

ISSN 2765-2351

물류 과학 기술 연구

Journal of Logistics Science & Technology

2022년 06월 3권 1호

THE SOCIETY OF LOGISTICS
SCIENCE AND TECHNOLOGY

물류과학기술연구

Journal of Logistics Science & Technology

제 3권 제 1호

2022년 06월

목 차

1. 강건한 선석 계획을 위한 가우시안 혼합 모델 기반의완충 시간 적용

우성훈, 박현지, 전성우, 김아름, 조성원 / 1

2. 불균등한 시설배치문제를 위한Coral Reef Optimization 방법론 적용

정동진, 채준재 / 22

3. 뉴노멀 시대에 대응하는디지털 생활물류 공동 플랫폼 활용 제안

임승찬, 박진희 / 44

4. 자율주행용 가변화각 카메라의 물류이송로봇 적용을 통한 물류창고 안전성 및 운영 정확도 향상에 관한 연구

김민중, 최경락, 김동현, 김영민 / 68

5. 국내 의약품 온도관리 실패 사례 분석을 통한의약품 콜드체인의 개선방안

이종희, 김은조, 장희수, 장호성 / 76

6. 반도체 Back-end Process의 Miniload AS/RS개발 및 구현 (사례연구)

장용훈, 장윤석 / 90

강건한 선석 계획을 위한 가우시안 혼합 모델 기반의 완충 시간 적용

우성훈¹, 박현지², 전성우³, 김아름⁴, 조성원²⁺

¹현대모비스 데이터사이언스팀

²한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부

³고려대학교 산업경영공학부

⁴한양대학교 교통물류공학과

Robust berth scheduling with GMM-based buffer time

Sung Hun Woo¹, Hyun Ji Park², Sungwoo Jun³, Armi Kim⁴, Sung Won Cho²⁺

¹Data Science Team, Hyundai Mobis

²Maritime Safety and Environmental Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

³School of Industrial and Management Engineering, Korea University

⁴Department of Transportation and Logistics Engineering, Hanyang University

With global changes as the spread of COVID-19, resource management of container terminals has become more difficult. For this reason, terminal managers have to come up with robust schedules to manage vessels, and many research have conducted to provide robust berth schedule from disruptions such as vessel delays. In this paper, a two-phase mathematical model is proposed to generate a robust berth schedule with GMM(gaussian mixture model)-based buffer time. In phase 1, tardiness cost is minimized and the best berthing position is determined. In phase 2, the schedule is rescheduled to minimize the deviation from the baseline schedule obtained by phase 1. At the same time, in order to assign optimal buffer time to each vessel, historical data is analyzed and applied to the proposed model by utilizing machine learning techniques. The proposed method, compared to conventional methods, showed improvement in reducing the total cost incurred for a terminal when encountered with disruptions.

Keywords: Container terminal, Berth scheduling, GMM(Gaussian mixture model), Buffer time

논문접수일 : 2021.09.29.

심사완료일 : 2022.06.17.

게재확정일 : 2022.06.17.

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 주요연구사업 “스마트 해양안전 및 기업지원을 위한 오픈플랫폼 기술개발(PES4450)”의 지원을 받아 수행되었음.

† Corresponding Author: gungnir@kriso.re.kr

1. 서론

최근 COVID-19 장기화 사태와 미중 무역전쟁 및 한일 수출규제 등의 사건들이 글로벌 경제와 공급체인에 충격을 입히면서 해운항만업계 역시 수출입 패턴(물동량, 선사 스케줄 등)에 큰 변동이 발생하였다. 수출입 물동량의 급증으로 인해 입항 대란이 발생하기도 하였고, 해상 운송 수요 폭등과 더불어 전 세계적인 물동량 급증에 비해 인프라의 공급은 부족하여 운송망이 마비되었다. 또한 물류 현장에서의 COVID-19 확진자 발생으로 인한 작업 지연 및 화물 운송 지체는 항만 적체 현상을 야기하였다. 글로벌 공급사슬이 복잡해질수록 각국의 항만 컨테이너 터미널은 더욱 불확실해지는 환경으로 인해 피해를 입을 수밖에 없으며 이로 인한 운영 손실은 점차 심각해진다. 이에 대비하여 터미널은 기존 처리 능력의 한계를 극복하고 터미널을 효율적으로 관리하기 위한 운영 대책이 필요하다. 특히 터미널의 처리용량을 결정하는 요소 중 하나인 선석 계획을 보다 지능적으로 수립하는 것이 중요하다.

선석 계획을 도출하기 위해서는 선석 할당 문제(berth allocation problem; BAP)와 안벽크레인 할당 문제(quay crane assignment problem; QCAP)를 고려해야 한다. 선석 할당 문제는 Figure 1과 같이 시간과 안벽의 길이로 나타낸 2차원 평면(time-space diagram) 위에 선박의 접안 시간과 접안위치를 결정하는 것이다(Kim and Park, 2004). 또한, 안벽크레인 할당 문제는 Figure 2와 같이 각 선박에 할당할 안벽크레인의 개수를 결정하는 것이다. 제한된 안벽크레인을 할당하는 방법에 따라 선박의 작업시간이 결정되기 때문에 터미널은 두 가지 문제를 동시에 고려하여 선석 계획을 수립한다.

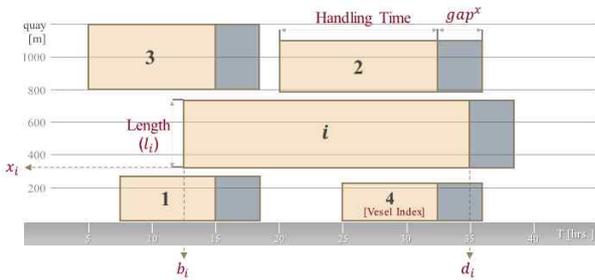


Figure 1. Time-space diagram

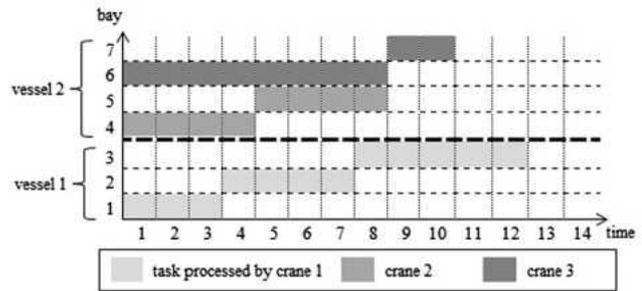


Figure 2. An example of QCAP

선석 계획을 수립함에 있어서 선박 사이의 시간 및 공간적 간격을 최소화 하여 효율을 극대화 하는 것이 중요하지만 여러 가지 불확실한 요인들로 인하여 어려움을 겪는 것이 현실이다. 이전 터미널에서의 작업 상황 또는 기상 상황에 의해 선박이 예상도착시간(estimated time of arrival; ETA) 보다 늦게 도착하여 발생하는 변동은 기존의 선석 계획이 틀어지게 되는 문제를 발생시키는데 이는 뒤에 이어지는 선석 계획에도 영향을 끼쳐 결과적으로 터미널에 큰 손실을 초래할 수 있다. 이에 선석 계획 수립 시 완충 시간을 도입하여 선박이 예정보다 늦더라도 초기 계획을 어느 정도 지킬 수 있는 강건한(robust) 선석 계획을 수립하는 방법론이 등장하였다. 초기 선석 계획을 수립할 때 선박과 선박 사이에 완충 시간을 부여하는 것인데 완충 시간을 부여하다 보니 초기 계획상에서 발생하는 공간적 손실과 불확실성이 초래하는 변동에 따른 손해를 감소시키는 득실을 비교하여 피해를 최소화하는 것을 목표로 하는 계획이다.

완충 시간은 다양한 기준과 방법에 의해 부여될 수 있는데 적절하지 않은 완충 시간은 오히려 선석 계획의 품질을 떨어뜨릴 수 있다. 예를 들어 완충 시간을 지나치게 길게 설정하면 불필요한 유휴시간이 발생하므로 선석 계획의 성능이 저하된다. 반대로 완충 시간을 너무 짧게 설정하면 불확실성으로 인한 변동에 충분히 대비가 되지 못하여 선석 계획을 재수립하고 복구하는 데 비용이 발생한다. 또한 완충 시간을 모든 선박에 동일하게 부여하면 정시에 도착하는 선박이 많을 경우 비효율성을 초래할 수 있고 선박별로 차등적으로 부여하면 그 기준의 정확도와 적합도에 따라 선석 계획의 성능이 좌우될 수 있다. 이처럼 완충 시간을 적용하는 방법에 의해 전체 선석 계획의 품질이 결정되기 때문에 상황에 맞는 적절한 완충 시간을 결정하는 것은 매우 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 선박의 지연에 대한 과거 데이터를 분석하고 머신러닝 기법을 이용하여 효율적이고 합리적인 완충 시간을 도출한 후, 이를 토대로 불확실한 선박 지연으로 인

한 손실에 효과적으로 대응하는 강건한 선석 계획을 수립하는 것을 목표로 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 제 2장에서는 선석 계획과 완충 시간에 관한 기존의 연구를 조사한다. 제 3장에서는 완충 시간을 도입한 수리모델을 설명하고 제 4장에서는 효율적인 완충 시간을 도입하기 위한 방법론을 제시한다. 제 5장에서는 제안한 수리모델을 이용하여 선석 계획을 수립하기 위한 휴리스틱 알고리즘을 설명한다. 제 6장에서는 수치실험을 통해 휴리스틱 알고리즘의 성능을 측정하고, 이를 이용하여 완충 시간을 도입한 선석 계획을 여러 상황에서 시뮬레이션 실험을 통하여 기존의 선석 계획과 비교해 본다. 마지막으로 제 7장에서는 연구의 결론 및 시사점을 제시한다.

2. 선행연구

과거 선석 계획 문제는 선석을 이산형(discrete)과 연속형(continuous)으로 구분하여 연구되었다(Lai and Shih, 1992; Imai et al., 1997; Kim and Moon, 2003). 오늘날 터미널의 레이아웃 형태와 장비가 다양해짐에 따라 터미널 운영 문제가 더욱 복잡해지면서 이를 고려하기 위한 다양한 가정, 모델, 모수 및 문제 해결 방법론이 등장하고 있다(Bierwirth and Meisel, 2010). 선석 할당 문제가 복잡해짐에 따라 선석 계획을 수립하기 위해 다양한 휴리스틱 방법론이 적용되고 있으며(Bierwirth and Meisel, 2015) 많은 연구들이 라그랑지안 완화법(lagrangian relaxation procedure), 트리 서치 절차(tree search procedure), 유전 알고리즘(genetic algorithm; GA), 빔 서치 알고리즘(beam search algorithm), 입자군집최적화(particle swarm optimization) 등의 휴리스틱을 이용하여 해의 성능과 효율성을 높이고자 하였다(Imai et al., 2001; Guan and Cheung, 2004; Imai et al., 2007; Wang and Lim, 2007; Ting et al., 2014).

안벽크레인 할당 문제는 터미널의 작업 효율성과 직결되어 있어 선석 계획 수립 시 선석 할당 문제와 함께 고려해야 하는 문제이며 선석 할당 문제의 복잡도를 크게 상승시키는 요인이다. 이를 해결하기 위하여 Guan et al.(2002)는 선석 계획을 기계(선석)에 동일한 종류의 프로세서(안벽크레인)들이 존재하고 작업(선박)을 처리하기 위해 프로세서를 할당하는 다중 프로세스 작업 스케줄링(multiprocessor task scheduling) 문제로 간주하였다. 이들은 각 선박의 작업량이 선박의 크기에 비례한다고 가정하고 선박의 작업시간을 선박에 할당된 크레인의 수와 크레인의 작업시간으로 표현하였다. 선박별로 작업시간의 크기에 따라 가중치를 부여하고 그 총합을 최소화하는 것을 목적식으로 하였다. 이들은 선박들을 가중치에 따라 오름차순으로 나열한 뒤 그룹으로 나누어 탐욕적 알고리즘(greedy algorithm)에 따라 안벽크레인을 할당하였다. 선석 할당과 안벽크레인 할당을 함께 고려하는 방법론으로 선박의 작업시간을 선박에 할당된 크레인의 개수를 매 개변수로 하는 함수로 표현하는 방법이 제안되었다. Park and Kim(2002)은 2단계 구조의 선석 계획 수립 모델을 제안했다. 첫 번째 단계에서는 라그랑지안 완화법을 이용하여 연속형 선석 계획을 수립하였고 이때 선박의 작업시간은 선박에 할당된 안벽크레인의 개수에 반비례한다고 가정하였다. 두 번째 단계에서는 동적계획법(dynamic programming)을 이용하여 안벽크레인의 착수 비용을 최소화하였다. Meisel and Bierwirth(2009)는 SWO(squeaky wheel optimization) 휴리스틱을 제안하였다. 예상 도착시간 순서대로 정렬된 선박 리스트에서 초기 우선순위 선박 리스트를 도출한 이후 SWO 휴리스틱 절차와 지역정제절차(local refinement procedure)를 반복하여 개선된 해를 탐색하였다. 삽입 휴리스틱 절차(insert heuristic procedure)에 의해 선박들의 접안 시간 및 접안위치를 결정하고 휴리스틱에 의해 먼저 배치된 선박들이 너무 많은 안벽크레인 자원을 독점하는 것을 방지하기 위하여 지역정제절차에 따라 각 선박들의 안벽크레인 자원을 적절히 분배하는 절차를 고안하였다. Iris et al.(2017)은 Meisel and Bierwirth(2009)의 수학적 모델에 대하여 안벽크레인 할당 프로파일을 개선하는 ALNS(adaptive large neighborhood search) 휴리스틱을 제안하였다.

수립한 선석 계획이 실행되려면 계획 수립 당시에 고려한 모든 입력 모수(input parameter)들에 변동이 없어야 한다. 그러나 실제 상황에서는 다양한 요인들에 의하여 계획 수립 당시의 예상한 정보들과 다르게 변화하게 되고 그에 따라 처음 작성한 선석 계획을 실행할 수 없게 된다. 따라서 선석 계획을 수립할 때

다양한 변동 발생 가능성을 고려하여야 한다. Moorthy and Teo(2007)는 stochastic한 접근을 시도한 초기 연구자들 중 하나로 대기 시간에 대한 분포를 프로그램 평가 및 검토 방법(project evaluation and review technique; PERT)을 이용하여 추정하였다. 이들은 대기 시간을 정규 분포(normal distribution)로 가정하고 PERT의 크리티컬 패스(critical path)를 이용하는 방식으로 최장 분포(longest distribution)를 분산으로 가정하여 BAP 문제를 풀이하였다. Zhou and Kang(2008)은 이산형 선석 모델에서 선박의 도착시간과 작업시간을 확률 매개변수(stochastic parameter)로 가정하였다. 또한 선박의 우선순위와 시간제약을 고려하여 선박마다 작업 시작 전까지 대기할 수 있는 최대 허용 대기 시간을 고려하였다. 이들은 터미널에 정박하는 선박의 정박 전 대기 시간과 안벽크레인의 작업 대기 시간의 합으로 구성된 선박의 작업 대기 시간의 총합을 최소화 하는 모델을 제안하고 유전 알고리즘으로 해결하였다. Zeng et al.(2011)는 변동 발생 시 선석과 안벽크레인 할당 계획을 복구시키는 문제를 연구하였다. 이들은 초기 선석 계획 및 안벽크레인 계획을 수립한 다음, 터미널 운영 중 발생하는 변동에 대응하기 위하여 안벽크레인 및 선석 재할당 전략을 적용하고 지역적 리스케줄링(local rescheduling)과 타부 서치(tabu search)를 이용하여 선석 계획을 재수립하는 방안을 제시하였다. 수치 실험을 통해 변동 발생 시 제안한 방법에 따라 얻어진 선석 재할당 비용과 안벽크레인 재할당 비용을 비교 제시하였다.

위의 연구들은 선석 계획에 불확실성을 다소 반영하였다. 그러나 위의 연구에서는 모든 선박에 동일한 완충 시간을 할당함에 따라 발생하는 비효율성은 고려하지 않았다. 선박의 실제 도착시간을 집계한 통계자료를 분석한 결과 일부 선박은 예정보다 늦게 도착하는 경우가 많은 반면 다른 선박은 정시에 도착하는 경우가 많았다. 따라서 모든 선박에 균일한 완충 시간을 도입하는 것은 초기 계획의 비용 측면에서 비효율을 야기하기 때문에 과거의 데이터를 기반으로 불확실성을 고려한 연구가 필요하다. 이러한 선박의 특성, 과거의 데이터에 따라 차등적인 완충 시간을 고려하는 연구는 제한적이다. Lu and Xi(2010)은 각 배의 도착시간과 배의 작업시간이 과거 데이터에 의하여 정규 분포를 이룬다는 가정 하에 문제를 정의하고 시물레이션 기반의 GA를 이용하여 풀이하였다. Du et al.(2010)는 선석 계획의 초기 일정의 강건성을 반복적으로 향상시키는 피드백 절차를 제안했다. 그들은 두 가지 조정 규칙을 고려하여 각 선박에 완충 시간을 다르게 할당했다. 그러나 접안위치와 안벽크레인 등을 동시에 고려하지 않아 실효성 측면에서 제한적이다. Karafa et al.(2013)은 안벽크레인의 생산성에 관한 데이터의 분포가 정규 분포 혹은 푸아송 분포(poisson distribution)를 따른다는 가정 하에 이산형 BAP에 대하여 수학적 모델을 정의하고 이를 유전 알고리즘과 포스트 파레토 시물레이션(post-pareto simulation)을 이용하여 풀이하였다. Ursavas and Zhu(2016)은 선박의 도착시간과 안벽크레인의 작업시간이 푸아송 분포를 따르며 DBAP에 대하여 확률적 동적 계획법(stochastic dynamic programming approach)를 적용하여 최적의 정책을 도출하였다. Shang et al.(2016)은 안벽크레인의 생산성이 동일한 분포라는 가정 하에 안벽크레인의 셋업 시간과 안벽크레인의 생산성에 대한 불확실성을 고려하여 선석 및 안벽크레인 동시 할당 문제(berth allocation and crane assignment problem; BACAP)를 풀이하였다.

본 연구의 차별성은 크게 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 머신러닝 기법을 활용하여 각 선박별 지연 특성을 반영한 완충 시간을 선석 계획에 고려했다. 정규 분포 등의 일반적인 분포를 완충 시간으로 고려하거나 선박별 특성을 반영하지 않고 동일한 완충 시간을 고려한 대부분의 연구와 차이점을 가진다. 둘째, 대부분의 선석 계획 연구에서는 문제의 복잡성을 낮추기 위해 BAP에만 초점을 맞추었다. 하지만, 실제 환경에서는 선석 계획을 수립할 때 안벽크레인의 생산성을 동시에 고려하기 때문에 BACAP를 다룬다는 점에서 보다 실용적이다. 마지막으로, 본 연구는 연속형 선석을 고려한 점에서 앞서 언급한 연구들이 모두 이산형 선석에 대하여 풀이한 것에 비하여 차이점을 가진다. 이산형으로 선석 계획을 수립하게 될 경우 더욱 많은 선박을 접안할 수 있음에도 선석을 제한적으로 사용하는 것이기 때문에 현실적이지 못하다. 실제 환경에서도 선석을 이산형으로 구분하여 표기하지만 실제 선석 계획은 연속형으로 이루어진다.

3. 연구방법론 및 연구모형

선석 계획 수립자는 터미널 운영을 위해 1주일 단위로 입항 예정인 선박에 대한 선석 계획을 수립한다. 1주일 전에 수립하는 계획을 초기 선석 계획이라 하고 이는 사전에 알려진 각 선박의 예정 도착시간, 예정 출발시간을 기반으로 작성된다. 그러나 초기 선석 계획은 터미널 운영 과정에서 발생하는 선박의 도착시간 혹은 작업시간 등의 변동으로 인해 최종적으로 유지될 수 없는 경우가 발생하고, 이때 반드시 선석 계획의 재수립이 뒤따른다. 초기 선석 계획이 어떻게 수립되었느냐에 따라 상황의 변동에도 불구하고 그대로 계획을 유지할 수 있고 또는 계획을 재수립하더라도 그 재수립에 적은 노력과 비용이 발생할 수 있다.

주어진 정보가 확정적이라고 가정하여 터미널 효율이나 터미널이 제공하는 서비스 수준을 최대화하는 초기 선석 계획을 수립하는 경우, 향후 터미널에 초래될 수 있는 손실은 크게 세 가지 관점에서 설명된다. 첫 번째는 초기 결정된 각 선박의 최적의 접안위치를 이탈하는 것이다. 초기 선석 계획이 도출된 이후 터미널은 효율적인 컨테이너 이동 작업을 위하여 초기 선석 계획에 수립된 각 선박의 접안위치에 가까운 야드에 선박에 선적할 컨테이너를 쌓아둔다. 그러나 뒤늦은 계획 재수립에 의하여 선박의 접안위치가 변경된 경우, 미리 준비된 컨테이너를 옮기는 노력이 들거나 이를 그대로 싣기 위한 이동 거리가 길어져 비용이 발생하게 된다. 두 번째는 재수립된 선석 계획에 따라서 안벽크레인의 일정 계획에도 역시 수정이 뒤따르는 것이다. 선석 계획은 터미널 운영 계획 중에서도 가장 상위의 단계의 계획으로서 먼저 결정되어야 하는 문제이며, 안벽크레인의 일정 계획을 비롯한 여러 계획과 맞물려 있다. 특히 컨테이너의 하역을 위한 안벽크레인은 터미널 내 매우 희소한 주요 장비이므로 잦은 계획의 수정은 필연적으로 터미널 전반에 운영 비효율을 야기한다. 마지막 세 번째는 선박의 예상 출발시간에 연쇄적으로 지연이 발생하여 운영 서비스 수준에 큰 타격을 입는 것이다. 이는 앞쪽에서 발생한 작은 변동이 후행 작업되는 선박의 스케줄에 연쇄적으로 변동을 일으켜 계획 후반부에 배치된 선박의 스케줄에 큰 변화를 줄 가능성이 높기 때문이다. 따라서 촘촘하게 계획된 초기 선석 계획을 재수립한다면, 한 선박의 스케줄 변경이 다른 선박의 스케줄에 영향을 미칠 확률이 커서 이 재수립에 더 많은 노력과 비용이 발생할 수밖에 없다.

한편, 선석 계획을 여유 있게 수립하는 것은 선박의 작업시간에 여분의 시간을 추가하는 것을 의미하며 이는 결과적으로 선박의 작업시간이 늘어나는 것과 같으므로 후행 작업되는 선박의 접안 및 출발시간이 지연될 수 있다. 따라서 후행 선박의 일정에 영향을 줄이면서 발생 가능한 변동에 대비하는 적절한 시간 간격을 찾는 것이 강건하고 효율적인 선석 계획을 수립하는 데 중요한 문제다. 본 연구에서는 선박과 선박 사이에 부여하는 시간 간격을 완충 시간이라 정의한다. 완충 시간은 선박의 예상 출발시간 이후에 부여되며, 초기 계획 안에서 해당 시간 동안은 다른 선박이 접안할 수 없다. 선박의 도착 지연시간 등 모든 정보가 확정적이라면, 최적의 선석 계획과 더불어 최적의 완충 시간이 존재한다고 가정할 수 있다. 만일 최적의 완충 시간이 존재한다고 할 때, 정보의 불확실성 아래 수립하는 초기 선석 계획에서 인공적으로 도입한 완충 시간이 최적의 완충 시간에 가까우면 가까울수록 그 도입이 터미널 운영 효율에 미치는 영향은 긍정적이다. 그러나 완충 시간이 적절하게 도입되지 않은 경우 오히려 계획 재수립 비용을 증가시킬 수도 있다.

따라서 본 연구는 각 선박별 도착의 불확실성, 즉 선박의 지연 정도를 고려하여 효과적인 완충 시간을 도입하여야 함에 주목한다. 이를 해결하기 위해 터미널에 접안한 선박의 이력 데이터를 기반으로 선박의 지연시간 분포를 추정하여 선박별로 적정 완충 시간을 부여하는 방법을 제안한다. 우선 선박별로 도착시간에 대한 지연의 크기를 고려하기 위하여 선박을 전항지별로 분류한다. 전항지별로 분류된 선박 데이터를 기반으로 지연시간 분포를 추정하고 선박의 전항지에 따른 지연 경향을 반영하여 선박별로 차등적인 완충 시간을 부여한다. 완충 시간을 부여하기 위한 분포를 추정하는 구체적인 방법론은 제 4장에서 설명한다.

이어지는 장에서는 제 4장의 방법론으로부터 도출된 완충 시간을 적용하여 선석 계획을 작성하는 수리모형을 제안한다. 수리모형은 터미널 운영 전 초기 선석 계획을 도출하기 위한 1단계 BACAP 수리모형과 터미널 운영 시작 후 변동 발생 시 선석 계획 재수립을 위한 2단계 BACAP 모델로 구성된다. 1단계에서는 선박의 출항지연(tardiness)을 최소화하는 동시에 완충 시간을 부여하여 초기 선석 계획을 수립한다. 이 때

초기 선석 계획에서 결정된 각 선박의 접안위치를 최적의 접안위치로 간주한다. 그 다음으로, 2단계에서는 터미널 운영 시작 이후 변동이 발생할 때 실행되는 것으로, 초기 선석 계획이 존재하는 상태에서 계획을 재수립한다. 계획 재수립 비용을 최소화하기 위하여 초기 선석 계획 대비 선박의 작업 일정 및 접안위치의 변동을 최소화 하는 것을 목적으로 한다. 최종적으로 선석 계획의 총 비용은 1단계와 2단계 각각에서 산출된 비용의 총합으로 고려하며, 이 비용이 최소화되는 선석 계획을 생산성과 강건성을 모두 충족하는 효율적인 선석 계획으로 간주한다.

3.1 1단계 : 초기 선석 계획 수립을 위한 완충 시간 기반의 BACAP 모델

1) Notation

입력 데이터

N	접안하는 전체 선박 대수
T	계획 기간의 길이
L	선석의 총 길이
Q	안벽크레인의 총 개수
N_i	선박 i 에 특정 시점에 할당된 안벽크레인의 개수의 집합; $N_i = \{q_i^{\min}, \dots, q_i^{\max}\}$
q_i^{\min}	선박 i 에 할당해야 하는 시간당 안벽크레인의 최소 개수
q_i^{\max}	선박 i 에 할당 가능한 시간당 안벽크레인의 최대 개수
ETA_i	선박 i 의 예상도착시간
ETD_i	선박 i 의 희망출항시간
l_i	선박 i 의 길이
a_i	선박 i 에 요구되는 안벽크레인의 총 개수; 선박의 처리물량을 안벽크레인 1개의 생산성을 나누어 올림한 값으로 계산된다.
θ_i	선박 i 의 완충 시간
gap^x	작업 시 최소한으로 요구되는 선박 간의 시간적 간격
gap^y	작업 시 최소한으로 요구되는 선박 간의 물리적 간격
C_{1i}	선박 i 의 접안지연에 따른 페널티 비용
C_{2i}	선박 i 의 출항지연에 따른 페널티 비용
M	충분히 큰 양의 실수

결정 변수

b_i	선박 i 의 접안시간
d_i	선박 i 의 출항시간
x_i	선박 i 의 접안위치; 선박의 하단부가 위치하는 선석 위치를 기준으로 한다.

z_{ij}^x	선박 i 의 출항시간이 선박 j 의 접안시간보다 이르면 1, 그렇지 않으면 0
z_{ij}^y	선박 i 의 접안위치 상단이 선박 j 의 접안위치 하단보다 아래이면 1, 그렇지 않으면 0
q_{itn_i}	선박 i 에 시점 t 때에 할당된 안벽크레인의 개수가 n_i 와 같으면 1, 아니면 0

2) Mathematical model

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N [C_{1i}(b_i - ETA_i) + C_{2i}(d_i - ETD_i)^+] \quad (1)$$

Subject to

$$b_i \geq ETA_i, \text{ for } i = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$x_i \leq L - l_i, \text{ for } i = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$b_j \geq d_i + \theta_i + gap^x + M(z_{ij}^x - 1), \text{ for } i, j = 1, \dots, N, i \neq j \quad (4)$$

$$x_j \geq x_i + l_i + gap^y + M(z_{ij}^y - 1), \text{ for } i, j = 1, \dots, N, i \neq j \quad (5)$$

$$z_{ij}^x + z_{ji}^x + z_{ij}^y + z_{ji}^y \geq 1, \text{ for } i, j = 1, \dots, N, i \neq j \quad (6)$$

$$\sum_{n_i \in N_i} q_{itn_i} \leq 1, \text{ for } i = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (7)$$

$$b_i \leq t \times q_{itn_i}, \text{ for } i = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T, n_i \in N_i \quad (8)$$

$$d_i \geq t \times q_{itn_i} + 1, \text{ for } i = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T-1, n_i \in N_i \quad (9)$$

$$d_i - b_i = \sum_{t=1}^T \sum_{n_i \in N_i} q_{itn_i}, \text{ for } i = 1, \dots, N \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{n_i \in N_i} n_i \times q_{itn_i} \geq a_i, \text{ for } i = 1, \dots, N \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{n_i \in N_i} n_i \times q_{itn_i} \leq Q, \text{ for } t = 1, \dots, T \quad (12)$$

$$b_i \geq 0, d_i \geq 0, x_i \geq 0 \quad (13)$$

$$z_{ij}^x, z_{ij}^y, q_{n_i} \in \{0, 1\} \quad (14)$$

목적식 (1)의 $(d_i - ETD_i)^+$ 는 선박 i 의 희망출항시간 보다 작은 출항시간은 0으로 취급하는 것을 의미하며, 모든 선박의 접안지연과 출항지연을 최소화하는 것을 의미한다. 제약식 (2)는 접안시간에 대하여 예정 도착시간 이후에 성립됨을 의미하며, 제약식 (3)은 접안위치에 대하여 선석의 총 길이 이내에서 성립됨을 의미한다. 제약식 (4)는 선박의 시간상, 제약식 (5)는 선박의 공간상의 충돌이 없게 하는 제약조건이며 제약

식 (6)으로 인해 성립된다. 특히 제약식 (4)는 각 선박별 완충 시간을 반영한다. 제약식 (7)은 모든 시점에 안벽크레인이 선박 i 에 할당되도록 하며, 제약식 (8)-(10)은 선박의 하역작업 시간 동안 안벽크레인 할당을 보장한다. 제약식 (11)은 선박 i 에 요구되는 안벽크레인의 개수를 만족하게 하며, 제약식 (12)는 모든 시점에 안벽크레인의 총 개수를 초과하지 않게 한다. 마지막으로, 제약식 (13)-(14)는 각각 결정 변수를 비음 실수 유형과 이진 유형으로 정의한다.

3.2 2단계 : 변동 발생 시 선석 계획 재수립 모델

1) Notation

입력 데이터

b_i^1	1단계에서 도출된 선박 i 의 접안시간
d_i^1	1단계에서 도출된 선박 i 의 출항시간
x_i^1	1단계에서 도출된 선박 i 의 접안위치, 즉 사전 결정된 선박 i 의 최적의 접안위치
δ_i	선박 i 의 지연시간
C_{3i}	선박 i 의 최적의 접안위치를 벗어남에 따른 페널티 비용
C_{1i}^+, C_{1i}^-	선석 계획 재수립에 따른 추가적인 C_{1i} 의 증가, 감소 비용; $C_{1i}^+ > C_{1i} > -C_{1i}^-$
C_{2i}^+, C_{2i}^-	선석 계획 재수립에 따른 추가적인 C_{2i} 의 증가, 감소 비용; $C_{2i}^+ > C_{2i} > -C_{2i}^-$

결정 변수

r_{1i}^+, r_{1i}^-	선석 계획 재수립에 따른 선박 i 의 도착지연의 증가, 감소 변동
r_{2i}^+, r_{2i}^-	선석 계획 재수립에 따른 선박 i 의 출항지연의 증가, 감소 변동

2) Mathematical model

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N [C_{1i}^+ r_{1i}^+(s) + C_{1i}^- r_{1i}^-(s) + C_{2i}^+ r_{2i}^+(s) + C_{2i}^- r_{2i}^-(s) + C_{3i} |x_i - x_i^1|] \quad (15)$$

Subject to

(3), (5)-(14)

$$b_i \geq ETA_i + \delta_i, \text{ for } i = 1, \dots, N \quad (16)$$

$$b_j \geq d_i + gap^x + M(z_{ij}^x - 1), \text{ for } i, j = 1, \dots, N, i \neq j \quad (17)$$

$$b_i - ETA_i - \delta_i = b_i^1 - ETA_i + r_{1i}^+ - r_{1i}^-, \text{ for } i = 1, \dots, N \quad (18)$$

$$(d_i - ETD_i)^+ = (d_i^1 - ETD_i)^+ + r_{2i}^+ - r_{2i}^-, \text{ for } i = 1, \dots, N \quad (19)$$

$$r_{1i}^+ \geq 0, r_{1i}^- \geq 0, r_{2i}^+ \geq 0, r_{2i}^- \geq 0 \quad (20)$$

목적식 (15)는 초기 선석 계획 대비 재수립 비용을 최소화하는 것으로, 구체적으로 접안지연과 출항지연, 그리고 최적의 접안위치로부터의 이탈을 기준으로 산출한다. 1단계 모델의 제약식 (3)과 제약식 (5)-(14)는 2단계 모델에서 유효하다. 1단계 모델의 제약식 (2)와 제약식 (4)는 각각 제약식 (16)과 제약식 (17)로 대체된다. 제약식 (16)은 선박 i 의 도착시간이 지연된 것을 반영한 시간 이후에 접안이 가능함을 의미하고, 제약식 (17)은 재수립 비용을 계산하기 위해 1단계에서 반영한 완충 시간을 제거한다. 제약식 (18)-(19)는 1단계 초기 선석 계획에서의 접안지연과 출항지연 대비 증가하거나 감소한 크기를 계산한다. 마지막으로 제약식 (20)은 결정 변수를 비음 실수 유형으로 정의한다.

4. 기계학습 기반의 완충 시간

본 장에서는 적절한 길이의 완충 시간을 도입하기 위해 선박의 도착시간 지연에 대한 과거 데이터를 분포로 추정하여 기댓값(expectation)을 구하는 기계학습 방법론을 제시한다. 완충 시간은 선박 사이에 여유작업시간을 확보함으로써 불확실성에 대비하고 선석 계획을 강건하게 한다. 강건한 선석 계획은 선박에 할당되는 완충 시간 동안 다른 선박의 접안과 작업이 제한되기 때문에 선석 계획의 효율성이 떨어진다. 따라서 적절한 길이의 완충 시간을 결정하는 것이 완충 시간을 도입하는 강건한 선석 계획의 핵심이라고 할 수 있다.

선박의 도착시간 지연에 영향을 미치는 요인으로는 악천후, 이전 항구의 혼잡도, 초기 지연으로 인한 연쇄효과, 수로의 접근성, 터미널 운영 장비 고장 등이 있다. 이러한 이유로 인하여 선박들은 제각기 다른 지연 경향을 띤다. 본 연구에서는 선박의 지연 경향을 반영하기 위해 선박의 도착시간 지연 데이터를 전항지에 따라 분류한다. 전항지로 분류하여 전항지에서의 작업시간과 각 기항지 간의 운항항로에서 발생하는 기후 및 해양 상황 등의 불확실성에 따른 지연 경향을 간접적으로 고려한다.

본 연구는 각 전항지별로 지연시간의 분포를 기계학습을 이용하여 추정하고 분포의 기댓값과 신뢰 구간에 기반하여 제약식 (4)의 완충 시간을 결정한다. 입력 데이터인 전항지별 도착시간의 지연은 선박의 도착 예정시간과 실제 도착시간의 차이를 전항지별로 분류한 것으로 정의한다. 전항지별 데이터를 기반으로 각 전항지의 지연시간 분포를 기댓값 최대화 알고리즘(expectation-maximization algorithm; EM 알고리즘)을 이용하여 가우시안혼합모델(gaussian mixture model; GMM)로 추정한다. GMM을 추정한 후 선석 계획에 적절한 완충 시간을 적용하기 위해 부트스트랩으로 GMM의 기댓값과 신뢰 구간을 추정한다. 추정된 기댓값과 신뢰 구간을 토대로 각 전항지를 가진 선박에 완충 시간을 적용한다. 이를 통해 선박마다 다른 완충 시간이 적용되어 보다 효율적인 강건한 선석 계획을 수립하게 된다.

4.1 완충 시간의 기댓값 추정

GMM 기반의 선박 지연시간 추정을 위해 statistical model을 제안한다. (21)은 선석 계획에 고려될 지연시간 추정을 위한 statistical model로써 x 는 지연시간으로써 선박의 실제 도착시간과 도착예정시간과의 차이를 의미한다. y_n 은 선박이 출발한 기항지를 의미한다.

$$E[X|Y] = \sum_{n=1}^N E[X|Y=y_n] \quad (21)$$

$$E[X|Y=y_n] = \int x f(x|y_n) dx \quad (22)$$

$$f(x|y_n) \sim \sum_{k=1}^K \pi_k \mathcal{N}(x|\mu_k, \Sigma_k), \text{ where } \sum_{k=1}^K \pi_k = 1 \quad (23)$$

(21)은 선석 계획에 고려될 선박의 지연시간의 기댓값을 추정하는 식으로써, 개별 출발지의 지연시간의 기댓값을 계산하여 전체 지연시간을 추정한다. 이때 개별 출발지의 지연시간의 기댓값은 (22)와 같다. 각 x 와 지연시간이 발생할 확률을 이용해 추정된다. 지연시간의 발생 확률은 일반적으로 다양한 잠재변수로 인해 혼합모형으로 구성되며, 이를 추정하기 위해 EM 알고리즘 기반의 GMM 추정방법을 통해 (23)를 추정한다. (23)의 π_k 는 각 추정된 정규분포에 속할 확률을 의미하며, 각 정규분포는 μ_k, Σ_k 를 모수로 가진다.

4.2 EM 알고리즘

EM 알고리즘은 잠재변수(latent variable)가 존재하는 비지도학습의 방법론 중의 최대가능우도(maximum likelihood)를 추정하기 위한 대표적인 알고리즘이며, GMM의 모수추정을 위해 널리 사용되고 있다. 선박의 지연시간을 추정하기 위한 EM 알고리즘의 절차는 다음과 같다.

- 1) 선박의 출발지 기준으로 데이터를 분리한다.
- 2) 분리된 데이터로부터 각 선박에 대한 지연시간을 계산한다.
- 3) 각 전항지별 x 와 임의의 μ_k, Σ_k 를 설정한다.
- 4) 설정된 모수를 기준으로 잠재변수의 사후분포를 추정한다. (E-Step)
- 5) 추정된 잠재변수를 고정 시킨 뒤 MLE를 이용하여 새로운 모수를 추정한다. (M-Step)
- 6) 모든 전항지별 수렴조건이 만족 할 때까지 4번 과정(E-step)과 5번 과정(M-step)을 반복수행하여 개별 지연시간의 GMM을 추정한다.

GMM 모델의 군집의 수를 결정하는 문제도 중요한 문제 중 하나이다. 일반적으로 GMM모델에서 혼합모형의 군집의 수를 결정하기 위한 criterion으로써 Akaike's information criterion (AIC), Schwarz's Bayesian inference (BIC), mutual information (MI) 등이 있으며, BIC가 많은 연구에서 활용되었다. 본 연구에서도 선박의 GMM모형의 군집의 수를 결정하기 위해 BIC를 이용하였다. 군집의 수를 결정하기 위한 절차는 다음과 같다.

