

ISSN 2765-2351

# 물류 과학 기술 연구

Journal of Logistics Science & Technology

2023년 6월 4권 1호

THE SOCIETY OF LOGISTICS  
SCIENCE AND TECHNOLOGY

# 물류과학기술연구

Journal of Logistics Science & Technology

제 4권 제 1호

2023년 06월

## 목 차

1. 버퍼 활용 무작위 빈 패킹 문제를 위한 강화학습-휴리스틱 결합 모델

김민지, 이강훈, 장병탁 / 1

2. 도시물류 시스템 운영 시나리오 검증을 위한 EFFBD(Enhanced Functional Flow Block Diagram) 기반 모델 개발

채우리, 황재민, 이재덕, 장경호, 김주욱 / 19

3. 지역경제파급효과 분석을 통한도시철도 공동물류 플랫폼 실용화 방안 연구

홍수민, 윤희성, 장경호, 황선우, 김영민 / 41

4. 도시철도 차량을 활용한 지하물류 운영개념 기반비상대응 메뉴얼 개발에 관한 연구

김명성, 김영민 / 57

5. V2V(Vehicle to Vehicle) 집화 및 배송체계의 간선차량 순환노선 설정문제

정동진, 이기주, 채준재 / 71

# 버퍼 활용 무작위 빈 패킹 문제를 위한 강화학습-휴리스틱 결합 모델

김민지<sup>1</sup>, 이강훈<sup>2</sup>, 장병탁<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3</sup>투모로 로보틱스

<sup>1,3</sup>서울대학교 컴퓨터공학부

<sup>2,3</sup>서울대학교 협동과정 인공지능전공

## Reinforcement Learning with Heuristics for Buffer-Utilized Random Bin Packing Problem

Minji Kim<sup>1</sup>, Ganghun Lee<sup>2</sup>, Byoung-Tak Zhang<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3</sup>Tommoro Robotics

<sup>1,3</sup>Department of Computer Science and Engineering, Seoul National University

<sup>2,3</sup>Interdisciplinary Program in Artificial Intelligence, Seoul National University

In this paper, we propose a reinforcement learning algorithm combined with heuristics to solve the bin packing problem (BPP) where the objects are randomly given and once placed objects cannot be moved, but the small load buffer can be utilized. This setting resembles the loading problem which has not been resolved despite of logistics automation. Since heuristics can be rapidly optimized by human intuition, and reinforcement learning is highly responsive to the environment, the combined method is highly available in the real-world industries. When the model learned through reinforcement learning determines the optimal object among the new object and objects in the buffer, then defined heuristics find optimal position and orientation for placement of the selected object. Through experiments, we verified the effectiveness by comparing the loading efficiency between the heuristic-only system and the combined system presented in this study.

**Keywords:** Buffer-utilized bin packing, Reinforcement learning, Heuristics, Value estimation, Uncertainty handling

---

논문접수일 : 2022.10.09.    논문수정일 : 2023.05.23.    게재확정일 : 2023.06.01.

1. 서울대학교 컴퓨터공학부 박사과정, 투모로 로보틱스 연구원

2. 서울대학교 협동과정 인공지능전공 박사과정, 투모로 로보틱스 연구원

3\*. 서울대학교 컴퓨터공학부 교수, 서울대학교 AI 연구원 원장, 투모로 로보틱스 CEO, Corresponding Author: btzhang@bi.snu.ac.kr

## 1. 서론

1인 가구의 증가와 베이비붐 세대의 온라인 시장 진입은 상황에 따라 물건을 구매하는 소비 트렌드로 변화를 이끌었다. 이에 따른 다양한 이커머스(e-commerce)의 등장은 온라인에서 구매할 수 있는 상품군의 확대에 이어서 택배 물동량 증가의 주요한 원인이 되었다. 코로나19의 여파로 인한 봉쇄와 함께 택배 물류량이 정체될 것이라는 전망과 다르게, 물류 산업은 팬데믹 이전보다 성장한 실적을 보여주었다. 한국통합물류협회에서 발표한 통계에 의하면, 2021년 기준 총 택배 물량은 약 36억 2천만 개로 2020년에 비해 7.59% 성장했고, 코로나 이전인 2018년 기준으로는 25억 4천만 개에 비해서는 42.59%로 크게 증가하였다. 이러한 성장률은 코로나 팬데믹의 여파로 온라인 쇼핑과 모바일 쇼핑 시장의 확대에 기인한 것으로 볼 수 있다. 물건의 종류에 상관없이, 1~2일과 같은 짧은 기간 만에 소비자에게 배달되는 '도어 투 도어(door to door)' 배송 시스템을 기반으로 물류 산업은 다양한 비대면 문화의 기반이 되었다. 비대면 문화는 사람들의 생활 방식에 큰 변화를 불러일으켰다. 식료품 및 생필품을 애플리케이션을 이용해 주문하기 시작하면서 비대면 문화에서의 스마트 물류는 향상된 편리성을 넘어 삶을 유지할 수 있는 도구로 자리 잡았다. 이처럼 크게 향상된 주문량과 물동량 처리를 위해 물류 산업은 발전된 정보통신 기술(ICT)과 인공지능(AI)을 활용한 스마트 물류에 집중하였다.

다수의 물류 기업들은 스마트 물류를 위한 자동화 설비 인프라 구축을 위해 로봇과 인공지능을 도입하는 등 투자를 아끼지 않고 있다. 쿠팡의 물류 센터는 사람과 로봇의 협업에 집중했다. 개인에게 지급되는 PDA를 통해 가장 효율적인 동선을 제공해주고, 모바일 로봇을 통한 물건 운반을 통해 자동화를 이용한 생산성 향상을 이뤄냈다(쿠팡, 2022). CJ대한통운은 Technology, Engineering, System & Solution(TES) 기반의 물류 자동화 센터 구축을 통해 반복 작업을 AMR로 대체하여 인력을 효율적으로 분배할 수 있었고, 송장 인식 및 '오분류 관리 시스템' 등 높은 정확도를 가진 설비를 활용했다(CJ대한통운, 2021).

물류 전반의 과정에서 자동화가 이뤄졌음에도 불구하고, 물류 트럭에 상자를 올리거나 내리는 상하차는 다양한 물류 작업 중에서도 대표적으로 자동화가 더딘 부분이다. 이는 차량에 따른 자동화 구축 설비 구현이 힘들고, 변화하는 환경에서 다양한 규격의 물건을 사람처럼 빠르고 효율적으로 다루기 어렵기 때문이다. 그래도 하차의 경우는 보스턴 다이내믹스의 스트래치와 피클 로봇의 딜 등이 인공지능과 결합하여 적재함에 쌓인 상자들을 컨테이너 벨트 위에 빠르게 올려놓을 수 있도록 개발을 시도한 사례가 있다(김정은, 2022; 장길수, 2021). 반면 상차는 컨베이어 벨트를 타고 무작위로 접근하는 상자들에 순간적으로 대응해야 하므로 하차보다 더 난도가 높고 사람의 생산성을 따라가지 못하고 있다. 상차와 하차의 차이점은 물체 인식이 아닌, 적재 위치의 적절성에 대한 파악이다. 하차는 물체 파지 후 컨베이어 벨트에 올리는 것이라면, 상차는 동적으로 들어오는 물체들을 순간적으로 파악해서, 최대한의 적재 효율을 살리는 것이 중요하다. 컨베이어 벨트 위로 순차적으로 들어오는 임의의 물건들의 대기열을 보고, 가장 먼저 오는 물건을 두는 것이 아니라 무겁거나 큰 물건을 우선순위에 둔다거나, 빈 곳에 알맞은 크기의 물건을 따로 빼두는 등의 문제들은 자동화를 어렵게 한다. 단순 생산성을 떠나, 업무 난이도와 산재율이 높은 상차는 자동화를 이용해 해결해야 할 중요한 문제이다.



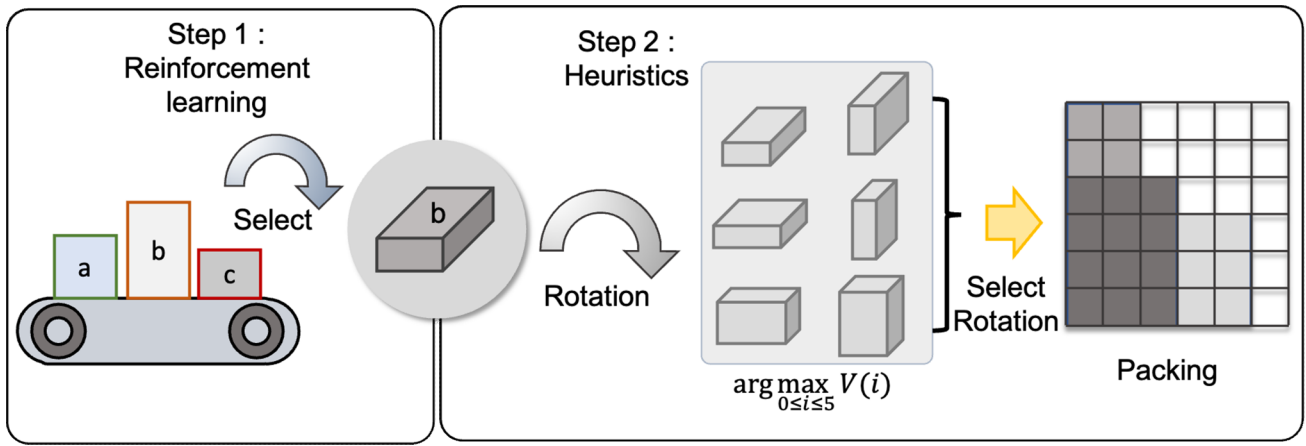


Figure 1. Reinforcement learning with heuristics  
for buffer-utilized random bin packing problem model overview

상차 문제는 고정 컨테이너 안에 최대한 많은 물건을 효율적으로 적재해야 하므로 고전적인 최적화 문제인 BPP(Bin Packing Problem)로 볼 수 있다(Benkö et al., 2010). 적재할 영역의 크기, 적재할 물체들의 조건이 다양하므로, BPP는 최적화의 관점에서 여전히 어려운 과제이다. 직육면체의 물체를 다루는 3D-BPP는 여러 분야에서 다양한 휴리스틱(heuristics)을 이용한 조건부 설정으로 해답을 찾기도 하였으며, 학습을 이용하여 최적화를 시도하기도 하였다. 휴리스틱을 사용하면 특정 조건에서 빠른 해답을 찾을 수 있지만, 물체나 환경의 조건이 변함에 따라 전체적인 조건 수정이 필요하다. 인공지능을 이용한 학습의 경우 환경 조건에 변화에 유의미한 대처가 가능하지만, 학습에 따른 시간 및 계산적 비용이 기하급수적으로 커지는 위험이 있으며 학습된 규칙은 수정될 수 없어 전체 시스템이 학습에 기반한다면 모듈화와 사용자 맞춤화가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 물류 환경과 같이 동적으로 들어오는 물건을 처리하는 3D-BPP 문제 해결을 위하여 휴리스틱과 강화학습을 결합한 해결책을 제시한다. 기존에 시도된 모든 경우를 시도 및 실패 경험으로 학습하는 강화학습과는 다르게 3D-BPP 학습과는 다르게 제안된 알고리즘은 휴리스틱과 함께 강화학습의 평가자의 가치 판단이라는 개념을 이용하여 문제를 해결하였다. Figure 1은 제안된 모델의 전체적인 모식도이다. 먼저 강화학습을 통해 가까운 미래에 조작할 물체 리스트 중 최적의 물체를 선택한다. 물체를 선택하고 나면, 물체의 가능한 6개의 방위 중 가장 높은 가치를 가지는 방위를 선택하여 물체를 적재한다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 BPP(Bin Packing Problem)

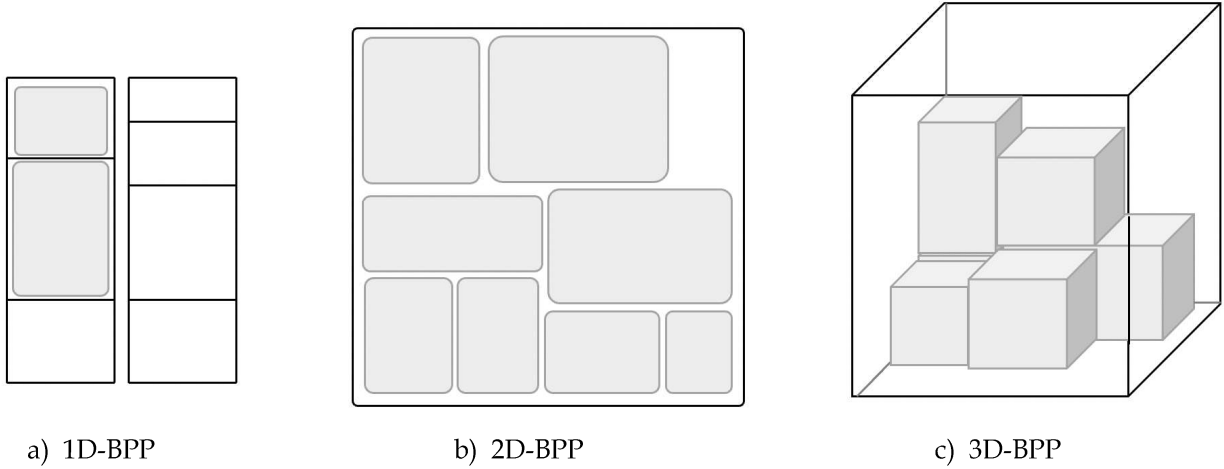


Figure 2. Examples of multi-dimension bin packing problem

1차원 BPP는 수식 1과 같이 정리될 수 있다. 주어진 물체들의 세트  $L = \{1, \dots, n\}$ 과 각 물체의 무게가  $w_i \in (0, 1)$ ,  $i \in L$  일 때, BPP에서는  $L$ 을 최소한의 적재 공간(Bin)  $B_1, B_2, \dots, B_m$ 에 넣을 수 있도록 한다.

$$\sum_{i \in B_j} w_i \leq 1, 1 \leq j \leq m \quad (1)$$

Figure 2는 차원에 따른 BPP의 예시를 보여준다. 차원이 높고, 영역이 넓을수록 BPP의 시간 복잡도는 크게 증가한다. BPP는 다항 시간 내에 완전한 해결책이 구할 수 없는 nondeterministic polynomial(NP)-hard 문제이다(Coffman et al., 1980). NP-hard 문제는 주로, 간단 추론 방식인 휴리스틱을 이용하여 빠른 최적해 근사를 이용한다. Johnson(1973)은 오프라인 휴리스틱을 이용한 BPP의 여러 방법론을 소개했다. 오프라인 휴리스틱은 적재 공간(bin) 안에 물체가 들어갈 공간이 있으면 배치하고, 들어가지 않으면 새로운 적재 공간을 열어 둔다는 기본적인 조건에 기반한다. 간단한 조건으로 보이지만, 적재 위치를 선택하는 기준에 따라 다양한 알고리즘들이 파생되었다. Best-fit(BF) 알고리즘은 적재 영역의 처음부터 끝까지 탐색하여 최적의 위치에 배치하고, first-fit(FF) 알고리즘은 탐색 중 첫 번째로 발견된 배치 가능 구역에 적재한다. 가장 대중적인 next-fit(NF) 알고리즘은 마지막 적재 위치로부터 적재 위치를 파악한다. 직관적으로는 BF가 가장 좋은 성능을 보일 것 같지만, BF의 높은 시간 복잡도 때문에 고차원의 문제에서는 선호되지 않는다. 반복적인 탐색 작업에서 나아가 Karmarkar and Karp(1982)에서는 오프라인으로 모든 물체를 적재 가능한 공간으로 정렬하여 배치하는 탐욕 정책들을 기반으로 최적해를 제시하였다.

1D-BPP와는 다르게 2D 및 3D-BPP에서는 고려해야 할 요소들이 추가된다. 다양한 규격의 물체들이 적재되면서 생기는 단차에 따른 물체의 기울어짐에 대해 생각해야 할 3D-BPP는 문제의 난이도가 크게 향상된다. 이 점에서 상차 시에 들어오는 물체들을 보고 가장 최적의 물체를 배치하는 직관이 필요하다. 3D BPP의 경우 마찬가지로 휴리스틱으로의 접근이 시도되었다(Gupta et al., 2017). Lodi et al.(2001)은 tabu search를 이용한 휴리스틱 해결책을 제시하였다. Edelkam et al.(2014)에서는 정확성과 랜덤 샘플링의 일반성을 결합한 최근 제안된 탐색 방법인 monte carlo tree search(MCTS)를 통해 기존 local search와 같은 반복적인 개선 알고리즘과 차별점을 가지는 동시에 시간 복잡도를 낮출 수 있었다(Browne et al., 2012). 앞선 선행 연구들은 BPP 최적화가 용이한 방식을 찾아 탐색했지만, 실제 물류 환경에서의 적용에서는 의도된

정도의 성능 기대하기 어렵다. 휴리스틱은 빠른 최적화에 이점을 가지는 건 분명하지만, 실제 물류 환경에 적용해야 하는 예측할 수 없는 미래의 대기열들까지 고려하긴 어렵기 때문이다. 더불어 물체 하나당 발생할 수 있는 모든 방위 상태의 고려 또한 계산 복잡도가 너무 높아져 학습 성능을 저해한다. 본 연구에서는 휴리스틱의 빠른 최적화에 대한 장점을 유지하면서 환경 대응성에 대한 한계를 극복하기 위해 강화학습과의 결합을 시도하였다.

## 2.2 Deep Reinforcement Learning(DRL)

심층 강화학습은 최근 다양한 문제의 해결책으로 활발히 적용이 이뤄지고 있는 연구 분야이다. 기존 인공지능은 정답이 주어진 상태에서 학습하는 지도 학습(supervised Learning)과 정답이 주어지지 않은 상태에서 비슷한 입력의 군집을 형성하도록 하는 비지도 학습(unsupervised Learning)이 주를 이루었다. 강화학습은 이들과 다르게 시행착오를 거치며 환경(environment)과 에이전트(agent)의 상호작용을 통해 받는 보상의 최대화를 추구하는 학습법이다(Arulkumaran et al. 2017; François-Lavet et al., 2018). 수학적 계산을 위해 필요한 개념이 Markov Decision Process(MDP)이다. MDP는  $(S, A, P, R, \gamma)$ 로 정의되며,  $S$ 는 가능한 상태(state)들의 집합과 상태 이행 확률(probability)의  $P$ 로 이루어진 Markov Process(MP)가 확장된 형태이다. 보상(Reward)  $R$ 과 감가율(discount factor)  $\gamma$ 를 통하여 행동(Action)  $a \in A$ 에 대한 가치를 학습한다(Puterman, 1990). 수식 2는 감가율이 적용된 보상의 총합을 보여준다. 감가율이 없다면 가까운 시간 안에 받는 작은 보상에 치중할 수 있기 때문에, 먼 미래까지의 보상을 고려할 수 있도록 감가율을 적용해주는 것이다. 순차적 결정 문제(sequential decision problem)의 경우 기대되는 가치에 대한 계산이 가능하다. 벨만 기대 방정식(the bellman equation)은 현재 상태의 가치함수와 다음 상태의 가치함수 사이의 관계를 식으로 나타낸다(수식 3). 가치함수는 가능한 행동들의 영향을 받아 변하는 상태에 기반하기 때문에 상태 이행 확률에 따라 계산되는 것을 알 수 있다(Li, 2017).

$$R_t = \sum_{t'=t}^T \gamma^{t'-t} r_{t'} \quad (2)$$

$$v(s) = R(s) + \gamma \max_{a \in A(s)} \sum_{s'} P(s'|s, a) v(s') \quad (3)$$

강화학습은 격자구조와 같은 간단한 환경에서부터, 복잡하고 연속적인 환경으로 확장되었다. 게임 환경을 넘어서, 실제 환경의 로봇 작업에 적용되고 있다(Johannink et al., 2019; Ibarz et al., 2021). 강화학습의 로봇 태스크 성공률이 증가함에 따라 물류 환경의 로봇 투입이 촉발되고 있다(Lobbezoo et al., 2021). Iriondo et al.(2019)에서는 물류 환경에서 모바일 로봇을 이용한 조작 태스크를 강화학습으로 해결하였으며, Yang et al.(2020)은 다중 로봇들의 경로 최적화 문제를 해결하였다. 하차에 대한 로봇 적용은 이뤄졌지만, 상차에 대한 로봇 적용이 미비한 이유는 크게 두 가지로 볼 수 있다. 움직이는 물체를 파지하는 것과 어떤 물건을 어디에 적재할지에 대한 유연한 사고를 기대할 수 없기 때문이다. 이러한 이유로 기존 휴리스틱에 강화학습을 결합한 연구들이 진행되고 있다(Cai et al., 2019). Hu et al.(2017)에서는 강화학습을 이용한 3D-BPP 연구가 이루어졌다. 해당 연구에서는 강화학습을 통해 적재할 위치를 학습하고 그에 따른 결과를 학습하였지만, 앞서 설정한 복잡한 환경의 BPP가 아닌 단순화된 형태의 BPP를 다룬다. Zhao et al.(2022) 또한 단순 3D-BPP를 문제를 다루었으나, feasibility 마스크를 통해 불가능한 행동을 고려하여 성능을 향상시켰다. 본 논문에서는 기존 3D-BPP 문제를 임의의 물체를 적재해야 하는 물류 환경에서의 상차 자동화를 위한 buffer-utilized BPP로 심화하고, 강화학습과 휴리스틱이 결합된 형태의 해결 모델을 제시한다.

### 3. 문제 정의 및 해결법

본 연구에서는 기존 BPP의 기본 전제와 물류 환경에 변동적 조건을 함께 결합한다. 기존 3D-BPP의 기본 전제와 같이 임의의 크기를 가진 직육면체 모양의 물체들이 제한된 영역에 최대한 많이 적재하는 것을 목표로 한다. 이때 물류 환경의 상차 환경은 컨테이너에서 적재할 물체들이 무작위의 크기로 연속적으로 배치되므로, 이를 반영하여 본 연구 환경에서도 물체에 대한 정보는 배치되기 이전에는 미리 알 수 없다. 또한, 상차 시에는 물체를 빠른 속도로 적재해야 하므로 한 번 배치된 물체를 다시 조작하기 어렵다. 이를 반영하여 본 연구 환경에서도 한 번 배치한 물체는 움직일 수 없다. 다만 현재 상태에서 적재가 어려운 물체가 배치되었을 때 숙련자가 잠시 그 짐을 치워두고 다음 물체를 우선 적재하는 것처럼, 작은 크기의 버퍼를 활용하여 무작위의 물체에 다소 대응할 수 있도록 하였다. 이때 해당 버퍼를 활용하여 버퍼의 물체와 새로 배치된 물체 중 적재할 물체를 선택하는 주체는 강화학습으로 학습할 모델이며, 선택된 모델은 휴리스틱에 의해 최적 방향과 위치를 고려하여 물체가 기울지 않도록 배치된다.

#### 3.1 휴리스틱

본 논문에서 제안하는 방법에서 사용되는 휴리스틱 알고리즘은 직접 고안한 알고리즘으로, 사용자의 다양한 의도에 따른 휴리스틱 3D-BPP 중 하나의 종류로 고려할 수 있다. 본 논문에서는 depth map을 구할 수 있는 환경을 가정한다. Depth map은 Figure 3과 같이 적재 공간의 지면에 대하여 수직으로 발사된 광선에 의해 얻어진 톱뷰(Top-view) 형식의 이미지이다. 음영은 물체가 놓인 부분이며 음영이 진할수록 depth가 낮다(높이가 높다). 알고리즘 적재 공간의 가로, 세로, 높이를 각각  $W, H, D$ , 적재 공간의 기본 위치를 0, 탐색 간격(window size)을  $\omega$ , depth map을 구하기 위한 광선의 간격과 발사되는 광선 시작점의 높이를 각각  $r_g, r_h$ , depth map을 양자화할 단위를  $z_g$ , 그리고 대상 지역의 평평함을 결정할 문턱 비율을  $\rho$ 라 하면 논문에서 제안하는 동적 휴리스틱 적재 알고리즘은 Algorithm 1과 같다(각 값과 관련한 도식은 Figure 4와 Figure 5를 참조한다).

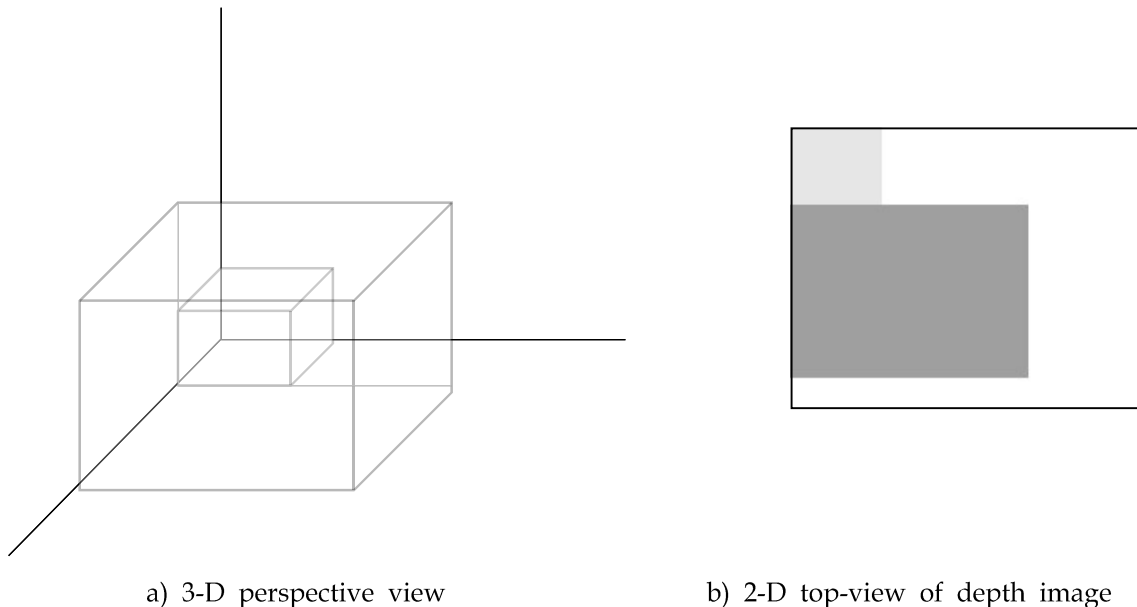


Figure 3. Two objects placed on the plane

초기 적재 공간은 비어있는 상태에서 적재를 시작하며, 매 순간 미리 알 수 없는 크기  $w, h, d$ 의 물체가 주어지면 6가지의 물체 방향에 따른 각각의 최적 적재 위치를 구한 후 그중 다음 depth map의 표준편차를 최소화할 물체 방향 및 최적 적재 위치에 따라 적재한다. 만약 어떤 물체 방향에서도 최적 위치가 구해지

지 않는 경우 적재 공간이 가득 찬 것으로 간주한다. 하나의 물체 방향에 대한 최적 위치를 구할 때는, Figure 5와 같이 주어진 탐색 간격에 따라 대상 위치를 움직이면서 모든 대상 위치에 대한 적재 가능 여부를 판단한다. 이때 적재 가능 여부는 적재 대상 높이 공간이 충분한가와 바닥 면이 평평한지에 따라 결정한다. 만약 적재할 물체가 차지할 대상 공간에 대한 depth map을  $z_g$ 를 단위로 양자화한 뒤 최빈값의 비율이  $\rho$  이상일 경우 평평하다고 간주한다. 단, 평평하더라도 최빈값이 최솟값(depth의 최솟값은 곧 높이의 최댓값을 의미한다)이 아니라면 오목한 부분이 평평한 것이므로 적재 불가능하다고 판단한다. 한 방향에 대하여 적재 가능하다고 판단된 모든 적재 위치가 모이면 그중 가장 기본 위치 0과 가까운 물체를 해당 방향에 대한 최적 위치로 간주한다. Figure 6은 고안된 휴리스틱을 사용하여 적재하는 예이다.

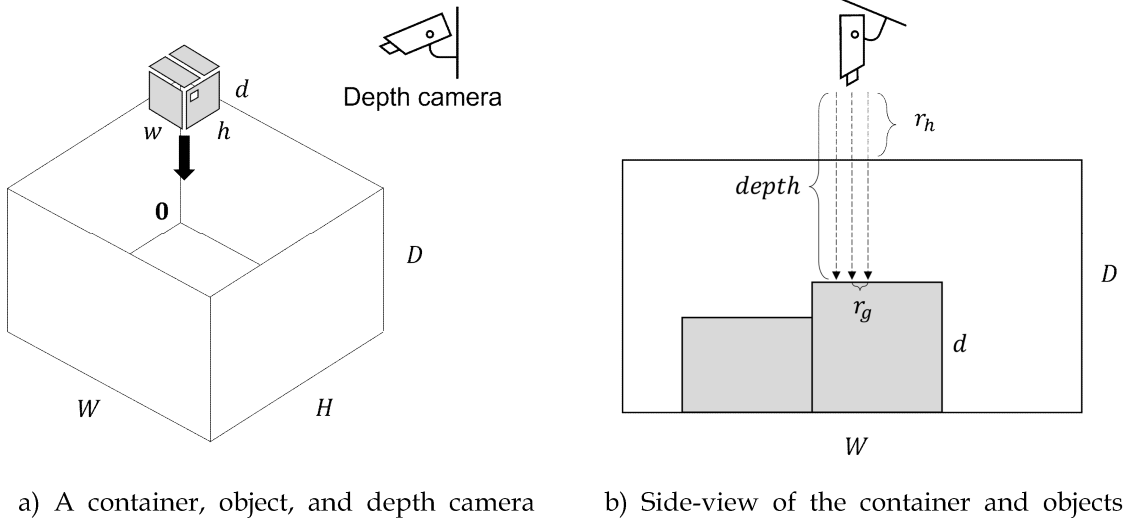


Figure 4. The container and objects

(dotted lines denote the orthogonal rays to obtain a depth image)

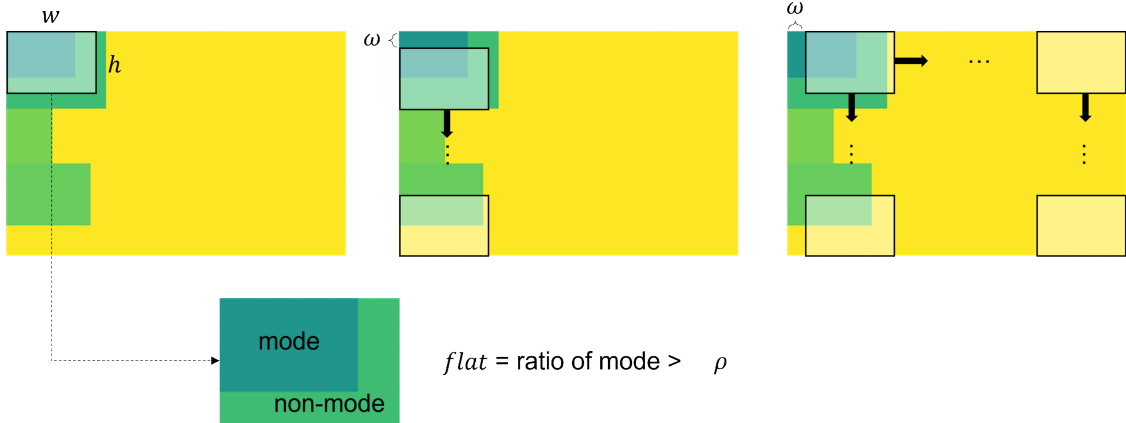


Figure 5. An example of sliding window for the proposed heuristic algorithm for dynamic bin packing

---

**Algorithm 1:** Heuristic Algorithm for Dynamic Bin Packing

---

**Input:**  $W, H, D, \mathbf{0}, \omega, r_g, r_h, z_g, \rho$   
generate grid positions  $\mathcal{G}$  with window size  $\omega$ ;  
 $l \leftarrow 0$ ;  
**while not full do**  
    capture depth map  $\mathcal{M}_t(W, H, \mathbf{0})$ ;  
    get next object of size  $w, h, d$ ;  
    define list of global position candidates  $\mathcal{C}$ ;  
    // consider 6 orientations  
    **for**  $obj \in \{(w, h, d), (w, d, h), (h, w, d), (h, d, w), (d, w, h), (d, h, w)\}$  **do**  
        define list of local position candidates  $\mathcal{C}_{obj}$ ;  
        // apply sliding window  
        **for**  $\mathbf{p} \in \mathcal{G}$  **do**  
            get depth map for target region  $\mathcal{M}_t(w, h, \mathbf{p})$ ;  
            // find z limit violence of target region  
             $z_{max} \leftarrow D - (\min(\mathcal{M}_t(w, h, \mathbf{p})) - r_h)$ ;  
             $overz \leftarrow z_{max} + d > D$ ;  
            // find flatness of target region  
            quantize  $\mathcal{M}_t(w, h, \mathbf{p})$  by  $z_g$ ;  
             $m \leftarrow mode(\mathcal{M}_t(w, h, \mathbf{p}))$ ;  
             $flat \leftarrow ratio(m, \mathcal{M}_t(w, h, \mathbf{p})) \geq \rho$ ;  
            // find if the mode value expresses highest z  
             $highest \leftarrow m$  equal to  $\min(\mathcal{M}_t(w, h, \mathbf{p}))$ ;  
            // add acceptable position candidate  
             $accept \leftarrow \text{not } overz \text{ and } flat \text{ and } highest$ ;  
            **if**  $accept$  **then**  
                simulate next depth map  $\mathcal{M}'_{t+1}(W, H, \mathbf{0})$ ;  
                 $s_{\mathbf{p}} \leftarrow std(\mathcal{M}'_{t+1}(W, H, \mathbf{0}))$ ;  
                add  $(\mathbf{p}, s_{\mathbf{p}})$  to  $\mathcal{C}_{obj}$ ;  
            **end**  
        **end**  
         $(\mathbf{p}_{obj}^*, s_{\mathbf{p}_{obj}}^*) \leftarrow (\mathbf{p}, s_{\mathbf{p}}) \in \mathcal{C}_{obj}$  which has minimum  $distance(\mathbf{p}, \mathbf{0})$ ;  
        add  $(\mathbf{p}_{obj}^*, s_{\mathbf{p}_{obj}}^*, obj)$  to  $\mathcal{C}$ ;  
    **end**  
     $(\mathbf{p}^*, obj^*) \leftarrow (\mathbf{p}, obj)$  in  $(\mathbf{p}, s_{\mathbf{p}}, obj) \in \mathcal{C}$  which has minimum  $s_{\mathbf{p}}$ ;  
    **if**  $\mathcal{C}$  is empty **then**  
        |  $full \leftarrow True$   
    **else**  
        | place object at position  $\mathbf{p}^*$  with orientation  $obj^*$ ;  
        |  $l \leftarrow l + 1$ ;  
    **end**  
**end**

---

Algorithm 1. Proposed heuristic algorithm for dynamic bin packing



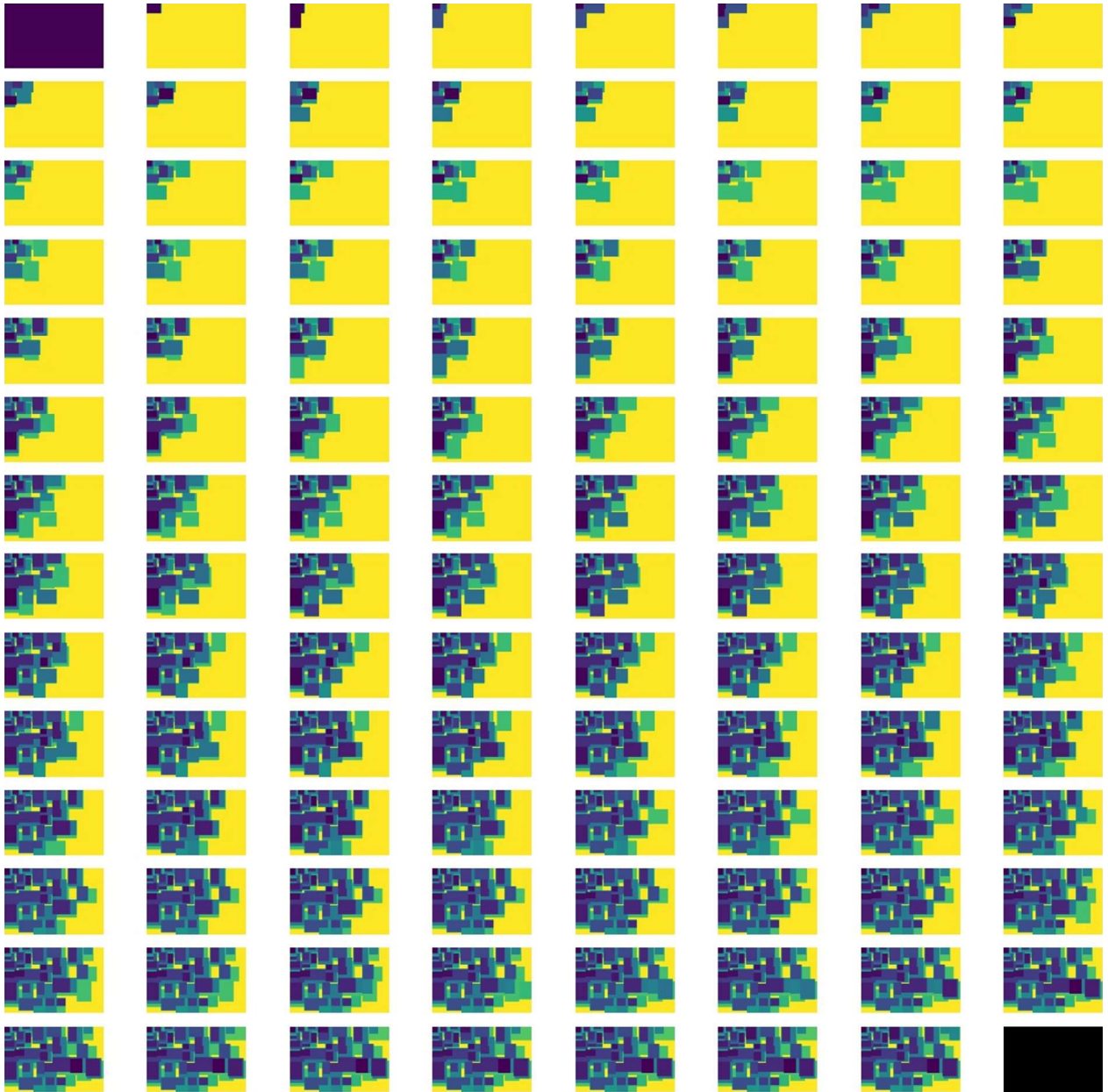


Figure 6. An example of packing sequence using proposed heuristic algorithm

### 3.2 강화학습과 휴리스틱을 융합한 버퍼 활용 동적 적재

실제로 동적 적재 작업을 수행할 때 상기한 휴리스틱 알고리즘을 직접 사용할 수 있지만, 적재 상태의 빈 곳과 배정된 물체의 크기 차이가 매우 큰 경우 배정된 물체를 처리하기 곤란할 수 있다. 이런 경우 배정된 물체를 하나씩 즉시 처리하는 것보다, 적은 수의 배정된 물체를 임시공간(버퍼)에 저장한 뒤 새로 배정받은 물체와 버퍼에 저장된 물체 중 하나를 선택하여 적재하는 것이 더 유연한 적재방식이다. 다만 주어진 적재 상태에서 최적의 물체를 선택하는 것은, 미래에 어떤 물체가 배정될지 알 수 없으므로 휴리스틱으로 설계하기 까다롭다. 이런 문제는 휴리스틱을 통한 설계 대신 경험적인 방법을 사용하여 접근할 수 있다. 2장 2절에서 서술했듯이 강화학습은 주어진 환경 내에서 여러 번의 경험을 통해 상태와 행동에 대한 가치를 일반화하여 최종 보상을 최대화하도록 행동을 학습하는 경험적 방법으로, 최적의 버퍼 활용을 위해 활용될 수 있다. 제안하는 방법은 강화학습의 개념을 통해 학습된 물체 선택자와 휴리스틱으로 설계된 물체 적재자를 활용하여 동적 적재 작업을 자동화하고 최적의 버퍼 활용을 통해 적재 효율을 증가시킨다.

