

지속가능 물류에서의 인공지능 활용: 문헌 및 사례 연구* A Literature and Case Review on Artificial Intelligence in Sustainable Logistics*

권용우(주저자) · 정고준(공저자) · 최전영(공저자) · 임재현(교신저자)
Yong Woo Kwon(First Author) · Ko Jun Jeong(Co-Author) · John Young Choi(Co-Author)
Michael K. Lim(Corresponding Author)

서울대학교 경영대학 Seoul National University College of Business Administration(rnjs1172@snu.ac.kr)
서울대학교 경영대학 Seoul National University College of Business Administration(kojun1113@snu.ac.kr)
서울대학교 경영대학 Seoul National University College of Business Administration(jychoi99@snu.ac.kr)
서울대학교 경영대학 Seoul National University College of Business Administration(milim@snu.ac.kr)

본 연구에서는 인공지능 기술이 물류 산업의 효율성과 지속가능성에 미치는 영향을 체계적으로 이해하기 위해 심층적인 문헌 고찰과 실무적 사례 분석을 진행하였다. 문헌 분석은 2017년부터 2025년까지 Scopus 데이터베이스에 등재된 관련 문헌 1,944편을 대상으로 분석하였다. 주요 연구 키워드 간의 관계를 통해 유통 관리와 라스트마일 배송, 창고 및 재고 운영 최적화, 역물류와 폐기물 관리, 디지털 전환의 네 가지 응용 분야로 구분할 수 있었다. 또한, 사례 분석은 미국, 중국, 한국의 주요 기업의 최신사례를 비교 분석하여 실무적으로 인공지능 적용이 물류 산업에 미치는 영향을 검토하였다. 각 응용 분야와 국가 별로 인공지능 기법의 활용 양상은 상이하게 나타났다. 그러나 문헌 분석과 실무 사례 비교 결과, 공통적으로 효율성 제고와 지속가능성 향상을 함께 지향하는 연구와 적용이 활발하게 이루어지고 있음을 확인하였다. 본 연구는 인공지능 기반 지속가능 물류 연구의 현재 동향과 향후 연구 방향을 제시함으로써, 학계와 산업계 모두에 유의미한 시사점을 제공하려 한다.

주제어: 인공지능, 지속가능 물류, 문헌고찰, 사례 분석

This study conducts a systematic literature review and practical case analysis to comprehensively understand how artificial intelligence (AI) technologies affect efficiency and sustainability in the logistics industry. A total of 1,944 relevant papers indexed in the Scopus database between 2017 and 2025 were analyzed. Through the analysis of keyword relationships, four major application domains were identified: transportation management and last-mile delivery, warehouse and inventory optimization, reverse logistics and waste management, and digital transformation. By comparing and analyzing leading corporate cases in the United States, China, and Korea, this study examines the practical impact of AI adoption in the logistics industry. Although the specific AI techniques and application trajectories vary across domains and nations, combined evidence from the literature analysis and practical comparisons confirms that research and implementation have been actively pursued not only to improve efficiency but also to enhance sustainability. This study aims to provide meaningful implications for both academia and industry by presenting current trends and suggesting future research directions in AI-based sustainable logistics.

Keyword: Artificial Intelligence, Sustainable Logistics, Literature Review, Case Review

최초투고일: 2025. 10. 20 수정일: (1차: 2025. 12. 29) 게재확정일: 2026. 02. 11

* 이 논문은 2022년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2022S1A5A2A01038230)

I. 서론

1.1 연구 배경

인공지능(Artificial Intelligence, AI) 기술의 발전에 따라 물류 산업은 이전에 없던 변화에 직면하였다. 인공지능 기술은 수요예측, 경로 최적화, 창고 자동화, 라스트마일 배송, 역물류 관리 등 다양한 영역에서 효율성과 정확성을 크게 향상시키며, 물류 운영 전반에서 핵심적인 역할을 하고 있다. 특히 전자상거래의 폭발적 성장, 글로벌 공급망 복잡성 심화, 환경 규제 강화, 지속가능성에 대한 사회적 요구 증대 등 복합적 요인들이 결합되면서 물류 분야에서 인공지능의 전략적 활용은 선택이 아닌 필수로 인식되고 있다.

본 연구는 이러한 배경 속에서 급격히 증가하고 있는 최신 인공지능 활용 문헌을 체계적으로 분석하고, 글로벌 기업의 실제 적용 사례를 통해 향후 유의미한 연구 방향과 시사점을 도출하고자 한다. 특히 본 연구는 효율성을 넘어 환경적 및 사회적 책임까지 포괄하는 지속가능 물류의 관점에서 인공지능 기술 활용 현황을 고찰한다. 지속가능 물류는 단순히 비용 절감이나 효율성 제고를 넘어 탄소 배출 저감, 자원 활용의 극대화, 투명성과 추적성 확보 등 환경적 및 사회적 책임까지 아우르는 새로운 패러다임으로 자리 잡고 있다. 이러한 변화 속에서 인공지능은 물류 운영을 혁신하고 효율성과 지속가능성을 동시에 달성할 수 있는 핵심 수단으로 부상하고 있다. 실제로 인공지능 기술은 수요를 정밀하게 예측하고, 운송 경로를 최적화하며, 재고를 효과적으로 관리하여 불필요한 운송과 자원 낭비를 줄인다. 그 결과 탄소 배출과 환경적 부담을 최소화할 수 있으며, 이는

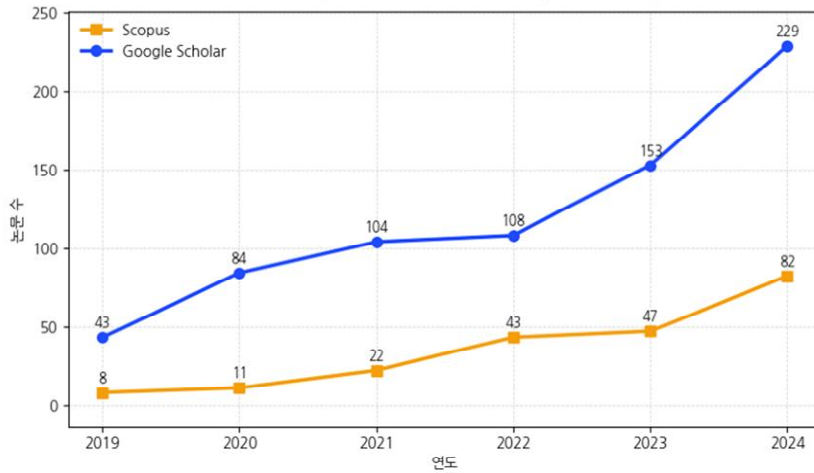
단순한 비용 절감을 넘어 물류 전반의 구조적 변화를 이끌어내는 데 기여한다.

더 나아가 물류는 기업 내부의 효율성 개선을 넘어 도시 인프라 전반과 긴밀하게 연결된다. 최근 전세계적으로 확산되고 있는 스마트시티 개념은 교통, 에너지, 환경, 안전, 생활 등 다양한 문제를 데이터 기반으로 해결하는 것을 목표로 한다. 이 과정에서 인공지능 기법은 핵심 기술로 작동하며, 물류 운영 혁신은 스마트시티의 지속가능한 운영으로 직결된다. 결과적으로 인공지능 기반 물류는 도시 효율성을 높이고 시민의 삶의 질을 개선하는 데 기여한다. 즉, 인공지능 기반 물류 연구는 단순한 산업 차원을 넘어 미래 도시와 사회 전반의 발전과도 맞닿아 있다.

1.2 연구 필요성

인공지능 기술과 지속가능 물류가 교차하는 분야에서 발표되는 학술 논문의 수는 매년 꾸준히 증가하고 있으며, 이는 해당 주제에 대한 학문적 관심이 점차 확대되고 있음을 보여준다. <그림 1>에서 확인할 수 있듯이, 최근 몇 년간 Google Scholar와 Elsevier Scopus와 같은 주요 학술 데이터베이스에서("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning") AND logistics AND ("sustainability" OR "sustainable") 라는 검색식을 활용해 수집한 논문 수는 뚜렷한 증가세를 나타냈다. 이러한 추세는 인공지능 기반 지속가능 물류가 공급망 관리와 도시 인프라 전반에서 핵심적인 연구 분야로 자리매김하고 있음을 시사한다.

전통적으로 물류 산업에서 인공지능은 비용 절감과 처리 속도 향상 등 운영 효율을 높이는 수단으로 논의되어 왔다. 그러나 전자상거래 확산과 도심 혼잡, 탄소중립 필요성 강화로 인해 물류 의사결정은



〈그림 1〉 인공지능-지속가능 물류 관련 논문 수 추이(2019-2024)

단순 차량 배차, 재고 정책을 넘어 에너지 사용, 탄소 배출, 혼잡 등 좀 더 포괄적인 관점을 고려해야 하는 문제로 확장되었다. 이때 개별 기업의 최적화만으로는 한계가 있으며, 교통, 에너지, 폐기물, 공간 정보체계와 실시간 연계를 기반으로 한 공급망 전반에 걸친 최적화가 요구된다(김수욱, 2004). 이는 스마트시티가 지향하는 목표(도시 자원 효율화, 탄소 저감, 투명한 거버넌스)와 정확하게 맞물리며, 궁극적으로 인공지능 물류 연구가 단순한 기술적 논의를 넘어 미래 도시 발전 전략의 핵심 축으로 자리매김해야 함을 보여준다.

이에 본 연구는 기존의 효율성 중심 인공지능 물류 연구를 넘어, 지속가능 물류 맥락에서 인공지능이 수행하는 의사결정 역할을 체계적으로 규명하고자 한다. 최근 몇 년간 인공지능과 물류를 결합한 연구가 급격히 증가하였음에도 불구하고, 다수의 선행 연구는 개별 알고리즘이나 응용 성과를 중심으로 논의되어 왔으며, 인공지능이 물류 의사결정 과정 전반에서 어떠한 방식으로 개입하고, 그 결과 효율성

과 지속가능성 성과가 어떻게 연결되는지에 대한 통합적 논의는 상대적으로 제한적이었다. 〈그림 1〉에서 확인할 수 있듯이 관련 문헌의 양적 증가는 본 주제의 학술적 중요성이 빠르게 부상하고 있음을 보여주지만, 동시에 기존 연구 흐름을 구조적으로 재정리할 필요성 또한 시사한다.

이러한 문제의식 하에서 본 연구는 학술적으로는 인공지능을 효율적 측면뿐만 아니라 지속가능 물류를 구현하는 핵심 의사결정 메커니즘으로 해석하고, 기존 문헌을 의사결정 단계와 분석 단위 관점에서 분류함으로써 연구 성과를 보다 명확히 드러내고자 한다. 더 나아가 실무적으로는 글로벌 차원의 실제 적용 사례를 통해, 문헌연구에서 도출된 논의가 실제 기업 환경에서 어떻게 구현되고 있는지 확인하여 학문적 논의와 실무적 현실 간의 연결을 시도한다. 이를 통해 인공지능 기술이 물류 현장에서 적용되는 과정과 그 효과뿐 아니라, 적용 맥락에 따른 차이점까지 균형 있게 조망하고자 한다. 본 연구의 목적은 다음과 같이 정리될 수 있다.

물류 전반에 걸쳐 최근 급격히 증가한 인공지능 활용 문헌을 대상으로, 인공지능이 각 의사결정에서 어떻게 활용되는지 체계적으로 분류 및 분석한다.

미국, 중국, 한국 등 주요 국가의 대표 기업 사례를 중심으로, 문헌연구에서 도출된 인공지능 활용 논의가 실제 물류 운영 맥락에서 어떻게 구현되고 있는지 비교 분석한다.

효율성과 지속가능성의 관점에서 인공지능 기반 의사결정 구조와 실제 적용 사례를 종합적으로 논의함으로써, 지속가능 물류 연구의 향후 연구 방향과 시사점을 도출한다.

1.3 이론적 배경

지속가능 물류는 전통적인 물류 관리 관점에서 확장되어, 물류과정에서 발생하는 환경적 사회적 외부효과를 체계적으로 고려하는 접근으로 정의된다(McKinnon et al., 2015). 기존 물류 연구는 운송비, 재고비용, 리드타임과 같은 효율성 지표를 중심으로 성과를 평가해 왔으나, 지속가능 물류는 여기에 환경적, 사회적 영향을 통합적으로 고려하는 것을 목표로 한다(Ahi and Searcy, 2013). 즉, 지속가능성은 단일한 성과 지표로 측정되기보다는, 효율성과 환경사회적 성과 간의 관계 속에서 이해되어야 한다. 또한 지속가능성의 반영 수준은 각 물류 시스템이 추구하는 목표, 적용 범위, 운영 맥락에 따라 상이하게 나타난다(Pagell and Wu, 2009). 이에 따라 기존 문헌에서 지속가능성이 어떠한 관점에서 정의되고, 어떤 방식으로 평가되어 왔는지를 체계적으로 검토할 필요가 있다.

한편, 인공지능과 머신러닝 기술은 물류 의사결정에서 불확실성을 완화시켜주는 핵심 도구로 활용되어 왔다. 머신러닝과 딥러닝 기법은 수요 예측, 운송

량 추정, 재고 판단과 같이 확률적 변동성이 큰 문제에서 예측 정확도를 향상시키는 역할을 수행한다(Küçk and Freitag, 2021; Tarighat et al., 2025). 그러나 물류 시스템에서 인공지능의 역할은 단순한 자동화나 예측에 국한되지 않으며, 의사결정 지원 도구로서 점차 확장되고 있다(Koot et al., 2021; Jiang et al., 2021). 이에 따라 물류 분야에서 인공지능은 단일한 기능을 수행하기보다는, 예측, 계획 및 최적화, 그리고 실행 단계의 의사결정을 서로 다른 방식으로 지원하는 도구로 활용되어 왔음을 확인할 수 있다. 예를 들어 일부 연구는 수요나 물동량과 같은 불확실성을 사전에 예측하는 데 초점을 두는 반면, 다른 연구들은 예측 결과를 바탕으로 운영 정책을 설계하거나, 실행 과정에서 발생하는 변동에 대응하기 위한 실시간 조정과 제어에 인공지능을 적용하고 있다.