- 1) 초기 k (군집의 개수) 값과 α (stopping point)를 설정한다.
- 2) 설정된 k 값에 대한 EM 과정을 수행한다.
- 3) 도출된 GMM 모델의 BIC값을 계산한다.
- 4-1) BIC의 변동성이 α 보다 크거나 같은 경우 현재의 k 를 $k+1$ 로 업데이트하여 2번 과정으로 넘어간다.
- 4-2) BIC의 변동성이 α 보다 작은 경우 현재의 k 를 최적의 군집 개수로 결정한다.

4.3 Importance sampling

추정된 GMM로부터 선박 지연시간의 expectation을 추정하기 위해 importance sampling method을 이

용한다. (24)는 샘플데이터가 선박 지연시간의 $p(x)$ 로부터 추출되었다고 가정하자. $p(x)$ 는 GMM이므로 정확한 샘플추출이 어렵다. 이러한 이유로 균등분포를 따르는 $q(x)$ 로부터 샘플을 추출한 다음 importance weight를 곱하여 expectation을 추정하며 이때, (25)과 (26)의 등식이 유지됨을 알 수 있다. 최종적으로 우리는 (26)과 같이 선박 지연시간의 expectation에 대한 근사 값을 추정한다.

$$E_{x \sim p}[X|Y] = \sum_{n=1}^N \int p(x)f(x|y_n)dx \quad (24)$$

$$E_{x \sim p}[X|Y] = \sum_{n=1}^N \int \frac{p(x)}{q(x)}q(x)f(x|y_n)dx, \text{ where } q(x) \sim \text{uniform} \quad (25)$$

$$E_{x \sim p}[X|Y] = \sum_{n=1}^N E\left[\frac{p(x)}{q(x)}X|Y=y_n\right] \approx \frac{1}{MN} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^M f(x_i|y_n) \frac{p(x_i)}{q(x_i)} \quad (26)$$

5. Rolling-horizon 기법

수학적 모델은 일정 주기를 단위로 계획이 이루어지며, 계획을 수립하는 시점에서 시간이 멀어질수록 변동성이 커진다는 단점이 있다. 또한, 실제 문제를 대상으로 선석 및 안벽크레인 재할당 모델을 상업용 솔버(CPLEX, Gurobi, Lingo 등)로 풀이하기에는 매우 높은 계산량이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 선석 계획 시 발생하는 동적(dynamic)인 환경을 반영하고, 합리적인 계산시간 내에 계획을 도출하기 위해 Rolling-horizon 기법을 적용하여 1단계와 2단계의 모델을 상업용 솔버로 풀이한다.

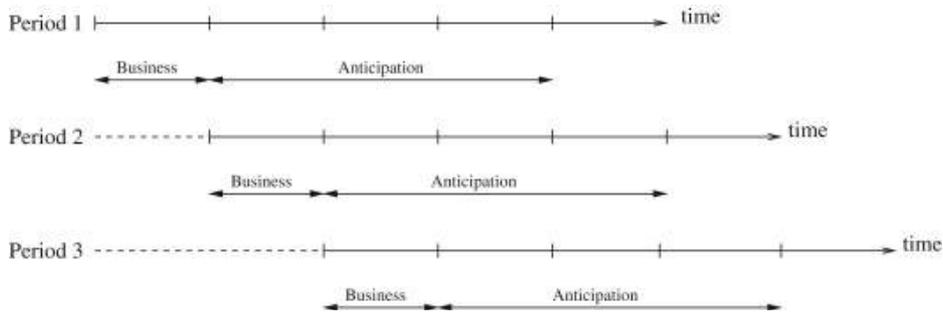


Figure 3. Conceptual diagram of the rolling-horizon approach

Rolling-horizon 기법은 동적 일정 재수립 방법(dynamic rescheduling-based approach)의 한 종류이며, 주기적으로 일정 기간에 대한 계획을 재수립하는 방법이다(Larsen and Pranzo, 2019). Figure 3과 같이 일정 기간에 대해 계획을 하고 단위 시간 혹은 조건이 변동됨에 따라 이전 계획의 결과를 반영하고 다음 일정 기간을 계획하는 것을 반복하여 변동성이 큰 상황에 유연하게 대처할 수 있는 방법이며, 선석 계획 연구에서도 활용되고 있다(Xiao and Hu, 2014; Liu et al., 2020; Kim et al., 2021).

본 연구에서는 Rolling-horizon 기법을 적용하기 위해 모델을 작동하여 선석 계획을 수립할 선박의 개수 (k)와 계획을 유지할 선박의 개수(λ)를 정의한다. 예를 들어, $k=3, \lambda=2$ 이라면 Figure 4와 같이 선박의 도착 시간을 기준으로 가장 먼저 도착하는 3개의 선박에 대한 선석 계획을 수립한다. 이후, 도착 시간이 빠른 2개의 선박의 계획은 유지하고, 다음으로 먼저 도착하는 3개의 선박에 대한 선석 계획을 수립한다.

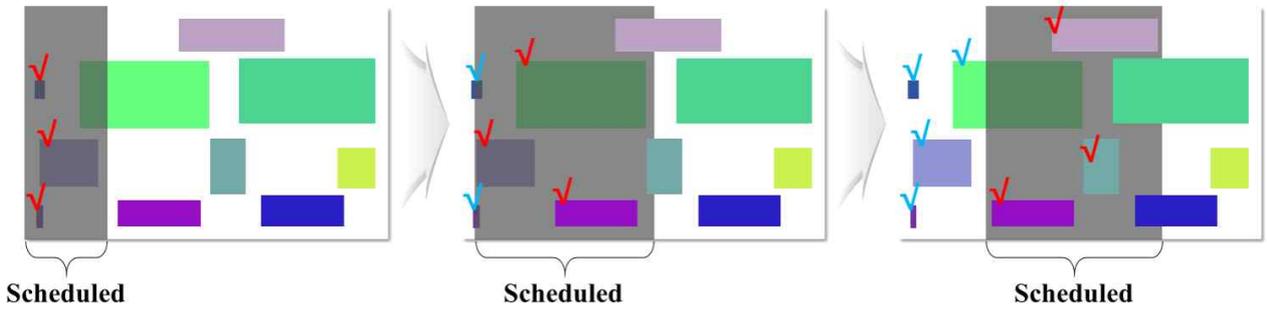


Figure 4. Rolling-horizon in berth planning

6. 수치 실험

6.1 실험 환경

본 연구에서 제안한 GMM 기반 완충 시간을 도입하여 얻은 효과를 평가하기 위하여 수치 실험을 수행하였다. 수치 실험에서는 본 연구의 모델이 실제 터미널 환경에 적용될 때 효과를 분석하기 위하여 완충 시간을 도입하지 않은 경우와 완충 시간을 정규분포로 반영한 경우와 비교하였다. 실험 환경은 부산항 북항 신선대부두의 실제 환경에 따라 선석의 길이 1,200m, 안벽크레인 총 개수 12개로 설정하였다. 또한 선박 데이터는 신선대부두의 실제 선석 계획에서 접안했던 선박들에 대하여 도착 예정 시각, 출항 희망 시각, 선박 길이, 컨테이너 물량, 최소/최대로 할당 가능한 안벽크레인 개수, 실제 접안 및 출항 시각 데이터가 사용되었다.

각 단계별로 사용되는 파라미터들의 입력 값은 다음과 같다. C_{1i} 는 단위 시간 당 250\$, C_{2i} 는 단위 시간 당 500\$, C_{3i} 는 단위 길이 당 100\$이다(Park and Kim, 2005). C_{1i}^+, C_{1i}^- 는 각각 C_{1i} 의 1.2배와 -0.8배, C_{2i}^+, C_{2i}^- 는 각각 C_{2i} 의 1.2배와 -0.8배이다(Liu et al., 2020). Rolling-horizon 방법에서 사용되는 파라미터의 입력 값으로 $k = 10$, $\lambda = 3$ 으로 설정하였다.

실험은 Intel Core i7-7700HQ 2.80GHz, 16.0GB RAM, Window 10 운영체제 환경에서 진행되었다. 또한 선형정수계획문제를 풀기 위하여 Gurobi 9.1 상업용 솔버를 사용하였다.

6.2 실험 데이터

본 연구에서는 2019년에 부산항 북항 신선대부두에 정박한 선박의 도착시간 데이터를 이용하였다. 총 3,123척의 선박이 82개의 전항지에서 신선대부두로 왔고 1,590척이 지연되었다. 전항지별로 데이터를 확인하였을 때 모든 전항지에서 지연이 발생하였다. 데이터 전처리 과정에서 전항지별로 지연이 발생한 횟수가 95%를 벗어나는 데이터는 이상치로 제거하였고, 표본 데이터의 개수가 30회 이상인 전항지만 사용하였다. Figure 5는 전처리 과정을 통해 선별된 31개의 전항지별 데이터를 보여준다. 울산항과 광양항에서 출발하는 선박의 개수가 많고 지연된 선박의 비율도 40%를 상회한다. 전반적으로 하역시설이 부족하고 하역 장비가 낙후됨에 따른 높은 체선율이 원인으로 판단된다.

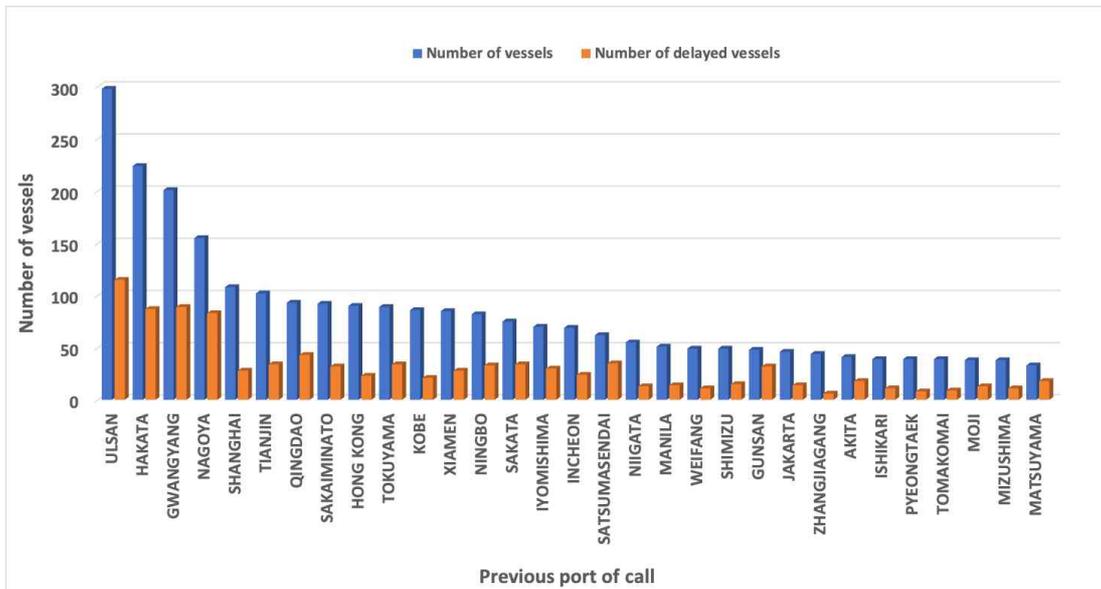


Figure 5. Preprocessed data for each previous port of call

6.3 실험 결과

1) GMM

Figure 6은 전항지 군산의 도착 지연에 대한 히스토그램과 GMM을 나타낸다. 선박의 도착 지연에 대하여 피크가 여러 곳에서 발생하는 경향을 보이는 것을 알 수 있으며, 지연의 분포는 통계 모집단이 둘 이상의 하위 모집단을 포함하는 혼합 모형으로 나타내는 것이 합리적임을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 이를 효과적으로 나타내기 위해 GMM으로 표현하였으며, Table 1에서 확인할 수 있듯이 전항지별 특성에 따라 3~4개 가우시안 분포의 혼합으로 표현됨을 알 수 있다. 본 연구에서 다루는 31개의 전항지별로 추정된 GMM의 파라미터는 Table 1에서 확인할 수 있다.

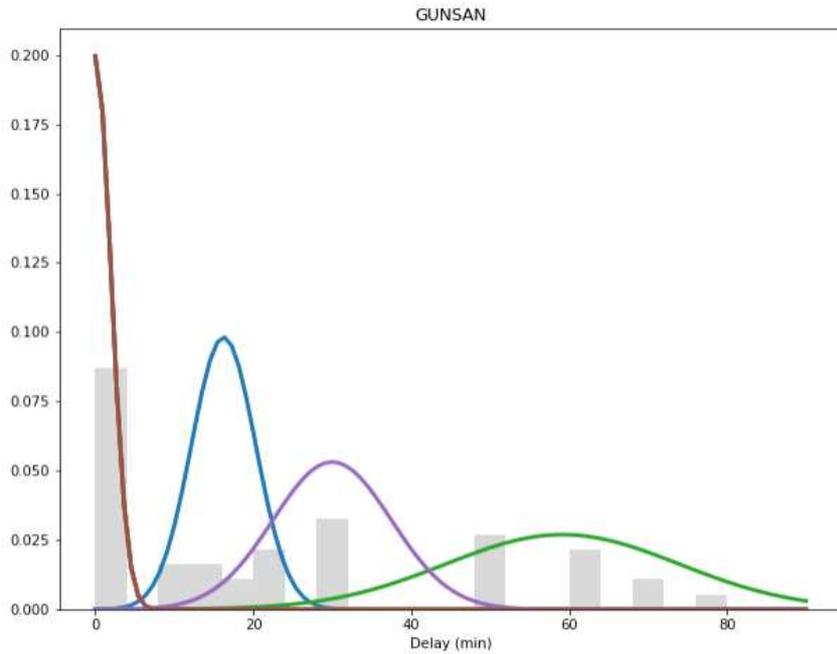


Figure 6. GMM of arrival delay at previous port of call(GUNSAN)

Table 2. Estimated GMM parameters for each previous port of call

Number	Port of Call	k	pi	mu	sigma
1	ULSAN	1	0.175138	0.611418	0.016968
		2	0.646607	0	0.000001
		3	0.178254	0.238452	0.006848
2	HAKATA	1	0.650536	0.00138	0.00018
		2	0.091504	0.767651	0.008726
		3	0.198308	0.323617	0.017897
		4	0.059652	1.069911	0.006956
3	GWANGYANG	1	0.602032	0.002231	0.00019
		2	0.136236	0.71687	0.005784
		3	0.219783	0.367212	0.018157
		4	0.04195	1.176268	0.011491
4	NAGOYA	1	0.615457	0.033548	0.0045
		2	0.085532	0.899934	0.028554
		3	0.166398	0.551467	0.010551
		4	0.132613	0.333123	0.000297
5	SHANGHAI	1	0.776695	0	0.000001
		2	0.0485	0.666667	0.000001
		3	0.174805	0.375064	0.011789
6	TIANJIN	1	0.11175	0.43238	0.006553
		2	0.701031	0	0.000001
		3	0.11506	0.826988	0.018546
		4	0.072159	0.166667	0.000001
7	QINGDAO	1	0.636364	0.017857	0.002658
		2	0.10221	0.5	0.000001
		3	0.159154	0.714201	0.006677
		4	0.102273	0.333333	0.000001
8	SAKAIMINATO	1	0.689653	0	0.000001
		2	0.112206	0.299414	0.007957
		3	0.114539	0.166667	0.000001
		4	0.083602	0.515532	0.004368
9	HONG KONG	1	0.082337	0.5	0.000001
		2	0.788229	0	0.000001
		3	0.047038	0.64586	0.001302
		4	0.082397	0.262014	0.006844
10	TOKUYAMA	1	0.670581	0.002923	0.000236
		2	0.177041	0.478368	0.004245
		3	0.094118	0.166667	0.000001
		4	0.05826	0.666651	0.000002
11	KOBE	1	0.060961	0.5	0.000001
		2	0.79268	0	0.000001
		3	0.109774	0.268542	0.005839
		4	0.036585	0.666667	0.000001
12	XIAMEN	1	0.752995	0.01091	0.0017

		2	0.130274	0.576047	0.008221
		3	0.042691	0.821363	0.000856
		4	0.074041	0.333333	0.000001
13	NINGBO	1	0.628154	0	0.000001
		2	0.066791	1.004524	0.050078
		3	0.191844	0.527625	0.01404
		4	0.113212	0.183621	0.004281
14	SAKATA	1	0.252004	0.212704	0.008195
		2	0.114266	0.557912	0.007994
		3	0.577227	0	0.000001
		4	0.056503	0.914313	0.007644
15	IYOMISHIMA	1	0.227611	0.478258	0.0108
		2	0.606061	0	0.000001
		3	0.060292	0.937955	0.004774
		4	0.106036	0.166667	0.000001
16	INCHEON	1	0.742424	0.013605	0.002083
		2	0.061463	0.871866	0.005793
		3	0.090905	0.333333	0.000001
		4	0.105208	0.570777	0.004833
17	SATSUMASENDAI	1	0.55995	0.028094	0.003724
		2	0.156815	1.153578	0.022594
		3	0.169776	0.664208	0.024146
		4	0.113459	0.323018	0.000754
18	NIIGATA	1	0.807692	0	0.000001
		2	0.057692	0.5	0.000001
		3	0.057692	0.666667	0.000001
		4	0.076923	0.1875	0.001303
19	MANILA	1	0.770833	0	0.000001
		2	0.090414	0.383751	0.006133
		3	0.020833	0.833333	0.000001
		4	0.11792	0.191617	0.001485
20	WEIFANG	1	0.829787	0.004274	0.000695
		2	0.085106	0.5	0.000001
		3	0.06383	0.333333	0.000001
		4	0.021277	0.666667	0.000001
21	SHIMIZU	1	0.723486	0.000009	0.000002
		2	0.064748	0.552221	0.00685
		3	0.084149	0.249349	0.010465
		4	0.127617	0.166667	0.000001
22	GUNSAN	1	0.383001	0.350899	0.014635
		2	0.065313	1.218107	0.007273
		3	0.356165	0.004227	0.000688
		4	0.195521	0.908639	0.007305
23	JAKARTA	1	0.727272	0	0.000001
		2	0.0809	0.460981	0.001993

		3	0.123647	0.295769	0.005774
		4	0.068181	0.694444	0.001544
24	ZHANGJIAGANG	1	0.904761	0	0.000001
		2	0.02381	0.583333	0.000001
		3	0.07143	0.249996	0.004632
25	AKITA	1	0.589743	0	0.000001
		2	0.209185	0.721405	0.017155
		3	0.102209	0.271007	0.004888
		4	0.098863	0.527625	0.001681
26	ISHIKARI	1	0.756754	0	0.000001
		2	0.140966	0.507481	0.008196
		3	0.027027	1.166667	0.000001
		4	0.075252	0.246534	0.005108
27	PYEONGTAEK	1	0.864865	0.002604	0.000211
		2	0.054054	0.333333	0.000001
		3	0.027027	0.166667	0.000001
		4	0.054054	0.5	0.000001
28	TOMAKOMAI	1	0.810811	0	0.000001
		2	0.108109	0.604165	0.004776
		3	0.054053	0.333333	0.000001
		4	0.027027	0.166667	0.000001
29	MOJI	1	0.694355	5.56E-308	0.000001
		2	0.055474	5.00E-01	0.000001
		3	0.055556	9.17E-01	0.006945
		4	0.194616	2.62E-01	0.008836
30	MIZUSHIMA	1	0.055556	0.333333	0.000001
		2	0.805556	0.011494	0.001785
		3	0.055556	0.666667	0.000001
		4	0.083333	0.5	0.000001
31	MATSUYAMA	1	0.612904	0.035088	0.004618
		2	0.064157	0.458066	0.001741
		3	0.161667	0.76604	0.00682
		4	0.161272	0.333333	0.000001

2) GMM 기반의 완충 시간

앞서 추정된 GMM을 토대로 각 선박의 전항지별 완충 시간(θ_i)을 도출하기 위해 importance sampling을 수행하였고, 샘플링은 3,000회를 하였다. 샘플링의 기댓값은 Table 2에서 확인할 수 있다.

Table 3. Buffer time(θ_i) for each previous port of call

Number	Port of Call	θ_i
1	ULSAN	1.76411
2	HAKATA	2.62702
3	GWANGYANG	2.83027
4	NAGOYA	2.53853
5	SHANGHAI	1.51342
6	TIANJIN	1.54645
7	QINGDAO	2.52417
8	SAKAIMINATO	1.08152
9	HONG KONG	0.81191
10	TOKUYAMA	0.84125
11	KOBE	1.19988
12	XIAMEN	1.64175
13	NINGBO	1.94486
14	SAKATA	1.4286
15	IYOMISHIMA	1.65076
16	INCHEON	2.1445
17	SATSUMASENDAI	1.72325
18	NIIGATA	0.05712
19	MANILA	1.06052
20	WEIFANG	0.01754
21	SHIMIZU	1.45242
22	GUNSAN	3.14353
23	JAKARTA	2.28178
24	ZHANGJIAGANG	0.53634
25	AKITA	1.50451
26	ISHIKARI	1.74959
27	PYEONGTAEK	0.10139
28	TOMAKOMAI	0.45229
29	MOJI	1.56952
30	MIZUSHIMA	1.00023
31	MATSUYAMA	2.53675

3) 성능 검증을 위한 비교 분석

본 절에서는 제안하는 방법론(strategy 3)이 실제 터미널 환경에 적용될 때 효과를 분석하기 위하여 완충 시간을 도입하지 않은 경우(strategy 1)와 완충 시간을 정규분포로 반영한 경우(strategy 2)와 비교하였다. 30개의 실제 데이터에 대해 전략 1, 2, 3을 비교하였고, 1단계와 2단계의 비용에 대한 결과는 Table 3에서 확인할 수 있다.

본 연구에서 제안한 방법론이 다른 전략에 비하여 효과적으로 비용을 절감하는 것을 확인할 수 있다. 전

략 2와 3의 경우 전략 1에 비하여 완충 시간 적용에 따른 1단계의 비용이 크게 발생하지만, 실제 지연이 발생한 상황에서 2단계의 비용이 적게 발생하기 때문에 총 비용이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, 전략 2는 전략 3에 비해 효율적인 완충 시간을 적용하지 않아 전략 1보다 큰 비용이 발생하는 경우도 있다. 따라서 GMM 기반의 완충 시간은 정규분포 기반의 완충 시간보다 더 효과적이다.

Table 4. Experimental results of 3 strategies

instance	strategy 1			strategy 2			strategy 3			Improvement	
	1단계	2단계	총 비용(z_1)	1단계	2단계	총 비용(z_2)	1단계	2단계	총 비용(z_3)	$(z_1 - z_3)/z_1$	$(z_2 - z_3)/z_2$
1	9750	13900	23650	11250	9400	20650	12250	7900	20150	14.80%	2.42%
2	13000	11700	24700	14250	9900	24150	16500	6900	23400	5.26%	3.11%
3	11250	16100	27350	12500	14800	27300	13750	13500	27250	0.37%	0.18%
4	5750	7300	13050	6250	6900	13150	6250	6500	12750	2.30%	3.04%
5	8500	13000	21500	8500	13000	21500	9750	10900	20650	3.95%	3.95%
6	2750	5800	8550	2750	5500	8250	2750	5500	8250	3.51%	0.00%
7	9000	8400	17400	9500	7500	17000	10500	6400	16900	2.87%	0.59%
8	9750	11700	21450	11250	9300	20550	11250	8300	19550	8.86%	4.87%
9	9750	11100	20850	9750	9700	19450	10000	9300	19300	7.43%	0.77%
10	15500	11400	26900	16750	10500	27250	19000	7500	26500	1.49%	2.75%
11	13000	11400	24400	13000	11400	24400	16500	7500	24000	1.64%	1.64%
12	6250	18400	24650	7000	17600	24600	7750	16700	24450	0.81%	0.61%
13	9750	11100	20850	10250	9300	19550	11500	8000	19500	6.47%	0.26%
14	12250	16900	29150	13500	15500	29000	15250	13700	28950	0.69%	0.17%
15	12250	17500	29750	13500	16100	29600	15250	14300	29550	0.67%	0.17%
16	13000	11400	24400	16750	8700	25450	16500	7500	24000	1.64%	5.70%
17	9250	10200	19450	10000	9400	19400	10500	8900	19400	0.26%	0.00%
18	7750	10200	17950	10000	9600	19600	8250	9100	17350	3.34%	11.48%
19	7750	18200	25950	8250	15900	24150	9250	14500	23750	8.48%	1.66%
20	14000	15500	29500	14750	14000	28750	15750	13000	28750	2.54%	0.00%
21	3000	4200	7200	3750	3900	7650	1500	2600	4100	43.06%	46.41%
22	5000	3300	8300	6000	2400	8400	5750	2400	8150	1.81%	2.98%
23	14750	9600	24350	14750	7900	22650	13250	8000	21250	12.73%	6.18%
24	4250	15500	19750	3000	14100	17100	3250	10600	13850	29.87%	19.01%
25	22250	18400	40650	23250	16400	39650	26500	13000	39500	2.83%	0.38%
26	13000	14100	27100	13000	14100	27100	13000	13800	26800	1.11%	1.11%
27	750	4500	5250	1250	2700	3950	1250	2700	3950	24.76%	0.00%
28	4250	14200	18450	6000	12000	18000	6750	11200	17950	2.71%	0.28%
29	10750	11700	22450	11750	11200	22950	12250	8500	20750	7.57%	9.59%
30	6000	4900	10900	6500	4200	10700	6500	4200	10700	1.83%	0.00%

7. 결론

다양한 불확실한 요인들에 의해 선박이 예상시간 보다 늦게 도착하는 경우 초기 선석 계획을 더 이상 적용할 수 없게 되고 이는 물류 프로세스의 지연을 야기하여 국가적으로 큰 경제적 손실을 초래한다. 이를 막기 위하여 우리는 초기 계획에서 변동 사항이 발생했을 때 발생하게 되는 비용을 최소화하는 완충 시간 기반의 전략을 제시하였다. 혼합정수계획법으로 수학적 모델을 수립하였고, 기계학습을 기반으로 하여 선박별 최적의 완충 시간을 도출하여 적용하였으며, 최종 모델을 효율적으로 해결하기 위해 Rolling-horizon 방법을 제안하였다. 제안한 방법론을 검증하기 위해 부산 컨테이너 터미널의 데이터를 바탕으로 수치 실험을 수행하였다. 완충 시간이 없는 경우와 완충 시간을 정규분포로 반영한 경우, 그리고 기계학습으로 도출한 데이터 기반의 완충 시간을 적용한 경우의 결과를 비교하였을 때, 본 연구에서 제안한 방법이 비용 측면에서 가장 효과적임을 확인하였다.

본 연구에서 사용한 데이터는 터미널에 입항한 선박별 전항지, 선사, 항로, 예상 도착시간, 실제 도착시간, 선적 컨테이너 개수, 양하 컨테이너 개수, 선박별 할당 가능한 최대/최소 안벽크레인 개수 정보를 가지고 있다. 선박의 지연시간을 예측하기 위해 선박별 전항지만을 고려하였는데, 이는 데이터 양의 한계로 인해 여러 변수를 고려하여 분류를 세분화하면 각 분류별 표본의 개수가 현저히 줄었기 때문이다. 향후에는 이러한 한계를 보완하기 위해 더욱 많은 양의 데이터를 확보하고, 선박의 지연에 영향을 미치는 요인들(기상, 해양환경 등)을 더욱 세분화하여 선박의 도착시간을 예측한다면 초기 계획에 대한 변동의 크기를 더욱 정확하게 예측하여 보다 효율적이며 강건한 선석 계획을 수립할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 항만에서 수집되는 다양한 데이터를 바탕으로 항만 및 해상, 육상의 상황을 예측하고, 예측된 결과를 통해 야드, 게이트 등의 다양한 항만 운영시스템을 종합적으로 고려한다면 물류 관점의 전역 최적화를 실현할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 높은 수준의 예측 및 통합 최적화 기술을 활용한 실용적인 서비스를 통해 항만 산업을 촉진할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Bierwirth, C., Meisel, F.(2010), A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals, *European Journal of Operational Research*, 202(3), 615-627
- Bierwirth, C., Meisel, F.(2015), A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals, *European Journal of Operational Research*, 244(3), 675-689
- Du, Y., Xu, Y., Chen, Q.(2010), A feedback procedure for robust berth allocation with stochastic vessel delays, In *Intelligent control and automation (WCICA)*, 2010 8th World Congress, 2210-2215
- Guan, Y., Cheung, R. K.(2004), The berth allocation problem: models and solution methods, *Or Spectrum*, 26(1), 75-92
- Guan, Y., Xiao, W. Q., Cheung, R. K., Li, C. L.(2002), A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst-case analysis, *Operations Research Letters*, 30(5), 343-350
- Imai, A., Nagaiwa, K. I., Tat, C. W.(1997), Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia, *Journal of Advanced transportation*, 31(1), 75-94
- Imai, A., Nishimura, E., Hattori, M., Papadimitriou, S.(2007). Berth allocation at indented berths for mega-containerships. *European Journal of Operational Research*, 179(2), 579-593
- Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S.(2001), The dynamic berth allocation problem for a container port, *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(4), 401-417
- Iris, C., Pacino, D., Ropke, S.(2017), Improved formulations and an adaptive large neighborhood search heuristic for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 105, 123-147
- Karafa, J., Golias, M. M., Ivey, S., Saharidis, G. K., Leonardos, N.(2013), The berth allocation problem with stochastic vessel handling times, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(1-4), 473-484
- Kim, A., Park, H. J., Park, J. H., Cho, S. W.(2021), Rescheduling Strategy for Berth Planning in Container Terminals: An Empirical Study from Korea, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(5), 527
- Kim, K. H., Moon, K. C.(2003), Berth scheduling by simulated annealing, *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(6), 541-560
- Kim, K. H., Park, Y. M.(2004), A crane scheduling method for port container terminals, *European Journal of operational research*, 156(3), 752-768
- Lai, K. K., Shih, K.(1992), A study of container berth allocation, *Journal of advanced transportation*, 26(1), 45-60
- Larsen, R., Pranzo, M.(2019), A framework for dynamic rescheduling problems, *International Journal of Production Research*, 57(1), 16-33
- Liu, C., Xiang, X., Zheng, L.(2020), A two-stage robust optimization approach for the berth allocation problem under uncertainty, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 32(2), 425-452
- Lu, Z. Q., Xi, L. F.(2010), A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time, *European Journal of Operational Research*, 207(3), 1327-1340

- Meisel, F., Bierwirth, C.(2009), Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 196-209
- Moorthy, R., Teo, C. P.(2007), Berth management in container terminal: the template design problem. In *Container Terminals and Cargo Systems*, 63-86
- Park, K. T., Kim, K. H.(2002), Berth scheduling for container terminals by using a sub-gradient optimization technique, *Journal of the operational research society*, 53(9), 1054-1062
- Park, Y. M., Kim, K. H.(2005), A scheduling method for berth and quay cranes, In *Container terminals and automated transport systems*, 159-181
- Shang, X. T., Cao, J. X., Ren, J.(2016), A robust optimization approach to the integrated berth allocation and quay crane assignment problem, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 94, 44-65
- Ting, C. J., Wu, K. C., Chou, H.(2014), Particle swarm optimization algorithm for the berth allocation problem, *Expert Systems with Applications*, 41(4), 1543-1550
- Ursavas, E., Zhu, S. X.(2016), Optimal policies for the berth allocation problem under stochastic nature, *European Journal of Operational Research*, 255(2), 380-387
- Wang, F., Lim, A.(2007), A stochastic beam search for the berth allocation problem, *Decision support systems*, 42(4), 2186-2196
- Xiao, L., Hu, Z. H.(2014), Berth allocation problem with quay crane assignment for container terminals based on rolling-horizon strategy, *Mathematical Problems in Engineering*.
- Zeng, Q., Yang, Z., Hu, X.(2011), Disruption recovery model for berth and quay crane scheduling in container terminals, *Engineering Optimization*, 43(9), 967-983
- Zhou, P. F., Kang, H. G.(2008), Study on berth and quay-crane allocation under stochastic environments in container terminal, *Systems Engineering-Theory & Practice*, 28(1), 161-169

불균등한 시설배치문제를 위한 Coral Reef Optimization 방법론 적용

정동진, 채준재[†]

한국항공대학교 항공교통물류학부 물류전공

Applicability of Coral Reef Optimization to Unequal area facility layout problem

Dongjin Jeong, Junjae Chae

School of Air Transport, Transportation and Logistics, Korea Aerospace University

Unequal area facility layout problem is an optimization problem that we place given departments on given floor space to minimize total material handling movement or maximize its efficiency. We study to find its applicability of Coral Reef Optimization to unequal area facility layout problem. Coral reef optimization is relatively new and there are not many researches applying this method to layout design. Specifically, a slicing tree structure is used to place rectangular shape blocks which represent functional departments in manufacturing system and the coral reef optimization is improving its fitness which is represented by total material movement based on the given configuration. The instances from previous literature are used to experiment and the results were compared to optimal solutions. To see the applicability, we only take small problems less than 20 blocks and result shows that the coral reef optimization properly work with unequal area facility layout problem.

Keywords: Unequal area facility layout problem, Coral reef optimization, Facility design, Meta-heuristic, Optimization

논문접수일 : 2021.10.12.

심사완료일 : 2022.06.22.

게재확정일 : 2022.06.24.

[†] Corresponding Author: jchae@kau.ac.kr

1. 서론

1.1 소개

시설배치문제(FLP: Facility Layout Problem)는 제약 조건을 만족하면서 그 효과를 최대화 하거나 비용이 최소화 되도록 시설을 배치하는 문제이다. Tompkins et al.(2010)은 좋은 배치는 회사의 총 제조물류 비용을 20% ~ 50%까지 줄일 수 있다고 했다. 이러한 이유로 FLP는 제조업에서 물류 비용을 줄이기 위해 고려해야 할 매우 중요한 문제이다(Kouvelis et al., 1992). FLP의 적용에는 여러가지가 있는데, 그 중에서 우리가 다룰 문제는 불균등한 면적의 시설 배치 문제(UA-FLP : Unequal Area Facility Layout Problem)이다(Drira et al., 2007; Hosseini-Nasab et al., 2018; Anjos and Vieira, 2017). 이는 일반적인 배치설계 문제에 많이 통용되는 형태이고 실제 산업현장과 유사하게 사용할 수 있는 문제 유형이다. UA-FLP 는 Armour and Buffa(1963)에 의해 처음 소개되었는데, 전체 직사각형 공간에 주어진 직사각형 모양의 시설을 배치하는 것인데, 이때 목표는 전체 물류이송거리의 합을 최소화다. 주요 제약조건으로는 첫째, 시설들 간의 중복(혹은 겹침)이 허용되지 않으며 둘째, 주어진 공간 안에 모든 시설이 배치되어야 한다. 일반적으로 UA-FLP의 목표는 배치가 이루어진 시설들 사이에서의 총 물류이송비용의 최소화 이다(Gonsalves and Resende, 2015).

1.2 문헌연구

최근 UA-FLP 해결을 위한 다양한 접근법이 소개 되었는데 Komarudin and Wong(2010)은 결정론적 절차와 휴리스틱/메타휴리스틱 방법의 해결법을 소개했고 Meller et al.(1998)은 Branch and Bound 알고리즘을 통해 비순환 그래프로 문제를 해결했다. Montreuil(1991) 과 Konak et al.(2006) 은 혼합 정수 계획법을 UA-FLP에 적용했고, Meller et al.(1998)은 Montreuil의 방법을 수정하여 보다 큰 규모의 문제를 해결했다. Sherali et al.(2003)과 Castillo et al.(2005)은 혼합정수계획법에서 유동적인 블록의 면적에 대한 선형화를 통해 오류를 제어할 수 있는 방법을 제안했다.

Saraswat et al.(2015)와 Purnomo and Wiwoho(2016)는 목표를 달성하기 위해 Sherali et al.(2003)의 방법을 사용했다. Chae and Regan(2016)은 최대 13개 블록에 대한 최적배치를 도출했다. 이들은 가로세로가 모두 정해진 시설과 그렇지 않은 시설을 동시에 고려했다. 일반적으로 메타 휴리스틱 방법은 매우 큰 사례에서 결정론적 방법보다 성능이 좋다. 이것이 휴리스틱 및 메타 휴리스틱 접근법이 이 문제를 해결하는 데 자주 사용되는 이유다. Tam(1992)은 최선의 해결책을 찾기 위해 LOGIC 이라고 불리는 Simulated Annealing 접근법을 소개했다. 그 후에 Scholz et al.(2009) 과 Kulturel-Konak(2012)은 Tabu Search를 제안했다. 다수의 연구자들은 유전 알고리즘(GA : Genetic Algorithm)을 채택했다. 이 방식으로 Tate and Smith(1995)는 실현 가능한 해만 보기 위해 패널티 함수를 포함하는 GA를 제안했다(때때로 값이 좋은 해의 경우 제약조건을 만족하지 못한다.). Azadivar and Wang(2000) 은 Slicing Tree Structure(STS)를 사용한 GA를 통해 UA-FLP를 해결했다. Wu and Appleton(2002) 과 Gomez et al.(2003)은 시설이 배치될 공간 내부의 복도를 고려해 문제를 해결했다. Enea et al.(2005)는 특히 가로 세로 비율(Aspect ratio, α) 제약조건을 고려하여 UA-FLP에 GA를 사용했다. 또한 Aiello et al.(2006)는 UA-FLP를 다루기 위해 GA와 Electre 알고리즘의 조합을 사용했으며, Liu and Meller(2007)는 혼합 정수 계획법과 GA를 결합한 방법을 고안했다. 최근에는 Palomo-Romero et al.(2017)가 아일랜드 모델에 기초한 GA를 사용해 다양성을 향상시켜 더 좋은 해를 만들었다. 그 외에도 다양한 메타휴리스틱이 사용되었는데, 개미 군집 최적화 (Komarudin and Wong, 2010; Wong and Komarudin, 2010; Kulturel-Konak, 2011; Liu and Liu, 2019), 인공 면역 체계 (Ulutas and Kulturel-Konak, 2012), Biased random-key GA (Gonsalves and Resende, 2015) 등이 그 사례

다. 마지막으로, Kang and Chae(2017)는 Geem et al(2001)이 제안한 Harmony Search 방법을 채택하여 UA-FLP를 해결했다. 그들은 해의 다양성을 위해 Shayan and Chittilappilly(2004)의 STS 표현을 개량했다.

위에서 언급한 알고리즘으로 UA-FLP의 해를 나타낼 때 보통 두 가지의 표현 중 하나로 나타낸다. 그것은 STS와 Flexible Bay Structure(FBS)다. <Figure 1> STS에서는 공간을 불규칙하게 나눌 수 있으며(Kang and Chae, 2017; Komarudin and Wong, 2010; Scholz et al., 2009; Shayan and Chittilappilly, 2004), FBS에서는 Bay라고 불리는 직사각형 공간에만 시설을 배치한다(KulturI-Konak and Konak, 2011). Coral Reef Optimization을 사용한 선행연구(Garcia-Hernandezatal, 2019)는 FBS 방식을 사용했는데 이는 STS와 비교했을 때 배치 다양성이 다소 떨어지는 단점이 있다. 따라서 이번 연구에서는 Kang and Chae(2017)의 개량된 STS를 적용해 UA-FLP를 해결한다.