---

**Algorithm 2: Training Critic with Heuristic**

---

```
Input:  $V_\phi, heu, \mathcal{R}, \gamma, \eta$ 
while training do
    // gather heuristic experience
    while not full do
        capture depth map  $\mathcal{M}$  and object size  $w, h, d$ ;
        set current state  $s = \{\mathcal{M}, w, h, d\}$ ;
        get heuristic action  $a = heu(s)$ ;
        set reward  $r = w \times h \times d$ ;
        capture next depth map  $\mathcal{M}'$  and object size  $w', h', d'$ ;
        set next state  $s' = \{\mathcal{M}', w', h', d'\}$ ;
        store transition  $\{s, a, r, s'\}$  to rollout  $\mathcal{R}$ 
    end
    // train critic  $V_\phi$  from heuristic experience
    Compute target value  $r + \gamma V_\phi(s')$  from  $\mathcal{R}$ ;
    Evaluate advantage  $A(s, a) = r + \gamma V_\phi(s') - V_\phi(s)$ ;
     $\phi \leftarrow \phi + \eta \nabla_\phi A(s, a)$ ;
end
```

---

Algorithm 2. Training critic with heuristic

제안하는 방법에서의 강화학습 방법은 전통적인 방법과 조금의 차이가 있다. 전통적인 강화학습에서는 일반적으로 상태를 관찰하고 행동을 결정하는 행위자(Actor), 그리고 상태를 관찰하고(또는 상태와 행동을 관찰하고) 그 가치를 결정하는 평가자(Critic)의 두 개체를 학습 대상으로 구성한다(Grondman et al., 2012). 그러나 Figure 7과 같이 제안하는 방법에서 학습하는 대상은 평가자뿐이며, 행위자는 없다. 평가자는 설계된 휴리스틱이 버퍼가 없는 적재 작업을 수행하는 동안 주어지는 상태와 보상을 관찰하고 상태에 따른 미래 가치를 추정하도록 학습한다. 이때 상태는 해당 순간의 depth map 및 해당 순간에서 배치된 물체의 크기  $w, h, d$ 이다. 보상은 배치된 물체의 부피  $w * h * d$ 이다. 단, 물류 환경에서는 안쪽부터 바깥쪽으로 쌓아가는 방식을 선호하므로 특별히 적재 공간 내부에 우선순위를 부여하였다. 현재 적재한 위치 우선순위가 이전에 적재한 위치 우선순위보다 높으면 부피 보상을 제공하고, 그렇지 않으면 보상을 제공하지 않는다. 에피소드는 더 이상 배치된 물체를 적재할 수 없을 때 종료된다. 따라서 에피소드가 종료될 때까지 받은 보상이 클수록 더 많은 부피의 물체를 적재한 것이다.

위의 시나리오를 통해 평가자가 충분히 학습되었다면, 평가자는 적재 상태를 나타내는 depth map과 그때 배치된 물체를 관찰하고 에피소드 종료까지 받을 보상에 대한 적절한 예측값을 출력할 수 있다. 만일 평가자에게 같은 depth map에 대해 다른 물체를 대입하여 예측값을 출력하도록 한다면 적재할 물체에 따른 미래의 가치를 비교할 수 있으며, 미래의 가치를 가장 크게 하는 물체를 선택하게 한다면 버퍼를 활용하는 적재 작업에서 최적의 물체를 선택하도록 응용할 수 있다. Figure 8은 학습된 평가자를 버퍼 활용 동적 적재 시나리오에 사용하는 예를 도식화하여 나타낸 것이다. 평가자가 버퍼 안에 들어있는 물체들 중 휴리스틱에 따라 배치할 경우의 가치를 예측하고, 잠재 가치가 가장 높은 물체를 적재하는 과정이 나타나 있다. Algorithm 2는 평가자를 휴리스틱을 이용하여 학습하는 방법에 대해 의사코드로 나타낸 것이다.



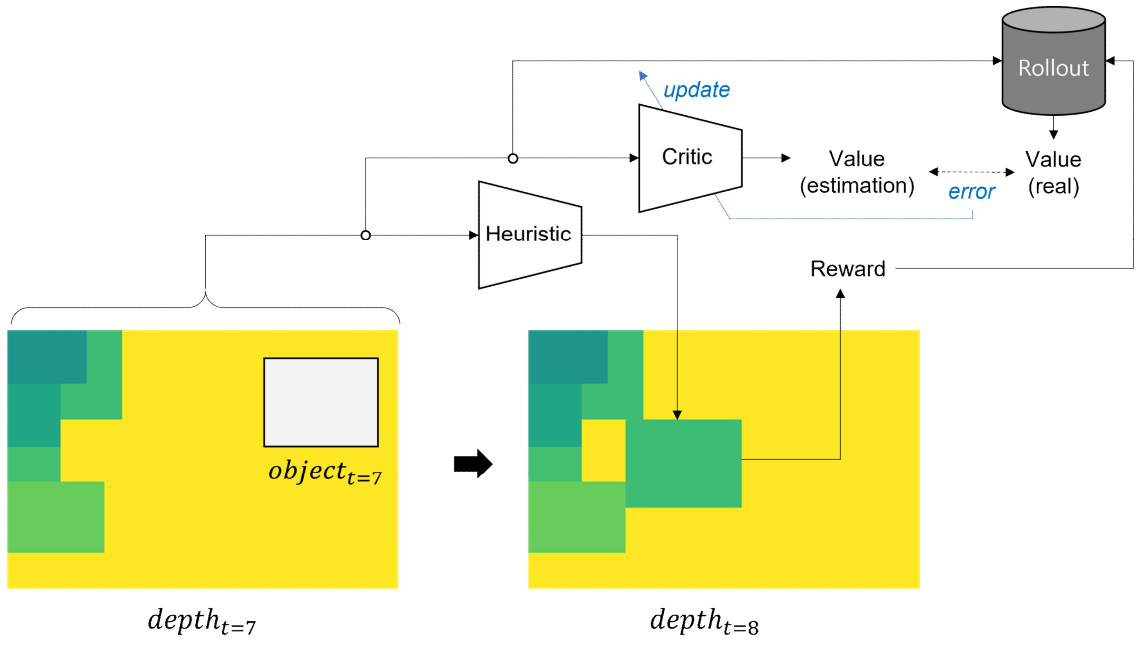


Figure 7. Training critic to estimate future value when depth and object size are given.  
The critic is trained by reinforcement learning algorithm

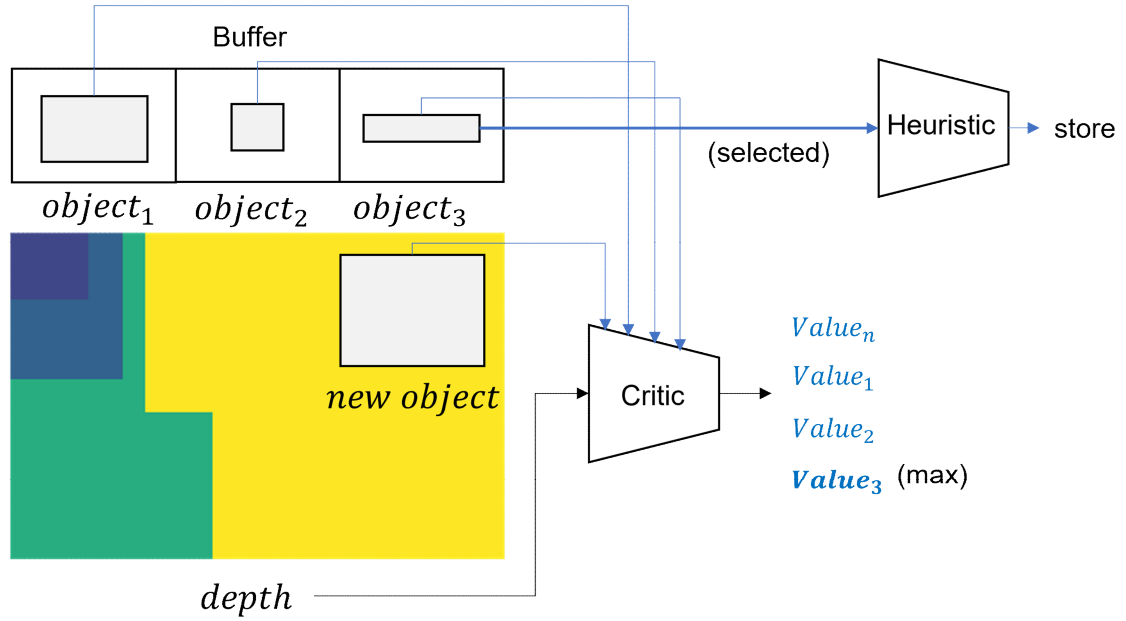


Figure 8. Using trained critic to select optimal object among objects in the buffer and newly given object. Heuristic will select the object which has maximum estimated value from critic, and place the object with predefined algorithm

#### 4. 실험

제시한 방법의 효용을 검증하기 위해 적재 공간의 크기를 ( $W=0.4, H=0.7, D=0.5$ ), ( $W=0.4, H=0.7, D=1.0$ ), ( $W=0.6, H=0.9, D=0.6$ )의 3가지로 다양화하고, 각 적재 공간에서의 환경 및 휴리스틱 설정값은 탐색 간격  $\omega=0.02$ , 광선 간격  $r_g=0.02$ , 광선 높이  $r_h=2$ , depth map 양자화 단위  $z_g=0.02$ , 평평함 문턱 비율  $\rho=0.9$ 로 설정하였다. 학습 시 매 순간 주어지는 물체의 크기는  $w, h, d$  각각 범위  $[0.06, 0.14]$  내의 0.02배수 크기로 무작위로 주어지도록 하였다. 강화학습 알고리즘으로는 proximal policy optimization(PPO) (Schulman et al., 2017)를 참조하였다. 모든 실험은 Python을 이용해 구축된 시뮬레이션 환경에서 수행되었다.

평가자의 학습에 따른 주요 실험 결과를 도출하기 위해 20번의 에피소드 학습마다 1번의 평가를 수행하였다. 학습 시에는 버퍼 없이 휴리스틱만으로 에피소드를 진행하지만, 평가 방식은 앞 장에서 서술한 바와 같이 매 평가 단계까지 학습된 평가자를 통해 버퍼 활용 적재를 수행한다. 이때의 버퍼 크기는 3으로 설정하였다. 따라서 평가 단계에서는 매 순간 버퍼에 담긴 물체 3개와 새로 배정된 물체 1개의 총 4개의 물체 중 평가자가 가장 고평가하는 물체를 적재할 물체로 선택한다. 1번의 평가에는 5번의 에피소드가 진행하고 그 결과의 평균으로 평가 결과를 도출하였다. 실험에서 주목해야 할 점은 같은 에피소드에 대하여 버퍼를 사용하지 않았을 때보다 학습된 평가자와 함께 버퍼를 사용하였을 때 에피소드 보상의 증분이다. 따라서 후자의 값에서 전자의 값을 뺀 값을 ‘개선된 에피소드 보상’으로 정의하고 해당 값을 평가 결과값으로 도출하였다.

Figure 9의 그래프는 각 적재 공간 크기에 따라 학습 중 평가된 개선된 에피소드 보상을 나타낸 것이다. 학습 초기에는 평가자가 올바르게 가치를 추정하지 못하여 버퍼를 사용하는 것이 사용하지 않는 것과 큰 차이를 보이지 않지만, 점차 학습이 진행됨에 따라 버퍼와 평가자를 사용할 때 개선된 누적 보상이 상승하는 경향을 보인다. 각 그래프 하단부의 그림은 해당 학습 부근의 최종 depth image 예시를 나타낸 것이다. 학습이 진행됨에 따라 점차 높은 밀도를 보이는 최종 depth image는 평가자의 학습이 진행될수록 버퍼를 더욱 잘 활용하여 적재 공간을 더 효율적으로 사용하고 있음을 나타낸다.

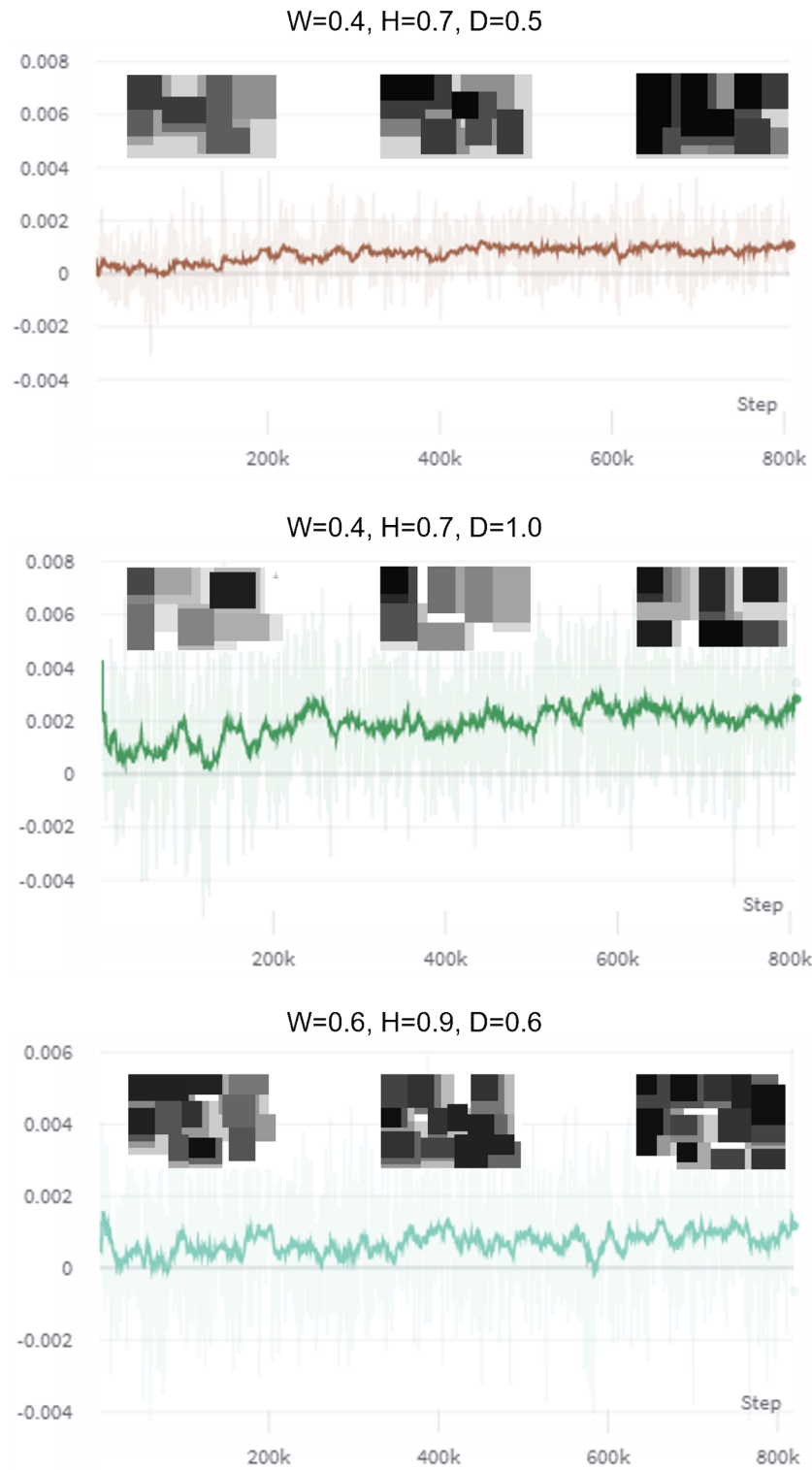


Figure 9. Improved episode reward and final depth images according to the training steps. As improved episode reward grows, the final depth images are getting more dense result

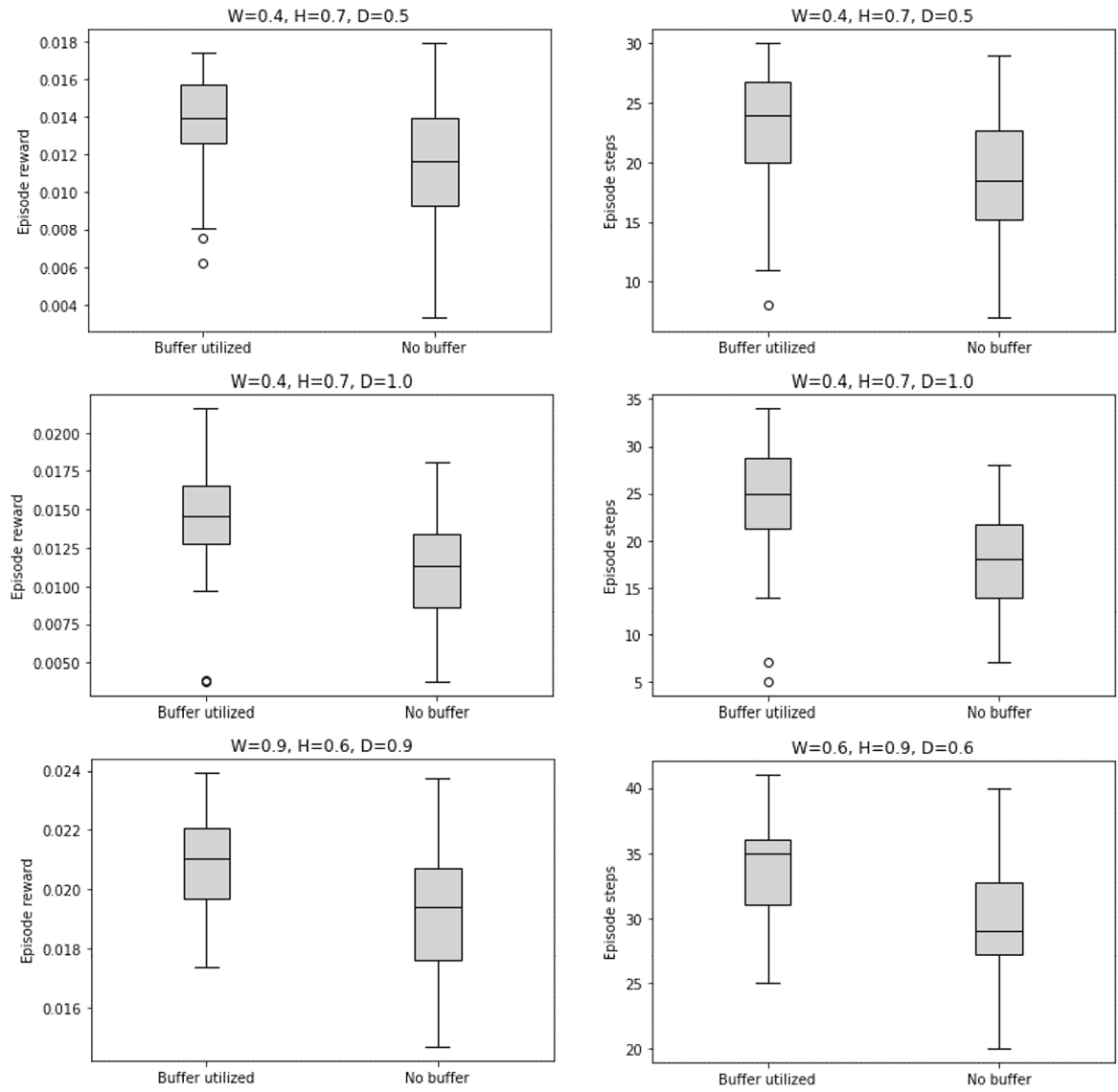


Figure 10. Box plots of episode rewards and episode steps(placed objects + 1) for different container sizes. All results indicate that buffer-utilized with trained critic performed bin packing more efficiently than without buffer

Figure 10은 학습된 평가자와 버퍼를 활용하여 50 에피소드 수행한 결과와 버퍼 없이 휴리스틱만으로 50 에피소드 수행한 결과를 에피소드 보상 및 에피소드 스텝 수로 구분(열)하여 각 적재 공간 크기에 따라(행) 상자 수염 그래프로 비교한 것이다. 에피소드 보상은 최종 적재 부피를 나타내며, 에피소드 스텝 수는(적재한 물체 수 + 1)을 나타낸다. 그래프에서 볼 수 있듯이 학습된 평가자와 버퍼를 활용하였을 때의 최종 적재 부피 및 적재한 물체 수가 버퍼를 사용하지 않았을 때보다 유의미하게 상승하였다. 평가자와 버퍼를 활용한 50 에피소드 수행 결과와 버퍼를 사용하지 않은 50 에피소드 수행 결과는 같은 에피소드에서 각 경우에 대해 2회 수행되었으므로, 두 집단 간 차이의 통계적 유의미성을 확인하기 위해 대응표본 t-검정을 수행할 수 있다. 검정 결과  $W=0.4, H=0.7, D=0.5$ 에서의 에피소드 보상 및 에피소드 스텝 수에 대한 p-value는 각각 0.0007, 0.0002,  $W=0.4, H=0.7, D=1.0$ 에서의 p-value는 최소 단위 이하로 0에 근사한 서로 다른 값 0.0000, 0.0000, 그리고  $W=0.6, H=0.9, D=0.6$ 에서의 p-value는 각각 0.0001, 0.0000(근사치)으로 세 적재 공간 크기의 경우 모두에 대해서 평가자와 버퍼를 활용한 집단과 버퍼를 활용하지 않은 집단의 에피소드 보상 및 에피소드 스텝 수는 통계적으로 매우 유의미한 차이를 보였다. 따라서 제안된 방법을 통해 학습한 critic은 다양한 적재 공간에 대하여 휴리스틱과 함께 버퍼를 효율적으로 활용하여 BPP 수행 능력의 품질을 개선한다고 볼 수 있다.

## 5. 결론

실험을 통해 본 논문에서 제안한 방법이 실제로 버퍼 활용을 통해 적재 효율을 개선할 수 있음을 보였다. 근래 딥러닝 기술의 발달로 물류 자동화가 가속화되고 있지만, 실적용 시에는 학습한 규칙을 수정하기 어려운 딥러닝의 특성 때문에 딥러닝만을 이용하여 물류 자동화를 수행하는 데에는 한계가 있다. 사람의 직관이 반영된 휴리스틱은 실적용 시 수정이 쉽더라도, 정해진 규칙 외의 상태에는 유의미한 선택을 하지 못한다는 한계점을 가진다. 본 논문에서는 딥러닝의 특성을 가지는 강화학습과 사용자 맞춤화가 쉬운 휴리스틱 방법을 적절히 융합한 방법으로, 물류 자동화를 위한 하나의 현실적인 방안을 제시하였다.

해당 모델은 버퍼 내의 적재할 물건 및 새로 배정된 물체 중 어떤 물건을 적재해야 휴리스틱이 더 높은 효율을 가져올 수 있을지 추론한다. 휴리스틱에서는 기존의 연구들과 다르게 적재할 물건의 방위를 고려한다는 점에서 차별점을 가진다. 실제 물류 환경 적용에 의의를 두어, 물체의 기울어짐에 대한 역치를 설정하여 현실적인 적재 환경을 고려할 수 있도록 하였다. 휴리스틱은 기존 환경에 최적화된 적재 결과를 유도할 수 있도록 설계되었기 때문에 성능 향상의 여지가 적다는 예측에도 불구하고, 다양한 실험 조건에서 향상된 생산성을 보여주었다. 그리고 구역화를 통해 적재 공간 안에 우선순위를 두어 적재함으로써 실제 작업 현장에 맞는 적재 형태를 유도할 수 있었다. 또한, 분할 구역 안에 작은 물체를 활용하여 더욱 많은 물건을 배치할 수 있었다는 긍정적인 효과 또한 실험을 통해 확인할 수 있었다.

상차 자동화 문제를 해결하기 위해 해결되어야 할 점이 아직 많지만, 본 논문에서는 기존의 BPP를 상차 환경에 대응하도록 고도화하였다는 의의가 있다. 또한, 고도화된 환경에서도 학습에 필요한 정보는 depth 정보뿐으로, 다수의 특수한 장비가 필요하지 않아 확장성이 좋다. 적재할 용량 설정과 적재 공간 내부의 depth 측정이 가능하다면, 파지 위치를 추정하는 인공지능 로봇과 같은 설비와 함께 자동화가 가능할 것으로 기대된다. 또한, 로봇과의 협업 등을 통해 인력난과 상해 및 업무 강도 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 늘어나는 물동량의 처리를 위한 효율적인 인력 배분이 될 수 있을 것으로 기대된다. 현재로서는 향후 연구로는 단순 평가자를 통한 가치 판단을 넘어, 학습된 평가자를 통한 사람의 지식 전이를 가능하게 하여, 강화학습만으로 BPP를 학습하였을 때의 성능을 향상하고자 한다. 또한, 실제 환경에서의 로봇을 이용한 실험 환경을 구축하고 강화학습의 역할을 확대하여 휴리스틱만 사용한 알고리즘과 학습된 평가자를 사용했을 경우의 비교 실험을 진행하여, 제안한 알고리즘의 유효성을 보일 예정이다.

## 참고문헌

- Arulkumaran, K., Deisenroth, M. P., Brundage, M., Bharath, A. A.(2017), A brief survey of deep reinforcement learning, *arXiv preprint arXiv:1708.05866*.
- Benkő, Attila, György Dósa, and Zsolt Tuza.(2010), Bin Packing/Covering with Delivery, solved with the evolution of algorithms, *2010 IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA)*.
- Browne, C. B., Powley, E., Whitehouse, D., Lucas, S. M., Cowling, P. I., Rohlfshagen, P., and Colton, S.(2012), A survey of monte carlo tree search methods, *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in games*, 4(1), 1-43.
- Cai, Q., Hang, W., Mirhoseini, A., Tucker, G., Wang, J. and Wei, W.(2019), Reinforcement learning driven heuristic optimization. *arXiv preprint arXiv:1906.06639*.
- Edelkamp, Stefan, Max Gath, and Moritz Rohde.(2014), Monte-Carlo tree search for 3D packing with object orientation, *Joint German/Austrian Conference on Artificial Intelligence (Künstliche Intelligenz)*. Springer, Cham.
- Edward G Coffman, Jr, Michael R Garey, David S Johnson, and Robert Endre Tarjan.(1980), Performance bounds for level-oriented two-dimensional packing algorithms, *SIAM Journal on Computing*, 9(4):808-826,1980.
- François-Lavet, V., Henderson, P., Islam, R., Bellemare, M. G., and Pineau, J.(2018), An introduction to deep reinforcement learning, *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 11(3-4), 219-354.
- Garey, M. R, Johnson, D. S. and Victor Klee(ed.).(1979), Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. *A Series of Books in the Mathematical Sciences*. San Francisco, Calif.: W. H. Freeman and Co.
- Grondman, I., Busoniu, L., Lopes, G. A., and Babuska, R.(2012), A survey of actor-critic reinforcement learning: Standard and natural policy gradients, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 42(6), 1291-1307.
- Gupta, A., Guruganesh, G., Kumar, A., and Wajc, D.(2017), Fully-dynamic bin packing with limited repacking, *arXiv preprint arXiv:1711.02078*.
- Hu, H., Zhang, X., Yan, X., Wang, L. and Xu, Y.(2017), Solving a new 3d bin packing problem with deep reinforcement learning method, *arXiv preprint arXiv:1708.05930*.
- Ibarz, J., Tan, J., Finn, C., Kalakrishnan, M., Pastor, P. and Levine, S.(2021), How to train your robot with deep reinforcement learning: lessons we have learned. *The International Journal of Robotics Research*, 40(4-5), 698-721.
- Iriondo, A., Lazkano, E., Susperregi, L., Urain, J., Fernandez, A., and Molina, J.(2019), Pick and place operations in logistics using a mobile manipulator controlled with deep reinforcement learning, *Applied Sciences*, 9(2), 348.
- Johannink, T., Bahl, S., Nair, A., Luo, J., Kumar, A., Loskyll, M., ... and Levine, S.(2019), Residual reinforcement learning for robot control. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 6023-6029 pp.

- Johnson, David S.(1973), Near-optimal bin packing algorithms. *Diss. Massachusetts Institute of Technology*.
- Karmarkar, N and Karp, R. M.(1982), An efficient approximation scheme for the one-dimensional bin-packing problem. In *23rd Annual Symposium on Foundations of Computer Science (sfcs 1982)*, 312-320. IEEE.
- Li, Yuxi.(2017), Deep reinforcement learning: An overview, *arXiv preprint arXiv:1701.07274*
- Lobbezoo, Andrew, Yanjun Qian, and Hyock-Ju Kwon.(2021), Reinforcement Learning for Pick and Place Operations in Robotics: A Survey, *Robotics 10.3* : 105.
- Lodi, Andrea, Silvano Martello, and Daniele Vigo.(2002), Heuristic algorithms for the three-dimensional bin packing problem. *European Journal of Operational Research 141.2*, 410-420.
- Martello, Silvano, David Pisinger, and Daniele Vigo.(2000), The three-dimensional bin packing problem. *Operations research 48.2*, 256-267.
- Puterman, Martin L.(1990), Markov decision processes, *Handbooks in operations research and management science 2*, 331-434.
- Schulman, J., Wolski, F., Dhariwal, P., Radford, A., and Klimov, O.(2017), Proximal policy optimization algorithms. *arXiv preprint arXiv:1707.06347*.
- Yang, Yang, Li Juntao, and Peng Lingling(2020), Multi-robot path planning based on a deep reinforcement learning DQN algorithm, *CAAI Transactions on Intelligence Technology 5.3* : 177-183.
- Zhao, H., Zhu, C., Xu, X., Huang, H., and Xu, K.(2022), Learning practically feasible policies for online 3D bin packing." *Science China Information Sciences 65.1*, 1-17.
- 김정은, 「보스턴 다이내믹스, "물류 로봇 '스트레치' 올해 생산량 이미 매진", THE DAILYPOST, 2022.04.04, 1쪽. <https://www.thedailypost.kr/news/articleView.html?idxno=86670>
- 장길수, 「피클 로봇, 고속 박스 하적 로봇 '딜(Dill)' 개발», 로봇신문, 2021.04.20, 1쪽. <http://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=24627>
- CJ대한통운, 「'AI 혁신 기술'이 이끄는 CJ대한통운의 스마트 물류 혁명», CJ대한통운, 2021.07.28, 1쪽. [https://www.cjlogistics.com/ko/newsroom/latest/LT\\_00000238](https://www.cjlogistics.com/ko/newsroom/latest/LT_00000238)
- 쿠팡, 「로봇과 인공지능: 쿠팡 물류의 최신 기술을 소개합니다», 쿠팡뉴스룸, 2022.09.06, 1쪽. <https://news.coupang.com/archives/19485/>

## 요약문

본 논문에서는 강화학습과 휴리스틱을 결합하여 매 순간 무작위로 물체가 주어지지만 작은 크기의 적재 버퍼를 활용할 수 있는 bin packing problem (BPP) 문제를 해결하는 방법을 제안한다. 이때 한번 놓인 물체의 위치는 변경될 수 없다. 이러한 환경은 전반적인 물류 프로세스 자동화의 물결에도 아직 원활히 해결되지 않은 상차 환경과 유사하다. 휴리스틱은 인간의 직관에 따라 신속한 최적화가 가능하고, 강화학습은 환경에 대한 반응성이 뛰어나므로 두 방법을 결합한 방법은 실제 물류 환경으로의 적용이 용이하다. 강화학습을 통해 학습한 모델이 신규 물체 및 버퍼 내 일부 물체들에 대한 각각의 가치를 판별하고 그에 따른 최적의 물체를 선택하면, 선택된 물체는 정의된 휴리스틱 알고리즘에 따라 물체의 최적 방위와 위치를 고려하여 배치된다. 이런 방식으로 결합된 자동화 방법은 버퍼를 효과적으로 활용하여 적재 효율을 증대시킬 수 있다. 실험을 통해 실제로 본 연구에서 제시한 방법을 통해 버퍼를 함께 고려했을 때 휴리스틱 모델만을 사용했을 때보다 적재 효율이 증가함을 확인하였다.

**키워드:** 버퍼 활용 빈 패킹, 강화학습, 휴리스틱, 가치 측정, 불확실성 제어



# 도시물류 시스템 운영 시나리오 검증을 위한 EFFBD(Enhanced Functional Flow Block Diagram) 기반 모델 개발

채우리<sup>1</sup>, 황재민<sup>2</sup>, 이재덕<sup>3</sup>, 장경호<sup>4</sup>, 김주욱<sup>5\*</sup>

<sup>1,2,3,5</sup>한국철도기술연구원 미래교통물류연구소 첨단물류시스템연구실

<sup>4</sup>서울교통공사 신성장본부 신사업처

## Development of EFFBD-based model for urban logistics system operation scenario verification

Uri Chae<sup>1</sup>, Jaemin Hwang<sup>2</sup>, Jaedeok Lee<sup>3</sup>, Kyungho Jang<sup>4</sup>, Joo-uk Kim<sup>5\*</sup>

<sup>1,2,3,5</sup>Department of Advanced Logistics System Research,

Innovative Transportation and Logistics Research Center, Korea Railroad Research Institute

<sup>4</sup>New Business Department of Seoul Metro

The COVID-19 pandemic has instigated a global surge in logistics volume, thus precipitating a myriad of socio-economic issues worldwide. To address these ramifications, numerous nations have embarked on research initiatives exploring the viability of urban railway utilization. However, the conception of an integrative and tangible framework for a logistics transportation system leveraging underground spaces remains an elusive challenge. This research undertakes the development of a novel scenario for an urban logistics system that capitalizes on the underutilized urban rail infrastructure currently being developed in South Korea. The scenario development is executed through the application of an EFFBD based model, the effectiveness of which is subsequently validated via timeline analysis. Through this validation process, the successful establishment of initial subsystem standards was discerned, indicating potential applicability of the model in real-world contexts. By proposing the possibility of integrating underground spaces into logistics networks, this research provides a critical foundation for stimulating subsequent investigations in the field of underground logistics. The proposition of leveraging underground spaces for logistics purposes could potentially catalyze the sustainable evolution of the logistics industry, and be instrumental in shaping both academic and practical discourse on urban logistics systems.