이러한 맥락에서 인공지능은 지속가능 물류 성과를 달성하기 위한 핵심적인 의사결정 지원 메커니즘으로 이해될 수 있다. 그러나 기존 연구들은 인공지능 활용이 운영 효율성에 미치는 효과를 개별적으로 분석하는 데 초점을 둔 경우가 많았으며, 효율성과 지속가능성을 구조적으로 연결하는 분석은 상대적으로 제한적이었다(Bhattacharya et al., 2024; Bergsma et al., 2025). 이에 본 연구는 인공지능을 지속가능 물류를 지원하는 의사결정 도구로 보고, 다음의 관점에서 기존 문헌을 분석하고자 한다. 인공지능이 물류 의사결정의 어느 수준에 적용되고 있는지, 해당 연구가 효율성뿐만 아니라 지속가능성 성과를 포함하고 있는지 검토한다.

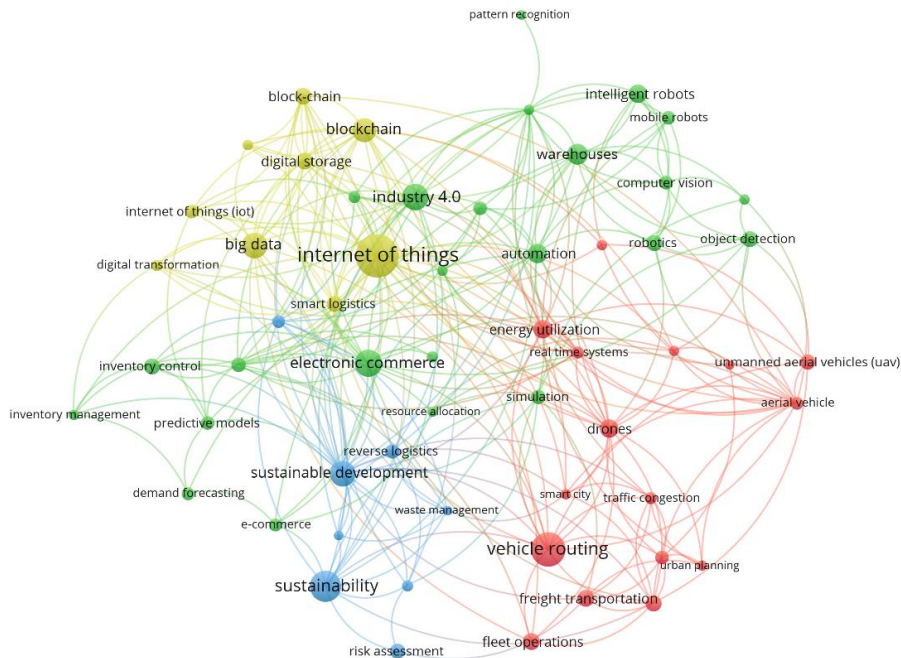
II. 문헌 조사 연구

2.1 문헌 검색 및 선정 절차

본 연구는 인공지능, 물류, 그리고 지속가능성이 교차하는 영역에서 이루어진 학술 연구를 체계적으로 검토하기 위해 체계적 문헌 고찰 방식을 활용하였다. 연구 과정은 검색과 선별, 적격성 평가, 그리고 최종 포함 단계로 이어지며, 이를 통해 문헌 선정의 투명성을 확보하였다. <그림 2>는 2017년부터 2025년까지 Elsevier Scopus 데이터베이스에 수록된 물류 분야 인공지능 기술 활용 문헌 1,944편

을 분석하여 도출한 키워드 간 연관성을 시각화한 결과이다. 해당 그림은 'VOSviewer'를 활용해 작성되었으며, 노드의 색상과 연결 구조를 통해 키워드 간 연관성의 강도와 특성을 확인할 수 있다.

분석 결과, 최근 학계에서 자주 다뤄진 핵심 연구 키워드로는 Internet of Things(IoT, 사물인터넷), vehicle routing problem(차량 경로 문제), sustainability(지속가능성), electronic commerce(전자상거래), automation(자동화), reverse logistics(역물류), inventory control(재고 관리), warehouses(창고 운영) 등이 있다. 이러한 키워드들은 인공지능과 지속가능 물류 연구가 데이터 및 플랫폼 기반의 디지털 전환, 환경 가치 창출, 공급망 효율성 제



<그림 2> 인공지능-지속가능 물류 관련 논문 키워드 네트워크 시각화

고를 중심으로 전개되고 있음을 시사한다. 이를 바탕으로 본 연구는 지속가능 물류에서의 인공지능 기술 활용 문헌을 네 가지 응용 분야로 구분하였다.

1. 유통 관리와 라스트마일 배송
(Transportation Management & Last-mile Delivery)
2. 창고 및 재고 운영 최적화
(Warehouse & Inventory Optimization)
3. 역물류와 폐기물 관리
(Reverse Logistics & Waste Management)
4. 디지털 전환(Digital Transformation)

위에서 확인된 물류 분야 연구 문헌이 방대하므로, 본 연구에서는 주제와 직접적으로 연관된 문헌을 대상으로 검색과 선별을 수행하였다. 데이터베이스는 Elsevier Scopus를 중심으로 선택하였다. Scopus는 경영학, 공학, 컴퓨터 과학 등 여러 학문 분야를 폭넓게 포괄하며, 특히 인공지능, 자동화, 물류 관련 연구가 꾸준히 게재되는 대표적 데이터베이스이다. 검색은 논문의 제목, 초록 및 키워드를 대상으로 수행하였으며, 다음의 검색식을 적용하였다: (“artificial intelligence” OR “machine learning” OR “deep learning”) AND logistics AND (“sustainability” OR “sustainable”). 이때 의학 보건 분야(oncology, cancer, patient, medical, clinical, surgery 등)와 관련된 연구를 다룬 논문은 제외하였다. 이러한 조건을 바탕으로 2017년부터 2025년까지 발표된 문헌을 검색한 결과, 초기 단계에서 총 349편의 문헌이 선정되었다.

초기 검색에서 확보한 349편의 문헌 중 중복된 문헌을 제거하고, 제목과 초록을 중심으로 연구 주제와의 관련성을 검토하여 AI 또는 최적화 기법이 물

류 및 공급망 의사결정 문제와 직접적으로 연관되지 않은 연구를 1차적으로 배제하였다. 이 과정을 통해 110편의 문헌이 본문 검토(full-text review) 단계에 포함되었다.

다음 단계에서는 확보된 110편의 문헌을 대상으로 보다 엄격한 선정 기준을 적용하였다. 먼저 본 연구에서 설정한 네 가지 주요 응용 분야(유통 관리와 라스트마일 배송, 창고 및 재고 운영 최적화, 역물류와 폐기물 관리, 디지털 전환) 중 최소 하나에 명확히 해당하지 않거나, 지속가능 물류 주제에서 인공지능 기술이 부수적으로만 언급된 문헌은 제외하였다. 또한 알고리즘 제안이나 이론적 논의에 그치고 실제 물류 문제와의 연계성이 충분히 설명되지 않은 연구 역시 분석 대상에서 배제하였다.

이와 함께 연구 방법론의 적합성도 중요한 기준으로 고려하였다. 단순 통계 분석이나 규칙 기반 휴리스틱에 머무른 연구보다는 기계학습, 강화학습 등 인공지능 기술이 물류 운영 의사결정에 실질적으로 통합된 연구를 우선적으로 포함하였다. 특히 동적 의사결정 및 불확실성 하의 운영 문제를 다룬 연구에 가중치를 두었다.

추가적으로 저널 유형과 학술적 신뢰성을 고려하여 컨퍼런스 논문과 접근이 제한된 원문 자료는 제외하였다. 최종 분석 대상에는 국제적으로 검증된 피어리뷰 저널에 게재된 논문을 중심으로 포함하였다. 또한 최근 연구 동향을 반영하기 위해 상대적으로 피인용 수가 일정 수준 이상인 논문을 우선적으로 검토하되, 최신 연구의 경우 인용 수가 제한적이더라도 학술적 기여도가 명확한 논문은 포함하였다.

이러한 선별 과정을 거쳐 최종적으로 55편의 문헌이 본 연구의 분석 대상으로 확정되었다. 이어지는 2장에서는 선정된 문헌을 바탕으로 네 가지 응용 분야별로 적용된 인공지능 및 최적화 기법을 체계적으

〈표 1〉 지속가능 물류에서의 인공지능 활용 분야별 주요 선행연구

No	논문	저자	저널	연도	분야	요약
1	Multi-agent mix hierarchical deep reinforcement learning for large-scale vehicle operations	Huang et al.	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	2023	유통 관리	다중 에이전트 계층형 DRL
2	Predicting drivers' route trajectories in last-mile delivery using a pair-wise attention-based pointer neural network	Mo et al.	Transportation Research Part E	2023	ラスト 마일 배송	포인터 신경망 기반 경로 예측
3	Dynamic multi-tour order picking in an automotive-part warehouse based on attention-aware deep reinforcement learning	Wang et al.	Robotics and Computer-Integrated Manufacturing	2025	창고 운영 관리	DRL 기반 멀티 투어 피킹 최적화
4	Applying machine learning to the dynamic selection of replenishment policies in fast-changing supply chain environments	Priore et al.	International Journal of Production Research	2019	재고 관리	ML 기반 재고 정책 최적화
5	Understanding and predicting online product return behavior: An interpretable machine learning approach	Duong et al.	International Journal of Production Economics	2025	역물류	해석가능한 ML 반품 분석
6	Artificial intelligence-based optimization of the WEEE reverse chain in São Paulo - Brazil to promote economic, environmental and social benefits	Oliveira Neto et al.	Journal of Cleaner Production	2025	폐기물 관리	AI 기반 전자폐기물 회수 최적화
7	Time to seize the digital evolution: Adoption of blockchain in operations and supply chain management among Malaysian SMEs	Wong et al.	International Journal of Information Management	2020	블록체인	중소기업 블록체인 공급망 도입
8	Integrated usage of artificial intelligence, blockchain and the internet of things in logistics for decarbonization through paradox lens	Mishra et al.	Transportation Research Part E	2024	사물인터넷	사물인터넷 통합 지속가능 물류 운영
9	Industrial applications of digital twins	Jiang et al.	Philosophical Transactions of the Royal Society A	2021	디지털 트윈	디지털 트윈 기반 공급망 모델

로 정리하고, 지속가능 물류 운영에 AI를 통합할 때의 주요 이점과 적용 사례를 살펴본다. 〈표 1〉은 최종 선정된 55편의 주요 문헌을 대상으로 연구 주제,

적용된 인공지능 기법, 응용 분야를 요약하여 제시한다.

2.2 응용 분야별 인공지능 활용 문헌 분석 결과

본 연구에서 제시한 네 가지 인공지능 응용 분야는 물류 시스템 전반에서 인공지능이 활용되는 서로 다른 운영 맥락과 의사결정 초점을 반영한 구분이다. 유통 관리와 라스트마일 배송 영역에서는 수요 예측과 경로 최적화 등을 통해 고객 서비스 수준과 직결되는 외부 의사결정이 주로 논의되는 반면, 창고 및 재고 운영 최적화는 이러한 의사결정을 지원하기 위한 내부 자원 배분과 운영 효율성에 초점을 둔다. 한편, 역물류 및 폐기물 관리는 반품과 회수, 재처리 과정을 중심으로 물류 흐름을 순환 구조로 확장하는 의사결정 맥락을 제공하며, 디지털 전환은 사물인터넷, 디지털 트윈 등 데이터 기반 기술을 통해 이러한 다양한 의사결정 맥락을 연결하고 조정하는 역할을 수행한다. 네 가지 응용 분야는 물류 시스템 전반에서 인공지능 활용이 어떤 수준과 맥락의 의사결정에 초점을 두는지를 서로 다르게 보여주는 상호 연계된 영역으로 이해될 수 있다.

2.2.1 유통 관리 및 라스트마일 배송

유통 관리와 라스트마일 배송을 다루는 연구 분야는 공급망에서 재고와 주문을 거점 간에 집약, 이동시키고 최종 소비자에게 전달하기까지의 전 과정을 다룬다. 이 분야는 주로 비용과 서비스 등 상충하는 목표를 동시에 관리하며, 데이터에 기반한 실시간 최적 의사결정을 설계 지원하는 데 집중한다. 유통 관리는 공급망 내에서 재고를 한 지점에서 다른 지점으로 이동시키는 핵심 과정으로, 경로 설계, 차량 스케줄링, 자원 배분 등 다양한 의사결정을 포함한다. 라스트마일 배송은 전자상거래의 급격한 성장과 함께 주목받고 있으며, 실시간 경로 최적화와 친환경

경 운송 수단 도입을 통해 효율성과 지속가능성을 동시에 추구한다. 전통적으로 제약 최적화, 휴리스틱, 메타휴리스틱 기법이 활용되었으나, 최근에는 강화학습(Reinforcement Learning, RL)을 활용하여 보다 우수한 성과를 보이고 있다. 이렇게 지속 가능 물류의 핵심 축인 유통 관리와 라스트마일 배송에서 인공지능의 활용은 빠르게 확산되고 있다.

1) 유통 관리

유통 관리는 차량 경로 최적화, 차량 스케줄링, 군집 주행, 네트워크 흐름 최적화 등 다양한 세부 연구 주제를 포괄한다. 경로 최적화는 비용, 시간, 자원의 사용을 최소화하기 위해 가장 효율적인 운송 경로를 식별하는 과정으로, 배송 시간, 교통 패턴, 도로 상태 등 여러 요인을 종합적으로 고려하여 최적의 경로를 선택하는 것을 포함한다(Qadir et al., 2021). 최근에는 합성곱신경망(Convolutional Neural Network, CNN)과 순환신경망(Recurrent Neural Network, RNN)을 활용하여 딥러닝 기반 지능형 교통시스템(Intelligent Transportation System, ITS)을 구축하는 연구가 진행되고 있으며, 교통 흐름 예측과 신호 제어 자동화를 통해 교통 혼잡을 완화하고 운영 효율을 개선할 수 있는 가능성을 보였다(Guerrero-Ibañez et al., 2021). 또한, 트럭 군집 주행의 경우 강화학습을 통해 라우팅, 적재, 운송 정책을 최적화함으로써 비용과 서비스 수준이 개선된 것으로 나타났다(Puskás et al., 2020). 복합 터미널 간 트럭 운행 문제를 다룬 연구에서는 출발지, 도착지, 시간 제약 등을 반영한 심층강화학습(Deep Reinforcement Learning, DRL) 기반 경로 최적화 모델을 구현하였다(Adi et al., 2020).