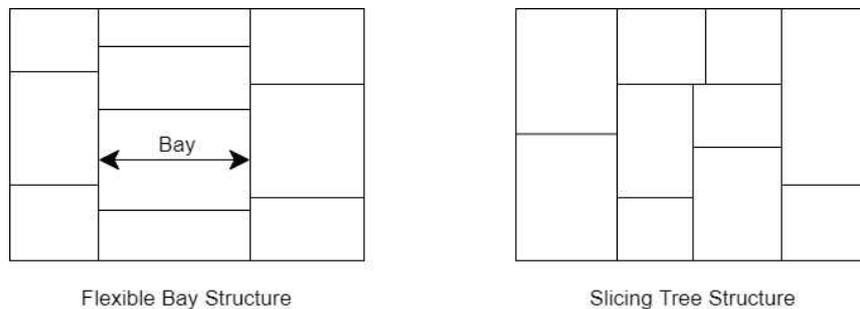


Figure 1. Flexible Bay Structure and Slicing Tree Structure

본 연구에서는 진화 기반 알고리즘인 산호초 최적화(CRO : Coral Reef Optimization) 방법(Salcedo-Sanz et al., 2014)의 적용성을 STS를 바탕으로 실험했다. CRO는 산호초에서 발생하는 생식, 착상, 복제 그리고 퇴화를 모방하는 진화형 알고리즘이다. CRO는 진화 알고리즘과 Simulated Annealing(Salcedo-Sanz et al., 2014a)을 조합한 것과 유사한 알고리즘으로 통신(Salcedo-Sanz et al., 2014d)(SalcedoSanz et al., 2014b), 에너지(Salcedo-Sanz et al., 2016)(Salcedo-Sanz et al., 2014c), 구조공학(Salcedo-Sanz et al., 2017)(Camacho-Gómez et al., 2018) 혹은 응용의료(Bermejo et al., 2018) (Yan et al., 2019)와 같은 다양한 분야에서 사용된다.

최근 CRO는 군집화(Medeiros, Xavier and Canuto, 2015), 인공신경망(Yang and Zhang, 2016), 시계열 분석(Duran-Rosal et al., 2018) 또는 자원 할당 문제 등 그 적용범위가 확대되고 있다. 이러한 문제들에서 CRO는 우수한 성능을 보여준다(Salcedo-Sanz, 2017). 우리 연구는 다양한 분야에서 그 효과를 보이고 있는 CRO를 UA-FLP에 적용하고자 한다. 이는 성능 자체의 평가보다도 최적해가 알려진 작은 규모의 문제들을 알려진 방법론대로 적용할 경우 적절히 해결하는지 확인하는 것이 일차적인 목표이다. FBS는 정해진 Bay 형태 안에서 배치를 하기 때문에 실질적인 최적해를 찾기에 한계가 있다. STS를 사용하게 되면 그 제약을 제거함으로써 인해 더 큰 수준의 다양성을 갖게 되어 최적 수준에 가깝게 된다. 이는 최적해를 찾기까지 더 많은 경우의 수가 요구되고 적절히 구현하기에 매우 어려운 조건이 된다. 이전 연구를 살펴보면 FBS를 이용한 UA-FLP는 CRO로 적용된 적이 있지만(Garcia-Hernandezetal, 2019), STS에 적용된 경우는 아직까지 없기 때문에 이 알고리즘을 통한 최적해로의 접근의 결과를 통해 이 알고리즘의 성능을 논할 수 있을 것이다.

2. 본론

2.1. UA-FLP

UA-FLP를 위한 수리모형을 통해 각 시설의 위치를 결정할 수 있다. UA-FLP는 주어진 직사각형 공간에 직사각형 모양의 시설을 배치하는 문제로, 이때 각 시설은 겹치지 않아야하며 각 시설의 중심좌표를 이용해 총 물류이송거리를 최소화하는 것을 목표로 한다. 이때 각 시설의 크기는 각각 다르다는 것을 가정한다. 문제를 해결하기전 각 시설의 넓이와 가로세로비(Aspect ratio, α)의 최댓값 그리고 시설이 들어가는 공간의 가로, 세로는 주어진다. 각 시설마다 그 값이 다른데, 그 이유는 시설마다 면적이 서로 다르기 때문이다. 이 문제의 목적함수는 각 시설간 총 물류이송거리의 최소화이며 정의된 변수와 매개변수는 다음과 같다. 이때 시설의 형태는 가로, 세로의 길이가 그 정해진 비율(Aspect ratio)안에서 움직일 수 있고 이후로는 편의를 위해 블록으로 명명하기로 한다.

Parameters and variables

n	각 블록의 수
L^s	주어진 공간의 x 축, y 축 길이
l_i^s	블록 i 의 x 축 혹은 y 축 길이
lb_i^s, ub_i^s	블록 i 의 x 축 혹은 y 축 길이의 하한, 상한값
f_{ij}	블록 i 와 j 사이의 물동량
d_{ij}^s	블록 i 와 j 사이의 x 축 혹은 y 축 거리
c_i^s	블록 i 의 중심의 x 좌표 혹은 y 좌표
z_{ij}^x	$\begin{cases} 1, \text{블록 } i \text{가 블록 } j \text{의 왼쪽에 있을 경우} \\ 0, \text{그 반대의 경우} \end{cases}$
z_{ij}^y	$\begin{cases} 1, \text{블록 } i \text{가 블록 } j \text{의 아래에 있을 경우} \\ 0, \text{그 반대의 경우} \end{cases}$

$$\text{Minimize} \quad \sum_i \sum_{j(i \neq j)} f_{ij} (d_{ij}^x + d_{ij}^y) \quad (1)$$

$$\text{Subject to} \quad a_i = l_i^x \times l_i^y, \forall i \quad (2)$$

$$d_{ij}^s = |c_i^s - c_j^s|, \forall i, j \forall s \quad (3)$$

$$lb_i^s \leq l_i^s \leq ub_i^s, \forall i, s \quad (4)$$

$$\sum_{s=x}^y (z_{ij}^s + z_{ji}^s) = 1, \forall i, j > i \quad (5)$$

$$c_i^s + \frac{l_i^s}{2} \leq c_j^s - \frac{l_j^s}{2} + L^s(1 - z_{ij}^s) \quad \forall i, j \neq i \quad \forall s \quad (6)$$

$$\frac{l_i^s}{2} \leq c_i^s \leq L^s - \frac{l_i^s}{2} \quad \forall i, s \quad (7)$$

$$z_{ij}^s \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \neq i, s \quad (8)$$

불균등한 시설배치문제의 목적함수는 (1)에 적힌 것과 같이 총 물류이송거리(물동량 * 직각거리)의 최소화다. 이때 (2)~(8)의 제약조건을 만족해야하는데, 블록 i 의 넓이는 (2)에 적힌 것과 같이 각 축 길이의 곱으로 나타내며, 각 블록간 거리는 (3)과 같이 직각거리이다. (4)는 각 블록은 길이의 상한값과 하한값을 가진다는 의미이며, (5)~(8)은 겹침방지에 대한 제약조건이다.

2.2. 방법론 소개

2.2.1 Layout representation

문제를 표현하기 위해 STS를 사용한다(Komarudin and Wong, 2010). STS는 주어진 공간을 수직, 수평적으로 연속해서 나뉘는 공간에 블록을 배치하는 방법이다. 이런 연속적인 분할 과정은 세가지 표현으로 구분한다. 각각 Cut point, Cut code, Department sequence이다. n 개의 블록을 배치하는 UA-FLP를 가정할 때 총 $(3n-2)$ 개의 벡터값이 필요하다.

Department sequence는 블록들의 배열 순서를 뜻하며 블록의 수인 n 개의 벡터로 표현된다. Cut point는 이 순서를 따라 블록을 자른다는 뜻이며, 블록 사이사이를 자르는 것이므로 총 $(n-1)$ 개의 벡터가 필요하다. 예를 들어 종이 한 장이 있다고 생각해보자. 종이를 반으로 자르면 2장이 된다. 다시 말해 종이를 자를수록 수량이 많아지고 그 분할된 종이들 속에 블록을 넣는 것이다. 따라서 n 개의 종이를 만들기 위해서는 $(n-1)$ 번 종이를 잘라야한다. Cut code는 어떤 방식으로 자를 것인지를 뜻한다. 기존에는 자르는 방법이 수직과 수평 두가지 뿐이었다(Tam, 1992a). 그러나 단순히 수직과 수평 이외에 역수직, 역수평이 추가되었고 우리 연구도 이 방식을 채택한다(Kang and Chae, 2017). 4가지 방식을 사용하는 이유는 2가지로는 해의 다양성이 떨어지기 때문이다. <Figure 2>는 각 표현을 예시를 통해 설명한 것이다.

Cut point는 Cut이 발생할 순서를 의미하고 Cut code는 0, 1, 2, 3 순서대로 수평, 수직, 역수평, 역수직을 뜻하는데 수평의 경우 자르는 위치를 기준으로 우측의 블록을 아래에 배치하고 좌측의 블록을 위에 배치한다. <Figure 2>를 보면 블록 1과 2, 3, 4, 5 사이에 Cut이 처음으로 발생하는데 그때 자르는 방식은 수평(0)이다. 그래서 1을 위로 배치하고 2, 3, 4, 5를 하단에 배치했다. 한번 잘린 블록은 배치에 영향을 줄 수 없으므로 블록 1의 위치는 가장 상단에 고정된다. 그 후로 블록 2와 3, 4, 5 사이에 수직(1) Cut이 발생하는데 수직으로 자를 경우 단순히 일렬로 둔다고 생각하면 된다. 다만 앞에서 좌측 블록의 위치가 고정됐던 것처럼 수직도 좌측의 블록의 위치가 확정된다. 마찬가지로 남은 블록에 대해 같은 과정을 반복하면 <Figure 2> 좌측 하단의 배치가 나온다. Cut code 2, 3은 0, 1의 반대개념인데 기존에 위에 배치했던 블록을 아래로 배치하고 기존에 일렬로 배치했던 것을 자르는 지점을 기준으로 좌측과 우측의 위치를 바꾸면 된다.

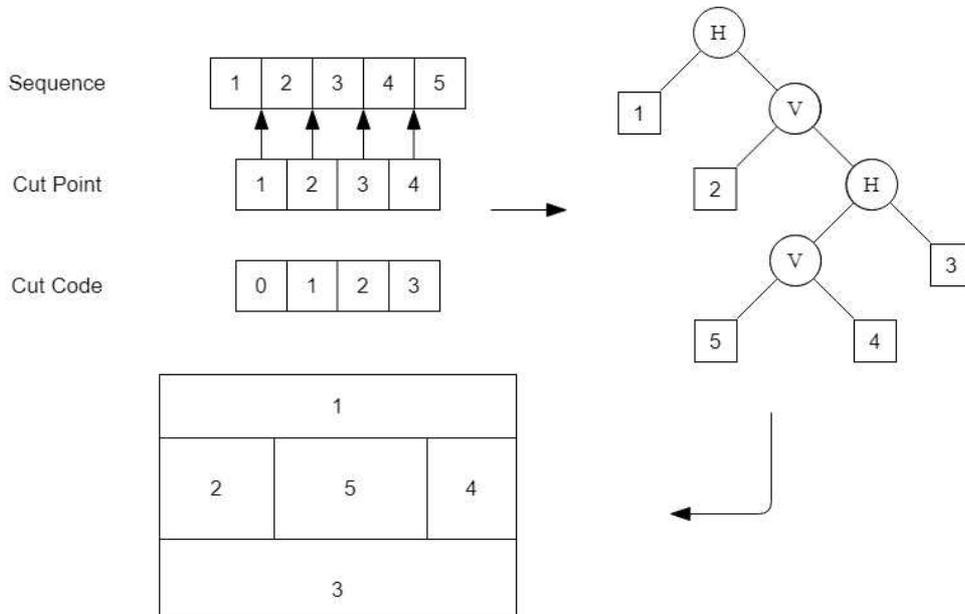


Figure 2. Slicing Tree Structure

2.2.2 Coral Reef Optimization

산호초 최적화 알고리즘(CRO)은 Salcedo-Sanz(2014a)에 의해 제안되었다. 산호초의 진화와 생태계에서 일어나는 과정을 모방하는 Bio-inspired algorithm이다. 이 알고리즘은 $N \times M$ 의 크기를 가진 직사각형 격자(암초, reef) 위에서 진행된다(<Figure 3>의 격자와 동일). CRO는 Population-based algorithm이고 그 알고리즘이 진행되는 공간이 <Figure 3>의 격자이다. 암초위의 다양한 장소에서 여러 산호가 자라나는 것과 같이 격자 위의 셀 하나하나가 각각의 산호를 가리킨다. (i, j) 에 위치한 각 사각형은 산호 $\eta(i, j)$ 를 나타낸다. $(i \leq N, j \leq M)$ 각각의 산호는 하나의 해, 하나의 배치를 뜻한다. 일단 암초를 정의하고 나면, 다음의 단계를 거친다.

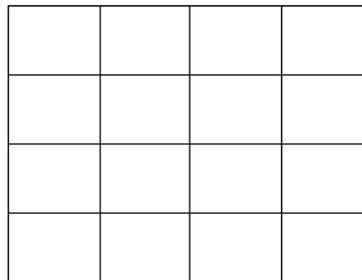


Figure 3. Grid(4X4)

1) 초기화

CRO 알고리즘의 시작은 암초에 있는 초기 산호의 수를 결정하는 것이다. 암초에서 비어있는 사각형과 사용중인 사각형의 비율을 결정하는 매개변수는 $\rho_0 (0 < \rho_0 \leq 1)$ 이다. 이를 이용해 초기 산호의 수 Initial Coral $s = N \times M \times \rho_0$ 가 결정된다. 산호의 수가 정해지면 암초 위에 랜덤한 배치를 갖는 해가 무작위로 자리를 잡는다. <Figure 4>의 경우 $\rho_0=0.6$ 을 가정했을 때 16개의 자리 중 10개가 초기해의 수로 지정되었고 각 초기해의 위치 또한 무작위로 결정된 것을 보여준다. 암초가 초기화되면 산호초는 번식하며 정지할 때까지 반복한다. 정지조건은 지정 횟수를 채우거나 일정 횟수동안 개선이 없으면 멈추는 것으로 한다. 앞

에서도 언급했듯이 각각의 산호는 UA-FLP 문제의 해를 뜻한다.

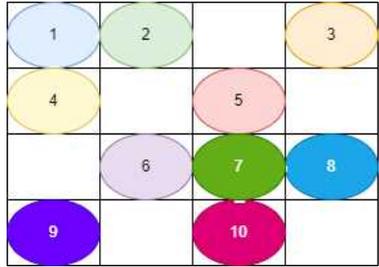


Figure 4. Initialization($\rho_0=0.6$)

2) 진화과정

번식 단계는 유성 생식(유성생식은 다시 내부, 외부 생식으로 나뉜다.)과 무성 생식으로 나뉘게 된다. 이 과정을 통해 현재 암초에 있는 산호들로부터 새로운 자식 산호를 만들어낸다. 유성 생식과 무성 생식 사이에는 착상단계가 존재하는데, 새로 만들어진 모든 산호가 암초에 들어갈 수 있지않고 그 중 일부만 착상된다. 마지막으로 퇴화단계를 통해 암초에서 가장 약한 산호를 제거한다. 유전 알고리즘과 비슷하게 건강하지 않은 산호는 없애고 건강한 산호를 통해 더 좋은 해를 생성하는 방식이다.

3) 외부 유성생식(Broadcast spawning)

이 과정은 두 단계로 이루어진다. 첫째, 암초에 존재하는 다수의 산호중 임의로 생식에 참여할 산호를 결정한다. 그 비율은 매개변수 F_b 로 결정하며 그 양은 (존재하는 산호의 수 \times 매개변수 F_b)다. 여기서 선택되지 않은 산호들(존재하는 산호의 수 $\times (1-F_b)$)은 나중에 내부 유성생식에 사용된다. 둘째, 선택된 산호중 임의로 두개씩 짝을 짓는다. 각각의 짝은 교차과정을 통해 자녀를 만든다. 우리는 여기서 Partially Matched Crossover(PMX)(Goldberg and robert, 1985), One point crossover(Holland, 1992)를 앞장에서 설명한 세가지 벡터집합에 대해 각각 사용했다. 즉, 세가지 벡터집합에 대해 각각 Crossover한 새로운 세가지 벡터집합이 형성되고 그 집합이 새로운 배치를 만들게 된다. 자녀가 생성되면 내부 유성생식이 끝날 때까지 따로 보관한다. <Figure 5>는 임의의 두 산호가 PMX Crossover를 사용해 자녀를 생성한 뒤 따로 보관하는 과정을 나타낸다.

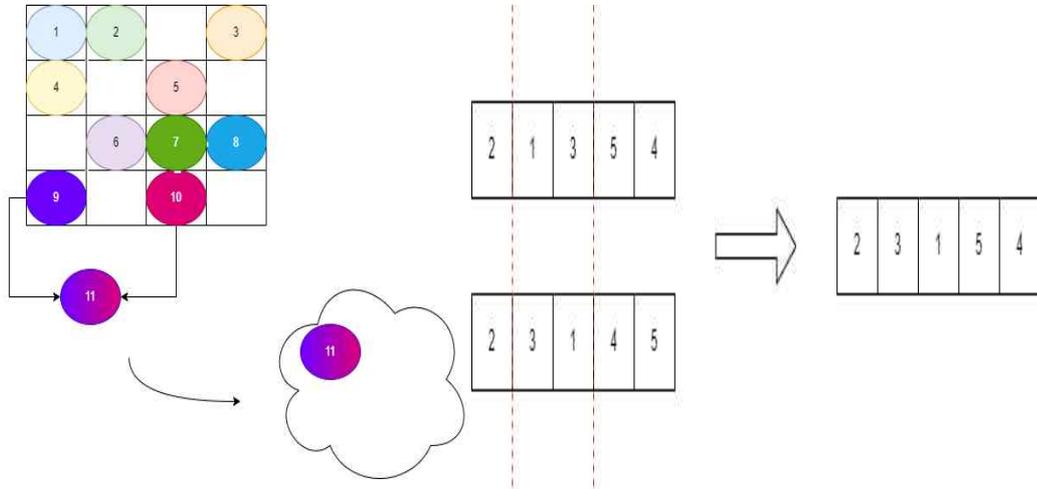


Figure 5. Broadcast spawning

4) 내부 유성생식(Brooding)

외부 유성생식에서 사용하고 남은 산호(존재하는 산호의 수 $\times (1-F_b)$)는 개별 산호에 대해 돌연변이 과정을 거친다. 돌연변이 과정은 Cut Point, Cut Code, Depart Sequence에 대해 Swap, Inversion을 사용한다. 유성생식이 끝나고 나면 암초에 착상하기 위한 준비를 한다. <Figure 6>은 외부 유성생식에 참여하지 않은 산호가 Swap 돌연변이를 일으켜 새로운 산호를 만들어 이전 단계의 자녀가 위치하는 곳에 함께 보관되는 모습을 표현했다.

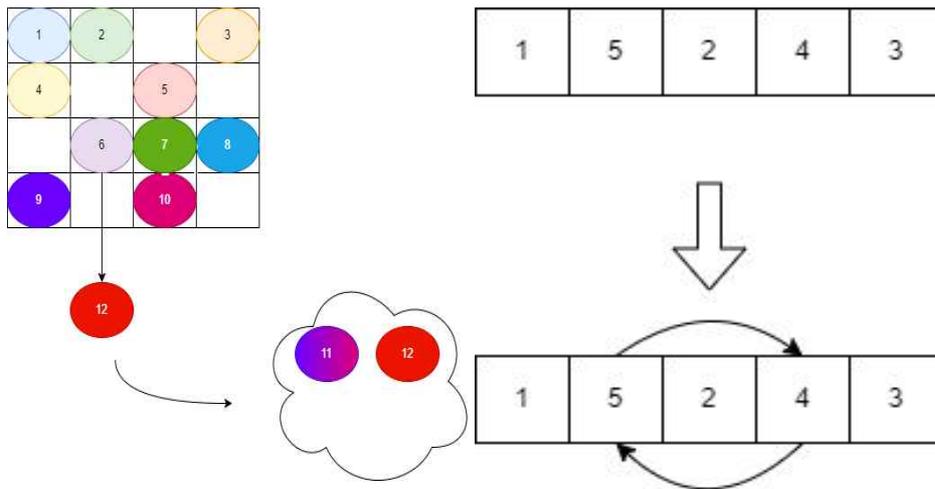


Figure 6. Brooding

5) 착상(Larvae setting)

앞의 모든 유성생식을 통해 만들어진 자식 산호들은 암초에 착상을 해야 살아갈 수 있는데, 새로운 산호들은 기존 암초의 임의의 위치에 다가간다. 만약 그 자리가 빈 자리일 경우 아무 조건 없이 착상되며 만약 그 위치에 이미 다른 산호가 존재한다면, 그 산호와 목적함수 값(물류이송거리)을 비교하여 새로운 산호의 값이 더 좋을 경우(더 낮은 물류이송거리를 가질 경우) 기존의 산호를 밀어내고 자리를 차지한다. 그러나 반대의 경우 몇 번의 과정을 반복한다(일반적으로 3회(Salcedo-Sanz et al., 2013)). 모든 암초위 자리를 한

번씩 돌아다니던 이후에도 착상하지 못한 자식 산호는 제거된다. <Figure 7>은 그 과정을 그림으로 표현했다. 초록색 산호는 기존에 있던 산호를 밀어내고 자리를 차지했으며 보라색 산호는 빈 자리를 찾아 착상했다. 빨간색 산호는 빈자리를 찾지 못하고 제거됐다.

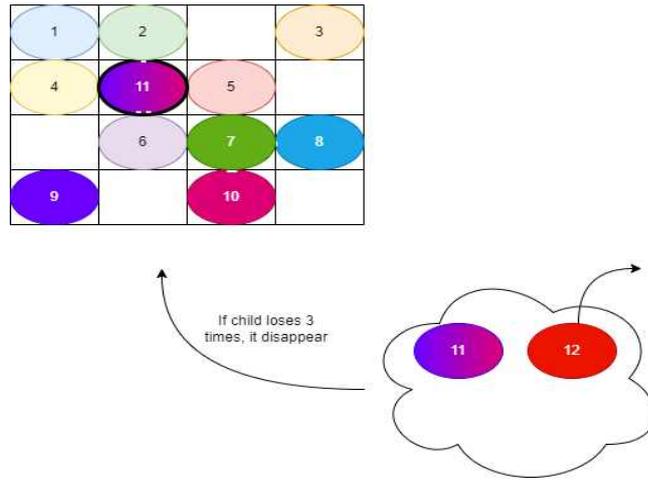


Figure 7. Larvae setting

6) 무성생식(Budding)

앞의 모든 과정을 끝내고 나면 암초는 부모 산호와 자식 산호, 둘연변이 산호가 섞여있는 형태다. 여기서 더욱 건강한 산호들만 다음 세대로 보내기 위해 산호는 자가복제를 한다. 모든 산호의 성능을 평가하여 목적함수 값에 따라 순위를 정하고 일정 비율(F_a)만큼 가장 건강한 산호를 복제한다. 그 후에 착상과정을 거쳐 암초에 들어오게 된다. 유성생식과의 차이점은 앞에서 생성된 자녀 산호는 자리를 찾지못해 죽을수도 있는 반면 복제된 산호는 가장 건강하기 때문에 무조건 착상이 된다. <Figure 8>는 가장 좋은 성능을 하진 하늘색 산호가 일부 복제되어 암초에 착상하는 과정을 보여준다.

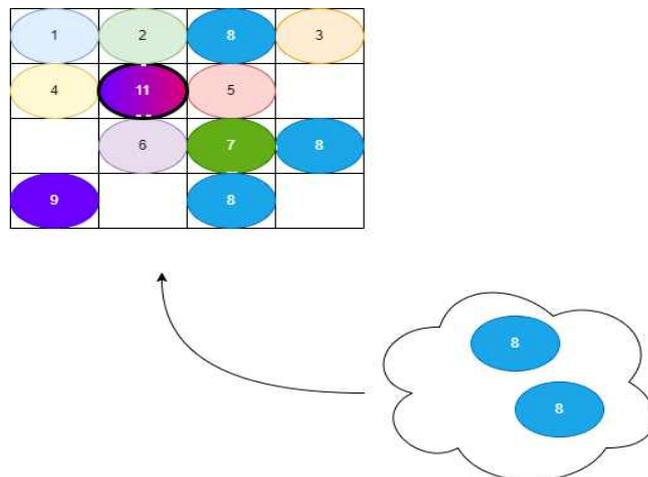


Figure 8. Budding

7) 퇴화(Depredation)

여기까지 알고리즘이 수행되면 암초에 존재하는 가장 나쁜 목적함수 값을 지닌 산호들은 매우 낮은 확률(P_d)로 따라 암초에서 제거된다. (P_d 는 0.1로 고정) 이때 제거될 산호를 고르는 방식은 무성생식과 마찬가지로 산호들을 목적함수 값이 따라 순위를 매긴 뒤 가장 나쁜 값을 가진 산호부터 순서대로 선택된다. 제거될 산호의 수는 매개변수 F_d 에 의해 결정된다(제거될 산호의 수 = 존재하는 산호의 수 $\times F_d$). <Figure 9>는 살구색 산호가 제거되는 모습을 보여준다. 제거되고 난 뒤의 빈공간은 다음 세대의 새로운 자식 산호를 위해 쓰인다. 정리하면 다양성을 위해 안좋은 해를 가진 산호도 다음 세대로 가져가지만 일정 확률에 따라 그런 산호들을 제거할 때도 있다. <Figure 10> 은 지금까지의 내용을 정리한 Coral reef optimization의 플로우차트이다. CRO의 Psuedo-code는 Algorithm1과 같다.

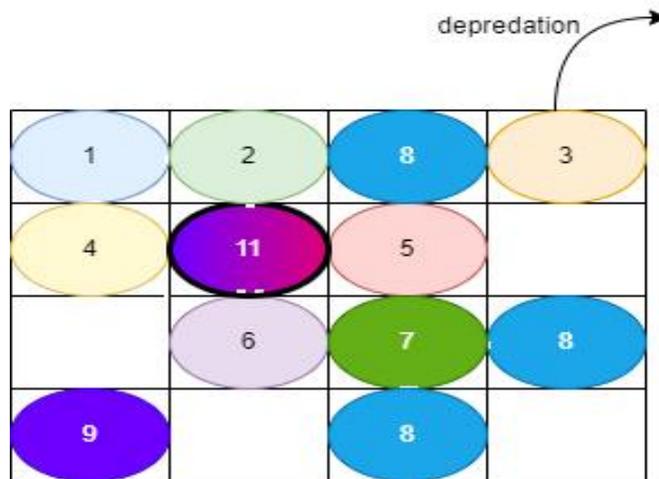


Figure 9. Depredation

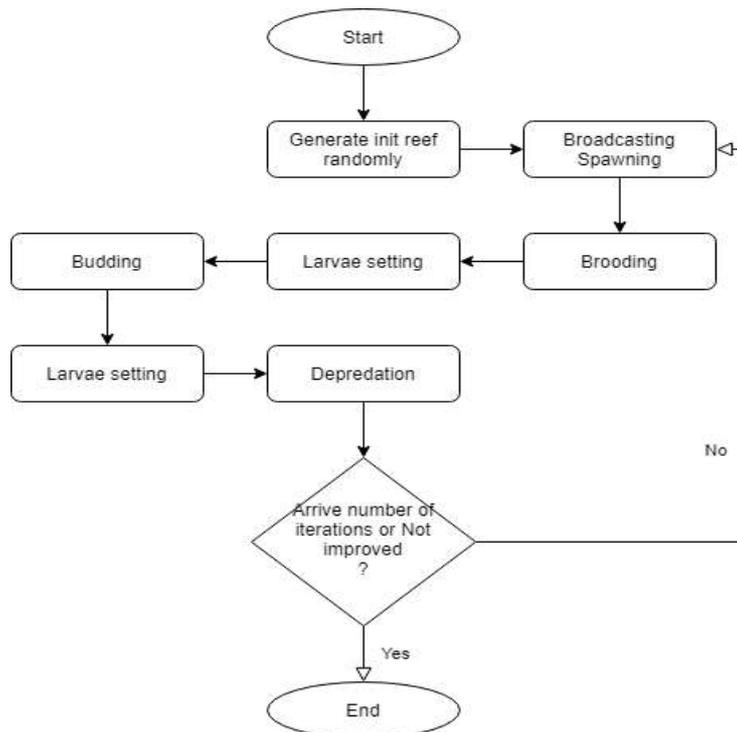


Figure 10. Flowchart of CRO

Algorithm 1 Psuedo-code of CRO

procedure CRO($N, M, iter_{max}, \rho_0, F_b, F_a, F_d, P_d$)**Initialize** set corals on coral reef with random position that equals to $\rho_0 \times N \times M$.

Evaluate initial population and select the one with the best fitness value.

while $iter \leq iter_{max}$ **or** $not_update \leq 1000$ **do** generate new corals fraction F_b by **broadcast spawning** generate new corals fraction $1-F_b$ by **brooding** **larvae setting** generate best corals fraction F_a by **asexual reproduction** **depredation** of F_d worst reef corals with probability P_d **for** each coral i **do** **if** $OFV_i > OFV_{best}$ **then** $not_update = not_update + 1$ **else** $not_update = 0$ **end for** **end while** **return** best feasible solution**end procedure**

2.3. 실험결과

이번 장에서는 UA-FLP를 STS 방식으로 해결한 기존의 연구들과 CRO의 결과를 비교한다. 코드는 JAVA로 작성되었으며, Intel Core i5 CPU(1.6 Ghz)와 8GB의 RAM, 그리고 Window 10 환경에서 실험하였다. 총 10개의 데이터셋을 이용했으며 이에 대한 정보는 <Table 1>에 정리되어 있다. 이 10개의 데이터셋은 UA-FLP 문제를 해결하기 위해 많은 연구자들이 실험을 하였는데 이 과정에서 주로 사용되어 온 데이터로 비교 가능한 정보를 제공하기에 이를 활용했다.

각각 이름, 블록 수, 공간 너비, 공간 길이, 가로세로 비율관계(Aspect ratio, α)이며 예외로 l_{min} 은 각 블록의 최소 길이를 뜻한다. 위의 문제들은 모두 블록들의 넓이 합계가 전체 면적과 동일하거나 거의 비슷한 문제이다.

본 연구는 CRO를 통해 각 문제의 물류이송거리를 최소로 만드는 배치를 찾고자 한다. 물류이송거리는 블록간 물동량 * 블록간 직각거리로 계산되는데 동일한 공간에 어떻게 배치하느냐에 따라 그 값이 크게 달라진다. 이때 목적함수를 총 물류이송거리로 하고 그 값이 낮을수록 더 좋은 배치라고 평가한다.

CRO는 매개변수의 값이 결과에 상당한 영향을 미친다. 따라서 적절한 매개변수를 결정해야 하는데, 본 연구에서는 통계프로그램 R의 irace 패키지를 이용하여 그 값을 결정했다. 우리 문제의 매개변수는 총 4개 (ρ_0, F_b, F_a, F_d)이고 그 값은 각각 (0.75, 0.53, 0.69, 0.54)이며 <Table 2>에 정리되어 있다. Grid Size는 각각 3번에 걸쳐 시행했는데 (4X4, 7X7, 10X10)가 그 값이다. Grid의 Size를 나눠 실험한 이유는 CRO는 Population-based algorithm이기 때문에 Pop의 크기에 따라서도 그 결과에 영향을 미치기 때문이다. 실험은 각 문제에 대해 50번씩 진행되었으며 1번의 실험당 총 50000번의 iteration을 진행하되 1000번 이상 Best Solution의 변화가 없으면 중단했다. Grid의 사이즈에 따른 실험 결과는 <Table 3>, <Table 4>, <Table 5>에 정리되어 있다.

Table 1. Problem specification

Problem name	# of Fac.	W * H	Aspect ratio	Reference
fO7	7	8.54×13.00	$\alpha_{\max} = 5$	(Meller et al., 1998)
fO8	8	11.31×13.00	$\alpha_{\max} = 5$	(Meller et al., 1998)
fO9	9	12.00×13.00	$\alpha_{\max} = 5$	(Meller et al., 1998)
O7	7	8.54×13.00	$\alpha_{\max} = 4$	(Meller et al., 1998)
O8	8	11.31×13.00	$\alpha_{\max} = 4$	(Meller et al., 1998)
O9	9	12.00×13.00	$\alpha_{\max} = 4$	(Meller et al., 1998)
vC10s	10	25.00×51.00	$l_{\min} = 5$	(Van Camp et al., 1991)
vC10a	10	25.00×51.00	$\alpha_{\max} = 5$	(Van Camp et al., 1991)
Nug12	12	3.00×4.00	$\alpha_{\max} = 5$	(Nugent et al., 1968)
AB20	20	3.00×2.00	$\alpha_{\max} = 4$	(Armour and Buffa, 1963)

Table 2. Parameter of CRO from R irace

<i>Parameters</i>	<i>Range</i>	<i>Best Value</i>	<i>Definition</i>
ρ_0	[0.1, 0.9]	0.75	Initial ratio of coral reef
F_b	[0.1, 0.9]	0.53	Fraction of broadcast spawning
F_a	[0.1, 0.9]	0.69	Fraction of asexual-reproduction
F_d	[0.1, 0.9]	0.54	Fraction of depredation

Table 3. Result of Gird(4X4)

Problem name	Best OFV	Mean OFV	Avg Process time(sec)
fO7	17.75	17.81	0.4
fO8	22.39	23.56	0.6
fO9	23.46	24.75	0.9
O7	131.69	132.89	0.2
O8	243.14	247.20	0.2
O9	239.06	247.13	0.2
vC10s	21684.5	22968.23	0.3
vC10a	19468.48	20446.90	0.3
Nug12	257.5	261.54	0.4
AB20	5333.21	6082.73	1.3

* Bold numbers are same as best known OFV

Table 4. Result of Grid(7X7)

Problem name	Best OFV	Mean OFV	Avg Process time(sec)
fO7	17.75	17.81	0.6
fO8	22.39	23.33	0.4
fO9	23.46	24.65	0.3
O7	131.69	132.89	0.2
O8	243.14	247.48	0.2
O9	239.06	244.93	0.3
vC10s	20915.71	22816.91	0.3
vC10a	18522.79	20410.44	0.3
Nug12	257.5	262.86	0.3
AB20	5533.8	6021.19	1.3

* Bold numbers are same as best known OFV

Table 5. Result of Grid(10X10)

Problem name	Best OFV	Mean OFV	Avg Process time(sec)
fO7	17.75	17.83	0.7
fO8	22.39	23.53	0.3
fO9	23.46	24.60	0.3
O7	131.69	132.90	0.4
O8	243.14	247.09	0.3
O9	239.06	246.76	0.3
vC10s	22126.68	22906.28	0.3
vC10a	18522.79	20488.19	0.3
Nug12	257.5	264.21	0.4
AB20	5505.25	6010.15	1.4

* Bold numbers are same as best known OFV

2.3.1. 문제 해결 : 블록의 넓이 총합 = 전체 공간 넓이

O7, O8, O9, fO9, vC10a, vC10s, Nug12, AB20은 블록의 총넓이 합이 전체 공간의 넓이와 정확하게 일치한다. 즉, 주어진 문제에 빈 공간이 없다는 뜻이다. fO7~8 은 약간의 빈 공간이 존재하지만 목적함수에 큰 영향을 줄 정도는 아니고 그 값이 미비하기 때문에 별도의 더미변수는 사용하지 않았다.

vC10 문제는 조건에 따라 vC10a 와 vC10s 로 나뉜다. vC10a는 aspect ratio 조건이 존재하며 반대로 vC10s는 모든 블록에 대해 최소길이(l_{min}) 조건이 존재한다. AB20문제는 Armour and Buffa(1963)가 사용한 비대칭 flow matrix를 갖고 있다. 나머지 모든 문제는 대칭 flow matrix를 사용한다.

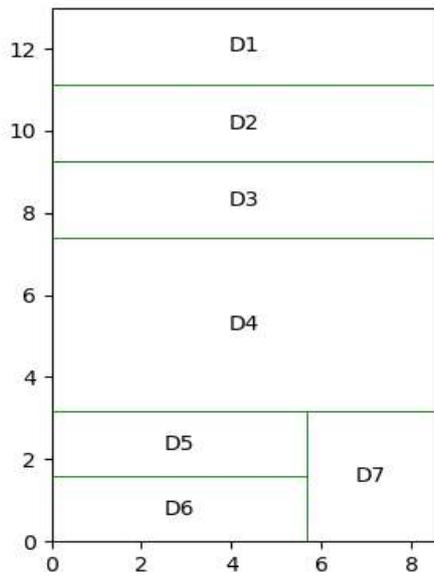
알고리즘의 적용성을 확인하기 위해 최적값과의 비교를 기본으로 한다. 다만 최적값이 알려져 있지 않은 경우 이전에 유사한 연구를 한 결과와의 비교를 통해 적용성을 평가하였다. 비교군은 3개의 그룹으로 나뉜다.(수학적 방법, 메타휴리스틱, 하이브리드) 수학적 방법의 경우 Castillo et al.(2005)가 쓰였고 메타휴리스틱의 경우 Goncalves and Resende(2015) 와 Komarudin and Wong(2010), Kulturel-Konak and Konak(2011b), Scholz et al.(2009)가 사용되었다. 마지막으로 하이브리드 방법은 Chang and Ku(2013)이 사용되었다. 결과는 <Table 6>에 정리되어있다.

보통 10개 미만의 블록을 배치하는 문제를 low size problem이라 한다. CRO는 다른 알고리즘과 마찬가지로 low size problem은 큰 무리없이 해결한다. 그러나 몇몇 문제의 경우 최적값에 도달하지 못했다.(O9) 30개 이하의 medium size problem에서는 vC10s와 AB20에서는 좋은 값을 도출하지 못했다. 그러나 전부 현재 가장 잘 알려진 값과 차이가 10% 미만이고 그간의 연구들보다 좋은 값인 경우도 있기 때문에 의미가 없다고 할 수는 없다. Grid size 차이에 따른 실험 결과를 <Table 2>, <Table 3>, <Table 4>에 정리했는데 그 결과를 살펴보면 사이즈가 클수록 평균 목적함수 값이 좋아진다. 일반적으로 Population-based algorithm은 Pop의 크기가 커질수록 한 세대에 해가 가질 수 있는 다양성이 커져서 더 좋은 결과를 보인다. 실제로 AB20의 실험결과를 살펴보면 Grid의 크기가 클수록 평균 OFV값이 낮아졌다. 큰 사이즈의 문제일수록 평균값이 차이나는 것으로 보아 추후 연구에서 Large size problem을 다룰 시 Grid의 크기를 키워야할 것이다. 또한 우리 연구의 가장 큰 장점은 그 수행시간에 있다. 상대적으로 열악한 실험환경에서 AB20 문제의 경우 Kang and Chae(2017)는 44.51초가 걸렸으며 같은 알고리즘을 사용한 연구인 Salcedo-Sanz et al.(2019)는 202초가 걸렸다(문제는 동일하지만 해결방식은 다름. 이전 연구는 FBS, 우리 연구는 STS를 사용함). 그에 반해 <Table 2>, <Table 3>, <Table 4>를 보면 위 방법으로는 평균 1.3초가 걸린다. 해의 성능이 시간에 비례하는 휴리스틱 방법의 특성상 위 결과는 의미가 있다. large size problem의 경우 그 시간이 더욱 단축될 것이다. 몇몇 문제에서 좋은 값이 나오지 못하는 이유는 빠르게 수렴해서이다. 따라서 추후 연구는 수렴을 천천히 하며 다양성을 늘리는 과정이 관건이 될 것이다. 각 문제의 평면 배치도는 <Figure 11> ~ <Figure 15> 에 나타나있다.