**Keywords:** Underground Freight System, Operation Scenario, EFFBD, Timeline Analysis

---

논문접수일 : 2022.10.05.    논문수정일 : 2023.05.23.    게재확정일 : 2023.06.01.

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었음(RS-2021-KA163194)

1. 한국철도기술연구원 미래교통물류연구소 첨단물류시스템연구실 박사후연수연구원

2. 한국철도기술연구원 미래교통물류연구소 첨단물류시스템연구실 선임연구원

3. 한국철도기술연구원 미래교통물류연구소 첨단물류시스템연구실 학생연구원

4. 서울교통공사 신성장본부 신사업처 처장

5\*. 한국철도기술연구원 미래교통물류연구소 첨단물류시스템연구실 책임연구원, Corresponding Author: jookim@krri.re.kr

# 1. 서론

## 1.1 국내외 택배 물류 시장 현황

전 세계적으로 택배 물량이 Figure 1과 같이 지속적으로 증가하고 있으며(Statista, 2022), 이 증가 추세는 COVID-19 팬데믹에 의해 더욱 가파르게 되었다(KILA, 2021). 또한 온라인 이커머스 시장의 확장(Lee, 2021)과 함께, 택배 화물량의 증가로 인해 발생하는 다양한 문제에 대한 해결책이 필요한 상황이 되었다(Kang and Lee, 2021; Kim and Hwang, 2021). EU(유럽연합)의 'EU Transport in Figures (2020)' 보고서에 따르면, 2013년부터 화물 운송량이 지속적으로 증가하고 있으며, 미국에서도 같은 기간 동안 연평균 1.5%의 증가 추세를 보였다. 일본에서는 2018년 기준으로 화물 운송량의 91.6%가 도로를 활용하고 있고, 중국에서는 2013년부터 화물 운송량의 연평균 증가율이 4.0%로 꾸준한 증가 추세를 보이고 있다(European Commission, 2020).

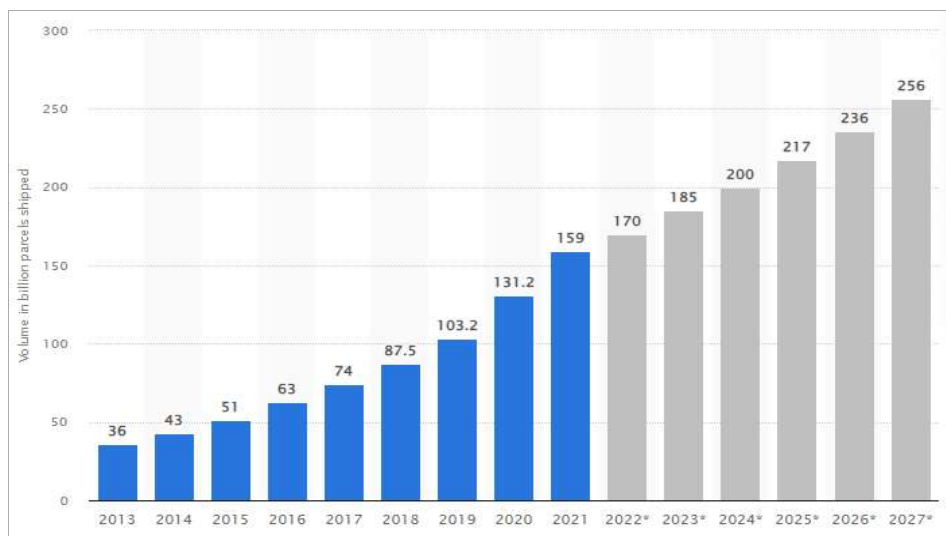


Figure 1. Global parcel shipping volume: Actual and forecast(Statista, 2023)

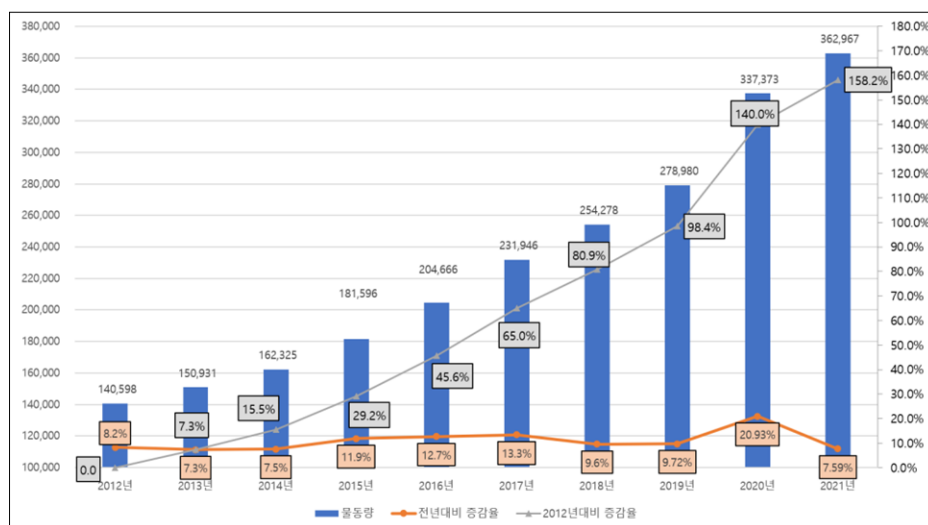


Figure 2. Korean market delivery volume

대한민국의 물류 산업은 2001년 59.4조에서 2018년 146.9조로 약 2.4배 증가하였으며, 온라인 쇼핑몰의 시장규모는 같은 기간 3.3조에서 113.3조로 약 34배가 증가하였다(Economy Chosun, 2022). 또한 택배업은 같은 기간 시장규모가 약 8.8배(6천 5백억-> 5.7조), 물량이 약 12.4배 증가하였다(Cho and Yun, 2001; Son et al., 2021). 이는 특히 국내 물동량의 증가 추이를 보면 알 수 있는데, 코로나가 발생한 2019~2020년을 기준으로 20% 이상의 증가율을 보이며, 2021년에도 2020년 대비 7% 이상의 물동량 증가율을 보였다(Figure 2). 국내 화물 운송시장의 경우 지속적인 증가 추세를 보이는데, 그중 도로운송 분담률은 2016년 톤(ton) 기준 91.1%, 수송비 기준 92.6%로 수송수단 중 가장 높은 비율을 보였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2019). 하지만 화물의 소량/다빈도화 및 수도권외의 물류 집중에 따른 화물자동차 운행의 증가는 유류비 상승과 맞물려 2016년 기준 46.7조 원(GDP의 2.94% 수준)의 전국 교통혼잡비용을 발생시키고 있으며, 도로화물 운송이 철도화물 운송보다 대기오염, 온실가스, 소음 등의 방면에서도 더 큰 사회적 비용을 발생시켰다(Shim et al., 2005; Korea Transport Institute, 2019). 도심 내 화물자동차는 최근 미세먼지 발생의 주요 원인으로 지적되고 있으며(Han et al., 2021), 택배산업 성장과 함께 택배 차량 및 도로변 조업 차량의 증가는 교통 혼잡, 대기오염 및 소음, 교통사고, 도로파손 등 다양한 사회적 문제의 원인으로 인식되고 있다(Kim, 2021). 이에 따라 대한민국 정부에서는 물류 산업의 성장과 대기 환경 등의 사회적 문제를 개선하기 위한 다양한 정책 중 하나로 모빌리티 혁신 로드맵을 발표하였다. 해당 정책은 도시철도를 활용한 생활 물류 서비스 등 도시철도를 활용한 도시 물류 추진전략이 포함되어 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2022).

이러한 문제는 대한민국뿐만 아니라, 전 세계적으로 만연하다(Menasce, 2014). 도시 외곽 지역으로부터 도심으로 개별 화물 트럭에 의하여 화물 운송이 이루어지기 때문에 물동량 증가에 따라 트럭 운행이 증가하고, 교통 혼잡과 환경문제 등 사회적 비용이 함께 증가하는 고비용, 비효율 물류 시스템이다.

## 1.2 국내외 택배 물류 시장 현황

이러한 사회적/경제적 이슈를 해결하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있는데, 프랑스에서는 도로 교통 정체를 해결하기 위해 Tremfret 이라는 방안을 제시하였다. 여객 수송 tram 사이에 두 편의 tram을 투입하여 4주에 걸쳐 6회/주 테스트 하였고, 2017년 낡은 전차를 개조하여 6일간 17톤의 화물을 운반하는데 성공하였다(efficacity, 2016). 또한 프랑스의 소매 체인점인 Monoprix에서는 2012년 효율적인 공급망 확보와 교통체증을 줄이기 위해 철도를 활용하여 화물 운송수단으로 사용하려는 계획을 제시하여 전체 물품의 약 30%를 철도로 운반하였다. 역에 도착한 물품은 시내 가게까지 천연가스 트럭으로 이동하여 도심의 정체 현상을 부분적으로 완화해주고 온실가스 배출량을 감소시켰다(Delaitre and Barbeyrac, 2012). 독일에서는 2001년 폭스바겐사에서 차량의 부품을 도심 내로 들여오기 위해 물류 운행 효율성 및 개선을 고려하여 첫 번째와 마지막 칸은 약 7,500kg, 중간 3칸은 15,000kg까지 실을 수 있는 5량 1편성의 열차를 50km/h로 주행하였다(Amesh2009, 2016). 일본에서는 기존의 지하철 인프라와 차량을 개량하지 않고 이동형 캐리어를 사용하여 도심으로 배송되는 택배 화물 운송에 대한 시험을 2010년 총 2회에 걸쳐서 실시하였으며, 60kg 무게의 카트를 승객 칸에 싣고 이동하였다(Kikuta et al., 2012).

이 외에 새로운 지하 터널을 통해 화물을 운송하는 계획도 제시되고 있다. 미국의 TubeXpress는 지하 튜브 통로를 이용하여 컨테이너를 자동으로 운송하는 시스템으로 미국 연방고속도로 관리청에서 진행하고 있는 첨단 화물 운송에 관한 연구 프로젝트 중 하나이며, 국가교통시스템센터에 의해 기술 및 경제적 타당성에 대한 검토가 진행 중이다(Kwon and Jang, 2010; Lee et al., 2008). 이러한 튜브 화물 운송 시스템은 교통사고 등과 같은 도로 상황이나 날씨에 영향을 받지 않고 정해진 시간에 배달될 수 있다는 장점이 있다(Lee et al., 2008). 독일의 CargoCap은 도심 내의 교통 혼잡으로 인해 유발되는 막대한 사회비용을 절감하기 위해 수행되고 있는 연구로, 직경 2.0m의 지하 파이프라인 관로를 이용하여 24시간 무인 자동으로 화물을 수송하는 지하 수송망 건설에 관한 연구이다(Kwon et al., 2008).

그러나, 현재까지는 트랩을 활용한 외부 철로를 이용하거나 특정 업체에서 당사의 물류를 이송하기 위한

연구, 혹은 사람이 직접 캐리어를 끌어 열차로 운송하는 등의 활용 사례이거나, 기존의 도시철도를 이용하는 것이 아닌, 새로운 지하 수송망 건설을 목표로 두기 때문에 실제 사회적/경제적 비용 절감을 위해서는 기존의 인프라를 활용하여 연구개발의 인력 및 비용 절감 방법을 고안할 필요가 있다. 이러한 비효율을 개선하고자 전 세계적으로 연구가 이루어지고 있는 만큼, 다양한 시스템을 제시하고, 그에 대한 운영 시나리오를 제공하여 국가적인 혼잡비용 및 사회적 비용을 차지하고 있는 도로 위주의 물류 시스템을 보다 친환경적인 철도시설 등을 활용한 물류 시스템으로 변화시켜야 할 필요가 있다.

### 1.3 도시철도 물류 운송 시나리오

본 논문에서 제안하는 운영 시나리오는 대한민국 서울 도심 내 건설되어있는 지하수송 인프라인 도시철도 시설을 활용하여 화물을 운송하기 위한 도시 물류 시스템을 대상으로 고안한 것으로, 도심 물류 증가 및 물류 기술의 고도화, 유통채널의 다양화 등 변화하는 물류 산업에서 기존 도시 내에 존재하는 도시철도 시설을 활용하여 초기 투자비용을 최소화하는 도심 물류 시스템이다.

도심에서 화물을 운송하기 위해서는 열차, 운송, 관제, 운영, 공간 등 다양한 시스템의 지원이 필요하며, 시스템의 명확한 기능과 이들 간의 복잡한 관계를 정의하여야 한다. 또한 시스템이 어떤 기능이 필요하고, 어떻게 수행하는지 다양한 방법으로 검증되어야 한다.

국내에서도 복잡한 시스템을 개발하는 경우, 개념단계에서 시스템 범위 및 개념을 정의하고, 운영 시나리오를 적용하는 사례가 많아졌으며(Yoon et al., 2011), 여러 가지 운영 시나리오를 통해 설계단계에서 발생할 문제를 사전에 해결하고자 노력하고 있다(Oh et al., 2013). 이러한 노력은 시스템 설계 및 운영 시 발생하는 위험 및 비용을 줄이는 방법의 하나로 활용되고 있다(Lee et al., 2015).

운영 시나리오는 개념단계에서 작성되는데, 다양한 시나리오를 분석할수록 시스템의 구조와 기능이 명확해지고, 도출되는 명확한 요구사항을 통해 성공적인 시스템 개발에 영향을 줄 수 있다. 요구사항은 시스템 개발 시 중요한 성과물 중의 하나로, 현재까지도 요구사항 도출 시 기존 자료를 활용하거나 개인의 경험 또는 직관적으로 요구사항을 도출하는 경우가 많다.

도심에 화물을 운송하기 위해 개념단계에서 시나리오가 제대로 분석되지 않은 채 요구사항이 도출되면 시스템 성공을 위한 올바른 방법을 적용하지 않으므로, 기존의 위험과 문제를 그대로 감수하며 시스템을 개발해야 할 수도 있다(Kim and Kim, 2016). 본 논문에서 구상하는 시나리오는 철송이 가능한지 시나리오를 작성하여 모델을 개발하고, 시간선 분석을 통해 비침두 시간에 화물열차에서 화물이 하차할 수 있는지 검증하기 위한 연구로, 물류 터미널과 라스트마일에서의 상/차에 대한 내용은 이미 구축되어 있다는 가정하에 진행되었다. 따라서 본 논문에서는 도심에 화물을 운송하기 위해 개발한 운영 시나리오를 기반으로 검증을 위한 모델을 구축하고, 시뮬레이션을 통해 운영 시나리오를 검증하고자 한다.

## 2. 본론

시나리오 모델링은 시스템 구축을 위한 전체 시스템을 세부 운영 시나리오로 구분하여 모델링을 통해 제시하였다(Figure 3). 본 논문에서 활용한 시나리오는 현재 개발 진행 중인 프로젝트의 전문가 의견을 바탕으로 작성되었으며, 이를 기반으로 각 주체별 정보 송·수신 및 행위에 대한 내용을 분석하여 모델을 개발하였다. 본 시나리오는 기존에 구축된 역사에서 기존에 운행되고 있는 열차 사이에 화물열차의 스케줄을 추가하여 화물의 상/하차 시간을 고려하여 화물열차의 추가적인 운행이 가능한지 검증하기 위해 개발되었다. 또한 화물열차를 포함하여, 화물을 실은 수평이송장치가 이동하는 모든 경로에는 수평이송장치가 인식할 수 있는 QR(Quick Response) 코드가 일정 간격으로 심어져 있으며 이를 인식하여 이동하는 것을 바탕으로 시나리오가 작성되었다.

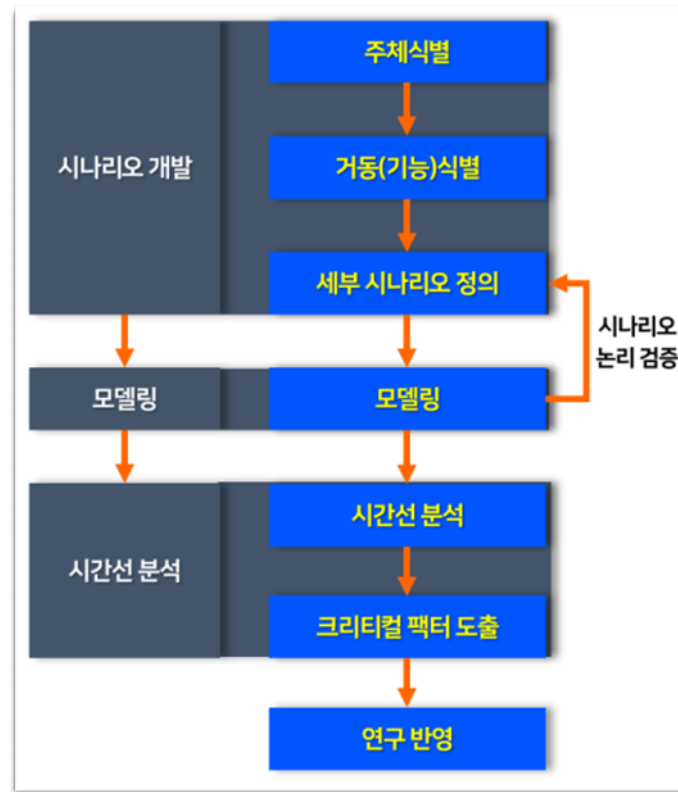


Figure 3. Research methodology diagram

## 2.1 운영 시나리오

시나리오는 크게 2가지 목적으로 나뉜다. 첫째, 화물운송 운영 시나리오, 둘째, 회수운송 운영 시나리오다. 화물운송 운영 시나리오는 택배 화물을 원하는 목적지로 배송하는 과정이며, 회수운송 운영 시나리오는 물건 반품 등의 사유로 다시 돌려보내거나, 물건을 배송시킬 때 사용한 화물운송 표준용기 및 수평이송 장치가 되돌아오는 과정을 말한다. 각 목적에 따른 시나리오는 주체가 이동하는 곳에 따라 공간으로 구분 지었다(Table 1).

Table 1. Delimiting spaces within a scenario

구분	공간
화물운송 운영시나리오	차량기지 물류 공간(차량기지 승강장 포함)
	화물열차
	화물역사 더미 플랫폼(화물역사 승강장)
	화물역사 물류 공간
회수운송 운영시나리오	화물역사 물류 공간
	화물역사 더미 플랫폼(승강장)
	화물열차
	화물열차 차량기지 물류 공간(차량기지 승강장 포함)

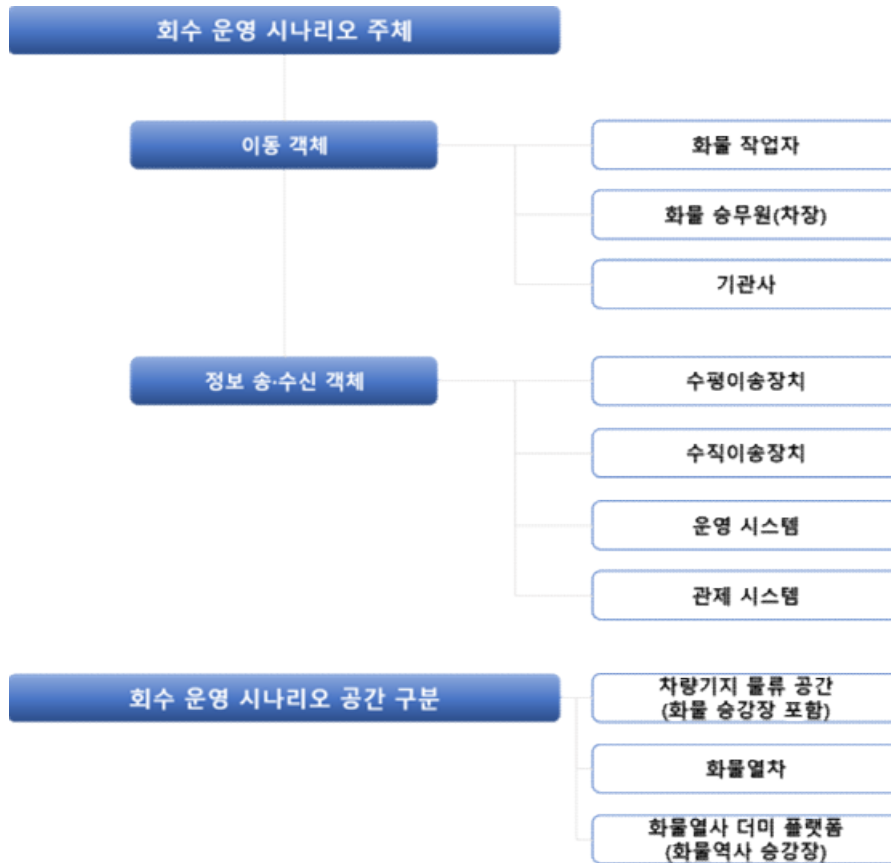


Figure 4. Criteria for scenario classification

주체는 크게 6개로 나뉘며, 각각 화물작업자, 화물승무원(차장), 기관사, 수평이송장치(AGV, Automated Guided Vehicle), 수직이송장치, 정보 송·수신 시스템으로 나뉜다. 정보 송·수신 시스템은 운영 시스템과 관제 시스템으로 나뉜다. 관제 시스템은 수평이송장치와 수직이송장치를 제어하는 시스템이며, 운영 시스템은 운송장 관리 및 도시철도 물류 공동운영 플랫폼이다(Figure 4).

구분	세부구분	번호	주체					
			시스템(사용자)		정보 송·수신 시스템		작업 승무원(차장) (태블릿 포함)	기관사
			화물 작업자 (태블릿, 모바일 디바이스 포함)	수평이송장치	수직이송장치	운영 시스템 (모바일 디바이스)		
화물 열차 단위 이동 시나리오	화물 열차 단위 이동 시나리오	101		화물 수평이송장치는 화물 열차에서 하차 후 인식되는 첫 번째 QR 정보를 확인하여 관제 시스템에 송신한다.				
		102				수평이송장치로부터 첫 번째 QR 정보를 수신한다.		
		103				첫 번째 QR 정보로 위치한 수평이송장치의 목적지 역사정보를 확인한다.		
		104				운영 시스템으로 수평이송장치가 화물 열차에서 하차했다는 정보를 송신한다.		
		105				관제 시스템으로부터 수평이송장치 하차 정보를 수신한다.		
		106						
		107		수직이송장치 탑승 입구 QR 위치로 이동한다.				
		108		(수평이송장치의 이동 중 거쳐가는 QR 위치정보를 관제 시스템으로 계속하여 송신한다.)		(수평이송장치의 이동 중 거쳐가는 QR 위치정보를 계속하여 수신한다.)		
		109		수직이송장치 탑승 입구 QR 위치 도착 정보를 관제 시스템으로 송신한다.				
		110				수평이송장치로부터 수직이송장치 탑승 입구 QR 위치 도착 신호를 수신한다.		
		111				수직이송장치의 상태/수평이송장치 탑승 가능 상태를 확인한다.		
시나리오 및 공간	시나리오 및 공간	112		수직이송장치의 탑승 문단을 자동으로 인식한다.				
		113		수직이송장치로부터 수직이송장치 탑승 문단을 수신한다.				
		114		수직이송장치로부터 수직이송장치 탑승 문단을 자동으로 인식한다.				
			시스템 기능 및 아이템(정보, 신호)					

Figure 5. Part of the operation scenario

화물운송 운영 시나리오는 택배 화물이 '차량기지 물류공간(차량기지 승강장 포함)'에 놓인 상태에서 시작된다. '차량기지 물류공간'의 경우 차량기지 승강장과 같은 공간에 위치하고 있기 때문에 같은 공간으로

정의하였다. 이어 도착화물역사별로 정리된 화물은 화물작업자에 의해 표준용기에 담겨 수평이송장치와 체결 후 열차 탑승위치(대기위치; 차량기지 승강장)로 이동한다. 화물열차가 정차하면 표준용기와 체결된 수평이송장치가 관제 시스템에 의해 라우팅 된 순서대로 열차 내부로 이동한다. 수평이송장치 탑승이 완료 되면 화물열차는 화물역사 승강장으로 이동한다. 수평이송장치는 순서대로 화물열차에서 하차하여 수직이송장치에 탑승하여 화물역사 물류공간으로 이동한다. 여기서 수직이송장치는 공간으로 분류하지 않았는데, 수직이송장치는 본 시스템 내에서 개발된 독자적인 시스템(관제 시스템)에 의해 신호를 송·수신하며 작동하기 때문이다(Table 2).

Table 2. A representative scenario of urban logistics technology development using underground space(Summary)

운영시나리오		
1		화물입고
1-1		목적지별로 분류된 화물이 도시철도 차량기지 물류 공간으로 입고
2		화물상차
2-1		차량기지 화물작업자가 차량기지 내 물류공간에서 목적지 별 화물의 스캔 작업 후 화물운송 표준용기에 옮겨 담는 작업 수행
2-2		화물이 담긴 화물운송 표준용기는 화물작업자에 의해 호출된 수평이송장치와 체결되며, 화물작업자가 화물운송 용기의 목적지 역정보를 단말을 통해 입력
2-3		지정된 개별 화물열차에 화물운송 표준용기와 체결된 수평이송장치가 탑승 후 열차 내부에 결박됨
3		화물운송
3-1		수평이송장치가 상차된 화물열차가 목적지 역으로 출발
4		화물하차
4-1		목적지 역에 도착한 개별 화물열차는 화물운송 표준용기와 체결된 수평이송장치의 결박을 해제하며, 역사공간(역사 내 물류 플랫폼)으로 수평이송장치의 하차를 시작
4-2		화물운송 표준용기와 체결된 수평이송장치는 개별 화물열차에서 하차한 후 층간 이송을 위해 수직이송장치에 탑승
4-3		층간 이송을 위해 수직이송장치와 수평이송장치가 체결됨
5		역사적치
5-1		화물운송 표준용기와 체결된 수평이송장치는 수직이송장치를 통해 역사 물류 공간으로 층간 이송
5-2		물류공간 도착 후 수평이송장치의 결박이 해제되며, 수직이송장치에서 하차
5-3		화물운송 표준용기는 수평이송장치를 통해 역사 물류 공간의 지정된 위치로 이송되며, 수평이송장치와 체결 해제 후 적치
6		화물출고
6-1		적치된 화물운송 표준용기의 화물은 단말 배송 작업자에 의해 스캔 후 배송을 위해 단말 배송 이동체에 상차되어 출고

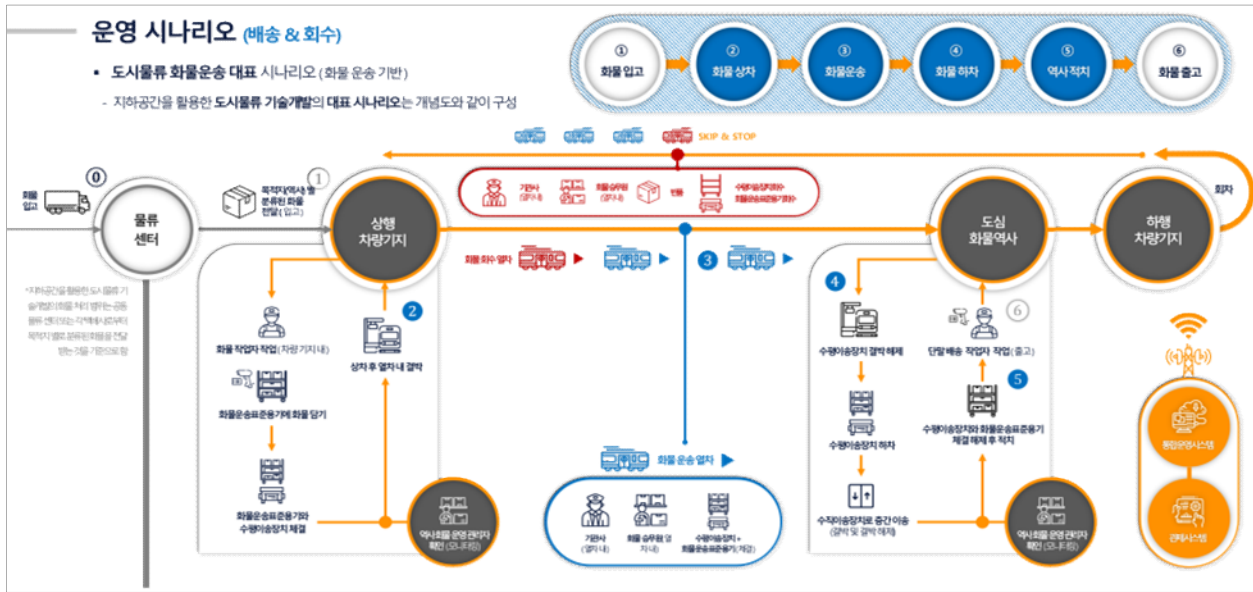


Figure 6. Urban logistics system operation concept using underground space

Figure 6의 개념을 대상으로 개발되고 있는 각각의 하위 시스템(시나리오 내 각 주체)의 정량적 목표를 설정하고, 역할에 대한 정의를 하였다. 또한 해당 시스템을 위해 대한민국의 열차 편성 시간을 분석한 결과에 따라 화물운송을 위한 화물열차의 정차시간은 5분으로 제한을 두고 있으므로 화물의 화물열차 상·하차에 대한 시간을 구분하여 작성하였다. 시나리오 모델링 검증은 해당 시간을 기준으로 시간 분석 시뮬레이션을 수행하여 검증하였다.

## 2.2 시나리오 분석

시나리오 모델링을 위해 시나리오의 시스템 운영 개념과 범위, 도시물류 화물운송을 대표하는 운영 시나리오(배송/회수)가 작성되어 운영 시나리오 분석을 하였다. 도시물류시스템 운영 개념에는 배송과 회수의 개념이 포함되어 있다.

운영 시나리오에서는 기능을 분리하여 상세한 활동을 식별하고, 주체 및 객체를 통해 시스템 및 시스템 간 인터페이스를 식별하였다. 또한 화물 적재, 수평이송장치/표준용기 체결, 수평이송장치 그룹화, 수평이송장치 상차, 표준용기 결박(열차 내), 화물수송 모니터링, 수평이송장치 하차, 수직이송장치 탑승, 수직이송장치 작동, 수평이송장치/표준용기 체결 해제, 화물 하역은 운영 시나리오 모델링을 위한 기준 자료가 되었다.

Figure 7은 도시물류 기술개발 시 필요한 관련 시스템의 범위를 나타낸 것으로, 대부분의 시스템은 운영 시나리오에서도 화물운송을 위한 시스템으로 식별되어 운영 모델링 작성 시 시스템으로 반영하였다.



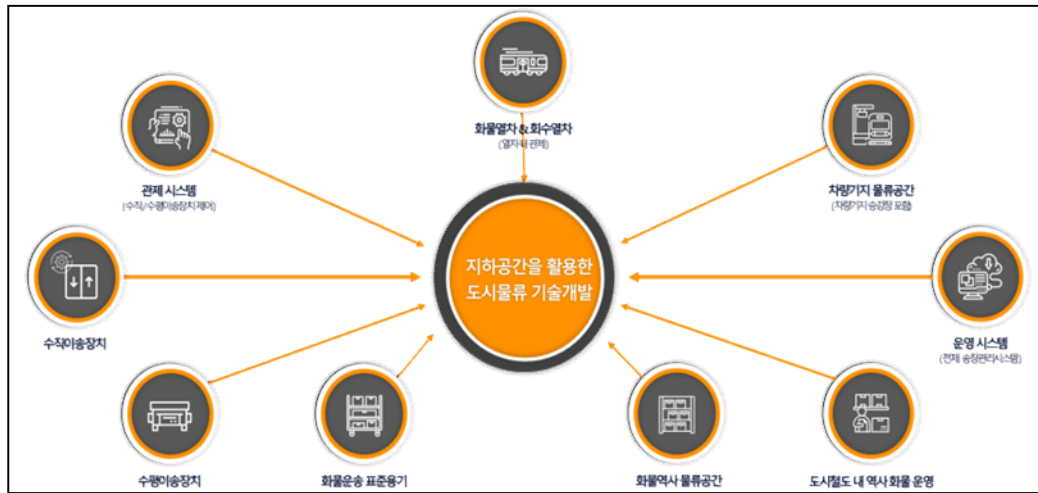


Figure 7. Urban logistics technology development scope

## 2.3 시나리오 모델링

기능 모델은 시스템의 기능을 모델로 구현하는 것으로, 기능 또는 기능의 흐름을 표현한다. 또한 기능 간 아이템(정보)을 통해 흐름(절차 또는 단계)을 제어하기도 한다. 기능 모델을 작성하면 시스템의 기능 식별이 용이하고, 기능의 흐름(절차)에 따라 시스템 간 전달되는 아이템(정보)을 확인할 수 있다. 운영 시나리오 모델링을 위해 지하공간 도시물류시스템 전반적인 시나리오 분석 내용을 바탕으로 모델링을 하였다.

도시물류 화물운송 기능은 화물 적재, 수평이송장치/표준용기 체결, 수평이송장치 그룹화, 수평이송장치 상차, 표준용기 결박(열차 내), 화물수송 모니터링, 수평이송장치 하차, 수직이송장치 탑승, 수직이송장치 작동, 수평이송장치/표준용기 체결 해제, 화물 하역으로 세부 구성되며, 화물이 입고되어 운송 후 출고 및 회수까지의 시나리오다. 화물이 어떻게 입고되고, 출고되는지 절차 및 방법을 정의한 최상위 기능으로 상세 시나리오는 각 모델에서 확인할 수 있도록 모델링 하였다. 모델링은 Enhanced Function Flow Block Diagram(EFFBD)로 수행하였으며, 본 논문에서는 회수 시나리오를 제외한 운송 시나리오를 바탕으로 모델링 후, 시간 분석을 위한 알고리즘을 제시하고자 한다.

## 3. 결과

### 3.1 화물운송 시나리오 모델링

화물운송 시나리오를 모델링하기 위해 아래 Table 3과 같이 세부 시나리오를 구성하여 세부 시나리오를 기반으로 모델링을 진행하였다.

Table 3. Subdivision of the operation scenario

1. 화물적재 시나리오
2. 수평이송장치/화물운송 표준용기 체결 시나리오
3. 수평이송장치 그룹화 시나리오
4. 수평이송장치 상차 시나리오
5. 화물운송 표준용기 결박 시나리오
6. 화물수송 모니터링 시나리오
7. 수평이송장치 하차 시나리오
8. 수직이송장치 탑승 시나리오

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>9. 수직이송장치 작동 시나리오</li> <li>10. 수평이송장치/화물운송 표준용기 체결 해제 시나리오</li> <li>11. 화물하역 시나리오</li> </ul> |
|---|

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 화물적재 시나리오</li> <li>2. 수평이송장치/화물운송 표준용기 체결 시나리오</li> <li>3. 수평이송장치 그룹화 시나리오</li> <li>4. 수직이송장치 탑승 시나리오</li> <li>5. 수직이송장치 작동 시나리오</li> <li>6. 수평이송장치 상차 시나리오</li> <li>7. 화물운송 표준용기 결박 시나리오</li> <li>8. 화물수송 모니터링 시나리오</li> <li>9. 수평이송장치 하차 시나리오</li> <li>10. 수평이송장치/화물운송 표준용기 체결 해제 시나리오</li> <li>11. 화물하역 시나리오</li> </ul> |
|--|

세부 시나리오 중 3.2에서 나올 시간선 분석을 통하여 일부 트래픽이 예상되는 부분을 아래와 같이 제시하였다.

#### 1) 수평이송장치 하차

수평이송장치의 하차는 목적지 화물역사의 도착 후, 해당 역에서 하차해야 할 AGV들이 하차하며 첫 번째 인식하는 QR 정보를 통해 목적지 역을 확인하는 시나리오이다.

하부는 9개 기능이며, 화물열차 문 열림, 안전건넌판 작동, 결박장치 해제, 수평이송장치 하차, 수직이송장치 탑승 QR 위치 경로 생성, 수직이송장치 탑승 QR 위치 수신 및 하차 후 첫 번째 인식하는 QR 정보 확인, 수평이송장치의 하차 완료 확인하는 기능으로 구성되었다. 왼쪽의 '화물작업자', '수평이송장치' 등은 기존 시나리오의 상단에 있는 주체들을 표기한 것으로, 해당 객체가 어떤 행위가 있을 때 파란색 박스로 행위가 표시된다. 또한 화살표를 통해 신호의 송·수신 방향을 알 수 있으며, 어떤 정보를 주고받는지에 대한 내용이 회색 상자로 표기되어있다.

예를 들어, 화물승무원이 화물열차의 문 열림 버튼을 누르면, 화물열차의 문이 열리며 안전건넌판이 작동되고, 표준용기를 고정하던 열차 내 결박장치가 해제된다. 화물승무원은 일련의 과정을 육안으로 확인하고, 해당 역사에서 하차해야 할 수평이송장치에 하차 명령을 내리게 된다. 해당 명령은 관제 시스템을 통해 수평이송장치로 전달이 된다. 이때 관제 시스템은 수평이송장치가 이동해야 할 QR의 위치 정보도 같이 송신한다. 수평이송장치는 QR 위치 정보를 받아 화물열차에서 하차하며, 하차하는 즉시 확인되는 첫 번째 QR 코드를 관제 시스템으로 송신하고, 관제 시스템에서는 통해 수평이송장치가 해당 역에서 맞게 내린 것인지 확인한다. 이후, 수평이송장치가 목적지 QR에 도착하면 도착 신호를 관제 시스템으로 송신하고, 관제 시스템은 수평이송장치의 도착 신호를 운영 시스템으로 송신하게 된다.

