

택배 터미널의 바닥짐 상황과 입하 트럭의 대기시간을 고려한 트럭 운영 스케줄링

노영후¹, 박유나¹, 홍정윤¹, 조성원^{2*}

^{1,2}단국대학교 경영공학과

Scheduling Inbound Trucks for Workload Balancing of Outbound Docks in Cross-docking Systems

Younghoo Noh¹, Youna Park¹, Jeongyoon Hong¹, Sungwon Cho^{2*}

^{1,2}Department of Management Engineering, Dankook University

Last-mile delivery companies are facing significant challenges in increasing productivity due to the growth of e-commerce markets, coupled with the development of information communication technologies. It is important to maximize the operational efficiency of existing facilities because investment in facilities and equipment requires long-term planning. To tackle this issue, this study proposes a mathematical model for inbound truck scheduling to balance the workload across multiple temporary inventory storages located in each outbound chute, while minimizing the waiting time for inbound trucks. The proposed model strategically allocates inbound trucks to inbound docks with a dynamic scheduling and reschedule the plan whenever the terminal situation is updated. To evaluate its effectiveness, numerical experiments were conducted based on real-life data. It has been verified that the proposed methodology yields superior results compared to existing strategy. Based on this study, the efficiency of the parcel distribution center can be enhanced.

Keywords: Parcel distribution center, Cross-docking, Truck scheduling, Temporary inventory storage, Dynamic rescheduling strategy

논문접수일 : 2023.10.20. 논문수정일 : 2024.12.14. 게재확정일 : 2024.01.27.

1. 단국대학교 경영공학과 학사과정

2*. 단국대학교, 경영공학과 교수, Corresponding Author: sungwon.cho@dankook.ac.kr

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

온라인과 모바일 시장이 성장함에 따라 택배 시장의 규모도 점차 확대되고 있다. 소비자 특성상, 합리성과 편리성을 추구하기 때문에 오프라인에서 구매하던 상품들을 온라인에서 구매함에 따라, 택배 산업은 지속적으로 성장할 것으로 예상된다. 특히 배송 서비스의 차별성과 증가하는 물량을 안정적이고 효율적으로 처리할 수 있는 역량을 확보하는 것이 가장 중요한 경쟁 우위 요소로 판단된다. 이를 위해서 택배 회사에서는 배송물량을 효율적으로 처리하기 위한 cross-docking 터미널을 도입하여 글로벌 경쟁력을 높이고자 한다 (Boysen et al., 2013). Cross-docking 터미널을 도입하여 성공적인 물류관리를 이룬 회사들은 여러 산업 분야에서 찾을 수 있다. 예를 들어 Wal-Mart (stark et al., 1992), UPS (Forger, 1995), Toyota (Witt, 1998) 등이 있다.

Cross-docking 터미널은 <Figure 1>과 같이 입하 트럭이 접안하여 화물을 하차하는 입하 도크 영역, 입하 트럭에서 하차한 화물을 분류하는 영역, 분류된 화물을 상차하는 출하 도크 영역으로 나뉜다. 과거에는 모든 영역에서 사람이 투입되어 화물을 운반하였지만, 점차 기술이 발전함에 따라 cross-docking 터미널에서는 지게차와 같은 장비를 이용하거나 컨베이어 벨트 시스템과 같은 설비를 도입하여 자동으로 많은 물건을 처리하고 운반한다 (Van velle et al., 2012). 특히, cross-docking 터미널에서 분류해야 하는 물량이 많은 택배 회사에서 다양한 연구와 시도를 통해 기술의 발전을 견인하였다.

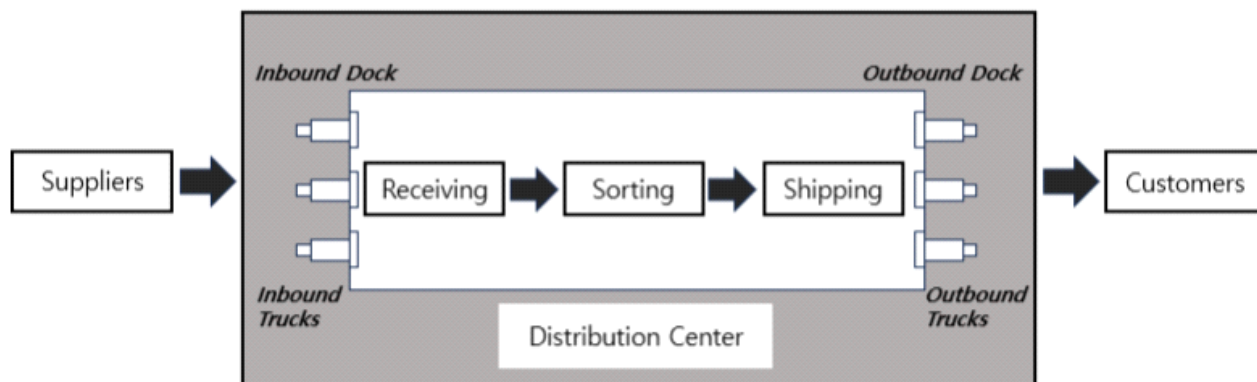


Figure 1. Typical layout of a cross-docking terminal

Cross-docking 터미널에 관해서는 많은 연구가 이루어졌다. Van velle et al.(2012)의 분류에 따르면 cross-docking에 관한 연구는 location of cross-dock, layout design, cross-docking network, dock door assignment, truck scheduling 등으로 분류할 수 있다. 과거에는 장치산업에 해당하는 cross-docking 터미널의 초기 설정과 관련하여 연구됐다. 하지만, 한번 컨베이어 벨트 시스템이 구축된 cross-docking 터미널에 물리적인 변형을 가하거나 새로운 설비를 도입하는 것은 많은 비용과 시간을 요구한다. 따라서, 다양한 택배 회사들은 최적화 및 자동화 기법을 도입하여 기존의 처리 능력의 한계를 극복하고 터미널을 효율적으로 관리하기 위한 노력을 하고 있다. 특히, 택배 허브 터미널의 처리 용량을 결정하는 트럭 스케줄링은 다양한 운영사를 유치하기 위한 주요 경쟁 요인이므로 최적화 로직의 개발을 통한 효율적인 관리가 매우 중요하다. 본 연구에서는 cross-docking 터미널을 효율적으로 운영하기 위한 트럭 스케줄링 problem에 주목하고자 한다.

