Control*, 33(16), 1573-1590.
- Kouhizadeh, M., S. Saberi. and J. Sarkis. (2021). Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. *International Journal of Production Economics*, 231, 107831.
- Krzan, M., H. Dudycz. and M. Suchomski. (2024). Artificial Intelligence in the Automation Process of Customs Declaration Preparation: A Case Study of an International Logistics Company. in Marcin Hernes, Jaroslaw Wątróbski, Artur Rot(eds.). *Emerging Challenges in Intelligent Management Information Systems*, Springer, 39-51.
- Maideen, S., S. Pitchai. and P. Velu. (2023). A Study on Export Documentation and Clearance Process at Logistics Company, *Central Asian Journal of Innovations on Tourism Management and Finance*, 4(10), 165-181.
- Papagiannidis, E., P. Mikalef. and K. Conboy. (2025). Responsible artificial intelligence governance: A review and research framework. *The Journal of Strategic Information Systems*, 34(2), <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2024.101885>
- Saberi, S., M. Kouhizadeh, J. Sarkis. and L. Shen. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117-2135.

- Shamout, M., R. Ben-Abdallah, M. Alshurideh, H. Alzoubi, B. A. Kurdi. and S. Hamadneh. (2022). A conceptual model for the adoption of autonomous robots in supply chain and logistics industry. *Uncertain Supply Chain Management*, 10(2), 577-592.
- Stoyanova, M. (2023). Document Process Automation with Artificial Intelligence for Logistics Sector. *Izvestia Journal of the Union of Scientists-Varna Economic Sciences Series*, 12(1), 190-197.
- 최광민. (2024). “파워젠, K-Shipping과 'RPA와 AI OCR' 결합한 무역 SaaS 서비스 출시... "혁신적인 무역서류 처리 자동화". 인공지능신문, <https://www.aitimes.kr/news/articleView.html?idxno=30056>
- Goover. (2025). “AI 시대, 혁신과 도전: 일자리 변화와 인력 양성 전략”. <https://seo.goover.ai/report/202503/go-public-report-ko-4cce462d-3bc8-48ae-a605-ba2c3a4dac3f-0-0.html>
- KITA. (2020). “AI 도입해 컨테이너 1개 통관처리 5시간→5분”. https://www.kita.net/board/totalTradeNews/totalTradeNewsDetail.do;JSESSIONID_KITA=198104952A3DC3C47AE3910E3E0F1A29.Hyper?no=57029&siteId=1
- AI Market. (2025), “通関書類業務でのAI活用方法とは？輸出入手続きの必要書類, AIによる課題の解決方法・注意点・導入例を紹介”. <https://ai-market.jp/purpose/customs-documents/>
- Mudness Partners. (2025). “生成AIが変える貿易実務の最前線：海外・国内事例に見る活用ノウハウと未来展望”. <https://note.com/mudnesspartners/n/n57b3d676c37d>
- ICC. (2024). “FIT Alliance launches declaration to secure commitment to digitalisation”. <https://iccwbo.org/news-publications/news/fit-alliance-launches-declaration-to-secure-commitment-to-digitalisation/>
- KlearNow.AI. (n.d.). “Impact of Poor Documentation Management Practices on Customs Clearance”. <https://www.klearnow.ai/impact-of-poor-documentation-management-practices-on-customs-clearance/>
- Vermeir, M. (2024). “Three Ways AI Overcomes Customs Delays”. <https://www.unite.ai/three-ways-ai-overcomes-customs-delays/>
- Yazid. (2024). “5 Ways Generative AI Is Revolutionizing Customs Brokerage”. <https://reads.alibaba.com/5-ways-generative-ai-is-revolutionizing-customs-brokerage/>

ABSTRACT

A Study on the Countermeasures for Automating Customs Clearance Documentation using AI Technology