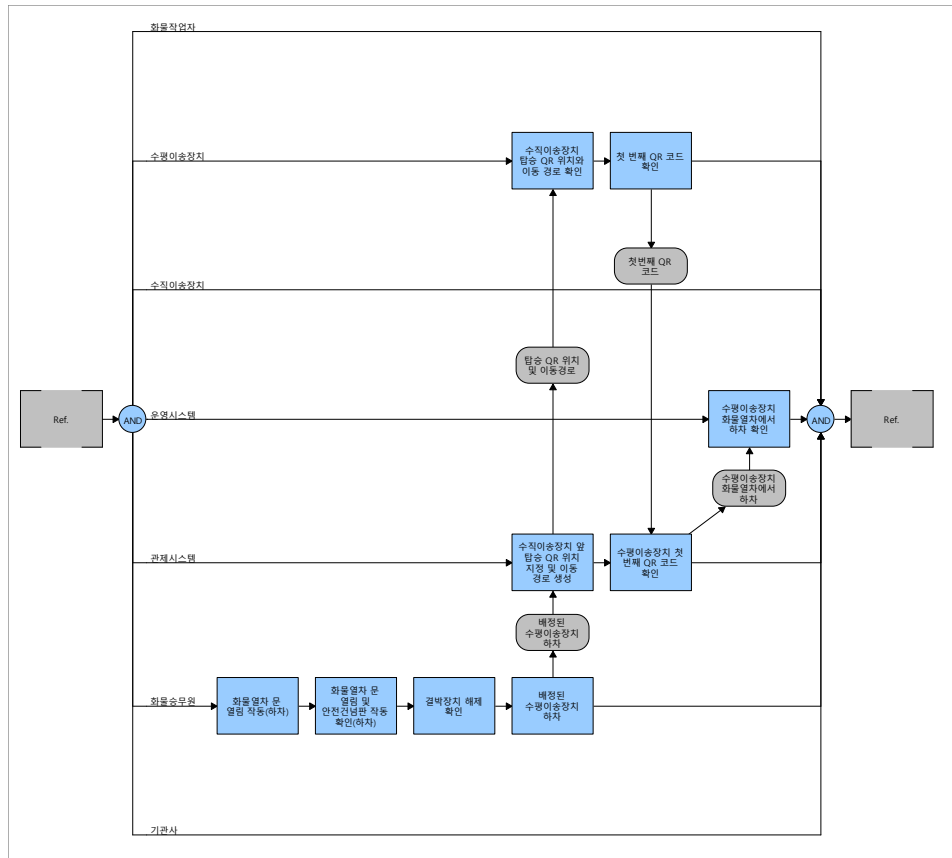


Figure 8. Freight transport\_AGVs get off the freight train

## 2) 수직이송장치 탑승

수평이송장치가 수직이송장치 탑승을 위한 입구 QR에 도착하면 수직이송장치를 통해 물류 공간으로 이동하는 시나리오이다.

하부는 8개 기능이며, 수평이송장치가 수직이송장치 탑승 입구 QR에 도착하면 관제 시스템으로 도착 신호를 송신하고, 관제 시스템에서는 수직이송장치의 상태를 확인하여 수평이송장치가 수직이송장치에 탑승할 수 있도록 명령을 내리고, 수평이송장치가 탑승하면 이를 자동으로 인식하는 기능으로 구성되어있다.

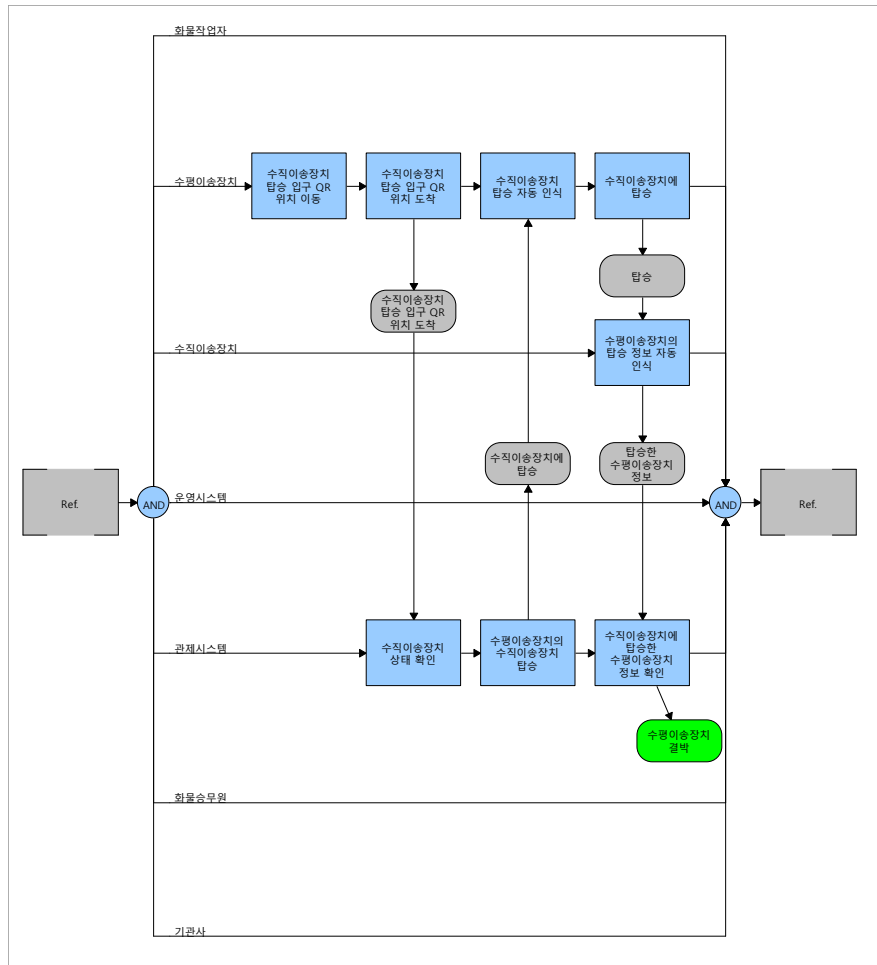


Figure 10. Freight transport\_Boarding VTS

### 3) 수평/수직이송장치 결박

수평이송장치와 수직이송장치의 결박은 수직이송장치가 이동하는 동안 수평이송장치와 체결된 표준용기가 기울어지는 등의 비정상 상황을 대비하기 위하여 수직이송장치 내부에서 표준용기를 고정해주는 시나리오다.

하부는 1개 기능이며, 수평이송장치가 수직이송장치에 탑승하면 관제 시스템에서 수직이송장치에 수평이송장치 결박 명령을 내리는 기능으로 구성되었다.



	4	화물열차 안전건넌판이 작동하는 시간	3	11	3
	5	화물열차 결박장치가 해제되는 시간	5	16	5
	6	화물 승무원(차장)이 안전건넌판의 작동 여부를 확인하는 시간	2	18	2
	7	화물 승무원(차장)이 태블릿을 사용하여 배송역사(도착지역) 선택 후, 수평이송장치의 하차 명령을 내리는 시간	5	23	5
t1	8	n번째 수평이송장치가 화물열차 내에서 하차하기 위한 입구까지의 이동 시간	2	25	2
t2	9	n번째 수평이송장치가 안전건넌판을 지나가는 시간	5	30	5
t3	10	n번째 수평이송장치가 수직이송장치의 입구까지 도착하는 시간	5	35	5
t4	11	n번째 수직이송장치의 결박장치가 해제되는 시간	2	37	40
t5	12	n번째 수평이송장치가 수직이송장치에 탑승하는 시간	7	44	140
t6	13	n번째 수평이송장치와 수직이송장치가 결박되는 시간	2	46	40
t7	14	n+1번째 수직이송장치가 n+1번째 수평이송장치를 탑승할 수 있게끔 준비하는 시간(수직이송장치가 한 층 올라가는 시간)	3	49	60
	15	화물 승무원(차장)이 문 닫힘 버튼을 누르는 시간	3	52	3
	16	화물열차 결박장치가 작동하는 시간	5	57	5
	17	화물열차 안전건넌판이 회수되는 시간	3	60	3
	18	화물열차 출입문이 닫히는 시간(단, n+21번째 수평이송장치가 화물열차를 하차한 후 수행)	2.5	62.5	3

화물열차 정차시간 동안 수평이송장치가 여러 차례 하차하는 반복 구간을 t1~t7로 표기하였다. 위 구간에서 각 step 별로 걸리는 시간은 Figure 12와 같다.

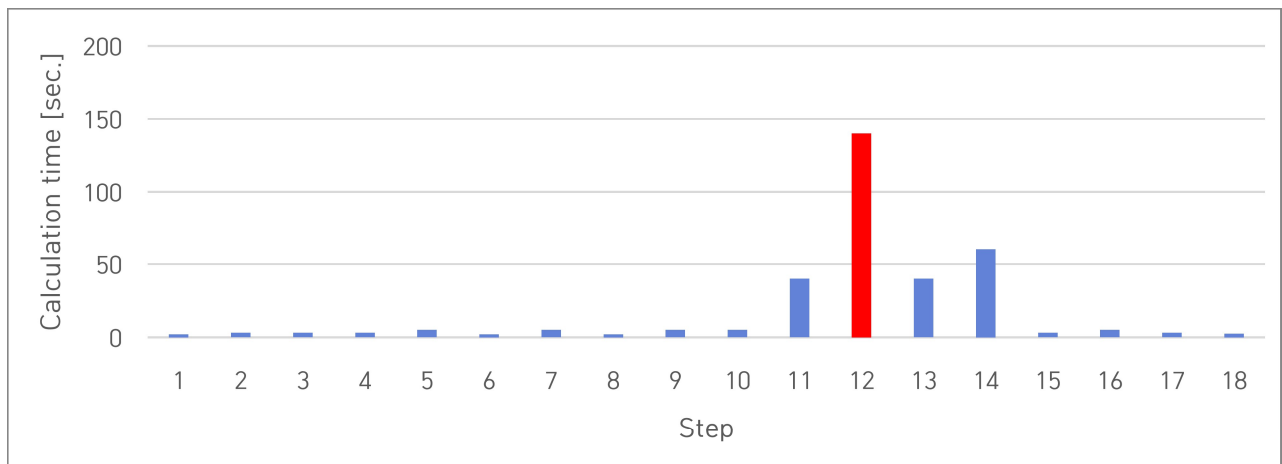


Figure 12. Calculation time[sec.] by step

위 Figure 12를 확인하면, step 12, ‘n번째 수평이송장치가 수직이송장치에 탑승하는 시간’에서 가장 많은 시간이 소요되는 것을 확인할 수 있다. 이를 개선하기 위해서는 수평이송장치가 수직이송장치에 탑승하는 시나리오, 즉, 수평이송장치의 이동 속도 및 속도 상승과 비례한 안전성의 개선이 필요할 것으로 판단된다. 아래 수식(1)은 실제 화물열차가 정차하는 시간을 도출하였다.

$$(t_{1,1} + t_{1,2} + t_{1,3} + t_{1,4} + t_{1,5} + t_{1,6} + t_{1,7}) + \sum_{n=2}^{21} (t_{n,4} + t_{n,5} + t_{n,6} + t_{n,7}) + n \leq 364[\text{sec.}] \quad (1)$$

수식(1)을 통해 현재 개발된 하위객체(수평이송장치, 수직이송장치, 화물열차 등)의 시스템 스펙을 대상으로 도출된 시간을 입력하여 총 정차시간이 364초 걸리는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서 제시한 시나리오는 최종 개발된 시스템을 대상으로 한 것이 아닌, 목표 시나리오를 목적으로 개발된 시나리오를 기반으로 모델링 하였다. 본 시나리오는 화물열차 정차시간 5분(300sec)을 목표로 하고 있으며 이를 위해 시나리오 모델링을 기반으로 테스트베드 실증평가를 하기 위해서는 실제 열차가 정차하는 시간을 파악할 필요가 있다. 화물열차가 화물 취급 역에서 최대 정차할 수 있는 시간은 앞서 언급한 바와 같이 5분이다. 운행 시격은 총 8분으로 앞 전 열차와 거리 1.5분 + 뒤 열차와의 거리 1.5분 + 화물 정차 5분으로 최소시격을 계산하고 있다(Oh et al., 2021). 안전한 운행을 위해서는 최대 운행시격이 10분이 되어야 하지만, 초기 시나리오 및 모델링을 기반으로 시작품 시스템 스펙을 적용하였을 때 6분 4초(364sec)가 나온 것은 성공적으로 개발이 되어가고 있다고 판단할 수 있다.

Table 5. Deriving improvements based on system specifications

	해결 주체	내용	난이도	비용
수평이송장치 속도	이송장치 제작사	수평이송장치의 현재 속도 (1.2m/s)를 올려 step 12 및 전후의 수평이송장치 이동으로 인한 시간 감소	A1	A2
수직이송장치 바닥재		수직이송장치의 바닥재가 회전하는 기능을 갖기 때문에 여러 개의 철판이 레일 형식으로 깔려 있으므로, 이를 평편하게 만들어 수평이송장치의 탑승 시간 감소	B1	B2
더미공간 확장	공간개발팀	화물열차에서 내린 수평이송장치들이 수직이송장치에 탑승하기 위해 대기하는 공간을 넓혀 시간에 구애받지 않도록 함	C1	C2
출입문 확대	차량개발 제작사	표준용기를 실은 화물열차의 출입구를 확장 또는 여러 개 만들어, 한 번에 하차시킬 수 있는 수평이송장치의 대수를 늘림	D1	D2

본 논문에서는 현재 개발 중인 지하공간 도시물류시스템을 기반으로 시나리오를 작성하고, 이를 모델링하였다. Table 5에는 Figure 12를 기반으로 가장 시간이 오래 소요되는 구간인 step 12에 해당하는 기능 및 개선해야 하는 내용에 대해 정리하였다. 이를 통해 개선되어야 할 구간에 대한 하위 객체(수평이송장치 이동 속도 등)를 판별할 수 있었다.

따라서 차후 연구에서는 Table 5를 활용하여 AHP(Analytic Hierarchy Process) 방법론(계층화 분석법)을 적용하여 각 해결 주체에 대한 난이도 및 비용을 도출하고, 수식(1)에 개선된 시스템 스펙을 대입하여 예상 정차시간을 도출할 수 있는 수식으로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

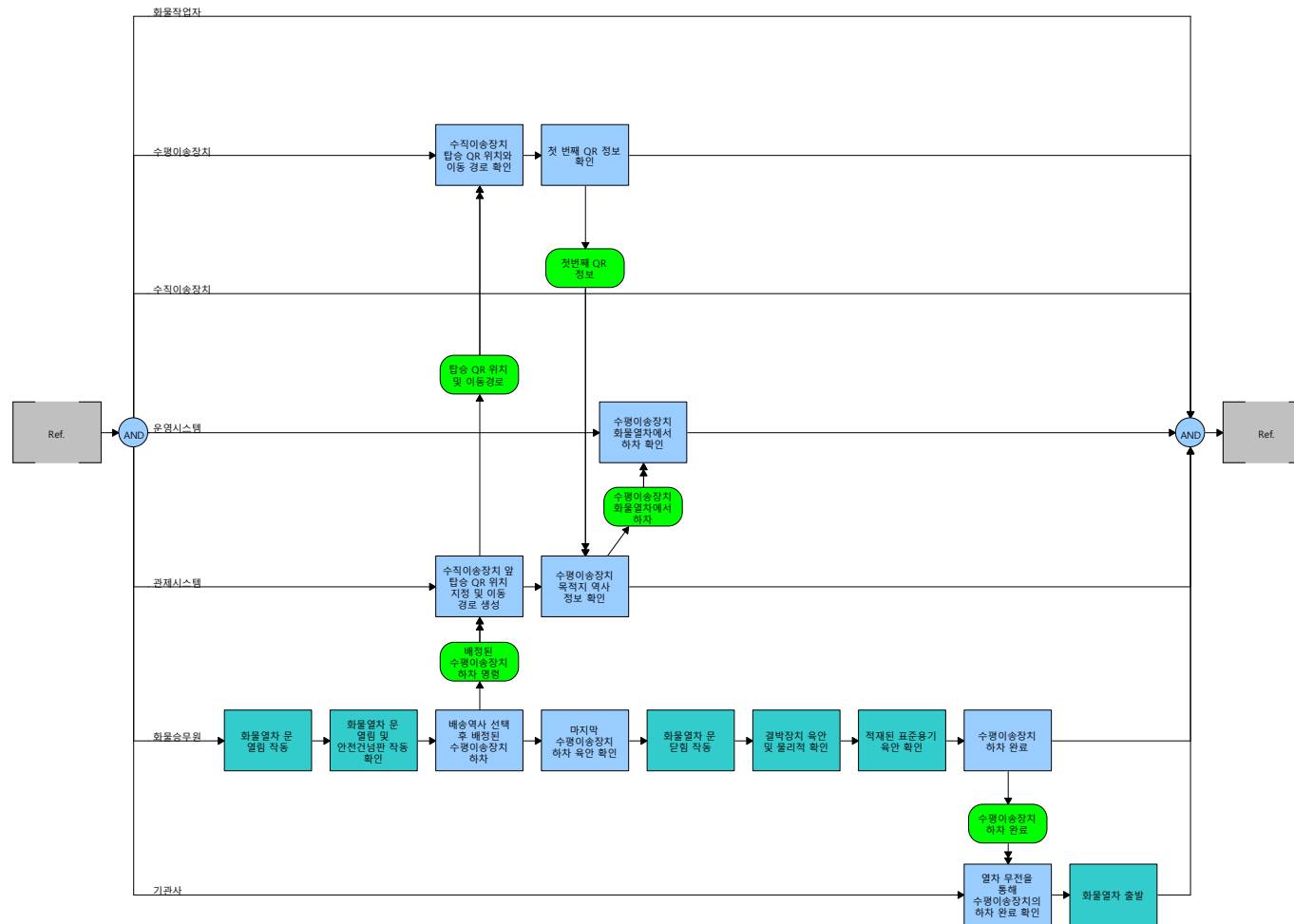


## 참고문헌

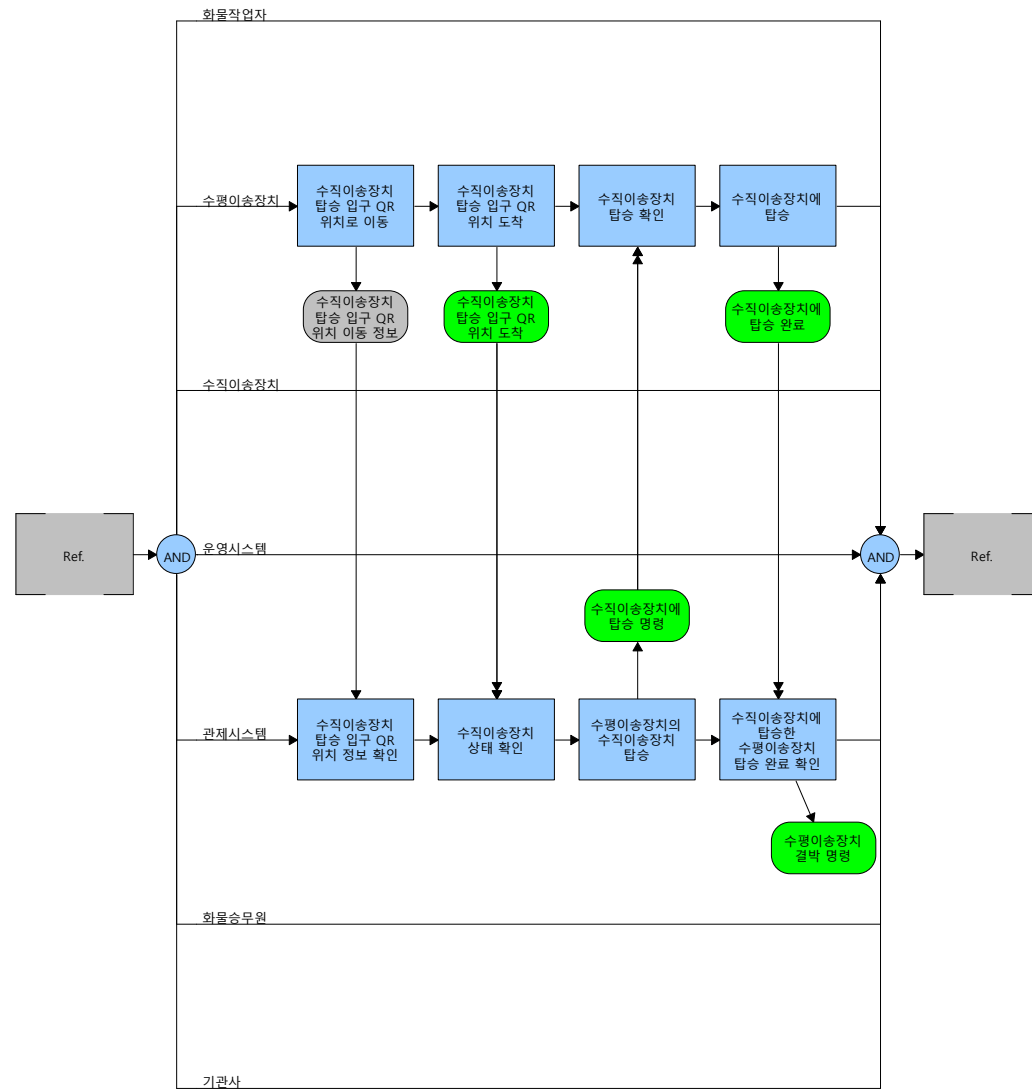
- Amesh2009 (2016), Volkswagen CarGo Tram, <https://www.youtube.com/watch?v=STZJuX4FL4w>, accessed on 2022.10.04.
- Cho, Y. S. and Yun M. K. (2001), Analysis of Korean parcel delivery market, *Korea Technology Innovation Society*, 2001, 245-270.
- Delaitre, L., (2012), Improving an urban distribution centre, the French case of Samada Monoprix, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012(39), 753-769, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.145>
- Efficacy (2016), Testing TramFret on the Saint-Etienne tram network, efficacy, <https://efficacy.com/wp-content/uploads/2018/01/18-EN.pdf>, accessed on 2022.10.04.
- European Commission, (2020), EU transport in figures: statistical pocketbook 2020, Publication of the European Union, <https://data.europa.eu/doi/10.2832/491038>, accessed on 2022.10.04.
- Han, J-S., Lee, S-M., Jeong, Y-M., Park, M-C. and Kim, S-H., (2021), Research on the Reduction of PM and GHG from Ground Freight Transportation, Korea Environment Institute, 24(1).
- Kang, C-R. and Lee, T-H., (2021), Study on the Green Packaging According to the Increase of Non-Contact Transaction: Focusing on Coupang and other distributors, *The Korean Society of Management Consulting*, 21(3), 407-418.
- Kikuta, J., Ito, T., Tomiyama, I., Yamamoto, S. and Yamada, T., (2012), New Subway-Integrated City Logistics System, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012(39), 476-489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.123>.
- KILA (2021), National Logistics Information Center, <https://koila.or.kr/>, accessed on 2022.09.27.
- Kim A-R., (2021), The dilemma of the delivery industry, Maeil, <https://www.m-i.kr/news/articleView.html?idxno=842960>, accessed on 2022.09.28.
- Kim, E. Y. (2022), Online shopping that has finished high growth, KTNEWS, <https://www.ktnews.com/news/articleView.html?idxno=121742>, accessed on 2022.10.04.
- Kim, E-J. and Kim, H-S., (2016), A study on the risk analysis method on the transport system, *Journal of Korean Navigation and Port Research*, 40(3), 147-157.
- Kim, J-H. and Hwang, M-Y., (2021), Parcel driver working environment problems and improvement plans, The Seoul Institute, 2021.03.08.
- Korea Transport Institute, (2021), 43 trillion won in social costs due to road traffic accidents... 2.3% of GDP, <https://www.mk.co.kr/news/economy/view/2021/04/334377/>, accessed on 2022.09.27.
- Kwon, H-B. and Jang, S-Y., (2010), State-of-the-Art and Prospects on Tube Transportation Technology for Development of Environment-Friendly Future Transportation system, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 23(3), 87-96.
- Kwon, H-B., Park, J-S., Nam, S-W. and Choi, S-K., (2008) Current status and prospect of tube transportation technology, *The Korean Society for Railway*, 11(3), 57-71.
- Lee, J. S., (2021), E-commerce market expected to reach 220 trillion won in 4 years, KTNEWS.

- Lee, J-S., Lim K-S., Nam, D-H., Kwon, H-B. and Kim, J-Y., (2008) Economic Feasibility and Technical Requirements for Tube Transportation System, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(5), 513-518.
- Lee, N-H., Kim, J-C., Lee, S-J., Park, K-H., Pyeon S-H. and Kim, Y-J., (2015) Operating scenario study by tram accident type, *The Korean Society for Railway*, 2015(5), 1268-1273.
- Menasce, D. (2014), Economic and social issues around Last Mile Delivery, *The journal of field actions*, Special issue 12
- Ministry of Land, Infrastructure and Trasnport, (2019), [https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx\\_cd=1245](https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1245), accessed on 2022.09.27.
- Oh, S-C., Lee, K-M., Chae, E-K. and Kim, M-S., (2013), Operation scenario and functional requirements for an automated train coupling/decoupling system, 2013(11), 826-831.
- Oh, S-M., Kwak, H-C., Kang, S-W., and Kim, H-S., (2021), A Study on Stop-Pattern of the Freight Train in the Urban Railway, *Journal of Korean Society for Urban Railway*, 9(4), 1041-1047, DOI : 10.24284/JKOSUR.2021.12.9.4.1041
- Shim, J-I., Yu, J-B. and Park, I-K., (2005) Consideration of the Social Cost of Transportation, The Korea Transport Institute.
- Son, S-H., Choi, D-G. and Jang, J-W., (2021) Deep Learning-based Parcel and Classification System Development research, Proceedings of the Korean Institute of Information and Communication Sciences conference, 25(2), 323-325.
- Statista (2022), Global parcel shipping volume between 2013 and 2027 (in billion parcel), <https://www.statista.com/statistics/1139910/parcel-shipping-volume-worldwide/>, accessed on 2022.10.04.
- Yoon, Y-K., Oh, S-C., Lee, K-M., Jo, H-J. and Kim, Y-K., (2011), A Study of Operational Scenarios for the Wireless communications Based Train Control System, *The Korea Society for Railway*, 2011(5), 904-909.

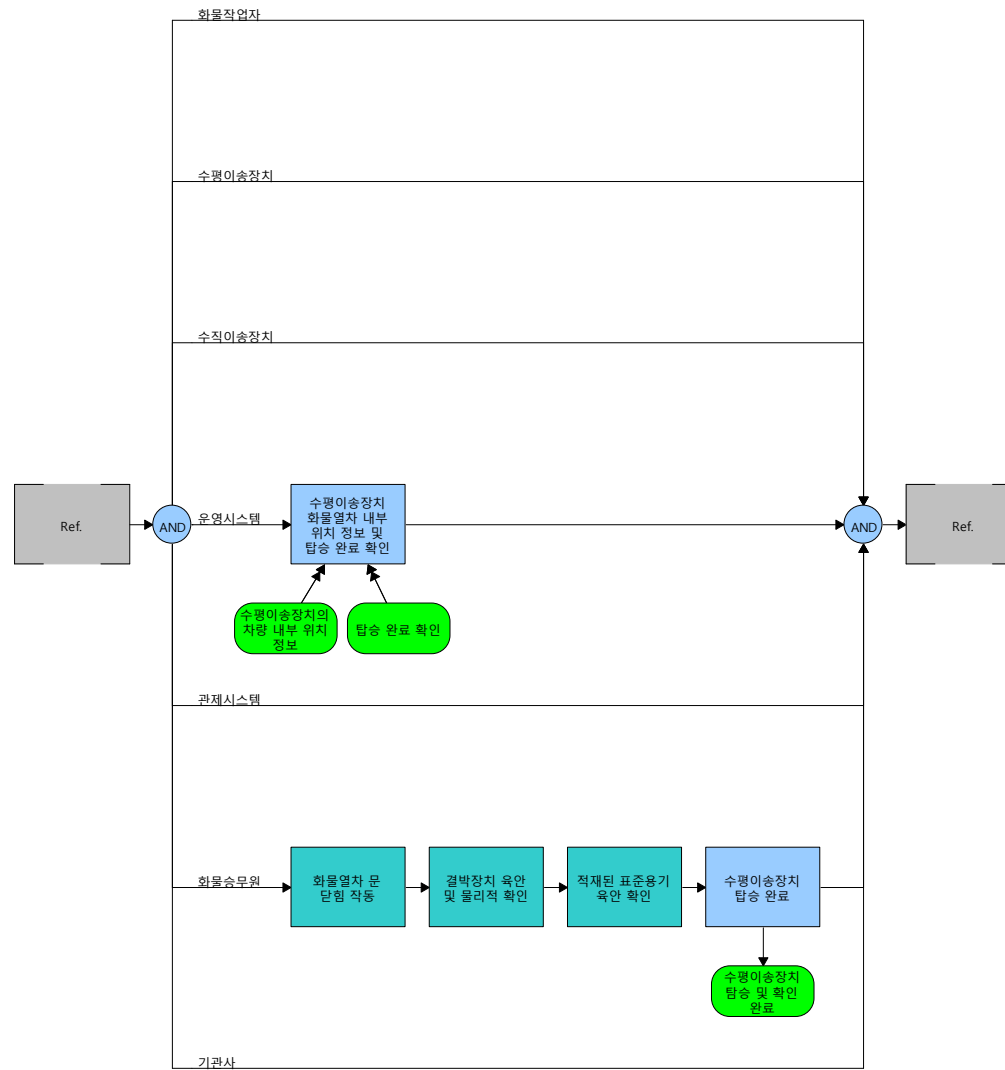
### 1) 수평이송장치 하차 시나리오



## 2) 수직이송장치 탑승 시나리오



### 3) 수평/수직이송장치 결박 시나리오



## 요약문

COVID-19 팬데믹은 물류량 급증으로 인해 세계적인 사회·경제적 이슈를 초래하였다. 이에 대응하기 위한 대안으로, 여러 국가에서는 도시철도의 활용 가능성에 대한 연구를 실시하였다. 그러나, 지하공간을 활용하는 물류 운송 시스템을 위한 통합적이고 구체적인 프레임워크를 마련하는 과정에서는 여전히 어려움이 존재한다. 본 연구는 한국에서 개발 중인 지하공간(도시철도 인프라)을 활용한 도시물류시스템에 대한 새로운 시나리오 개발을 수행하였다. 시나리오 개발은 EFFBD 기반의 모델을 도입하여 수행되었으며, 시간선 분석을 통해 그 유효성을 검증하였다. 검증 과정에서 초기 하위 시스템 표준이 성공적으로 확립된 것을 확인했고, 이는 실제 환경에서 모델의 잠재적 적용성을 시사한다. 본 연구는 지하공간을 물류 네트워크에 통합하는 가능성을 제시함으로써, 지하물류 분야에 관한 후속 연구를 촉진하는 중요한 발판을 제공한다. 지하공간의 활용 가능성을 제시함으로써, 물류 분야의 지속 가능한 발전을 도모하고 도시 물류 시스템에 대한 학술적 및 실무적 논의에 결정적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.

**주제어:** 지하 화물 체계, 운영 시나리오, 향상된 기능흐름 블록 다이어그램, 시간선 분석

# 지역경제파급효과 분석을 통한 도시철도 공동물류 플랫폼 실용화 방안 연구

홍수민<sup>1</sup>, 윤희성<sup>2</sup>, 장경호<sup>3</sup>, 황선우<sup>4</sup>, 김영민<sup>5\*</sup>

<sup>1,2,3</sup>서울교통공사 교통정책연구팀 / <sup>4</sup>아주대학교 시스템공학과 / <sup>5</sup>아주대학교 물류시스템 및 SCM학과  
/ <sup>1</sup>서울시립대학교 교통공학과

## A Study on the Commercialization of the Joint Logistics Platform of Urban Railway through the Analysis of the Regional Economic Spread Effect

Sumin Hong<sup>1</sup>, Heesung Yoon<sup>2</sup>, Gyungho Jang<sup>3</sup>, Sunwoo Hwang<sup>4</sup>, Youngmin Kim<sup>5\*</sup>

<sup>1,2,3</sup>Transportation Policy Research Team, Seoul Metro

<sup>4</sup>Department of Systems Engineering, Ajou University

<sup>5</sup>Department of Logistics System & SCM, Ajou University

<sup>1</sup>Department of Transportation Engineering, University of Seoul

Recently, with the increase in single-person households and the activation of e-commerce, small-volume and frequent parcel delivery is rapidly increasing. In the case of the metropolitan area, which accounts for about 70% of the national parcel delivery volume, social problems such as traffic and environmental problems are constantly being caused due to the continuous increase in the number of cargo vehicles in the city. Accordingly, it is necessary to establish a logistics complex located close to Seoul and introduce a joint logistics system that prevents overlapping investments between companies. But, because logistics continues to increase, there is a limit to the introduction of new logistics models. In this study, in order to solve this problem, a joint logistics platform using urban railway, a new logistics model, was presented, and an analysis of regional economic ripple effects based on direct and indirect benefits was conducted to prove the practicality of this model. Socio-environmental costs and logistics costs, including vehicle operating costs, operating costs, air pollution, greenhouse gas, noise costs, accident costs, and congestion costs, were calculated as direct benefits, and inducements necessary for calculating indirect benefits necessary for analyzing the ripple effects on the local economy. The coefficient considered production inducement effect, added value inducement effect, and employment (employment) inducement effect. As a result, the direct benefit was about 1.1 trillion won, and the production inducement effect of Seoul was 1.26. The outputs derived from this paper can be used as a basic study to secure justification in developing a practical business model for an urban rail joint logistics platform.

**Keywords:** Joint Courier Logistics Base Infrastructure, Analysis of the Regional Economic Spread Effect, Preliminary Feasibility Analysis, Urban Railway Logistics System

논문접수일 : 2022.10.09. 논문수정일 : 2023.05.29. 게재확정일 : 2023.06.02.

본 논문은 2023년도 정부(국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(21HCLP-C163194-01)

1. 서울교통공사 교통정책연구팀 과장, 서울시립대학교 교통공학과 박사과정

2. 서울교통공사 교통정책연구팀 대리

3. 서울교통공사 교통정책연구팀 처장

4. 아주대학교 시스템공학과 박사과정

5\*. 아주대학교 물류시스템 및 SCM학과 교수, Corresponding Author: pretty0m@ajou.ac.kr

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 필요성

최근 1인 가구의 증가와 전자상거래 활성화로 B2C 물류시장이 급성장함에 따라, 소량, 다빈도의 택배 물류가 급격히 증가하고 있는 추세에 있다. 2021년 기준, 택배 물동량은 36억 box로 2013년 이후 연평균 11%의 고성장 추세에 있다. 이에 대한 내용은 <Figure 1>의 국가물류통합정보센터 생활물류 통계 자료 중 택배업 매출액 및 물동량 추이에서 나타내고 있다. 특히, 전국 택배 물동량의 약 70%를 차지하는 수도권 경우, 택배 물동량 증가로 인하여 도시 내 화물차량의 지속적인 증가로, 교통문제와 환경문제 등의 사회적 문제가 끊임없이 야기되고 있는 시점이다. 또한, 당일배송, 새벽배송 등의 새로운 물류 모델의 수요가 지속적으로 증가하고 있지만, 이를 기존 도심물류 인프라를 활용하여 물류 서비스를 제공하기에는 실질적으로 공간적, 제도적 한계가 있다. 따라서 기존 지상 도로 중심의 도심 물류 시스템을 넘어서 지하 공간을 활용하는 새로운 도시물류 인프라 구축의 필요성이 증대되는 시점이다. 도시철도를 활용한 지하 도시물류 인프라 구축을 위해서는 도시철도의 시발점인 차량기지에 대한 공동 물류 센터의 구축이 필수적이며 이러한 공동 물류 플랫폼 구축을 위해서는 정책적 영역에서의 많은 투자가 필요하다. 이러한 시대적 요구에 맞춰서 프랑스, 독일, 일본, 스위스 등의 해외에서는 도시철도, 트램, 튜브 등을 활용한 도심물류 시스템의 효용성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 우리나라 수도권이 직면하고 있는 사회적 문제를 위한 특성에 맞는 물류 모델은 전무한 상황이며, 수도권 내의 물류 수요를 해소하기 위한 공동물류 플랫폼의 개념이 제시와 투자를 위한 분석이 필요한 시점이다.