이러한 강화학습 기반 접근은 보다 대규모의 운영 문제로도 확장되고 있다. 대규모 차량 운영 환경을

대상으로 다중 에이전트 기반 심층강화학습을 적용하여 차량 재배치 및 운영 의사결정의 효율성을 향상시키는 연구가 제안되었다(Huang et al., 2023). 더 나아가, 불확실성이 존재하는 동적 차량경로 문제에서 심층강화학습을 적용하여 실시간 라우팅 의사결정 성능을 개선할 수 있음을 보였다(Pan and Liu, 2022). 한편, 인공지능 기반 이상 탐지를 활용한 연구는 수요 급변 상황에서의 제품 분배 효율과 공급 안정성을 개선할 수 있음을 보였다(Adulyasak et al., 2024). 최근 차량경로 문제 전반을 대상으로 진행한 서베이 연구에서는 강화학습을 포함한 다양한 머신러닝 기법이 전통적인 최적화 기법을 보완하는 방향으로 활용되고 있음을 체계적으로 정리하였다(Bogyrbayeva et al., 2024). 이러한 연구들은 단순한 비용 절감을 넘어 에너지 효율과 지속가능성을 동시에 개선하는 성과로 이어지고 있다.

2) 라스트마일 배송

ラスト마일 배송은 전자상거래의 폭발적 성장과 함께 주목받고 있다. 이러한 라스트마일 배송을 체계적으로 이해하기 위한 많은 시도가 있었다. 콜롬비아 보고타 데이터를 활용하여 실시간 상황 변화에 따라 라스트마일 배송 차량 경로를 동적으로 조정하는 강화학습 기반 모델이 제시되었다(Gutiérrez-Franco et al., 2021). 또한, 라스트마일 배송 환경에서 운전자의 실제 배송 궤적 데이터를 활용하여 어텐션 기반 포인터 신경망(attention-based pointer neural network)을 적용함으로써, 기존 최적화 및 다른 머신러닝 기법 대비 예측 경로와 실제 경로 간의 차이를 약 15% 감소시켰다(Mo et al., 2023). 아울러, 확률적 동적 라스트마일 배송 환경에서 심층강화학습과 혼합정수선형계획법(MILP)을 결합한 접근을 제안하고, 기존 불확실성 최적화 기법 대비 배

송 비용을 효과적으로 절감할 수 있음을 보인 연구도 제시되었다(Silva et al., 2023).

한편, 실제 운영 환경에 AI 기술을 적용하는 연구들도 활발히 수행되고 있다. 제3자 물류 기반 라스트마일 배송 환경에서 주문 불확실성을 고려한 머신러닝 기반 휴리스틱이 제안되었으며, 이탈리아 토리노 사례에서 운영 성과 개선 가능성이 확인되었다(Bruni et al., 2023). 아테네의 한 항만 데이터를 활용한 연구에서 다양한 유형의 자동화 무인운반차량(Automated Guided Vehicle, AGV)과 라우팅 기법을 결합한 스마트 물류 시스템 도입을 통해 적재된 운반차량의 총 운행 거리가 18% 감소하고, 환경적 영향이 개선되는 효과를 보였다(Tsolakis et al., 2022). 더불어 인공지능 기반 경로 최적화와 실시간 추적 기술은 제품의 추적 가능성을 높이고, 동적 라우팅과 스케줄링을 지원하여 물류 지연을 줄이며 온실가스 배출 감축에도 기여한다(Abduljabbar et al., 2019). 이러한 사례들은 라스트마일 배송이 단순한 운송 효율성 개선을 넘어 지속가능성과 공급망 회복탄력성을 동시에 강화할 수 있는 중요한 수단을 보여준다.

2.2.2 참고 및 재고 운영 최적화

참고 및 재고 운영 관리를 다루는 분야는 불확실한 수요, 리드타임, 처리시간 하에서 비용, 서비스수준 그리고 생산성의 균형을 설계하고 공간, 설비, 노동의 제약 속에 최적화 문제를 다루는 것이 특징이다. 전통적으로는 총비용 최소화와 서비스 수준 최대화를 주요점으로 삼았으나, 최근에는 예측과 처방, 실시간 제어, 에너지 탄소와 같이 지속가능성 지표까지 포함하는 방향으로 확장되고 있다.

1) 창고 운영 관리

물류 창고 운영 분야에서 최근 인공지능 기반 자동화 흐름은 물류의 판도를 재편하며 운영 효율성을 높이고 있다(Nasereddin, 2024). 특히 엣지 컴퓨팅(Edge computing)은 데이터가 생성되는 현장 단말(로봇, 센서, RFID 등) 근처에서 연산 및 저장을 수행하여 중앙 서버로의 왕복 통신을 줄이는 분산 처리 방식으로, 물류 지연을 최소화하고 핵심 작업의 응답성을 높인다(Silitonga et al., 2024). 엣지에서 구동되는 인공지능 모델은 센서, 카메라 등 데이터 스트림을 즉시 해석해 중앙 서버의 지시를 기다리지 않고 주문량 변동이나 장비 상태 변화에 신속하게 대응하여 원활하고 끊김 없는 운영을 보장한다. 강화학습은 이러한 로컬 지능과 결합되어 로봇 경로, 컨베이어 속도 제어, 분류 규칙 등을 센서와 환경 피드백에 따라 실시간으로 학습하는 적응형 창고 시스템을 구현할 수 있다(Padakandla, 2021). 이로 인해 복잡한 물류 창고 환경에서도 효율적이고 정확한 작업을 수행할 수 있다(Panzer and Gronau, 2024). 또한 창고 내 운송 경로 최적화를 통해 폐기물을 약 67% 줄일 수 있음이 입증되었으며(Burinskienė et al., 2018), 스웨덴 자동차 부품 창고에서 수집된 수천 개의 멀티 투어 오더 피킹 데이터를 기반으로 한 비교 실험 결과, 제안된 어텐션 기반 심층강화학습(Attention-aware Deep Reinforcement Learning, ADRL)은 기존 방법 대비 성능과 계산 속도를 동시에 개선한 것으로 확인되었다(Wang et al., 2025). 이는 물류 창고의 운영 정책이 실질적 자원 절감으로 이어짐을 보여준다. 이처럼 엣지 컴퓨팅과 강화학습 기법의 결합은 창고 운영의 반응 속도와 효율성을 동시에 끌어올리며, 변동성이 큰 전자상거래 환경에서 민첩성과 지속가능성을 확보하는 핵심 수단으로 자리 잡

고 있다.

2) 재고 관리

다음으로, 재고 관리를 다루는 연구는 인공지능을 활용한 재고 정책 학습과 수요예측, 추적 감지 등 재고 관리 두 영역에서 활발히 진행되고 있다. 서로 다른 리드타임을 갖는 다품목 재고 관리 문제에서 중량과 수량, 유통기한, 확률적 수요 등 현실적인 시나리오를 통합한 환경이 구성되고, 심층 Q-신경망(Deep Q-Networks, DQN)과 근접정책최적화(Proximal Policy Optimization, PPO) 알고리즘을 활용한 강화학습 기반의 새로운 재고 정책이 제안되었다. 비교 결과에 따르면 제안된 방법은 안정적이면서도 최적해에 매우 근접한 성능을 보였다(Meisheri et al., 2022). 부패성 재고 관리에서는 심층강화학습이 학습 과정을 안정화하고 재고 효율성을 향상시킬 수 있음이 확인되었으며, 보상 설계(reward shaping)의 효과 또한 유의미하게 나타났다(De Moor et al., 2022). 또한 재고 내부 외부 요인의 복합 상호작용을 귀납적 학습(Inductive learning)으로 포착하는 동적 프레임워크가 개발되어, 도매업체 재고 관리 문제에서 평균 88%의 정확도로 최적 재고 정책을 선택한 것으로 확인되었다(Priore et al., 2019). 이러한 연구는 복잡한 제약과 불확실성이 존재하는 상황에서도 인공지능 기법이 재고 정책을 효과적으로 개선하여 기존 규칙 기반 접근의 한계를 극복하고, 적응형 재고 관리 시스템의 가능성을 보여준다.

정책 학습과는 별개로, 재고 관리 전반에서의 인공지능 기술 활용도 두드러진다. 수요예측에서 인공지능 기반 예측 분석이 수요예측 정확도를 높이고 재고 수준을 최적화하여 자원 낭비를 줄일 수 있음이 확인되었으며(Bergsma et al., 2025), 대규모

소매 데이터를 활용한 데이터 기반 반품 예측 모델로 반품을 예측하고 반품 급증 등 공급망 혼란에 선제 대응할 수 있음이 제시되었다(Cui et al., 2020). 또한, 코로나 팬데믹 이후 소매 시장의 구조적 변화로 인해 더욱 복잡해진 수요 예측 문제를 개선하기 위해 도메인 적응(Domain Adaptation) 기법과 머신러닝 모델(XGBoost, Transformer)을 적용하고, 실제 POS 데이터를 기반으로 수요 예측 정확도를 향상시킨 연구가 제시되었다(Tarighat et al., 2025). 아울러 K-최근접 이웃(local k-NN) 모델을 활용하여 생산 계획을 위한 고객 수요를 예측한 결과, 짧은 시계열에서도 높은 예측 정확도를 보여 재고 계획에서의 실용성을 입증하였다(Kück and Freitag, 2021). 한편, 시각 비전 기반 관리에서는 합성곱신경망을 활용해 저조도 환경에서도 실시간 바코드 탐지와 스캔을 수행하는 UAV 기반 로봇 시스템이 현장에서의 신뢰성과 효율성을 입증하였다(Kalinov et al., 2020). 이러한 재고 관리 연구들은 예측 추적 감지 기능을 통해 재고 운영 효율성을 높이고 품질과 폐기 손실을 줄이는 동시에, 정책 학습과 결합될 경우 데이터 기반의 실시간 의사결정 체계를 구축할 수 있음을 보여준다.

2.2.3 역물류 및 폐기물 관리

역물류 및 폐기물 관리를 다루는 연구 분야는 순환경제 관점에서 제품, 포장, 자원을 회수 선별하여 재사용 처리하는 네트워크와 운영을 설계하고 제어하는 분야이다. 이 분야에서는 경제적 부담(거리, 비용, 시간)과 환경적 부담을 동시에 최소화하는 녹색물류를 달성하는 것이 목표이다. 이를 달성하기 위해 인공지능 기반 최적화와 메타휴리스틱, 그래프 기법 등이 활용되고 있다. 이러한 연구는 가치 재창

출과 비용 절감 그리고 지속가능성 강화를 함께 달성할 수 있음을 보여준다.

1) 역물류

물류 활동은 다양한 폐기물을 발생시키며, 특히 포장 과정에서 자원의 과소비와 환경 오염 같은 심각한 문제를 야기한다. 이에 따라 지속가능한 포장재 활용, 역물류, 폐기물 관리 등 다각적인 노력이 요구된다. 최근에는 경제적 환경적 부담을 동시에 줄이는 녹색물류가 부상하고 있으며, 역물류는 가치 재창출과 비용 절감을 동시에 달성할 수 있는 핵심 활동으로 주목받고 있다. 역물류 네트워크 시스템의 입지-배정 문제를 해결하기 위해 하이브리드 이산인공벌 군집 알고리즘(hybrid discrete artificial bee colony algorithm, HDABC)이 제안되었으며(Li et al., 2017), 전자상거래 역물류에는 개선된 다목적 입자 군집 최적화(Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)가 적용되어 재고 운영 효율성이 향상되었다(Yang et al., 2018). 더 나아가, 전자상거래 신선식품 역물류 문제를 대상으로 탄소 배출과 연료 비용을 고려한 혼합정수선형계획(MILP) 모형과 강화학습 기반 유전 알고리즘(GA)을 결합함으로써, 대규모 역물류 운영의 효율성과 지속가능성을 동시에 개선한 연구가 제시되었다(Li and Shih, 2024). 최근에는 SVR(support vector regression) 기반 수요 예측과 다목적 최적화를 결합하여 제3자 전기차 배터리 역물류 업체에 대한 주문 할당을 결정하고, 탄소 배출 최소화를 달성한 연구도 제시되었다(Jauhar et al., 2024). 또한, 온라인 고객 리뷰를 활용한 해석 가능한 머신러닝 분석을 통해 제품 속성이 반품 행동에 미치는 영향을 규명하고, 랜덤 포레스트 모델을 활용하여 반품 의도를 효과적으로 예측한 연구가

제시되었다(Duong et al., 2025). 나아가 폐쇄형 공급망과 역물류를 중심으로 인공지능 기술이 예측, 최적화, 의사결정에 어떻게 활용되고 있는지를 체계적으로 정리하고 향후 연구 방향을 제시한 종합적인 연구도 보고되었다(Bhattacharya et al., 2024). 이러한 연구들은 역물류가 단순한 회수 처리를 넘어 네트워크 설계와 운영 전략을 혁신함으로써 경제성과 지속가능성을 동시에 달성할 수 있음을 보여준다.

2) 폐기물 관리

비체계적인 인력 계획과 차량 운용의 비효율성으로 인해 폐기물 운송 및 처리 과정에서 막대한 비용이 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 인공지능 기반 최적화 기법이 운송 거리, 비용, 시간, 효율성 측면에서 폐기물 물류를 개선하는 효과적인 대안으로 주목받고 있다(Abdallah et al., 2020). Dijkstra 알고리즘으로 좌표 간 최단 거리를 계산하고 Tabu 탐색 알고리즘으로 최적 경로를 결정한 결과, 폐기물 운송 거리를 최대 28%까지 줄일 수 있음이 입증되었다(Rizvanoğlu et al., 2019). 다른 연구에서 43개의 재활용 거점을 포함한 이란 지역의 경로를 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing, SA) 알고리즘으로 최적화한 결과 총비용이 13.3% 절감되었으며(Babae Tirkolaee et al., 2019), 베이징 지역의 폐기물 수거 경로는 병렬 시뮬레이티드 어닐링(Parallel Simulated Annealing, Parallel SA) 알고리즘을 통해 개선되어 기존 대비 수거 시간이 약 12% 단축되었다(Zhang et al., 2019). 최근에는 브라질 상파울루 지역의 전자폐기물(WEEE) 역물류 체인을 대상으로 유전 알고리즘(GA)과 타부 탐색(Tabu Search)을 결합한 AI 기반 최적화 기법을 적용하여 재활용업체 배치, 수거 거점 및 차량 경로를 최적화한 결과, 수거 거리 약 30% 감소와

수거 시간 약 20% 단축을 달성하였으며, 연료 소비와 온실가스 배출 저감 효과도 확인되었다(Oliveira Neto et al., 2025). 또한, 머신러닝 모델과 오버샘플링(Oversampling) 및 스택킹 앙상블(Stacking Ensemble) 기법을 결합하여 폐기물-에너지(Waste-to-Energy) 소각시설의 입지 적합성을 예측한 결과, AUC(Area Under the Curve) 92%를 달성하며 정밀도와 재현율을 동시에 개선하였고, 중국 후난성 사례를 통해 신규 후보지 예측이 가능한 의사결정 도구의 실효성을 입증하였다(Hou et al., 2024). 종합하면, 폐기물 관리 분야에서 인공지능 기술과 다양한 최적화 알고리즘은 전통적 물류의 한계를 보완하며 운송 거리와 비용을 줄이고 효율성을 높이는 동시에 지속가능성을 강화하는 핵심 도구로 자리매김하고 있다.