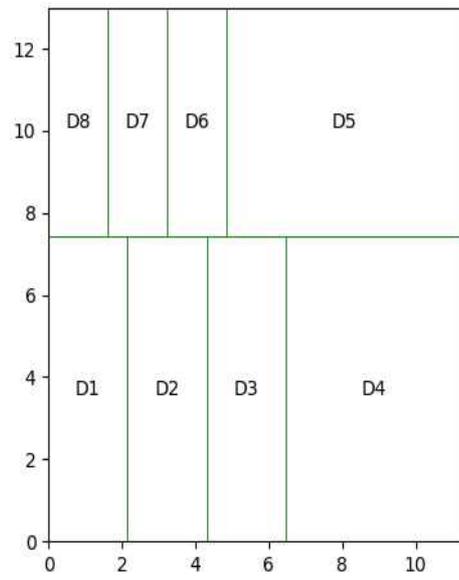
Table 6. Summary of the result with our approach

Research	Castillo et al., 2005	Scholz et al., 2009	Komarudin and Wong, 2010	Kulturel-Konak and Konak, 2010	Goncalves and Resnede, 2015	Chang and Ku, 2013	Kang and Chae, 2017	This approach 2021
Methodology	MILP	Tabu-Search	Ant Colony Optimization	Probabilistic Tabu Search	Biased random-key GA	QCP model based-Improved Harmony Search	Improved Harmony Search	CRO
Problem name	Best OFV							
f07	17.75						17.75	17.75
f08	22.31						22.39	22.39
f09	23.46						23.46	23.46
O7	131.58	132.00	131.68		131.56		131.69	131.69
O8	242.93	243.16	243.12		242.92	243.18	243.13	243.13
O9	236.14	239.07	236.14		236.57	236.14	236.14	239.06
vC10s	21,297.98	19,994.10	19,967.60	22,899.65	19,951.17	20,770.89	19,973.66	20915.71
vC10a				20,142.13		19,465.77	18,522.79	18522.79
Nug12				275.50			275.50	275.50
AB20		5225.96	4972.56	5336.36	5021.17	5151.86	4959.11	5333.21

* Bold numbers are same as best known OFV

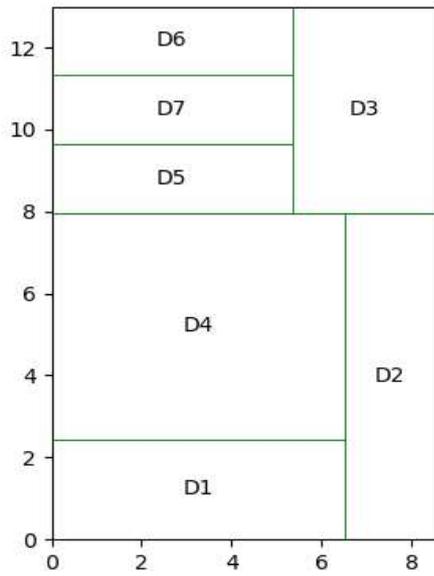


(a) fO7(OFV = 17.75)

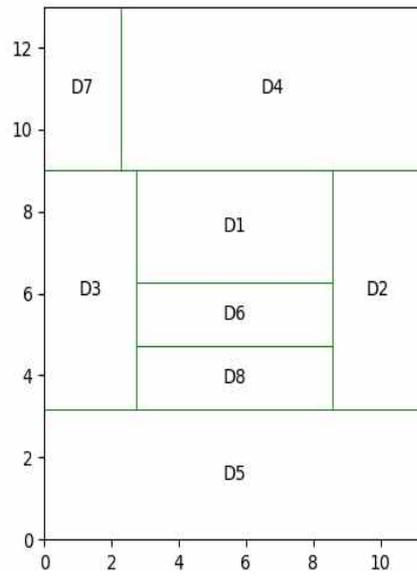


(b) fO8(OFV = 22.39)

Figure 11. Layout Configuration generated by CRO

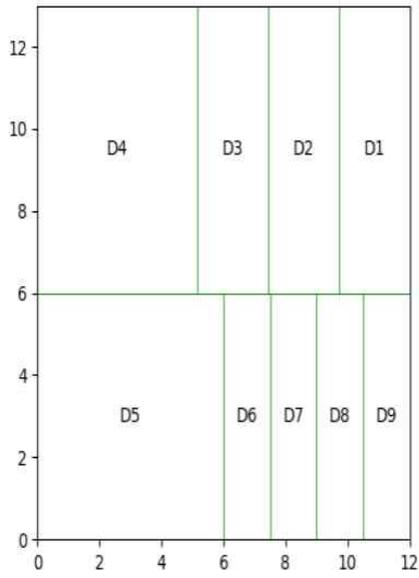


(a) O7(OFV = 131.69)

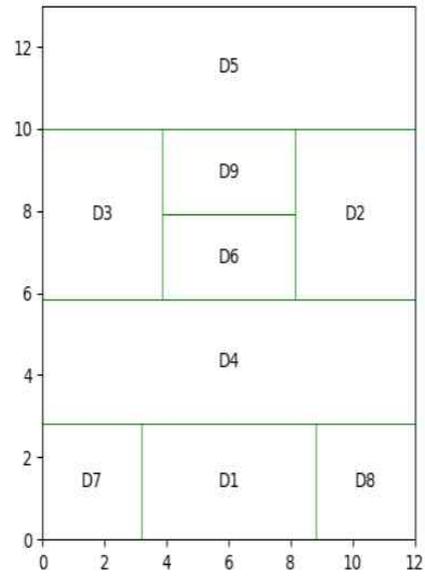


(b) O8(OFV = 243.13)

Figure 12. Layout Configuration generated by CRO

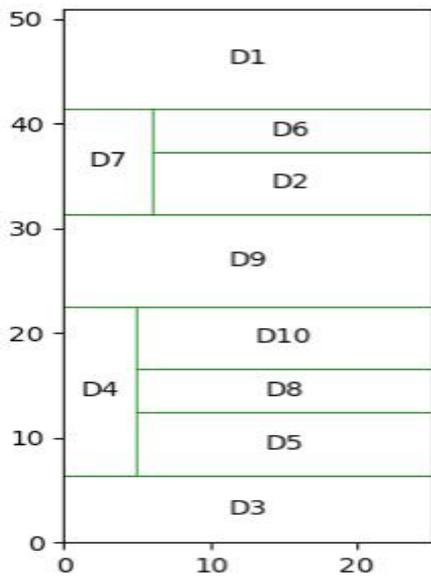


(a) fO9(OFV = 23.46)

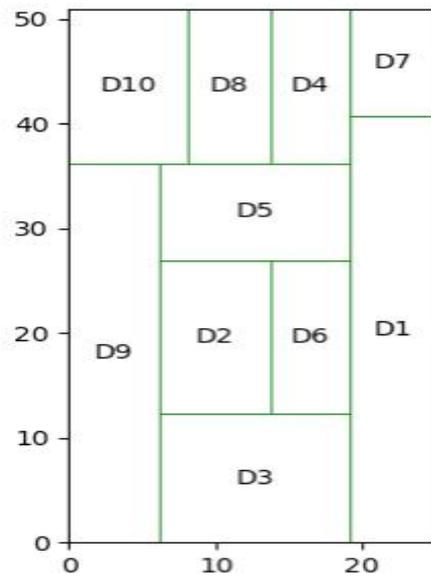


(b) O9(OFV = 239.06)

Figure 13. Layout Configuration generated by CRO

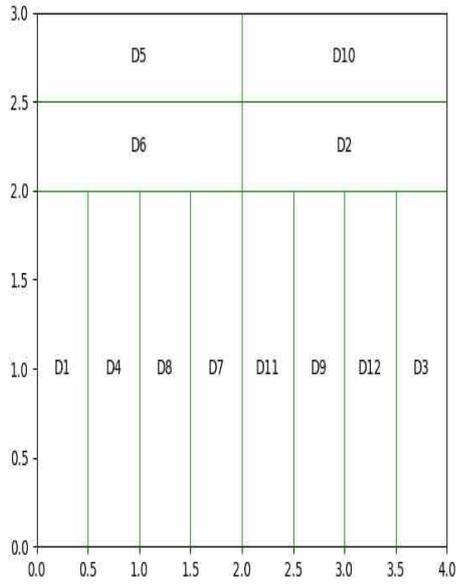


(a) vC10a(OFV = 18522.79)

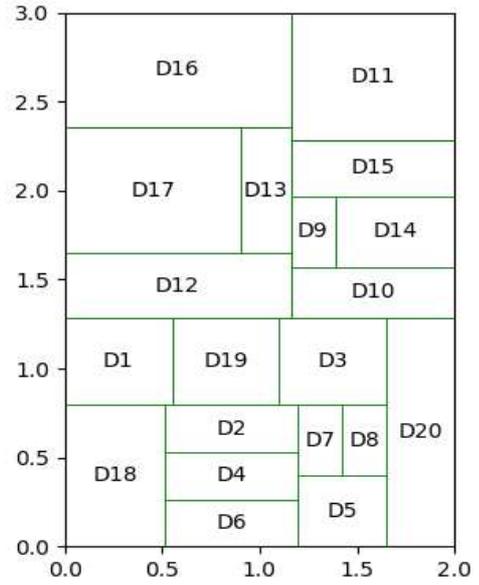


(b) vC10s(OFV = 20915.71)

Figure 14. Layout Configuration generated by CRO



(a) Nug12(OFV = 257.50)



(b) AB20(OFV = 5333.21)

Figure 15. Layout Configuration generated by CRO

3. 결론

본 연구는 STS를 기본으로 하여 산호초 최적화(CRO)를 UA-FLP에 적용 가능한지에 대한 평가를 수행했다. 제안된 CRO는 참고자료에서 추출한 10개의 데이터에 적용되었으며 그 성능은 1. 최적해가 알려져 있는 경우 이에 대한 비교, 2. 최적해가 알려져 있지 않은 경우 최근 연구자의 결과와 비교를 통해 분석되었다. CRO 알고리즘은 실험한 문제의 대부분 좋은 해를 도출했고(10개 중 7개의 최적해) 알려진 최선의 해에 도달하지 못하는 경우도 있었지만 비교적 빠르게 그 해를 찾는 것을 확인했다. 현재의 CRO는 초기 설계자의 기본 형태를 그대로 적용하여 UA-FLP에 활용 가능한지를 분석한 것인데 몇몇 문제를 잘 해결하는 것으로 보아 적용이 가능한 것으로 보인다. 다만 수행 시간에 관한 문제가 남아있다. 수행 시간이 빠르다는 것은 수렴도와 연관이 있다. 사이즈가 작은 문제의 경우 많은 iteration을 거치지 않더라도 최적해가 나올 수 있는 반면, 사이즈가 큰 문제에서는 충분한 횟수의 iteration이 진행되기 전에 수렴해 지역 해에 빠져 알고리즘이 종료된다. 따라서 이후에는 알고리즘 자체의 변화를 통해 UA-FLP에 맞는 형태로 변화시켜 수렴 속도를 줄이는 방향으로 진행해야 한다. 그 이후에는 변형된 형태의 CRO(Modified CRO) 연구로 더 큰 문제에도 적용 가능하도록 하는 것이 추후의 연구 방향이 될 것이다.

참고문헌

- Aiello, G., Enea, M., & Galante, G. (2006). A multi-objective approach to facility layout problem by genetic search algorithm and Electre method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(5-6), 447-455.
- Anjos, M. F., & Vieira, M. V. C. (2017). Mathematical optimization approaches for facility layout problems: The state-of-the-art and future research directions. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 261, Issue 1).
- Bermejo, E., Chica, M., Damas, S., Salcedo-Sanz, S., & Cordón, O. (2018). Coral Reef Optimization with substrate layers for medical Image Registration. *Swarm and Evolutionary Computation*, 42.
- Gordon C, & Elwood, A. ! (1963). A Heuristic Algorithm and simulation approach to relative location of facilities - Combinatorial Difficulty of the Problem. *Management Science*, 9(2).
- Azadivar, F., & Wang, J. (2000). Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. *International Journal of Production Research*, 38(17).
- Camacho-Gómez, C., Wang, X., Pereira, E., Díaz, I. M., & Salcedo-Sanz, S. (2018). Active vibration control design using the Coral Reefs Optimization with Substrate Layer algorithm. *Engineering Structures*, 157.
- Castillo, I., & Westerlund, T. (2005). An ϵ -accurate model for optimal unequal-area block layout design. *Computers and Operations Research*, 32(3).
- Chae, J., & Regan, A. C. (2016). Layout design problems with heterogeneous area constraints. *Computers and Industrial Engineering*, 102.
- Drira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2007). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 31(2).
- Durán-Rosal, A. M., Gutiérrez, P. A., Salcedo-Sanz, S., & Hervás-Martínez, C. (2018). A statistically-driven Coral Reef Optimization algorithm for optimal size reduction of time series. *Applied Soft Computing Journal*, 63.
- Enea, M., Galante, G., & Panascia, E. (2005). The facility layout problem approached using a fuzzy model and a genetic search. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16(3).
- Garcia-Hernandez, L., Arauzo-Azofra, A., Salas-Morera, L., Pierreval, H., & Corchado, E. (2013). Recycling Plants Layout Design by Means of an Interactive Genetic Algorithm. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 19(3).
- Garcia-Hernandez, L., Salas-Morera, L., Garcia-Hernandez, J. A., Salcedo-Sanz, S., & Valente de Oliveira, J. (2019). Applying the coral reefs optimization algorithm for solving unequal area facility layout problems. *Expert Systems with Applications*, 138.
- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. v. (2001). A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. *Simulation*, 76(2).
- Goldberg, D. E., & Lingle, R. (1998). Alleles, loci. and the traveling salesman problem. In *Evolutionary Computation: The Fossil Record*.

- Gómez, A., Fernández, Q. I., de la Fuente García, D., & García, P. J. (2003). Using genetic algorithms to resolve layout problems in facilities where there are aisles. *International Journal of Production Economics*, 84(3).
- Gonçalves, J. F., & Resende, M. G. C. (2015). A biased random-key genetic algorithm for the unequal area facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 246(1).
- Hosseini-Nasab, H., Fereidouni, S., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Fakhrzad, M. B. (2018). Classification of facility layout problems: a review study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1-4).
- John, H. (1992). *Holland, Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor MI University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Kang, S., & Chae, J. (2017). Harmony search for the layout design of an unequal area facility. *Expert Systems with Applications*, 79.
- Komarudin, & Wong, K. Y. (2010). Applying Ant System for solving Unequal Area Facility Layout Problems. *European Journal of Operational Research*, 202(3).
- Konak, A., Kulturel-Konak, S., Norman, B. A., & Smith, A. E. (2006). A new mixed integer programming formulation for facility layout design using flexible bays. *Operations Research Letters*, 34(6).
- Kouvelis, P., Kurawarwala, A. A., & Gutiérrez, G. J. (1992). Algorithms for robust single and multiple period layout planning for manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 63(2).
- Kulturel-Konak, S., & Konak, A. (2011). Unequal area flexible bay facility layout using ant colony optimisation. *International Journal of Production Research*, 49(7).
- Kulturel-Konak, S., & Konak, A. (2011). A new relaxed flexible bay structure representation and particle swarm optimization for the unequal area facility layout problem. *Engineering Optimization*, 43(12).
- Liu, J., & Liu, J. (2019). Applying multi-objective ant colony optimization algorithm for solving the unequal area facility layout problems. *Applied Soft Computing Journal*, 74.
- Liu, Q., & Meller, R. D. (2007). A sequence-pair representation and MIP-model-based heuristic for the facility layout problem with rectangular departments. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 39(4).
- Medeiros, I. G., Xavier, J. C., & Canuto, A. M. P. (2015). Applying the Coral Reefs Optimization algorithm to clustering problems. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2015-September.
- Meller, R. D., Narayanan, V., & Vance, P. H. (1998). Optimal facility layout design. *Operations Research Letters*, 23(3-5).
- Montreuil, B. (1991). *A Modelling Framework for Integrating Layout Design and flow Network Design*.
- Paes, F. G., Pessoa, A. A., & Vidal, T. (2017). A hybrid genetic algorithm with decomposition phases for the Unequal Area Facility Layout Problem. *European Journal of Operational Research*, 256(3).
- Palomo-Romero, J. M., Salas-Morera, L., & García-Hernández, L. (2017). An island model genetic

- algorithm for unequal area facility layout problems. *Expert Systems with Applications*, 68.
- Purnomo, M. R. A., & Wiwoho, Y. S. (2016). Multi-objective Mixed Integer Programming approach for facility layout design by considering closeness ratings, material handling, and re-layout cost. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 105(1).
- Salcedo-Sanz, S., del Ser, J., Landa-Torres, I., Gil-López, S., & Portilla-Figueras, J. A. (2014). The Coral Reefs Optimization Algorithm: A Novel Metaheuristic for Efficiently Solving Optimization Problems. *Scientific World Journal*, 2014.
- Salcedo-Sanz, S., Camacho-Gómez, C., Magdaleno, A., Pereira, E., & Lorenzana, A. (2017). Structures vibration control via Tuned Mass Dampers using a co-evolution Coral Reefs Optimization algorithm. *Journal of Sound and Vibration*, 393.
- Saraswat, A., Venkatadri, U., & Castillo, I. (2015). A framework for multi-objective facility layout design. *Computers and Industrial Engineering*, 90.
- Scholz, D., Petrick, A., & Domschke, W. (2009). STaTS: A Slicing Tree and Tabu Search based heuristic for the unequal area facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 197(1).
- Shayan, E., & Chittilappilly, A. (2004). Genetic algorithm for facilities layout problems based on slicing tree structure. *International Journal of Production Research*, 42(19).
- Sherali, H. D., Fraticelli, B. M. P., & Meller, R. D. (2003). Enhanced model formulations for optimal facility layout. *Operations Research*, 51(4).
- Sikaroudi, A. M. E., & Shahanaghi, K. (2016). Facility layout by collision detection and force exertion heuristics. *Journal of Manufacturing Systems*, 41.
- Tam, K. Y. (1992). A simulated annealing algorithm for allocating space to manufacturing cells. *International Journal of Production Research*, 30(1).
- Tate, D. M., & Smith, A. E. (1995). Unequal-area facility layout by genetic search. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 27(4).
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2011). *Facilities planning - 4th edition*. *International Journal of Production Research*, 49(24).
- Ulutas, B. H., & Kulturel-Konak, S. (2013). Assessing hypermutation operators of a clonal selection algorithm for the unequal area facility layout problem. *Engineering Optimization*, 45(3).
- Wong, K. Y., & Komarudin. (2010). Solving facility layout problems using Flexible Bay Structure representation and Ant System algorithm. *Expert Systems with Applications*, 37(7).
- Wu, Y., & Appleton, E. (2002). The optimisation of block layout and aisle structure by a genetic algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, 41(4).
- Yan, C., Ma, J., Luo, H., & Patel, A. (2019). Hybrid binary Coral Reefs Optimization algorithm with Simulated Annealing for Feature Selection in high-dimensional biomedical datasets. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 184.
- Yang, Z., Zhang, T., & Zhang, D. (2016). A novel algorithm with differential evolution and coral reef optimization for extreme learning machine training. *Cognitive Neurodynamics*, 10(1).

뉴노멀 시대에 대응하는 디지털 생활물류 공동 플랫폼 활용 제안

임승찬, 박진희[†]

한국해양대학교 물류·환경·도시인프라공학부 물류시스템공학전공

Proposal to utilize a joint platform for digital life logistics in response to the new normal era

Seungchan Lim, Jinhee Park

Engineering of Logistics Department, Korea Maritime and Ocean University

The advent of the COVID-19 crisis brought dramatic changes in our cities. As the contactless society becomes commonplace in the New Normal era, further expansion of the e-commerce business is highly predicted. Despite the high demand in the e-commerce market, logistic companies have been unable to offer flexible last-mile services due to excessive competition and the domination of the last-mile market by some of the major companies. This study aims to propose a joint digital life logistics platform system in response to the new normal era to alleviate excessive competition and improve inefficient last-mile services of blue-chip companies by studying the feasibility for joint life logistics through case analysis. An operation plan for the digital urban life logistics joint platform was suggested to improve the quality of last-mile services and seek solutions to the joint logistics by balancing competition and collaboration among logistics service providers.

Keywords: New Normal era, Joint logistics, life logistics, Platform, Case analysis

논문접수일 : 2021.10.12.

심사완료일 : 2022.06.23.

게재확정일 : 2022.06.24.

[†] Corresponding Author: jinheep@kmou.ac.kr

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

세계보건기구(WHO)는 2020년 3월 11일 COVID-19를 팬데믹(Pandemic)으로 공식적으로 선언하였다. 정보통신기술 발전, 안전하고 편리한 결제 시스템, 코로나19 장기화로 인한 비대면(Un-tact) 사회 형성 등으로 인하여 전자상거래는 글로벌 소매유통시장의 핵심 유통채널로 자리를 잡고 있다. 자국 시장뿐만 아니라 국가 간 전자 플랫폼과 크로스보더(Cross-border) 전자상거래가 활성화되고 있다. 아마존, 알리바바와 같은 다국적 기업은 해외 거점별 글로벌 전자상거래 물류센터(GDC: Global Distribution Center) 운영 확대를 하며 무인 운송 등과 같이 글로벌 전자상거래 소비자의 고도화된 니즈(Needs) 충족을 위해 차별화된 서비스를 제공하고 있다.

2020년 국가별 온라인 소매 판매 동향 기준 한국의 온라인 소매 비중은 25.9%로 가장 높은 비중을 차지하고 있다(<Table 1> 참조). 이처럼 비대면 수요 증가로 인하여 온라인 쇼핑 거래액은 급증하였고, 언택트 사회가 뉴노멀(New Normal) 시대에 일상화되면서 전자상거래 비즈니스의 규모는 지속해서 성장을 기대하고 있다.

Table 1. Online retail sales, selected economies(2018-2020)

(단위 : \$ billions, %)

Economy	Retail sales			Online retail sales			Online share(%)		
	2018	2019	2020	2018	2019	2020	2018	2019	2020
Australia	239	229	242	13.5	14.4	22.9	5.6	6.3	9.5
Canada	467	462	452	13.9	16.5	28.1	3.0	3.6	6.2
China	5,755	5,957	5,681	1,060.4	1,233.6	1,414.3	18.4	20.7	24.9
Korea (Rep.)	423	406	403	76.8	84.3	104.4	18.2	20.8	25.9
Singapore	34	32	27	1.6	1.9	3.2	4.7	5.9	11.9
UK	565	564	560	84	89	130.6	14.9	15.8	23.3
US	5,269	5,452	5,638	519.6	598	791.7	9.9	11.0	14.0
Economies above	1821.7	1871.7	1857.6	252.8	291.1	356.5	10.7	12.0	16.5

source : UNCTAD. (2020), Estimate of global E-commerce 2019 and preliminary assesment of COVID-19 impact on online retail 2020, UNCTAD Technical Notes on ICT for Development, 18, p.1

1.2 연구 목적

뉴노멀 시대가 도래되면서 온라인 소비가 급증과 함께 생활물류의 수요는 높아진 가운데, 기업 간 불필요한 경쟁과 아울러 우량 기업의 지나친 시장 독점으로 인하여 물류·유통업체는 충분한 라스트마일 (Last-mile) 서비스를 제공하지 못하고 있다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 서울시 공용주택단지 지역 대상으로 사례 분석을 통해 플랫폼 도입의 타당성을 검토하여 우량 기업의 독점 완화 및 비효율적인 라스트마일 서비스를 개선하고자 디지털 생활물류 공동플랫폼 추진체계를 제안하는 데 목적이 있다.

1.3 연구 방법

본 연구는 Lim and Park.(2020)에서 연구하였던 Post-COVID-19에 대응하는 디지털 라스트마일 운송계획을 확장 연구하여 인구밀도가 가장 높은 서울시 M 아파트를 중심으로 정부차원에서 효율적인 도시물류정책 수립을 위하여 뉴노멀 시대를 대응하는 디지털 생활물류 공동플랫폼(DLP; Digital Last-mile Platform) 활용을 제안하였다. 생활물류 동향 분석을 통해 문제점을 시사하고 개선방안을 제안하였다. 생활물류 문제점의 개선방안으로 DLP의 구상안과 운용 방안을 제시하였다. 서울시의 대규모 공용주택단지인 강남구 대치동 M 아파트를 사례 분석 대상 지역으로 선정하였고, 시뮬레이션을 통해서 생활물류 공동플랫폼의 도입 전후를 비교하며 도입 효과를 실증적으로 검증하였다.

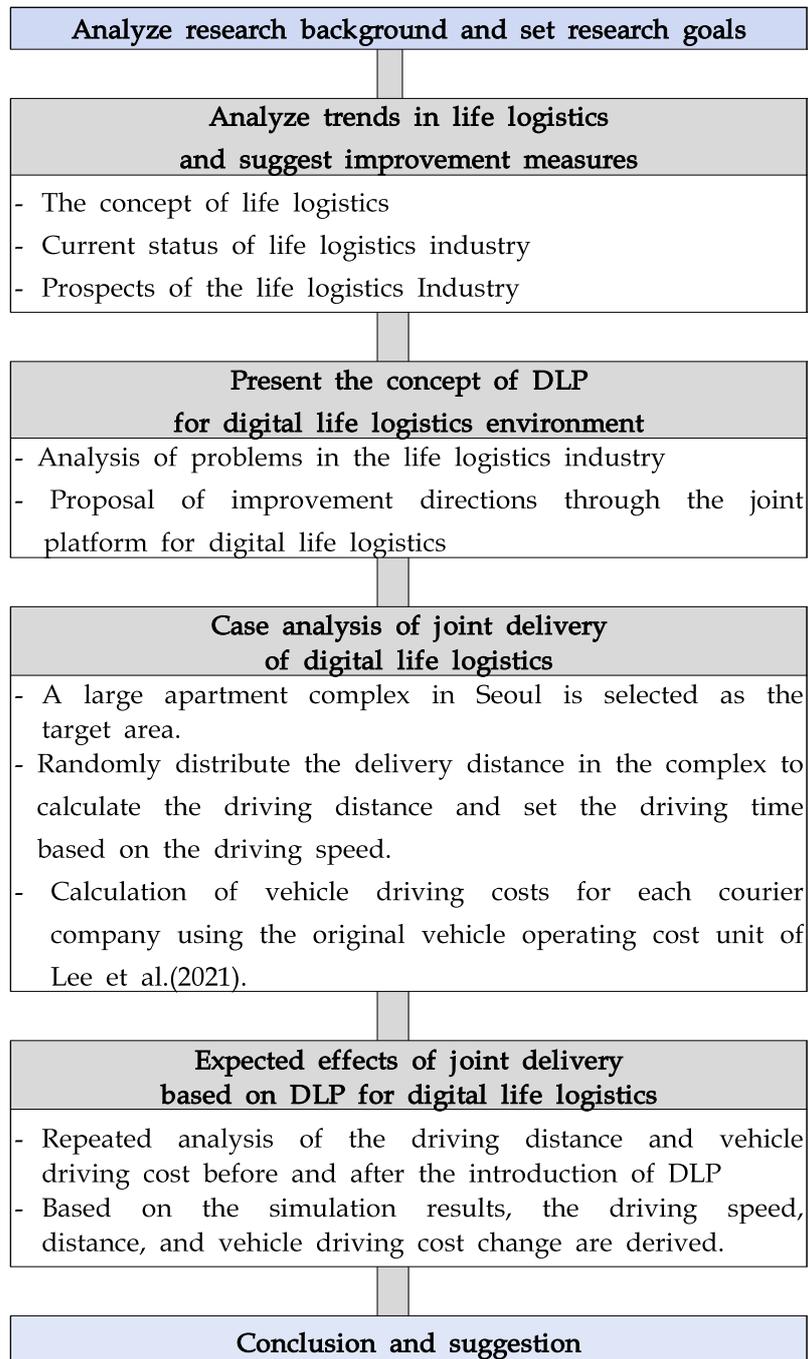


Figure 1. Research Flow

2. 생활물류 산업 현황 및 전망

2.1 생활물류의 개념

과거의 물류산업은 기업과 기업 사이에 이루어지는 단순 공급자 중심의 B2B(Business to Business) 물류 활동으로 오랜 기간 발전해 왔으며 제조업 지원의 비용 절감 중심으로 국한되어 있었다. 최근 소비자의 니즈 변화와 ICT 산업의 발전으로 물류서비스 만족도에 대한 요구가 향상되면서 기존의 기업 중심 물류활동은 소비자 중심 물류활동으로 중심축이 이동하였다. 「생활물류서비스산업발전법」에 따르면 생활물류란 소비자 주문에 따라 소형·경량 위주의 화물을 집화, 포장, 보관, 분류 등의 과정을 거쳐 배송하거나 정보통신 등을 활용하여 이를 중개하는 행위를 의미하며, 생활물류 시장의 범위는 택배, 배달대행, 쿠팡과 같은 라스트마일 서비스가 중심이 된다. 현대 생활물류 서비스의 개념은 과거 화주와 제조업 지원중심이 아닌 유통-물류-IT 등과 같이 산업 간에 유기적으로 융합되어 소비자와 종사자의 편의 개선을 위한 물류 서비스로 발전하였다. <Table 2>는 전통적인 물류와 현대 생활 물류의 차이를 나타낸다. 전통적인 물류는 기업과 기업 사이에 이루어지는 단순 공급자 중심의 B2B(Business to Business) 물류활동이며, 제조업 중심으로 중량 혹은 대량 화물 위주의 화물을 처리하여 비용절감에 국한되어 있다. 반면에 현대 생활물류란 소비자 주문에 따라 소형·경량 위주의 화물을 ICT 기술을 활용하여 배송을 진행하며 생활물류 시장의 범위로 택배, 배달대행, 쿠팡과 같은 라스트마일 서비스가 중심이 되고 있다.

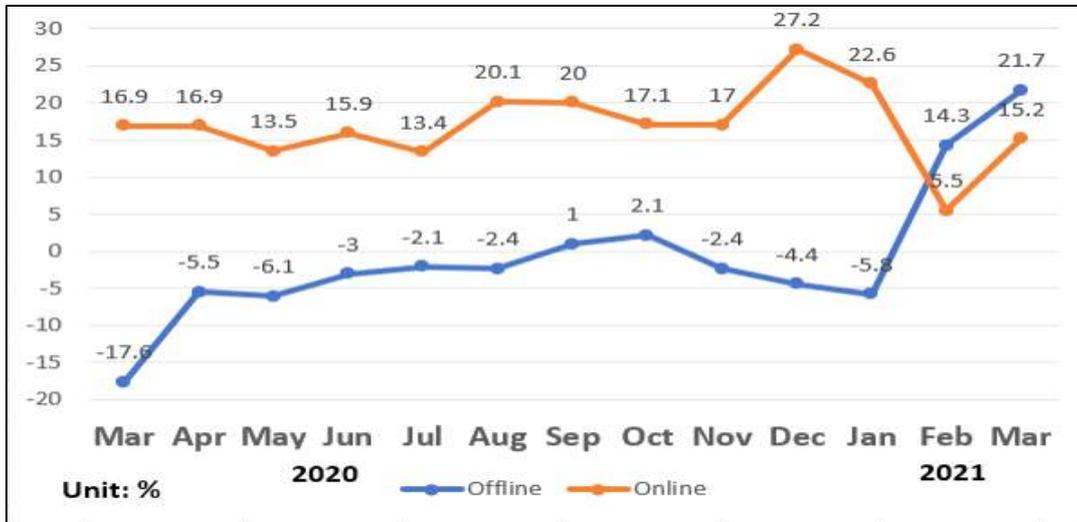
Table 2. A comparison between traditional and modern life logistics

Section	Traditional Logistics	Modern life logistics
Target	B2B, Shipper-oriented	B2C, Consumer life-oriented
Main objective	focusing on reducing production costs and supporting imports and exports	Focusing on improving customer service quality
Function	Divided functions distinctively centered on manufacturing	Integrated functions centered on consumer convenience
Size of Products	Medium and large-sized cargo	Small cargo
Technology/ Transportation	Labor-based/medium-sized trucks	ICT(IoT, AI, Big data, etc)-based/ Small truck, two-wheeled truck, a drone, etc

source : Kim J-H. (2020), Changes in the logistics industry and the life Logistics Service Act, National Assembly Debate Collection, p.9

2.2 생활물류산업 현황

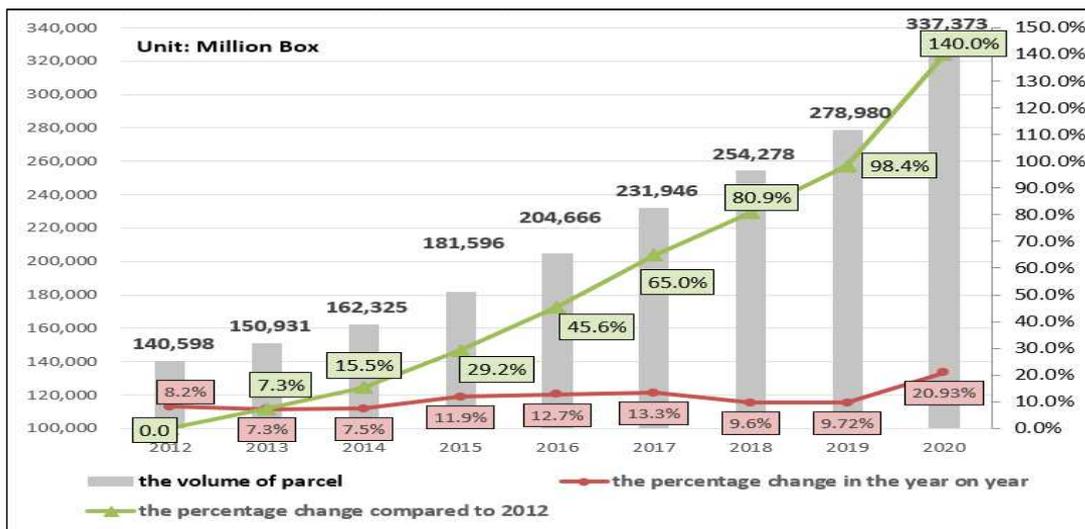
COVID-19 확산을 방지하기 위해 전 세계적으로 외출 제한 및 지역 봉쇄 등과 같은 조치로 사회적으로 분리되어 사람을 대면하지 않는 언택트 사회가 도래되면서 전반적인 생활물류 시장 규모는 점차 확대되고 있다. 이처럼 주문의 편리함과 다중 이용 시설의 기피 등으로 인해 소비자는 주요 오프라인 방문을 꺼려 기업의 매출이 위축되는 반면 온라인으로 제품을 구매하는 비중이 전년 대비 지속해서 증가하고 있다. 국내 주요 유통업체의 온라인과 오프라인 전년 동월대비 월별 매출 증감률을 나타낸 것이다. <Figure 2>는 2020년 COVID-19가 국내에 본격적으로 발생하면서 9월과 10월을 제외하고 오프라인 시장은 전년대비 부진한 것을 알 수 있다. 2021년도 2월과 3월은 전년 대비 증가하였지만, COVID-19의 기저효과와 함께 봄철 세일을 맞아 잠재적 소비가 표출되어 증가하였다고 고려된다. 반면에 온라인 유통업체의 매출액은 끊임없이 증가하는 추세를 나타내고 있다. 이를 통해 국내 온라인 유통업체와 택배 같은 도심 생활물류 수요가 증가하고 언택트 소비가 현대 사회에 일상화되고 있다는 것을 알 수 있다.



source: Kim H-S. and Kim M-S. (2020), Online shopping trend in 2021, Ministry of Trade, Industry and Energy, p.2, Korea

Figure 2. Comparison of the percentage change in the year on year sales of primary retailers

국내 온라인 쇼핑 시장의 성장으로 전자상거래와 밀접한 관계가 있는 택배 산업도 동반 성장할 수 있게 되었고, 코로나19가 장기화하면서 비대면 배송서비스의 수요는 지속해서 증가할 것으로 전망된다. 2020년 택배 시장은 지난 2012년 대비 취급물량은 140% 증가한 33억 7천만 개이고, 2019년(27억 9천 개) 대비 20.93% 성장하였다고 조사되었다(<Figure 3 참조>). 전자상거래와 택배업 성장 가운데 소비자 중심의 생활 물류 서비스가 더욱 고도화될 것이고, 앞으로도 일정 수준 이상은 성장할 것으로 전망된다.



source: KILA(Korea Integrated Logistics Association)(2021), Statistics of life Logistics, Korea

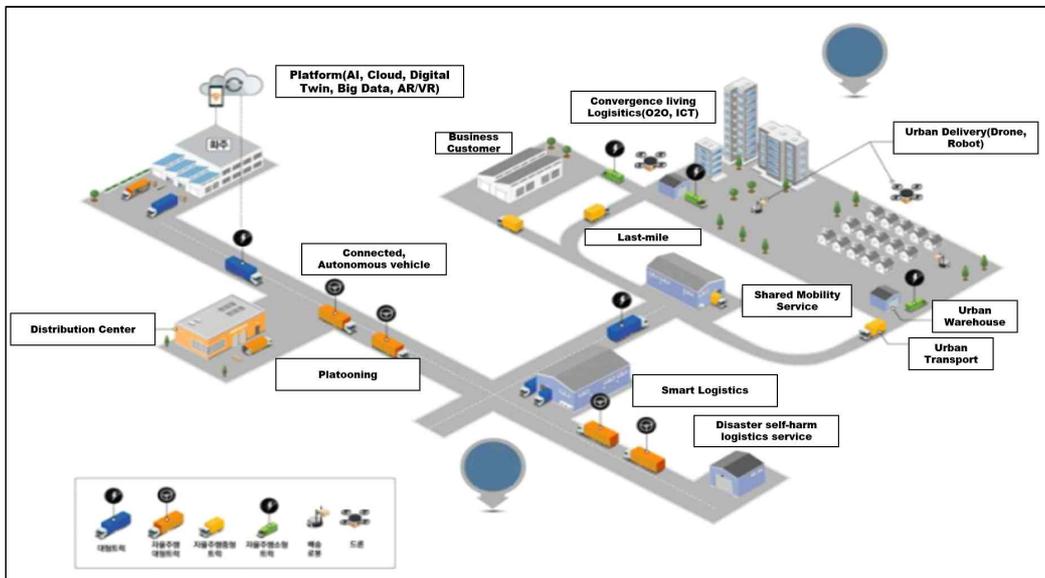
Figure 3. The trend of domestic parcel delivery

2.2 생활물류 산업의 전망

1) 생활물류의 빅블러(Big Blur) 시대

소비자가 요구하는 시간과 장소에서 차별화된 서비스를 제공하기 위해 이제 산업간 구분은 무의미해지는 빅블러(Big Blur) 시대로 도래하였다. 유통-물류-IT 등과 같이 산업 간의 유기적 융합으로 물류서비스의 혁신 및 새로운 시장의 창출이 전망된다. 이처럼 산업 장벽의 붕괴와 혁신 및 서비스 확대에 따라 생활물류 서비스의 질을 향상하기 위해 혁신기술 개발과 디지털 혁신을 활용하여 도시 배송 효율성을 제고시키고, 빅 데이터, IoT, 블록체인 등과 같은 첨단 ICT 기술을 기반으로 다양한 이해관계자와 정보 공유 및 수집을 통해 새로운 물류 체계를 구축해 나가고 있다.