Cross-docking 터미널에서 트럭 스케줄링 problem은 주로 입하 트럭의 스케줄링을 의미한다. 출하 도크

별로 목적지가 정해져 있으며 출하 트럭은 해당 목적지 도크에 할당하면 되기 때문에 단순하다. 오히려 도크에 목적지를 할당하는 문제가 병목을 해결하는 데 중요하다. 한편, 입하 트럭은 설정된 목적지가 없으므로 유희 입하 도크에 도착한 입하 트럭을 지연 없이 빠르게 할당하는 것이 중요하다. 과거 연구에서는 입하 트럭 내부의 화물 정보를 확인할 수 없었기 때문에 단순한 문제였다. 그러나 현재 기술의 발전에 따라 각 트럭의 내부 화물 정보를 미리 취득할 수 있게 되면서 이를 활용한 최적화가 중요해졌다. 특히, 과거의 할당 전략은 입하 트럭이 싣고 있는 화물의 목적지를 모르기 때문에 하차한 화물이 출하 도크에 균일하게 분류되지 않아 병목현상을 발생시켰다. 따라서, 본 연구에서는 입하 트럭의 화물 정보를 알고 있는 상태에서 출하 도크의 작업 부하 분산을 위한 입하 트럭 스케줄링 전략을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 다음 절에서는 택배 허브 터미널에서의 truck scheduling에 관한 기존의 연구를 조사한다. 제2장에서는 바닥집 상황과 대기시간을 도입한 수리적 모델을 설명하고, 제3장에서는 최적의 inbound truck scheduling을 위한 dynamic rescheduling strategy를 제안한다. 제4장에서는 제안한 방법론의 효과를 검증하기 위한 수치 실험을 수행하고 이에 따른 결과를 분석한다. 마지막으로 제5장에서는 연구의 결론 및 시사점을 제시한다.

1.2 문헌 조사

트럭 스케줄링 문제는 트럭의 도착 순서에 따라 택배 터미널의 효율성이 크게 영향을 받기 때문에 택배 업계에서 여러 번 논의되어 왔다. 예를 들어, 출하 스케줄이 있는 입하 트럭이 하차 작업 중에 지연되면 해당 트럭의 상차 과정도 지연되며 다른 출하 트럭에도 지연이 발생할 수 있다. 이러한 지연이 모여 택배 터미널의 효율에 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한, 임시 보관 장소로 지정된 두 개의 슈트 사이의 좁은 공간을 바닥집이라고 하는데, 바닥집이 가득 차면 택배 터미널의 라인 전체가 멈춰야 하므로 금전적으로 막대한 손해를 입는다. 물류가 택배 터미널에 도착하는 시간을 최소화하기 위해 연구자들은 트럭 스케줄링 문제를 다양한 각도에서 접근했다.

McWilliams(2009)는 택배 허브 스케줄링 문제를 수학적으로 모델링 하였고 하차부터 상차까지의 전환 작업에 걸리는 시간의 최소화를 유전 알고리즘을 사용하여 평행한 산출 스테이션의 최대 업무를 최소화하는 방법으로 풀었다. 이 모델에서는 들어오는 트럭 세트와 하차 위치 세트를 스케줄링하며, 도착하는 택배의 종류를 여러 가지로 가정하고 있다. 하지만 최댓값을 최소화하는 방법에 입각하면 일반적으로 솔루션 스페이스가 매우 커지게 되며 해답도 여러 가지가 나온다는 단점이 존재하기 때문에 좋은 방법은 아니다. 하차부터 상차까지의 전환 작업에 걸리는 시간의 최소화를 목적으로 Joo and Kim(2013)은 스케줄 문제를 3종류의 트럭 카테고리로 나누어 풀었다. 연구자들에 따르면 트럭은 입하 트럭, 출하 트럭, 컴파운드 트럭으로 구분된다. 연구자들은 택배 터미널이 여러 개의 입구를 가진 cross-docking 터미널이라고 가정하였고 입구 배정 및 docking 순서를 모든 트럭 카테고리에 대해 동시에 풀었다.

다른 연구자들은 입하 트럭의 스케줄을 짜기 위해 출하 트럭의 출발시간에 초점을 맞추었다. Boysen et al.(2013)은 cross-docking 터미널에서 출발시간이 정해져 있는 상황에 대해 트럭 스케줄링을 연구하였다. 연구자들은 총 손해 비용을 최소화하는 방법으로 모델을 제시했는데, 여기서 손해 비용이란 들어오는 택배가 나가는 트럭의 출발시간 전에 해당 트럭에 실리지 못할 때 발생한다고 가정했다. 하지만 손해가 발생된 택배가 다음 트럭에 실려 배달되는 것은 고려하지 않았기 때문에 현실과는 다소 거리가 있다. 보다 현실적인 모델을 위해 Tootkaleh et al.(2016)은 지연된 택배는 같은 도착지를 가진 다음 트럭이 출발할 때까지 임시 장소에 보관되고 있는 상황을 가정하였고, 앞선 연구와 똑같이 트럭의 출발시간이 정해진 상황에서의 cross-docking 스케줄을 연구하였다. 택배 교체 아이디어에 의해 해당 모델은 들어오는 트럭의 최적 순서를 도출하는데, 택배 교체 아이디어란 지연된 택배를 같은 도착지로 나가야 하는 다른 택배로 교체하는 가정을 말한다. Molavi et al.(2018)은 또 다른 접근 방식으로 출하 트럭의 배송 기한을 고정하여 트럭

스케줄링을 연구했다. 연구진은 문제의 재정적 측면을 적용하기 위해 배송 지연으로 인한 위약금과 배송 비용으로 구성된 총 비용을 최소화했다.

Liao et al.(2013)은 트럭 스케줄링 문제를 여러 메타휴리스틱 알고리즘을 사용하여 풀었다. 연구자들은 도크의 할당과 들어오는 트럭의 순서를 동시에 풀었고 simulated annealing, tabu search, ant colony optimization, differential evolution, 2개의 하이브리드 differential evolution 알고리즘 등의 6개의 알고리즘을 사용하였다. 그리고 택배 센터에 적용하기 가장 좋은 알고리즘을 찾기 위해 결과를 비교하였다. Boysen et al.(2017)은 한발 더 나아가 트럭 스케줄링 문제를 택배 센터의 운영과 연관 지어 해결했다. 들어오는 트럭의 스케줄 문제를 푼 다음 연구자들은 트럭 스케줄링이 택배 센터의 중앙 conveyor 시스템의 분류 성능에 어떠한 영향을 미치는지 테스트하였고, 경영상 깊은 통찰력을 가져다주었다.

Mahziaz Taghizadeh(2022)은 inbound dock 및 outbound dock에서 최상의 truck docking 순서를 찾고 cross-docking에서 truck scheduling 문제를 해결하기 위해 이중 목표 혼합 정수 수학적 모델을 제시한다. 이는 총 운영 시간(makespan)과 터미널 내 화물 이동 비용을 최소화하는 것을 목표로 하며, NSGAII(비지배 정렬 유전 알고리즘)이라는 진화 알고리즘을 통해 계산이 복잡한 더 큰 문제를 해결한다. 또 다른 cross-docking 터미널에서의 scheduling을 제안하는 Mohammad Mahdi Nasiri(2022)은 불확실성에 대비하여 사전 예방적인 접근 방식을 취하고 마스터 schedule을 생성하는 데 중점을 두고 있다. Truck의 도착 불확실성에 대응하기 위해 주기적인 예측-반응적 rescheduling 시스템을 제안하고, 예정된 truck 도착을 기준으로 계획 기간 초기에 생성되는 마스터 schedule과의 편차를 최소화하기 위한 scheduling 최적화 모델을 제시한다.