2.2.4 디지털 전환

디지털 전환을 다루는 분야는 크게 블록체인, 사물인터넷(Internet of Things, IoT), 디지털 트윈을 통해 공급망 데이터를 신뢰 가능하게 수집, 연결하여 운영을 고도화, 최적화하는 분야이다. 이 분야의 주된 목표는 투명성, 추적 가능성, 보안성을 높여 오류, 지연을 줄이고, 실시간 데이터에 기반한 의사결정을 통해 궁극적으로 비용과 운영 리스크를 줄이는 것에 있다. 이때 블록체인은 거래의 신뢰성과 데이터 품질을 높여 인공지능 기술 활용을 확장하고, 사물인터넷은 재고, 창고를 실시간 모니터링하며, 디지털 트윈은 물리 시스템을 가상에서 시뮬레이션을 통해 검증하여 시스템을 평가하고 위험을 감지한다. 이러한 통합을 통해 공급망은 속도, 정확성, 안정성을 동시에 개선하고, 궁극적으로 경제적, 전략적 가치를 창출한다(서윌&최현도, 2025).

1) 블록체인

디지털 전환은 공급망의 투명성과 추적 가능성을 강화하는 핵심 수단으로 부상하고 있으며, 블록체인(Blockchain)은 거래의 보안성과 신뢰성을 보장함으로써 공급망 관리 체계를 근본적으로 혁신하는 데 기여하고 있다(Aslam et al., 2024). 블록체인 기술은 원자재 조달부터 최종 소비에 이르는 전 과정을 모니터링할 수 있어 주문 지연, 데이터 오류, 중복 입력 등 주요 물류 문제를 완화할 잠재력을 지닌다. 이를 통해 공급망의 투명성을 높이고 오류를 줄이며 거래 속도와 보안성을 동시에 강화할 수 있다. 이러한 개선 효과는 비용 절감, 운영 리스크 감소, 규제 준수 강화로 이어져 공급망 관리에서 경제적 및 전략적 이점을 제공한다(Idrissi et al., 2024).

한편, 블록체인의 실증적 적용 사례도 점차 확대되고 있다. 말레이시아 중소기업(SMEs)을 대상으로 한 실증 연구에서는 블록체인 기술의 도입이 운영 및 공급망 관리에서 투명성과 신뢰성을 제고하는 핵심 요인으로 작용하며, 기술적 준비도와 조직 역량, 외부 환경 압력이 블록체인 채택에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다(Wong et al., 2020). 의약품 공급망을 대상으로 블록체인 도입 과정에서 발생하는 이해관계자 간 인센티브 불일치를 분석하고, 계약 및 보상 메커니즘 설계를 통해 블록체인 채택을 촉진할 수 있음을 이론적으로 규명하였다(Niu et al., 2021). 또한 기존 데이터 기반 네트워크에 블록체인을 결합하면 데이터 품질이 향상되며, 이는 인공지능 활용 범위의 확대로 이어진다. 나아가 인공지능 기술과 블록체인의 결합은 물류 데이터 처리 방식을 혁신하여 실시간 분석과 신속한 의사결정을 가능하게 하며, 글로벌 물류 시장에서 경쟁 우위를 확보하는 데 기여한다(Iranmanesh et al., 2023).

2) 사물인터넷

사물인터넷은 여러 유형의 사물을 포괄하며, 어느 위치에서든 다수의 사용자 간 데이터 연결을 가능하게 하는 핵심 기술로 주목받고 있다. 사물인터넷은 데이터의 실시간 교류를 가능하게 하여 물류 운영에서 발생하는 문제에 대해 신속히 대응하고 효율적인 의사결정을 내릴 수 있도록 지원한다(Jiang et al., 2022). 특히 RFID 기술과 통합된 사물인터넷은 상품을 실시간으로 모니터링할 수 있으며(Tran-Dang et al., 2022), 최소한의 자원으로 다수의 사물을 상호 연결하여 광범위한 데이터 교환을 가능하게 함으로써 물류 의사결정의 민첩성과 효율성을 제고한다(Savić et al., 2021). 또한 사물인터넷 기반 핵심 기술은 변화하는 사용자 요구에 따라 재고 관리, 운송 추적, 창고 최적화 등 다양한 물류 활동을 실시간으로 모니터링하고 관리할 수 있도록 지원한다(Koot et al., 2021). 한편, 최근 연구에서는 물류 시스템에서 인공지능, 블록체인, 사물인터넷(IoT)의 통합 활용이 에너지 효율 개선과 탄소 배출 저감을 촉진하는 동시에, 시스템 복잡성과 운영 부담을 증가시키는 상충 관계(paradox)를 형성함을 지적하고, 이러한 디지털 기술 통합을 효과적으로 관리하기 위한 지속가능 물류 전략의 중요성을 강조하는 연구가 제시되었다(Mishra et al., 2024). 이러한 사물인터넷의 도입과 확산은 증가하는 데이터 처리 수요를 충족시키며, 궁극적으로 물류 네트워크의 민첩성과 효율성을 제고한다.

3) 디지털 트윈

디지털 트윈(Digital Twin)은 현실 세계의 물리적 시스템을 가상 공간에 정밀하게 복제하여, 사물인터넷(IoT), 데이터 분석, 시뮬레이션 기술을 통합적으로 연계하는 디지털 기술로 정의된다(Fuller

et al., 2020). 실제 응용에서는 전통적인 기준 재고 정책(base-stock policy)과 비교되었으며, 그 결과 현실 적용 가능성이 확인되었다(Kegenbekov and Jackson, 2021). 더 나아가 디지털 트윈은 창고 레이아웃, 장비 구성, 자재 흐름 등을 가상 공간에서 시뮬레이션하여 다양한 시나리오를 신속히 검증하고, 레이아웃 변경의 영향을 사전에 분석함으로써 혼잡을 최소화하고 창고 설계를 최적화할 수 있다. 또한 새로운 자동화 전략과 기술을 적용하기 전에 가상 시뮬레이션을 통해 적용 알고리즘의 파라미터를 미세 조정함으로써 운영 중단 위험을 줄일 수 있다(Jiang et al., 2021). 최근에는 실제 물류 및 공급망 운영 환경을 대상으로 디지털 트윈을 적용하고, 그 활용 가능성을 검증하는 연구가 증가하고 있다. 물리적 및 재무적 교란이 발생한 공급망 환경에서 기계학습과 시뮬레이션을 디지털 트윈 프레임워크에 결합하여 재고 및 현금 관리 정책을 통합적으로 설계하고, 이를 통해 공급망 운영 효율성과 현금 흐름을 효과적으로 개선한 연구가 제시되었다(Badakhshan and Ball, 2022). 독일 식품 유통 공급망을 대상으로 디지털 공급망 트윈을 활용하여 COVID-19 팬데믹이 공급망 운영에 미치는 영향을 분석한 결과, 공급망 회복탄력성은 공급업체 가동 중단, 재고 주문 정책, 고객 행동 등에 의해 결정됨을 확인하였다(Burgos and Ivanov, 2021). 이러한 연구들은 디지털 트윈 기반 공급망 모델이 물류 네트워크의 실시간 가시성과 시뮬레이션을 활용하여 리스크를 체계적으로 분석하고, 회복탄력성을 갖춘 물류 운영 전략을 도출할 수 있음을 제시하였다.

III. 실제 적용 사례 연구

본장은 지속가능 물류 분야에서 인공지능을 활용하고 있는 기업 사례를 중심으로 분석을 수행한다. 본 연구의 사례연구는 문헌연구에서 정립된 논의가 실제 기업 환경에서 어떻게 나타나는지를 살펴보고자 한다. 앞서 학술 분석에서 확인한 바와 같이, 인공지능의 물류에서의 활용 방식과 연구 초점은 산업 환경의 특성에 따라 다양하게 나타난다. 특히 수요 변동성, 주문 단위의 세분화, 짧은 리드타임과 높은 서비스 수준 요구가 동시에 존재하는 환경에서는 예측과 실시간 의사결정을 지원하는 인공지능 기법이 빈번히 논의되어 왔다. 이러한 운영적 특성은 최근 물류 연구에서 인공지능 활용을 설명하기 위해 반복적으로 등장하는 분석 맥락으로 이해될 수 있다. 이 가운데 전자상거래 물류 환경은 주문 빈도와 변동성, 라스트마일 배송, 재고 선배치 등과 같이 기존 문헌에서 논의되어 온 인공지능 적용 논점을 비교적 명확하게 관찰할 수 있는 사례 맥락을 제공한다. 실제로 본 연구의 문헌조사에서도 라스트마일 배송, 실시간 경로 최적화, 수요예측, 재고 관리 등 전자상거래 물류와 밀접하게 연관된 주제들이 반복적으로 등장하였다. 이에 본 연구는 문헌연구에서 도출된 인공지능 활용 논의를 실무적 맥락에서 설명하고 구체화하기 위한 사례 연구 대상으로 전자상거래 선도 기업을 선정하였다.

이러한 이유로 미국, 중국, 한국의 대표 기업을 중심으로 인공지능의 실제 적용 사례를 조사하고, 그 특성과 차이를 비교 및 검토한다. 미국은 물류 전반의 기술 서비스 모델을 선도하며 글로벌 표준을 형성하고 있고, 중국은 초대형 플랫폼 생태계와 정책, 인프라를 바탕으로 가장 빠르게 확산, 고도화를 선

도하는 추격국이다. 산업 현장의 최신 동향을 면밀히 파악하기 위해 학술 문헌뿐 아니라 기업 공식 발표, 산업 보고서, 주요 언론의 심층 기사를 교차 검증하여 분석 대상으로 활용한다.

3.1 미국

미국 전자상거래 물류 시장은 광활한 국토, 다양한 지형, 지역별로 세분화된 고객 수요가 결합된 복합적 환경 속에서 발전해 왔으며, 이러한 구조적 특성은 물류 혁신을 선도하는 다양한 운영 모델의 형성으로 이어졌다(Deloitte, 2025). 아마존, 월마트, 타겟 사례는 미국 시장에서 대표적인 인공지능 활용 모델을 잘 보여준다. 아마존은 직매입(1P) 중심의 수직통합형 물류 네트워크를 기반으로 배송 효율을 극대화하고, 배송 시간을 지속적으로 단축해 모범 사례로 평가받는다. 월마트와 타겟은 전국적 오프라인 매장을 물류 거점으로 활용하는 옴니채널 전략을 통해, 전통 소매와 전자상거래 물류가 결합된 하이브리드 모델을 구현한다. 본 절에서는 이러한 미국의 핵심 기업 사례를 통해, 글로벌 선도 기업의 인공지능 활용 전략과 운영 모델의 특징을 정리한다.

3.1.1 아마존(Amazon)

아마존의 수직 통합 모델은 수요예측, 창고 운영, 라스트마일을 하나로 묶어 인공지능이 예측한 신호를 곧바로 실행할 수 있게 만들었다. 아마존은 생성형 인공지능을 라우팅 최적화, 로봇틱스 지능화, 작업 인체공학 개선, 신상품의 지역별 선배치 등 운영 전반에 적용하여 동일일(Same-Day) 익일 배송 비중을 높이고 있다(Tarasov, 2024). 2024년 3월

기준, 미국 상위 60개 대도시권에서 프라임(Prime) 주문의 약 60%가 당일 또는 익일에 배송되었으며, 회사는 생성형 인공지능 고도화를 통해 이 비중을 추가로 확대하는 전략을 제시했다(Tarasov, 2024). 또한 아마존은 인공지능을 활용하여 중간 물류 네트워크를 최적화하는 '프로젝트 웰스프링(Project Wellspring)'을 운영해왔다(Amazon, 2023). 이 시스템은 머신러닝을 통해 수백만 개의 소포 이동 경로와 트럭 운송망 전체를 분석하여, 자체 물류 네트워크의 효율성과 예측 가능성을 극대화한다.

아마존은 Kiva 인수 이후 배송 상품이 작업자에게 이동하는 'goods-to-person' 기능 자동화를 확장했고, 창고 로봇에 인공지능 기술을 도입하여 창고 내 장애물 회피 및 우선순위 기반 동선 결정을 정교화했다(Amazon, 2023; Tarasov, 2024). 특히 2021년 약 35만 대였던 창고 로봇은 2023년 75만 대 이상으로 늘었고, 차세대 구동 유닛인 Proteus는 비전 생성형 인공지능 로봇으로 장애물을 회피하고 정밀 정지 위치를 판단할 수 있다(Tarasov, 2024). 이로 인해 성수기나 협소 공간에서의 중량물 처리 등 고강도 작업을 흡수해, 사람의 동선을 줄이고 전체적인 물류 배송 속도를 향상시키고 있다(Tarasov, 2024).

아마존은 AWS 플랫폼을 기반으로 공급망의 디지털 트윈 솔루션을 구축하여 운영 효율성을 높이고 있다(Amazon, 2023). 이는 사물인터넷 기반 센서에서 수집된 실시간 데이터를 가상 모델에 반영해 공급망의 가시성을 제고하고, 시뮬레이션을 통해 잠재적 문제를 사전에 예측 및 해결할 수 있도록 한다. 아마존은 자사의 AWS 플랫폼을 통해 이러한 디지털 트윈 솔루션을 구현하며 운영 효율성을 크게 향상시키고 있다.

3.1.2 월마트(Walmart) 및 타겟(Target)

월마트와 타겟은 재고 부족으로 인한 판매 기회 손실을 막기 위해 인공지능 기반 예측 분석 시스템을 적극적으로 도입하고 있다(Kapadia, 2025). 매장 설비 레이아웃 동선까지 반영하는 디지털 트윈을 통해 냉장 장비 고장 징후 등 운영 리스크를 사전에 탐지, 진단, 조치할 수 있으며(최대 약 2주 전 조기 경보), RFID 증강현실(Augmented Reality, AR) 등과 결합하여 재고 탐색 보충 업무의 속도와 정확도를 높이고 있다(Caminiti, 2023). 월마트의 시스템은 판매 시점 정보(POS), 공급망 데이터뿐만 아니라 날씨, 지역 이벤트, 소셜 미디어 트렌드와 같은 외부 데이터를 실시간으로 분석하여 수요를 정밀하게 예측한다. 이를 통해 특정 상품에 대한 수요 급증을 사전에 인지하고 재고를 자동으로 조정하며, 보충 주문까지 자동화하여 운영 효율성을 높이고 있다(Kapadia, 2025).