정부는 이러한 생활물류의 흐름에 맞추어 디지털 물류체계를 구현해 교통혼잡, 안전사고, 등 도시물류의 문제를 해소하고자 '2021년 디지털 물류실증단지 조성 지원 사업'을 추진하고 있다(<Figure 4 참조>). 이 사업은 스마트 물류기술을 활용하여 혁신적인 생활물류 서비스를 제공하며, 신규 도시를 대상으로 물류계획 수립을 지원하는 데 목표를 두고 있다. 정부는 라스트마일 산업에 디지털을 활용하여 물류 솔루션을 제시하여 국민의 삶의 질을 향상하기 위해 스마트 물류체계를 조성하는 데 더욱 힘을 쏟을 것이다.



Annotation : The figure was edited by the present researcher for a translation.

source : Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021, The Ministry of Oceans and Fisheries has come up with a strategy to leap forward as a leading global logistics country in 2030, p.10

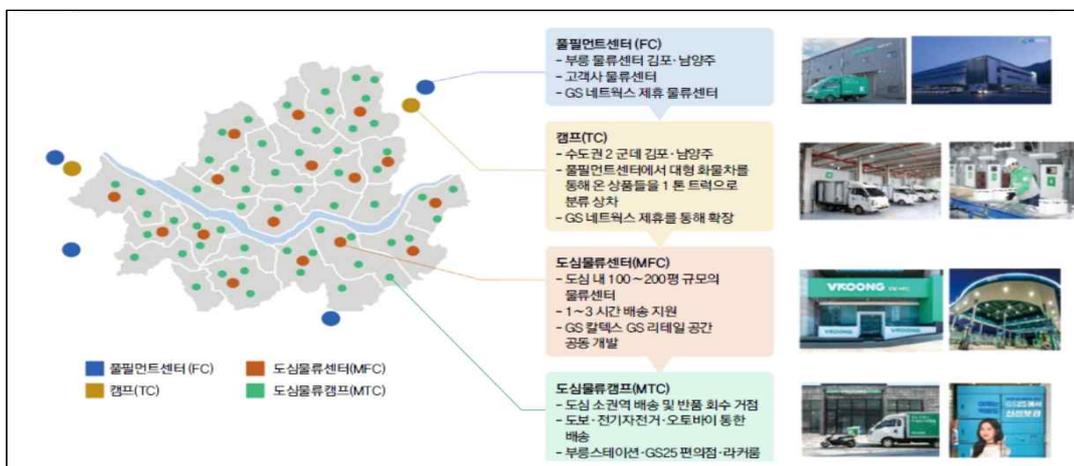
Figure 4. Resolution of digital logistics demonstration complex

2) 물류센터의 뉴노멀 시대

과거에 물류센터의 주된 기능은 상품이 입고, 보관, 출고되기까지의 과정을 관리하여 오프라인과 B2B 수요를 충족하였다. 즉, 대규모 화물이 한 번에 입고되고 재고로 장기간 보관되었다가 필요에 따라 간헐적인 출고 작업이 이루어졌었다. 정보통신기술 발달과 소비자 니즈의 다양화됨에 따라 전자상거래 시장이 급속도로 성장하였고, 물류 산업은 3PL(Third Party Logistics) 물류 시장에서 이커머스 시장으로 집중되고 있다. 이에 따라 물류센터는 단순 물류 대행 서비스가 아닌 B2C 수요를 맞추는 이커머스 특화된 풀필먼트(Fulfilment)로 진화되었고, 보관과 배송뿐만 아니라 IT 및 공급망(SCM) 통합 솔루션을 제공한다. 이를 통

해 전자상거래 판매자들은 다수의 마켓플레이스를 이용할 수 있고, 각각에서 발생하는 제품 정보를 취합하여 실시간 재고관리 및 상품의 입출고 관리를 가시화할 수 있게 되었다.

일반적으로 풀필먼트 서비스를 제공하기 위해 임대료가 저렴한 도시 외곽에 대형 물류센터를 구축하여 상품의 보관, 포장, 배송, 재고관리 등 종합 서비스(Total Service)를 제공하고 있지만, 더욱 빠른 서비스를 원하는 소비자가 증가하면서 제품을 신속하게 배송하기까지 한계를 내재하고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 인구가 밀집한 도심 속에서 소규모 풀필먼트센터를 구축해 판매자와 소비자에게 신속한 배송 및 밀접하게 연계하면서 고도화된 생활물류 시장의 경쟁력을 확보하고 있다. 이러한 도심형 생활물류 서비스를 제공하는 풀필먼트센터는 마이크로 풀필먼트센터(MFC, Micro Fulfilment Center)라고 칭한다. 종합 IT 물류기업인 메쉬코리아(Mesh Korea)는 도심물류의 노하우와 데이터를 기반으로 도심형 마이크로 풀필먼트센터를 국내에서 최초로 구축한 것이 대표적인 사례이다. 메쉬코리아의 마이크로 풀필먼트 센터는 고객사의 물량을 직매입하여 센터 내 재고로 직접 보관하고, 소비자 발주에 맞춰 개별 고객에게 신속하게 배송하는 모델이다. 메쉬코리아는 2021년 4월 강남 1호점을 시작으로, 동년 6월 송파에 2호점을 구축하였고, 연말까지 수도권 내에 50여곳으로 추가로 확대할 예정이다.



source: Jnag J-Y. (2021), The strategies of Mesh Korea as an urban logistics technology company(<https://dbr.donga.com>)

Figure 5. Mesh Korea's Logistics network

3) 위드 코로나(With Corona) 시대의 차별화된 라스트마일 무인운송

뉴노멀 시대에 도입하면서 물류·유통 업계에서 과거 어느 때보다 생활물류에 밀접한 라스트마일 배송이 주목받고 있다. 본래 라스트마일이란 '범죄를 저지른 사형수가 사형집행이 이루어지는 장소까지 걸어가는 길'을 의미한다. 이러한 어원이 물류·유통 업계에서 파생되어 배달과 전달을 의미인 'Delivery'를 포함하여 '여러 배송 단계 중 소비자를 최종적으로 만나는 마지막 배송'을 의미한다. 물류·유통업체는 라스트마일 delivery 단계에서 최종 소비자의 까다로운 요구를 충족시켜야 하는 방식으로 제품을 유연하게 공급하기 위하여 배송 리드타임 감축 및 서비스 품질을 높이는 것이 중요한 단계이다. 기하급수적으로 성장하는 생활물류 시장에 대응하기 위해서 단순 배송 서비스를 넘어 라스트마일 구간에 배송 로봇, 택배 드론, 자율주행차 등과 같은 스마트 무인운송이 상용화되고 있다. 기존의 물류 로봇은 공급망 중심인 창고 물류센터 내 무인운송 및 피킹(Picking)으로만 주로 활용되었으나 최근 글로벌기업 중심으로 라스트마일 배송에서 무인운송 활용이 확대되고 있다. 세계 라스트마일 무인배송 시장 규모는 2021년 119억달러에서 2030년 849억달러로 약 24%씩 증가할 것으로 전망된다. 현재 글로벌 생활물류 시장은 지속해서 성장세 유지하는 가운데 국내에는 아직 배송로봇 및 드론 택배가 시범단계에 머물러 있다. 올해 제정 및 시행된 「생활물류서비스발전법」에는 이륜차 또는 화물자동차 중심 운송 수단 규정에만 국한되었고, 현재까지 드론, 자율주행차,

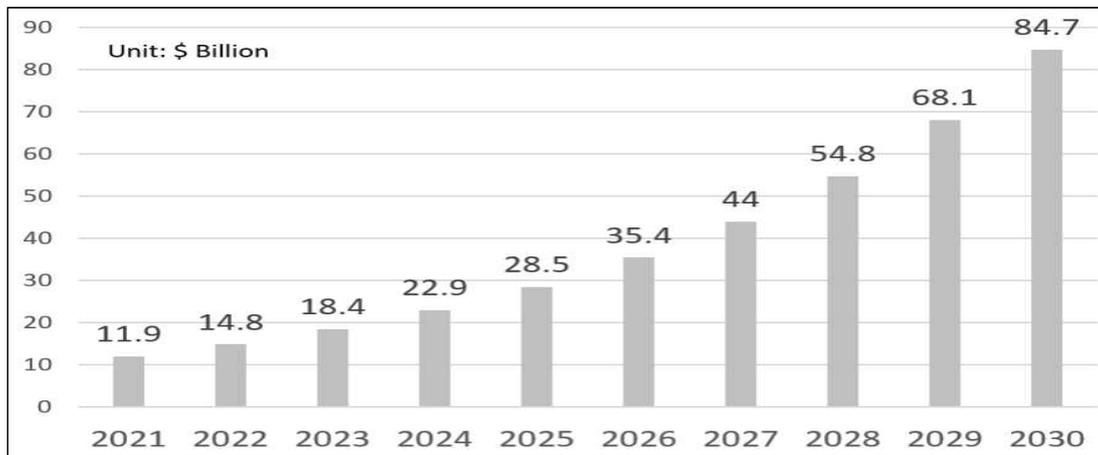
운송로봇 등과 같은 무인 운송수단 운영에 관한 법적 근거 마련이 미흡한 상태이다. 즉, 무인운송 라스트마일 서비스를 수행할 수 있는 물품의 중량 및 대상에 대한 운영 기준이 마련되어 있지 않다. 따라서 정부는 드론 배송과 자율형 배송로봇 상용화를 앞당기기 위해서 최근 시범 운행지역에 규제 개선 및 운영 계획 중이다. 선진국들의 도심지역 환경규제 및 배송 물동량 증가에 대응하기 위해서 국내 무인 운송산업은 지속해서 성장하고, 국내 시장에 조속히 운영될 수 있도록 제도적 준비를 하여 미래 물류·유통 산업의 패러다임 변화를 주도할 것이다.

Table 3. Projection of robot and drone global market

Unit: \$ Trillion

Section	2019	2025
Delivery Robot	1.2	22
Parcel Drone	< 0.01	36

Annotation : OMDIA(2020), Delivery Robots and Drones and Statista(2020) were cited.
 source: Shim H-J. (2021), A plan to strengthen the competitiveness of the high-tech delivery industry, Trade Brief, 9, p.3



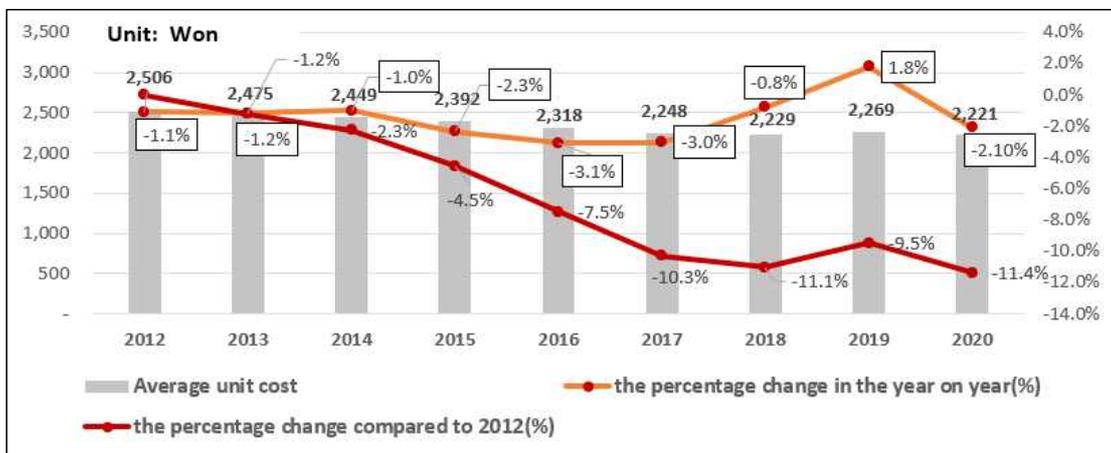
Annotation : Statista(2020) were cited.
 source: Shim H-J. (2021), A plan to strengthen the competitiveness of the high-tech delivery industry, Trade Brief, 9, p.3

Figure 6. Prospect of unmanned last mile delivery global market

3. 생활물류 산업의 문제점 및 개선 방향

3.1 생활물류 산업의 문제점 분석

뉴노멀 시대에 도래됨에 따라 물동량 증가로 인하여 라스트마일의 전반적인 시장 규모는 확대되고 있으나, 기업은 비효율적인 라스트마일 시스템으로 인해 유연한 물류 서비스를 제공하지 못하고 있다. 도심 물류에서 라스트마일의 비효율성은 택배 물류비 상승 및 국민 체감 서비스 품질을 감소시키고 있다(Heo et al., 2016). 이러한 대표적인 이유는 택배 물류 시장의 과도한 경쟁 구도로 인하여 차별화된 서비스 제공을 위해 박스당 택배 단가는 하락하고 치열한 가격 경쟁을 초래하기 때문이다. 수많은 택배업체의 출현으로 2019년에 택배 단가가 일시적으로 상승하였지만, 물가와 최저임금 상승에도 불구하고 2020년 다시 하락하였으며, 이는 단순 개인 사업자가 택배 단가를 상승하기에는 한계를 지니고 있다(<Figure 7> 참조). 즉, 택배 운임의 단가 하락 현상은 가격 중심의 경쟁 구도를 일으키고, 수익 악화 및 소비자에게 차별화된 서비스 부재를 고착하게 한다.



source: KILA(Korea Integrated Logistics Association). (2021), Statistics of life Logistics, Korea

Figure 7. Average unit cost of parcel delivery service in Korea

이러한 과도한 경쟁은 수확 체증의 법칙으로 대기업 택배 기업 또는 우량 업체의 독점을 초래한다. 즉, 점유율이 높은 강자 기업은 대규모 투자 및 인수합병을 통해 성장할 수 있지만, 규모의 경제를 확보하지 못한 중소 규모 업체 및 신생 기업은 경쟁력이 저하된다. 생활물류 시장에서 강자 업체의 라스트마일 사업자는 공급자와 수요자의 정보와 거래 정보를 독식하여 스타트업이나 중소 규모업체의 기업의 성장을 경감시킨다. 그뿐만 아니라 뛰어난 차별성을 보유한 후발 주자가 나오더라도 기존의 우량 대기업을 따라잡기 매우 어렵다. 2020년 CJ대한통운은 전체 택배 물동량 중 50.1% 비중을 차지하며 상위 5 택배사는 92%를 차지하면서 과점 체제는 심화하고 있다. 이러한 경쟁을 완화하기 위해 기업 간 전략적 제휴 및 협업하며 노력하고 있지만, 기업 전체의 이익을 추구하는 조종자 역할의 미흡 및 공유 경제 활용을 극대화하지 못하고 있다.

3.2 개선방향 제안

치열한 경쟁 구도와 배타적 운영으로 인한 비효율적인 라스트마일 시스템을 완화하기 위해 공유 경제를 추구하는 협력 시스템이 필요하다. 정부차원에서 물류 업체 간 배타적인 운영 완화와 라스트마일 영역에서 공유의 경제를 극대화하는 방안으로 보관 영역과 수·배송 영역의 공유 비즈니스 모델 구축하는 가운데 본 연구자는 생활물류 시장 내에서 개별기업 차원이 아닌 참여기업 전체의 이익을 추구하는 역할을 하는 DLP(Digital Last-mile Platform) 구축을 제안한다.

<Figure 8>은 ICT 기술을 기반으로 한 DLP를 통해 제시 가능한 디지털 라스트마일 서비스의 흐름도이다. 디지털 라스트마일 서비스 단계는 ① 물류·유통업체나 소비자는 DLP 이용자로서 배송 서비스를 요청하며 ② DLP에서는 자율주행 운송사와 연계하여 도심 인근 이용자 배송 거점에 자율주행 전기차를 자동 배차한다. ③ 배송 거점에서는 DLP에서 산출한 유사 품목들을 묶어서 공동 배송 서비스를 제공하여 ④ 플랫폼 운영자는 서비스 이후 사용자들의 서비스 만족도 및 플랫폼 로그(log) 정보를 수집하여 DLP 운영 개선 사항에 착안한다.

초기 DLP 구축 및 운영하는 주체는 정부로 시작하여 플랫폼 모델이 안정화될 시 운영 적합성 평가를 통해 운영 기업을 선정한다. 플랫폼 특성상 전반적으로 기업 전체 이익을 추구하는 공공성과 신뢰성을 보유해야 하는 주체가 필요하기 때문이다. 정부는 이러한 디지털 운송체계에 걸림돌이 없도록 환경을 조성해야 하고, 변화에 보수적인 다수 기업을 장려하기 위해 성공적인 선도 사례들에 대해 지원 및 정책을 제공해야 한다.

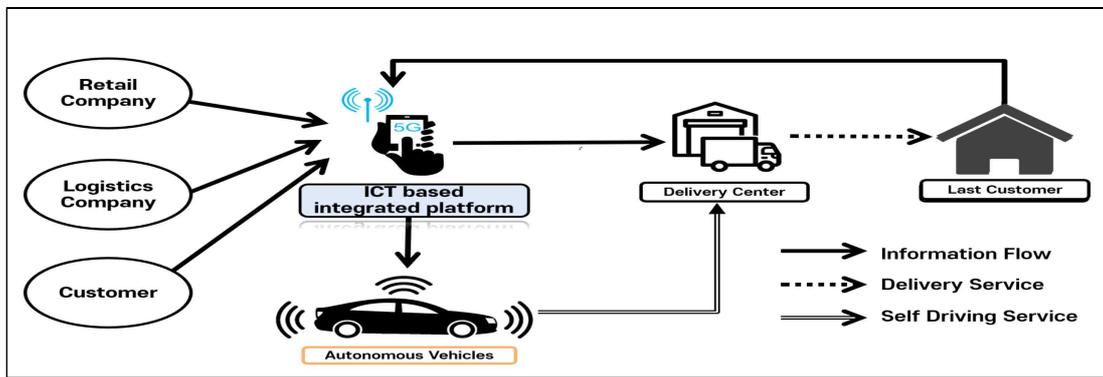


Figure 8. DLP digital service flow chart

DLP를 통해서 택배사에서 제품 운송의 발주와 동시에 데이터 센터에서는 인공지능(AI)과 머신러닝(Machine Learning)를 이용하여 제품 특성별과 발하주·착하주 특성별에 공통성 유무를 분류하고 특정 지역에 최적 운송 경로와 비용을 분석 및 평가한다. 데이터 센터에서는 통합된 정보를 다수의 독립된 정보로 분리하여 최적의 소비자 맞춤형 무인운송 경로(Trip planner)와 최적의 운송비용으로 의사결정을 한다. 이용자가 플랫폼으로 서비스 요청을 하면 플랫폼에서 소비자 맞춤형 무인운송 수단을 권고 후 목적지 인근 공동 물류센터에 무인운송 수단을 자동 배차 및 연결(TMS)한다. 즉, 플랫폼에서는 효율적인 물류 솔루션을 제시하여 언택트(Untact) 주문 관리 시스템(OMS), 전자계산서, 전자인수증 등을 디지털화한다.

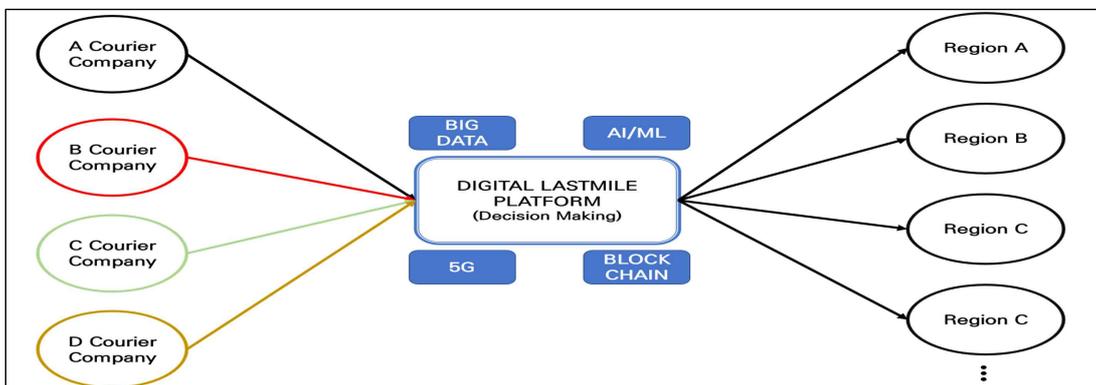


Figure 9. The conceptual diagram of the joint platform for life logistics

<Figure 10>은 공동 물류시스템의 As-is와 To-be의 비교 개념도이다. 기존의 별도의 운송사가 배송 거점에서 개별로 물품을 최종소비자에게 인수했지만 향후 디지털 라스트마일 서비스를 이용 시 DLP를 기반으로 자율주행 전기차가 각기 다른 배송사의 물품을 최적의 경로와 비용으로 최종소비자에게 공동배송을 진행할 것으로 전망된다. 이렇게 여러 배송사를 연계하여 공동 배송을 통해 도시 내 효율적인 물류 서비스를 제공하고 도시 내 교통체증 완화, 물류비 절감, 배기가스 저감 등과 같은 부가가치를 창출할 수 있다.

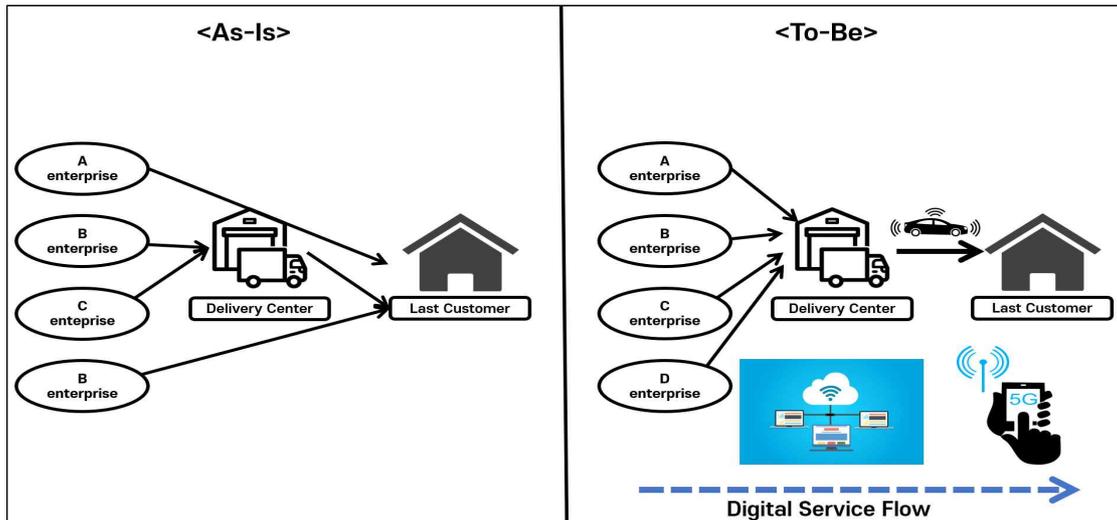


Figure 10. The conceptual map of the joint delivery system

Figure 9. The conceptual diagram of the joint platform for life logistics

4. 사례 분석을 통한 기대효과 분석

4.1 효과분석을 위한 분석틀

본 연구에서는 DLP의 도입효과를 실증적으로 검증하고자 사례 분석을 진행하였다. 먼저, 연구 목표를 설정하고 사례 분석 대상 지역 선정을 위해 환경 분석하였다. 이후 대상 지역 기반으로 자료 수집을 하였고, Excel을 활용한 시뮬레이션 분석을 진행하였다. 도출된 시뮬레이션 결과값을 기반으로 DLP의 도입 효과를 시사하였다.

Table 4. Synopsis of case analysis

Section	Content
The target of the study	The targeted area of platform business
The goal of the study	the expected effects of introducing a life logistics joint platform
Data collection	- Status of target areas for platform business - Demand for delivery to the target area - original cost unit of vehicle operation
Analysis methodology	Simulation
Research outcome	Analysis of expected effects

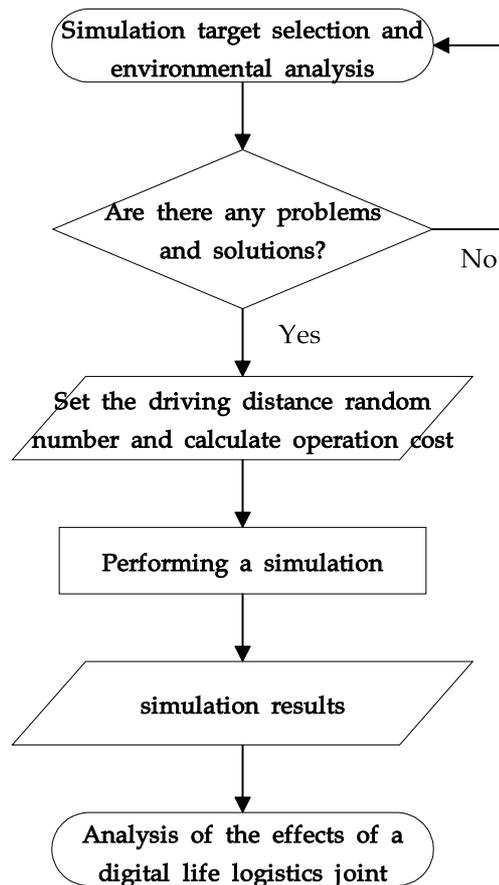


Figure 11. Flow chart of the simulation

4.2 사례분석 대상 선정 및 환경 분석

1) 서울시 물류산업 동향 분석

서울시는 2021년 8월 통계청 기준 전체 인구 5천 167만 명 중 18%를 차지하는 955만 명으로 전국에서 경기도(26%) 다음으로 가장 많은 인구가 분포되어 있다. 따라서 유발 수요가 높은 서울시를 DLP를 통한 라스트마일 공동 배송 사례 분석 대상 지역으로 선정하였고, 서울시 중 인구 밀집도가 높은 강남구 중 1개 공동주택단지를 선정하였다. Shin et al.(2013)에서 조사한 택배물류 공동화사업 후보 유형별 적합성 평가 중에서 도심 내 지역 공동집배송과 상점가 공동집배송, 대규모 집합 공용주택단지 공동집배송 순서대로 가장 적합하다고 평가되었다(<Table 5> 참조). 따라서 본 연구에서는 서울시 강남구의 지역 공동배송과 대규모 집합 공용주택단지 공동집·배송을 사례 분석 대상으로 선정하였다.

Table 5. Evaluation of suitability by candidate type
for the Seoul Metropolitan Government's delivery logistics joint project

Business type	Evaluation factor						Priority of support in Seoul (Score)
	Publicity			Economic / financial feasibility		Ease of business	
	Traffic tie-up	pedestrian environment	Landscape /Village making	Demand for delivery	Infrastructure construction cost /operation cost	level of difficulty	
House and buildings joint delivery	△	△	△	○	△	◎	5 (8 points)
Regional joint delivery	◎	◎	◎	○	○	△	1 (14 points)
Shop joint delivery	○	◎	○	○	○	○	2 (13 points)
Large-scale complex buildings joint delivery	△	○	○	○	○	○	4 (11 points)
Large-scale residential complexes joint delivery	○	○	○	○	○	◎	3 (13 points)

Annotation: ◎ Very suitable ○ Suitable △ Ordinary

source: Shin, S-G., Ahn K-J., Lee, C-H., and Park, DJ. (2013), Joint Logistics for Parcel Delivery Service in Seoul, Seoul Research Institute's Policy Task Research Report, 2013(11), p.9

서울시에서는 1인 가구증가와 온라인 쇼핑 대중화로 인하여 생활밀착형 라스트마일 서비스의 수요는 과거 생활 산업과 비교해 급증하였다. <Table 6>와 <Table 7>은 통계청에서 조사한 생활물류와 가장 밀접한 택배업과 늘찬배달업의 현황을 나타낸 것이다. 2007년 생활물류 시장에 대기업의 M&A 열풍으로 인한 인수합병과 후발 주자 진입 등과 같은 생활물류 동향으로 인하여 기업체수는 줄어드는 추세를 보였지만 서울시 생활물류산업은 전반적으로 발전하였다. 서울의 택배업 총매출액은 2007년 14조 599억 원에서 2019년 52조 744억 원까지 늘어 연평균 17.42%로 기하급수적으로 증가하였고, 유형자산 비용은 5조 709억 원에서 2019년 24조 876억 원을 기록하여 연평균 20.20% 성장하였다. 서울시의 늘찬배달업의 성장 또한 마찬가지이다. 2007년도 서울시 기업체수와 종사자수 각각 634개와 10,530명을 기록하였지만 대기업간 경쟁 심화와 후발 기업의 무리한 시장 확대로 인하여 매출액은 부진하였다. 서울의 늘찬배달업 총매출액은 2007년 2조 460억 원에서 2019년 3조 111억 원으로 연평균 2.98% 성장하였다. 또한 늘찬배달업의 유형자산은 2017년 75억에서 2019년 181억까지 성장하여 연평균 11.64%만큼 성장하였다.

Table 6. Current status of the parcel delivery service in Seoul

(unit: number/ one million won)

year	Number of companies	Number of workers	Payroll amount	Sales	Operating cost	Added Value	Tangible asset
2007	14	24,982	518,969	1,459,949	1,347,175	772,852	570,961
2009	12	19,944	508,583	1,967,248	1,888,047	824,172	620,240
2011	13	29,234	857,619	2,798,062	2,766,609	1,125,539	1,638,974
2013	13	28,072	923,966	3,256,580	3,222,010	1,381,261	1,671,503
2015	12	28,638	972,915	3,839,905	3,669,701	1,600,466	1,856,216
2017	10	29,441	1,228,859	4,152,412	3,982,062	1,768,991	1,296,638
2019	10	30,228	1,178,795	5,274,391	5,172,166	1,676,678	2,487,550

source: KOSIS. (2021), 2020, Transportation Survey

Table 7. Current status of the delivery agency service in Seoul

(unit: number/ one million won)

year	Number of companies	Number of workers	Payroll amount	Sales	Operating cost	Added Value	Tangible asset
2007	634	10,530	177,998	273,731	246,435	217,340	7,519
2009	455	6,011	113,785	174,033	156,821	141,731	8,790
2011	521	7,916	146,744	219,118	204,067	174,354	18,897
2013	528	7,295	106,387	189,690	174,247	137,323	12,268
2015	556	7,042	103,650	211,874	179,150	148,344	11,090
2017	580	8,250	114,884	216,750	196,327	155,579	9,088
2019	499	10,261	161,344	311,050	295,578	199,826	18,178

source: KOSIS. (2021), 2020, Transportation Survey

2) 사례분석 지역 선정

본 연구자는 DLP의 도입 기대효과 도출을 위한 사례 분석 지역 선정을 위해 2021년 통계청 기준 서울시 인구의 18.2%를 차지하는 송파구, 강남구, 강서구 그중 서울시 지역의 공동주택단지가 많이 분포된 강남구로 선정하였다. 강남구의 적정 공용주택단지 사례 지역을 위해 공동물류체계가 미흡한 구식 공용주택단지를 고려하여 강남의 대규모 구식 아파트단지인 서울시 강남구 대치동 M 아파트를 사례 분석 대상 지역으로 선정하였다. M 아파트단지는 1차와 2차가 나뉘지며 101동에서 212동까지 총 21 동수이다. M 아파트단지의 세대수는 2,436세대이며, 아파트 1일 택배 발생건수는 세대수와 세대별 주민등록수를 고려할 때 약 1,000개가 발생한다. GPS 지도에서 단지내 최대거리로 측정한 결과 단지 내 차량이 이동할 수 있는 최대거리는 3.5km이다.

Table 8. The targeted area of platform business

Section	Content
Then number of household	2,436
The number of apartment building	21
Resident registration per household	2.28
Maximum Travel distance	3.5km
The number of daily delivery per person(DP)	0.18
The number of daily deliveries in apartments(DA)	999.73

Annotation : The distance traveled in the complex is calculated as the maximum distance that a parcel truck can travel using a GPS map.

source : Seoul Metropolitan City(2021), Statistics of the resident registration population (by district) of Seoul

$$DP = \frac{x}{365} \times \frac{y}{\alpha} \quad (1)$$

$$DA = DP \times y \quad (2)$$

DP = The number of delivery per person

DA = The number of daily deliveries in apartments

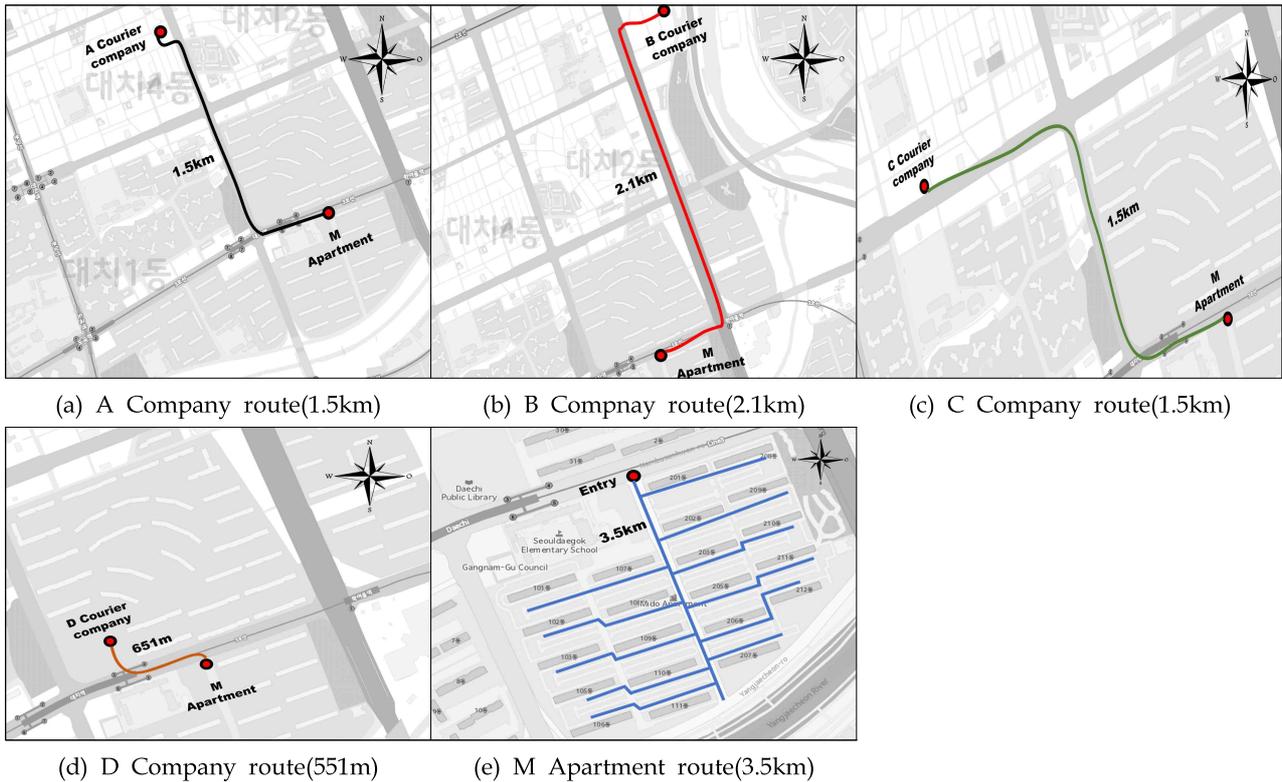
α = The total number of population in Korea

x = The number of delivery per person

y = The number of household \times Resident registration per household

Annotation : Based on the life logistics statistics of KILA(2021), the annual number of courier use per person (65.1 times) in 2020 is calculated.

DLP 시행 전 배송 기점은 M 아파트와 가장 인근 택배영업소(경동택배 서울강남대치 913 영업소, 대신 택배 대치동점)와 우체국(은마우체국과 대치 4동 우편 취급국)으로 가정하였다. A 기업의 기점에서 M 아파트 입구까지 도착하기까지 1.5km 소요되며, B 택배업체는 2.1km, C 택배업체는 1.5km, 그리고 D 택배업체는 651m 소요된다. M 아파트 단지 내 총 주행거리는 3.5km이다. DLP 도입하기 전 라스트마일 운영방식은 A업체, B업체, C업체, D업체는 각각의 다른 기점에서 최종 소비자까지 직접 개별 배송하는 Point to Point 방식을 가정하였다. 또한, 근린시설의 거리 및 이동은 제외하고, 입구와 출구는 정문에 위치한 주차장입구(빨강색 동그라미 표시)로 통일하였다(<Figure 12>의 (e) 참조).



Annotation: The source of maps is the National Territory Information Platform.

Figure 12. The maps of targeted area of case analysis

DLP를 도입하기 전에는 각기 다른 개별 택배사로부터 택배를 배송하였으나 DLP를 통해서 오직 1개의 통합운영사가 공동 배송하여 주행거리 및 주행시간과 차량 운행비용의 변화를 산출하였다. 택배영업소와 우체국을 기점으로 전제하여 진행하였고, 도로별 평균 속도별로 주행시간을 산출하였다.

「2020년 서울시 차량속도 보고서」 기재되어 있는 강남구의 1일 평균 속도(25km/hr)를 추출하여 택배영업소에서 M 아파트까지의 속도 및 시간을 적용하였다. M 공용주택단지 내에서는 공용주택단지 안전 주행속도 10km이하인 6km/hr 주행속도를 설정하였고 입구부터 가장 가까운 208동까지의 주행거리인 116.5m로 시작하여 단지 내 최대 이동거리인 3,500m로 난수 범위를 설정하여 택배 A사, B사, C사, D사의 M 아파트의 주행거리를 랜덤으로 산정하였다.

Lee et al.(2021)의 차량 운행비용 항목별 원단위는 「철도투자평가편람 전면개정 연구」상의 항목별 원단위 산출 결과를 기반으로의 원/km를 원/m으로 차량운행비용 항목별 원단위를 설정하였다. 또한 속도별·차종별 유류비 원단위를 기반으로 유류비 및 주행시간을 설정하였다. 차량 중 라스트마일 배송으로 가장 많이 사용하는 소형화물승합차(small Truck)와 소형화물(small-sized cargo) 기준으로 운행비용 원단위를 산출하였다.

Table 9. Results of the original fuel cost unit by speed and vehicle type (as of 2019)

(unit: won/km)

speed(km/h)	car	small-sized van	large-sized van	small-sized cargo	mid-sized cargo	large-sized cargo
10	133.53	192.73	468.15	180.38	371.35	662.65
20	85.36	121.54	333.84	131.59	251.48	501.48
30	65.71	93.11	270.20	108.41	201.10	418.40
40	55.57	78.58	235.14	95.99	176.02	370.80
50	49.97	70.50	215.02	89.45	163.87	343.10
60	46.76	66.16	204.30	86.87	160.37	328.59
70	45.46	64.44	200.60	87.62	164.44	324.36
80	45.69	64.95	203.18	91.90	177.32	329.65
90	47.51	67.82	212.56	100.81	203.66	345.43
100	51.32	73.70	230.75	117.28	256.87	374.90
110	58.13	84.29	252.54	149.19	386.33	-
120	70.43	103.81	319.45	224.81	1003.69	-

Annotation 1 : The unit price as of 2015 was adjusted as of 2019 using the Consumer Price Index (104.9).