이상 선행연구를 살펴본 결과 cross-docking 터미널의 바닥짐 초과로 인한 작업 중단과 불균형이라는 문제를 고려한 연구는 찾을 수가 없었다. 화물 트럭에 최대한 많은 수의 물건을 적재하기 위해 먼저 분리되어 나오는 화물을 잠시 대기 시켜 놓거나 다음 출하 트럭이 도착할 때까지 쌓이게 되는 바닥짐으로 라인이 멈추는 문제는 sorting 작업의 정지를 유발하여 총 운영시간(makespan)을 크게 증가시키게 된다. 따라서 본 연구에서는 cross-docking 터미널에서 출하 슈트의 바닥짐 수준이 적정량을 초과하여 발생하는 터미널의 효율성 저하 및 운영시간 증가를 최소화하기 위해서 대기 트럭의 입하 순서 조정과 입하 도크의 할당 위치를 결정하기 위한 최적 솔루션을 제시한다.

2. 연구방법론 및 연구모형

2.1 문제 정의

일반적으로 입하 트럭 스케줄링을 위해서는 다양한 요소들을 고려해야 한다. 우선, 트럭의 종류에는 입하 트럭, 출하 트럭, 컴파운드 트럭이 있다. 입하 트럭과 출하 트럭은 각각 하차와 상차 작업만 배차된 차량을 의미하며, 컴파운드 트럭은 입하 도크에서 하차 작업을 마친 뒤 출하 도크에서 상차 작업까지 배차되어있는 차량을 의미한다. 그리고 택배 허브 터미널을 사용하는 고객사, 차량 내의 물류의 종류, 차량의 종류 등이 있다. 만약, 차량 내의 물류의 종류가 신선식품일 경우에 신선식품의 신선도를 유지하기 위해서 짧은 시간 내에 하차하여 적정 온도를 유지하는 것이 매우 중요하다. 그리고 차량의 종류가 특판 차량일 경우에 특판 차량의 특성을 고려하여 하차를 진행하여야 한다. 특판 차량이란 특별한 물류의 요구 사항을 충족시키기 위해 제작된 차량으로, 물품의 운송, 보관, 적재를 최적화하기 위한 기능과 구조를 가지고 있다. 이러한 다양한 요소들을 고려하면 문제의 복잡도가 매우 높아지기 때문에 실제 택배 터미널에서는 <Table 1>의 로직에 기반하여 입하 도크를 할당한다.

Table 1. Operational logic for the current practice

Step	Content
Step 1	Unloading priority for priority.
Step 2	Priority unloading if there are fresh products in the loaded goods within the vehicle.
Step 3	Priority unloading for compound trucks after unloading. (subject to priority unloading if the temporary inventory storage at the loading area is insufficient)
Step 4	Priority unloading for special distribution vehicles.
Step 5	Priority unloading for specific regions (destinations) with a deadline for departure time.

본 로직은 총 5단계로 이루어져 있다. 첫 번째 단계는 우선순위 고객사를 최우선으로 하차를 진행하며, 이는 일 평균 2~3대 트럭에 해당한다. 두 번째는 트럭 내의 적재상품 중 신선식품이 있는 경우 우선 하차한다. 신선식품의 신선도 유지를 고려하여, 트럭 내 신선식품이 잔류하는 시간을 최소화하기 위해 작업 마무리 시점인 03시에서 04시경에 중요도가 상승한다. 세 번째는 물류를 하차한 뒤, 컴파운드 트럭으로 배차가 되어있는 경우 우선 하차한다. 단, 출하 슈트의 바닥짐의 용량이 부족할 경우 최우선으로 하차할 수 있도록 한다. 만약 바닥짐이 가득 찬 상태라면, 원활하게 상차를 진행할 수 없어 안전상의 문제를 고려하여 해당 라인의 가동을 멈추게 된다. 이는 작업의 효율성을 떨어뜨려, 택배 허브 터미널의 총 운영시간 (makespan)이 증가하게 되어 많은 비용이 발생하게 된다. 네 번째는 특판 차량의 우선 하차이다. 이는 특판 차량의 특성을 고려하여, 26시 이전에 우선 하차하도록 한다. 마지막 다섯 번째는 출하 트럭의 출발시간에 대한 dead line이 존재하는 특정 지역이 존재할 때 우선 하차하도록 한다.

로직의 우선순위 선정 기준에 따르면, 거리나 시간에 따른 할당보다 출하 슈트의 바닥짐 상황에 따른 입하 도크의 할당이 최우선시되는 것을 알 수 있다. 그러나 본 로직을 반영한 택배 허브 터미널을 새로 설계하거나 신규 장비를 투입할 경우, 상당한 시간과 대규모의 투자가 요구된다. 따라서 현재 보유하고 있는 설비의 효율성을 극대화하기 위해 출하 슈트의 바닥짐 상황을 반영하여 적절한 입하 트럭 스케줄링을 수립하여 택배 허브 터미널의 운영 효율성을 향상시키고자 한다.

본 연구는 바닥짐의 과부하에 따른 라인 멈춤으로 인한 택배 허브 터미널의 총 운영시간 증가를 해결하는 것에 집중하기 위해 일부 고려사항들을 가정하며 다음 절에 상세히 서술하였다.

1) 입하 트럭의 할당 정책

입하 트럭의 할당 정책을 수립하기 위해 입하 트럭이 입하 도크에 접안하는 순서에 따라 입하 트럭 set의 pool을 생성하고자 한다. 이를 위해서 비어있는 입하 도크의 queue length 상태에 따라 접안하는 입하 트럭의 순차적 결정 순서를 <Table 2>에 기반하여 가정한다. 이때 queue length는 입하 도크에 접안하기 위해 대기 중인 입하 트럭의 수를 의미한다.

Table 2. Assumptions of ‘입하 트럭’ allocation

Case	Content
Case 1	queue length = 0 : the state of the inbound dock is changed to idle.
Case 2	queue length = 1 : the corresponding truck docks immediately.
Case 3	queue length \leq total number of inbound docks : all trucks are considered as solution candidates.
Case 4	queue length > total number of inbound docks : only the selected trucks based on waiting time, up to the number of inbound docks, are considered as solution candidates.

대기 중인 트럭이 없다면 입하 도크를 유헴 상태로 취급하고 대기 중인 트럭이 1대 있다면 트럭을 도크에 즉시 접안시킨다. 입하 도크 수가 대기 중인 입하 트럭의 수보다 많다면 모든 트럭을 할당 후보 트럭으로 고려하고 대기 중인 입하 트럭의 수가 입하 도크의 수보다 많다면 대기시간을 기준으로 선별된 트럭만 할당 후보 트럭으로 고려한다. 이 가정을 바탕으로 적절한 입하 트럭을 선택하기 위해서 트럭이 접안할 때 각 트럭의 예상 출발 시간마다 바닥짐 상황을 좋게 하는 해를 도출하고, 비어있는 도크에 할당된 트럭을 선택하여 입하 도크에 대한 할당 최적화 정책을 제안한다.