반면, 타겟은 매장을 허브로 사용하는 Stores-as-Hubs 전략과 소팅센터를 결합해 매장의 주문 처리 부담을 낮추고 라스트마일 효율을 극대화 하고 있다(Target, 2023). 타겟은 2023년 'Inventory Ledger'를 도입해 매장별 재고 변동을 통합 추적하고 인공지능 모델로 재고 소진을 사전 탐지하는 체계를 구축했다. 현재 40% 이상의 SKU 범주에서 인공지능 주도 재고관리를 적용하고, 리드타임, 운송비, 현 재고 및 수요 신호를 결합해 주당 수십억 건의 수요예측을 수행하고 있다. 시즌 속성(색상, 사이즈)과 수요 차이를 반영해 매장 내 오배치(잘못된 통로나 선반)의 자동 탐지 기능도 병행한다(Kapadia, 2025). 월마트 또한 지역, 기후, 시점별 수요 편차를 반영하는 재고 재배치 알고리즘을 운용하고 있다(Kapadia, 2025). 이렇게 재고 수요

관리를 매장, 시간, 상품속성 단위로 미세화해 특정 지점이나 피크 시간대의 결품을 선제적으로 방지할 수 있다. 모델 구축에 있어 알고리즘은 인구통계가 다른 상권별로 자주 함께 구매되는 장바구니 패턴을 스스로 추론해 매장 클러스터별 수요 차이를 반영하고, 시즌 상품의 색상, 사이즈와 같은 세부 속성까지 매장별로 예측해 배치 정확도를 높이고 있다. 기후나 지역에 따라 수요가 갈리는 품목의 경우에는 판매 흐름을 실시간으로 탐지해 재고를 재배치함으로써 오프라인 매장과 전자상거래 물류 네트워크 전체의 효율을 높이고 있다(Kapadia, 2025).

월마트는 '공간, 물리 AI' 기반의 디지털 트윈을 매장, 설비 운영에 적용해 문제를 최대 2주 전에 탐지, 진단, 조치하는 체계를 구축하고 있다(Curry, 2025). 매장 세정 로봇에 부착된 인벤토리 인텔리전스 타워로 매대 이미지를 대량 취득 판독하여 결품 신호를 조기에 포착하고 보충을 자동 트리거하는 프로세스를 운용한다(Caminiti, 2023).

3.2 중국

중국은 징둥, 알리바바를 통해 방대한 내수 시장과 정부의 적극적인 지원을 바탕으로 인공지능을 비롯한 기술 혁신이 빠르게 적용되는 기술 시험장의 특성이 두드러진다. 2023년 중국의 온라인 소매 판매액은 15조 4,200억 위안(약 2조 1,400억 달러)에 달하는 전 세계 최대 규모로 성장하였으며, 가파른 성장과 경쟁은 기업들의 효율성 향상과 비용 절감을 위한 인공지능, 사물인터넷, 물류센터 자동화, 드론 배송 등 첨단 기술의 상용화를 앞당겼다(Xu, 2024). 이러한 배경 속에서 중국의 대표적인 전자상거래 기업들은 각기 다른 전략을 통해 물류 기술 혁신을 이끌고 있다. 징둥(JD.com)은 자체 인프라

와 인력을 기반으로 한 자산집약적(asset-heavy) 통합 모델을, 알리바바(Alibaba)의 물류 자회사인 차이냐오(Cainiao)는 제3자 물류 네트워크를 통합하는 자산경량화(asset-light) 플랫폼 모델을, 각각 구현하고 있다.

3.2.1 징둥(JD.com)

징둥은 자체적으로 구축한 물류 인프라에 막대한 기술 투자를 결합하여 공급망 전체를 직접 통제하는 자산집약적 모델의 선두 주자이다. 이러한 수직 통합 모델은 아마존과 유사하며, 인공지능 모델 및 로보틱스 기술에 기반한 독자적인 기술 개발을 통해 세계 최고 수준의 효율성을 달성하고 있다.

징둥 물류 시스템의 핵심은 고도로 자동화된 풀필먼트 센터이다. 징둥은 상품을 작업자에게 이동시키는 '굿즈투퍼슨(Goods-to-person)' 로봇과 같은 자동화 솔루션을 통해 입고, 적재, 포장, 출고에 이르는 전 과정을 자동화했다. 이러한 시스템의 두뇌 역할을 하는 것은 로봇 군집을 위한 고도의 디스패칭 알고리즘이다. 이 알고리즘은 대규모 정수계획법(large-scale integer programming)과 온라인 삼자 매칭(로봇-선반-워크스테이션) 문제를 수초 내에 해결하여 현장 운영을 실시간으로 최적화한다(Qin et al., 2022). 그 결과, 징둥은 풀필먼트 비용을 세계적인 수준인 6.5%까지 낮추었으며, 성수기에는 평시의 10배에 달하는 주문량을 처리할 수 있는 민첩성을 확보했다(Qin et al., 2022). 또한, 인공지능 딥러닝에 기반한 '엔드-투-엔드 최적화(End-to-End Optimization)' 솔루션은 중간 단계 없이 입력 데이터로부터 최적의 자동 보충 계획을 직접 도출하여, 85%의 자동 조달률과 31.5일의 재고 회전일을 달성했다(Hu et al., 2024).

징둥은 라스트마일 배송 분야에서 자율주행 기술을 가장 적극적으로 도입하고 있는 기업이다. 2016년부터 자율주행 배송 차량 연구를 시작하여, 현재 중국 내 여러 도시에서 레벨 4 수준의 자율주행 배송 로봇을 운영하고 있다. 또한, 농촌이나 산간 지역과 같은 배송 인프라가 취약한 지역에는 자체 설계한 드론을 활용하여 배송 서비스를 제공함으로써 물류 사각지대를 해소하고 있다(JD.com, 2016).

징둥의 가장 큰 경쟁력은 창고 재고부터 최종 배송까지 공급망 전 과정에 대한 완전한 가시성과 통제력을 제공하는 독자적인 물류 플랫폼에서 나온다. 이러한 종단간(end-to-end) 통합 시스템은 인공지능 기법과 전통적인 알고리즘이 공급망 전체를 유기적으로 최적화할 수 있는 기반이 된다. 이를 통해 징둥은 주문의 90% 이상을 당일 또는 익일에 배송하는 '211 프로그램'을 안정적으로 운영하며 고객 신뢰를 확보하고 있다(Qin et al., 2022).

3.2.2 알리바바(차이냐오)

알리바바의 물류 자회사인 차이냐오(Cainiao)는 직접 물류 자산을 소유하거나 배송 인력을 고용하는 대신, 데이터와 기술을 통해 수천 개의 물류 파트너사를 연결하고 전체 물류 프로세스를 조율하는 '디지털 물류 플랫폼' 모델을 추구한다. 이 자산 경량화 모델의 핵심은 개방형 생태계를 구축하여 중국 물류 산업 전체의 디지털화를 촉진하는 것이다.

차이냐오 플랫폼의 기반은 파트너사들이 물류 데이터를 공유하고 표준화된 프로토콜을 통해 협업할 수 있도록 지원하는 개방형 사물인터넷 플랫폼이다. 차이냐오는 협력기업과의 데이터 통합 및 분석을 통해 물류 전 과정에서 발생하는 방대한 데이터를 실시간으로 처리하고 분석하여 공급망의 투명성과 예

측 가능성을 극대화한다(Chen et al., 2024).

차이나오는 인공지능 기반의 분석 기법을 활용하여 여러 판매자로부터 동일한 소비자가 주문한 소포들을 운송 과정에서 통합하는 스마트 소포 통합(Smart Parcel Consolidation) 시스템을 개발했다. 이를 통해 배송 시간을 50% 이상 단축하고 연간 수천만 달러의 비용을 절감하는 성과를 거두었다(Chen et al., 2024). 또한, 자율주행 배송 차량이 복잡하고 동적인 환경에서 최적의 경로를 찾고 장애물을 효과적으로 회피할 수 있도록 하는 다중 센서 데이터 융합 및 심층강화학습 기반의 경로 계획 알고리즘에 대한 연구를 지속하고 있다(Hall, 2024).

3.3 한국

국내 시장은 쿠팡, 네이버-CJ 대한통운, 롯데-오카도를 통해 좁은 국토와 도시 집중, 신속 배송에 대한 높은 수요가 결합된 환경 속에서, 앞선 두 시장의 대표적인 운영 모델이 변형, 응용되는 과정을 확인할 수 있는 독특한 시장 특성을 지닌다. 높은 도시화율과 한국 인구의 수도권 편중 구조는 물류 허브의 짧은 배송 반경과 고밀화의 결정적 요인으로 작용한다. 이와 같은 환경에서 국내 소비자는 당일, 익일 배송을 기본적인 서비스로 인식하고 있으며, 기업 간 경합이 주 7일 배송과 초고속 배송 보장의 전국 확대를 견인해 시장 표준을 재정의하고 있다.

쿠팡은 주문부터 라스트마일까지 물류 사슬 전체를 수직 통합한 자산집약형(end-to-end) 모델을 통해 재고의 선제적 배치와 동적 경로배정(dynamic routing)을 내부적으로 최적화하였다. 네이버-CJ 대한통운은 플랫폼의 수요 데이터와 전국적 3PL 인프라의 물류 실행 역량을 결합한 연합형 모델을 통해 다채널 주문 통합관리(orchestration)와 주 7

일, 당일, 익일 배송의 제도화를 병행하고 있다. 롯데-오카도는 신선식품 배송에 특화된 모델로, 고도로 자동화된 고객 풀필먼트 센터(CFC)와 인공지능 기반 경로배정을 포함하는 OSP(Ocado Smart Platform)를 국내 시장에 도입하여 신선도, 정확성, 정시성의 동시 달성을 지향한다(박선희, 2023). 선도 기업 구도가 유동적인 국내 시장의 분석은 한국 인공지능 물류의 상용화 수준과 경쟁 전략을 파악하는 데 유의미한 시사점을 제공한다.

3.3.1 쿠팡(Coupang)

쿠팡은 인공지능과 데이터 분석 기술을 물류 시스템 전반에 통합하여 대한민국 이커머스 시장의 배송 패러다임을 재정의했다. 쿠팡의 물류 혁신은 독자적으로 구축한 엔드투엔드(end-to-end) 물류 인프라와 이를 운영하는 정교한 기술력에 기반한다.

유통 관리 및 라스트마일 배송 분야에서 쿠팡의 핵심 경쟁력은 '로켓배송'으로 대표되는 익일 배송 서비스에 있다. 이는 인공지능 기반의 동적 라우팅(dynamic routing) 기술을 통해 구현된다. 인공지능 기술은 수백만 개에 달하는 상품의 주문 정보, 물류센터의 재고 현황, 지역별 배송 밀집도, 실시간 교통 상황 등 방대한 데이터를 분석하여 최적의 배송 경로를 실시간으로 계산한다(정재현, 2025; Coupang, 2025). 이를 통해 배송 기사는 가장 효율적인 동선으로 움직일 수 있으며, 이는 배송 시간 단축과 유통비 절감으로 이어진다. 또한, 이러한 데이터 기반 시스템은 전국 각지의 캠프(배송 거점)에 상품을 효율적으로 분배하고, 라스트마일 배송의 예측 가능성과 정확성을 극대화하는 데 기여한다.

창고 재고 운영 최적화 측면에서 쿠팡은 인공지능 수요예측을 통해 고객의 주문을 사전에 예측하고,

전국 30개 지역에 위치한 물류센터에 상품을 선제적으로 배치한다. 이는 '로켓배송'의 핵심 동력으로, 재고를 소비자 가까이로 둬으로써 배송 거리를 획기적으로 단축시킨다(정재환, 2025). 물류센터 내부 운영은 자동화 기술이 주도한다. 수천 대의 무인운반차(AGV), 자동 분류로봇(sorting robot), 무인지게차 등이 도입되어 상품의 입고, 분류, 피킹, 출고 과정을 자동화함으로써 처리 속도와 정확성을 높이고, 인력 의존도를 낮춘다(박동휘, 2022). 특히 디지털 트윈(Digital Twin) 기술을 활용하여 실제 물류센터와 동일한 가상 모델을 구축하고, 수만 번의 시뮬레이션을 통해 발생 가능한 모든 시나리오를 예측하고 최적의 운영 방안을 도출한다(Coupang, 2025).

쿠팡은 신선식품 배송에 사용되는 '로켓프레시 에코백'을 도입해 스티로폼과 같은 일회용 포장재를 대체하는 재사용 모델을 운영한다(홍다영, 2022). 쿠팡의 엔드투엔드 운영 구조로 인해 포장, 세척, 수거, 재투입의 전 과정을 내부화함으로써 재사용이 용이하다. 또한, 상품 포장에 재활용 가능한 소재를 도입하는 등 친환경 포장 전략을 실행하고 있다.

디지털 전환은 쿠팡 물류 시스템의 근간을 이룬다. 상품 입고부터 고객에게 전달되기까지의 모든 과정은 데이터로 기록되고 실시간으로 모니터링된다. 쿠팡의 창고관리시스템(Warehouse Management System)은 이러한 데이터를 기반으로 재고 배치, 인력 운영, 배송 경로 등 물류 네트워크 전체를 최적화하는 의사결정을 내린다(Coupang, 2025). 이는 공급망의 투명성을 확보하고, 예기치 못한 문제 발생 시 신속하게 대응할 수 있는 기반을 제공한다. 결과적으로 쿠팡의 디지털 전환은 단순히 운영 효율성을 높이는 것을 넘어, 데이터 기반의 예측 물류를 실현하는 핵심 요소로 작용하고 있다.

3.3.2 네이버-CJ 대한통운(Naver & CJ Logistics)

네이버와 CJ 대한통운의 협력은 대한민국 최대 포털 및 이커머스 플랫폼과 물류 선두 기업의 결합으로, 인공지능 기술을 활용한 스마트 물류 체계 구축을 목표로 한다. 이들의 파트너십은 플랫폼의 방대한 데이터와 물류 기업의 운영 노하우를 결합하여 시너지를 창출하는 대표적인 사례이다.