Annotation 2 : The Korea Development Institut.(2017) cited a study on the methodology of calculating the benefits of transportation business.

source: Lee, S-H., Jung, Y-H., Choi, G-J., and Hong., J-Y. (2021), Detailed Guidelines for Conducting Preliminary Feasibility Study in the Railroad and Roads, 2021 Preliminary Feasibility Study Report, p.279

Table 10. The result of the original operation cost unit of small truck vehicle(as of 2019)

won/distance	Engine oil cost	changing tires cost	Maintenance cost	Depreciation cost
won/1km	2.57	8.96	14.8	117.53

Annotation : Korea Railroad Facilities Corporation(2010) was cited.

source: Lee, S-H., Jung, Y-H., Choi, G-J., and Hong., J-Y. (2021), Detailed Guidelines for Conducting Preliminary Feasibility Study in the Railroad and Roads, 2021 Preliminary Feasibility Study Report, p.283

4.3 시뮬레이션 실행

1) 시뮬레이션 과정

대규모 공용주택단지 내에 주행거리 및 주행시간과 차량운행비용이 DLP 도입으로 인한 효과는 Excel를 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 대상지의 택배 공동화를 위하여 1회 주행거리와 차량운행 비용의 변화를 분석하기 위해서 DLP 도입 전에는 단지 내 택배 운영 주체는 A, B, C, D 택배사가 개별로 운영하며 단지 내 이동수단은 소형화물자동차로 가정하였다. <Figure 13>은 본 연구에 대한 이해를 돕기 위해 DLP 도입전 각기 다른 택배사의 Point to point 운영방식 개념도이다. M 아파트의 동의 개수인 21번의 시뮬레이션을 4개사의 총 주행거리 및 주행시간과 차량운행비의 합계와 평균을 산출하였다.

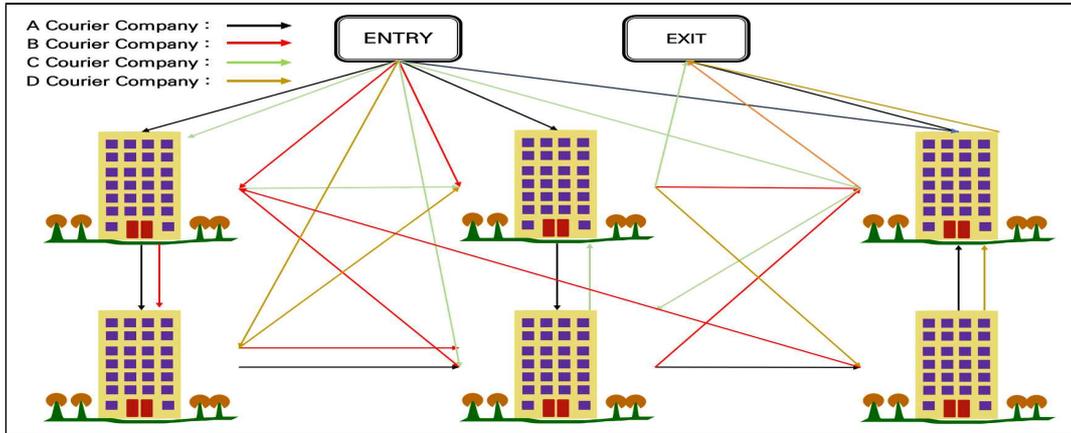


Figure 13. The congested delivery routes of M apartment before the platform introduction

2) DLP 도입 후 시뮬레이션 결과 분석

본 연구는 <Figure 14>의 (a)와 같이 DLP 도입 전 Point to point 운영방식을 개선하여 <Figure 14>의 (b)와 같은 라스트마일 소비자에게 순회하여 일괄적으로 택배를 배송하는 방식인 밀크런(Milk-run) 유형을 채택하여 DLP 도입 후 시뮬레이션 결과를 산출하였다. 밀크런 유형은 기본적으로 일정 규모 이상의 물량이 있어야 가능한 방식이며 시간적 효율성을 높여 리드타임 단축과 트럭 적재 효율성을 제고할 수 있는 장점이 있다. 또한, M 아파트와 가장 인접한 은마아파트 우체국을 공동물류센터로 지정하여 공동물류센터 운송사가 밀크런 방식으로 통합 배송한 시뮬레이션 결과를 도출하였다.

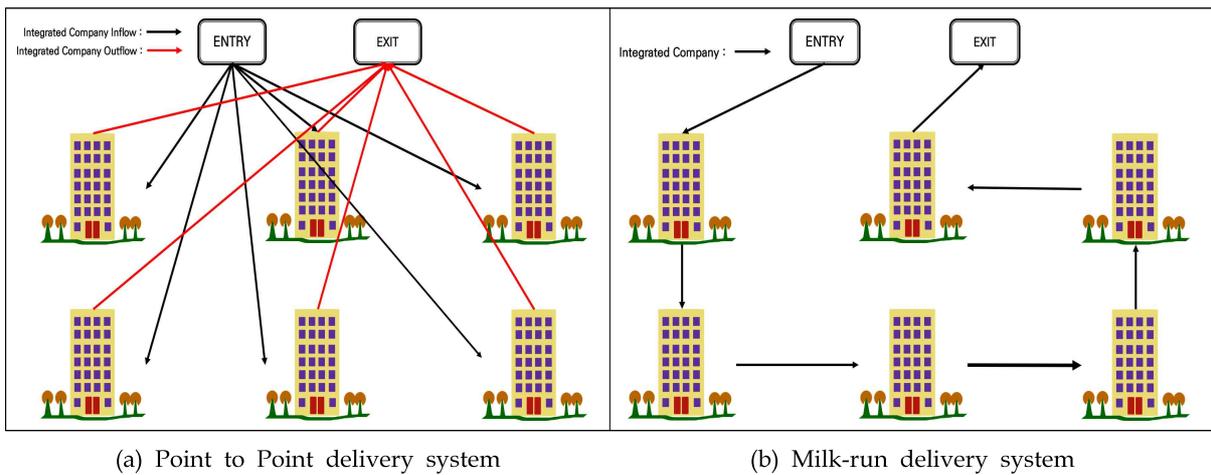


Figure 14. Types of joint delivery system

DLP 도입 전 결과는 Point to point 운영방식이므로 Excel의 'RANDBETWEEN' 함수를 활용하여 116.5~3500 범위 내 무작위로 단지 내 거리를 산출하였다. 단지 외 거리는 A업체의 영업소에서 M 아파트 입구까지 거리인 1.5km, B업체의 영업소에서 M 아파트 입구까지인 2.1km, C업체의 영업소에서 M 아파트 입구까지 거리인 1.5km, D업체의 영업소에서 M 아파트 입구까지 거리인 646m 설정하였다. 총 4개의 다른 기점에서 온 차량 4대의 단지 내 무작위 거리와 각 영업소의 단지 외 거리를 합산하여 플랫폼 도입전 Distance를 산출하였다.

배송 차량은 단지 내에서 시속 10km/hr로 운행되고 단지 외에서는 20km/hr로 운행되는 것을 가정한다. 소형화물승합차(Small truck)와 소형화물(Small-sized cargo) 기준으로 차량의 단지 내 거리와 시속별 유류비 원단위인 0.18원을 곱하여 단지 내 유류비를 설정하고, 단지의 거리와 0.13원을 곱해서 단지의 유류비를 합쳐서 유류비(Fuel cost)를 산출하였다. 「철도투자평가편람 전면개정 연구」상의 항목별 원단위 산출 결과를 기반으로의 원/km를 원/m으로 바꾸어서 원단위를 총거리를 곱하여 엔진오일비(Engine oil cost), 타이어교환비(Changing tires cost), 유지관리비(Maintenace cost), 감가상각비(Depreciation Cost)를 산출하였다.

DLP 도입 후 밀크런 배송을 통해 통합 운영사(Integrated Company)가 택배 배송을 운영하며, 1일 택배 건수를 소화하기 위해 4대의 트럭으로 21번째 반복 시뮬레이션을 진행하였다. 밀크런 배송을 위해 201동 -> 208동 -> 209동 -> 202동 -> 203동 -> 210동 -> 211동 -> 205동 -> 212동 -> 206동 -> 207동 -> 111동 -> 106동 -> 110동 -> 105동 -> 109동 -> 103동 -> 108동 -> 102동 -> 101동 -> 107동 순으로 21개의 동별 간 거리를 측정하였고, 단지 외 거리는 공동물류센터로 가정한 은마아파트 우체국과 M 아파트의 입구까지의 거리와 동별 간 거리를 합산하여 시뮬레이션 반복번호의 Distance로 설정하였다.

DLP 도입 후 시뮬레이션 평균 결과값은 주행거리와 주행시간은 총 1.5km과 27분이며, 유류비는, 125원, 엔진오일비는 4원, 타이어교환비는 14원, 유지관리비는 23원, 그리고 감가상각비는 184원을 포함한 350원의 차량운행비용을 산출하였다.

DLP 도입 전과 비교했을 때 총 운행 거리는 11.5km 감소할 수 있었고, 유류비는 45원, 엔진오일비는 15원, 타이어교환비는 52원, 유지관리비 85원, 그리고 감가상각비 677원 감소하여 차량운행비용은 874원 절감되었다.

Table 11. Results before the implementation of platform

	Company	Distance (m)	Driving time (min)	Fuel cost	Engine oil cost	changing tires cost	Maintenance cost	Depreciation cost
1	A, B, C, D	15,906	115	221	26	91	150	1,194
2	A, B, C, D	14,073	97	188	21	75	123	978
3	A, B, C, D	13,694	93	181	20	71	118	934
4	A, B, C, D	13,774	94	183	21	72	119	943
5	A, B, C, D	10,841	65	130	13	46	75	598
6	A, B, C, D	9,275	49	101	9	32	52	414
7	A, B, C, D	13,110	87	171	19	66	109	865
8	A, B, C, D	12,126	77	153	16	57	94	749
9	A, B, C, D	14,809	104	201	23	81	134	1,065
10	A, B, C, D	12,437	80	158	17	60	99	786
11	A, B, C, D	12,839	84	166	18	64	105	833
12	A, B, C, D	13,209	88	172	19	67	110	877
13	A, B, C, D	14,498	101	196	22	78	129	1,028
14	A, B, C, D	13,833	94	184	21	72	120	950
15	A, B, C, D	15,234	108	209	24	85	140	1,115
16	A, B, C, D	13,198	88	172	19	67	110	875
17	A, B, C, D	12,335	79	157	17	59	97	774
18	A, B, C, D	13,792	94	183	21	72	119	945
19	A, B, C, D	10,284	59	120	12	41	67	533
20	A, B, C, D	12,864	85	166	18	64	105	836
21	A, B, C, D	12,385	80	158	17	59	98	780
Average		13,072	87	170	19	66	108	861

Table 12. Simulation results after the platform implementation

	Comapny	Distance (m)	Driving time(min)	Fuel cost	Engine oil cost	changing tires cost	Maintenance cost	Depreciation cost
1	Integrated Company	20,322	360	1062	52	182	301	2388
2	Integrated Company	444	7	68	1	4	7	52
3	Integrated Company	491	8	71	1	4	7	58
4	Integrated Company	524	9	72	1	5	8	62
5	Integrated Company	734	12	83	2	7	11	86
6	Integrated Company	4945	8	71	1	4	7	58
7	Integrated Company	640	11	78	2	6	9	75
8	Integrated Company	606	10	77	2	5	9	71
9	Integrated Company	583	10	75	1	5	9	69
10	Integrated Company	450	8	69	1	4	7	53
11	Integrated Company	654	11	79	2	6	10	77
12	Integrated Company	712	12	82	2	6	11	84
13	Integrated Company	520	9	72	1	5	8	61
14	Integrated Company	663	11	79	2	6	10	78
15	Integrated Company	486	8	70	1	4	7	57
16	Integrated Company	656	11	79	2	6	10	77
17	Integrated Company	580	10	75	1	5	9	68
18	Integrated Company	600	10	76	2	5	9	71
19	Integrated Company	520	9	72	1	5	8	61
20	Integrated Company	887	15	91	2	8	13	104
21	Integrated Company	1,324	22	112	3	12	20	156
Average		1,566	27	125	4	14	23	184

Park et al.(2013)의 1인당 배송원 1일 평균 배송량(300 box)를 이용하여 M 아파트의 1일 택배 건수 (1000box)는 4회이므로 2021년도 기준 공유일을 제외한 평일과 토요일은 304일로 1,216회 운행을 가정하였다. 그 결과 DLP 도입 효과는 주행거리는 도입전 15,896km에서 88.02%를 절감한 1,904km로 단축되었고, 주행시간은 약 1763시간(105,792분)에서 78.35%를 절감한 약 547시간(32,832분) 단축되었고, 차량운행비용은 71.41%를 절감하여 425,600원으로 절감하였다(<Table 13> 참조). 이처럼 DLP 도입으로 생활물류 서비스를 통합적으로 관리하여 불필요한 주행 및 비용을 감소하면서 단지 내 교통 혼잡을 예방뿐만 아니라 단순한 기업의 과점이 아닌 전체 이익 측면에서 효율적인 물류 공동화 시행이 가능하다.

Table 13. The results of simulation analysis of the yearly delivery of apartment M

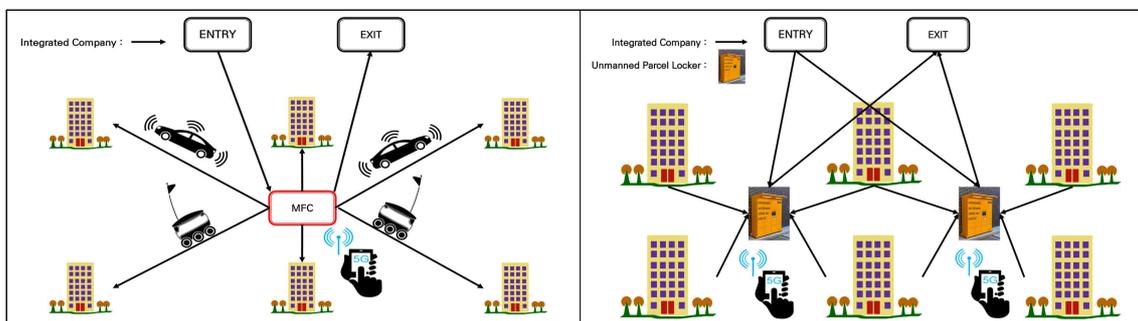
Large section	Small section	Before	After	Effect
Vehicle operation cost(won)	Fuel cost	206,720	152,000	26.47%
	Engine oil cost	23,104	4,864	78.95%
	changing tires cost	80,256	17,024	78.79%
	Maintenance cost	131,328	27,968	78.7%
	Depreciation cost	1,046,976	223,744	78.63%
	Total	1,488,384	425,600	71.41%
Transportation	Distance(km)	15,896	1,904	88.02%
Time	Driving time(min)	105,792	32,832	68.97%

4.4 시사점

DLP의 활용은 오직 강남구 M 아파트뿐만 아니라 점차적으로 공용주택단지에 활용할 수 있으며, 규모가 클수록 기대효과는 클 것으로 전망된다. 운영방식 또한 개별 배송 방식에서 통합 밀크런 배송 방식에만 국한되어 있지 않다.

이러한 점을 감안할 때 이외 DLP 활용은 <Figure 15> 같은 운용으로까지 확대 제시 가능하다. <Figure 15>의 (a)인 중앙 거점형 배송 시스템은 아파트 단지 특정지점에 공동플랫폼과 연계되는 마이크로 풀필먼트센터(MFC: Micro-Fulfilment Center)와 같은 소형 물류시설을 개발하여 최종소비자에게 무인 라스트마일 서비스를 제공한다. 공간적인 시설이 운영되므로 아파트 단지 외 다른 지역으로 배송하는 화물을 접수하여 부수적으로 병행할 수 있다.

<Figure 15>의 (b)는 물품 배달 시 수취인이 부재중이어도 수취인이 원하는 시간대에 수령이 가능한 공공 무인택배함 활용 방안이다. 택배 통합 운영사는 아파트 단지 내 최적 입지를 선정하여 일괄적으로 배송하여 소비자가 원하는 시간대에 안전하게 수령이 가능한 시스템이다. 디지털 생활물류 공동플랫폼 연계를 통해 각기 다른 택배사의 데이터를 통합하여 무인택배함의 사용 현황 조회 및 장래 택배 물동량 예측을 통해서 통합 운영사의 시간, 비용, 거리를 절감할 수 있다.



(a) central MFC-based delivery type

(b) Platform-based unmanned delivery box type

Figure 15. Suggestions of utilizing digital life logistics joint platform

5. 결론

5.1 결론

과거 B2B 방식의 물류 서비스에서 B2C 방식인 생활 물류 산업으로 패러다임의 변화가 진행되었다. 이처럼 뉴노멀 시대로 도래되면서 최근 생활물류 시장은 지속해서 성장 되고 있으나 우량 기업의 과점이 심화 되고 비효율적인 라스트마일 서비스가 진행되고 있다.

본 연구에서 제안하는 ICT 기술을 융합한 플랫폼 기반으로 한 소비자와 밀접한 생활물류 공동화를 통해 변화하고 있는 뉴노멀 시대에 대응하고, 전통적인 라스트마일의 비효율성을 개선을 위하여 인구 밀집도가 가장 높은 서울시 대상 지역으로 사례 분석을 통해 도시물류발전을 위한 방안과 공동플랫폼 체계 구축에 이바지하고자 하였다.

이에 따라 공공 부문에서 치열한 경쟁 구도와 불필요한 비용으로 인한 비효율적인 라스트마일 시스템을 완화하기 위해 공유 경제를 추구하는 협력 시스템인 디지털 생활물류 공동플랫폼(DLP)을 도입하였다. 본 연구에서는 서로 다른 업체의 정보를 연계하는 중립적인 ICT 기반 공동플랫폼 비즈니스를 개념적 측면에서 제안하였고, 서울시 대규모 공용주택단지를 사례 분석으로 공용주택단지 내 주행거리 및 주행시간과 차량운행비용을 기반으로 도입 전과 후의 변화를 실증 분석을 수행하였다. 실증 분석 결과를 통하여 강남구 대치동 M 아파트의 주행 거리 및 주행시간의 효용은 각각 80.82%와 78.35% 증가하였고, 차량운행비용은 91.10% 절감되었다. 이를 통해 디지털 생활물류 공동플랫폼의 도입은 M 아파트의 생활물류 공동화 사례를 통해 타당성을 확보하는 것으로 분석되었다.

5.2 제언

본 연구에서는 공동플랫폼 도입의 기초연구로서 오직 한 공동주택단지를 대상으로 그 기대효과를 분석하여 대표성을 가지기에는 부족하므로 플랫폼 도입은 주거 단지 내부 효과뿐만 아니라 전체적인 생활물류 공동화의 대규모 도입이 필요하여 점차적으로 도시 전체에 미치는 기대효과를 추정하는 연구가 필요하다.

뉴노멀 시대에 대응하기 위해서 디지털 생활물류 체계를 효과적으로 확립하기 위해서는 정부의 역할이 중요하다. 정부는 플랫폼 구축 및 운영 관련 방안을 마련해야 하며, 생활물류의 라스트마일 수요 및 공급과 정책을 분석해서 이용자가 어떤 효율화된 시스템이 필요한지 운영 방안을 파악해야 한다. 이러한 분석을 통해 정부는 관련 물류 공동화 정책을 마련하며 기업들의 참여를 장려하고, 기업 간 정보연계를 협의해야 한다. 플랫폼 구축 및 운영 방안을 마련한 뒤 안정성 확보를 위한 시범 운영을 진행하여 정책적 한계 및 실제 환경에 부합할 수 있는지 파악해야 한다. 전자상거래 수요가 가장 높은 수도권부터 기업체 참여를 통한 시범 운영을 진행하여 효과를 검증해야 하며 생활물류 공동화 배송을 위해 플랫폼을 통해 참여자들을 최대한 확보해야 한다. 하지만 보수적인 물류기업은 업무 노하우 같은 기업 정보의 공개를 꺼리며 서비스 이용 주체 간 이해 불일치를 일으킬 수 있다. 따라서 정부는 중립적인 위치에서 플랫폼 이용을 적극적으로 권장하여 최대한 많은 기업을 연계하여 물류 공동화를 진행해야 할 것이다.

참고문헌

- Bae, Y-Y., and Shin, H-R. (2020), COVID-19 accelerates untact society, Issue&Analysis, 416, 1-26
- Jang, J-Y. (2021), The strategies of Mesh Korea as an urban logistics technology company (<https://dbr.donga.com>), Korea
- Jo, I-H., and Yoon, Y-J. (2018), Service innovation of Last Mile Logistics with Unmanned Technology: Focused on Korea Post Office Case, Journal of Korea Service Management Society, 19(5), 225-241.
- Kim, H-S. and Kim, M-S. (2020), Online shopping trend in 2021, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2, Korea
- Korea Integrated Logistics Association(2021), Logistics complex information in Korea, Korea
- Korea Integrated Logistics Association(2021), Statistics of life Logistics, Korea
- Korea Statistical Information Service(2021), Transportation Survey, Korea
- Kim, J-H. (2020), Changes in the logistics industry and the life Logistics Service Act, National Assembly Debate Collection, 9.
- Lee, S-H., Jung, Y-H., Choi, G-J., and Hong., J-Y. (2021), Detailed Guidelines for Conducting Preliminary Feasibility Study in the Railroad and Roads, 2021 Preliminary Feasibility Study Report, 283.
- Lim, S-C. and Park, J-H. (2020), Proposal of Digital Last-mile Transportation Plan in Response to Post COVID-19, The society of Logistics Science and Technology essay competition 2020, Korea
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2021), The Ministry of Oceans and Fisheries has come up with a strategy to leap forward as a leading global logistics country in 2030, 10.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2020), Promote smart logistics, green logistics, and people-centered logistics, p.3, Korea
- Park, H-J., Park D-J., Shin S-I., Lee C-H., and Nam D-S. (2013), A Study on Estimation of Logistics Collaboration in Parcel Delivery Service: focused on apartment complex in Seoul, Proceedings of the KOR-KST Conference, 69, 372-376.
- Park, H-J., Park, D-J., Shin, S-I., Lee, C-H., and Nam, D-S. (2013), A Study on Estimation of Logistics Collaboration in Parcel Delivery Service: focused on apartment complex in Seoul, Proceedings of the KOR-KST Conference, 69, 372-376.
- Park, H-S., Ban, J-H., Jung, H-C., and Kim, S-J. (2020), The impact of COVID-19 on the Seoul economy and countermeasures against small business owners and tourism, Policy Report, 297, 6-14.
- Seoul Metropolitan City(2021), Statistics of the resident registration population (by district) of Seoul, Korea
- Seoul Metropolitan City(2021), 2020 Seoul City Vehicle Traffic Speed Report, p.27, Korea
- Shim, H-J. (2021), A plan to strengthen the competitiveness of the high-tech delivery industry, Trade Brief, 9, 3-7.
- Shin, S-G., Ahn K-J., Lee, C-H., and Park, D-J. (2013), Joint Logistics for Parcel Delivery Service in Seoul, Seoul Research Institute's Policy Task Research Report, 2013(11), 9.
- UNCTAD(2020), Estimate of global E-commerce 2019 and preliminary assesment of COVID-19 impact on online retail 2020, UNCTAD Technical Notes on ICT for Development, 18, 1.

자율주행용 가변화각 카메라의 물류이송로봇 적용을 통한 물류창고 안전성 및 운영 정확도 향상에 관한 연구

김민중¹, 최경락², 김동현³, 김영민¹⁺

¹아주대학교 시스템공학학과

²디엔브이비즈니스어슈어런스코리아, 자동차엔지니어링서비스팀

³주식회사 캔랩

On the Improvement of Safety and Operational Accuracy of Logistics Warehouses by Application of AGVs of Variable Focus Functional Camera for Autonomous Driving

Min Joong Kim¹, Kyoung Lak Choi², Tong Hyun Kim³, Young Min Kim¹⁺

¹Department of System Engineering, Ajou University

²Automotive Engineering Service Team, DNV GL Business Assurance Korea

³CanLab Co., LDT.

Today, the development of the Internet and mobile technologies has a great influence on consumer purchasing patterns. As online purchases using mobile devices increase, the delivery industry for logistics delivery has also increased significantly. However, the working environment in the logistics warehouse is still poor. To improve this, many companies have conducted a lot of research and development on logistics robots, and various logistics robots have been operated. But, there are still limitations to unmanned. In this paper, a variable focus function camera and RSS model used in autonomous vehicles were derived to be suitable for AGVs. It was applied to the derived AGVs and verified in terms of safety and accuracy, and valid result were obtained. It is expected that this study will contribute to the use of AGVs that can operate unmanned logistics warehouse.

Keywords: Autonomous Guide Vehicle, Variable Focus Function Camera, Vision Camera, Responsibility Sensitive Safety, logistics warehouse

논문접수일 : 2021.10.08.

심사완료일 : 2022.06.21.

게재확정일 : 2022.06.24.

이 논문은 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행되었음. (20014470)

† Corresponding Author: pretty0m@ajou.ac.kr

1. 서론

1.1 연구배경

최근 경제 성장과 사회 전반에 걸친 기술의 발전은 다양한 분야에 크고 작은 영향을 미치고 있다. 특히 인터넷과 모바일 기술의 발전은 구매자가 다양한 소비패턴을 선택할 수 있도록 하였으며, 시간과 장소에 구애받지 않는 모바일을 활용한 온라인 시장의 급격한 성장을 가져왔다. 이러한 시장 변화에 적응하기 위하여 기업들은 여러 방면에서 물류 기술 개발에 투자하고 있다(Bigne E. et al. 2005). 이와 함께 최근 COVID-19 사태로 인하여 온라인 구매가 증가하면서 구매 물품 배송을 위한 택배사의 물류량도 급증하게 되었다. 그러나 물류센터에서 처리량은 증가하였지만, 근로자들의 근로조건 및 환경은 열악한 상황이다 (Jang and Kim 2020). 근로자들의 열악한 작업 환경을 개선 시키고, 부담을 경감하기 위하여 고중량 물품 픽업 및 이송에 로봇을 활용할 수 있고, 더 나아가 인공지능, 감지 센서, 카메라 등의 기술과 접목하여 자율 로봇을 활용한 무인 물류센터도 가능하다(Jang and Lee 2018). 따라서 물류 로봇의 활용을 통해 물류의 분류, 적재, 및 이송을 수행할 수 있으며, 효율성을 향상할 수 있다(Han et al. 2020). Figure 1은 실내 물류창고에서 유도선을 따라 이동하는 물류 로봇을 활용한 작업 환경을 나타낸다.



Figure 1. Working environment using AGV in a logistics warehouse

1.2 관련연구

IoT(Internet of Things) 기술과 자율주행 기술 등을 접목하여 다양한 물류 로봇이 존재하고 있으며, 물류 센터와 공장 등 여러 산업 분야에서 활용되고 있다. 물류 로봇은 화물처리, 창고용 AGV(Autonomous Guided Vehicle), 무인 항공 로봇 등이 있다(Jang and Lee 2018). 특히 AGV는 물류 센터에서 생산성 및 효율성을 높이는 중요한 요소이다(Jaiganesh, V. et al. 2014). Kirchheim, A. et al.(2008)은 적재된 비정형 화물들을 자동 하차 작업 수행을 위한 이미지 인식 시스템 연구하였다. 이를 위해 집게를 이용하는 로봇 방식을 제안하였다(Kirchheim, A. et al. 2008). 3차원 영상 인식을 통한 비정형 화물의 형태를 인지하고 구별하는 비전 시스템 제시하였다(Thamer, H. et al. 2013). RFID를 활용하여 화물 인식 및 다양한 종류의 물품을 사용하여 실험을 수행하였다(Landschutzer, C. et al. 2018). 물류 자동화의 다양한 형태에 대하여 다루었으며, 일반 또는 팔레트 형태의 화물에 대한 하역 작업에 대해 논의하였다(Echelmeyer, W. et al. 2008). 또한, 자동 로봇 시스템 도입했을 경우의 경제성에 대해 논의하였으며, 다양한 시나리오에 대해 비교하였다(Echelmeyer, W. et al. 2011). QR 코드를 활용하여 위치를 파악하는 방법에 대한 연구가 진행되었으며

(Juntao, L. et al. 2015), 소형 무인 항공기(드론)를 활용한 물류 이송에 대한 국내 및 국외의 시장 현황과 규제, 개발 사례 등을 제시하고, 드론을 활용한 물류 서비스 도입의 필요성에 대해 제시하였다(Kim, S.-J. et al. 2016).

1.3 문제정의 및 논문구성

온라인 쇼핑 시장이 크게 성장함에 따라 근로자들의 작업 환경을 개선하고, 작업의 효율성을 높이기 위해 24시간 무인 작업을 위한 물류 로봇의 도입이 매우 증가할 것으로 기대된다. 그러나 기존 방식의 물류 로봇을 무인 작업에 활용하기에는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 자율주행 자동차에 활용하는 가변 화각 카메라와 RSS(Responsibility Sensitive Safety) 모형을 물류 이동로봇에 적합하도록 변경하고, 이렇게 변경한 모형에 대한 안전성과 정확도를 확인할 것이다. Figure 2는 자율주행 3요소와 기존의 물류로봇의 한계 및 본 논문에서 목표하는 우리의 관심 영역을 나타낸다.

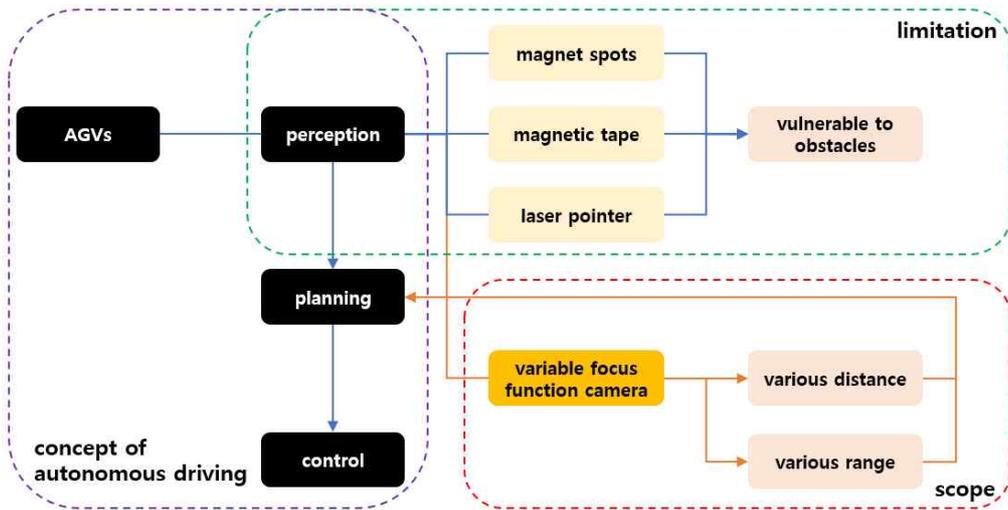


Figure 2. Autonomous driving concept of AGVs and limitation of existing system and our research scope

논문의 구성은 다음과 같다. 이어지는 2장에서는 기존 물류 이동로봇 시스템의 종류와 한계점 및 가변 화각 카메라의 특징과 필요성에 대해서 살펴본다. 3장에서는 가변 화각 카메라를 적용하기 위한 물류 이동로봇에 적합한 RSS 모델을 구축하는 과정에 관해 서술한다. 4장에서는 3장에서 도출한 모델을 물류 이동로봇에 적용했을 때 안전성 및 정확도에 대해 살펴보고, 마지막 5장에서는 연구의 결론을 도출한다.

2. 물류 이동로봇에 가변 화각 카메라 적용의 필요성

2.1 기존의 물류 이동로봇 시스템의 방식 및 한계

물류 로봇 시스템에는 다양한 방식이 존재한다. 기존에는 바닥에 자성이 있는 테이프를 운반 경로를 표시하거나, 유도 전선을 바닥에 설치하여 이동하는 방식이 사용되었다. 이러한 시스템은 바닥에 유도선이 설치되기 때문에 물류창고의 특성상 선이 오염이나 훼손이 되면 동작에 오류를 발생시킬 수 있고, 구조를 자주 변경하는 경우, 매번 새로 설치하거나 변경해야 하므로 비효율적이다. 원통형 마그넷 스폿을 이용하여 실내 AGV의 항법 및 제어 시스템에 대해 논의하고, 홀 효과 센서, 인코더 및 카운터를 사용하여 제어 및 지속적인 안내를 수행하는 방법을 설명한다(Lee and Yang 2012). 하지만 마그넷 스폿을 감지하지 못하는 경우 로봇에 오류가 발생할 가능성이 존재한다. Paromtchik, I. E. (2006)는 천정에 레이저 포인터를 설치하여 바닥에 투사하여 목표 위치를 나타내는 연구를 진행하였다. 레이저 비컨을 사용하여 경로를 표시함으로써 로봇이 알지 못하는 환경에서 로봇을 안내하고 유도할 수 있다(Paromtchik, I. E., 2006). 그러나 레이저 빛을 이용하기 때문에 밝은 환경에서 레이저 빛이 약하거나, 물류창고 특성상 다른 장애물에 의해 가로막히거나 복잡한 구조에서는 로봇이 이동하는 데 오류를 발생할 수 있다.

2.2 가변 화각 카메라 구조 및 특징

가변 화각 카메라는 광각, 미들, 협각의 총 3가지 화각을 바꿀 수 있는 카메라를 말한다. 단일 카메라로 다양한 화각을 측정할 수 있는 가변화각 카메라는 현재 자율주행 자동차용으로 개발중에 있기 때문에 실제 실험은 불가능하며, 이론적인 계산만이 가능한 상황이다. 이를 통해 다양한 범위의 객체를 인식할 수 있으며, 앞서 언급한 3개의 화각은 각각 라이다, 카메라, 레이더 센서의 인식 범위를 나타낸다. 이중의 센서를 사용하게 되면 각각의 센서에 대한 데이터 처리기를 구성해야 하며, 이는 시스템의 복잡성을 증가시키는 한편, 복잡한 시스템 구성으로 인한 오류 발생의 가능성이 존재한다. 이밖에 각각의 화각에 대한 카메라를 하나로 묶어서 사용하는 방법도 존재하지만, 이럴 경우에 패키징을 하는 데 있어 큰 공간을 차지하기 때문에 공간적 제약이 따르게 된다. 가변 화각 카메라는 다양한 화각을 커버하는 동시에 단일 카메라를 사용하기 때문에 공간적 이점도 가지고 있다. Figure 3은 가변 화각 카메라의 개념을 보여 준다. 그림에서 파란색 삼각형은 광각의 근거리의 객체를 탐지할 수 있으며, 녹색 삼각형은 협각이며 원거리의 객체를 인식할 수 있음을 나타낸다.

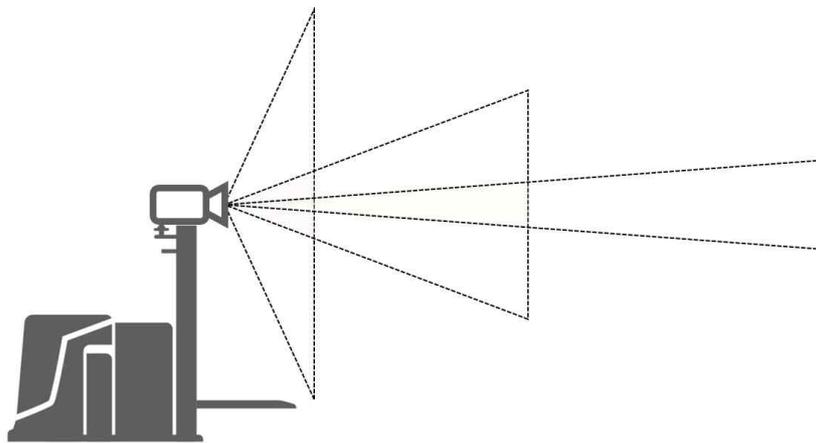


Figure 3. A conceptual diagram of variable focus function camera installed in AGV

2.2 물류 이동로봇에 가변 화각 카메라 적용 시 이점

위치 인식을 위해 외부 장치나 자극을 필요로 하는 기존의 시스템과는 달리, 물류 이동로봇에 가변 화각 카메라를 적용하면 근거리와 원거리의 다양한 거리와 범위에 있는 물체를 스스로 인지하고 식별할 수 있으며, 가변 화각 카메라 센서를 통해 장애물을 인지한 다음 대상까지의 거리와 속도 정보를 통해 RSS 안전 거리를 도출할 수 있다. 이렇게 도출된 RSS 안전거리를 바탕으로 AI(Artificial Intelligence)를 통해 스스로 판단하여 근거리의 장애물 회피 및 목적지까지 최적의 이동 경로를 탐색하고 이동하는 데 활용될 수 있다. 따라서, 기존 시스템에서 바닥의 유도선이 오염 또는 장애물에 의한 지시 포인트의 차단 등으로 인한 오동작 및 오류를 방지할 수 있다. 또한, 단일 카메라 센서를 사용하기 때문에 설치 공간에 대한 이점을 얻을 수 있으며, 이중 센서 사용 시 센서별 데이터 처리기를 별도로 구성하여야 하며 이로 인한 시스템 구성의 복잡성 증가로 발생 가능한 오류를 예방할 수 있다.

3. 물류 이동로봇에 적용을 위한 가변 화각 적합형 RSS 모델 구축

3.1 RSS 모델의 특징 및 정의

RSS 모델은 mobileye에서 자율주행 자동차의 안전을 보장하고, 사고 시 과실 여부를 판단하기 위한 화이트박스 수학적모델이다(Shalev-Shwartz, S. et al. 2017). RSS 모델은 다양한 주행 시나리오에 대해 안전거리를 정의하고, 위험한 상황 정의 및 위험한 상황을 회피하기 위한 적절한 반응을 제시한다. RSS 모델의 구성은 다음과 같이 5개의 규칙으로 구성된다.

- 안전거리
- 끼어들기
- 우선순위
- 제한된 시야
- 충돌 회피

mobileye에서 제시하는 RSS 모델은 자율주행 자동차를 위해 제안되었기 때문에 자동차의 주행상황을 가정한다. 동일한 방향으로 주행하는 두 차량에 대하여 RSS 모델에서 제시하는 두 차량 사이의 안전거리 공식은 다음과 같다.

$$d_{\min} = \left[v_r \rho + \frac{1}{2} a_{\max, \text{accel}} \rho^2 + \frac{(v_r + \rho a_{\max, \text{accel}})^2}{2 a_{\min, \text{brake}}} - \frac{v_f^2}{2 a_{\max, \text{brake}}} \right]_+ \quad (1)$$

여기서 $[x]_+ := \max\{x, 0\}$ 으로 정의하며, v_f 는 선행 차량의 속도, v_r 은 후행 차량의 속도, ρ 는 후행 차량의 반응시간이며, $a_{\min, \text{brake}}$ 는 선행 차량의 감속도, $a_{\max, \text{accel}}$ 와 $a_{\min, \text{brake}}$ 은 후행 차량의 가속도와 감속도를 나타낸다. 이와 같이 RSS 모델은 객체와의 안전거리를 도출하기 위한 위한 수학적 모델이며, 가변 초점 카메라는 객체를 탐지하기 위한 카메라 모듈이다. 카메라 센서를 통해 장애물을 인식하고 RSS 모델로 안전거리를 도출하여 충돌 전 장애물을 회피하거나, 긴급 정지함으로써 사고를 예방하여 안전성을 확보할 수 있다.