입하 트럭의 할당 정책의 목적은 터미널 총 운영시간의 최소화 또는 정해진 시간 내의 상차물량(throughput)의 최대화이다. 두 목적 가운데, 운영시간을 단축하는 방법으로 두 가지가 존재한다. 첫 번째 방법은 도크와 트럭을 매칭 하는 가동시간의 최소화이다. 이 방법은 도크와 트럭을 매칭 하는 과정의 시간을 최소화함으로써 터미널의 차량 및 물류 처리 속도를 높여 총 운영시간을 단축할 수 있다. 두 번째 방법은 바닥짐 초과로 발생하는 라인의 멈춤과 지연을 방지하기 위한 강건한 도크와 트럭의 할당이다. 이는 바닥짐 초과로 인해 라인의 정상 가동에 문제가 생겼을 때, 출하 슈트의 바닥짐을 반영하여 도크와 트럭을 할당함으로써 터미널 운영의 효율성이 향상되어 총 운영시간을 줄일 수 있다. 그러나 택배 허브 터미널의 특성상 queue length가 매우 길고, 입하 도크의 사용률이 거의 항상 1의 수준으로서 매우 높다. 따라서 이러한 택배 허브 터미널의 특성을 고려했을 때, 실질적인 운영시간을 단축하는 방법은 두 번째 방법인 바닥짐 상황을 좋게 하는 출하 도크 부하 분산을 하는 것이다.

2) 바닥짐 상황

입하 트럭의 할당 정책을 올바르게 수행하기 위해서 고려해야 할 주요 사항은 바닥짐 상황을 좋게 하는 트럭을 선택하는 것이다. 바닥짐 상황이란 터미널의 화물을 처리하는 과정에서 상차되지 못한 화물들이 출하 슈트 주변에 쌓여있는 것을 의미한다. 이러한 바닥짐 상황이 지속되면 라인이 멈추거나 지연되어 터미널 총 운영시간에 영향을 미친다.

본 연구에서는 바닥짐 상황을 좋게 하는 출하 도크 부하 분산을 진행하기 위해서 트럭 하나가 하차를 끝내어 도크 하나가 비어있을 때마다, 바닥짐을 체크하고, <Table 3>의 상황을 가정한다.

Table 3. Assumptions of temporary inventory storage

Section	Assumptions
(1)	At the current point in time (the allocation decision point), all the logistics information for items that have been offloaded, as well as information on the temporary inventory storage situation.
(2)	When an outbound truck exists at the outbound dock, assume that the truck is waiting at the outbound dock first.
(3)	Up to the point where the arriving truck has completed unloading, calculate the total expected volume of parcels going to each destination for all trucks that have docked. Estimate the inventory situation, considering it balanced. If it's balanced, it's considered a good temporary inventory storage situation
(4)	At a certain point, when calculating the temporary inventory storage of the outbound chutes, we consider the following buffer ($c_s(Y_i)$). (However, C_s is temporary inventory storage capacity.) $c_s(Y_i) = C_s + (\text{Number of compound trucks that have completed unloading}) \times (\text{Load of a single outbound truck})$
(5)	At a certain point in time, when outbound trucks are waiting, we consider the following buffer($c_s(Y_i)$). $c_s(Y_i) = C_s + \{(\text{Number of outbound trucks}) + (\text{Number of compound trucks that have completed unloading})\} \times (\text{Load capacity for one additional outbound truck})$

할당 결정 시점을 기준으로 하차 된 화물 정보 및 바닥집 상황의 정보를 알고 있다고 가정하고 출하 슈트에 트럭이 존재하는 경우, 출하 도크에 해당 트럭이 먼저 대기하고 있다고 가정한다. 접안하는 트럭의 작업 완료 시간까지 다른 도크에 접안한 모든 트럭들에 대하여 각 목적지로 가는 예상 물량의 총합을 구한 다음 바닥집 상황을 추산하여 부하 분산이 되어있을수록 좋은 바닥집 상황으로 간주한다. 특정 시점에서 출하 슈트의 바닥집 계산 시 (4) 수식을 따른다. 만약 그 시점에 출하 트럭이 대기하고 있는 경우에는 (5) 수식을 따른다.

2.2 연구 모형

1) Notation

입력 데이터

Y_i	입하 트럭 i 가 출발할 때의 상황
a_i	입하 트럭 i 의 도착시간
e_i	입하 트럭 i 의 작업 완료시간
d_j	하차 중인 트럭 j 의 (예상) 작업 완료시간
h_i, h_j	입하 트럭 i 의 (예상) 작업 소요시간(하차 중인 트럭 j 의 (원래 총 적재물량 기준 예상) 작업 소요시간
n_{is}, n_{js}	입하 트럭 i 의 적재물량 가운데 출하 슈트 s 로 가는 총 물량 개수(하차 중인 트럭 j 의 남은 적재물량 가운데 s 로 가는 총 물량 개수)
z_{is}, z_{js}	입하 트럭 $i(j)$ 가 출하 슈트 s 로 가는 컴파운드 트럭이면 적재물량, 그렇지 않으면 0
c_s	현재 시점 기준 출하 슈트 s 의 바닥짐의 capacity (매 시점 업데이트되는 정보)
r_s	현재 시점 기준 출하 슈트 s 로 간 총 물량 (매 시점 업데이트되는 정보)

결정 변수

x_{ik}	입하 트럭 i 가 입하 도크 k 에 하차하면 1 아니면 0
b_i	입하 트럭 i 의 접안(예상)시간
d_i	입하 트럭 i 의 (예상) 작업 완료 시간
$c_s(Y_i)$	입하 트럭 i 가 출발할 때 출하 슈트 s 의 바닥짐 capacity (트럭 i 가 컴파운드 트럭이어도 capacity 미만영)
$r_s(Y_i)$	입하 트럭 i 가 출발할 때까지 출하 슈트 s 로 간 총 물량 (트럭 i 의 적재물량 포함, 바닥짐 수준은 $c_s(Y_i) - r_s(Y_i)$ 로 표현됨)

2) 수리적 모델

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} [\alpha (\max_s (c_s(Y_i) - r_s(Y_i)) - \min_s (c_s(Y_i) - r_s(Y_i))) + \beta (b_i - a_i)] \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{k \in K} x_{ik} = 1, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ik} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$b_i = \sum_{k \in K} (e_i \times x_{ik}), \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$d_i = b_i + h_i, \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$c_s(Y_i) = c_s + \sum_{\substack{i' \in I \cup J \\ d_{i'} > d_i}} z_{i's}, \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (6)$$

$$r_s(Y_i) = r_s + n_{is} + \sum_{\substack{i' \in I \cup J \\ d_{i'} < d_i}} n_{i's} + \sum_{\substack{i' \in I \cup J \\ d_{i'} > d_i}} [(1 - \frac{d_{i'} - d_i}{h_{i'}}) \times n_{i's}], \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (7)$$

$$b_i \geq 0, \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$d_i \geq 0, \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$c_s(Y_i) \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (10)$$

$$r_s(Y_i) \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (11)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (12)$$