유통 관리 및 라스트마일 배송에서 CJ 대한통운은 인공지능 기반의 통합 배송 시스템 '오네(O-NE)'를 통해 배송 효율성을 제고하고 있다. 이 시스템은 네이버의 주문 데이터를 포함한 대규모 물동량 정보를 분석하여 허브 및 서브 터미널의 운영을 최적화하고, 배송 기사에게 효율적인 경로를 제공한다. 특히, 물류 경로 최적화와 실시간 관제 시스템을 통해 수도권 및 대도시 지역의 당일 새벽 배송 서비스의 안정성을 높이고 있다.

창고 재고 운영 최적화는 양사 협력의 핵심 분야이다. 네이버의 인공지능 수요예측 모델인 '클로바 포캐스트(CLOVA Forecast)'가 이 협력의 중심축을 담당한다(차준호, 2021). 클로바 포캐스트는 과거 주문량 데이터를 통해 다음날 발생하는 예상 주문량을 높은 정확도로 예측하며, 일반적이지 않은 이벤트 기간에도 약 95%의 정확도를 유지한다. 이러한 예측은 사전에 물류센터의 자원(인력, 차량) 배치를 최적화할 수 있으며 이는 전반적인 운영의 효율성으로 귀결된다. CJ대한통운은 이 예측 데이터를 기반으로 풀필먼트 센터의 재고를 사전에 확보하고 적절히 배치함으로써, 재고 부족이나 과잉 문제를 최소화하고 주문 처리 리드타임을 단축시킨다(차준호, 2021).

역물류 및 폐기물 관리 측면에서는 친환경 스마트 패키징 솔루션 도입을 추진하고 있다. 이는 상품의

부피와 무게에 최적화된 포장재를 인공지능 모델이 추천하고, 재활용이 용이한 소재를 사용하여 불필요한 폐기물 발생을 줄이는 것을 목표로 한다. 또한, 반품 과정에서도 데이터 분석을 통해 가장 효율적인 회수 경로를 설계하여 역물류 과정에서 발생하는 탄소 배출을 저감하려는 노력이 포함된다.

양사의 협력은 디지털 전환을 통한 물류 시스템의 고도화를 지향한다. CJ 대한통운은 미국 법인을 통해 인공지능 기반 솔루션 제공 기업 '원트랙 AI (OneTrack.AI)'와 협력하여 인공지능 컴퓨터 비전 기술을 물류센터에 도입했다(박선희, 2023). 이 시스템은 물류센터 내 지게차에 비전 카메라 센서를 장착하여 현장에서 발생하는 모든 움직임을 자동으로 수집하고 분석함으로써, 안전을 강화하고 운영 효율을 높이는 데 기여한다. 이러한 디지털 기술의 통합은 공급망의 투명성을 높이고 예측 기반의 물류 운영을 가능하게 하는 핵심 동력이다.

3.3.3 롯데-오카도(Lotte & Ocado)

롯데쇼핑과 영국 식품 물류 기업 오카도(Ocado)의 파트너십은 기존의 물류 방식을 근본적으로 혁신하는 차세대 스마트 물류 모델을 국내에 도입하는 것을 목표로 한다. 이는 오카도의 통합 스마트 플랫폼(OSP, Ocado Smart Platform)을 기반으로 한 고객 풀필먼트 센터(CFC, Customer Fulfilment Center) 구축을 핵심으로 한다(윤다빈, 2022).

ラスト마일 배송에서 오카도 스마트 플랫폼은 인공지능 기반의 경로 최적화 솔루션을 제공한다. 이 솔루션은 주문된 상품의 종류, 부피, 배송지의 지리적 분포, 실시간 교통 정보, 고객이 선호하는 배송 시간대 등 복잡한 요소를 종합적으로 분석하여 가장 효율적인 배송 경로와 차량 적재 방식을 자동으

로 산출한다(김경미, 2025). 이를 통해 한 대의 차량이 처리할 수 있는 배송 건수를 극대화하고, 정시 배송률을 97% 이상으로 유지하면서 운행 거리를 최소화하여 유류비와 탄소 배출량을 동시에 절감한다.

창고 재고 운영 최적화는 롯데-오카도 모델의 가장 혁신적인 부분이다. CFC 내부에 설치된 '하이브(The Hive)'로 불리는 격자 모양의 자동화 설비가 그 중심이다. 수천 개의 로봇이 그리드 위를 초당 4미터의 속도로 이동하며, 인공지능 '항공 교통 관제' 시스템의 통제에 따라 서로 충돌 없이 상품을 피킹한다. 이 시스템은 초당 10회 이상 각 로봇과 통신하며 전체 시스템을 조율한다(김경미, 2025). 인공지능 모델은 실시간 주문 데이터를 기반으로 수요를 예측하고 재고를 관리하며, 컴퓨터 비전과 딥러닝 기술이 적용된 로보틱 피킹(robotic picking) 시스템은 사람의 손길이 필요한 섬세한 상품까지 자동으로 처리한다.

역물류 및 폐기물 관리에 대한 구체적인 정보는 제한적이거나, 오카도 시스템은 본질적으로 높은 재고 정확성과 수요예측을 통해 폐기물 발생을 원천적으로 최소화하는 구조를 가지고 있다. 정확한 재고 관리의 유통기한이 짧은 신선식품의 폐기율을 현저히 낮추는 데 기여하며, 이는 지속가능성 측면에서 중요한 의미를 가진다.

디지털 전환은 롯데-오카도 모델의 본질 그 자체이다. 오카도 스마트 플랫폼은 온라인 주문 접수부터 상품 피킹, 패키징, 배송, 고객 커뮤니케이션에 이르는 이커머스 전 과정을 통합 관리하는 엔드투엔드 솔루션이다. CFC 내부의 모든 로봇과 설비는 실시간으로 데이터를 생성하며, 인공지능 모델은 이 데이터를 분석하여 시스템 전체를 자율적으로 최적화한다. 이는 물류 운영의 투명성을 최고 수준으로 보장하며, 데이터 기반의 실시간 의사결정을 통해 예

〈표 2〉 전자상거래 플랫폼 유형별 특징

구분	핵심 특징	대표 기업	AI 기술 집중 영역 및 적용 사례
1. 수직 계열화형 (End-to-End Integrated)	자산 보유(Asset-heavy): 창고, 운송망 직접 소유, 속도, 통제력, 즉시성 확보	Amazon (미), JD.com (중), Coupang (한)	<ul style="list-style-type: none"> 유통/ラスト마일: 동적 라우팅 (Dynamic Routing), 자율주행 창고/재고: 로보틱스(AGV/GTP) 기반 완전 자동화, 지역별 선배치
2. 플랫폼 연합형 (Platform Orchestrator)	자산 경량화(Asset-light): 파트너사 연결 및 데이터 통합, 네트워크 확장, 비용 효율화	Alibaba, Cainiao (중), Naver-CJ (한)	<ul style="list-style-type: none"> 유통/ラスト마일: 스마트 통합포장 (Smart Consolidation)을 통한 경로 단축 창고/재고: 판매자(Seller) 대상 수요 예측 솔루션 제공(예: CLOVA Forecast) 디지털 전환(DT): 개방형 IoT 플랫폼, 데이터 표준화, 파트너사 연동
3. 옴니채널 및 특화형 (Hybrid & Specialist)	하이브리드: 오프라인 매장 거점 활용, 재고 통합 관리 카테고리 특화: 신선도 유지	Walmart, Target (미), Lotte-Ocado (한)	<ul style="list-style-type: none"> 유통/ラスト마일: 신선식품 콜드체인 최적화, 매장 발송(Ship-from-store) 창고/재고: 매장-온라인 재고 통합, 매장 디지털 트윈(결품 탐지) 역물류: 신선식품 폐기물 최소화를 위한 정밀 수요 예측

측 불가능한 문제에 신속하게 대응할 수 있는 유연성을 제공한다. 롯데는 이 플랫폼을 통해 국내 온라인 그로스리 시장의 디지털 혁신을 주도하고자 한다.

3.4 유형별 비교 분석

앞서 문헌 연구에서 도출한 4가지 핵심 영역(유통/ラスト마일, 창고/재고, 역물류, 디지털 전환)을 기준으로 각 기업의 유형별 전략을 비교 분석하였다. 상세한 내용은 아래와 같다(〈표 2〉 참조).

첫째, 물류 인프라를 직접 소유하는 수직 통합형(End-to-End Integrator) 모델은 '속도'와 '통제력' 확보에 집중한다. 동적 라우팅(Dynamic Routing)이나 창고 자동화 로보틱스 기술과 AI를 결합하여 물리적 실행 과정을 조정하고 공급망 현장의 불확실성을 즉각적으로 통제함으로써 전체 운영 프로세스의 회전율을 극대화하는 운영 체계를 구축한다. 이

에 해당하는 기업은 미국의 Amazon, 중국의 JD.com, 한국의 Coupang이다.

둘째, 파트너사들을 연결하는 자산 경량화(Asset-light) 운영을 추구하는 플랫폼 연합형(Platform Orchestrator) 모델은 '데이터 표준화'와 '연결성'을 위해 AI를 활용한다. 디지털 전환(DT)을 통한 파트너사 간의 데이터 표준화와 예측 정보 공유를 통해 수직 통합형과 같은 직접적인 통제 대신 데이터 오케스트레이션(Orchestration)을 통해 규모의 경제와 운영 효율을 확보하는 전략을 구사한다(김초연 외, 2025). 이러한 전략을 취하는 기업은 Alibaba, Cainiao(중국), Naver-CJ(한국)이 대표적이다.

셋째, 기존 오프라인 매장을 활용하거나 신선식품과 같은 특정 카테고리에 집중하는 옴니채널 및 특화형(Hybrid & Specialist) 모델은 '재고 통합'과 '폐기물 최소화'를 위해 AI를 활용한다. 매장 디지털 트윈으로 온, 오프라인 재고의 실시간 동기화와 신

선식품 전용 관리 플랫폼을 통해 배송 속도를 향상시키고, AI가 재고 흐름을 모니터링 및 예측한다. 이를 통해 주문 시점에 결품을 방지하고 신선식품의 폐기율을 절감하는 운영 정밀도 개선을 추구한다. 이러한 유형별 비교는 전자상거래 물류에서 인공지능 활용이 단일한 최적 해법이 아니라, 기업의 자산 구조와 전략적 우선순위에 따라 상이하게 활용하고 있음을 보여준다. 대표적으로는 미국의 Walmart, Target과 Ocado와 협력을 맺은 한국의 Lotte이 있다.

IV. 결론

본 연구는 지속가능 물류 분야에서 인공지능 활용을 주제로 한 선행연구를 체계적으로 검토하고, 연구 주제와 방법론의 흐름을 정리하였다. 기존 연구들은 비용 절감과 운영 효율성 개선을 중심으로 인공지능의 효과를 분석해 왔으며, 최근에는 환경적 지속가능성과 회복탄력성에 대한 논의로 점차 확장되고 있다. 특히 강화학습, 딥러닝, 데이터 기반 최적화 기법은 불확실성이 높은 물류 환경에서 의사결정의 유연성을 제고하는 핵심 수단으로 활용되고 있다. 이러한 연구를 바탕으로 본장에서는 이론적 시사점을 도출하고자 한다.

4.1 시사점

본 연구는 지속가능 물류에서의 인공지능 활용을 네 가지 응용 분야(유통 관리 및 라스트마일 배송, 창고 및 재고 운영 최적화, 역물류 및 폐기물 관리, 디지털 전환)로 구분하여 문헌을 분석하였다. 문헌

연구 결과, 4가지 지속가능 물류에서의 인공지능 분야는 공통적으로 인공지능을 불확실성 하의 의사결정을 지원하는 핵심 메커니즘으로 활용한다. 하지만 세부적으로 각기 다른 운영 상황과 목적으로 인공지능을 물류 운영에 적용하는 방향이 서로 상이하였다.

먼저, 유통 관리 및 라스트마일 배송 분야에서는 인공지능이 실시간 경로 조정, 차량 재배치, 수요 변동 대응과 같은 동적 의사결정을 가능하게 함으로써 비용과 서비스 수준 간의 전통적 상충 관계를 완화하는 역할을 수행한다. 강화학습과 딥러닝 기반 접근은 불확실한 교통 상황과 주문 변동성 하에서도 운영 성과를 안정적으로 개선하는 수단으로 활용되고 있었으며, 이 과정에서 주행 거리 감소, 배송 지연 완화, 에너지 효율 개선과 같은 지속가능성 효과가 함께 논의되고 있다.

반면 창고 및 재고 운영 최적화 분야에서는 예측과 제어를 결합한 인공지능 활용이 두드러졌다. 수요예측 정확도 향상은 재고 과잉과 결품을 동시에 완화하였으며, 강화학습 기반 정책 학습은 복잡한 제약 조건과 변동성을 고려한 적응형 재고 운영을 가능하게 하였다. 특히 창고 자동화, 로봇틱스, 엣지 컴퓨팅과 결합된 인공지능 활용은 불필요한 이동과 에너지 소비, 폐기물 발생을 줄이는 방향으로 확장되고 있다.

역물류 및 폐기물 관리 분야에서는 인공지능이 회수 네트워크 설계, 반품 예측, 수거 경로 최적화 등 순환경제 관점의 운영 문제를 해결하는 핵심 도구로 활용되고 있다. 기존 비용 중심의 역물류 연구와 달리, 최근 문헌은 회수율 제고, 매립 감소, 자원 재활용 촉진 등 환경적 성과를 함께 고려하는 방향으로 확장되고 있음을 확인하였다.

마지막으로 디지털 전환 분야에서는 블록체인, 사물인터넷, 디지털 트윈이 인공지능 활용을 가능하게

하는 데이터 인프라로 기능하고 있다. 이들 기술은 물류 전 과정의 투명성과 추적성을 제고하고, 실시간 데이터 기반 의사결정을 가능하게 함으로써 운영 리스크를 완화하고 지속가능성 목표 달성을 지원한다. 특히 디지털 트윈은 시뮬레이션 기반 검증을 통해 물류 시스템의 회복탄력성과 안정성을 강화하는 수단으로 제시되고 있다. 종합하면, 기존 문헌에서 인공지능은 단순한 자동화 도구가 아니라 지속가능 물류 성과를 구현하기 위한 의사결정 메커니즘으로 점차 자리 잡고 있으며, 효율성과 지속가능성을 동시에 개선할 수 있음을 확인할 수 있다.