3.2 물류 이동로봇에 적용하기 위한 RSS 모델 기준 식별 및 도출

물류 이동로봇에 RSS 모델을 적용하기 위해서는 두 가지 상황으로 나누어 접근해야 한다. 첫 번째로 관련 법인 산업안전보건법에 근거한 위험기계·기구 자율안전확인 고시에 따르면 ‘작업자(사람)이 있는 공간에서는 로봇은 반드시 정지하여야 한다’라고 규정하고 있다. 따라서 위의 식 (1)에서 선행차 관련 변수를 물류창고 내 이동하는 사람이라고 가정을 하였다. 사람의 이동 속도는 4 km/h , 로봇의 속도는 사람의 평균 이동 속도와 같은 4 km/h 로 가정하였으며, 가속도와 감속도를 1 m/s^2 으로 가정하여 식 (1)에 대입하면 0.011의 결과를 얻을 수 있다. 즉, 로봇과 사람 사이에 11cm의 거리만 있어도 로봇이 4 km/h 의 속도로 움직이면서 움직이는 사람을 발견하여 사람과 충돌하지 않고 안전하게 멈출 수 있다. 두 번째는 정지한 물체를 인지하고 접근하기 위해서는 적합한 기준을 식별하여 정의하여 위의 식 (1)로부터 적합한 식을 도출하여야 한다. 예를 들면 선행 차량에 대한 변수 등은 정지된 물체를 픽업하는 물류 이동로봇에서는 필요가 없는 값이다. 해당 값들을 0으로 두면 분모가 0이 되는 수식 오류가 발생하기 때문에, 해당 변수를 삭제하여 다음과 같은 계산식을 도출하였다.

$$d = v\rho + \frac{1}{2} a_{\text{accel}} \rho^2 + \frac{(v + \rho a_{\text{accel}})^2}{2 a_{\text{brake}}} \quad (2)$$

도출된 식 (2)를 통해 로봇의 속도와 가속도, 그리고 반응시간과 안전거리 사이의 상관관계를 확인할 수 있다.

3.3 물류 이동로봇에 적용하기 위한 RSS 모델 기준 식별 및 도출

3.2절의 식 (2)의 변수 중 속도, 가속도 및 감속도는 특성값이므로 고정된 변수이므로, 이를 통해 로봇과 물체 사이의 거리와 반응시간 사이의 관계를 도출할 수 있다. 본 논문에서는 도출된 결과를 확인하기 위해 두 가지 방향에서 접근하였다. 로봇의 속도는 사람의 평균적인 이동 속도인 4 km/h 로 두 가지 경우에 대해 가정을 하였으며, 가속도와 감속도를 1 m/s^2 으로 가정하고, 첫 번째는 반응시간에 따라 로봇이 사람과 충돌

돌하지 않을 수 있는 최소 거리를 Table 2에 결과를 나타내었고, 두 번째는 로봇의 속도가 아마존의 물류 로봇인 키바의 속도로 알려진 1.5 km/h 와 사람의 평균적인 이동 속도인 4 km/h 를 갖는 각각의 경우에 대해, 로봇과 정지한 물체 사이의 거리를 1 m , 2 m , 5 m , 10 m , 20 m , 30 m , 50 m , 100 m 으로 가정하여 객체를 인지 후 충돌하지 않는 데 필요한 반응시간을 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Safe distance depending on response time

Response time [s]	Safe distance [m]
0.01	0.64
0.05	0.73
0.10	0.85
0.15	0.97
0.20	1.10
0.25	1.24
0.30	1.37
0.35	1.52
0.40	1.67
0.45	1.82
0.50	1.98

Table 3. Required response time according to distance

Safe distance [m]	Response time [s]	
	1.5 km/h	4 km/h
1	0.63	0.16
2	1.03	0.51
5	1.84	1.26
10	2.76	2.15
20	4.07	3.43
30	5.07	4.42
50	6.66	6.00
100	9.59	8.92

4. 물류 이동로봇에 RSS 모델 기반 가변 화각 카메라 적용의 적합성 확인

4.1 RSS 모델 기반 가변화각 카메라를 적용한 물류 이동로봇의 안전성

Table 1에서 보이는 바와 같이 1 m/s^2 의 가감속도를 갖는 물류 로봇이 우리가 가정한 최대 속도인 4 km/h 의 속도로 이동을 하면서 객체를 감지 후, 충돌하지 않고 안전하게 정지할 수 있는 거리가 0.01초(10ms)의 반응시간을 가질 때 0.64 m이며, 0.5초의 반응시간을 가질 때 1.98 m이다. Table 1에서의 결과는 가정한 최대 속도를 이용하여 얻은 결과이므로 만약 이동을 시작하거나 정지하는 과정에서는 작은 속도 값을 갖게 되므로 실제 안전거리는 더욱더 작아지게 된다. 예를 들어 가감속도의 값은 동일하게 1 m/s^2 를 갖고, 현재 속도가 1 km/h 라고 한다면, 0.01초(10ms)의 반응시간에서의 안전거리는 0.04 m이며, 0.5초의 반응시간을 가질 때 0.57 m이다. 따라서 물류 로봇에 RSS 모델을 적용한 가변 초점 카메라를 이용할 경우 물류 로봇의 이동하는 데 있어서 사람과의 충돌에 대한 위험으로부터 안전성을 확보할 수 있게 된다.

4.2 물류 이동로봇의 이동 및 정지거리 정확도

Table 2에서 $1m/s^2$ 의 가속속도를 갖는 물류 로봇이 아마존의 물류 로봇의 속도로 알려진 $1.5km/h$ 의 속도로 이동을 하는 물류 로봇이 1 m 거리에서 충돌 없이 안전하게 도달하기 위한 필요한 반응시간은 0.63 초로 계산되었다. 가변 화각 카메라의 데이터 전송 주기는 0.08초이며, 카메라로부터 데이터를 받은 이후 AI가 분석하고, 결정하여 명령을 내리고 실제 수행하는 데까지 최대 0.55초의 시간을 확보할 수 있다. 이를 통해 충분히 안전하게 정확하게 정지할 수 있음을 나타내고 있다. Figure 4는 앞서 도출한 데이터 전송 주기와 실제 수행까지 소요되는 시간 등을 기반으로 가변 화각 카메라가 설치된 물류 로봇이 장애물을 회피하고, 목표 물품을 픽업하는 과정을 순서도와 timeline 분석을 나타낸다. 먼저 가변 화각 카메라를 통해 다양한 범위와 거리에 대하여 인지하고, 목표 지점까지 최적의 경로를 분석하여 이동한다. 이동 중 장애물을 만났을 경우, 정지할지 우회할지를 가변 화각 카메라의 영상정보를 분석하여 결정한 다음 수행을 하게 된다. 목표 지점에 도달하였을 경우 물품을 픽업하여 다시 가변 화각 카메라의 영상정보를 바탕으로 경로를 결정, 이동하는 과정을 거치게 된다.

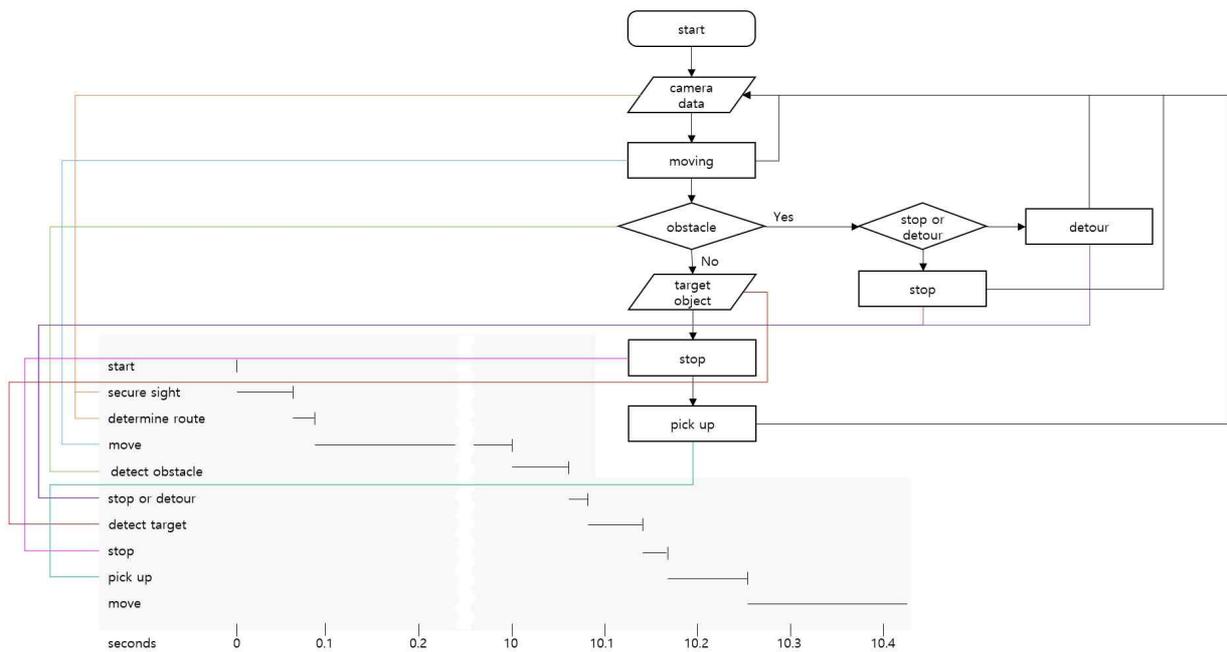


Figure 4. Timeline analysis for variable focus function camera installed AGV scenario

5. 결론

인터넷과 모바일 기술의 발전은 온라인 시장의 급격한 성장을 가져왔으며, 최근 COVID-19 사태로 인한 온라인 구매가 증가하면서 물품 배송을 위한 물류량도 급증하게 되었다. 하지만 물류센터의 근로자들은 열악한 작업 환경에 노출되어 있다. 그 결과, 작업 환경을 개선하고, 업무의 효율성을 증가시키기 위해 물류 로봇의 다양한 연구가 수행되었다. 기존에는 외부 장치나 자극이 필요한 형태의 로봇이 도입되었지만, 물류센터의 특성상 한계가 존재한다. 따라서, 본 논문에서는 외부 장치나 자극 없이 인지하는 방법을 제시하였다. 또한, 현재 자율주행 자동차용 인지 센서로 개발중에 있는 시스템인 가변 화각 카메라와 자율주행 자동차에 적용하기 위하여 mobileye에서 제시한 RSS 모델을 활용하여 물류 이송 로봇에 적합한 모형을 도출하여, 로봇 운용에 있어 사람과의 충돌을 방지할 수 있는 최소 인지 거리를 도출하였다. 또한, 도출된 결과를 바탕으로 안전성과 정확도 측면에서 모델이 물류 로봇에 적합한지를 검증하였으며, 유효한 결과를 확인할 수 있었다. 더불어 물류 로봇의 이동 속도를 구간에 따라 변화를 준다면 더 안전하게 근접한 거리를 유지할 수 있을 것이다. 이 결과를 바탕으로 물류센터에서 이송 로봇을 활용한 무인화에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- Bigne, E., Ruiz, C., and Sanz, S. (2005), The impact of internet user shopping patterns and demographics on consumer mobile buying behaviour, *Journal of Electronic Commerce Research*, 6(3), 193-209.
- Echelmeyer, W., Kirchheim, A. and Wellbrock, E., (2008), Robotics-logistics: Challenges for automation of logistic processes. In 2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2099-2103.
- Echelmeyer, W., Kirchheim, A., Lilienthal, A. J., Akbiyik, H. and Bonini, M., (2011), Performance indicators for robotics systems in logistics applications. In IROS Workshop on Metrics and Methodologies for Autonomous Robot Teams in Logistics (MMARTLOG) 55.
- Han, S.-M., Won, J.-W., Lee, S. and Smpil, E., (2020), The Study on the Efficiency of Parcels Unloading Robot at Delivery Logistics Terminal, *로지스틱스연구*, 28(6), 1-11.
- Jaiganesh, V., Kumar, J. D., and Girijadevi, J., (2014), Automated guided vehicle with robotic logistics system, *Procedia Engineering*, 97, 2011-2021.
- Jang, H-J. and Lee Y-J., (2018), 물류 로봇 (AGV) 동향, *The Korean Institute of Electrical Engineers*, 67(8), 8-12.
- Jang, S-Y. and Kim, Y-J., (2020), A Comparative Study on the Working Conditions of Field Workers in the Parcel Delivery Industry and Logistics Industry, *KOREA LOGISTICS REVIEW*, 30(5), 105-117.
- Juntao, L., Zhilei, W., Jun, Z. and Weiyi, C. (2015), Research of AGV positioning based on the two-dimensional Code Recognition Method. In 2015 International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS), 1-6.
- Kim, S.-J., Bae, K.-H. and Choi, C.-Y., (2016), A study on introduction of drone delivery service policies and development plans in countries. *Korea Logistics Review*, 26(1), 27-38.
- Kirchheim, A., Burwinkel, M. and Echelmeyer, W. (2008), Automatic unloading of heavy sacks from containers. In 2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 946-951
- Landschutzer, C., Wolfschluckner, A. and Fritz, M., (2018), Innovative automated unloading of parcels. In TRA 2018 Proceedings, 10427.
- Lee, S.-Y. and Yang, H. W., (2012), Navigation of automated guided vehicles using magnet spot guidance method, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(3), 425-436.
- Paromtchik, I. E. (2006), Optical guidance method for robots capable of vision and communication, *Robotics and Autonomous Systems*, 54(6), 461-471.
- Shalev-Shwartz, S., Shammah, S. and Shashua, A. (2017). On a formal model of safe and scalable self-driving cars. arXiv preprint arXiv:1708.06374.
- Thamer, H., Kost, H., Weimer, D., & Scholz-Reiter, B., (2013), A 3d-robot vision system for automatic unloading of containers. In 2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA) 1-7.

국내 의약품 온도관리 실패 사례 분석을 통한 의약품 콜드체인 개선방안

이종희[†], 김은조, 장희수, 장호성

인하대학교 아태물류학부

A Study on the Improvement of domestic pharmaceutical Cold Chain based on the Analysis of Temperature Control Failure Cases

Jong-hee Lee, Eun-jo Kim, Hui-su Jang, Ho-seong Jang

Asia Pacific School of Logistics, Inha University

Cold chain is known as "logistic that maintains appropriate temperatures," and among cold chains, pharmaceutical cold chain is characterized by important temperature management. However, as can be seen in the cases of Covid-19 vaccine, flu vaccine refrigerant contact, and S medicine, the cold chain of domestic medicine continues to fail to control the temperature. Therefore, this paper will derive the problems of domestic pharmaceutical cold chains (complex distribution structure, insufficient guidelines, and the absence of unified institutions) based on the actual case of temperature management failure. In order to solve this problem, it will be concluded by establishing a legal system to simplify the complex distribution structure, detailed and accurate regulations to prevent temperature fluctuations in the drug cold chain as much as possible, and suggesting measures nationwide management and supervision by the Ministry of Food and Drug Safety.

Keywords: Cold chain, Pharmaceutical cold chain, Temperature management

논문접수일 : 2021.10.12.

심사완료일 : 2022.06.24.

게재확정일 : 2022.06.27.

† Corresponding Author: azzu1997@naver.com

1. 서론

한국 의약품 시장은 2025년 최대 25조 원 규모로 성장할 것으로 전망된다. 연평균 성장률은 4.5~7.5%로 예측되는데, 이는 10대 선진국 중에서 가장 높은 수치에 달한다. 세계 의약품 시장의 규모는 2025년 연간 1조 6천억 달러에 이를 것으로 예측되며, 이 중에서 한국은 20조 원 규모로 진단된다(IQVIA, 2021). 또한 글로벌 물류 시장에서 콜드체인 시스템의 중요성은 나날이 증가하고 있는데, 특히 글로벌 콜드체인 내 의약품 콜드체인 시장의 규모 역시 확대되는 추세이다. 이에 따라 글로벌 흐름에 맞게 국내 콜드체인 시장에서도 의약품이 차지하는 비중 또한 점차 확대되고 있다. 미국 제약 전문 미디어 파마슈티컬 커머스(Pharmaceutical Commerce)에 따르면 2019년에 비해 현재 콜드체인 의약품 매출액은 약 15.9% 증가한 것으로 예측되며 콜드체인 의약품의 성장률은 59%로, 앞으로의 발전 가능성은 더 커질 것으로 보인다(Pharmaceutical Commerce, 2020). 국민 사이에서도 2020년 COVID-19 사태가 발생한 후 백신 및 의약품 유통에 관한 관심은 연일 화두로 떠오르고 있다. 하지만 높아진 국민의 관심과 커진 의약품 콜드체인 시장과 달리 온도관리 실패 사례들은 여전히 발생하고 있다. 의약품의 온도관리 문제는 안전성과 직결되는 중요한 문제이기 때문에 본 논문을 통해 콜드체인 내 의약품의 온도관리 개선방안을 제시하고자 한다.

1.1 일반 콜드체인 특징

국가기술표준원의 보고서에 따르면 콜드체인을 “단지 낮은 온도를 유지하는 것이 아니라 제품에 적합한 온도를 유지시키는 정온 물류”라고 정의하고 있다(Kim, 2018). 다시 말해서 콜드체인은 특정 저온이 필요한 의약품과 같은 제품에 대하여 항상 일정한 온도로 유지하면서 유통하도록 하는 일종의 저온 유지 유통 운송체계를 말하며 발송에서부터 제품이 최종 사용자에게 전달될 때까지 필요한 저장 및 저온 운송을 모두 포함하는 것이다 (Kim, 2008). 그리고 콜드체인은 기존 물류의 개념과는 다른 특징을 몇 가지 가지고 있다. 첫 번째로 ‘시효성’이다. 유통기간이 짧아 부패하기 쉬운 물품은 저장성이 낮기 때문에 정확한 유효기간 관리가 필요하다는 의미이다. 두 번째는 ‘융복합성과 복잡성’이다. 콜드체인의 전 과정에는 제냉 기술, 보온 기술, 상품 품질 메커니즘 및 모니터링 등에 대해 다양한 기반 기술이 필요하며, 취급되는 물품은 물품 종류에 따라 상이한 온도 제한 및 저장시간의 요구가 있어 콜드체인 관리가 복잡하다는 의미이다. 세 번째는 ‘고원가성’이다. 콜드체인은 설비 부분에 있어 냉장창고의 건설과 냉장 차량의 구매에 대규모 투자가 필요하며, 운영할 때에도 지속해서 전기 등의 에너지를 활용하여야 하므로 운영 원가 또한 상온 물류보다 높다는 의미이다(Kim et al., 2019).

1.2 의약품 콜드체인 특징

일반적인 콜드체인과 의약품 콜드체인의 차이점은 바로 ‘온도관리’에서 찾을 수 있다. Table 1은 콜드체인의 온도에 따른 분류를 정리한 표이다. 나타낸 바와 같이 일반 콜드체인은 보관되는 품목별로 온도에 따라 급속냉동(-50°C~-40°C), 냉동(-40°C~-10°C), 냉장(-10°C~10°C), 정온(10°C~40°C), 고온(40°C~60°C) 등으로 구분된다 (Lee, 2007). 해당 품목들은 세부적인 제품별로 구분하여 관리하기보다는 냉동어, 냉동육, 냉동식품, 유제품, 어패류, 곡물류 등 품목별로 광범위하게 구분된다.

Table 1. Cold chain temperature classification

분류	급속냉동		냉동		냉장		정온		고온
온도	-50℃	-50℃ ~ -40℃	-40℃ ~ -30℃	-30℃ ~ -20℃	-20℃ ~ -10℃	-10℃ ~ -2℃	-2℃ ~ 10℃	10℃ ~ 40℃	40℃ ~ 60℃

하지만 의약품 콜드체인은 해당 약품의 구성 요소에 따라서 같은 종류의 의약품이라도 제품별로 관리되어야 하는 온도의 차이가 있다. COVID-19로 인해 의약품 콜드체인 내에서도 중요성이 높아지고 있는 백신을 예로 들겠다. COVID-19 백신은 항원이 기본적으로 단백질로 구성되어 있으며, 온도에 따라 단백질이 변질될 가능성이 크기 때문에 보관과 유통을 나누어 온도를 모니터링해야 한다. Table 2는 온도에 따른 코로나 백신의 관리 온도를 종류별로 정리한 표이다. 이와 같이 백신 종류별로 나누어 보면, 아스트라제네카(이하 AZ로 칭한다)는 2℃~8℃로 6개월간 보관할 수 있으며 2℃~8℃로 3개월간 유통할 수 있다. 얀센은 -20℃로 24개월간 보관할 수 있으며 2℃~8℃로 6개월간 유통할 수 있다. 화이자는 -75℃에서 ±15℃의 변동을 허용하며 6개월간 보관할 수 있으며 -75℃에서 ±15℃의 변동을 허용하며 6개월간, 2℃~8℃로 5일간 유통할 수 있다. 모더나는 -20℃로 6개월간 보관할 수 있으며 2℃~8℃로 30일간 유통할 수 있다(Kang, 2020).

Table 2. Temperature management guidelines for each covid-19 vaccine

구분	보관	유통
Astra Zeneca	2℃~8℃ (6개월)	2℃~8℃ (3개월)
Janssen	-20℃ (24개월)	2℃~8℃ (6개월)
Pfizer	-75℃ ±15℃ (6개월)	-75℃ ±15℃ (6개월) 2℃~8℃ (5개월)
Moderna	-20℃ (6개월)	2℃~8℃ (30개월)

일반 콜드체인과 달리 의약품 콜드체인은 COVID-19 백신이라는 한 가지 품목 내에서도 제품별로 상이한 온도관리 지침을 가지고 있다는 점에서 의약품 온도관리의 중요성이 굉장히 높다고 할 수 있다.

2. 선행연구

2.1 의약품 콜드체인 관련 선행연구

최근 COVID-19 백신의 유통과정의 문제, 국내 의약품 시장의 성장, 인천 콜드체인 클러스터 등의 콜드체인 물류 인프라 증가에 따라 국내 의약품 콜드체인에 대한 관심과 연구의 필요성이 증가하고 있다. Table 3은 의약품 콜드체인 관련 선행연구를 정리한 표이다. Song and Shin(2020)은 국내 콜드체인 의약품 운송에서의 온도관리 실태 및 문제점을 알아보고자 하였으며, 운송에 이용되는 온도관리 포장과 온도관리 차량의 적격성 평가 기준을 수립과 기술적 한계를 토대로 의약품 공급업체 및 정부가 시행하는 제도 및 개선방안의 우선순위를 제안하였다. 또한 Sun and Sung(2018)은 상관관계 분석을 통해 의약품 콜드체인 3자 물류업체의 선정요인을 파악하고 선정요인들이 만족도에 미치는 영향력을 검증하였다.

Table 3. Prior studies of pharmaceutical cold chain

저자(년도)	주요 내용
Song and Shin (2020)	Locus Focus Model을 활용한 의약품 콜드체인 개선을 위한 우선순위 제시 (의약품 공급업체): 온도관리 차량의 화물 적재 시 공기 순환 공간 확보의 적격성 평가 기준을 수립 - 온도관리 차량 적재함 적정 공간에 화물 온도 측정 센서 설치 (정부): 의약품 안전성 테스트에 온도 분류 테스트를 추가 - 국내 백신 공급업체 선정 방법의 개선
Sun and Sung (2018)	상관 분석을 통한 의약품 체인 3PL 업체 선정요인 식별, 선정요인이 만족도에 미치는 영향 검증, 바이오콜드체인 물류 전문지식을 갖춘 기업이 표준화된 프로세스를 관리해야 한다는 점을 강조

2.2 의약품 유통구조 및 규제 관련 선행연구

본 연구의 주제는 온도관리 실패 사례 분석을 통해 국내 의약품 콜드체인 유통구조 및 관리·감독을 개선하는 개선방안에 초점을 두고 있다. 신선품 수요의 증가와 COVID-19 백신 수송을 계기로 콜드체인 기술의 발전은 날로 거듭되고 있다. 특히 오늘날에는 냉장·냉동고 온도 수준의 일반 콜드체인에서 나아가 영하 70°C에서 영하 270°C에 이르는 극저온을 유지할 수 있는 슈퍼 콜드체인 기술의 발전이 대두되고 있다. 그럼에도 불구하고, 콜드체인 의약품의 유통구조 문제로 인해 최근 독감 백신 폐기 문제와 같은 의약품 온도관리 실패 사례가 발생하고 있다. 따라서 본 연구의 문제점 분석에 앞서 의약품 유통구조 및 규제에 관한 선행연구 분석을 실시하였다. Table 4는 의약품 유통구조 및 규제에 대한 선행연구를 정리한 표이다. 이 표에서 요약한 내용을 보면 Kim(2019)은 의약품 도매업체 인터뷰를 통한 실태조사를 중심으로 의약품 도매상 유통구조의 문제점과 개선방안을 제도(정책)적 측면과 환경(시장 경제적) 측면으로 도출하고자 하였다. Lim(2016)은 국내 의약품 유통에 대한 제반 규제를 파악하고, 의약품 유통구조를 1유형[제조자·수입자(자사제품)→요양기관], 2유형[제조자·수입자(자사제품)→도매업자→(도매업자)→요양기관], 3유형[제조자·수입자(자사제품)→제조자·수입자(타사제품)→도매업자→(도매업자)→요양기관]의 세 가지의 유형으로 분류하여 의약품 유통의 특성을 분석하였다. Kim(2011)의 연구에서는 일본, 미국, 독일, 스페인 등 국가별 유통구조 분석을 토대로 하여 정부의 의약품 유통 관련 정책 수립에 대한 신중한 접근· 의약품 유통업체의 기업 개선노력·Korea Good Supplying Practice(이하 KGSP로 칭한다)의 법적 강제력 강화·의약품 유통 정보화 관련 제도의 개선 및 인프라 구축·유통 정보화 실현과 의약품 산업구조 변화를 통한 유통 투명화 시도의 필요성을 강조했다. Jung et al.(2011)는 의약품 제조기업의 물류 운영 형태와 물류 성과와의 관계에 관한 연구에서 위계적 다중회귀 분석을 통해 의약품 물류 아웃소싱 성과요인을 분석하였으며, 복잡하고 다원화되어 있는 국내 의약품 유통구조의 비효율성과 이의 주된 원인을 분석하고자 하였다.

Table 4. Prior studies of the distribution structure and regulation of Korea pharmaceutical industry

저자(년도)	주요 내용
Kim(2019)	<p>국내 의약품의 유통구조 문제: 허가기준의 표준화 및 관리 시스템 부족, 도매업체 간 거래 증가, 재고 관리 시스템의 부족, 재정적 건실성의 악화 요인, 불공정행위.</p> <p>개선방안: 인허가 기준 강화를 통한 도매업체 경쟁력 제고, 유통구조 투명성, 불공정행위 방지, 불합리한 시장구조 개선.</p>
Lim(2016)	<p>의약품 유통의 특성: 도매업자에 대한 제조업체 및 수입업체의 통제의 필요성, 보건기관과의 거래조건 결정에 있어 도매업자의 소극적 역할</p> <p>의약품 유통의 주요 법적 이슈: 약사법상의 이중처벌 규정 적용, 공정거래법상 불공정거래행위 규제, 의약품에 대한 품질 보증.</p>
Kim(2011)	<p>일본, 미국, 독일, 스페인 등의 국가별 의약품 유통구조 분석.</p> <p>의약품 유통 관련 정부 정책 수립에 대한 신중한 접근· 제약 유통업체의 개선을 위한 노력· KGSP의 법적 효력 강화· 의약품 유통정보시스템 개선 및 인프라 구축· 분배 정보에 대한 이해와 의약품 산업구조의 변경을 통한 유통 분배 투명화 노력의 필요성 강조</p>
Jung et al.(2011)	<p>계층적 다중 회귀 분석을 통한 의약품 물류 아웃소싱 성과 요인 분석, 의약품 물류 3PL이 활성화되기 위해서는 구조적 제약에서 벗어나기 위한 국가적 로드맵이 필요함, 기업 간 물류정보 공유, 각종 물류시설 표준화, 제품 포장의 표준화 등을 위한 IT분야에 대한 투자가 요구됨.</p> <p>의약품은 약사법상 다른 제품과 혼용되는 것을 금지하는 규정이 필요함.</p>

2.3 선행 연구와의 차별성 및 연구 필요성

오늘날 의약품 콜드체인 시장의 성장에 따라 의약품 콜드체인의 중요성은 갈수록 커지고 있으며 특히나 COVID-19 사태 이후 백신과 관련하여 국민의 관심도 집중된 상황이다. 그러나 COVID-19 백신, A약품 백신 관리 실패 사례에서 볼 수 있듯이 국내 의약품 콜드체인 유통은 지속적인 온도관리 실패를 보여주며 그 기대에 부응하지 못하고 있는 실정이다. 그동안 의약품 유통구조의 이론적 연구는 활발했지만, 유통구조가 아닌 상대적으로 복잡한 성격을 가지고 있는 의약품 콜드체인과 관련된 연구는 크게 활발하지 않았다. 특히, 의약품 콜드체인의 유통구조에 대해 연구한 논문은 전무한 실정이다. 이에 따라 국내 의약품 콜드체인 유통과정 상의 실제 실패 사례 분석을 통한 구체적인 의약품 콜드체인의 개선방안을 제시한 연구의 필요성도 대두되고 있다. 이에 필요성을 느끼고 본 연구에서는 기존의 연구들을 바탕으로 A약품 유통 실패 사례, 냉매 접촉 사례 등 현재 우리가 실제로 직면하고 있는 의약품 콜드체인 유통구조 상의 실패 사례 분석을 더 해 의약품 콜드체인 유통구조 문제의 실질적인 개선방안을 모색하고자 한다. 이를 위해 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 이 논문의 이론적 기반이 되었던 배경지식을 설명하는 제1장과 의약품 콜드체인에 관해 먼저 연구가 진행되었던 선행연구를 살펴본 제2장을 토대로 제3장에서는 온도관리 실패 사례를 분석하고 이를 통해 문제점을 도출하며, 제4장에서는 앞선 문제점을 개선할 수 있는 구체적인 개선방안을 제시하고자 한다. 마지막으로, 제5장에서는 앞선 연구 결과를 통해 논문의 결론을 짓고자 한다.

3. 사례 분석 및 문제점 도출

앞선 1장을 통해 의약품 콜드체인의 주된 특징에 있어 온도관리가 가장 중요하다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 국내 의약품 콜드체인 관리·감독 기관은 지속적으로 온도관리의 미흡함을 지적받아 왔다. 특히, 이번 COVID-19 사태로 인해 의약품 콜드체인에 있어 가장 중요한 온도관리가 미흡하다는 점이 크게 부각되고 있다. 지난 8월 4일, 보건복지위원회 소속 신현영 의원은 COVID-19 백신 접종 시작 후 폐기된 COVID-19 백신 물량이 9000회분 중 86%가 온도 조절 실패 때문으로, 현 의약품 콜드체인의 온도관리 허점을 지적했다(Kim, 2021).

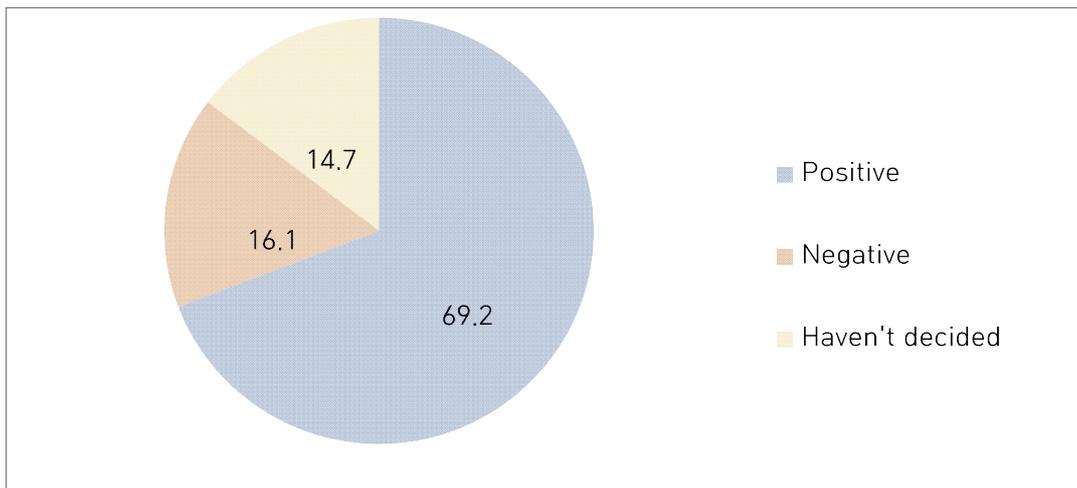


Figure 1. Survey on vaccination intentions

Figure 1은 보건복지부의 COVID-19 백신에 대한 인식조사 결과를 정리한 그림이다. 이 인식조사에 따르면 국내 도입 COVID-19 백신의 안전성 및 효과성의 정보에 대해 과반수 이상인 53%가 충분하지 않다는 답변을 했으며, 예방접종을 받을 의향이 없다고 응답한 사람은 16.1%, 모르겠다고 응답한 사람은 14.7%로 부정적인 답변이 30.8%에 달했다. 부정적인 답변을 한 이유로는 예방접종 이상반응에 대한 우려가 85.1%로 가장 높은 비율을 기록하였다(Ministry of Health and Welfare, 2021). 예방접종 이상반응의 경우 백신 자체에 대한 신뢰뿐만 아니라 온도이탈로 인한 부작용도 포함되어 있다는 점을 고려하면 의약품 콜드체인에 대한 불신이 심각하다는 것을 알 수 있다. 이 장에서는 의약품 콜드체인의 온도관리 문제가 큰 사회적 이슈가 된 현 상황에서 구체적인 온도관리 실패 사례를 통해 의약품 콜드체인의 온도관리에서의 문제점을 분석하고자 한다.

3.1 백신 상온 노출 사례 분석

지난 2020년, 독감 유통시 냉장 차량에서 백신이 들어있는 상자를 꺼내 병원으로 이동하는 과정에서 온도관리의 중요성을 간과한 채 상온 노출하여 백신 중단 및 전량 폐기에 이르는 상황이 발생했다. 단순한 온도변화에도 민감하게 반응하며 몸에 직접 주사되는 백신에 있어 상온 노출 문제는 치명적이었다. 해당 실패 사례의 경우 온도관리에 미흡했던 해당 유통업체만의 단독 과실이라고 보기 어렵다. 해당 문제의 근본적인 원인은 한국 의약품 콜드체인의 기형적인 유통구조에서 찾을 수 있다(Moon, 2020). 앞서 문제가 발생한 독감백신 유통을 담당했던 A약품은 제조사가 아니다. A약품은 7개의 백신 제조사에게 백신을 구입한 뒤 이를 직접 배달하지 않고 다시 의약품 유통 중개업체인 A사에 맡겼다. A사의 내장 탑재 보유 대수는 전 백신의 운송량을 감당할 수 없었기 때문에 다시 전문의약품 운송 면허를 보유한 물류기업과 계약을 맺

었다. 물류업체 또한 일부 냉장 탑차를 보유하고 있긴 했으나 보유량이 넉넉하지 않아 대부분의 물량을 개인·법인 차량과 위탁·수탁 계약을 맺어 하청을 통해 물량을 처리했다. 그뿐만이 아니라 A사는 수도권에만 물류 배송망을 확보했기 때문에 비수도권지역의 경우 따로 다른 지역 물류 업체에 하청을 맡겼다. 이렇듯 국내 의약품 콜드체인은 하청업체에 재하청을 맡겨 연속된 하도급 형태로 진행되는 피라미드식 구조이다. 이번 사례 역시 A약품에서 발생한 사건이 아니라 재재하청을 맡긴 냉장 탑차 운송자가 온도관리의 중요성을 간과하여 발생한 일이었다. 하청을 맡긴 A사에서 온도 유지의 중요성을 교육했지만 제대로 관리·감독이 되지 않았기 때문에 해당 사태가 발생했다. Figure 2는 본 사례의 유통구조를 요약한 그림이다.

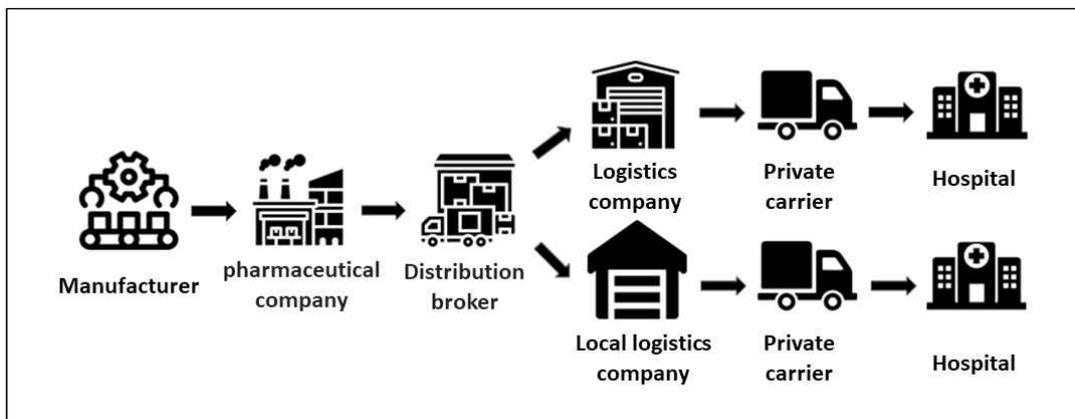


Figure 2. Distribution structure

3.2 냉매 접촉 사례 분석

2020년 11월 9일, 식품의약품안전관리처(이하, 식약처로 칭한다)에서는 지난 말 김해시 보건소에서 지역 병원으로 발송된 독감백신 600-700개에서 백색 입자가 발견되었다는 신고가 접수되었다. 식약처에서는 백신 수송 과정에서 냉매에 백신이 직접 접촉되었고 이로 인해 백신이 동결되어 발생한 내인성 단백질로 보고 이미 접종된 분량을 제외한 모든 분량을 폐기하였다(Gye, 2020). 2-8°C를 유지하기 위해서는 백신과 달리 냉매는 이 온도보다 낮기에 동결의 가능성이 있어 냉매에 백신이 직접 접촉하는 것은 피해야 하며 이는 백신의 안정성에도 영향을 주는 중요한 문제이다. 이에 따라 PIC/S GDP 국제 기준은 냉매에 의약품이 닿지 않을 것을 요구하고 있지만 국내 독감 백신 관련 규정에는 이러한 기준이 존재하고 있지 않다. 해당 냉매 접촉 사태가 발생했음에도 불구하고, 2021년 10월 2일 현재까지도 독감백신 관련 규정에는 냉매 접촉에 관한 지침이 존재하지 않으며, 오로지 COVID-19 백신 규정인 「코로나 19 백신 보관 수송 관리 가이드라인」(Korea Centers for Disease Control and Prevention, 2020)에만 명시되어 있다.

또한 이 사례를 통해서 의약품 콜드체인 관련 지침들은 미흡뿐만 아니라 통일되지 않은 채 존재한다는 점도 확인할 수 있다. 국내 의약품 콜드체인은 「의약품유통관리기준 해설서」(Ministry of Food and Drug Safety, 2011), 「생물학적 제제 등의 제조 판매관리 규칙」, 「코로나 19 백신 보관 수송 관리 가이드라인」(Korea Centers for Disease Control and Prevention, 2020) 등으로 기준들이 나뉘어 존재하고 있다.