목적식 (1)은 출하 도크 부하 분산과 접안지연을 최소화하는 것이다. 이때 α 와 β 는 각각 바닥집 여유 공간과 대기시간의 가중치를 의미한다. 본 실험은 작은 규모로 진행했기 때문에 바닥집 여유 공간보다 대기 시간에 더 큰 가중치를 부여해 각각 0.9, 0.1로 설정해 진행하였다. 제약식 (2)는 모든 입하 트럭은 반드시 한 개의 입하 도크에 할당됨을 의미하며, 제약식 (3)은 1개의 입하 도크에 1개의 트럭만 접안됨을 의미한다. 제약식 (4)는 입하 트럭의 접안(예상)시간에 대하여 도크에서의 작업이 끝난 후에 다음 트럭이 접안하게 됨을 의미하고, 제약식 (5)는 입하 트럭의 (예상)작업 완료시간을 접안(예상)시간과 (예상)작업 소요시간의 합임을 의미한다. 제약식 (6)은 입하 트럭 i 가 출발할 때의 출하 슈트 s 의 바닥집을 실시간 s 의 바닥집과 트럭 i 보다 작업을 먼저 끝낸 트럭 중 해당 슈트로 가는 컴파운드 트럭의 적재 물량의 합임을 의미한다. 이때 컴파운드 트럭의 적재 물량은 이진 유형을 사용해 컴파운드 트럭이면 트럭의 적재물량, 그렇지 않으면 0으로 정의했다. 제약식 (7)은 입하 트럭 i 가 출발할 때까지 슈트 s 로 이동한 물량을 실시간 슈트 s 의 물량과 i 에서 s 로 이동한 물량, i 보다 작업을 먼저 끝낸 트럭에서 s 로 이동한 물량, i 보다 작업이 늦게 끝

나는 트럭에서 s 로 이동한 물량의 합임을 의미한다. 제약식 (8)~(11)은 각각 결정 변수를 비음 실수 유형으로 정의하고 제약식 (12)는 결정 변수를 이진 유형으로 정의한다.

3. Dynamic rescheduling strategy

본 연구에서는 앞서 수립한 수리 모형을 이용하여 불확실한 상황에 대응하기 위해 inbound truck의 작업이 완료될 때마다 바닥집 상황을 업데이트하고, 업데이트된 정보를 바탕으로 계획을 재수립하기 위해 Larsen and Pranzo(2019)의 Dynamic rescheduling strategy를 적용한다.

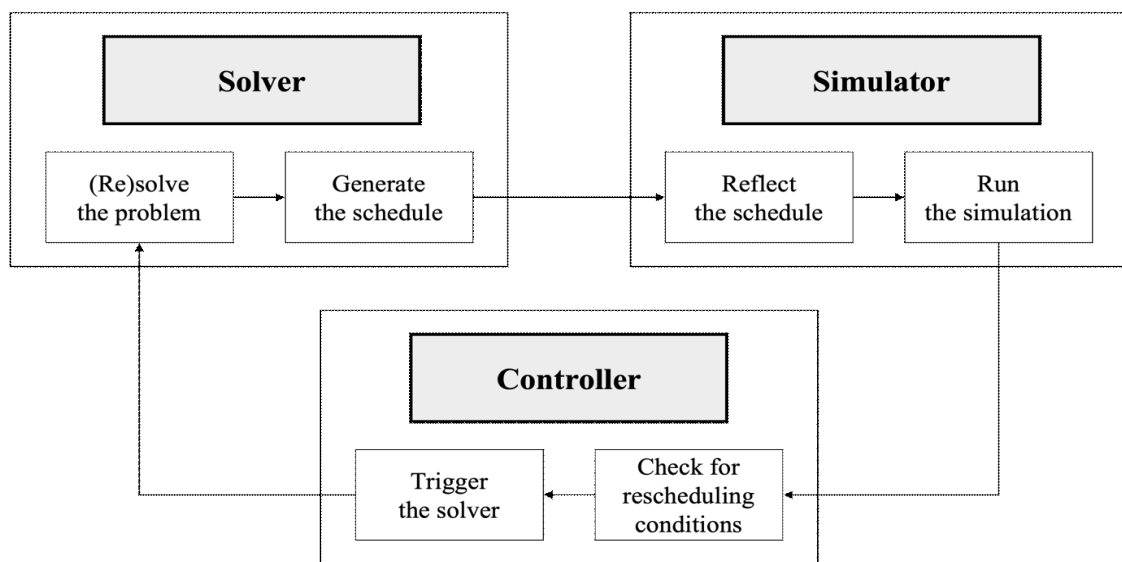


Figure 2. Conceptual framework for dynamic rescheduling

일반적으로 dynamic rescheduling strategy는 <Figure 2>와 같이 Solver, Simulator, Controller 모듈로 구성된다. Solver는 출하 슈트 부하 분산과 집안 지연을 최소화하기 위해 앞서 제안한 모델로 결정론적 스케줄링 문제를 (재)해결하여 최적의 스케줄을 생성한다. Simulator는 입하 트럭의 도착 데이터, 입하 트럭의 화물 정보를 바탕으로 각 출하 슈트에 모델의 결과를 반영하여 효과를 파악한다. Controller는 rescheduling 조건을 확인하여 Solver의 작동 여부를 결정하며, 본 연구에서는 입하 트럭의 작업이 완료될 때마다 발동하도록 설정한다.

시간이 지남에 따라 다양한 불확실 요소들로 인해 초기에 도출된 스케줄은 최적에서 점차 멀어지게 되며 실제 환경에 적용하기 어렵다. 따라서, 불확실성이 있는 상황에 유연하게 대응하기 위해서는 계획의 갱신이 필요하다. 본 연구에서는 입하 트럭의 작업이 완료될 때마다 초기 스케줄을 Solver에서 새롭게 최적화된 스케줄로 대체하여 연구 결과의 실용성을 높이고자 한다.

4. 수치 실험

4.1 실험 환경

본 연구에서 제안한 입하 순서 조정 및 입하 도크에 대한 할당 최적화 방법의 효과를 평가하기 위해서 수치 실험을 수행하였다. 수치 실험에서는 본 연구의 모델이 실제 택배 허브 터미널 환경에 적용될 때 효과를 분석하고, 제안한 방법론을 검증하기 위하여 두 가지 전략을 비교하였다. 첫 번째 전략은 실시간으로 입하 트럭을 할당하는 전략으로, 바닥집 상황이 가장 혼잡한 출하 슈트에 컴파운드 트럭을 최우선으로 할당한다. 두 번째 전략은 출하 슈트의 바닥집 상황과 대기시간을 모두 고려하여 입하 트럭을 할당하는 전략으로, 바닥집 상황과 트럭의 대기시간을 고려하여 대기열에 먼저 도착한 입하 트럭을 최우선으로 할당한다. 택배 허브 터미널의 경우, 출하 슈트와 입하 슈트의 비가 약 3 : 1로 구성되어 있어, 이를 고려하여 본 실험 환경은 각각 8개, 3개로 설정하여 small-size 환경을 구축하였다. 또한 입하 트럭은 입하 전용 트럭과 컴파운드 트럭으로 구분되며 A사의 터미널의 경우, 각 트럭의 비가 3 : 10 이기 때문에, 본 실험 환경은 전체 15개의 입하 트럭 가운데 각각 4개, 11개로 설정하여 small-size 환경을 구축하였다. 출하 슈트에 따라 대기하는(예약된) 출하 트럭의 개수를 다르게 정의함으로써 바닥집이 다른 상태로 실험을 진행하였다. 전략에서 사용하는 파라미터의 입력값으로 α 는 0.1, β 는 0.9로 설정하였다. 실험은 Intel Core i7-7700HQ 2.80GHz, 16.0GB RAM, Window 10 운영체제 환경에서 진행되었으며 혼합정수계획문제를 풀기 위하여 Gurobi 9.1 상업용 솔버를 사용하였고, 모든 실험에서 해가 1초 이내로 도출되었다.