4.2 향후 연구 방향

본 연구의 문헌고찰 결과는 지속가능 물류 분야에서 인공지능 활용 연구가 빠르게 축적되고 있음에도 불구하고, 여전히 몇 가지 중요한 연구 공백이 존재함을 시사한다. 다수의 선행연구는 인공지능 도입을 통한 운영 효율성 개선 효과를 중심으로 성과를 분석해 왔으며, 지속가능성 성과는 비용 절감의 부수적 결과로 제한적으로 논의되는 경향이 강하다. 이에 따라 향후 연구에서는 인공지능 활용이 효율성 성과를 넘어 지속가능성 성과로 연결되는 구체적인 메커니즘을 보다 명시적으로 규명할 필요가 있다. 특히 수요예측 정확도 향상, 경로 최적화, 재고 정책 개선과 같은 효율성 지표가 어떠한 경로를 통해 탄소 배출 저감, 폐기물 감소, 자원 활용 효율성 제고로 전환되는지에 대한 통합적 분석이 요구된다.

또한 본 연구에서 확인한 바와 같이, 인공지능은 물류 의사결정 과정에서 예측 단계, 계획 및 최적화 보조 단계, 실시간 제어 단계 등 서로 다른 수준에서 활용되고 있으나, 이러한 활용 방식의 차이가 성과에 미치는 영향을 체계적으로 비교한 연구는 상대적

으로 부족하다. 많은 문헌이 특정 알고리즘이나 문제 유형에 초점을 맞추고 있어, 인공지능이 기존 물류 의사결정 구조를 보완하는 도구로 기능하는지, 혹은 의사결정 체계 자체를 재편하는 역할을 수행하는지에 대한 일반화된 논의에는 한계가 존재한다. 향후 연구에서는 인공지능의 개입 수준과 역할을 기준으로 기존 연구를 재분류하고, 각 활용 방식이 효율성과 지속가능성 성과에 어떠한 차별적 영향을 미치는지를 비교 분석할 필요가 있다. 이러한 연구적 공백을 인공지능 응용 분야별 살펴보면 아래와 같다.

(1) 유통 관리 및 라스트마일 배송 분야에서 다수의 연구를 통해 강화학습과 딥러닝 기반의 동적 의사결정이 배송 시간 단축과 서비스 수준 개선에 기여하는 것으로 확인되었다. 하지만, 이러한 개선이 실제로 에너지 소비 감소나 탄소 배출 저감과 같은 환경적 성과로 이어지는지에 대해서 보다 정밀한 기준을 세우고 분석해야 한다. 이를 위해 향후 연구에서는 결과에 영향을 주는 운영 환경(도시 밀도, 주문 변동성, 운송 수단의 특성 등)의 차이를 고려하여, 동적 라우팅과 실시간 경로 조정이 지속가능성 측면에서 가지는 순효과를 분석하는 접근이 필요할 것이다.

(2) 창고 및 재고 운영 최적화 분야에서는 예측과 제어를 결합한 인공지능 활용이 재고 과잉과 결품을 완화하고 운영 효율성을 제고하는 것으로 나타났으나, 자동화 설비와 로봇틱스, 엣지 컴퓨팅의 확산이 에너지 소비와 환경 부담에 미치는 영향은 상대적으로 충분히 논의되지 않았다. 이에 따라 향후 연구에서는 수요예측 정확도, 재고 정책 학습, 자동화 수준이 폐기물 발생과 에너지 사용에 어떠한 영향을 미치는지 어떤 프로세스에 영향을 미치는지 통합적으

로 평가해야 한다. 이를 통해, 창고 운영의 지속가능성을 보다 입체적으로 분석할 필요가 있다.

(3) 역물류 및 폐기물 관리 분야의 경우, 최근 연구들은 회수 네트워크 설계와 반품 예측을 통해 경제성과 환경 성과를 동시에 고려하는 방향으로 확장되고 있으나, 순환경제 성과를 측정하는 지표의 통합과 비교는 여전히 제한적이다. 향후 연구에서는 비용과 거리 중심의 전통적 지표를 넘어 직접적으로 순환경제 성과를 나타내는 회수율, 재활용률, 매립 감소 등 다차원적 평가 기준을 적용하고, 예측 기반 의사결정과 운영 최적화가 이러한 성과에 어떠한 영향을 미치는지를 체계적으로 분석할 필요가 있다.

(4) 마지막으로 디지털 전환 분야 다수의 연구에서 블록체인, 사물인터넷, 디지털 트윈과 같은 기술이 인공지능 활용을 가능하게 하는 데이터 인프라로 기능하고 있음을 밝혔으나, 데이터 품질, 표준화 수준, 이해관계자 간 정보 공유 범위와 같은 조건이 지속가능성 성과에 미치는 영향은 상대적으로 충분히 규명되지 않았다. 향후 연구에서는 인공지능 알고리즘 자체의 성능뿐만 아니라, 이를 뒷받침하는 데이터 인프라의 특성이 물류 시스템의 지속가능성과 회복탄력성에 어떠한 제약과 가능성을 제공하는지를 분석함으로써, 기술 통합 관점에서의 지속가능 물류 연구를 확장할 수 있을 것이다.

또한 향후 연구에서는 개별 기업이나 단일 운영 단계에 국한된 분석을 넘어, 공급망 또는 물류 시스템 전체 차원에서 인공지능 활용의 효과를 평가하는 접근이 요구된다. 기존 문헌의 상당수는 특정 기업, 특정 의사결정 단계, 또는 개별 운영 성과를 중심으로 분석을 수행하고 있어, 인공지능 도입이 공급망 전반의 물류 흐름과 지속가능성 성과에 미치는 파급

효과를 충분히 포착하지 못하는 한계가 존재한다. 예를 들어, 라스트마일 배송에서의 경로 최적화나 재고 선배치 전략이 개별 기업의 비용과 서비스 수준을 개선하더라도, 공급망 전체 또는 도시 물류 시스템 차원에서는 교통 혼잡, 에너지 수요 집중, 외부 불경제를 유발할 가능성도 존재한다. 이에 따라 향후 연구에서는 복수의 주체와 단계가 상호작용하는 공급망 구조를 고려하여, 인공지능 기반 의사결정이 시스템 전반의 효율성과 환경적, 사회적 지속가능성에 어떠한 균형 효과를 가져오는지를 분석할 필요가 있다.

마지막으로, 한·중·미 최신사례 분석 결과에서도 알 수 있듯이 인공지능의 효과는 개별 알고리즘의 성능보다 데이터 인프라의 성숙도와 조직 간 연계 방식에 따라 크게 달라지는 것으로 나타났다. 따라서, 물류 개별 영역의 최적화를 넘어 공급망 전체 시스템 차원의 접근을 통해 지속가능 물류 전략의 실질적 효과를 평가하고 정책적, 전략적 시사점을 도출하는 데 중요한 기여를 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 김경미, "1조 들인 '신선식품 배송' 혁명...롯데쇼핑 승부수 통할까," **중앙일보**,
<https://www.joongang.co.kr/article/25360250>, 2025년 9월 접속.
- (Kim, K. M., "The 1-Trillion-Won Revolution in Fresh Food Delivery: Will Lotte Shopping's Bet Pay Off?" *JoongAng Ilbo*,
<https://www.joongang.co.kr/article/25360250>, retrieved September 2025.)
- 김수욱(2004), "기업성과향상을 위한 공급체인통합의 전

- 략적 역할에 관한 연구,” **경영학연구**, 제33권 2호, pp.631-653.
- (Kim, S. W. (2004), “The Role of Supply Chain Integration for Firm Performance Improvement,” *Korea Management Review*, 33(2), pp.631-653.)
- 김초연, 하병천, 김수효(2025), “동적역량과 공급사슬관리에 대한 실증연구,” **경영학연구**, 제54권 3호, pp.601-618.
- (Kim, C., Ha, B. C. and Kim, S. (2025), “An Empirical Study of Dynamic Capabilities and Enhancing Supply Chain Management,” *Korea Management Review*, 54(3), pp.601-618.)
- 박동휘, “쿠팡 혁신 시즌2는 로봇…현금 구조원 쏟아붓는다,” **한국경제**,
<https://www.hankyung.com/article/20221102281>, 2025년 8월 접속.
- (Park, D. H., “Coupang Innovation Season 2: Robots and Billions of Won in Cash Investment,” *Korea Economic Daily*,
<https://www.hankyung.com/article/20221102281>, retrieved August 2025.)
- 박선희, “AGV 1000대가 제품 운반… 소팅봇은 분류작업 딱딱,” **동아일보**,
<https://www.donga.com/news/Economy/article/all/20230207/117781524/1>, 2025년 9월 접속.
- (Park, S. H., “1,000 AGVs Handle Product Transport While Sorting Bots Streamline Classification,” *Dong-A Ilbo*,
<https://www.donga.com/news/Economy/article/all/20230207/117781524/1>, retrieved September 2025.)
- 서월, 최현도(2025), “디지털 기술 지향성이 기업 국제화 성과에 미치는 영향: 인공지능, 블록체인, 클라우드 컴퓨팅, 빅데이터, 디지털 기술응용을 중심으로,” **경영학연구**, 제54권 2호, pp.307-324.
- (Xu, Y. and Choi, H. (2025), “The Impact of Digital Technology Orientation on Firms’ Internationalization Outcomes: A Focus on Artificial Intelligence, Blockchain, Cloud Computing, Big Data and Digital Technology Application,” *Korea Management Review*, 54(2), pp.307-324.)
- 윤다빈, “롯데쇼핑-오카도 맞손… ‘온라인 식품시장 게임 체인저 될것’,” **동아일보**,
<https://www.donga.com/news/Economy/article/all/20221101/116270964/1>, 2025년 8월 접속.
- (Yoon, D. B., “Lotte Shopping Partners with Ocado: ‘A Game Changer for the Online Grocery Market’,” *Dong-A Ilbo*,
<https://www.donga.com/news/Economy/article/all/20221101/116270964/1>, retrieved August 2025.)
- 정재환, “쿠팡, 2025 물류산업대전 참가… AI 기반 물류 시스템 공개,” **조선비즈**,
<https://biz.chosun.com/distribution/channel/2025/04/23/NKG3EHJF4VFXRPWF4SDTMGXV2U/>, 2025년 9월 접속.
- (Jung, J. H., “Coupang Participates in 2025 Logistics Industry Expo… Unveils AI- Based Logistics System,” *Chosun Biz*,
<https://biz.chosun.com/distribution/channel/2025/04/23/NKG3EHJF4VFXRPWF4SDTMGXV2U/>, retrieved September 2025.)
- 차준호, “CJ대한통운, 네이버와 손잡고 군포·용인 풀필먼트 센터 오픈 [마켓인사이트],” **한국경제**,
<https://www.hankyung.com/article/202106218494i>, 2025년 8월 접속.
- (Cha, J. H., “CJ Logistics Partners with Naver to Open Fulfillment Centers in Gunpo and Yongin [Market Insight],” *Korea Economic Daily*,
<https://www.hankyung.com/article/202106218494i>, retrieved August 2025.)

- 6218494i, retrieved August 2025.)
- Coupang, "쿠팡을 움직이는 WMS 물류 기술의 비밀," 쿠팡 뉴스룸, <https://news.coupang.com/archives/18754/>, 2025년 8월 접속.
- (Coupang, "The Secret Behind Coupang's WMS Logistics Technology," Coupang Newsroom, <https://news.coupang.com/archives/18754/>, retrieved August 2025.)
- 홍다영, "[ESG 리포트] 프레시백으로 年 1억개 스티로폼 절약... 라이언 쿠팡 부사장 '친환경 투자 지속,' **조선비즈**, <https://biz.chosun.com/distribution/channel/2022/02/11/CMBUOWS4HJBD7HV4LCLKM4SWNA/>, 2025년 9월 접속.
- (Hong, D. Y., "[ESG Report] Freshbag Saves 100 Million Styrofoam Boxes a Year... Coupang VP Ryan: 'Sustainable Green Investment Will Continue,'" Chosun Biz, <https://biz.chosun.com/distribution/channel/2022/02/11/CMBUOWS4HJBD7HV4LCLKM4SWNA/>, retrieved September 2025.)
- Abdallah, M., Abu Talib, M., Feroz, S., Nasir, Q., Abdalla, H., and Mahfood, B. (2020), "Artificial intelligence applications in solid waste management: A systematic research review," *Waste Management*, 109, pp.231-246.
- Abduljabbar, R., Dia, H., Liyanage, S., and Bagloee, S. A. (2019), "Applications of artificial intelligence in transport: An overview," *Sustainability*, 11(1), pp.1-189.
- Adi, T. N., Bae, H. Y., and Iskandar, D. P. (2020), "Interterminal truck routing optimization using deep reinforcement learning," *Sensors*, 20(20), 5794.
- Adulyasak, Y., Benomar, O., Chaouachi, A., Cohen, M. C., and Khern-Am-Nuai, W. (2024), "Using AI to detect panic buying and improve products distribution amid pandemic," *AI & Society*, 39(4), pp.2099-2128.
- Ahi, P., and Searcy, C. (2013), "A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management," *Journal of Cleaner Production*, 52, pp. 329-341.
- Amazon, "How Amazon Is Using AI to Innovate for Customers," Amazon, <https://www.aboutamazon.com/news/operations/amazon-ai-innovations-delivery-forecasting-robotics>, retrieved September 2025.
- Aslam, J., Lai, K.-H., Kim, Y. B., and Treiblmaier, H. (2024), "The implications of blockchain for logistics operations and sustainability," *Journal of Innovation & Knowledge*, 9(4), 100611.
- Babae Tirkolaee, E., Abbasian, P., Soltani, M., and Ghaffarian, S. A. (2019), "Developing an applied algorithm for multi-trip vehicle routing problem with time windows in urban waste collection: A case study," *Waste Management & Research*, 37, pp.4-13.
- Badakhshan, E., and Ball, P. (2022), "Applying digital twins for inventory and cash management in supply chains under physical and financial disruptions," *International Journal of Production Research*, 61(15), pp.5094-5116.
- Bergsma, R., de Ruijt, C., and Bhulai, S. (2025), "A systematic review of machine learning approaches in inventory control optimization," *Operations Research Perspectives*, 15, 100367.
- Bhattacharya, S., Govindan, K., Ghosh Dastidar, S., and 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.
- Bogyrbayeva, A., Meraliyev, M., Mustakhov, T., and Dauletbayev, B. (2024), "Machine learning to solve vehicle routing problems: A survey," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(6), pp.4754-4772.
- Bruni, M. E., Fadda, E., Fedorov, S., and Perboli, G. (2023), "A machine learning optimization approach for last-mile delivery and third-party logistics," *Computers & Operations Research*, 157, 106262.
- Burgos, D., and Ivanov, D. (2021), "Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 152, 102412.
- Burinskienė, A., Lorenc, A., and Lerher, T. (2018), "A simulation study for the sustainability and reduction of waste in warehouse logistics," *International Journal of Simulation Modelling*, 17(3), pp.485-497.
- Caminiti, S. "How Walmart Is Using A.I. to Make Shopping Better for Its Millions of Customers," CNBC, <https://www.cnbc.com/2023/03/27/how-walmart-is-using-ai-to-make-shopping-better.html>, retrieved August 2025.
- Chen, Y., Yuan, B., Zhou, Y., Chen, Y., and Hu, H. (2024), "Smart parcel consolidation at Cainiao," *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 54(5), pp.417-430.
- Cui, H., Rajagopalan, S., and Ward, A. R. (2020), "Predicting product return volume using machine learning methods," *European Journal of Operational Research*, 281(3), pp.612-627.
- Curry, R. "Walmart's Latest AI Innovations Represent a Shift for Big Retail," CNBC, <https://www.cnbc.com/2025/08/30/walmart-stores-ai-innovation-retail-shopping-shift.html>, retrieved September 2025.
- De Moor, B. J., Gijsbrechts, J., and Boute, R. N. (2022), "Reward shaping to improve the performance of deep reinforcement learning in perishable inventory management," *European Journal of Operational Research*, 301(2), pp.535-545.
- Deloitte. "2025 US Retail Industry Outlook," Deloitte Insights, <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/retail-distribution/retail-distribution-industry-outlook>, retrieved August 2025.
- Duong, Q. H., Zhou, L., Nguyen, T. V., and Meng, M. (2025), "Understanding and predicting online product return behavior: An interpretable machine learning approach," *International Journal of Production Economics*, 280, 109499.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., and Barlow, C. (2020), "Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research," *IEEE Access*, 8, pp. 108952-108971.
- Guerrero-Ibañez, J., Contreras-Castillo, J., and Zeadally, S. (2021), "Deep learning support for intelligent transportation systems," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32(3), e4169.
- Gutierrez-Franco, E., Mejia-Argueta, C., and Rabelo, L. (2021), "Data-driven methodology to support long-lasting logistics and decision making for urban last-mile operations,"