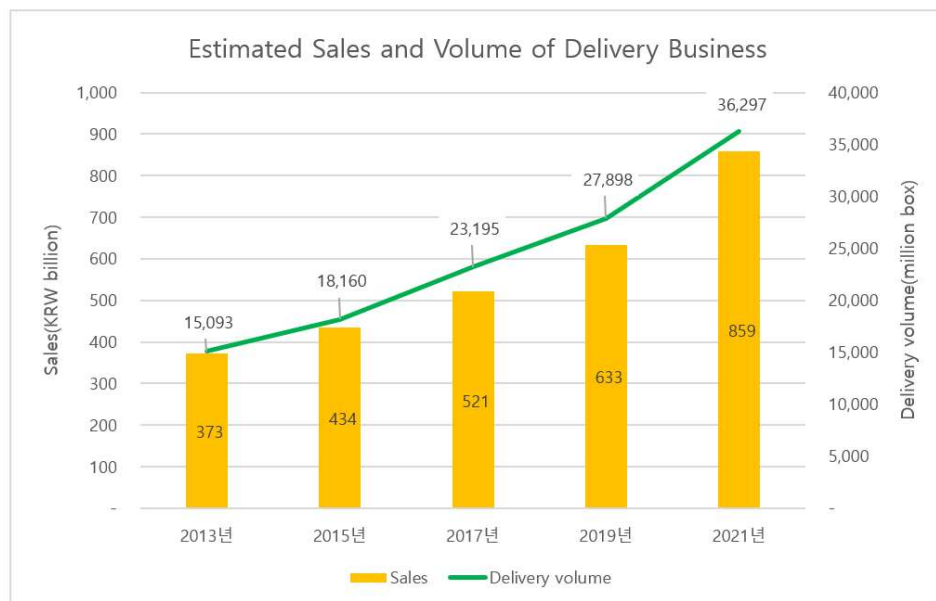


Figure 1. Estimated Sales and Delivery Volume

물류 수요의 증가로 인한 사회적 문제를 해결하기 위하여, 수도권 특성에 맞는 물류 모델을 개발하기 위해서는, 먼저, 수도권에 위치되어있는 물류 단지 현황 파악이 중요하다. 수도권의 물류 단지는 물류시설(물류터미널, 공동집배송단지, 도소매단지, 농수산물도매시장 등)과 지원시설을 집단적으로 설치, 육성하기 위하여 지정, 개발하는 일단의 토지로 정의되며, 수도권 지역의 물류단지는 대부분 경기도에 분포하고 있다. 서울시 소재 물류 터미널은 동부물류터미널, 한국트럭터미널, 서부트럭터미널 3곳이었으나, 현재는 동부물류터미널이 폐쇄되어, 2곳만 운영 중인 시점이다. 물류 터미널 외에 수도권 내 물류시설 현황을 <Table 1>



에 나타내었다. 현재 서울시 내 소규모 물류시설은 용지부족, 지가 상승으로 인한 비용부담 및 물류관련시설에 대한 시민들의 혐오 등으로 서울시 외곽의 수도권으로 이전하는 추세를 보이고 있다. 최근 전자상거래 발달로 인하여, 도시물류 수요가 급격하게 증가함에 따라서, 서울시 내 물류시설 개발 및 공급의 필요성이 제기되고 있으나, 현실적으로는 매우 어려운 한계점을 가지고 있다. 우리나라 전체 국민을 기준으로, 2021년 1인당 택배 이용 횟수는 70.3회/년으로, 2020년 65.1회/년보다 5.2회/년 높게 집계되었다. 택배 단가는 2012년부터 2018년까지 감소하는 추세를 보였으며, 2019년부터 2020년까지 불특정한 보험 추세를 보이다가, 2021년 2,366원으로 증가하였다. 현 시점에서의 택배업은 우리 사회의 필수적 요소로써 인식되어가고 있으며, 2022년 10월 기준 서울시는 「2022 미래물류혁신포럼」에서 4차 산업혁명에 기반한 스마트 도시물류체계를 구축 계획을 밝혔으며, 지자체와의 도시 물류 체계를 구축을 통해 유통혁신, 일자리 창출 계획을 밝힌 바 있다. 현대 사회에서 수도권 및 대도시로의 인구 고밀도화, 집중화로 인하여, 물류, 유통업은 크게 팽창하는 시기를 맞이하고 있으며, 이에 대한 문제가 대두되기 전에 예방 차원의 조치가 필요한 시점이다.

Table 1. Logistics Complex In Capital Area

Group	Logistic Complex	Location	Area[㎡]	Sales Rate	Note
Seoul	Seoul Southeastern	Songpa-gu, Seoul	560,694	100%	operation
Incheon	Gyeongin ARA Waterway Incheon	Seo-gu, Incheon	1,145,026	96%	operation
Gyeonggi	Yeoju Chelsea	Yeoju	264,242	100%	operation
	Icheon Fashion	Icheon	796,706	100%	operation
	Gwangju Docheok	Gwangju	278,016	100%	operation
	Gwangju Chowol	Gwangju	264,529	99%	operation
	Pyeongtaek Doil	Pyeongtaek	486,062	100%	operation
	Anseong Miyang	Anseong	136,942	100%	operation
	Anseong Wongok	Anseong	682,398	99%	operation
	Hwaseong Dongtan	Hwaseong	460,670	100%	operation
	Bucheon Ojeong	Bucheon	457,856	77%	operation
	Gimpo Gochon	Gimpo	894,454	100%	operation
	South Yeoju	Yeoju	206,955	-	construction
	Gwangju Opo	Gwangju	191,417	-	construction
	Gwangju Jikdong	Gwangju	571,410	-	construction

## 1.2 물류 수요 증가로 인한 사회적 문제 식별

### 1) 교통혼잡 문제

장래 서울시의 지속적인 교통량 증가에 따라, 교통혼잡이 증가되고 있으며, 이로 인한 사회적 비용도 점차 증가할 것으로 예상된다. 특히, 전국의 전체 교통혼잡비용 중 서울을 포함한 수도권에서 차지하는 비용이 51.7%로써, 높게 집계되어 수도권의 교통혼잡으로 인한 사회적 비용이 국가 전체에서 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었으며, 서울시 내의 전체 화물차 통행비용이 17.4%를 차지함을 고려하였을 때, 화물차가 전체 교통혼잡비용에 미치는 영향이 적지 않을 것으로 예상된다. 이는 물류산업에 있어서도, 교통혼잡이 심화될수록 통행시간이 증가됨에 따라, 배송시간이 증가된다는 사실이 자명하며, 따라서, 화물비용이 증가되

어 물류산업의 국가경쟁력을 악화시키는 결과를 초래할 수 있다. 이에 따라, 서울시는 정책적으로 도심 내에서의 대형 화물차량의 진입 금지 방안을 계획하고 있는 시점이다.

## 2) 택배 근로자 근로조건 악화 문제

서울노동권익센터에서는 서울지역 택배기사 500명을 대상으로 설문조사를 실시한 결과, 택배기사의 노동시간은 오전 7시에 출근하여 저녁 8시 이후 퇴근, 하루 13시간 이상의 장시간 노동을 하는 것으로 조사되었다. 이는 택배기사의 업무가 명확하지 않아, 집·배송 업무는 물론 화물취급 및 분류작업까지도 병행하고 있는 실정이기 때문이다. 또한, 택배기사를 대상으로 교통사고 경험 여부에 대한 조사를 실시한 결과, 전체 택배기사의 18.4%가 교통사고 경험이 있다고 응답하였으며, 8.8%가 작업장에서의 안전사고 경험이 있다고 응답하였다. 또한, 55.6%가 택배 업무에 종사하면서 허리나 다리를 빼끗한 경험이 있다고 응답하였다.

## 3) 대기환경오염 문제

최근 미세먼지 등 환경문제에 대응하기 위해 정부는 관계부처 합동으로 「미세먼지 관리 종합대책」 및 「2030 국가 온실가스 감축 로드맵」 등의 다양한 정책을 시행할 예정에 있다. 이중 「미세먼지 관리 종합대책」에서는 전국 배출량의 12%가 경유차량이 차지하고 있으며, 대도시 미세먼지 기여도 1위인 상황이다. 이에, 도로 수송 부문의 미세먼지 감축 대책으로 노후 경유차 저공해 및 운행제한 확대, LPG 및 전기차 등 친환경차 보급 확대 등을 개선책으로 제시할 예정이다. 「2030 국가 온실가스 감축 로드맵」에서는 2030년까지 온실가스 배출량을 기존 감축 로드맵 전망치인 850.8백만 톤에서 536.0백만 톤 이내로 유지하는 것을 감축목표로 설정하였으며, 수송부문은 온실가스 주요 감축수단으로 전기차 보급 확대(100만대 → 300만대), 친환경 대중교통 확충, 자동차·선박·항공기 연료효율 개선 등의 로드맵을 수립하여 추진 중에 있다.

## 1.3 연구 절차

본 논문에서는 수도권 물류 수요 증가에 따라, 택배 물동량 증가로 인하여 도시 내 화물차량의 지속적인 증가로, 교통문제와 환경문제 등의 사회적 문제가 끊임없이 제기되고 있는 현재 시점에서, 지역경제파급효과 분석을 통한 도시철도 공동물류 플랫폼 실용화 방안에 대한 연구를 수행하였다. 1장에서는 연구배경 및 필요성, 물류 수요의 증가로 인한 사회적 문제 등을 기술하였으며, 2장에서는 도시철도 공동물류 플랫폼 활성화를 위한 관련 선행연구 방법론 분석과 상세 방법론을 기술하였다. 3장에서는 직접편익과 간접편익을 산정하였으며, 4장에서는 지역경제파급효과 분석 결과에 대한 정리를 기술하였다. 마지막으로, 5장에서는 본 연구의 시사점 도출에 대한 제언 및 결론으로 마무리 지었다. 본 논문은 도시철도 공동물류 플랫폼과 관련한 선행연구를 분석한 결과를 토대로, 지역경제파급효과 분석을 수행하였다. 이에 따라, 본 논문의 결과로써 도출되는 산출물은 도시철도 공동물류 플랫폼의 실용적인 비즈니스 모델을 개발하는데 있어서, 추진의 당위성 확보를 위한 개선방안 도출의 기반 연구로써 활용될 수 있다. <Figure 2>는 연구 절차를 나타낸다.

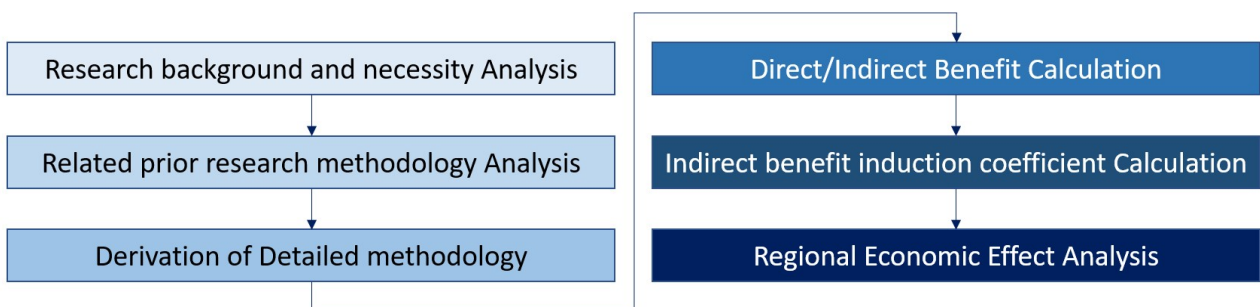


Figure 2. Process of Regional Economic Effect Analysis

## 2. 연구 방법론

### 2.1 선행연구 분석을 통한 방법론 도출

본 절에서는 지역경제파급효과 분석을 통한 공동물류 플랫폼 실용화 방안 연구를 위하여, 관련 선행연구 분석을 수행한 결과를 기술하였다. 조정란 등은 중소기업을 위한 KOTRA 지원 해외 공동물류 플랫폼의 평가 및 발전방안에 관한 연구를 수행한 바 있다(Cho and Cheong, 2012). 본 연구는 복합물류 서비스를 제공하기 위해서는 최소한 종합 물류기업이 참여하여 통합 물류 서비스, 수·배송 서비스, IT 솔루션 서비스 등을 제공하고, 정부는 전시 및 무역 서비스, 보험 및 금융서비스, 업무 지원 서비스를 지원함으로써 공동물류 플랫폼의 기능 개선 및 확대의 필요성을 주장했다. 박원근 등은 수도권을 연구 대상으로 선정하여, DEA 모델을 활용한 공동물류 플랫폼 이용업체의 효율성 분석 연구를 수행한 바 있다(Park et al., 2013). 본 연구에서는 임차료, 소요 면적을 투입변수로 활용하였고, 평균 보관량/물동량을 산출변수로 활용하였으며, 분석 결과, 임차료를 비롯한 투입 및 산출 요소를 증감시키는 것은 개별기업의 역량으로는 한계가 있기 때문에 정부의 관심 및 장기적인 정책 마련이 필요하다는 점을 도출하였다. 민세홍 등은 부산항 국제선용품유통센터를 활용한 선용품 공동물류 운영방안에 관한 연구를 수행한 바 있다(Min et al., 2015). 본 연구에서는 선용품 센터의 초기 건립 목적인 공동물류를 하나의 해결 방안으로 선정하여, 선용품 공동물류를 운영함에 따라, 핵심 요인 도출에 관한 연구를 수행하였다. AHP와 IPA의 공통된 결과로 보관비용 절감, 위당 물류비용 감소, 차량적재율 향상을 통한 배송비 절감 등 비용 측면이 선용품 공동물류를 운영하는 데 있어 중요한 요인으로 도출되었다.

서상석 등은 공동물류사업의 관점에서 물류협력지수의 개발 및 측정에 관한 연구를 수행한 바 있다(Suh et al., 2016). 본 연구에서는 공동물류 사업이나 물류 분야의 협력관계 구축이 업무 레벨이 아닌 기업 운영의 전략적 측면에서 공동물류 사업이 추진되어야 함을 주장했으며, 공동물류 사업은 물류 관리비 절감의 단순한 목표 보다는 기업간 협력을 통한 시장 확대와 성장의 발판으로써, 추진 및 계획되어야 한다고 주장했다. 장상영 등은 공동물류 플랫폼의 혼합추천시스템 기반의 차주·화주 중개 서비스 구현 연구를 수행한 바 있다(Jang et al., 2016). 본 연구에서는 과거의 이력 데이터를 바탕으로 화주나 물류 업자의 특성을 남기 민감, 비용 민감, 안전성 민감 등으로 분류하고, 클러스터링을 통해 업체를 특징별로 군집화하였다. 화주와 배송업체를 연결하여 중개기술의 추천 성과율이 높게 나왔다는 것은 클러스터링과 분류기반의 새로운 추천시스템이 기존의 연구와는 차별성을 보였다는 점에서 해당 연구는 의의를 가질 수 있다고 판단된다. 권민택은 컴퓨터 시뮬레이션을 활용한 공동물류 플랫폼 입지선정 분석모델에 관한 연구를 수행한 바 있다(Kwon, 2018). 본 연구에서는 물류시설 간의 상호의존성을 향상시키고 상생할 수 있는 공동구매를 통해 원가절감과 충분한 물량을 확보하고, 공동화, 통합화, 규모화를 통한 시장 범위를 확대하는 것이 가장 실질적인 대안이라는 점을 도출하였다. 문인구는 포스트 코로나 시대의 온라인 배송을 위한 공동물류 플랫폼 활성화에 관한 우선순위 연구를 수행한 바 있다(Moon, 2020). 본 연구는 온라인 중심의 소비로의 전환이 가속화되는 시점에 온라인 배송을 위한 공동물류센터 활성화를 위하여 제도지원적, 기업특성적, 운영특성적, 의사소통, 정보시스템 요소 5가지와 하위요소 20가지를 구성한 후 AHP 기법을 활용하여 우선순위를 연구하였다. 상위요소 5가지 중에서의 우선순위는 운영특성적 측면, 기업특성적 측면, 정보시스템 측면, 의사소통, 제도 지원적 측면 순으로 확인되었다. 결론적으로, 공동물류 플랫폼에 참여하는 기업의 특성이 다양하기 때문에 모든 기업의 요구를 충족시켜 줄 수 있는 다양한 형태의 서비스가 제공되어야 공동물류가 활성화 될 수 점을 도출하였다.

오승철 등은 공동물류 플랫폼 개발을 통한 중소택배 경쟁력 강화 방안 연구를 수행한 바 있다(Oh et al., 2017). 본 연구는 80% 이상의 국내 택배시장을 잠식하고 있는 대형택배기업과의 경쟁에서 살아남기 위해서는 중소택배기업은 택배서비스의 품질을 향상시켜야 한다는 목표를 가지고 수행되었다. 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하고 중소택배기업의 경쟁력을 강화시키는 방안으로, 공동물류 비즈니스 모델과 공동배송 비즈니스 모델을 제시하였다. 중소택배기업이 공동으로 현대화된 공동화물터미널을 활용하였을

경우, 공동물류 비즈니스 모델은 업무 효율성을 달성하고 택배 서비스 경쟁력을 강화할 수 있으며, 궁극적으로는 자본과 기술이 영세한 중소 택배업자가 개별적으로 추진하기 어려운 정보화 및 자동화 사업 등을 공동 또는 상호협력으로 추진하여 중소택배업의 경쟁력을 향상시킬 수 있다는 점을 결론으로 도출하였다.

기존 공동 물류 플랫폼에 대한 개별 물류 시스템 대비 공동 물류의 장점 및 기업간 협력 방안에 대한 연구가 이루어졌으나 정책적 방향에서 실제 투자를 위한 투자 타당성에 대한 분석은 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 지역경제파급효과 분석을 통한 도시철도 공동물류 플랫폼 실용화 방안 연구로써, 단계상 예비타당성 수준의 초기단계임을 고려하여, 활용한 효과분석 방법론은 관련 지침인 공기업·준정부기관 사업 예비타당성 수행을 위한 일반지침 수정·보완연구에서 제시하는 평가분석방법을 활용하였다 (이정권, 정동호 (2018, KDI)). 해당 지침에서 제시하는 사업의 평가분석은 크게 공공성 평가와 수익성 평가가 있으며, 공공성 평가는 다시 경제성 평가와 정책성 분석으로 구분된다. <Figure 3>은 이에 대한 내용을 도시한다. 경제성 평가는 일반적인 공공사업의 평가 시 활용되는 사회경제적 편익분석을 다루며, 정책적 분석은 정책적 일관성, 지역균형발전효과 등 정책적 측면을 평가한다. 재무적 평가는 사업주체의 입장에서 실제 투입되는 비용과 이에 따른 사업의 수익성을 분석하여 투자 수익성을 평가한다. 본 연구에서는 공공성 평가의 한 방안인 사회경제적 효과분석을 수행하였다.

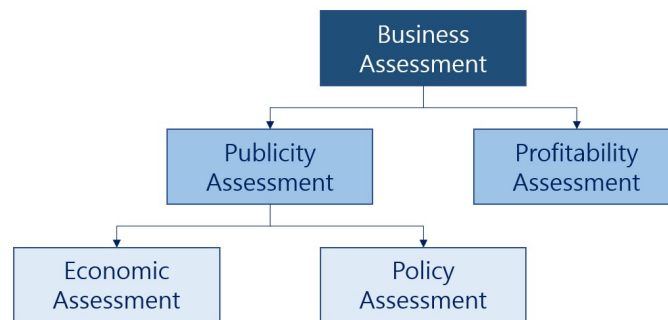


Figure 3. Business Assessment

사회경제적 편익분석은 공공사업을 시행할 때, 개별 사업주체의 입장이 아닌 국가 전체적(사회적) 입장에서 예상되는 공공의 편익을 분석하는 과정으로써, 일반적인 재무분석 시 활용되는 수익 분석과는 상이한 점을 보인다. 도시철도 공동물류 플랫폼은 1단계 차량기지 개발과 2단계 화물열차 운행으로 구분되며, 본 연구에서는 1단계와 2단계의 구분 그대로를 적용하였다. 사업성 평가와 관련된 우리나라의 관련지침인 「교통시설 투자평가지침, 국토교통부, 2017」에서는 물류시설에 대해 직접편익과 간접편익으로 구분하고 있다. 직접편익으로는 화물차량의 대형화로 인한 수송비 절감, 하역작업의 기계화 및 자동화로 인한 물류비 절감을 제시하고 있으며, 간접편익으로는 화물차량 통행량 감소에 따른 도로교통 혼잡 해소, 사고 감소, 환경비용 감소를 제시하였다. <Table 2>는 이에 대한 내용을 도시한다.

Table 2. Business Assessment Sortation

Sortation	Contents
Direct benefit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduction of transportation costs due to mass transportation by maintenance service</li> <li>- Reduction of logistics costs due to automation of loading and unloading operations</li> <li>- Reduction of logistics costs due to ICD creation</li> </ul>
Indirect benefit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elimination of road traffic congestion</li> <li>- Reduction of traffic accidents</li> <li>- Reduction of environmental costs</li> <li>- Reduction of maintenance costs of road-related facilities, such as roads and bridges</li> </ul>

### 3. 지역경제파급효과의 편익 산정

본 연구에서의 편익항목은 직접편익과 간접편익으로 구분하였으며, 각 단계별 편익항목은 <Table 3>과 같다. 직접편익 중 1단계 차량기지 개발로 인한 편익은 물류체계 개선으로 인한 차량운행비용 절감편익과 상하역 작업 기계화 및 자동화로 인한 운영비용 절감편익을 주요 편익으로 고려하였으며, 2단계 화물열차 운행으로 인한 편익은 도로로 운송되는 물동량이 철도로 전환되었을 경우의 물류부문 관련 사회 및 환경적 비용 편익 및 물류비용 편익으로 고려하였다.

Table 3. Business Assessment Sortation

Sortation		Contents
Direct benefit	Level 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Benefits of reducing vehicle operating costs</li> <li>- Benefits of reducing operating costs</li> </ul>
	Level 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Benefits of social and environmental cost</li> <li>- Benefits of logistics costs</li> </ul>
Indirect benefit		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regional Economic Impact             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Production inducement effect</li> <li>• Value-added inducement effect</li> <li>• Employment inducement effect</li> </ul> </li> </ul>

### 3.1 직접편익 산정

<Table 4>와 같이, 본 연구에서는 각각의 단계별로 산정된 차량운행비용(a), 운영비용(b), 대기오염, 온실가스, 소음비용, 사고비용, 혼잡비용을 포함한 사회 환경적 비용(c)과 물류비용(d)을 「중부권 광역우편집중국 건립사업 예비타당성조사」에서 제시한 편익 원단위를 반영하여, 소비자물가지수로 보정을 수행하였다.

Table 4. Business Assessment Sortation

Sortation	Contents			Unit
Level 1	Vehicle operating costs(a)		37.17	KRW
	Operating costs(b)		83.05	
Level 2	Regional Economic costs(c)	Air pollution	82.3	KRW/ton-km
		Greenhouse gases	22.8	
		Noise cost	6.2	
		Accident cost	23.9	
		Congestion cost	46.6	
		Sum	181.8	
	Logistics costs(d)		288.3	

직접편익 산정에서 무게환산은 화물을 초소형, 각각 2kg, 5kg, 10kg, 30kg, 30kg 이하 및 규격 외로 분류하였고, 소포량과 kg 중위값을 조합하여 산출하였다. 일평균 운행거리는 「택배기사 노동실태와 정책대안 모색」에서 제시한 일평균 운행거리 평균값을 적용하였다. 이에 따른 직접편익 산정 결과는 타겟 물동량 5%와 20%를 기준으로 적용하여, 차량기지별 직접편익 산정 결과로 <Table 5>, <Table 6>과 같이 나타났다.

Table 5. Calculation Results of Benefits by Vehicle Base(Target Volume 5%)

Sortation		Fulfillment Center				Joint Courier Logistics Center						Total
		A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	
Lv. 1	(a)	113.6	57.2	112.8	95.8	7.5	5.2	22.6	13.6	7.7	19.4	455.5
	(b)	253.8	127.8	252.1	214.0	16.8	11.7	50.5	30.5	17.3	43.2	1,017.7
	sun	367.3	185.1	365.0	309.7	24.3	17.0	73.0	44.1	25.0	62.6	1,473.2
Lv. 2	(c)	123.2	62.1	122.4	103.9	8.2	5.7	24.5	14.8	8.4	21.0	494.2
	(d)	195.4	98.4	194.1	164.8	13.0	9.0	38.9	23.4	13.3	33.3	783.6
	sum	318.6	160.5	316.6	268.6	21.1	14.7	63.4	38.2	21.7	54.3	1,277.8
Total sum		686.0	345.6	681.5	578.4	45.5	31.7	136.4	82.3	46.8	116.9	2,751.0

Table 6. Calculation Results of Benefits by Vehicle Base(Target Volume 20%)

Sortation		Fulfillment Center(A)				Joint Courier Logistics Center(B)						Total
		A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	
Lv. 1	(a)	454.3	228.9	451.3	383.0	30.1	21.0	90.3	54.5	31.0	77.4	1,821.8
	(b)	1,015.1	511.4	1,008.5	855.9	67.3	46.9	201.9	121.8	69.2	173.0	4,070.9
	sun	1,469.4	740.2	1,459.9	1,238.9	97.4	67.8	292.2	176.3	100.2	250.4	5,892.7
Lv. 2	(c)	492.9	248.3	489.7	415.6	32.7	22.7	98.0	59.1	33.6	84.0	1,976.6
	(d)	781.6	393.8	776.6	659.0	51.8	36.1	155.4	93.8	53.3	133.2	3,134.5
	sum	1,274.5	642.1	1,266.3	1,074.6	84.5	58.8	253.4	152.9	86.9	217.2	5,111.1
Total sum		2,743.9	1,382.3	2,726.1	2,313.5	181.9	126.6	545.6	329.3	187.0	467.6	11,003.9

### 3.2 간접편익 산정

산업연관분석은 최종수요의 변동(소비 혹은 투자)이 각 산업의 생산활동에 미치는 직·간접의 파급효과를 계측하는 것이다. 최종수요 변동으로 인한 경제적 파급효과는 보통 세 가지, 즉, 생산 유발효과, 부가가치 유발효과, 고용 및 취업 유발효과 측면에서 파악한다. 부가가치 유발효과는 다시 부가가치를 구성하는 항목별로 각각의 유발효과로 나눌 수 있다. 본 연구의 간접편익은 산업연관모형(Input-Output Model)과 관련이 있으며, 산업연관모형이란 한 경제에서 생산되는 재화와 서비스의 산업간 거래 관계, 즉, 일정 기간 중 생산된 모든 재화와 서비스의 각 산업간 거래(최종수요와 산업 간의 거래 및 원초적 투입요소와 산업 간의 거래)를 일정한 체계에 따라 정리한 일반균형 통계체제를 말한다. 산업연관모형을 한 국가경제를 대상으로 하지 않고, 그 국가 내의 특정 지역을 대상으로 작성하게 되면 지역 간 산업연관모형(IRIO, Inter Regional Input-Output Model)이 된다. 한 국가 경제를 대상으로 하는 산업연관모형의 경우는 산업간 거래가 국내 산업간 거래와 국외 거래뿐이지만, 한 국가 내의 특정 지역을 대상으로 하는 지역 간 산업연관모형의 경우, 지역 내 산업간 거래와 국외 거래 이외에 국내 다른 지역 간의 거래가 추가된다는 특징이 있다.

공기업·준정부기관사업 예타 수행을 위한 일반지침 수정·보완연구 보고서에서는 한국은행에서 발표한 지역간 산업연관모형을 활용하여, 사업시 행에 따른 생산 유발효과, 부가가치 유발효과, 고용(취업) 유발효과 측면에서 검토할 수 있으며, 부가가치 유발효과는 다시 부가가치를 구성하는 항목별로 각각의 유발효과를 나누어 검토할 수 있다고 제시하였다. 또한, IRIO 모형을 통해 산출된 지역경제 파급효과를 보고서에 명시하여 사업의 추진 여부를 결정하는데 참고자료로 이용할 수 있다고 제시하였다. 본 연구에서는 한국은행에서 제시한 지역산업 연관표를 적용하여 지역경제 파급효과 분석을 수행하였다. 추가로, 본 연구의 간접편익은 「공기업·준정부기관사업 예타 수행을 위한 일반지침 수정·보완연구」에서 제시하는 지역경제 파급효과 분석을 적용하였다. 적용 원단위 가격변환지수는 매년 발표되는 소비자물가지수를 고려한 보정값을 적용하였다.

#### 1) 생산유발 효과

생산유발 효과는 특정 지역의 최종수요 한 단위를 충족시키기 위해서 해당 지역 및 타 지역에서 직·간접적으로 유발되는 생산효과를 의미한다. 지역산업연관표에서 각 지역의 각 산업부문에서 생산된 생산물을 중간수요(Z)와 최종수요(Y)로 배분되는데, 두 지역으로 구성된 지역산업연관표를 이용하면 식 (1)과 식 (2)와 같이, 수급방정식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$Z_{11} + Z_{12} + Y_{11}^d + Y_{12}^d = X_1 \quad (1)$$

$$Z_{21} + Z_{22} + Y_{21}^d + Y_{22}^d = X_2 \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2) 수급방정식은 투입계수( $A_{ij} = Z_{ij} / X_j$ )를 이용하면 다음의 식으로 변형되고, 투입계수로 된 수급방정식을 행렬 형식으로 표기하면 다음의 식 (3), 식 (4) 및 식 (5)와 같이 도출할 수 있다.

$$A_{11}^d X_1 + A_{12}^d X_2 + Y_{11}^d + Y_{12}^d = X_1 \quad (3)$$

$$A_{21}^d X_1 + A_{22}^d X_2 + Y_{21}^d + Y_{22}^d = X_2 \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} A_{11}^d & A_{12}^d \\ A_{21}^d & A_{22}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_1^d \\ Y_2^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A^d X + Y^d = X$$

$$\text{단, } Y_1^d = Y_{11}^d + Y_{12}^d, \quad Y_2^d = Y_{21}^d + Y_{22}^d \text{ 임}$$

해당 수급방정식  $A^d X + Y^d = X$  를 산출액  $X$  에 대해 정리하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 단, 여기서  $A^d$ 는 국산투입계수행렬,  $X$ 는 총산출액벡터,  $Y^d$ 는 국산품에 대한 최종수요 벡터,  $I$ 는 단위행렬에 해당한다.

$$\begin{aligned} A^d X + Y^d &= X \\ (I - A^d) X &= Y^d \\ X &= (I - A^d)^{-1} Y^d \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서  $(I - A^d)^{-1}$ 를 생산유발계수행렬이라고 하는데, 최종수요가 한 단위 증가하였을 경우 이를 충족시키기 위해서 각 산업부문에 직·간접적으로 유발되는 산출규모를 나타낸다. 생산유발계수는 역행렬 계수 혹은 레온티에프 역행렬계수라고도 한다.



## 2) 부가가치 유발효과

재화와 서비스에 대한 최종수요의 증가는 국내 생산을 유발하며, 이는 생산과정을 통해 다시 부가가치 및 고용(취업)을 유발한다. 최종수요에 의한 부가가치 유발효과를 계측하는 방법은 다음과 같이, 최종수요에 의해 생산이 유발되고, 생산활동을 통해 부가가치가 창출되는 관계는 부가가치계수  $A^v (= V_t / X_t)$ 를 생산유발계수에 곱하여 도출된다. 이에 대한 내용은 식 (7)로 표현할 수 있다. 단, 여기서  $\hat{A}^v (I - A^d)^{-1}$ 는 부가가치 유발계수이다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_1^v & 0 \\ 0 & \hat{A}_2^v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} Y^d \quad (7)$$

$$V = \hat{A}^v (I - A^d)^{-1} Y^d$$

## 3) 고용(취업) 유발효과

생산활동은 기본적으로 중간재에 자본이나 노동 등 본원적 생산요소를 결합하여 이루어진다. 수요증가에 따른 관련 산업의 생산활동은 노동의 수요를 수반하게 되므로, 노동의 산업별 파급효과 계측은 노동수요 예측 및 계획수립에 있어 중요한 자료를 제공할 수 있다. 부가가치와 마찬가지로, 일정 기간 동안 생산활동에 투입된 산업별 노동(L)을 산출액(X)으로 나눈 고용(취업)계수 ( $= L_i / X_i$ )의 대각행렬을 이용하면 최종수요가 각 지역의 고용을 어느 정도 유발하는지 식 (8)과 같이 도출할 수 있다. 단, 여기서  $\hat{l} (I - A^d)^{-1}$ 는 고용(취업)유발계수에 해당한다.

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{l}_1 & 0 \\ 0 & \hat{l}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} Y^d \quad (8)$$

$$L = \hat{l} (I - A^d)^{-1} Y^d$$

# 4. 지역경제파급효과 분석 적용 및 결과

## 4.1 지역 내·외 파급효과 승수 분석

특정 지역에 수요가 발생할 경우 지역산업의 생산활동은 해당지역의 산업은 물론 이·출입을 통하여 다른 지역산업의 생산활동을 유발하게 되며, 전체적인 유발효과 중 해당지역 내 산업에 미치는 영향인 지역내 파급효과와 해당지역을 제외한 기타지역에 미치는 효과인 지역외 파급효과로 구분할 수 있다. 지역간 산업연관모형에서 지역 내·외의 파급효과의 구분은 생산, 부가가치, 고용(취업) 등 모든 부문의 유발계수로부터 구할 수 있다. 예를 들어 2지역(L, M), 3개 산업의 생산유발계수 행렬이 다음과 같다고 하면 식 (9)와 같이 적용할 수 있으며, 이에 대한 결과는 식 (10)과 같다.

$$(I - C)^{-1} = \begin{bmatrix} \alpha^{LL} & \alpha^{LM} \\ \alpha^{ML} & \alpha^{MM} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} 1.126 & 0.447 & 0.300 & \vdots & 0.479 & 0.418 & 0.153 \\ 0.628 & 1.317 & 0.606 & \vdots & 0.552 & 1.115 & 0.323 \\ 0.512 & 0.526 & 1.100 & \vdots & 0.335 & 0.470 & 0.247 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ 0.625 & 0.369 & 0.250 & \vdots & 1.223 & 0.455 & 0.217 \\ 0.237 & 0.384 & 0.205 & \vdots & 0.278 & 0.649 & 0.167 \\ 0.472 & 0.444 & 0.589 & \vdots & 0.594 & 0.529 & 1.232 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $\alpha^{LL}$ 은 L 지역 산업에 최종수요가 1단위 증가했을 경우 L 지역 산업에 미치는 생산 유발계수를 나타내는 것으로, 이를 열로 합하면 L 지역 각 산업의 지역내 파급효과를 나타내는 것이다.  $\alpha^{LL}$ 행렬 (3×3) 각 열로 합한 벡터 (1×3)를  $O^{LL}$ 라고 하면, L 지역내 각 산업의 지역내 파급효과는 식 (11)과 같고, M 지역의 경우( $\alpha^{MM}$ )도 마찬가지로 식 (11)을 활용하여 정리할 수 있다.

$$O^{LL} = [2.226 \ 2.290 \ 2.005], \ O^{MM} = [2.094 \ 1.633 \ 1.615] \quad (11)$$

$\alpha^{ML}$ 은 L지역 산업에 대한 최종수요 1단위의 증가로 인한 M지역의 생산 유발효과, 즉 지역의 파급효과 (혹은 지역간 파급효과)를 나타내고,  $\alpha^{LM}$ 은 반대의 경우를 나타낸다. 이에 대한 내용은 식 (12)와 같이 표현될 수 있다.

$$O^{ML} = [1.334 \ 1.197 \ 1.043], \ O^{LM} = [1.365 \ 2.003 \ 0.724] \quad (12)$$

L지역 최종재에 대한 수요증가로 인한 전체 생산 유발효과를 OL, M지역의 경우를 OM이라고 하면 지역 내.외의 총생산 유발효과는 식 (13)과 같이 도출될 수 있다.

$$\begin{aligned} O^L &= O^{LL} + O^{ML} = [3.599 \ 3.487 \ 3.048] \\ O^M &= O^{MM} + O^{LM} = [3.459 \ 3.636 \ 2.339] \end{aligned} \quad (13)$$

## 4.2 지역경제파급효과 분석 결과

본 논문에서는 도시철도 공동물류 플랫폼 실용화를 위하여, 지역경제파급효과 분석을 수행하였다. 앞서 제시한 <Table 4>와 같이, 각각의 단계별로 산정된 차량운행비용(a), 운영비용(b), 대기오염, 온실가스, 소음 비용, 사고비용, 혼잡비용을 포함한 사회 환경적 비용(c)과 물류비용(d)을 직접편익으로 산정하였으며, 지역경제파급효과 분석에 필요한 간접편익 산정에 필요한 유발계수는 생산 유발효과, 부가가치 유발효과, 고용(취업) 유발효과를 고려하였다. 지역산업연관표에 따른 계수값에 사업비를 곱하여 지역경제파급효과를 분석한 결과는 <Table 7>과 같이 도출되었으며, 산업 부문 항목은 '건물건설 및 건축보수' 항목을 적용하였다. 서울시의 생산 유발효과는 1.2586, 부가가치 유발효과는 0.4271, 고용(취업) 유발효과는 9.8088, 서울시 외의 생산 유발효과는 1.0947, 부가가치 유발효과는 0.2942, 고용(취업) 유발효과는 2.8640으로 도출되었으며, 지역경제파급효과 분석의 모든 항목에서 서울시 내가 우세한 것으로 도출되었다.