4.2 실험 데이터

본 연구에서는 A사 터미널의 입하 트럭 도착시간 데이터를 활용하였으며, small-size 실험을 위해 무작위로 샘플링하여 이용했다. 입하 데이터에는 터미널의 실제 입하 트럭 스케줄에서 접안 했던 입하 트럭에 대한 도착시간, (예상) 작업 소요 시간, 적재물량 및 각 물량의 도착점 분류 코드, 입하 도크의 작업 완료 시간이 사용되었다. 다음은 연구에서 사용한 입력 데이터 값이다.

파라미터	실험 값
a_i	[0,0,0,0,50,100,150,200,250,300,350,400,450,500,550]
h_i	[10,50,70,84,106,116,95,115,84,84,105,103,84,119,114]
z_{is}	[[0,0,0,0,0,0,0,0],[0,0,0,100,0,0,0,0],[0,0,0,0,100,0,0,0],[84,0,0,0,0,0,0,0],[0,0,0,0,0,0,106],[0,116,0,0,0,0,0,0],[0,0,0,0,0,0,0,0],[0,0,115,0,0,0,0,0],[0,0,0,0,0,0,0,0],[0,0,0,84,0,0,0,0],[0,0,0,0,0,0,0,0],[0,0,0,0,103,0,0,0],[0,0,0,0,0,84,0,0],[0,0,0,0,0,0,119,0],[0,0,0,0,0,0,0,114]]
n_{is}	[[0,10,0,0,0,0,0,0],[0,25,0,25,0,0,0,0],[20,0,0,20,10,0,0,20],[24,0,20,20,0,0,20,0],[0,0,0,0,0,40,40,26],[0,16,25,25,25,25,0,0],[25,25,25,0,0,0,0,20],[0,0,15,20,20,20,20,20],[54,10,10,10,0,0,0,0],[0,0,0,0,14,50,10,10],[45,0,10,10,10,10,10,0],[0,40,10,10,13,10,10,10],[10,10,10,10,10,14,10,10],[15,10,10,15,10,10,19,20],[10,10,20,10,10,20,20,14]]
c_s	[650,900,600,700,770,650,900,600]
r_s	[301,402,283,404,385,356,247,288]

4.3 실험 결과

1) 실시간 입하 트럭 할당 전략

실시간으로 상황에 맞춰 입하 트럭을 할당하는 전략은 출하 슈트의 바닥짐 상황을 고려하여 컴파운드 트럭을 최우선으로 할당한다. <Figure 3>과 같이 1번 입하 슈트의 작업이 완료되었을 때 첫 rescheduling 이 진행되며, 이때 3번 출하 슈트의 바닥짐 상황이 가장 혼잡하므로 컴파운드 트럭을 가장 우선 할당한다. 본 실험은 입하 슈트의 작업이 완료되었을 때 업데이트한 바닥짐 상황을 고려하여 컴파운드 트럭을 우선 할당하는 rescheduling을 9회 진행했다. Rescheduling 과정은 두 전략 모두 9개의 트럭에 대한 데이터를 추출해서 트럭이 도착할 때마다 진행했다.

바닥짐 여유 공간의 최솟값은 클수록 좋지만, 컴파운드 트럭 분포나 적재물량의 목적지 분포의 수치가 무작위로 생성되기 때문에 왜곡될 가능성을 고려해야 한다. 출하 슈트의 바닥짐 여유 공간을 살펴보면 바닥짐 상황이 가장 안 좋은 출하 슈트를 좋게 만들기 위한 목적만 고려해 트럭을 할당하므로, 실험이 거듭될수록 바닥짐이 넘치는 상황이 발생한다. 또한 대기시간을 전혀 고려하지 않고 일찍 도착한 트럭을 먼저 할당하는 전략이 없으므로 평균 대기시간이 크게 나타난다. 실험을 9회 진행한 결과 실제 바닥짐 상황과 대기시간은 <Table 4>와 같다.

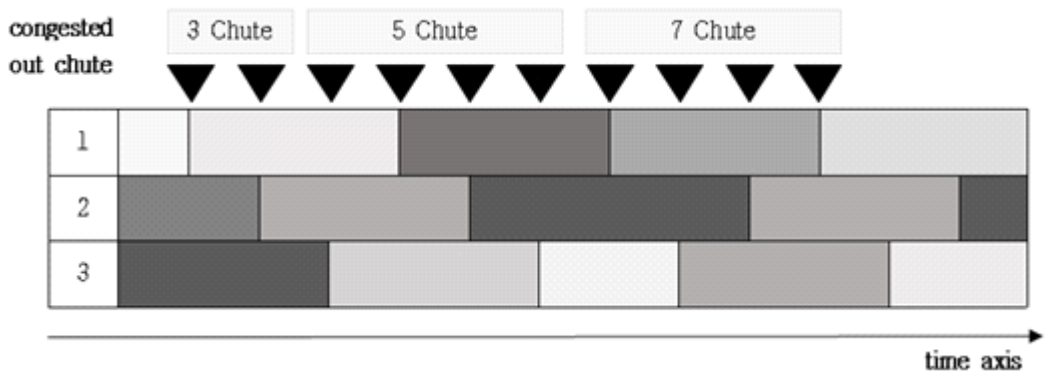


Figure 3. Experimental results for Strategy 1

Table 4. Experimental results for Strategy 1

out	Temporary inventory storage situation($c_s - r_s$)								
Min	97	76	65	55	39	32	59	47	34

out	Waiting time($b_i - a_i$)								
Average waiting time	146	153	145	155	160	155	161	189	173

2) 대기시간을 고려한 계획적 할당 전략

본 연구에서 제안하는 대기시간을 고려한 계획적 할당 전략은 출하 슈트의 바닥집 상황뿐만 아니라 대기시간도 고려하여 트럭을 할당한다. <Figure 4>와 같이 1번 입하 슈트의 작업이 완료되었을 때 첫 rescheduling이 진행되며, 이때 대기시간을 고려하여 대기열에 일찍 도착한 1번 입하 트럭을 우선 할당한다. 본 실험은 입하 슈트의 작업이 완료되었을 때 업데이트한 바닥집 상황과 트럭의 대기시간을 고려하여 대기열에 일찍 도착한 입하 트럭을 우선 할당하는 rescheduling을 9회 진행했다.