Nak-Hyun Han*

Trade practice is a challenging field that involves extensive documentation, such as invoices and bills of lading, and must constantly consider various factors, such as national and regional regulations, tariffs, and exchange rate risks. Moreover, exchanges with overseas partners face time differences and language barriers, requiring considerable effort just to respond to daily emails and phone calls. In recent years, in addition to the increase in trade volume, the number of tasks that must be addressed has increased, including strengthening regulations in each country and establishing environmentally friendly logistics systems. In this context, a new technology called generative AI is attracting attention as a powerful means of practical innovation. Automation of customs clearance documentation using AI technology is contributing to increased efficiency in customs administration and shortening clearance times. AI is being used in various fields, such as automatic classification of import/export declarations and AI recognition of Certificates of Origin (C/O). The introduction of such AI technologies can significantly improve the efficiency of import and export operations by promoting the automation and simplification of customs clearance procedures. This study analyzes the challenges of customs clearance documents and customs clearance operations, addresses the challenges of customs procedures utilizing AI, examines cases of its introduction, and analyzes countermeasures for introducing AI into customs clearance documents. This study is different from previous studies in that it examines the challenges of customs clearance documents and customs clearance work, the solutions and introduction cases of customs clearance procedures using AI, and suggests countermeasures when introducing AI to customs clearance document work.

| Keywords AI, Bill of Lading, Certificate of Origin, Customs Automation, Customs Documentation, Import/Export Declarations

* Honorary Professor, Kyungnam University, nhhan@kyungnam.ac.kr

「관세무역연구」 투고 안내

(사)한국관세무역개발원에서는 관세행정 및 무역 정책 수립·발전에 기여할 연구 활동을 장려하고 관세·무역 학술활동 진흥을 도모하고자 학술지 「관세무역연구(Korea Customs Review)」를 발간하고 있습니다.
이에 본 학술지에 게재할 논문을 모집하오니 많은 관심과 투고 바랍니다.

※ 본 학술지는 연구 장려를 위해 투고료와 심사료를 받지 않으며, 게재가 확정된 논문에 대해서는 소정의 연구지원금을 지급하고 있습니다.

1. 논문투고 방법

□ 발행 일정

구분	학술지 발행일	논문 투고 마감일
제1호 (3월)	3월 31일	1월 31일
제2호 (6월)	6월 30일	4월 30일
제3호 (9월)	9월 30일	7월 31일
제4호 (12월)	12월 31일	10월 31일

* 논문 게재를 원하는 연구자는 각 호별 논문투고 마감일까지 논문 투고

□ 투고 자격

관세·무역 분야의 전문가(학계·연구·실무자) 및 대학(원)생

□ 논문 주제

- 관세행정 및 제도 관련 연구 분야(통관, 심사, 조사, 국제협력, 정보데이터 등)
- 무역 관련 이론·정책 등 연구 분야(무역실무, 무역이론, 국제경영 등)

□ 제출 자료

① 논문 원고 ② 논문투고 신청서 ③ 연구 윤리 확인서

□ 투고 방법

(사)한국관세무역개발원 홈페이지 통해 투고(www.kctdi.or.kr)

* 한국관세무역개발원 홈페이지 접속 후 관세무역연구 → 학술지 → 논문투고 탭에서 투고

□ 연구지원금

편 당 200만원(게재가 확정된 논문에 한함)

* 사사 표기 대상 논문의 경우 지원금의 50% 감액 지급

□ 문 의 처

연구본부 연구실 (Tel 02-3416-5168)

□ 일반 사항

- 국내외 학술논문집에 이미 게재하였거나 게재가 예정된 논문은 투고할 수 없다.
- 논문투고요령에 적합하지 않은 논문은 접수 대상에서 제외한다.
- 논문 원고는 한글 프로그램으로 작성하며, 원고 분량은 20매 내외를 원칙으로 한다.

- 원고의 표기는 한글을 원칙으로 하되, 편집위원회에서 인정하는 경우 예외적으로 외국어로 된 논문도 게재할 수 있다.
- 타기관에서 연구비 지원을 받은 논문, 공모전 수상작, 학위논문 및 학술대회 발표논문 등의 경우 논문 첫 페이지 하단에 관련 내용 및 사사를 표기하여야 한다.