Table 7. Analysis results using Regional Inter-Industry Table

Sortation	Production inducement effect	Value-added inducement effect	Employment inducement effect
Seoul	1.2586	0.4271	9.8088
Except for Seoul	1.0947	0.2942	2.8640

## 5. 결론

최근 1인 가구의 증가와 전자상거래 활성화로 B2C 물류시장이 급성장함에 따라, 소량, 다빈도의 택배 물류가 급격히 증가하고 있는 추세에 있다. 전국 택배 물동량의 약 70%를 차지하는 수도권은 경우, 택배 물동량 증가로 인하여 도시 내 화물차량의 지속적인 증가로, 교통문제와 환경문제 등의 사회적 문제가 끊임 없이 야기되고 있는 시점이다. 우리나라 수도권이 직면하고 있는 사회적 문제를 위한 특성에 맞는 물류 모델은 전무한 시점이며, 수도권 내의 물류 수요를 해소하기 위한 공동물류 플랫폼의 개념이 제시되고 있는 시점이다. 본 연구에서의 편익항목은 직접편익과 간접편익으로 구분하였으며, 직접편익 중 1단계 차량기지 개발로 인한 편익은 물류체계 개선으로 인한 차량운행비용 절감편익과 상하역 작업 기계화 및 자동화로 인한 운영비용 절감편익을 주요 편익으로 고려하였으며, 2단계 화물열차 운행으로 인한 편익은 도로로 운송되는 물동량이 철도로 전환되었을 경우의 물류부문 관련 사회 및 환경적 비용 편익 및 물류비용 편익으로 고려하였다. 이를 상세하게 기술하자면, 각각의 단계별로 산정된 차량운행비용(a), 운영비용(b), 대기오염, 온실가스, 소음비용, 사고비용, 혼잡비용을 포함한 사회 환경적 비용(c)과 물류비용(d)을 직접편익으로 산정하였으며, 지역경제파급효과 분석에 필요한 간접편익 산정에 필요한 유발계수는 생산 유발효과, 부가가치 유발효과, 고용(취업) 유발효과를 고려하였다. 분석 결과, 서울시의 생산 유발효과는 1.2586, 부가가치 유발효과는 0.4271, 고용(취업) 유발효과는 9.8088, 서울시 외 생산 유발효과는 1.0947, 부가가치 유발효과는 0.2942, 고용(취업) 유발효과는 2.8640으로 도출되었으며, 지역경제파급효과 분석의 모든 항목에서 서울시 내가 우세한 것으로 도출되었다. 도시철도 물류 시스템을 구축 하여야 하는 수도권 차량기지는 거의 대부분 서울시 내부에 위치하고 있으므로 서울시의 생산 유발 효과 및 고용 유발효과가 우세한 것은 서울시의 적극적 투자가 필요한 것으로 해석 될 수 있다. 본 논문은 도시철도 공동물류 플랫폼과 관련한 선행연구를 분석한 결과를 토대로, 지역경제파급효과 분석을 수행하였다. 이에 따라, 본 논문의 결과로써 도출되는 산출물은 도시철도 공동물류 플랫폼의 실용적인 비즈니스 모델을 개발하는데 있어서, 추진의 당위성 확보를 위한 개선방안 도출의 기반 연구로써 활용될 수 있다.

## 참고문헌

- I.K. Moon (2020), A Study on the Priority to Activate Joint Logistics Centers for Online Delivery in the Post-corona Era, *Journal of International Trade and Insurance (JITI)*, 21(6), 101-119.
- J.R. Cho and I.K. Cheong (2012), Evaluation of KOTRA Overseas' Logistics Center and Issues for Improvement, *Korea Logistics Review*, 22(2), 323-344.
- M.T. Kwon (2018), The Analysis Model of Local Joint Logistic Center Location Using Computer Simulation, *Korean Business Education Review*, 33(5), 443-460.
- S.C. Oh, J.H. Ma, Y.H. Ahn (2017), Developing the Collaborative Logistics System for Small and Medium Sized Door-to-Door Service Providers, *Korea Logistics Review*, 27(4), 65-74.
- S.H. Min, H.D. Choi, E.Y. Yun, D.W. Kang and Y.S. Kim (2015), A Study on the Operation of Ship Supply Common Logistics in Utilizing the Busan Port International Ship Supply Center, *Journal of Korean Navigation and Port Reserch*, 39(6), 553-559.
- S.S. Suh, G.S. Song, J.W. Park (2016), A Study on the Development and Measurement of Logistics Partners Cooperation Index(LPCI): Focused on the Joint Logistics, *Journal of Distribution Science (JDS)*, 14(6), 107-118.
- S.Y. Jang, M.J. Choi, J.K. Yang (2016), Hybrid Recommendation Based Brokerage Agent Service System under the Compound Logistics, *Journal of Korean Society of Industrial and Systems Engineering*, 39(4), 60-66.
- W.G. Park, S.I. Park and G.T. Yeo (2013), An Analysis of Efficiency in Joint Logistics Center Client by using DEA : Focusing on Capital Region, *Journal of Distribution and Management Research (JDMR)*, 16(1), 79-87.
- 국가물류통합정보센터(<http://www.nlic.go.kr>)
- 이정권, 정동호(2018), 공기업·준정부기관 사업 예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완 연구(KDI)
- 김재영, 박보영(2015), 중부권 광역우편집중국 건립사업 예비타당성조사 보고서(KDI)

## 요약문

최근 1인 가구의 증가와 전자상거래 활성화로 B2C 물류시장이 급성장함에 따라, 소량, 다빈도의 택배 물류가 급격히 증가하고 있는 추세에 있다. 전국 택배 물동량의 약 70%를 차지하는 수도권의 경우, 택배 물동량 증가로 인하여 도시 내 화물차량의 지속적인 증가로, 교통문제와 환경문제 등의 사회적 문제가 끊임없이 야기되고 있는 시점이다. 우리나라 수도권이 직면하고 있는 사회적 문제를 위한 특성에 맞는 물류 모델은 전무한 시점이며, 수도권 내의 물류 수요를 해소하기 위한 공동물류 플랫폼의 개념이 제시되고 있는 시점이다. 본 연구에서의 편익항목은 직접편익과 간접편익으로 구분하였으며, 직접편익 중 1단계 차량기지 개발로 인한 편익은 물류체계 개선으로 인한 차량운행비용 절감편익과 상하역 작업 기계화 및 자동화로 인한 운영비용 절감편익을 주요 편익으로 고려하였으며, 2단계 화물열차 운행으로 인한 편익은 도로로 운송되는 물동량이 철도로 전환되었을 경우의 물류부문 관련 사회 및 환경적 비용 편익 및 물류비용 편익으로 고려하였다. 이를 상세하게 기술하자면, 각각의 단계별로 산정된 차량운행비용, 운영비용, 대기오염, 온실가스, 소음비용, 사고비용, 혼잡비용을 포함한 사회 환경적 비용과 물류비용을 직접편익으로 산정하였으며, 지역경제파급효과 분석에 필요한 간접편익 산정에 필요한 유발계수는 생산 유발효과, 부가가치 유발효과, 고용(취업) 유발효과를 고려하였다. 본 논문은 도시철도 공동물류 플랫폼과 관련한 선행연구를 분석한 결과를 토대로, 지역경제파급효과 분석을 수행하였다. 이에 따라, 본 논문의 결과로써 도출되는 산출물은 도시철도 공동물류 플랫폼의 실용적인 비즈니스 모델을 개발하는데 있어서, 추진의 당위성 확보를 위한 개선방안 도출의 기반 연구로써 활용될 수 있다.

**주제어:** 공동물류 플랫폼, 물류기업, 도시철도 기반 공동물류, 도시철도 물류 시스템, 물류 자동화

# 도시철도 차량을 활용한 지하물류 운영개념 기반 비상대응 메뉴얼 개발에 관한 연구

김명성<sup>1</sup>, 김영민<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>아주대학교 시스템공학과

<sup>2</sup>아주대학교 물류시스템 및 SCM학과

## A Study on the Development of Emergency Manual to Secure Underground Logistics Systems Operation Stability

Myungsung Kim<sup>1</sup>, Youngmin Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Systems Engineering, Ajou University

<sup>2</sup>Department of Logistics System & SCM, Ajou University

Urbanization and the expansion of the e-commerce market in modern society have promoted the increase of e-commerce among modern people. It has caused an increase in the demand for urban logistics, resulting in large amount of freight vehicles into the city. Fundamentally, the existing system for transporting goods using transportation means using an internal combustion engine is operating without solving the problem of road traffic congestion and environmental problems caused by exhaust gas. To solve this problem, in Korea, an urban railway logistics system that can transport logistics within the city center using urban railways is currently being developed. This underground urban railway logistics system is a new concept logistics system, and since it is operated at the station through the underground urban railway infrastructure, a standard operating procedure based on the subway system that can respond to emergency situations occurring during operation should be prepared. In this study, basic requirements for emergency manuals for establishing standard operating procedures for urban railroad logistics systems were proposed.

**Keywords:** Logistics, SOP, Underground Logistics Systems, Emergency Manuals

---

논문접수일 : 2022.10.08.    논문수정일 : 2023.05.23.    게재확정일 : 2023.06.06.

1. 아주대학교 시스템공학과 석사과정

2\*. 아주대학교 물류시스템 및 SCM학과 교수, Corresponding Author: pretty0m@ajou.ac.kr

## 1. 서론

### 1.1 연구배경

현대사회에서의 도시화는 엄청난 인구 밀도를 불러일으키고 있다. 특히, 우리나라의 전체 인구의 50.2%가 수도권에 거주하고 있다(Lee and Kim, 2019). 뿐만 아니라, 통신기술의 발달 및 이커머스 시장의 확대는 현대인들의 전자상거래 증가를 촉진했고, 이는 도시 물류 수요 증가의 원인이 되어 도심 내 많은 양의 화물차량 유입을 발생시켰다. '15~'20년 사이 택배차량이 포함된 1톤 이하 특수용도형 화물차의 동기간 연평균 증가율은 10.14%에 달했다. 1톤 이하 특수용도형 화물차가 1톤 이하 사업용 화물차에서 차지하는 비중도 '15년 28.8%(35,089대)에서 '20년 43.0%(62,633대)로 대폭 증가하였다(No et al., 2021). 이처럼 다수의 화물차량은 대도시의 교통체증 문제와 화물차가 내뿜는 매연으로 인한 대기오염 및 많은 문제를 발생시키고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 현재 국내에서는 도시철도를 이용하여 도심 내 물류 운송을 할 수 있는 도시철도 물류 시스템을 개발 중에 있다. 본 도시철도 물류 시스템은 신개념 물류 시스템으로써, 지하 도시철도 인프라를 통해 역사에서 운행되기 때문에 운용 중 발생하는 비상상황에 대응이 가능한 지하철 시스템을 기반으로 하는 표준 운영 절차서가 마련되어야 한다. 본 연구에서는 도시철도 물류시스템의 표준 운영 절차서 구축을 위한 비상사태 매뉴얼의 기본 요구사항을 제안하였다.

### 1.2 관련 선행연구

본 절에서는 도시철도 물류시스템의 표준 운영 절차서 구축을 위한 비상사태 매뉴얼의 요구사항 도출을 위해 선행연구 분석을 수행하였다. 노홍승 등은 미래 물류환경 고도화를 위한 지하물류체계 구축 연구를 수행하였다(No et al., 2021). 해당 연구는 기존 도시물류체계의 문제점을 분석하였으며 국내외에서 개발 사례의 현황 및 지하물류체계의 개념을 제시하였다. 최종적으로, 도시 지하물류체계 구축을 위한 정책 추진 방향 및 제도개선 방안을 제시하였다. 신종현 등은 철도 비상사고 대비 비상대응 시나리오 설정 및 기관사의 행동요령을 도출하는 연구를 진행하였다(Shin et al., 2008). 해당 연구에서는 기존 철도 운영기관의 철도 비상사고시 상황에 따른 행동요령 및 상황분류를 지적하였고, Activity-Action Diagram을 적용하여 5곳의 공항철도 입지에서 비상대응 행동요령 방안을 제시하였다. 최종적으로, 8가지 형태의 유형별 비상대응 시나리오를 구축하였다. 임광균 등은 철도 비상사태유형별 표준운영절차서 구축을 위한 시나리오의 설정을 연구하였다(Lim and Kim, 2005). 해당 연구는 철도사고에서 실제 발생가능한 비상사태 유형별로 비상대응 표준운영절차서를 구축하기 위해 대응 시나리오를 설정하는 방안을 제시하였다. 최종적으로, 예방, 대비, 대응, 복구의 4단계 시나리오를 설정하고 시나리오의 각 항목을 나열하였다. 임광균 등은 철도사고 대응 매뉴얼 과부하에 대한 진단과 개선방안을 연구하였다(Lim and Yun, 2016). 해당 연구는 철도분야에서 활용되고 있는 비상대응 관련 계획의 문제점을 진단하고 실제 비상대응 계획 구성의 복잡성과 현장에서의 활용성을 높이기 위하여 그에 따른 개선방안을 제시하였다. 최종적으로, 비상대응 관련 법률의 이원 적용 방안 및 매뉴얼 구성의 개선 방안을 제시하였다. 장정호 등은 ISO 22301을 기반으로 철도 비상대응계획 통합 수립에 관한 연구를 진행하였다(Chang and Cheung, 2021). 해당 연구는 ISO 22301, 기업재난관리 표준과 기존의 철도 비상대응계획을 비교·분석하여 ISO 22301을 기반으로 한 일관성 있는 철도 비상대응계획의 통합 수립 방안을 제시하였다. 최종적으로, ISO 22301 및 기능 연속성 계획, 기업재난관리표준을 철도 안전관리 체계의 비상대응계획에 통합하는 절차 및 통합된 철도 비상대응계획 모형을 제시하였다.

앞서 언급한 선행연구들에서는 기존 도시철도 비상대응 매뉴얼의 개선과 지하물류 체계에 대한 정의가 이루어졌으나, 실제 지하물류 시스템이 운영되었을 때 필요한 비상대응 매뉴얼에 대한 연구는 미미한 실정이다. 이에 본 연구는 기존의 선행연구들을 참조하여 기존의 철도 시스템 비상대응 시나리오 및 지하물류 체계에 대한 개념을 기반으로 실제 지하물류 체계의 수립과 이에 필요한 비상대응 매뉴얼의 구축을 목표로 하여 향후 도시철도 시스템에 대한 비상대응 계획수립에 기반이 되고자 한다.



### 1.3 문제정의

인터넷을 통한 전자상거래의 증가와 현대인의 소비성향 변화로 인해 운송화물은 점점 소량화 및 다빈도화되고 주거지역이 밀집된 수도권에 물류가 집중되는 현상이 발생한다. 또한 국제운송 및 간선운송 중심의 물류시스템이 지역 및 지구단위로 세분화됨에 따라 도시환경에 큰 악영향을 미치고 있다(Lee and Park, 2016). 지하 도시철도 물류 시스템은 이러한 기존의 화물차량을 이용한 화물운송의 문제점을 해결하는데 많은 기여를 할 것으로 판단된다. 하지만 지하 도시철도 물류시스템은 신개념 물류 시스템이기 때문에 국내 사례가 전무하고, 이와 비슷한 지하물류 관련 연구들도 아직 개념 단계에 그치기 때문에 실질적인 운영 중 발생할 수 있는 위험 상황에 대해서 정의하고 그에 대한 방안을 구축해야만 한다. 화물 차량 및 수직/수평 이송장치 등 새로운 개념이 도입된 지하 도시철도 물류시스템은 기존의 도시철도 운영시스템에서 발생할 수 있는 위험상황과는 다른 위험원의 발생 및 위험상황이 초래할 가능성이 있기 때문에 기존의 도시철도 운영 매뉴얼을 그대로 적용하는데 어려움이 있다. 그러므로 개발 중인 시스템의 실제 운영과 정상적인 시스템 운용을 위해서 운영 중 발생할 수 있는 사고에 신속하게 대응하고 정상 운행이 가능하도록 하는 표준 운영 매뉴얼에 대한 구축이 필요하다.

### 1.4 논문의 구성

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 지하 도시철도 물류체계의 개념을 정의하고, 도시철도 물류체계의 핵심장비 및 운영시나리오를 설명한다. 마지막으로 표준운영절차서의 개요와 필요성에 대해 설명한다. 3장에서는 표준 운영절차서 구축을 위한 비상매뉴얼의 도출 프로세스와 도출 방안에 대해서 제시한다. 4장에서는 시나리오 기법이 반영된 표준운영절차 매뉴얼의 문제점을 분석하고 비상매뉴얼 구축을 위한 요구사항을 정의한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문에 대한 결론을 제시한다. 그림 1은 이에 대한 개념을 도시한다.



Figure 1. Scope

## 2. 지하 도시철도 물류기술 개요 및 표준 운영 절차서 도출 프로세스 구축

### 2.1 지하 도시철도 물류체계



Figure 2. Concept of Underground Logistics Systems

지하 도시철도 물류 시스템은 도심 외곽에 도시 철도 인프라 철도 차량기지과 도심 내 인구 밀집 지역의 지하에 구축되어 있는 지하철 역사 공간을 활용하여 지정된 배송지로의 화물 운송과 회수를 위해 전용 도시철도 화물차량을 운영함으로써 물류 화물의 운송과 하위 배송 시스템과의 연계 서비스를 운영하는 것을 목표로 한다. 이는 도심 내 화물 차량의 운송을 대체할 것이라고 기대한다. 그림 2는 지하 도시철도 물류 시스템의 개념을 도시한다. 차량기지 기반의 도시철도 인프라를 활용하여 구축되는 공동물류터미널은 간선이동 화물차량이 차량기지에 입고 되면, 송하인으로부터 수하인으로의 운송이 필요한 화물의 집하와 분류를 진행하고 목적지인 도심 화물 역사까지 운송이 필요한 화물을 화물열차에 탑승시킨다. 화물운송 전용 도시철도 화물열차는 기존의 사람을 운송하기 위한 여객 수송열차가 아닌 화물 수송을 위한 전용 도시철도 차량으로 개발되어 차량 내 화물의 반입과 반출이 가능한 시스템이다. 본 화물 열차를 통하여 목적지인 도심역사로 운송이 완료되면, 도심역사 내 공간의 이송을 위한 화물 수직/수평이송장치를 통하여 도심 역사 공간 내 화물 상, 하차 승강장으로 이송된다. 화물열차를 통해 운송된 화물의 하차와 회수가 필요한 화물의 상차가 이뤄지는 전용 공간으로 이송된다. 운송된 화물은 말단배송, 즉 소형 화물 차량에 입고되어 운송지로 전달된다. 도시철도 물류 시스템은 전용 화물열차를 이용하여 화물의 운송과 회수를 수행하는 것에서 기존 물류시스템과의 기술적 차별점과 기존 시스템의 문제점을 해결하는 데 기여할 것으로 예상된다 (Hwang et al., 2021). 그림 3은 지하 도시철도 물류 시스템의 주요 장비를 보여준다.

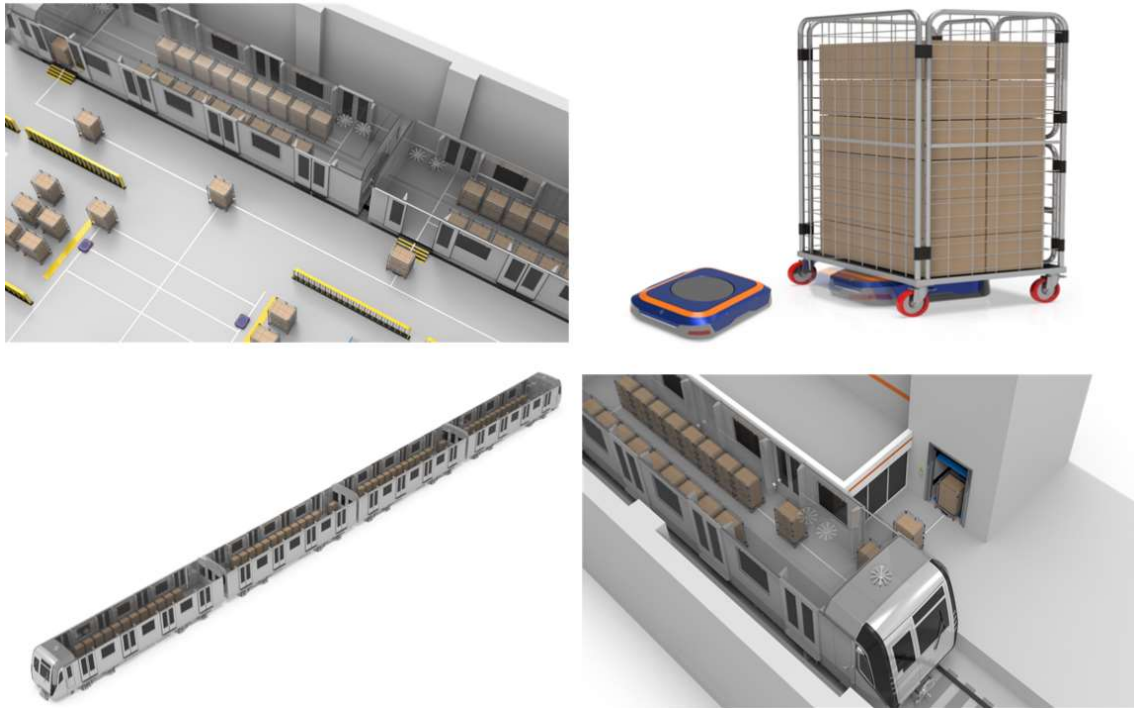


Figure 3. Major Equipments of Underground Logistics Systems

## 2.2 표준 운영 절차서 개요와 필요성

도시철도는 대도시에서 지하구간을 운행하고 있는 대중교통수단이며 국민이 도시생활 중 가장 빈번하게 이용하는 교통수단으로, 안전성 확보가 우선이 되어야 한다(Lee and Lee, 2014). 철도안전법 제8조의 '비상 대응계획'에서는 화재, 폭발, 열차 탈선 등의 비상사태에 대비하여 표준운영절차 및 비상대응훈련 등이 포함된 비상대응계획을 수립하여 국토부 장관의 승인을 받도록 하였다(Shin et al., 2012).

기존의 도시철도는 특수한 상황 발생 시 대응이 가능하게 하는 표준운영절차를 담고 있는 SOP (Standard Operating Procedures) 매뉴얼이 구축되어 있으며, 원활한 시스템 운영이 가능하도록 실제 현장에 적용되어 작동하고 있다(Wang and Kim, 2007). 지하 도시철도 물류 시스템은 기본적으로 승객 운송을 위해 활용되는 선로와 역사 공간을 활용하여 시스템이 운영되기 때문에 기존의 SOP와 관련된 사항을 적용하는 것도 가능하지만 승객을 운송하는 것이 아닌 화물을 운송한다는 점에서 차이가 있으며, 화물을 운송하고 이송하기 위한 개별 장치들이 구성되고 지정된 공간에서 무인으로 작동한다는 점도 기존의 시스템과 구분되는 하나의 요소로 볼 수 있다.

서울교통공사의 역사 운영을 위해 기존에 구축되어 운영 중인 비상대응 현장조치 매뉴얼은 총 30종으로 구성되어 있으며, 도심 내 승객 운송을 위해 운영되고 있는 도시철도와 관련된 이벤트, 사고, 재난, 이상 상황 발생시 문제를 신속하게 해결하고 승객 운송을 위한 기능의 정상 운영이 가능하도록 각 상황에 대한 정의와 대응 방안을 정립하여 관련 정보 사항을 제공하고 있다. 서울교통공사에서 활용 중인 비상대응 현장조치 매뉴얼(SOP)은 관제, 기술, 승무, 영업, 차량으로 구분되어 있으며, 비상상황 유형에 따른 사고흐름도 정의, 사고전개에 기반한 초동 조치 시나리오 정의, 개인별 조치 임무 정의 그 외 사고 분류와 관계기관에 대한 정보 정의를 통해 상황 발생 시 관계자들이 신속하게 문제를 해결할 수 있도록 하고 있다(Shin et al., 2008). 지하 도시철도 물류 시스템의 운영과 작동을 위해서는 기존 승객 운송을 위해 운영되고 있는 도시철도와의 연계와 융합이 필수적이다. 이에 지하 도시철도 물류 시스템과 관련 사항이 기존 비상대응 현장조치 매뉴얼에 적용되어야 하며, 승객 운송과 구분되는 화물 운송의 발생 상황에 대응하고 도시철도 본연의 기능인 승객 운송에 영향을 미치지 않도록 정보의 정의와 대응 사항에 대해 제시해야 한다.

### 3. 표준 운영 절차서 구축을 위한 비상사태 매뉴얼 도출 프로세스

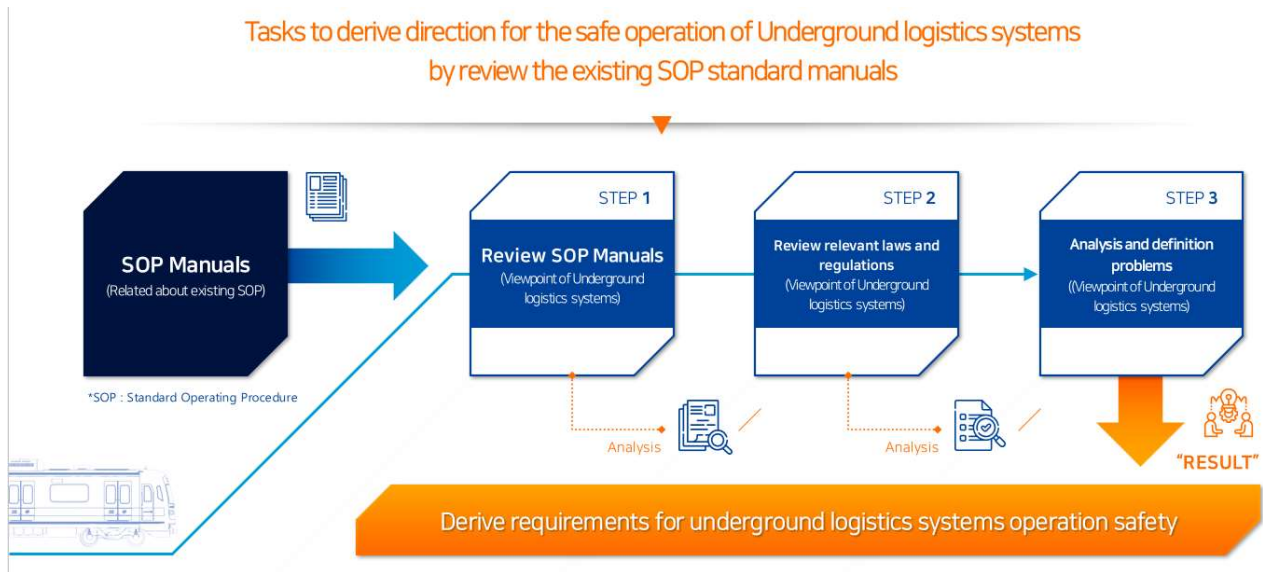


Figure 4. Tasks to derive direction for the safe operation of Underground logistics systems

본 논문은 지하 도시철도 물류 시스템의 실제 운영과 이벤트 상황에 원활하게 대응할 수 있는 표준운영 절차 개정을 위한 기존 표준운영절차에 대한 분석과 문제점 정의 결과를 기반으로 하는 요구사항을 제안하고자 하였으며, 도출된 요구사항을 통해 지하 도시철도 물류 시스템이 실제 역사와 도시철도 인프라에 적용되어 운영될 수 있도록 기여하고자 했다. 이를 위해 운영 중인 표준 매뉴얼에 대한 검토 및 분석과 시스템 적용을 위한 문제점 정의 및 요구사항 도출을 위한 연구를 수행했다. 표준 매뉴얼 검토를 위해 기존 SOP 표준운영절차에 대한 검토와 SOP 사고 대응 매뉴얼 검토, SOP 비상대응 시나리오 검토를 수행하였으며, 문제점 정의와 요구사항 도출을 위해 지하공간을 활용한 도시물류와 SOP를 기반으로 하는 문제점 정의 및 분석과 지하물류 적용 관련 사항 검토, SOP의 지하물류 적용 필요사항 도출, 지하물류 적용 SOP 요구사항 도출 연구를 수행했다. 그림 4는 선행 연구 및 관련 전문가들의 의견을 바탕으로 지하 도시철도 물류시스템의 SOP 및 비상대응 시나리오 연구 과정을 도시하였다.

지하 도시철도 물류 시스템 운영을 위한 SOP 표준 매뉴얼 검토 및 방향성 도출을 위해 기존에 구축되어 운영 중인 도시철도 비상대응 현장조치 매뉴얼에 대한 분석을 수행했다. 분석의 자료로 활용된 비상대응 현장조치 매뉴얼은 2021년 개정판으로 지하 도시철도 물류 시스템과 관련된 사항을 식별하고 정의하기에 가장 적절한 자료이기에 이를 활용한 연구를 수행했다. 표준 매뉴얼의 검토는 관제, 기술, 승무, 영업, 차량에 대해 분석하였으며, 각 분야는 세부 항목으로 구분되어 분야별로 적용되어 운영되고 있다. 이를 고려하여 본 시스템의 적용을 위한 관련 사항의 식별을 위한 분석을 수행했다. 기존 비상대응 현장조치 매뉴얼의 구성은 다음의 표1과 같으며, 각 분야는 세부분야로 구분되어 지정된 환경과 상황에 맞춰 신속하고 빠른 대응이 가능하도록 구성되어 있어 이를 고려한 분석을 수행했다. 기존 매뉴얼을 기반으로 수행한 분석 결과를 기반으로 표1과 같이 지하 도시철도 물류 시스템 적용을 위한 문제점 정의와 요구사항을 도출한 결과를 제시했다.

Table 1. On-site Emergency Manual for Analysis

On-site Emergency Manual (Ver. 2021)				
No	Sub No	Dept	Details	Title
1	1-1	Control tower	Tower No. 1	On-site Emergency Manual(Tower No. 1)
	1-2		Tower No. 2	On-site Emergency Manual(Tower No. 2)
2	2-1	Technology	Construct	On-site Emergency Manual(Office of Construct)
	2-2		Tram	On-site Emergency Manual(Office of Tram)
	2-3		Mechanic	On-site Emergency Manual(Office of Mechanic)
	2-4		Elevator	On-site Emergency Manual(Office of Elevator)
	2-5		Signal	On-site Emergency Manual(Office of Signal in Daelim)
	2-6		Equipment	On-site Emergency Manual(Office of Equipments)
	2-7		Electric	On-site Emergency Manual(Office of Electric in Dongdaemun 1)
	2-8		Electronic	On-site Emergency Manual(Office of Electric in Dongdaemun 2)
	2-9		IT	On-site Emergency Manual(Office of IT in Dongdaemun)
	2-10		Civil	On-site Emergency Manual(Office of Civil)
	2-11		PSD	On-site Emergency Manual(Office of PSD)
3	3-1	Service	Office of Dongdaemun	On-site Emergency Manual(Office of Dongdaemun)
4	4-1	Operation	Jonggak Station	On-site Emergency Manual(Jonggak Station)
	4-2		Gangnam Station	On-site Emergency Manual(Gangnam Station)
	4-3		Gyodae2 Station	On-site Emergency Manual(Gyodae2 Station)
	4-4		Gyodae3 Station	On-site Emergency Manual(Gyodae3 Station)
	4-5		Seocho Station	On-site Emergency Manual(Seocho Station)
	4-6		Modify Tram	On-site Emergency Manual(Modify Tram in Seocho)
	4-7		Bangbae Station	On-site Emergency Manual(Bangbae Station)
	4-8		Naksungdae Station	On-site Emergency Manual(Naksungdae Station)
	4-9		Seoul univ. Station	On-site Emergency Manual(Seoul univ. Station)
	4-10		Bongcheon Station	On-site Emergency Manual(Bongcheon Station)
	4-11		Sillim Station	On-site Emergency Manual(Sillim Station)
	4-12		Sindaebang Station	On-site Emergency Manual(Sindaebang Station)
	4-13		Gudi Station	On-site Emergency Manual(Gudi Station)
	4-14		Daelim2 Station	On-site Emergency Manual(Daelim2 Station)
	4-15		Daelim7 Station	On-site Emergency Manual(Daelim7 Station)
5	5-1	Train	Shinnae vehicle	On-site Emergency Manual(Shinnae vehicle)

지하 도시철도 물류 시스템 운영을 위한 SOP 표준 매뉴얼 검토 및 방향성 도출을 위해 다음의 표와 그림과 같이 연구를 수행하였으며, 법령 및 규정의 검토는 기존의 SOP에 새롭게 적용될 지하 도시철도 물류 시스템 관련 사항을 적용하기 위한 사항을 식별하고 정의하였다. 최종적으로 지하 도시철도 물류 시스템의 SOP 적용을 위한 요구사항을 도출하여 시스템의 안정적인 운영에 기여하고 SOP의 개정에 제안하고자 했다. 표 2는 이에 대한 결과를 도시한다.

Table 2. Analysis and Drive Direction for Underground Logistics Systems

Analysis and Drive Direction for Underground Logistics Systems		
No	Process	Details
1	Analysis SOP Manuals	Existing SOP manual review and analysis-based problem definition
2	Analysis Related statutory regulations	Review of related laws and regulations for SOP application of underground logistics Systems
3	Analysis and Definition Problem of Exist Manuals	Problem definition and analysis, related laws and system definition-based requirements
Target		Derivation of SOP requirements for safe operation of urban logistics system using underground space

#### 4. 비상매뉴얼 도출 절차 및 산출물

##### 4.1 시나리오 기법이 반영된 표준 운영 절차 매뉴얼 검토

표준운영절차는 비상 상황에 따른 대응과 정상 운영 복귀를 위한 활동을 정의하여 제안하고 있으며, 이는 상황을 수습하는 기관의 구성원과 조직의 역할 정의와 함께 실제 역사를 사용하는 승객을 위한 대응체계도 구성되어 있다. 사고 발생 시 승객의 대피가 필요한 경우 승객 대피원칙을 기반으로 안내와 대피 유도 방안을 제안하고 있으며, 이는 사고 시나리오와 사고흐름도에 따라 빠른 처리가 상황 대응과 복구가 어려운 경우나 위험 상황이 발생하였을 경우를 고려하여 작동되도록 하고 있다. 비상 상황 발생 시 승객을 안내하고 대피하기 위한 안내방송과 관련된 사항도 정의되어 있다.

지하 도시철도 물류 시스템의 적용을 위해 기존에 적용되어 운영 중인 SOP 표준운영절차에 대한 검토를 수행하였으며, 기존 표준운영절차는 관계, 기술, 승무, 영업, 차량에 대한 전 분야의 검토를 수행했다. 기존 표준운영절차 매뉴얼은 비상상황에 대한 유형을 선정하고 있었으며, 비상상황은 현장조치 매뉴얼이 적용되는 각 분야와 현장에 따라 구분되어 있었다.

서울도시철도공사의 제1 관제센터와 제2 관제센터를 기준으로 비상상황유형은 충돌, 탈선, 화재, 사상사고, 차량장애, 시설장애, 자연재해로 구분되어 있었으며, 관제센터를 기준으로 운영 중 발생할 수 있는 사고와 상황에 따른 유형과 코드 번호로 구분된다. 비상상황 유형의 선정에 따른 사고 유형 분류와 사고에 따른 사고 흐름도를 통해 도시철도 운영 중 발생할 수 있는 상황에 대한 원활한 대처가 가능하도록 하고 있다.

사고흐름도는 비상상황의 유형에 따라 운영 중 발생할 수 있는 사고에 대한 정의와 사고를 기반으로 발생할 수 있는 상황의 순서와 흐름에 대한 내용의 정의가 수행되어 있으며, 기존의 사고 유형별 사고 흐름도에는 상황 발생 이후 상황 접수, 황금시간 조치, 단시간 복구, 복구완료, 운행재개, 상황보고, 상황종료로 구성되어 있다. 사고 흐름도는 각 상황에 대한 흐름을 정의하고 있으며, 각 상황에 맞는 행동과 대응이 가능하도록 관련 내용을 정의하여 제안하고 있다.

사고 흐름도를 기반으로 사고전개와 이에 따른 초동조치 시나리오를 구성하여 사고 발생 이후 시간 구성에 따른 초동조치 시나리오를 제시하고 있다. 초동조치 시나리오와 함께 세부 조치임무를 정의하여 제안하고 있으며, 시간 구성에 따라 발생 상황을 유연하고 원활하게 대응하여 정상 운영으로 돌아갈 수 있도록 구성되어 있다.

개인별 조치임무의 구분은 운전관제, 상황관제, 기타관제로 구성되어 있으며, 이는 제1 관제센터를 기준

으로 작성되어 있어 사고의 대응과 관련되는 각 관제 센터의 역할을 구분했다. 비상대응 현장조치 매뉴얼의 기준과 적용 분야에 따라 각기 다른 역할 구분과 관련 부서의 정의가 적용되어 있다.