출하 슈트의 바닥집 여유 공간을 살펴보면 strategy 1과 비교하여 바닥집 상황은 유사하거나 좀 더 안정적인 수준인 것으로 나타난다. 또한 9회 동안 매 시점 대기하고 있는 트럭의 평균 대기시간이 strategy 1과 비교하여 작게 나타나며, 가장 먼저 도착한 트럭의 지연을 막음으로써 대기시간의 변동이 크지 않다. 실제로 대기열에서 주로 앞쪽에 위치한 트럭을 접안시키고 바닥집 상황을 좋게 하는 경우는 대기열 뒤쪽에 위치한 트럭을 접안시키기도 하는 것으로 나타난다. 실험을 9회 진행한 결과 실제 바닥집 상황과 대기시간은 <Table 5>와 같다.

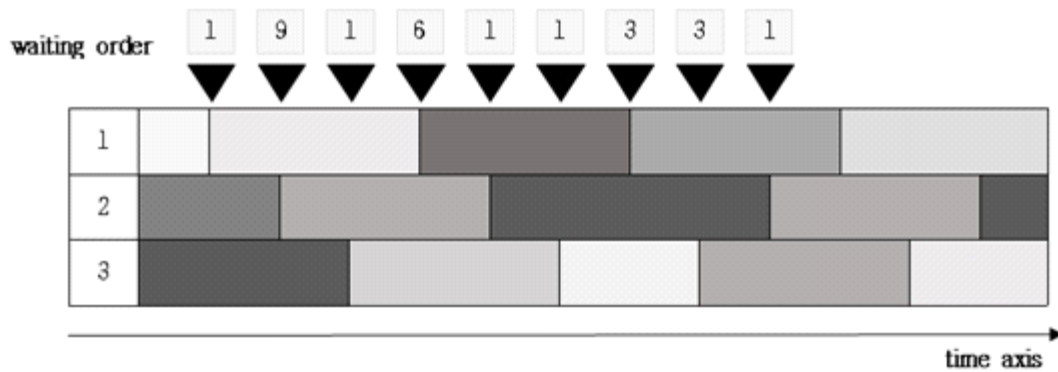


Figure 4. Experimental results for Strategy 2

Table 5. Experimental results for Strategy 2

out	Temporary inventory storage situation($c_s - r_s$)								
Min	97	76	66	55	69	64	61	52	46

out	Waiting time($b_i - a_i$)								
Average waiting time	136	131	141	133	141	134	124	126	132

3) 성능 검증을 위한 비교 분석

본 절에서는 실제 택배 허브 터미널 환경에 적용될 때 효과를 분석하기 위하여 실시간으로 입하 트럭을 할당하는 전략(strategy 1)과 대기시간을 고려한 계획적 할당 전략(strategy 2)의 실험 결과를 <Table 6>에 정리하였다.

본 연구에서는 strategy 2가 strategy 1보다 바닥짐 상황을 안정적으로 유지하는 한도 내에서 트럭의 대기시간을 최소화하는 것을 확인할 수 있다. Strategy 1은 입하 전용 트럭의 대기시간이 지나치게 긴 결과가 도출된다. Strategy 2는 strategy 1과 비교하여 바닥짐 상황은 유사하거나 좀 더 안정적인 수준이며, 9회 동안 매 시점 대기하고 있는 트럭의 평균 대기시간이 strategy 1과 비교하여 작게 나타난다. Strategy 2가 바닥짐 상황을 해치지 않는 선에서 FIFO 전략을 되도록 만족시켰음을 확인할 수 있으며, 실제 터미널의 복잡한 환경(동시다발적 하차)을 고려할 때 제안한 본 로직이 large scale의 문제에서 더욱 효과적일 것으로 예상된다. 따라서 대기시간을 고려한 계획적 할당 전략(strategy 2)은 입하 트럭을 할당하는 전략(strategy 1)보다 더 효과적이다.