- Sustainability*, 13(11), 6230.
- Hall, C. "With Cainiao Buyback, Alibaba Takes Aim at Rivals' Overseas Advance," Reuters, <https://www.reuters.com/world/china/wit-h-cainiao-buyback-alibaba-takes-aim-rival-s-overseas-advance-2024-03-28/>, retrieved September 2025.
- Hou, Y., Wang, Q., Zhou, K., Zhang, L., and Tan, T. (2024), "Integrated machine learning methods with oversampling technique for regional suitability prediction of waste-to-energy incineration projects," *Waste Management*, 174, pp.251-262.
- Hu, H., Qi, Y., Lee, H. L., Shen, Z.-J. M., Liu, C., Zhu, W., and Kang, N. (2024), "Supercharged by advanced analytics, JD.com attains agility, resilience, and shared value across its supply chain," *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 54(1), pp.54-70.
- Huang, X., Ling, J., Yang, X., Zhang, X., and Yang, K. (2023), "Multi-agent mix hierarchical deep reinforcement learning for large-scale vehicle operations," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(12), pp.14294-14305.
- Idrissi, Z. K., Lachgar, M., and Hrimech, H. (2024), "Blockchain, IoT and AI in logistics and transportation: A systematic review," *Transport Economics and Management*, 2, pp.275-285.
- Iranmanesh, M., Maroufkhani, P., Asadi, S., Ghobakhloo, M., Dwivedi, Y. K., and Tseng, M.-L. (2023), "Effects of supply chain transparency, alignment, adaptability, and agility on blockchain adoption in supply chain among SMEs," *Computers & Industrial Engineering*, 176, 108931.
- Jauhar, S. K., Singh, A., Kamble, S., Tiwari, S., and Belhadi, A. (2024), "Reverse logistics for electric vehicles under uncertainty: An intelligent emergency management approach," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 192, 103806.
- JD.com. "JD.com's Drone Delivery Program Takes Flight in Rural China," JD.com Corporate Blog, <https://jdcorporatelog.com/jd-coms-drone-delivery-program-takes-flight-in-rural-china/>, retrieved August 2025.
- Jiang, F., Ma, X. Y., Zhang, Y. H., Wang, L., Cao, W. L., Li, J. X., and Tong, J. (2022), "A new form of deep learning in smart logistics with IoT environment," *The Journal of Supercomputing*, 78(9), pp.11873-11894.
- Jiang, Y., Yin, S., Li, K., Luo, H., and Kaynak, O. (2021), "Industrial applications of digital twins," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2207), 20200360.
- Kalinov, I., Petrovsky, A., Ilin, V., Pristanskiy, E., Kurenkov, M., Ramzhaev, V., Idrisov, I., and Tsetserukou, D. (2020), "WareVision: CNN barcode detection-based UAV trajectory optimization for autonomous warehouse stocktaking," *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), pp.6647-6653.
- Kapadia, S. "To Avoid Product Shortages, Big Retailers Are Scrapping Reactive Methods for AI," Business Insider, <https://www.businessinsider.com/walmart-target-use-ai-to-prevent-inventory-shortages-2025-6>, retrieved September 2025.
- Kegenbekov, Z., and Jackson, I. (2021), "Adaptive supply chain: Demand-supply synchronization using deep reinforcement learning," *Algorithms*, 14(8), 240.

- Koot, M., Mes, M. R. K., and Iacob, M. E. (2021), "A systematic literature review of supply chain decision making supported by the Internet of Things and Big Data Analytics," *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107076.
- Kück, M., and Freitag, M. (2021), "Forecasting of customer demands for production planning by local k-nearest neighbor models," *International Journal of Production Economics*, 231, 107837.
- Li, J.-Q., Wang, J.-D., Pan, Q.-K., Duan, P.-Y., Sang, H.-Y., Gao, K.-Z., and Xue, Y. (2017), "A hybrid artificial bee colony for optimizing a reverse logistics network system," *Soft Computing*, 21(20), pp.6001-6018.
- Li, M. Y., and Shih, F. Y. (2024), "Solving the green reverse logistics problem in e-commerce using a reinforcement learning based genetic algorithm," *Electronic Commerce Research and Applications*, 68, 101455.
- McKinnon, A., Browne, M., Whiteing, A., and Piecyk, M. (2015), *Green logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*, Kogan Page Publishers.
- Meisheri, H., Sultana, N. N., Baranwal, M., Baniwal, V., Nath, S., Verma, S., Ravindran, B., and Khadilkar, H. (2022), "Scalable multi-product inventory control with lead time constraints using reinforcement learning," *Neural Computing and Applications*, 34(3), pp.1735-1757.
- Mishra, R., Singh, R. K., Daim, T. U., Fosso Wamba, S., and Song, M. (2024), "Integrated usage of artificial intelligence, blockchain and the internet of things in logistics for decarbonization through paradox lens," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 189, 102780.
- Mo, B., Wang, Q., Guo, X., Winkenbach, M., and Zhao, J. (2023), "Predicting drivers' route trajectories in last-mile delivery using a pair-wise attention-based pointer neural network," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 175, 103168.
- Nasereddin, A. (2024), "A comprehensive survey of contemporary supply chain management practices in charting the digital age revolution," *Uncertain Supply Chain Management*, 12(2), pp.1331-1352.
- Niu, B., Dong, J., and Liu, Y. (2021), "Incentive alignment for blockchain adoption in medicine supply chains," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 152, 102276.
- Oliveira Neto, G. C. de, Silva, R. N. B. da, Lima, G. A., Araújo, S. A. de, Belan, P. A., Carvalho, D., and Almeida, C. M. V. B. (2025), "Artificial intelligence-based optimization of the WEEE reverse chain in São Paulo - Brazil to promote economic, environmental and social benefits," *Journal of Cleaner Production*, 521, 146073.
- Padakandla, S. (2021), "A survey of reinforcement learning algorithms for dynamically varying environments," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(6), pp.1-25.
- Pagell, M., and Wu, Z. (2009), "Building a more complete theory of sustainable supply chain management using case studies of 10 exemplars," *Journal of Supply Chain Management*, 45(2), pp.37-56.
- Pan, W., and Liu, S. Q. (2022), "Deep rein-

- forcement learning for the dynamic and uncertain vehicle routing problem," *Applied Intelligence*, 53(1), pp.405-422.
- Panzer, M., and Gronau, N. (2024), "Designing an adaptive and deep learning-based control framework for modular production systems," *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35, pp.4113-4136.
- Priore, P., Ponte, B., Rosillo, R., and de la Fuente, D. (2019), "Applying machine learning to the dynamic selection of replenishment policies in fast-changing supply chain environments," *International Journal of Production Research*, 57(11), pp.3663-3677.
- Puskás, E., Budai, Á., and Bohács, G. (2020), "Optimization of a physical internet-based supply chain using reinforcement learning," *European Transport Research Review*, 12(1), pp.1-47.
- Qadir, Z., Ullah, F., Munawar, H. S., and Al-Turjman, F. (2021), "Addressing disasters in smart cities through UAVs path planning and 5G communications: A systematic review," *Computer Communications*, 168, pp.114-135.
- Qin, H., Xiao, J., Ge, D., Xin, L., Gao, J., He, S., Hu, H., and Carlsson, J. G. (2022), "JD.com: Operations research algorithms drive intelligent warehouse robots to work," *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 52(1), pp.42-55.
- Rızvanoğlu, O., Kaya, S., Ulukavak, M., and Yeşilnacar, M. İ. (2019), "Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes, through linear programming and geographic information system: a case study from Şanlıurfa, Turkey," *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1), pp.1-9.
- Savic, M., Lukic, M., Danilovic, D., Bodroski, Z., Bajovic, D., Mezei, I., Vukobratovic, D., Skrbic, S., and Jakovetic, D. (2021), "Deep learning anomaly detection for cellular IoT with applications in smart logistics," *IEEE Access*, 9, pp.59406-59419.
- Silitonga, D., Rohmayanti, S. A. A., Aripin, Z., Kuswandi, D., and Sulisty, A. B. (2024), "Edge computing in e-commerce business: Economic impacts and advantages of scalable information systems," *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*, 11(1), 4375.
- Silva, M., Pedroso, J. P., and Viana, A. (2023), "Deep reinforcement learning for stochastic last-mile delivery with crowdshipping," *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 12(1), 100105.
- Target. "On Target: Inside Our Stores-as-Hubs Strategy," Target Corporate, <https://corporate.target.com/news-feature/s/article/2023/09/stores-as-hubs-strategy>, retrieved August 2025.
- Tarasov, K. "Amazon Is Using Generative AI to Drive More Same-Day Deliveries Using Smarter Robots and Better Routes," CNBC, <https://www.cnbc.com/2024/09/17/how-amazon-is-using-generative-ai-to-drive-more-same-day-deliveries.html>, retrieved September 2025.
- Tarighat, N., Cohen, M. C., and Clark, J. J. (2025), "Domain adaptation for retail demand prediction," *IEEE Access*, 13, pp.146267-146294.
- Tran-Dang, H., Krommenacker, N., Charpentier, P., and Kim, D. S. (2022), "The Internet of

- Things for logistics: Perspectives, application review, and challenges,” *IETE Technical Review*, 39(1), pp.93-121.
- Tsolakis, N., Zissis, D., Papaefthimiou, S., and Korfiatis, N. (2022), “Towards AI-driven environmental sustainability: an application of automated logistics in container port terminals,” *International Journal of Production Research*, 60(14), pp.4508-4528.
- Wang, X., Zhang, L., Wang, L., Ruiz Zúñiga, E., Wang, X. V., and Flores-García, E. (2025), “Dynamic multi-tour order picking in an automotive-part warehouse based on attention-aware deep reinforcement learning,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 94, 102959.
- Wong, L. W., Leong, L. Y., Hew, J. J., Tan, G. W. H., and Ooi, K. B. (2020), “Time to seize the digital evolution: Adoption of blockchain in operations and supply chain management among Malaysian SMEs,” *International Journal of Information Management*, 52, 101997.
- Xu, W. “Role of digitalization in business grows,” *China Daily*, <https://www.chinadaily.com.cn/a/202405/15/WS66440924a31082fc043c71f3.html>, retrieved August 2025.
- Yang, W., Xie, Q., and Li, M. (2018), “Inventory control method of reverse logistics for shipping electronic commerce based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm,” *Journal of Coastal Research*, 83, pp.786-790.
- Zhang, A., Venkatesh, V. G., Liu, Y., Wan, M., Qu, T., and Huisingh, D. (2019), “Barriers to smart waste management for a circular economy in China,” *Journal of Cleaner Production*, 240, 118198.

-
- 저자 권용우는 서울대학교 경영대학 생산서비스운영 전공 박사과정에 재학 중이다. 학사는 경영학, 석사는 응용시스템 학위를 취득하였다. 주요 관심 분야는 데이터 기반 실증분석을 통해 지속가능경영 및 ESG 경영성과를 측정 및 분석하는 것이다.
 - 저자 정교준은 현재 서울대학교 경영대학 생산서비스운영 전공 석사과정에 재학 중이다. 중국 칭화대학교에서 자동차공학을 전공하였으며, 공학 학사를 취득하였다. 학사 학위 취득 이후에는 현대자동차 그룹사 모트라스에서 품질관리 매니저로 근무하였으며, 이후 서울대학교 일반경영대학원에 입학하게 되었다. 주요 연구 분야는 강화학습을 이용한 재고 최적화, 최적화 모델링 등이다.
 - 저자 최전영은 현재 서울대학교 경영대학 생산서비스운영 석사과정에 재학 중이다. 경영학 학사를 취득하였다. 주요 연구분야는 플랫폼, 이커머스 물류 유통, 신선식품 물류 등이다.
 - 임재현 교수는 서울대학교 경영대학 생산서비스운영 분야에 재직 중이다. 연세대학교 산업공학과를 졸업하고, 미국 노스웨스턴대학교에서 산업경영공학으로 석사 및 박사 학위를 취득하였다. 이후 미국 일리노이대학교 어바나-샴페인(UIUC) 경영대학에서 8년간 교수로 재직하였으며, 현재는 서울대학교에서 교육과 연구를 수행하고 있다. 주요 연구 분야는 물류·유통 및 공급사슬망 최적화, 지속가능 ESG 운영관리, 녹색기술 정책 등이다.