본 논문에서는 SOP 표준운영절차, 사고대응 매뉴얼, 비상대응 시나리오를 검토하여 기존 SOP 매뉴얼의 문제점을 분석하고자 하였고, 검토 및 분석한 결과는 표 3과 같다. 표준 운영절차는 제1, 2 관제소를 기준으로 검토하였고, 사고대응 매뉴얼과 비상대응 시나리오는 동대문 승무사업소를 기준으로 검토하였다.

Table 3. Review of the existing SOP standard manual for the operation of underground logistics system

Review of the existing SOP standard manual for the operation of underground logistics system			
Type	Standard Operating Procedure (Control Tower No 1, 2)	On-site Emergency Manuals (Service Office in Dongdaemun)	Emergency Scene Scenario (Service Office in Dongdaemun)
Type Emergency Situation	The types of situations that can occur in the operation of urban railroads are divided into collisions, derailments, fires, casualties, vehicle failures, facility failures, and natural disasters according to each field and site.	It describes in detail the situations that can occur in vehicles, routes and sections rather than standard operating procedures, and is divided into collisions, derailments, fires, casualties, and facility and vehicle failures.	Based on the accident classification, it consists of the emergency type code classification system, priority selection and results (risk assessment), and the application of standard operating procedures. The appendix includes the command system and reporting system in case of an emergency, the passenger emergency evacuation system, and emergency response. Defines information on announcement and support system, main facilities and equipment status, individual mission card, and emergency contact network.
Accident flow chart	Definition of the sequence and flow of accident situations that may occur during operation.	Control report according to the accident situation based on the flight service office and description of possible countermeasures.	
Accident / First action scenario	Organized to return to normal operation by flexibly and smoothly responding to the occurrence situation according to the time configuration after the accident, centered on the control center.	It consists of passenger evacuation and control report, damage confirmation and recovery according to the time composition after the accident, centering on the cabin.	
Individual action task	It consists of operation control, situation control, and other control, and divides the roles of each control center in response to accidents.	Record each role and action related to the response of an accident by dividing it into crew (engineer, conductor), crew office, and crew system department.	

#### 4.2 시나리오 기법이 반영된 표준운영절차 매뉴얼의 문제점 정의 및 분석

지하 도시철도 물류 시스템의 SOP 적용을 위해 기존의 도시철도공사 운영에 활용 중인 표준운영절차 관련 사항에 대한 분석을 수행했다. 분석은 관제, 기술, 승무, 영업, 차량으로 구분된 각 분야에 구축되어 있는 표준 30종에 대한 전면 검토를 통해 진행되었으며, 각 영역에 대한 검토 결과를 도출했다. 본 시스템은 기존에 운영 중이던 도시철도 인프라 시설에 적용되어 운영되어야 하는 시스템적 특징을 가지고 있기 때



문에 기존 도시철도 운영을 위해 구축된 표준운영절차에 관련 내용의 추가와 보완이 필요하다. 이를 위해 본 논문은 표준운영절차 SOP 메뉴얼의 주요 구성인 비상상황 유형과 그것을 기반으로 하는 사고흐름도, 사고전개/초동시나리오, 개인별 조치임무에 대해 지하 도시철도 물류 시스템 관점의 관련 사항 작성과 내용 보완이 필요하다는 문제점 정의를 결과로 도출했다. 표 4는 이에 대한 결과를 도시한다.

지하 도시철도 물류 시스템의 비상상황 유형의 선정을 통해 사고 상황을 정의하고 사고에 따른 대응 사항을 구성하여 이벤트에 대한 대응이 가능하도록 SOP 메뉴얼 재구축이 필요하며, 사고전개와 초동시나리오와 개인별 조치 임무는 정의된 지하 도시철도 물류 기술개발 시스템과 관련된 비상상황 유형과 사고흐름도에 따라 조직과 담당자, 관계 및 지원 기관의 협업과 지원을 통해 상황에 원활하게 대처하고 신속한 수습이 가능하도록 정의와 구분의 과정이 필요하다.

Table 4. Definition of Problems for Application of SOP in Underground Logistics Systems

Definition of Problems for Application of SOP in Underground Logistics Systems		
No	Type	Contents
1	Type Emergency Situation	It is necessary to define the types of emergency situations related to underground logistics systems.
2	Accident flow chart	It is necessary to establish an accident flow chart according to emergency situations related to underground logistics systems.
3	Accident / First action scenario	It is necessary to establish an accident /First action scenario related to underground logistics systems.
4	Individual action task	It is necessary to establish an individual action task related to underground logistics systems.
5	Appendix	Need to define and add related matters to support underground logistics systems operation.

#### 4.3 표준운영절차 메뉴얼의 구축을 위한 요구사항 도출

##### 1) 지하물류 적용 SOP 요구사항 도출

지하 도시철도 물류 시스템의 표준운영절차 SOP 적용을 위해 기존 도시철도 시스템 운영에 활용되고 있는 기존 비상대응 현장조치 메뉴얼에 대한 검토를 수행하였으며, 도시철도 인프라에 적용하여 더욱 안정적인 운영에 기여하고자 했다.

기존 시스템의 운영에 활용되고 있는 서울교통공사의 비상대응 현장조치 메뉴얼은 승객 운송을 위한 시설과 관련 인프라, 서비스들의 작동과 사고 상황 발생 시 이에 대처하고 신속하게 정상 운영으로 돌아갈 수 있도록 지원하고 있으며, 새롭게 도시철도를 통해 화물을 운송하는 본 과업의 대상 시스템이 적용되기 위해서는 새로운 시스템 적용에 문제가 될 수 있는 사항들을 정의해야 한다.

이를 위한 결과들은 본 과업의 분석과정을 통해 도출하였으며, 도출된 사항을 기반으로 지하 도시철도 물류 시스템의 표준운영절차 SOP 적용을 위한 요구사항을 도출했다. 도출된 요구사항은 기존 SOP 메뉴얼의 관제, 기술, 승무, 영업, 차량에 대한 분석을 통해 도출된 사항으로 비상대응 현장조치 메뉴얼의 비상상황 유형 선정, 사고흐름도, 사고전개/초동조치 시나리오, 개인별 조치임무와 부록에 구성되어 있는 비상대응 시나리오, 비상사태 시 지휘체계, 비상사태 시 보고체계, 비상대응 협력 및 지원체계, 비상대응 안내방송, 비상대응 협력 및 지원체계, 개인별 임무카드, 승객 긴급 대피체계, 비상연락망에 대한 사항을 기반으로 정의했다.

##### 2) 비상상황 유형 선정

비상대응 현장조치 메뉴얼의 기반이 되는 비상상황 유형 선정은 SOP가 활용되는 각 분야에 따라 다르게 구성되며, 도시철도의 정상적인 운영을 위해서는 지정된 각 분야에서 발생할 수 있는 사건, 사고, 재난에



대한 정확한 정의가 우선되어야만 정확한 대응과 신속한 정상 운영 복귀가 가능할 수 있다. 이를 위해서는 지정된 관제, 기술, 승무, 영업, 차량에서 활용될 비상대응을 위한 표준운영절차의 대응방안 구성을 위한 비상상황의 유형이 우선적으로 선정되어야 한다. 비상상황 유형은 각 분야에서 발생할 수 있는 충돌, 탈선, 화재, 사상사고, 차량장애, 시설장애, 자연재해와 같이 승객의 운송을 수행하기 위해 작동하는 도시철도의 운영에 영향을 줄 수 있는 비상상황에 대한 구분이 정의되어야 하며, 비상상황 유형 선정을 기반으로 세부적인 사고의 유형과 코드번호를 도출하여야 한다.

### 3) 사고흐름도

사고흐름도는 비상상황 유형의 선정에 따른 각 사고 상황에 맞게 운영자와 관계자들이 정확하게 상황에 대응하고 신속하게 시스템의 정상 운영이 가능하도록 제안하고 행동을 지원하는 정보와 상황 대응 정의로 구분된 비상상황에 맞게 구성되어 있다. 지하 도시철도 물류 시스템의 비상대응 현장조치 매뉴얼의 적용을 위해 사고 유형에 따른 상황 발생 기반 과정(프로세스)의 정의와 사고 또는 사건 해결을 위한 각 단계의 정의와 단계별로 필요하거나 연관된 사항에 대한 정의가 필요하다. 도시 철도를 활용한 화물 운송이라는 시스템의 목적을 수행하고 목표를 달성하는 것도 중요하지만 시스템의 운영에 기반이 되는 전체 시스템의 작동과 운영에 영향을 주지 않도록 해야 한다.

### 4) 사고전개/초동조치 시나리오, 개인별 조치임무

사고전개/초동조치 시나리오와 개인별 조치임무는 사고유형에 기반하여 발생이 예상되는 사고흐름도에 따라 구성되며, 사고 상황 발생 후 정확한 조치가 가능하도록 사고전개에 대한 내용과 조치에 필요한 시나리오를 제안하여 운영자와 관계자들이 이를 기반으로 사고를 수습할 수 있도록 제안하고 있다.

본 연구를 통해 정의된 지하 도시철도 물류 시스템의 표준운영절차 SOP 적용을 위한 분석 결과인 요구사항은 다음의 표와 같다. 도출된 결과는 서울교통공사에서 운영 중인 기존 비상대응 현장조치 매뉴얼과 관련 법령에 대한 검토를 통해 도출하였으며, 이를 기반으로 정의된 사항을 토대로 관련 과업을 수행하여 지하 도시철도 물류 시스템의 운영과 기존 시스템으로의 적용을 위해 필요한 결과를 도출해야 할 것으로 예상되며, 본 과업의 결과를 통해 관련 연구와 개발에 기여하고자 했다.

Table 5. Requirements for Application of SOP in Underground Logistics Systems

Requirements for Application of SOP in Underground Logistics Systems		
No	Problems	Requirements
1	Lack of analysis based on system configuration definition	Underground logistics-related system definition-based analysis required
2	Lack of analysis based on operational scenarios	Underground logistics operation scenario-based analysis required
3	Scenario-based events, lack of accident definition	Underground logistics scenario-based incident, accident definition required
4	Lack of underground logistics accident classification code	Establishment of code classification system for underground logistics SOP application
5	Lack of underground logistics incidents and accident response scenarios	A response scenario is required to apply the underground logistics SOP
6	Lack of definition of departments related to underground logistics	Need to define departments and institutions for underground logistics operation
7	Lack of definition of an underground logistics support organization	Define an organization related to the operation of underground logistics required
8	Lack of definition of manpower related to underground logistics	Relevant Stakeholders required for underground logistics operation
9	Lack of cargo transport related matters	Underground logistics-related laws need to be reviewed.
10	Lack of logistics facilities	Need to review laws for underground logistics and transportation

## 5. 결론

국내 물류산업은 사회적 변화와 기술의 발전으로 지속적으로 증가하고 있으며, 인구의 대다수가 집중되어 있는 수도권에 물류 운송을 위한 활동 또한 꾸준히 증가할 것으로 예상된다. 기술의 고도화로 인해 물류 관련 기술들이 발전되고 있으나 근본적으로 내연기관을 이용하는 운송 수단을 활용하여 물품을 운송하는 기존의 시스템은 도로 교통의 혼잡 문제와 배기가스로 인한 환경적 문제를 해결하지 못한 상태로 운영되고 있다. 이에 도심 내 승객 운송을 위해 구축되어 있는 도시철도 인프라와 열차를 활용한 새로운 개념의 물류운송 시스템에 대한 제안이 이뤄지고 있으며, 지하 도시철도 물류 시스템이라는 이름으로 개발되고 있다. 그러므로 개발 중인 시스템의 실제 운영과 정상적인 시스템 운용을 위해서 운영 중 발생할 수 있는 사고에 신속하게 대응하고 정상 운행이 가능하도록 하는 표준 운영 매뉴얼에 대한 구축이 필요하다.

개발 중인 시스템은 신개념 물류 시스템으로 기존에 도심 내에서 운영 중에 있는 도심 역사 시설과 도심 외곽 차량기지 유휴 부지를 활용하여 구축 및 운영될 계획으로 기존의 도시철도 시스템과의 연계와 구분이 명확해야 하며, 승객 운송 중 발생할 수 있는 철도 운영과 관련된 다양한 사건과 사고 상황 등 기존의 도시철도 운영시스템에서 발생할 수 있는 위험상황과는 다른 위험원의 발생 및 위험상황이 초래할 가능성이 있기 때문에 기존의 도시철도 운영 매뉴얼을 그대로 적용하는데 어려움이 있으며, 이에 대응할 수 있는 표준운영절차가 필요한 실정이다.

이에 본 논문은 지하 도시철도 물류 시스템의 실제 운영과 이벤트 상황에 원활하게 대응할 수 있는 표준 운영절차 개정을 위하여 기존 표준운영절차에 대한 분석과 문제점 정의 결과를 기반으로 도출된 요구사항을 통해 개발 중인 시스템이 보다 안정적으로 운영되고 사건 또는 사고 상황 발생 시에도 기존의 승객 운송을 수행하는 도시철도 시스템에 영향을 최소화하여 복구될 수 있도록 비상대응을 위한 표준운영절차가 구성되는데 기여하고자 과업 수행을 통한 결과를 제안했다.

이를 위해 운영 중인 표준 매뉴얼인 기존 SOP 표준운영절차에 대한 검토 및 분석과 시스템 적용을 위한 문제점 정의 및 요구사항 도출을 위해서 선행연구 및 관련 전문가들의 의견을 바탕으로 Figure 4에 효율적으로 지하 도시철도 물류시스템의 SOP 및 비상대응 시나리오 연구를 진행하는 방향성 및 과정을 도출하였고, 기존에 구축되어 운영 중인 도시철도 비상대응 현장조치 매뉴얼에 대한 분석을 수행하여 수행한 분석 결과를 기반으로 지하 도시철도 물류 시스템의 표준운영절차 SOP 적용을 위한 요구사항을 표 5에 제시했다.

본 연구는 기존의 도시철도 운영시스템에서 발생할 수 있는 위험상황과는 다른 위험원의 발생 및 위험상황이 초래할 가능성이 있는 지하 도시철도 물류시스템에서 물류 시스템의 운영과 기존의 운영 중인 도시철도 시스템을 모두 고려하여 효율적으로 시스템 운영의 간섭을 최소화하는 새로운 지하 물류 시스템에 대한 표준 운영절차를 마련하는데 기여할 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- Chang, C-H and Cheung, C-S.(2021), A Study on Integration of Railway Emergency Response Plan Based on ISO 22301, Proceedings of the Conference of the Society of Disaster information, 145-146.
- Hwang, S-W., Kim, J-W., Kim, M-J., Kim, Y-M., Jo, M-T. Park, J-M. and Lee, S-M.(2021), A study on derivation of operating concept for the realization of underground urban railway logistics technology, Proceedings of the Conference of the Korean Society for Railway, 272-272.
- Lee, H-J. and Kim, M-Y.(2019), Socioeconomic Status, Housing Outcomes and Residential Assessment of Young One-Person Households, Journal of the korean housing association, 30(4), 55-64.
- Lee, J and Lee, H-S. (2014), Disaster Response System and Management Plan of Urban Railway Accidents: Focusing on Human Error and Emergency Quick Response Manual, Study report from The Korea Transport Instituteol, Daehanjungbo Inswe, Sejong, Korea.
- Lee, M-G and Park, J-H.(2016), A study on Logistics and Home delivery service for Electronic Commerce in Korea, Korea Logistics Review, 26(3), 15-24.
- Lim, K-K and Kim, S-G.(2005), Scenarios for Developing Standard Operation Procedure against Railroad Emergency Incident/Accident, Proceedings of the Conference of the Korean Society of Transportation, 463-470.
- Lim, K-K and Yoon, G-C.(2016), Diagnosing railway incident response manuals and their improvement, Proceedings of the 19th Conference of the Korean Society for Railway, 698-707.
- Rho, H-S., Kim, D-H., Lee, T-H. and Shin, S-J.(2021), A study on the underground logistics system for the advancement of the future logistics environment, Study report from The Korea Transport Instituteol, Kyungsung Moonhwasa, Sejong, Korea.
- Shin, J-B., Chang, Y-S., Choi, Y-G., Lee, D-C., Kim, C-S., Kim, S-G., Park, M-K. and Lee J-S. (2012), A Study on Development of Railway Emergency Response System on Railway Operation Organizations, Proceedings of the Spring Conference of the Korean Society for Railway, 2305-2311.
- Shin, J-H., Kim, K-S. and Kim, S-G.(2008), An Establishment of Emergency Response Scenarios For Railroad Emergency Accident and a way to derive appropriate activities from the train operator, Proceedings of the Spring Conference of the Korean Society for Railway, 2305-2311.
- Wang, H-J and Kim, S-G.(2007), An Establishment of Emergency Response Scenarios For Developing Standard Operations Procedures (SOP) against Urban Railroad Incidents -Focused on Fire Accidents-, Proceedings of the KSCE Journal of Civil Engineering, 27(1), 131-140.

## 요약문

현대사회에서의 도시화와 이커머스 시장의 확대는 현대인들의 전자상거래 증가를 촉진시켰고, 이는 도시 물류 수요의 증가의 원인이 되어 도심 내 많은 양의 화물차량 유입을 발생시켰다. 근본적으로 내연기관을 이용하는 운송 수단을 활용하여 물품을 운송하는 기존의 시스템은 도로 교통의 혼잡 문제와 배기가스로 인한 환경적 문제를 해결하지 못한 상태로 운영되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 현재 국내에서는 도시철도를 이용하여 도심 내 물류 운송을 할 수 있는 도시철도 물류 시스템을 개발 중에 있다. 본 도시철도 물류 시스템은 신개념 물류 시스템으로써, 지하 도시철도 인프라를 통해 역사에서 운행되기 때문에 운용 중 발생하는 비상상황에 대응이 가능한 지하철 시스템을 기반으로 하는 표준 운영 절차서가 마련되어야 한다. 본 연구에서는 도시철도 물류시스템의 표준 운영 절차서 구축을 위한 비상사태 매뉴얼의 기본 요구사항을 제안하였다.

**주제어:** 물류, SOP, 지하 물류, 비상 대응 매뉴얼

# V2V(Vehicle to Vehicle) 집화 및 배송체계의 간선차량 순환노선 설정문제

정동진<sup>1</sup>, 이기주<sup>2</sup>, 채준재<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3</sup>한국항공대학교 항공교통물류학과

## Cyclic Trunk Line Routing Problem in V2V(Vehicle to Vehicle) Pickup and Delivery System

Dongjin Jeong<sup>1</sup>, Keyju Lee<sup>2</sup>, Junjae Chae<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3</sup>School of Air Transport, Transportation and Logistics, Korea Aerospace University

The speed and efficiency of pickup and delivery of e-commerce products have become important in customers' choice. Recently, a vehicle to vehicle (V2V) pickup and delivery system was suggested by a company that guarantees same-day delivery at a lower rate than the conventional courier service or point to point (P2P) delivery service. The V2V system may operate on relatively small infrastructural investments as the products are transferred from vehicle to vehicle that are continuously circulating trunk line routes. This study proposes a way of creating the circulating routes by formalizing the cyclic trunk line routing problem (CTLRP). A mixed integer programming approach is provided, and the model is solved using CPLEX. Then, the study provides examples of implementation on some major cities in South Korea. The analysis on the case studies shows that the V2V system can significantly reduce the delivery distance (time) required per an item compared to the P2P system.

**Keywords:** Vehicle to Vehicle Delivery, Public Logistics Network, Parcel Delivery, Courier Service, Trunk Line Routing Problem

---

논문접수일 : 2022.10.08.    논문수정일 : 2023.05.23.    게재확정일 : 2023.06.07.

본연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2021-KA163182).

1. 한국항공대학교 항공교통물류학과 석사과정

2. 한국항공대학교 항공교통물류학과 박사과정

3\*. (한국항공대학교 항공교통물류학부 교수, Corresponding Author: jchae@kau.ac.kr

## 1. 서론

온라인 쇼핑을 포함한 전자상거래 이용률이 지속적으로 증가하고 있으며, 특히 COVID 19는 이러한 현상을 가속시켰다(Alfonso et al., 2021). 대한민국 통계청(2021)에 의하면 국내 모바일 쇼핑 거래액은 2020년 12월 11.1조원에서 2021년 12월 13.6조원으로 22.9% 상승했으며, 월평균 3회 이상 온라인으로 물건을 구매하는 소비자의 비율은 2019년 39.3%에서 2021년 49.7%로 약 26% 증가했다. 구매한 물품을 즉시 수령할 수 있는 오프라인 쇼핑과는 달리 온라인 쇼핑은 그들의 집화 및 배송체계에 따라 물품 수령 시간에 차이가 있다. 국내에서 전자상거래를 지원하기 위한 집화 및 배송체계는 대표적으로 택배 서비스와 풀필먼트(fulfillment) 서비스로 구분할 수 있다. 택배 서비스와 풀필먼트 서비스는 막대한 기반시설 투자가 전제되어야 한다(ShippingNewsNet, 2021). 특히 택배 서비스는 발송지와 배송지가 지리적으로 근접하더라도 반드시 원거리의 허브터미널로 집화된 후 재분배해야 하는 동선상의 비효율이 존재한다. 도심에 가까이 위치한 터미널을 통해 배송하는 풀필먼트 서비스는 면적대비 비용이 택배 서비스에 비해 높으며 고객의 주문을 예측해 재고를 미리 보유해야 한다는 단점이 있다.

당일배송 서비스업체 투데이(Today, 2022)는 거대한 기반시설이 필요하지 않으면서도 불필요한 물류동선을 축소하고, 재고를 미리 보유하지 않아도 되며, 이륜차를 통한 당일배송의 문제로 지적되는 비용 문제를 해결한 V2V(vehicle to vehicle) 집화 및 배송체계를 제시하였다(KoreaLogisticsNews, 2022). V2V 체계는 Figure 1에 나타난 바와 같이 정해진 노선을 순환하는 다수 차량 간의 환승을 통해 물품을 집화하고 배송하는 도심형 네트워크이다. 대중물류망 또는 공유물류망으로도 불리는 V2V 체계는 승객을 출발지에서 환승을 통해 목적지로 이동시키는 대중교통과 닮아있다. 그들에 의하면 V2V 체계가 구축된 지역에서는 물품의 집화로부터 배송까지 빠르면 3시간 이내, 늦어도 당일 내에 완료할 수 있다. V2V는 광역, 지역, 배송의 3단계로 구분된다. 광역차량에 의해 순환하는 광역노선(trunk line)과 지역차량에 의한 지역노선(feeder line)은 반복적인 순환을 위한 경로가 미리 설정되어 있으며, 픽업 및 배송(pickup and delivery)차량의 경우 주문상황에 따라 생성된 경로를 따른다.

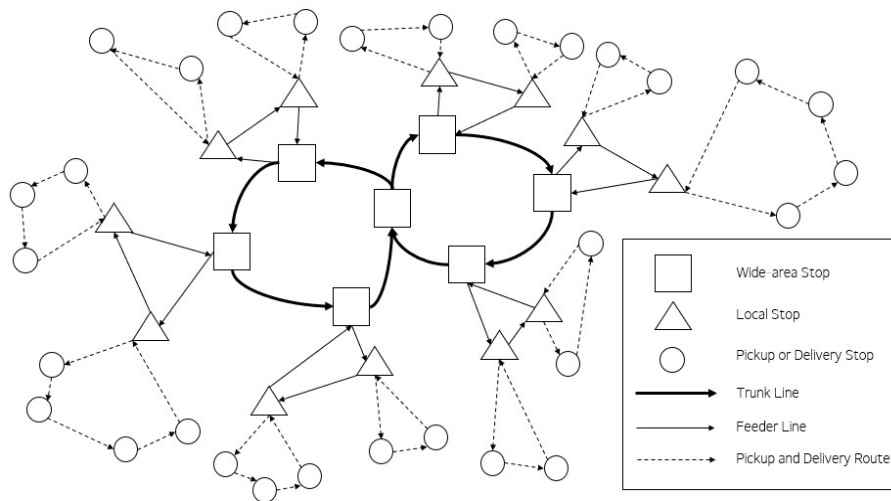


Figure 1. Public logistics network

본 연구는 V2V 집화 및 배송체계에 존재하는 특수한 네트워크 구조의 조건을 반영하여, 환승을 고려한 광역차량 순환노선 설정문제(cyclic trunk line routing problem, CTLRP)를 모형화하고자 한다. V2V 체계의 지역순환노선과 배송차량경로 설정문제는 일반적인 외판원문제(traveling salesman problem)(Flood, 1956) 또는 차량경로문제(vehicle routing problem)(Laporte, 1992) 방법론을 활용한 접근이 가능하다. 그러나 광역순환노선의 설정문제의 경우 외판원문제 및 차량경로문제와는 다르게 정의된다. 광역순환노선 설정문제에서는 각 차량이 소속한 회차지점(depot) 또는 환승거점으로 사용할 광역거점을 미리 지정하지 않

는다. 모든 광역거점 간에는 물류의 흐름이 연결될 수 있어야 하며, 광역거점 간 흐름에서 차량 간 환승을 이용할 수 있다. 각 광역차량의 경로는 순환하는 형태를 가져야 하며 1회 순환에 소요되는 최소 또는 최대 시간이 제약될 수 있다. 본 연구에서는 앞선 조건들을 만족하는 최단길이의 광역순환노선(cyclic trunk line)을 찾아내는 것을 목표로 한다.

## 2. 문헌연구

### 2.1 집화 및 배송체계

국내에서 가장 많은 택배 물동량을 처리하는 CJ대한통운(CJ Logistics, 2022)은 269개 서브터미널로 집화한 물품을 14개 광역 허브터미널로 모아 분류한 뒤 다시 각 지역 서브터미널로 보내 배송하는 허브앤스포크(hub-and-spoke) 방식을 사용한다. 택배 서비스에서는 발송지와 배송지가 지리적으로 근접하다라도 원거리의 허브터미널로 집화된 후 재분배하며, 일반적으로 택배는 물품의 발송으로부터 배송까지 1일에서 최대 3일의 시간을 필요로 한다. 국내에서 쿠팡(Coupang, 2022)으로 대표되는 풀필먼트 서비스는 고객과 가까운 도심 또는 근교에 풀필먼트센터를 두어 소비자의 주문에 빠르게 대응하여 배송시간을 단축한다. 일반적으로 풀필먼트는 익일 배송 서비스를 제공하고 있다. 나아가, 배달의민족 B마트(Woowa Brothers Corp., 2022), 올리브영 오늘드림(Olive Young, 2022) 등은 배송 소요시간을 수 시간 내로 단축시킨 마이크로풀필먼트(micro-fulfillment) 형태의 서비스를 제공한다. 마이크로풀필먼트는 작은 범위로 축소된 풀필먼트 서비스로, 배송거점을 고객과 더욱 가까운 곳에 위치시킨다(Progressive Grocer, 2021). 택배 서비스와 풀필먼트 서비스는 공통적으로 막대한 기반시설 투자를 전제로 하며(ShippingNewsNet, 2021), 주로 이륜차를 이용하는 마이크로풀필먼트는 단건 배달과 같은 제약으로 인해 배송단가가 상승하는 문제가 있다(JoongAng, 2022).

V2V 집화 및 배송체계는 최소한의 분류 및 환적 시설만을 이용하며, 주차장 공간과 차량 간 화물 인계 방식을 통해 합리적인 가격의 당일배송 서비스를 지원할 수 있다(LogiDucks, 2022). 택배, 풀필먼트, V2V의 서비스에서 발생하는 단계와 소요시간을 비교하면 Figure 2와 같이 나타낼 수 있다.

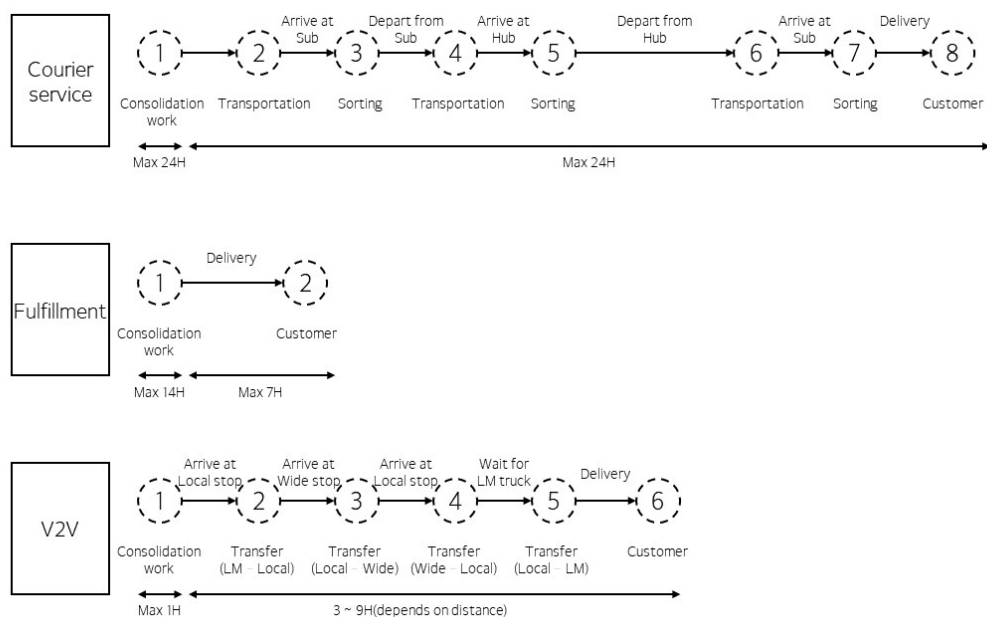


Figure 2. Comparison of courier, fulfillment, and V2V service

## 2.2 관련 연구

V2V 집화 및 배송체계는 대중물류망 또는 공유물류망으로도 불리며, 대중교통(public transport) 분야의 연구에서 연관점을 찾을 수 있다. 대중교통 분야의 노선 설정문제는 Dubois et al.(1979)에 의해 통행경로망 디자인문제(transit route network design problem, TRNDP)라 정의되었으며, 해당 문제에서는 주어진 다수의 정류장에 대해 모든 정류장이 연결(이동) 가능한 최적의 노선을 제시한다. Hasselstrom(1981)의 연구는 통행경로망 디자인문제의 수리모형을 제안하였고, 이후 Agrawal & Mathew(2004)는 통행비용과 운영비용의 합으로 정의되는 전체 비용을 최소화하기 위한 모형을 제시하였다. Yang et al.(2007)은 통행자 밀도(노선의 단위 길이당 직행 승객 수의 비율)를 최대화할 수 있는 수리모형을 고안했다. 문제의 복잡도를 증가시켜 제대로 다루어지기 어려웠던 환승의 문제를 해결하기 위해 Yu et al.(2012)의 연구에서는 개미군 집적최적화(ant colony optimization) 메타휴리스틱(meta-heuristic) 기법을 이용하였다. 해당 연구에서는 승객 통행 시간에 대한 상한값을 고려함으로써 합리적인 시간 내에 원하는 장소로 이동할 수 있도록 하였다. Kim et al.(2019)의 연구에서는 노선설정에 소요되는 자원을 함께 고려한 최적화를 진행하였다.

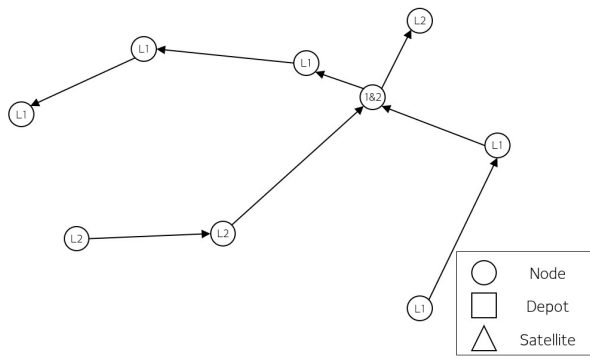
V2V 체계와 같이 다수 차량의 순환으로 각 지점이 연결되는 체계는 협력적AGV체계배치(tandem automated guided vehicle system layout)에도 나타난다. Bozer & Srinivasan(1991)의 연구에서 처음 정의된 해당 문제는 각 영역의 작업량을 최소화하는 것을 목표로 전체 공간을 환승지점으로 연결되는 다수 영역으로 분할한다. 이어지는 연구(Bozer & Srinivasan, 1992)에서는 무차별대입(brute force) 방법론을 제시하였으며, ElMekkawy & Liu(2009)는 유전알고리즘에 입각한 미미틱(memetic)알고리즘 해법을 제시하였다.

V2V 집화 및 배송체계는 다수 차량의 경로를 최적화한다는 점에서 다중(multiple)외판원문제 또는 차량 경로문제와 연관된다. 다중외판원문제는 차량의 용량제약을 제거한 차량경로문제로 볼 수 있으며(Taha & Benadada, 2014), 두 문제는 모두 단일 회차지점에서 출발한 차량이 방문지를 거쳐 회차지점으로 복귀하는 운행 길이의 합을 최소화하기 위한 경로를 도출한다. Carlos et al.(2013)의 연구에서는 다중회차지점(multi-depot)이 주어졌을 때의 최적 경로를 제시하였다. V2V 집화 및 배송체계는 광역, 지역, 배송의 3단계로 구분되고, 각 단계에 속한 차량은 다른 단계의 노선에 개입하지 않는다는 점에서 2단계(two-echelon) 차량경로문제(Crainic et al, 2009)와 유사하다. 해당 문제에서는 첫 번째 단계의 차량이 도심 내부에 위치하는 중간거점(satellite)까지 화물을 운반하며, 이후 중간거점에서 고객위치까지는 두 번째 단계의 차량이 배송을 담당한다. Belgin et al.(2018)의 연구에서는 집화(pickup)와 배송(delivery)을 함께 고려한 2단계 차량 경로문제의 해법을 제시하였다.

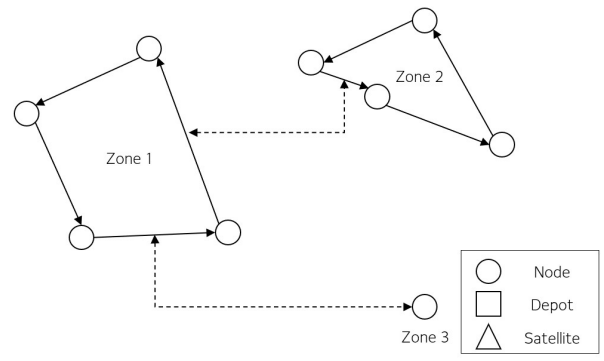
## 2.3 차별점 및 연구 기여

일반적으로 이용자 편익 최대화에 초점을 맞춘 통행경로망 디자인문제와 달리 본 연구에서 제시하는 광역차량 순환노선 설정문제(CTRLP)는 순환노선의 경로길이 최소화를 목표로 한다. 추가적으로 광역차량 순환노선 설정문제는 각 차량의 노선을 순환하는(cyclic) 형태로만 제약한다는 차이가 있다. 협력적AGV체계 배치문제 또한 순환노선을 제시하지만 거점 간 이동을 위해서는 구역 내에 배치된 별도의 거점을 이용해야 하며, 유입과 유출, 순환흐름의 경로가 미리 지정되어 출발 및 도착 거점이 제한되어 있다. 그러나 본 연구에서 제시하는 문제에서는 거점 간의 연결이 두 순환노선의 교차점에서 직접 이루어지며 모든 거점이 유입 및 유출 역할을 할 수 있다. 다중외판원문제, 차량경로문제, 다중회차지점문제에서는 단일 또는 다중 회차지점이 미리 지정되어 있지만 광역차량 순환노선 설정문제에서는 어느 광역거점이라도 환승거점으로 사용될 수 있다. 또한 광역차량 순환노선 설정문제에서는 각 차량의 일일 순환횟수를 특정 값 이상으로 보장하기 위해 순환노선 길이를 제약할 필요가 있다. V2V 집화 및 배송체계는 광역, 지역, 배송의 3단계로 구분되어 있으나, 광역노선을 제외한 지역노선과 배송노선은 일반적인 외판원문제 또는 차량경로문제 방법론을 통해 접근할 수 있다. 따라서 광역차량 순환노선 설정문제는 2단계 차량경로문제와 달리 특수한 조건을 가진 광역 단위의 노선 설정에 대한 문제만을 다룬다. 본 연구에서는 Figure 3에 보인 바와 같이 기존 연구들과 다른 형태의 문제를 새롭게 제시하며, 이와 관련한 혼합정수계획법 수리모형을 제시한다.