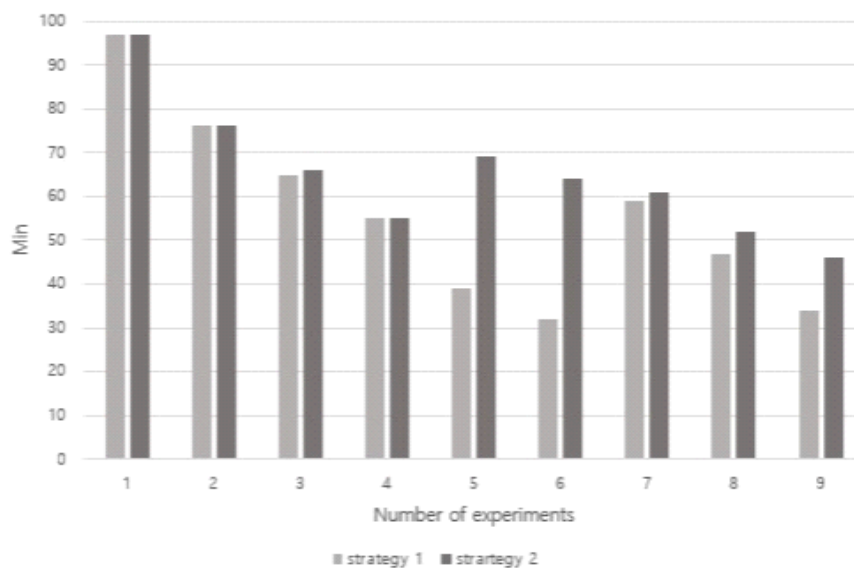


Figure 5. Experimental result for temporary inventory storage

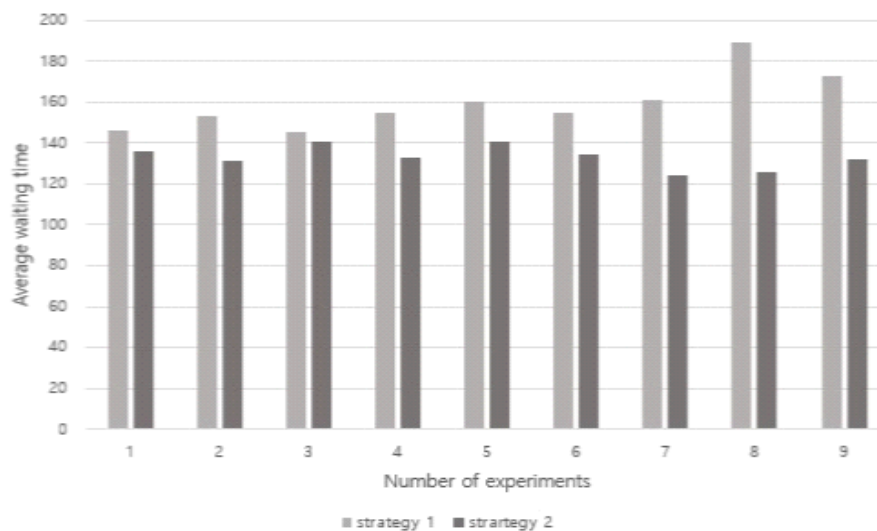


Figure 6. Experimental result for waiting time

5. 결론 및 향후 연구

바닥집의 과부하로 인해 라인이 멈추는 문제는 분류 작업의 정지를 유발하여 터미널 총 운영시간을 크게 증가시키고 택배 허브 터미널에 큰 손실을 초래한다. 본 연구는 이를 방지하기 위하여 택배 허브 터미널의 운영 효율성을 향상시키기 위한 입하 순서 조정 및 입하 도크에 대한 할당 최적화 방법을 제안한다. 혼합정수계획법을 기반으로 수학적 모델을 수립하였으며, dynamic rescheduling strategy를 제안하여 실제 바닥집 상황과 대기시간을 줄이고 기존의 입하 트럭 스케줄링의 운영 로직에 대한 개선 가능성을 탐색했다. 또한, 제안한 방법을 검증하기 위해 A사의 데이터를 활용하여 실험을 진행했다. 본 연구에서 제안한 방법과 실시간 입하 트럭 할당 전략을 비교하였을 때, 제안한 방법이 평균 대기시간 측면에서 더 효율적임을 확인하였다.

트럭의 예상 도착시간 alarm, 바닥집 상황의 실시간 시각화 등의 발전이 택배 허브 터미널의 입하 트럭 스케줄링의 운영 로직에 대한 개선 가능성을 탐색할 수 있었다. 이 방법을 사용하여 택배 허브 터미널의 운영을 최적화할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 바닥집 상황을 안정적으로 유지하는 한도 내에서 트럭의 대기시간을 최소화하는 운영 로직을 통해 바닥집 상황을 최우선으로 고려하는 터미널 측의 입장과 대기시간이 최소화되기를 원하는 운송사 측의 입장이 동시에 고려될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 수행한 수치 실험은 실제 환경을 축소된 small size 환경이며, 이를 통해 제안한 방법론의 효과를 단편적으로 확인할 수 있었다. 향후에는 실제 물류 센터의 규모에 대한 실험을 통해 본 연구에서 제안한 방법론의 다양한 환경에 대한 적용 가능성을 확인하는 것이 필요하다. 실시간 의사결정을 위해 실험의 규모가 커짐에 따라 계산 복잡도가 증가하는 문제를 해결하는 방법론의 개발이 필요할 것으로 예상되며, 휴리스틱 기반의 알고리즘을 개발할 계획이다. 개발한 알고리즘을 기존 연구에서 사용된 방법론들과의 성능 비교를 진행할 계획이며 더 많은 실험 데이터를 확보하고 검증하여 본 연구에서 제안한 방법론을 고도화할 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 현재는 택배마다 동일한 처리 시간을 적용하여 모델을 구상하였지만, 현실과 가까이 구현하기 위하여 택배 크기에 따른 처리 속도를 고려한 시뮬레이션 분석을 추가로 수행할 계획이다.

참고문헌

- Boysen, N., Briskorn, D., Tschöke, M.(2013). Truck scheduling in cross-docking terminals with fixed outbound departures. *OR spectrum*, 35(2), 479-504
- Boysen, N., Fedtke, S., Weidinger, F.(2017). Truck scheduling in the postal service industry. *Transportation Science*, 51(2), 723-736
- Forger, G.(1995). UPS starts world's premiere cross-docking operation. *Modern material handling*, 36(8), 36-38
- Golshahi-Roudbaneh, A., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Paydar, M. M. (2021). Cross-dock scheduling considering time windows and deadline for truck departures. *Scientia Iranica*, 28(1), 532-546
- Gupie, M., Knight, J., Knoll, T., Trent, L., Vargo, J.(2004). *Competing on Capabilities: The New Rules of Corporate Strategy*. Briefing slides with commentary, Athens, GA: University of Georgia. Available from <http://www.arches.uga.edu/~rdavis/competingoncapabilities.ppt>. Internet. Accessed, 3
- Joo, C. M., Kim, B. S.(2013). Scheduling compound trucks in multi-door cross-docking terminals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(5-8), 977-988
- Larsen, R., Pranzo, M.(2019). A framework for dynamic rescheduling problems. *International Journal of Production Research*, 57(1), 16-33
- Liao, T. W., Egbelu, P. J., Chang, P. C.(2013). Simultaneous dock assignment and sequencing of inbound trucks under a fixed outbound truck schedule in multi-door cross docking operations. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 212-229
- McWilliams, D. L.(2009). Genetic-based scheduling to solve the parcel hub scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 56(4), 1607-1616
- Molavi, D., Shahmardan, A., Sajadieh, M. S.(2018). Truck scheduling in a cross docking systems with fixed due dates and shipment sorting. *Computers & Industrial Engineering*, 117, 29-40
- Taghizadeh, M., Shojaie, A. A., Sarfaraz, A. H., & Raissi, S. (2022). A multiobjective mathematical model for truck scheduling problem in multidoor cross-docking system. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2022
- Tootkaleh, S. R., Ghomi, S. F., Sajadieh, M. S.(2016). Cross dock scheduling with fixed outbound trucks departure times under substitution condition. *Computers & Industrial Engineering*, 92, 50-56
- Van Belle, J., Valckenaers, P., Cattrysse, D.(2012). Cross-docking: State of the art. *Omega*, 40(6), 827-846
- Witt, C. E.(1998). Crossdocking: Concepts demand choice. *Material Handling Engineering*, 53(7), 44-49

요약문

기술의 발전으로 온라인 쇼핑 시장이 급격하게 성장함에 따라 택배 물량이 증가하여 택배 산업의 지속적인 성장이 이루어졌다. 택배 산업은 장치 산업인 만큼 택배 회사들은 초기에 투자한 시설들의 효율성을 높이기 위해 여러 운영 전략을 연구하고있다. 기존의 연구에서는 트럭에 실린 화물의 정보를 이용한 스케줄링이 이루어지지 않아 바닥집 상황이 고려되지 않고 이는 병목을 야기한다. 따라서, 본 연구에서는 크로스 도킹 터미널의 운영 효율성을 향상시키기 위해 바닥집 상황과 입하 트럭의 대기시간을 고려한 입하 트럭 스케줄링 모델을 제안한다. 제안한 모델은 터미널의 상황이 업데이트될 때마다 계획을 재수립하는 dynamic rescheduling strategy를 따른다. 제안한 모델의 효과를 검증하기 위해 실제 데이터를 활용하여 수치 실험을 진행한 결과 제안한 모델이 바닥집의 상황을 안정적으로 유지하면서 입하 트럭의 평균 대기시간을 줄임을 확인하였다. 이를 통해, 트럭의 예상 도착시간 alarm, 바닥집의 실시간 시각화 등의 기술이 택배 물류 센터의 입하 트럭 스케줄링의 운영 로직에 대한 개선 가능성을 확인할 수 있었으며 실제 운영 환경에 적용 가능성을 보였다.

주제어: 택배 허브 터미널, 크로스 도킹, 트럭 스케줄링, 바닥집, 동적 계획 재수립 전략