2. 논문작성 방법

□ 논문 구성

논문 제목, 저자 성명, 목차, 국문 초록, 주제어, 본문, 각주, 참고문헌, 영문 초록, 영문 주제어 순으로 작성

□ 편집 규격

「관세무역연구」 논문 편집 샘플 활용

□ 인용·각주·표와 그림·참고문헌 작성 요령

- 인용이나 참고한 문헌의 출처는 본문의 괄호 속에 저자명과 출판연도를 쉼표로 구분하여 표기한다. 영문 저자의 경우, 영문 표기를 원칙으로 하며 성(Last name)과 연도를 표기한다.
- 저자가 2인인 경우 항상 모든 저자를 표기한다. 저자가 3인 이상인 경우에는 처음 인용할 때는 저자의 이름을 모두 표기하고, 이후부터는 1저자 다음에 OOO 외, OOO et al. 로 표기한다. 단 저자가 6인 이상인 경우 항상 1저자만 표기한다.
- 각주는 본문에 표기하기 어려운 보충적인 설명이나 법령, 판례 등의 표기에 한하여 사용하는 것을 원칙으로 하며, 각주 번호는 1), 2), 3)를 사용한다.
- 표와 그림의 제목은 표와 그림의 위쪽에 넣고, 〈표 1〉, 〈그림 1〉의 방식으로 일련번호를 표기한다.
- 참고문헌은 표기 언어를 기준으로 국문, 외국어 순서로 배치하되, 1저자명을 기준으로 국문은 가나다순, 외국어는 알파벳 순서대로 작성한다.

항목		예시
본문 내 인용		기술의 발전이 국제무역의 방식을 바꾸고 있다(김민구, 2023). 수입금지물품의 불법통관을 방지하는데 일조하고 있다(Kim, 2007). 통상조약 관련 국내 보완대책 마련의 필요성이 제기되었다(이민하, 김소영, 2009). 지식재산권 침해물품에 대한 신속한 단속이 가능하다(이근호 외, 2017). 합리적 가격결정정책 수립의 중요성이 증가하고 있다(Stewart et al., 2007).
각주의 표기		1) 관세법 제226조 제1항 참조 2) 대법원 2017. 4. 7. 2015두49320 판결
표와 그림		〈표 1〉 관세감면제도 유형 〈그림 1〉 특송물품 수입 개관
참고문헌	단행본	김준호. (2005). 「관세무역제도」. 무역 출판. Jason M, C. (2002). Customs Procedures. Trade Publishing.
	저널논문	박민우. (2007). FTA 지원제도 운영에 관한 연구. <i>관세무역연구</i> , 15(1), 12-13. Murphy C, W. (2003). A Study on the Interpretation of Incoterms 2010. <i>Trade Research Society</i> , 11(3), 24-25.
	학위논문	이진아. (2003). 수입물품 가격신고제도 분석. 관세무역대학교 대학원 박사학위논문.
	신문, 잡지 등	KITA. (2020. 12). 2020년 수출입 평가 및 2021년 전망. <i>Trade Focus</i> , 71-73.
	인터넷 자료	연합뉴스. (2024.2.12.). "군산항 특송화물 통관장 26일 정식 개장...국내 4번째". Available at (https://www.yna.co.kr/view/AKR20240208103700055?input=1195m)

「관세무역연구」 편집위원회

(원외) 편집위원장	송선욱	백석대학교
(원내) 편집위원장	이갑수	한국관세무역개발원
(원외) 편집위원	김한성	아주대학교
	라공우	제주대학교
	오문갑	세명대학교
	오수교	PWC 관세법인
	유광현	조선대학교
	이양기	부산대학교
	이종욱	관세청
	정재완	대문관세법인
	최준호	백석대학교
	한상필	관세인재개발원
(원내) 편집위원	김희수	한국관세무역개발원
	하정주	
	신대철	
	이주영	
편집위원 간사	정대한	

관세무역연구

제2권 제3호·통권 제7호(2025년 9월)

Korea Customs Review

Vol. 2, No. 3 September 2025

발 행 처 (사)한국관세무역개발원
발 행 인 이종우
편 집 인 송선옥, 이갑수
발행주소 서울시 강서구 마곡중앙5로 22, 7층(마곡동)
등록번호 강서 바00055
전 화 02 3416 5168
팩 스 02 3416 5025
홈페이지 www.kctdi.or.kr
I S S N 3022-7569(Print)
3022-831X(Online)
인 쇄 처 경성문화사
인 쇄 일 2025년 09월 26일
발 행 일 2025년 09월 30일

※ 본 책의 저작권은 (사)한국관세무역개발원에 있으며 사전 승인 없이 무단복제 및 배포를 금합니다.

Korea Customs Review

Vol. 2 No. 3 September 2025

ARTICLES

Digital-enabled ecological indicators for sustainable ports
: An integrated approach to pollution control and worker health protection
Zhenqing Su · Miao Su

Study on the Impact of Manufacturing Specialization Agglomeration on Export Trade
Zhen Wu

A Review of Export Controls on the Space Industry
: Focusing on the United States Export Control Regime
Young-Ju Kim

A Study on the Countermeasures for Automating Customs Clearance Documentation using
AI Technology
Nak-Hyun Han