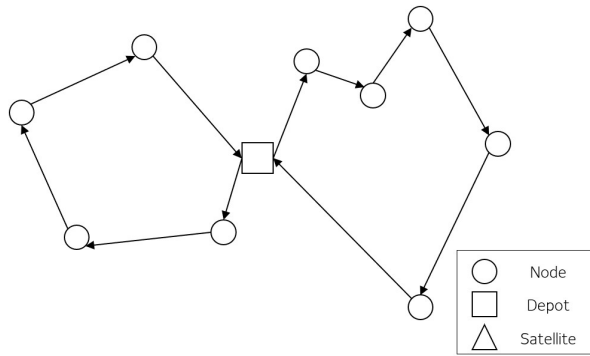




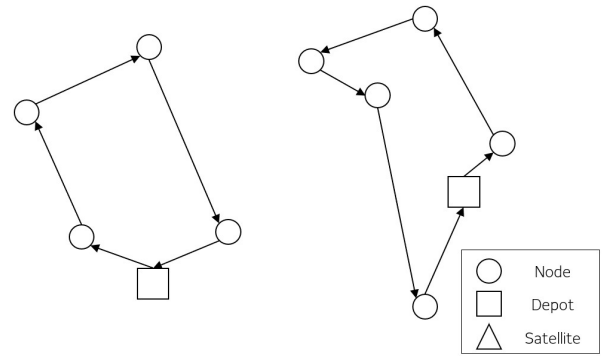
(a) An example of TRNDP



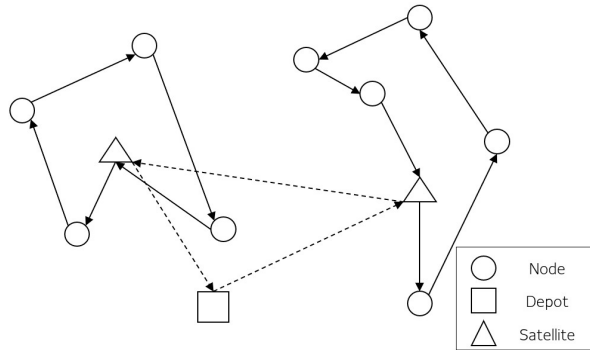
(b) An example tandem AGV layout planning



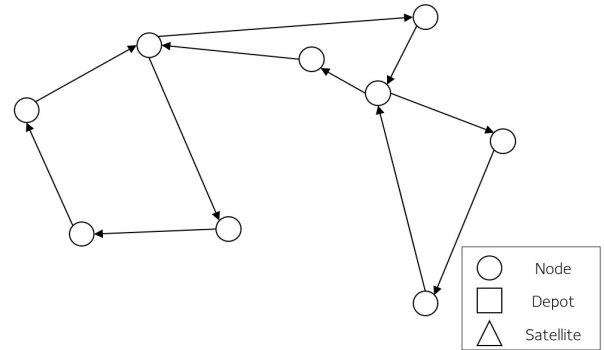
(c) An example of mTSP/VRP



(d) An example of multi-depot TSP/VRP



(e) An example of two-echelon VRP



(f) An example of CTRLRP

Figure 3. Comparison of different problems: TRNDP, tandem AGV layout planning, mTSP/VRP, multi-depot TSP/VRP, two-echelon VRP, and CTRLRP

### 3. 광역차량 순환노선 설정문제(CTRLRP)의 모형화

본 연구에서는 광역차량 순환노선 설정문제를 혼합정수계획법으로 구성하였다. 해당 문제는  $V$ 가 노드의 집합,  $A = \{(i, j) | i, j \in V\}$ 가 호의 집합을 의미하는 그래프  $G = (V, A)$  상에서 정의된다. 두 노드  $(i, j)$  사이의 이동비용인  $c_{ij}$ 는 차량의 이동 소요시간(또는 이동거리)을 의미한다. 노드 집합은  $V = V_o \cup V_d = \{1, \dots, n\}$ 의 합으로 구성되며, 각 집합은 원천(origin)노드  $V_o = \{1\}$ , 그리고 원천노드를 제외한 목적지(destination)노드  $V_d = \{2, \dots, n\}$ 로 표현될 수 있다.  $V_o$ 는  $n$ 개의 노드 중 임의로 선택하는 하

나의 노드이며, 어떤 노드가 선택되더라도  $V_d$ 가  $V_o$ 를 제외한 모든 노드를 의미하도록 구성한다면 문제 되지 않는다.  $V_o$ 와  $V_d$ 가 구분되는 이유는 강연결그래프(strongly connected graph)를 구성하기 위함이다.

강연결그래프는 각 노드로부터 모든 노드로 연결될 수 있는 경로(path)가 존재하는 그래프를 의미한다 (Khuller et al., 1996).  $V_o$  노드로부터 모든  $V_d$  노드에 도달할 수 있는 경로가 존재할 수 있도록 제약하고, 동시에 모든  $V_d$  노드로부터  $V_o$  노드에 도달할 수 있는 경로가 존재하도록 제약한다면 강연결그래프의 구성을 보장할 수 있다. 차량은  $H = \{1, \dots, h\}$ 로 표기한다. 각 차량이 하루에 특정횟수 이상을 순환하면서도 너무 자주 순환하지 않도록 제약하기 위해 순환경로가 구성될 수 있는 길이(시간)의 최솟값  $T_l$ 와 최댓값  $T_u$ 를 입력값으로 설정한다.

해당 수리모형의 결정변수로는  $x_{ijh}$ ,  $f_{ijk}$ ,  $y_{ij}$  세 가지가 있다. 노드  $i$ 에서  $j$ 로의 이동을 차량  $h$ 가 수행하는 경우  $x_{ijh}$ 의 값은 1이며, 그렇지 않으면 0의 값을 가진다.  $f_{ijk}$ 와  $y_{ij}$ 는 강연결그래프 제약조건 구성을 위해 사용된다.  $f_{ijk}$ 는 호  $(i, j)$ 를 통해  $k$ 에 도달할 수 있으면 1, 그렇지 않으면 0의 값을 가진다. 이때  $k$ 에 접근하기 위해  $i$ 를 다시 방문하거나, 원천노드를 경유해야 한다면 반드시 0의 값을 갖는다. 이전에 한 번 사용된  $i$ 는  $j$ 의 자리에 올 수 없다. Figure 4(a)를 예시로 들면  $f_{12\dots}$ 이 처음에 사용되고 나면  $f_{21\dots}$ 은 반드시 0의 값을 갖는다. 마찬가지로 Figure 4(b)에서도  $f_{54\dots}$ 가 먼저 사용됐으므로  $f_{95\dots}$ 의 값은 모두 0이 된다. 이는 탐색의 중복을 방지하기 위함이다.  $y_{ij}$ 는 호의 방향이  $i$ 에서  $j$ 면 1, 그렇지 않으면 0의 값을 가진다.

광역차량 순환노선 설정문제 수리모형의 매개변수와 의사결정변수, 목적함수 및 제약조건을 아래와 같이 표현한다.

Index	Definition
$i$	index for nodes
$j$	index for nodes
$k$	index for nodes
$h$	index for vehicles
Set	Definition
$V$	set of all nodes, $V_o \cup V_d$
$V_o$	set of original node
$V_d$	set of destination nodes
$H$	set of all vehicles
Parameter	Definition
$c_{ij}$	distance (time) of traveling from node $i$ to $j$
$T_l$	lower bound for total travel distance (time) of each vehicle
$T_u$	upper bound for total travel distance (time) of each vehicle
Decision Variable	Definition
$x_{ijh}$	1 if vehicle $h$ travels from $i$ to $j$ , 0 otherwise
$f_{ijk}$	1 if $k$ can be reached by $A(i, j)$
$y_{ij}$	1 if $i$ and $j$ are connected and direction is $i$ to $j$ , 0 otherwise

$$\text{minimize } Z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{h \in H} c_{ij} \times x_{ijh} \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{i \in V, i \neq j} \sum_{h \in H} x_{ijh} \geq 1, \forall j \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq j} \sum_{h \in H} x_{ijh} \leq |H|, \forall j \in V \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V, i \neq j} \sum_{h \in H} x_{ijh} \geq 1, \forall i \in V \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V, i \neq j} \sum_{h \in H} x_{ijh} \leq |H|, \forall i \in V \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq j} x_{ijh} = \sum_{i \in V, i \neq j} x_{jih}, \forall j \in V, h \in H \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V} (f_{ijk} - f_{jik}) = -1, \forall k \in V_d, j \in V_o \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V} (f_{ikk} - f_{kik}) = 1, \forall k \in V_d \quad (8)$$

$$\sum_{i \in V} (f_{ijk} - f_{jik}) = 0, \forall k \in V_d, j \notin V_o, j \neq k \quad (9)$$

$$f_{ijk} \leq y_{ij}, \forall k \in V_d, i \in V, j \in V \quad (10)$$

$$f_{jik} \leq y_{ji}, \forall k \in V_d, i \in V, j \in V \quad (11)$$

$$y_{ij} + y_{ji} = \sum_{h \in H} x_{ijh} + \sum_{h \in H} x_{jih}, \forall i \in V, j \in V \quad (12)$$

$$\sum_{i \in V_d} \sum_{k \in V_d} f_{ijk} \leq \sum_{i \in V} x_{ijh}, \forall h \in H, j \in V_d \quad (13)$$

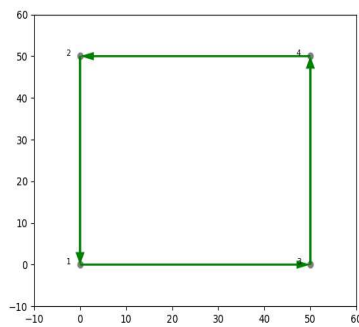
$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} \times x_{ijh} \geq T_l, \forall h \in H \quad (14)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} \times x_{ijh} \leq T_u, \forall h \in H \quad (15)$$

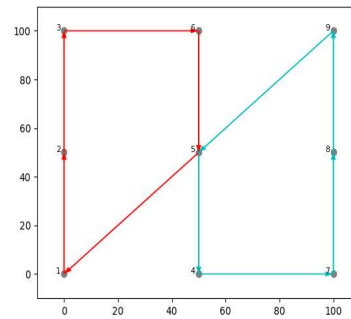
수식(1)에 나타난 수리모형의 목적함수는 각 순환경로의 운행거리(시간) 합계를 최소화하고자 한다. 제약 조건 (2)와 (3)에 의하면 모든 노드에 대해 최소 한 번, 최대 차량의 대수만큼의 유입(inflow)이 존재해야 하며, (4)와 (5)에 의하면 최소 한 번, 최대 차량의 대수만큼의 유출(outflow)이 있어야 한다( $|H|$ 는 집합  $H$ 의 원소 개수 즉, 차량의 대수를 나타냄). 제약조건 (6)은 각 노드에 대해 유입량과 유출량이 일치하도록 한다. 제약조건 (7)~(12)는 Hua(2018)의 연구에 의해 제시된 강연결그래프 조건을 적용한 것이다. 해당 제약조건은  $V_o$  노드로부터 모든  $V_d$  노드에 도달할 수 있는 경로가 존재할 수 있도록, 동시에 모든  $V_d$  노드로부터  $V_o$  노드에 도달할 수 있는 경로가 존재하도록 제약한다. 제약조건 (13)은 서브투어(subtour)를 제거한다. 외판원문제 또는 차량경로계획에서 Danzig Fulkerson Johnson(DFJ), Miller Tucker Zemlin(MTZ) 등의 방법을 통해 서브투어를 제거할 수 있으며, 제약조건 (7)~(13)에 의한 서브투어 제거는 물품흐름구성(commodity flow formulation)에 의한 방법론의 응용으로 볼 수 있다(Bazrafshan et al., 2021; Öncan et al., 2009). 제약조건 (14)와 (15)는 각 차량의 순환경로의 길이(시간)가 지정된 길이의 범위 내로 구성되도록 제약한다.

## 4. 실험

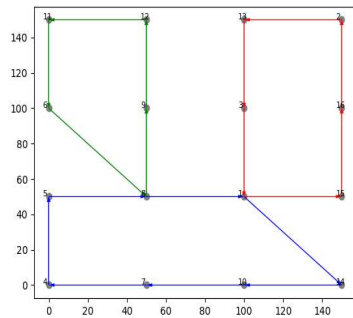
본 연구에서 제시한 수리모형에 대한 솔루션 도출을 위해 CPLEX Optimization Studio를 활용하였으며, Intel(R) Core(TM) i9-7900X @3.30GHz 중앙처리장치(CPU)와 32GB의 메모리(RAM) 하드웨어가 활용되었다. 먼저, 가상의 격자(grid)상에 존재하는 노드의 개수를 증가시키며 실험을 진행하였으며, 이후 실제 데이터 기반의 사례연구 실험을 진행하였다. Figure 4의 실험에서는 가상의 격자 간격을 50으로 설정하였으며  $2 \times 2$  격자의 4개 노드,  $3 \times 3$  격자의 9개 노드,  $4 \times 4$  격자의 16개 노드, 그리고  $5 \times 5$  격자의 25개 노드에 대해 실험하였다. 최대 가용차량의 대수  $h$ 는 5, 순환경로 길이(시간) 최솟값  $T_l$ 는 0, 최댓값  $T_u$ 는 400으로 설정하였다. 문제의 크기가 증가함에 따라 복잡도가 증가하며, 이로 인해 최적해 탐색시간이 증가한다. 해당 수리모형이 Figure 4(c)의 16개 노드에 대한 문제까지는 충분히 합리적인 시간(10분) 내에 최적해를 도출하였다. 20개 노드에 대한 문제까지도 12시간 이내에 해결 가능했으나, Figure 4(d)의 25개 노드의 경우 12시간 이내에 최적해를 찾을 수 없었으며, 최적성간격(optimality gap) 수치는 9.84%로 나타났다.



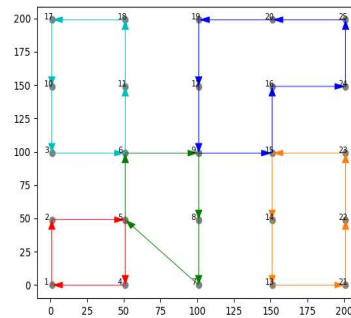
(a) Example solution on 2x2 grid



(b) Example solution on 3x3 grid



(c) Example solution on 4x4 grid



(d) Example solution on 5x5 grid

Figure 4. Example solutions on problems of different sizes

(5x5 grid instance was run for 12 hours and the optimality gap resulted in 9.84%)

### 4.1. 서브투어 제거 제약조건

제약조건 (13)은 서브투어를 제거하기 위해 적용하였으며, 적용유무에 따른 최적해가 서로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다(Figure 5). 서브투어 제거 제약조건이 적용되지 않은 Figure 5(a)에서도 환승을 통한 모든 노드 간의 흐름이 가능하지만, 특정 차량(blue)의 경로가 서브투어로 분리되어 실현불가능한 순환노선을 구성하고 있다. 반면 서브투어 제거 제약조건을 적용한 Figure 5(b)에서는 이러한 문제가 나타나지 않으며, 이로 인해 목적함수값이 증가한 것을 확인할 수 있다. 따라서 기존 강연결그래프 제약식에 차량 경로계획의 서브투어 제거 제약조건을 추가함으로써 본 연구의 순환경로를 완성할 수 있다.

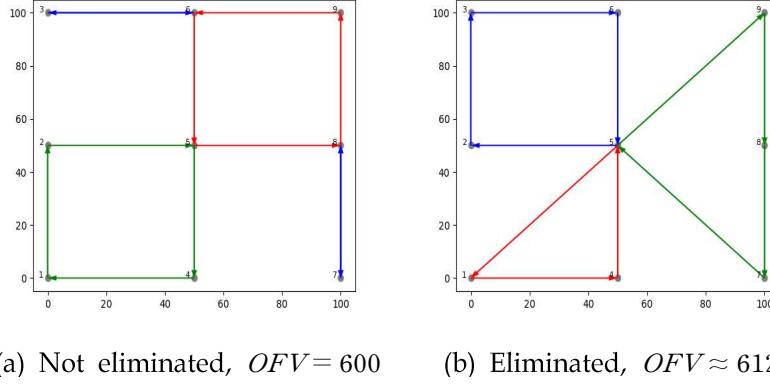


Figure 5. Example solutions with and without subtour elimination constraints

#### 4.2. 순환경로 길이(시간) 제약조건

제약조건 (14)와 (15)는 각 차량의 순환경로의 길이(시간)가 특정 범위 이내로 구성되도록 하며, 길이(시간) 제한의 최솟값  $T_l$  또는 최댓값  $T_u$  값이 변한다면 최적해가 다르게 제시될 수 있다. Figure 6(a)는  $T_u$  을 250으로 제한한 결과를, Figure 6(b)는 보다 높은 수치인 300으로 제한한 결과를 제시하고 있다. 해당 조건을 제약한 이유는 제한값의 차이에 따라 결과가 달라지므로 적절한 값을 결정해야 함을 보이기 위함이다.

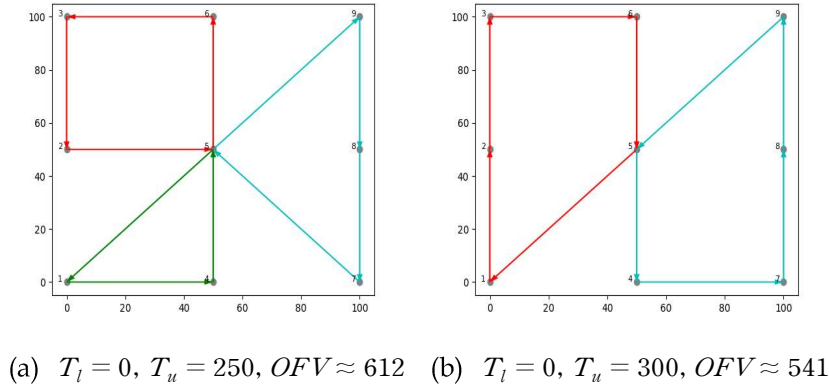


Figure 6. Example solutions with different  $T_u$  values

#### 4.3. 사례연구 및 분석

본 연구에서 제시한 광역차량 순환경로 설정문제를 가상의 격자가 아닌 실제 지리정보에 기반하여 추가적인 실험을 진행하였다. 대한민국에서 인구가 가장 많은 3개 도시(서울, 부산, 인천)를 대상으로 선정하였으며, 각 도시 관할구역 내의 자치구(서울 25개, 부산 16개, 인천 10개) 중심점(centroid)을 광역거점의 위치로 가정하였다. 각 노드 간의 이동비용(시간)인  $c_{ij}$ 는 오픈소스 지도(OpenStreetMap, 2015) 및 오픈소스 경로엔진(GraphHopper, 2022)을 이용해 도출하였다. 투입가능 차량  $h$ 는 5, 순환경로 길이(시간) 최솟값  $T_l$ 는 1시간, 최댓값  $T_u$ 는 3시간으로 설정하였다. 실제 지리정보에 기반한 실험에서도 문제의 크기가 증가함에 따라 최적해 탐색시간이 증가하였으며, 25개 노드를 포함하고 있는 서울의 경우 24시간 이내에 최적해를 도출할 수 없었다(최적성간격 9.64%).

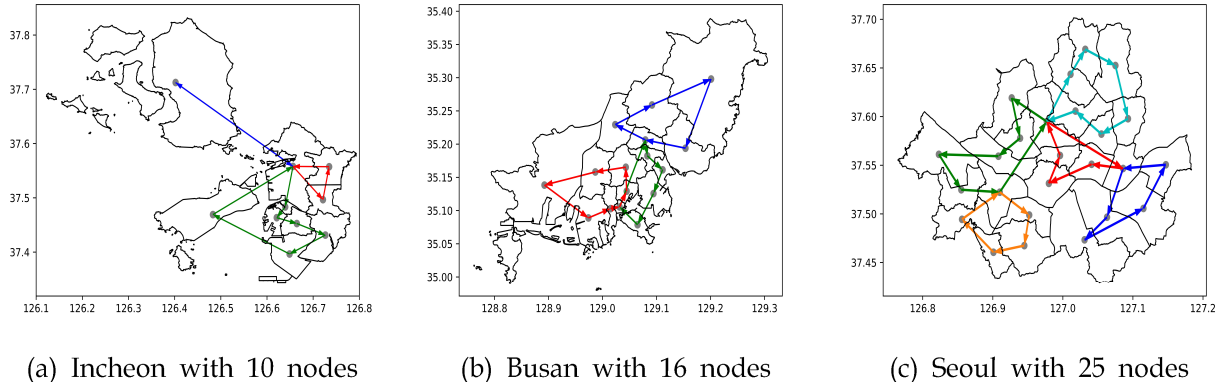


Figure 7. Example solutions on case studied regions  
(Seoul instance was run for 24 hours and the optimality gap resulted in 9.64%)

아래 Table 1은 사례연구에 대한 추가분석 내용을 제시한다. Table 1의  $n$ 은 노드의 개수,  $h$ 는 가용차량의 대수,  $h'$ 는 최적해로 도출된 이용차량 대수를 의미한다. 각 순환경로의 길이(시간)을 확인한 결과 모두 1시간 이상 3시간 이하의 조건을 만족한 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 물품이 V2V 환적을 통해 광역거점 사이를 이동하기 위해 소요되는 예상 거리(시간)와 효과를 분석한다. 모든 노드  $i$ 와  $j$  간에는 1만km의 물동량이 존재하는 것으로 가정하였다. 먼저, P2P(point to point) 배송이 이루어졌을 경우 각  $i \rightarrow j$  경로의 평균소요시간 ①을 측정하고, 이를 최종적으로 V2V 배송에서 각 물품이동의 평균소요거리(시간) ⑤와 비교한다. P2P 배송의 평균소요시간 ①은 모든 노드  $i$ 와  $j$ 를 직접 연결한 호 길이의 평균값으로 볼 수 있다. V2V 배송에서 각  $i \rightarrow j$  경로의 평균소요시간 ②를 계산하기 위해서는 수리모형을 통해 도출된 차량의 경로를 반영해야 한다. V2V 배송에서 경로가 직접 연결되는 경우도 존재하지만, 대부분은 다른 노드를 경유해야 하며, 수차례의 차량 간 환적이 요구되기도 한다. 따라서 V2V 경로의 평균소요시간 ②가 모든 노드를 직접 연결한 P2P 경로의 평균소요시간 ①에 비해 더 길게 나타나는 것은 당연하다.

이와 달리 각 물품의 건당 평균소요거리(시간)를 계산한다면 V2V 배송의 확실한 이점을 확인할 수 있다. 이륜차 단건배송을 가정한 P2P 배송은 물품의 건당 평균소요시간이 앞서 계산된 ①과 동일하다. 하지만 광역차량의 지속적인 순환과 차량 간 물동량 환적을 이용하는 V2V 배송에서는 물품의 건당 평균소요시간 계산방식을 달리해야 한다. 먼저, V2V 간선차량이 모든 물품을 출발지로부터 목적지까지 이송 완료시킬 수 있을 때까지 순환노선을 계속해서 운행했을 때 합산된 시간 ④를 계산한다. 이는 모든 V2V  $i \rightarrow j$  경로 중 가장 긴 경로 ③의 값에 투입된 차량의 대수  $h'$ 를 곱한 것으로 표현할 수 있다. 이렇게 계산된 값을 전체 물동량으로 나누었을 때 V2V 배송의 물품 건당 평균소요시간 ⑤가 계산된다. 모든 노드 간 1만km의 물동량을 가정하였으므로 전체물동량( $n \times n \times 1$ )은 인천 100, 부산 256, 서울 625로 계산되며, V2V 배송의 물품 건당 평균소요시간 ⑤의 계산식은 다음과 같이 나타낼 수 있다:  $[(③ \times h') / (n \times n \times 1)]$ . Table 1의 가장 우측에는 P2P 단건배송 대비 V2V 배송의 물품 건당 차량운행시간 감소효과를 제시하였다.

Table 1. Post-analysis on obtained solutions for case studied regions

$n$	$h$	$h'$	Vehicle route length in hour			Average P2P travel hour for path $i \rightarrow j$ (①)	V2V travel hour for path $i \rightarrow j$		Expected total vehicle travel hour in V2V (④ = ③ $\times$ $h'$ )	Average V2V travel hour per item (⑤)	P2P $\rightarrow$ V2V travel time reduction/item [1-(⑤/①)100%]	
			avg	min	max		avg (②)	max (③)				
Incheon	10	5	3	2.01	1.01	2.71	0.612	1.090	1.955	5.865	0.059	90.42%
Busan	16	5	3	1.72	1.21	2.51	0.454	0.869	2.440	7.320	0.029	93.70%
Seoul	25	5	5	1.24	1.01	1.66	0.448	0.910	2.061	10.307	0.016	96.32%

Table 1에 제시된 분석은 물품의 지리적 이동거리 감소효과에 관한 것이며, V2V 체계에서 환적을 위해 환승거점에서 물품이 대기하는 시간을 고려하지 않는다. 대기시간을 반영하기 위해서는 각 순환노선을 운행할 차량의 대수와 각 차량의 출발지점이 사전에 명확히 결정되어야 한다. 해당 분석에서 모든 노드 간 물동량을 1로 가정하였으나, 더욱 큰 물동량을 가정한다면 P2P 단건배송 대비 감소효과가 더욱 크게 산정될 수 있다. 아울러 물동량 이외에도 차량의 대수 및 용량제약 또한 감소효과의 증감에 영향을 줄 수 있으므로, 현실적인 분석을 위해 정확한 수요량 정보가 요구된다. 물품 건당 소요시간은 운행거리로 환산할 수 있으며, 차량 종류(이륜차, 트럭 등)에 의한 특성을 반영한다면 운행거리의 감소를 직접적인 비용의 감소효과 또는 탄소배출량 감소효과 등으로도 환산할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 환송을 고려한 광역차량 순환노선 설정문제(cyclic trunk line routing problem, CTLRP)를 정의하고 이를 혼합정수계획법의 형태로 모형화하였다. 해당 문제에서 각 노선은 순환하는 형태를 가져야 하며, 1회 순환에 필요한 최소 또는 최대시간이 제약될 수 있다. 모든 노드 간의 물동량 흐름이 연결될 수 있어야 하는데, 물동량의 흐름은 차량 간 환송을 통해서도 연결될 수 있다. 모든 노드가 환송거점이 될 수 있으며, 환송거점 후보를 사전에 지정해두지는 않는다. 광역차량 순환노선 설정문제는 앞선 조건들을 만족하는 최단길이의 순환노선을 찾아내고자 한다. 문헌연구를 통해 유사연구(통행경로망 디자인문제, 협력적 AGV체계배치, 다중외판원문제, 차량경로문제, 다중회차지점 차량경로문제, 2단계 차량경로문제)를 조사하였으며, 광역차량 순환노선 설정문제와의 차이점을 분석하여 본 연구의 특수성과 독창성을 확인할 수 있었다.

혼합정수계획법으로 구성된 수리모형을 상용 프로그램인 CPLEX를 활용해 실험한 결과 16개 노드(거점) 크기의 문제 수준에서는 10분 이내, 20개 노드의 경우 12시간 이내에 최적해를 도출하는 것으로 확인했다. 25개 노드 수준의 크기에서는 24시간 이내에 최적성간격 10% 미만의 가능해를 제시할 수 있었다. 사례연구를 위해 대한민국 3대 도시의 실제 지리정보에 기반한 분석을 진행하였다. 수리모형에 의해 도출된 순환노선을 이용했을 때와 P2P 배송체계를 이용했을 때 발생하는 물품당 이동거리(시간)를 비교하였으며, 90% 이상의 물품당 이동거리(시간) 감축효과를 확인할 수 있었다. 후속연구에서는 P2P와의 비교 외에도 택배 또는 풀필먼트 서비스에서 발생하는 물품당 이동거리(시간)와의 비교가 함께 제시될 필요가 있다. 아울러, 향후 연구에서는 본 연구에서 고려할 수 없었던 차량의 종류, 용량, 물동량, 환송횟수 및 대기시간(환송 대기시간 및 차량간 운행 일정의 차이에 의한 대기시간) 등을 포함한 수리모형이 제시될 필요가 있으며, 정확한 데이터에 입각한 추가분석이 요구된다.

본 연구는 V2V 집화 및 배송체계의 광역, 지역, 배송 노선을 함께 고려하지 않았으며, 광역노선 설정의 최적화만을 목표로 하였다. 따라서 이는 전체 네트워크 상의 최적해가 아님을 밝힌다. 광역 노선의 최적화가 진행된 이후 지역 노선과 배송 노선은 일반적인 차량경로계획 문제로 해석하여 별도로 해결할 수 있다. 광역차량 순환노선 설정문제는 V2V 집화 및 배송체계에 존재하는 특수한 네트워크 구조에 착안하였으며, 본 연구는 해당 네트워크 구조의 효율화에 기여한다. 대중교통과 물류체계의 특성을 혼합한 대중물류망이 기존의 택배체계와 P2P 배송체계 사이의 간극을 좁히는 새로운 서비스로 자리 잡는다면, 보다 효율적이고 환경친화적인 물류체계를 구축할 수 있을 것으로 기대된다.



## 참고문헌

- Agrawal, J., Mathew, T. v., & Asce, A. M. (2004). Transit Route Network Design Using Parallel Genetic Algorithm. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(3), 248-256.  
<https://doi.org/10.1061/ASCE0887-3801200418:3248>
- Alfonso, V., Boar, C., Frost, J., Gambacorta, L., & Liu, J. (2021). Online appendix - E-commerce in the pandemic and beyond. In *BIS Bulletin*(No. 36). <https://www.bis.org/publ/bisbull36.pdf>
- Bazrafshan, R., Hashemkhani Zolfani, S., & Al-E-hashem, S. M. J. M. (2021). Comparison of the sub-tour elimination methods for the asymmetric traveling salesman problem applying the SECA method. *Axioms*, 10(1), 1-14. <https://doi.org/10.3390/axioms10010019>
- Belgin, O., Karaoglan, I., & Altiparmak, F. (2018). Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and heuristic approach. *Computers and Industrial Engineering*, 115, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.032>
- Bozer, Y. A., & Srinivasan, M. M. (1991). Tandem Configurations for Automated Guided Vehicle Systems and the Analysis of Single Vehicle Loops. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 23(1), 72-82. <https://doi.org/10.1080/07408179108963842>
- Bozer, Y. A., & Srinivasan, M. M. (1992). Tandem AGV systems: A partitioning algorithm and performance comparison with conventional AGV systems. *European Journal of Operational Research*, 63(2), 173-191. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90024-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90024-4)
- Carlos E. Andrade, Flávio K. Miyazawa, & Mauricio G.C. Resende. (2013). Evolutionary algorithm for the k-interconnected multi-depot multi-traveling salesmen problem. *GECCO '13: Proceedings of the 15th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 463-471.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1145/2463372.2463434>
- CJ Logistics. (2022). One-stop logistics solution. Retrieved from September 23, 2022, from <https://www.cjlogistics.com/ko/business/parcel>
- Coupang. (2022). We building the future of commerce. Retrieved from September 23, 2022, from <https://news.coupang.com/archives/14432>
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2009). Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems. *Transportation Science*, 43(4), 432-454. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0279>
- Dubois, D., Bel, G., & Llibre, M. (1979). A Set of Methods in Transportation Network Synthesis and Analysis. *Journal of the Operational Research Society*, 30(9), 797-808.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1057/jors.1979.190>
- ElMekkawy, T. Y., & Liu, S. (2009). A new memetic algorithm for optimizing the partitioning problem of tandem AGV systems. *International Journal of Production Economics*, 118(2), 508-520.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.01.008>
- Flood, M. M. (1956). The Traveling-Salesman Problem. *Operations Research*, 4(1), 61-75.  
<https://doi.org/10.1287/opre.4.1.61>
- GraphHopper. (2022). Graphhopper Routing Engine. Retrieved from September 23, 2022, from <https://github.com/graphhopper>

- Hasselstrom, D. (1981). Public Transportation Planning: A Mathematical Programming Approach. Doctoral Dissertation, University of Goteborg, Sweden
- Hua, H. (2018). A Flow Formulation for Steiner Tree Problem.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21163.75047>
- JoongAng. (2022). There is no delivery app or restaurant left...Where did all that delivery money go? Retrieved from September 23, 2022, from <https://www.joongang.co.kr/article/25063010#home>
- Khuller, S., Raghavachari, B., & Young, N. (1996). On strongly connected digraphs with bounded cycle length. *Discrete Applied Mathematics*, 69(3), 281–289.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0166-218X\(95\)00105-Z](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0166-218X(95)00105-Z)
- Kim, M., Kho, S. Y., & Kim, D. K. (2019). A transit route network design problem considering equity. *Sustainability(Switzerland)*, 11(13). <https://doi.org/10.3390/su11133527>
- Korea Statistics. (2021). Trends in online shopping in December 2021 and annually. Retrieved from September 23, 2022, from [https://kostat.go.kr/portal/korea/kor\\_nw/1/12/3/index.board?bmode=read&bSeq=&aSeq=416587&pageNo=1&rowNum=10&navCount=10&currPg=&searchInfo=&sTarget=title&sTxt=](https://kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/1/12/3/index.board?bmode=read&bSeq=&aSeq=416587&pageNo=1&rowNum=10&navCount=10&currPg=&searchInfo=&sTarget=title&sTxt=)
- KoreaLogisticsNews. (2022). Incheon Metropolitan Government has demonstrated that “one-day delivery based on shared logistics network.” Retrieved from September 23, 2022, from <https://www.klnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=305291>
- Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345–358.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90192-C](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C)
- LogiDucks. (2022). The same-day delivery network without a logistics center created by Incheon City in Yeonsu-gu. Retrieved from September 23, 2022, from [https://www.logi-ducks.com/web/sub05.php?hjb1\\_sn=1519](https://www.logi-ducks.com/web/sub05.php?hjb1_sn=1519)
- Olive Young. (2022). Same-day delivery for Olive Young without worrying about delivery. Retrieved from September 23, 2022, from <https://www.oliveyoung.co.kr/store/planshop/getPlanShopDetail.do?dispCatNo=500000100700005>
- Öncan, T., Altinel, I. K., & Laporte, G. (2009). A comparative analysis of several asymmetric traveling salesman problem formulations. *Computers and Operations Research*, 36(3), 637–654.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.11.008>
- OpenStreetMap. (2015). Setting up a local copy of the OpenStreetMap database. Retrieved from September 23, 2022, from [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Setting\\_up\\_a\\_local\\_copy\\_of\\_the\\_OpenStreetMap\\_database,\\_kept\\_up\\_to\\_date\\_with\\_minutely\\_diffs](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Setting_up_a_local_copy_of_the_OpenStreetMap_database,_kept_up_to_date_with_minutely_diffs)
- Progressive Grocer. (2021). The Age of Micro Fulfillment \_ Progressive Grocer. Retrieved from September 23, 2022, from <https://progressivegrocer.com/age-micro-fulfillment>
- ShippingNewsNet. (2021). What is the expected pain and exit of the fast-growing delivery industry due to COVID-19? Retrieved from September 23, 2022, from <https://www.shippingnewsnet.com/news/articleView.html?idxno=43519>
- Taha Benslimane, M., & Benadada, Y. (2014). Exact method for the multi-region vehicle routing problem

in large quantities by a heterogeneous fleet of vehicles. 2014 International Conference on Logistics Operations Management. <https://doi.org/10.1109/GOL.2014.6887420>

Today. (2022). A real one-day delivery for everyone today. Retrieved from September 23, 2022, from <https://amazing.today/>

Woowa Brothers Crop. (2022). Technology required to reduce delivery time. Retrieved from September 23, 2022, from <https://story.baemin.com/3529/>

Yang, Z., Yu, B., & Cheng, C. (2007). A Parallel Ant Colony Algorithm for Bus Network Optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(1), 44-55.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2006.00469.x>

Yu, B., Yang, Z. Z., Jin, P. H., Wu, S. H., & Yao, B. Z. (2012). Transit route network design-maximizing direct and transfer demand density. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 22, 58-75. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.12.003>

## 요약문

전자상거래 제품의 집화/배달 속도와 효율성은 고객 선택에 있어 중요해졌다. 최근 기존 택배나 P2P(포인트 투 포인트) 배송 서비스보다 저렴한 비용으로 당일 배송을 보장하는 업체가 차량 대 차량(V2V) 집화/배송 시스템을 제안했다. V2V 시스템은 차량이 지속적으로 간선 노선을 순환하며 상품의 배송에 있어서 상대적으로 적은 인프라 투자로 운영될 수 있다. 본 연구는 순환 간선 경로 문제(CTLRP)를 공식화하여 순환 경로를 생성하는 방법을 제안한다. 혼합 정수계획법이 사용되었으며 해당 문제를 CPLEX를 통해 해결한다. 다음으로, 이 연구는 대한민국의 일부 주요 도시에 적용된 사례를 보여준다. 사례 연구를 분석한 결과, V2V 시스템은 P2P 시스템에 비해 품목당 필요한 배송 거리(시간)를 크게 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

**주제어:** 차량간 배송, 대중교통망, 소포배송, 배송서비스, 간선노선 경로문제

## 물류과학기술연구 제4권 제1호

- 
- 인 쇄 : 2023년 6월 29일
  - 발 행 : 2023년 6월 30일
  - 발행인 : 권 용 장
  - 편집인 : 채 준 재
  - 발행처 : (사)한국물류과학기술학회(<https://www.klst.or.kr>)  
경기도 의왕시 철도박물관로 176  
전화 : 031-460-5921
- 

(비매품)

□ 이 학술지의 저작권은 (사)한국물류과학기술학회가 갖고 있습니다.

Copyright 2023. The Society of Logistics Science and Technology all rights reserved.