Table 5. Guidelines for cold chain management of pharmaceuticals

KGSP, 의약품유통관리기준 해설서 (Ministry of Food and Drug Safety)	생물학적 제제 등의 제조 판매관리 규칙
2°C ~8°C 로 유지	10°C 이하로 유지

Table 5는 국내 지침들의 의약품 콜드체인 관리 방법을 정리한 표이다. 정리한 내용을 보면 앞선 냉매 문제뿐만 아니라 수송 온도에서 「의약품의 품목허가·신고·심사 규정」 제19조제1항에는 2 ~ 8°C를 요구하고 있지만 「생물학적 제제 등의 제조 판매관리 규칙」의 별표로 첨부된 수송 용기의 기준에 따르면 10°C이하만 유지하면 되는 것으로, 온도 관리 지침에서도 각 지침끼리 통일되지 않고 있다(Song, 2021). 이런 사례들은 국내 의약품 콜드체인에 있어 명확하게 하나로 통일된 지침이 없다는 것을 보여준다.

3.3 문제점 도출 및 분석

앞선 두 사례 분석을 통해 3가지의 문제점을 도출할 수 있었다. 먼저, A약품 사례에서는 복잡한 유통구조의 문제를 도출했다. 복잡한 유통구조는 온도관리의 효율성 측면에서 큰 단점을 가진다. 효율적인 관리를 위해서는 복잡한 구조보다는 간단한 구조가 바람직하다. 유통단계가 증가할수록 복잡성으로 인해 하위 유통 과정에 문제가 없는지에 관한 정보 파악이 어렵다. 따라서 상위 단계에서 체계적인 관리 감독이 진행되더라도 하위 단계의 유통 관리 현황 파악이 어려워 온도관리의 실패가 일어나기 쉽다. A약품의 사례의 경우 역시 의약품 유통업체인 A사에서 온도관리의 중요성을 파악하고 이를 하청 업체에 교육했지만 유통구조 하위 단계에서의 이탈로 문제가 발생했다. 그렇기에 유통구조를 간단화하는 방안이 필요하다.

두 번째 사례인 냉매 접촉 사례에서는 두 가지 문제점이 도출되었다. 첫 번째는 미흡한 지침으로 인한 온도관리 실패이며 두 번째는 통일된 관리·감독 기관의 부재이다. 의약품에서의 온도는 적정온도를 약간만 벗어나도 해당 의약품을 폐기해야 하는 아주 중요한 문제이다. 그렇기에 의약품 콜드체인의 지침은 콜드체인 내에서 발생 가능한 모든 상황에 대해 자세하고 명확해야 한다. 하지만 냉매 접촉 사례의 경우 지침은 의약품과 냉매가 서로 닿는 상황에 대해서도 예상해야 했으나 이를 미리 방지하지 못했다. 그렇기에 현 의약품 관련 지침들이 온도관리를 달성하기 위해서는 더욱 자세하고 명확한 지침이 필요하다. 그리고 같은 대상을 공유하는 지침끼리도 서로 다른 지침이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 통일된 지침을 제시할 수 있는 통일 관리·감독 기관이 부재하다는 것을 의미한다. 통일된 지침의 부재는 지침 연구의 중복으로 비효율성을 초래할 수 있으며 관련 취급자도 이에 혼란을 가질 수 있어 온도관리에 악영향을 미칠 수 있다.

4. 개선방안

본 논문 1장에서는 일반 물류와 의약품 콜드체인의 가장 큰 차이점이자 의약품 콜드체인의 핵심인 온도관리의 중요성을 언급하였다. 그러나 3장에서 구체적인 온도관리의 실패 사례 분석을 통해 현재 콜드체인 내 복잡한 유통구조로 인해 하위 유통단계에 있어 온도 관리·감독이 원활하지 않다는 문제점을 도출했다. 또한 콜드체인 온도관리를 위해 제시되어 있는 지침 또한 미흡한 상태이나 그마저도 통일되지 않아 비효율적인 측면이 있음을 확인할 수 있었다. 이 내용을 기반으로 4.1장에서는 복잡한 유통구조를 단순화하는 법적 개선방안을 제시한다. 물류 산업 유통구조의 경우 다단계식 하청구조로 굳혀져 있기 때문에 구조 자체를 한 번에 바꾸기란 쉽지 않다. 따라서 점진적으로 변화할 수 있도록 법률적 측면으로 접근하는 방안이 필요하다. 4.2장에서는 국제 기준과의 비교를 통해 미흡한 지침을 보완하는 개선방안을 제시한다. 해당 장에서 제시하는 국제 기준의 경우 Technical Report 발행을 통해 세계적으로 입증된 콜드체인 가이드라인으로, 해당 국제 기준에 맞게 보완하는 것이 국내 콜드체인 관리·감독 체계 개선을 위해서 적합할 것으로 사료된다. 4.3장에서는 현재 국내 콜드체인 내 통일된 관리·감독 기관의 부재를 해결하기 위해 기존에 존재하는 기관들의 분석을 통해 적합한 기관을 모색하고자 한다.

4.1 복잡한 유통구조 개선방안

앞선 A약품 유통 실패 사례를 분석한 결과, 현재 콜드체인은 복잡한 유통구조로 형성되어 있어 유통과정에 대한 전반적인 관리가 어려우며 이는 곧 온도관리의 실패로 이어졌다는 사실을 알 수 있었다. 의약품 유통은 하도급이 많을수록 유통구조가 복잡해져 유통 흐름을 관리하기 어렵다는 문제가 있다(Kim, 2019). 본 장에서는 3.1장 분석 결과에 근거하여 복잡한 유통구조를 간소화하기 위해 법적 제도를 통한 개선방안을 제안하고자 한다. 복잡한 유통구조의 문제는 타 산업의 사례를 벤치마킹하여 개선할 수 있다. 건설업에서는 오래전부터 과도한 하청구조 문제에 관심을 가져왔다. 도급이란, 상대방이 결과에 대해서 보수를 지급할 것을 약정하는 것이다(민법 제664조). 이에 따르면 결과에 따라 보수를 지급하는 것이기 때문에 일하는 대상은 중요하지 않으며, 그 결과 건설업에서는 하도급 계약이 빈번하게 사용되었다. 하도급의 경우 분업을 통해 효율적인 작업을 할 수 있다는 장점이 있지만, 수급인(원사업자)이 하도급인보다 우월적인 위치에 있기 때문에 하도급인의 이익을 침해하는 일이 빈번하게 발생했다(Ko, 2016). 이러한 문제를 방지하기 위해 「건설산업기본법」은 제3장 ‘도급계약 및 하도급계약’을 통해 하도급관리, 참여제한, 적정성 심사 등 하도급에 대해 상세하게 다루고, 과도한 하도급을 제한하고 있다. 물류 산업 역시 하도급에 대해 「하도급거래 공정화에 대한 법률」을 통해 하도급 문제를 다루고 있다. 그러나 「하도급거래 공정화에 대한 법률」의 경우 물류 산업 뿐만이 아니라 모든 산업에 있어 공통적으로 적용되는 법률이며, 건설산업이 관련 법안에 하도급 문제를 직접 언급하며 집중적으로 관리하는 것과 달리 물류 산업의 경우 물류 관련 법안에서 하도급 문제를 직접적으로 다루고 있지 않다. 구체적으로, 건설업에서는 「건설산업기본법」 제29조를 통해 ‘건설공사의 하도급 제한’으로 하도급인의 권익 보호와 공사결과 품질 향상 등을 위한 하도급 제한을 하고 있다. 그리고 ‘건설공사의 하도급 제한’에는 ‘일괄하도급의 금지’가 있다. 건설업자는 일부 예외 사항을 제외하면 도급받은 건설공사의 전부 또는 대통령령으로 정하는 주요 부분의 대부분을 다른 건설사업자에게 하도급할 수 없다(건설사업기본법 제29조제1항). 앞서 언급했듯, 현재 국내 전체 산업에 있어 하도급거래 공정화에 대한 법률이 존재하나, 물류정책기본법 등 물류 관련 법안에 있어서 하도급 문제를 다루는 법률이 존재하지 않아 물류 산업 법안 내에도 하청 관련 내용이 추가될 필요가 있다. 제29조제2항제2호의 경우, 품질 향상을 위해 필요한 경우 대통령령으로 정한 요건에 해당하는 2인 이상에게 분할하여 하도급할 수 있다는 내용이 존재한다. 물류 산업의 경우에는 이렇게 경우를 나누지도 않고 있을뿐더러 제한도 두고 있지 않아 하도급이 만연하고 있으며 체계적인 관리가 어렵다. A약품 사례 역시 콜드체인의 유통구조에 있어 직접적인 관여 없이 중개만 하는 사업자가 존재했다. 따라서 물류 산업에서도 과도한 하도급을 방지할 수 있도록 물류정책기본법 등 물류 관련 법안에 ‘일괄하도급의 금지’ 등의 조항을 추가하여 직접적으로 다루어야 한다. 또한 이 조항에는 대통령령으로 정한 요건에 해당할 경우에만 하도급을 할 수 있도록 경우를 나누어야 한다. 이러한 법안이 제정된다면 과도한 하도급이 방지될 수 있으며 복잡한 유통구조가 단순화됨으로써 온도관리가 원활하게 진행될 수 있다.

건설업에서는 「건설산업기본법」 제35조를 통해 ‘하도급 대금 직접지급’에 대해서도 언급하고 있다. ‘하도급 대금 직접 지급’은 수급인의 문제로 하도급인의 권익이 침해될 가능성이 있다고 생각되는 일부 경우에 대해 원청에서 직접 하도급인에게 대금을 지급하는 방법이다. 실제로 서울시의 경우 공사대금을 다른 용도로 인출할 수 없는 ‘대금 e 바로지급’ 시스템을 운영하여 원도급사가 대금 수령 즉시 하도급사에 지급이 가능한 건설공사 대금 지급 시스템을 운영하고 있다. 또한, 서울시 발주 공사의 경우 2020년 기준 70%까지 하도급 대금을 직접 지급하고 있다(Yeo, 2020). 건설업에서 시행하고 있는 ‘하도급 대금 직접지급’ 역시 유통구조 문제에 있어 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다. 건설업의 경우를 접목하여 물류 산업에서도 원청에서 하도급 대금을 직접 지급하는 방법을 시행한다면 콜드체인 내 원청의 영향력을 높임으로써 원활한 관리가 가능해진다. 따라서 물류정책기본법 등 물류 관련 법안에 ‘하도급 대금 직접지급’ 조항을 추가하는 방안을 제안한다.

4.2 미흡한 지침 개선방안

앞선 냉매 접촉 사례에서 미흡한 의약품 콜드체인 지침 때문에 온도관리에 실패했다는 사실을 알 수 있었다. 약간의 온도 이탈도 치명적인 결과가 될 수 있는 의약품 콜드체인에서 온도이탈을 최대한 방지할 수 있는 세세하고 정확한 규정은 필수적이다. 냉매 접촉 사례에서 국내 기준과는 달리 국제 기준은 이를 이미 고려하고 있었다는 점에서 이 문제를 국제 기준인 PIC/S GDP와 국내 의약품 콜드체인 관련 가이드라인들과 비교 후 차이점을 도출하는 과정을 통해 개선할 점을 찾고자 한다. 다음 내용은 한국해양대학교 송세웅 박사의 논문에 기반한 내용이다(Song, 2021). Table 6은 PIC/S GDP와 국내 지침을 비교한 표이다. PIC/S GDP와 비교했을 때 첫 번째 차이로 우리나라의 지침들은 의무 사항과 권장 사항에서 차이를 보인다. PIC/S GDP의 경우 정기적으로 온도 측정기기의 교정을 요구하지만 앞서 언급한 의약품 콜드체인 관리 기준 중 하나인 「의약품유통관리기준 해설서」의 경우에는 의무적으로 요구하고 있지 않기 때문에 이를 의무 사항으로 바뀌어야 한다. 또한 PIC/S GDP는 온도관리 포장과 온도관리 차량에 대한 적격성 평가를 매우 중요하게 생각해 의무적으로 요구하지만 국내는 그렇지 않고 있다. 적격성 평가는 「완제의약품 제조 및 품질관리기준 가이드라인, 제2개정판」(Ministry of Food and Drug Safety, 2018)에 따르면“기계·설비가 설계한 대로 제작, 설치되고 목적인 대로 작동하여 원하는 결과가 얻어진다는 것을 증명하고 이를 문서화하는 것”이라고 정의된다. 국내 관리 기관들도 적격성 평가에 대한 중요성을 인식하고 온도관리에 대한 적격성 평가를 의무사항으로 바뀌어야 한다. 다른 차이점은 교육 내용과 세세한 상황 고려의 차이가 있다. 대표적으로 PIC/S GDP는 계절별로 주위 온도가 고려되고 있지 않다. 운송 중 주변 온도에 영향을 받을 수 있고 계절마다 포장방법이 주위 온도에 맞춘 포장방법을 관련 운송자가 교육받을 것을 요구하고 있지만 국내 지침의 경우 계절에 따른 다를 수도 있지만 현재 이를 고려하지 않기 때문에 이를 고려한 지침을 만들고 관련자가 이를 교육받도록 규정해야 한다.

Table 6. Comparison with Korea guidelines and PIC/S GDP

	국내 의약품 콜드체인 가이드라인	국제 의약품 콜드체인 가이드라인 (PIC/S GDP)
온도 측정 기기 교정	권고(의약품유통관리기준 해설서)	의무사항
적격성 평가	권고(완제의약품 제조 및 품질관리기준 가이드라인 제2개정판)	의무사항
교육 내용과 세세한 상황 고려	-	온도 제어 차량을 사용하는 경우 운송 중에 사용되는 온도 모니터링 장비를 정기적으로 유지 및 보정해야 함. 대표적인 조건에서 temperature mapping을 수행해야 하며, 해당되는 경우 계절적 변동을 고려해야 함. (PIC/S GDP 9.4.4)

4.3 통일된 기관의 부재 개선방안

의약품 콜드체인 등의 국내 의약품 유통 관리는 식약처가 정한 「의약품유통관리기준」을 따른다. 그러나 이와 관련하여 의약품 유통을 담당하는 도매상의 관리·감독과 행정처분은 해당 도매상 소재지 관할 지방자치단체가 담당하도록 업무가 이양되어 있다. 즉, 국내 「의약품유통관리기준」은 서류상의 명목적인 지침으로 의약품 유통과정 중 보관 및 취급에 관한 규정이 존재하지 않는다. Table 7은 이양된 업무를 정리한 표로 이양된 내용을 확인할 수 있다.

Table 7. KGSP Works

KGSP의 업무 이양 (식약처 → 지방자치단체)					
의약품 광고 지침	의약품 표기 지침	의약품 품질 검증	지정관리	보증 관리	의약품 실태 조사

또한 다른 관리·감독 기관으로 질병관리청이 있다. 질병관리청은 「코로나 19 백신 보관 수송 관리 가이드라인」을 통해 의약품 유통 관리를 하고 있지만, 이 지침은 COVID-19 백신의 유통에만 적용되는 지침이며 질병관리청의 역할 역시 전염병 관리, 효율적 만성질환 관리, 질병 대응 연구개발 역량 확보로 의약품 내에서도 백신에만 치중되어 있다. 이런 면들을 종합했을 때 전국적인 관리를 할 수 없는 지방자치단체는 부적합하며 관리·감독이 백신에만 치중되어 있는 질병관리청 역시 부적합하다. 따라서 Table 7에서 언급된 ‘지방자치단체로 이양된 업무’를 다시 식약처로 재이양하여 전국단위의 관리·감독을 전 의약품에 걸쳐 진행하는 것이 가장 적합하다. 하지만 식약처의 전문 분야는 식품, 의약품의 안전이다. 온도관리 달성을 위해서는 콜드체인을 중점적으로 관리·감독하는 기관이 필요하다. 이를 위해서는 안전분야뿐만 아니라 물류 분야 역시 전문성에 기반한 깊은 이해를 가지고 콜드체인에 접근해야 하지만 식약처는 물류적 전문성을 갖추지 못한 점이 문제다. 식약처의 세부조직은 소비자위해예방국, 식품안전정책국, 수입식품안전정책국, 식품소비안전국, 의약품안전국, 바이오생약국, 의료기기안전국으로 이루어져 있다. 의약품안전국에 의약품관리과, 의약품품질과가 있고 바이오생약국에 바이오의약품품질관리과가 있긴 하지만 역시 안전에만 전문성이 치중되어 있어 물류적 전문성을 갖춘 조직이 존재하지 않는다.

여러 측면을 고려했을 때, 식약처가 지방자치 단체로부터 업무를 이양받아 의약품 콜드체인 통일 관리·감독하는 기관이 되는 것이 적합하지만 물류적 전문성이 부족하다는 점을 앞에서 지적했다. 그렇기에 콜드체인을 전문적·체계적으로 관리하기 위해 식약처의 산하단체이자 정부산하기관인 한국콜드체인안전관리원 신설을 제안한다. 「정부산하기관 관리기본법」에는 정부산하기관이 “정부로부터 출연금·보조금 등을 받는 기관 또는 단체, 법령에 의하여 직접 정부로부터 업무를 위탁받거나 독점적 사업권을 부여받은 기관 또는 단체로서 제3조의 규정에 의한 기관 또는 단체를 말한다.”(정부산하기관 관리기본법 제2조제1항)로 정의하고 있다. 콜드체인의 관리·감독 업무를 국무총리 직할 처인 식약처로부터 위탁받는 점에서 한국콜드체인안전관리원이 정부산하기관의 조건으로 적합하다. 또한 다른 식약처 산하단체에는 한국식품안전관리인증원이 있다. 이 기관의 설립의 근거가 되는 「한국식품안전관리인증원의 설립 및 운영에 관한 법률」에 따르면 기관 설립의 목적이 해당 업무의 전문성과 체계성을 위해 설립되는 것에 있다고 밝히고 있다. 한국콜드체인안전관리원 역시 콜드체인 관리의 전문성과 체계성을 위해 설립되어야 한다는 점에서 산하단체가 될 이 유로 충분하다. 한국콜드체인안전관리원은 콜드체인의 안전관리를 주목적으로 콜드체인의 상시적인 관리·감독을 할 것을 기대한다. 이를 달성하기 위한 의약품 혹은 식품의 특성에 관련한 전문성은 소속 기관인 식약처를 통해 얻을 수 있다. 하지만 앞서 언급한 것처럼 물류적 전문성은 식약처에게 기대할 수가 없다. 그렇기 때문에 다른 물류적 전문성을 갖춘 정부부처와 협력해야 할 것이다. 국내 물류 관련 정부부처는 국토교통부와 해양수산부가 있다. 해양수산부의 경우 해운 물류국을 통해 해상 물류에 집중하고 있고 국토교통부는 해상 물류를 제외한 물류 분야에 집중하고 있다. 식품 콜드체인의 경우 해상물류의 비중이 크기 때문에 두 정부부처 모두와의 협력이 필요하다는 점을 고려한다면 내륙물류와 항공물류의 경우 국토교통부와의 협력을 통해 전문성을 얻고 해상물류의 경우 해양수산부와의 협력을 통해 전문성을 얻는 것이 바람직하다. 또한 콜드체인이 ‘융복합성과 복잡성’라는 특징으로 기술집약적인 산업임을 고려할 때 과학기술정보통신부 혹은 산업통상자원부와의 협력도 기대해 볼 만하다. 특히 4차 산업혁명 시대가 도래하면서 기존 산업혁명의 발전 속도보다 빠르고 사업전환의 패러다임이 예측할 수 없어 정부부처간 협력의 중요성이 강조되고 있다(Lee et al., 2019). 이런 시대 흐름에 따라 전문성을 해당 정부부처와 협력을 통해 키우는 것이 더욱 적합하다.

5. 결론

현재, 콜드체인 산업이 크게 성장하고 있고 콜드체인 내의 의약품 콜드체인의 비중 역시 갈수록 커지고 있으며 COVID-19 사태로 국민들의 관심도 커지고 있다. 의약품 콜드체인은 온도관리가 중요하다는 것을 1장을 통해 확인했지만, 의약품 콜드체인의 온도관리 실패는 지속적으로 발생하고 있으며 관련 연구도 미흡한 상황이다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 사례 분석을 통한 온도관리 개선방안을 제시하고자 했으며 사례로는 최근 발생한 A약품 사례와 냉매 접촉 사례를 분석하는 과정을 진행했다. 그리고 이를 통해 현재 온도관리의 문제점은 복잡한 유통구조, 미흡한 지침, 통일된 관리·감독 기관의 부재가 문제점으로 도출되었다. 각 문제점에 대응되는 개선방안은 '일괄하도급의 금지' 조항과 '하도급 대금 직접지급' 조항의 추가, 의무사항 지침과 주변 환경을 고려한 지침과 교육 내용의 추가, 한국콜드체인안전관리원 신설이 제안되었다. 하지만 본 논문에서는 여러 산업 분야를 아우르는 개선방안을 제안했기 때문에 실제 현장의 상황과 괴리가 있을 수 있다는 한계점이 있다. 이 한계를 넘기 위해서는 다음과 같은 선행과제들이 있다. 법적 방안과 관련하여, 기존 법안을 개정하거나 필요할 경우 새 법안을 발의해야 하므로 관련 정부 부처 간의 조율과 심의가 필요하다. 또한 물류 산업의 하도급 예외 조항 신설에 앞서 적합하고 자세한 예외 조항을 만들 수 있게 충분한 전문가의 연구가 필요하다. 미흡한 지침의 개선 경우에는 이 논문에서 다루지 않은 미흡한 지침이나 앞으로도 시대변화에 맞게 지침을 변경하는 작업이 필요하므로 지침 개선을 지속적으로 할 수 있는 권한이 있는 기관에서 지침 개선의 필요성을 충분히 인식해야 한다. 마지막으로 한국콜드체인안전관리원 신설의 경우에는 지방자치 단체의 업무 재이양과 함께 식약처와 협력 정부부처가 산하단체의 필요성을 인식해야 하며 조직 구성과 법적 근거가 될 법률 발의 등 기관 신설에 필요한 준비들 또한 충분히 진행되어야 한다. 의약품 콜드체인은 지속 성장하는 추세이며 갈수록 중요성이 부각되고 있는 분야로, 의약품 콜드체인에서 온도관리는 중요하다. 따라서 앞으로도 이와 관련한 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각되며 추후 연구도 실제 현장 상황에 대한 고려를 통한 추가적인 개선방안이 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- Anh K-S., Park S-H., Lee H-C., Yeo G-T. (2020), An Evaluation of Cold Chain Cluster Competitiveness in the Metropolitan Area, *Journal of Digital Convergence*, 18(10), 181-194
- Gye S-H. (2020), Ministry of Food and Drug Safety Disposes Suspected Flu Vaccine for "Refrigerant Contact" Additional Disposal..."There's no safety issue", *Yonhap News*, 2020.11.09., <https://www.yna.co.kr/view/AKR20201109128900017>
- IQVIA. (2021), *Global Medicine Spending and Usage Trends: Outlook to 2025*, USA
- Jung S-T., Ji Y-H. (2011), A Study on the Relation between Logistics Performance and Logistics Operation Types of Korean Pharmaceutical Manufacturing Companies, *Korea Logistics Review*, 21(2), 231-256
- Kang C-S. (2020), "It's the same vaccine...Pizer, minus 70 degrees. Moderna, minus 20 degrees. Why?", *The Joongang*, 2020.11.17., <https://www.joongang.co.kr/article/23922310#home>
- Kim D-S. (2019), The problems of the distribution structure of pharmaceutical wholesalers and ways to improve them, pp. 43~54, Korea Biomedicine Industry Association, Korea
- Kim H-S., Sang O-B. (2019), A study on the Activation Schemes of Cold Chain Logistics System in Incheon Port, *Journal of Korea Port Economic Association*, 35(3), 19-40
- Kim J-K. (2018), Current Status and Standardization Trends of Fresh Logistics Industry, *National Institute of Technology and Standards*, 107, 4-19
- Kim S-J. (2021), "COVID-19 cold chain, many institutional loopholes in storage", *Gukje News*, 2021.08.05., <http://www.gukjenews.com/news/articleView.html?idxno=2281170>
- Kim S-W. (2011), International Investigation on the Distribution System of Medical Supplies, *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management*, 11(2), 121-135
- Ko H-S. (2016), A Study on the Direct Payment of the Person Placing an Order, *Ajou Law Review*, 10(3), 19-48
- Korea Centers for Disease Control and Prevention. (2021), *COVID-19 Vaccine Storage and Transportation Management Guidelines*, Korea
- Lee S-Y., Cho K-H., Park K-K. (2019), A Study on the Collaboration between Government Departments in the Fourth Industrial Revolution Era, *Journal of Digital Governance*, 17(6), 35-42
- Lim H-Y. (2016), Regulation of Distribution of Pharmaceutical Products and Main Legal Issues in Korea, *Distribution Law Review*, 3(2), 9-32
- Ministry of Food and Drug Safety. (2011), *Korea Good Supplying Practice*, 4th ed, Korea
- Ministry of Food and Drug Safety. (2018), *Guidance on Good Manufacturing Practices (GMP) for Medicinal Products*, 2nd ed, Korea

- Ministry of Health and Welfare. (2021), A perception survey related to COVID-19, Korea
- Moon H-C. (2020), A hole in the flu vaccine "Cold Chain". Why? Multi-level subcontractors and directors are poor, The JoongAng, 2021.09.23., <https://www.joongang.co.kr/article/23879371#home>
- Pharmaceutical Commerce. (2020), Biopharma Cold Chain Sourcebook, USA
- Pharmaceutical Inspection Co-operation Scheme. (2014), Guide to Good Distribution Practice for Medicinal Products, Swiss
- Song S-W. (2021), A Study on the Improvements of the Inland Transportation System for Cold Chain Pharmaceuticals: Focused on Temperature Control, Dissertation, Korea Maritime & Ocean University, 32-88
- Song S-W., Shin C-H. (2020), Improvements on the Inland Transportation of Cold Chain Pharmaceuticals in Korea: Focused on the Qualification and Institutional Improvements for Temperature Controlled Packaging, Korea Logistics Review, 30(3), 71-81
- Sun I-S., Sung J-A. (2018), An Empirical Study on the Influence of the Selection Factors of the Cold Chain Third Party Logistics Companies on Satisfaction, Journal of Korea Port Economic Association, 34(3), 1-16
- Yeo I-G. (2020), Seoul Metropolitan Government will pay the subcontract price for construction work within 5 days, The News, 2020.03.20., <http://www.kharn.kr/news/article.html?no=12281>

반도체 Back-end Process의 Miniload AS/RS 개발 및 구현 (사례연구)

장용훈¹, 판야카미², 장윤석³⁺

¹랩투마켓

²NXP Manufacturing Thailand(ATBK)

³한국항공대학교 항공교통물류학부

Develop and implementation of Miniload AS/RS in Semiconductor Back-end Process-A Case Study

Yong Hoon Jang¹, Panya Kamme², Yoon Seok Chang³

¹Lab to Market Inc., Engineering

²NXP Manufacturing Thailand(ATBK)

³School of Air Transport & Logistics, Korea Aerospace University

A Miniload AS/RS system is a logistics automation system that supports the storage and in/outbound of various types of cargo. It can hold up to 50kg of cargo per tote box and is widely used in places that require the storage of small quantities of various types of goods. Mini-Load system is already applied in various types of Logistics warehouses. This study conducted a study on introducing Mini-load AS/RS to improve logistics work in the semiconductor back-end process. We gathered and analyzed various types of data considering the overall production environment, which includes the processing time, transportation time of worker/WIP and requirements/constraints of the field. By automating labor-intensive, inefficient work environments such as transporting and picking work that depends only on human resources, improvements such as minimizing picking work time, operator's travel distance, and reducing workspace were obtained. To demonstrate the superiority and efficiency of Miniload AS/RS, we compared travel distance, working time and space utilization using real data. From the results, we verify that the proposed automation system can enhance productivity and improve the working environment.

Keywords: AS/RS 자동보관창고, Miniload 미니로드, 자동화 Automation

논문접수일 : 2022.06.10.

심사완료일 : 2022.06.24.

게재확정일 : 2022.06.24.

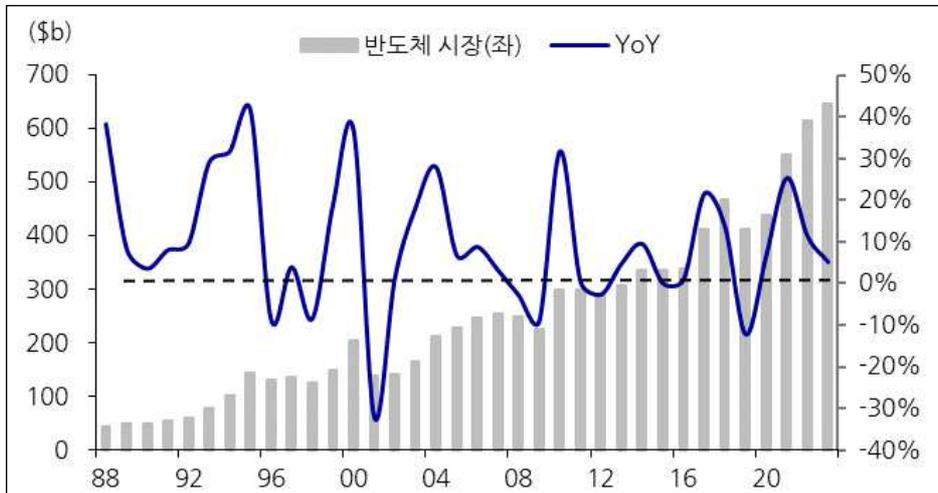
본 연구는 2019년도 정부(산업통상자원부)의 혁신성장 글로벌인재양성사업(P0008747)의 사업의 지원을 받아 수행되었음.

† Corresponding Author: yoonchang@kau.ac.kr

1. 서론

최근 기업들은 생산성 향상과 원가절감을 위해 자동화의 필요성이 대두됨에 따라 자동 창고 시스템 (Automated storage and retrieval system: AS/RS)을 도입 운영함으로써 재고관리 등 물류관리의 효율 개선을 도모하고 있다.

최근 통신, 자동차, 헬스케어, 가전 등 다양한 산업에서 반도체 수요가 급증하고 있고 인공지능, 전기차 및 커넥티드 카, 사물인터넷 (IoT) 기술의 활용도가 증가함에 따라 반도체 수요가 급격하게 증가하고 있다.



source: 유진투자증권, 2022 반도체산업전망 Revision, 2022

Figure 1. 반도체 시장 규모 추이 유진투자증권

반도체 산업의 수급 불균형을 해소하기 위해 반도체 제조기업들은 혁신적인 방법을 모색 중이며 관련 투자를 해 나갈 의지를 보인다. TSMC, 삼성 및 인텔은 모두 2022년에 자본 지출을 늘릴 계획이라고 발표했으며, TSMC의 경우 400억~440억 달러를 지출할 계획이라고 밝혔다.

반도체 기업들은 생산비용 절감, 수출 향상, 생산성 향상, 납기 준수, 지속적이고 안정적인 생산을 실현할 수 있는 고도의 생산 운영 방법에 관심을 두고 있다.

반도체 산업 내 생산 기술의 향상에 따라 반도체 생산량이 증가하였으며, 생산 가능 용량이 증대되었으며, 이에 따른 피킹(Picking) 인력과 피킹 시간의 절감, 피킹 정확도 향상, 보관효율 향상에 대한 이슈가 커지고 있다.

자동창고 시스템 도입은 초기 투자 비용이 높기 때문에 현장 분석, 레이아웃 검토 등을 필요로 하며, 시스템 초기 설계 단계부터 운영 프로세스 정립, 크레인(stacker Crane) 사양, 랙(Rack) 높이, 토트(Tote) 크기 등을 결정해야 한다.

본 연구는 Mini-load AS/RS 도입 시 어떠한 사항을 고려해야 하는지 제시하였다. 고려 사항은 실제 현장 도입사례와 문헌 연구를 기반으로 도출되었으며, 각 고려 사항별로 확인해야 할 사항을 정리하였다. 또한 본 연구는 Mini-load AS/RS 도입 시 제시된 고려사항을 검토하여 시행착오를 최소화하는 것에 초점을 맞추었다.

본 연구에서는 반도체 물류 프로세스의 개선을 위한 자동화 시스템 연구, 시뮬레이션 분석을 통해 개선 효과를 제시할 예정이다.

2. 연구 대상 및 선행연구

2.1 도입 현장

N社は 글로벌 반도체 기업이며 Miniload AS/RS를 도입한 곳은 태국에 위치한 공장이다. 이 공장은 반도체 제조 공정 중 후 공정 공장으로서, 어셈블리(Assembly) 및 테스트(Test) 공정을 위한 시설이다.

기존 N社は 반도체 생산 기술의 향상으로 단위 생산량이 증가하였으며, 물류 효율 개선에 대한 지속적인 고민을 하고 있었다. N社 태국 공장은 인력에 의존하여 화물 이송 및 선반 보관을 진행하는 비효율적인 물류 작업 처리의 문제점이 존재하였다. 이에 따라 마지막 공정인 Pack Area에 Bottle Neck이 걸리는 사실을 인지하고 있었다.

기존 운영 프로세스는 Pack Area (면적 : 67,291mm X 23,705mm)에 분포된 94개 선반에 (1개 선반은 3단으로 이루어짐)에 물건을 쌓아 놓는 형식으로 상위 시스템(MES, Manufacturing Execution System)에서 오더가 생성되면 작업자가 해당 선반에 물건을 찾아오는 형식이다. 인력에 의존함에 따라 현장 작업자가 하루 수십km 이상 이동하는 등 비효율적인 작업이 이뤄지고 있었다.



Figure 2. 인력에 의존적인 상품 피킹 작업 현황

2.2 도입 시스템 (Miniload AS/RS)

AS/RS는 화물의 취급, 운반, 저장, 반출을 정확하고 빠른 시간 내에 수행하기 위한 자동 창고 시스템이다. AS/RS는 장비와 제어장치의 복합체로서 물건을 보관하는 랙(Rack)과 랙 사이를 이동하며 물건을 입/출고하는 크레인 (Stacker Crane) 또는 Storage/Retrieval Machine (S/R Machine) 및 입/출고 스테이션으로 구성되어 있다. AS/RS는 크게 Unit load AS/RS, Miniload AS/RS, Vertical Lift Modules (VLMs), Carousel system, Mobile-Rack AS/RS로 구분할 수 있다. 셔틀(Shuttle)은 AS/RS에서 랙 사이의 레일과 리프트를 통해 수평, 수직으로 이동하는 운반기구로서 높은 처리 능력을 필요로 하는 물류센터에서 활용되고 있다. 크레인은 지게차(Forklift) 타입의 크레인으로서 창고 내의 통로에 설치된 트랙을 따라 이동하며, 포크(Fork)를 사용하여 보관 창고의 랙에 화물을 저장하거나 반출한다.

Mini-Load AS/RS는 보통 30 - 50 kg 범위의 물품이 담겨 있는 작은 컨테이너나 토트(Totes)를 처리하는 물류 자동화 시스템이며, 시간당 처리량이 많고, 공간을 집약적으로 활용할 수 있는 시스템이다.

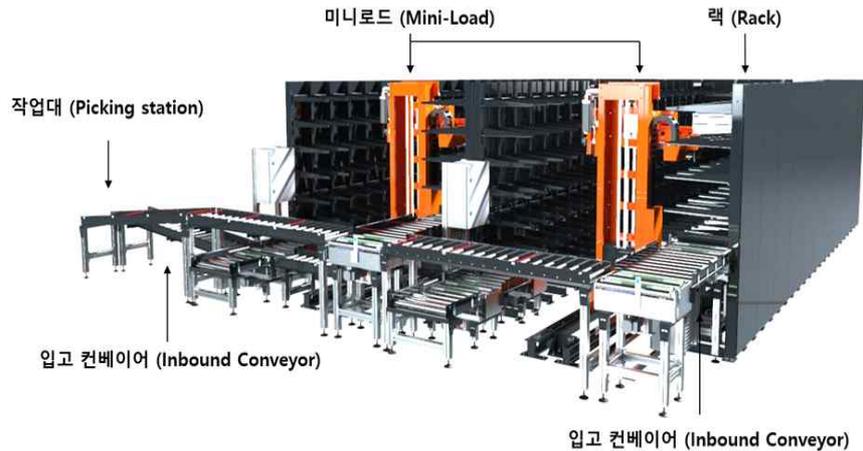


Figure 3. N社 적용 Miniload AS/RS

Mini-Load AS/RS의 시스템 구성 및 정의는 아래와 같다.

- 1) Miniload 크레인 : 랙과 랙 사이에 설치된 레일 위에서 수평, 수직 방향으로 주행하며 토트를 랙에 저장 혹은 반출하는 장비
- 2) 입고 컨베이어(Inbound Conveyor) : 랙에 화물을 저장하기 위해 크레인에 토트를 전달하는 컨베이어
- 3) 출고 컨베이어(Outbound Conveyor) : 랙에 저장된 화물을 꺼내기 위해 크레인에 의해 출고된 토트를 전달받는 컨베이어
- 4) 입/출고 작업대 : 입/출고 지점과 연결되어 있는 부분으로서, 작업자가 토트에서 상품을 꺼내는 등 작업을 하는 공간

2.3 Miniload AS/RS 선행연구

AS/RS 시스템이 개발된 이래로 AS/RS의 설계 및 운영을 위해 많은 연구가 이루어져 왔다. Roodbergen & Vis[1]는 AS/RS 관련하여 기존에 어떤 연구가 행해졌는지 분석하여 시스템 디자인, 이동 시간 예측, 보관 할당, 대기 위치, 스케줄링 등 다양한 연구 이슈 중 정적 스케줄링 및 시스템 설계에 대한 연구가 많이 수행되었음을 확인하였다.

Gagliardi, Renaud, & Ruiz[2] 또한 연구에 적용된 다양한 가정 사항을 중심으로 기존에 수행된 연구를 분석하였다.

Gu, Goetschalckx, & McGinnis[3]는 창고 운영에 대해 기존에 수행된 연구를 다양한 카테고리로 구분하여 정리하였다. 여기에서도 다수의 연구가 AS/RS를 대상으로 수행된 것을 확인할 수 있다. 저자들은 결론에서 연구 성과가 실제 현장에서 많이 반영되고 있지 않음을 지적하였다.

Bozer & White[4]는 다수의 물품 토트 도크를 가진 Miniload 시스템을 대상으로 지정된 보관 용량과 처리량을 만족하는 최소 복도 수를 가지는 시스템을 설계하는 방법을 제시하였다. 시스템 처리량을 산정하기 위해 작업자의 가동률을 추정하였으며 두 개의 물품 토트 도크가 설치된 시스템에 비해 네 개의 물품 토트 도크가 설치된 시스템이 피킹 성능이 좋음을 보였다.

Foley & Frazelle[5]는 두 개의 물품 토트 도크를 가진 Miniload 시스템을 대상으로 최대 입/출고 성능을 산정하기 위한 수리 모델을 제시하였다. 작업자의 피킹 시간에 편차가 있을 경우 그렇지 않은 경우보다 입/출고 성능이 떨어질 수 있음을 보였다.

Lee, Kim, & Chang[6]는 피킹 작업자의 피로를 줄이기 위한 워크스테이션 형태에 대해 연구하였다. 도크의 높이 및 기울기, 버튼 및 디스플레이의 높이에 따라 작업자의 피로도가 어떻게 변화하는지 설문 및 근전도 검사를 통하여 분석하였다.

Gller and Hegmanns[7]는 에이전트 기반 모델링 방법을 사용하여 셔틀 기반 AS/RS Miniload 시스템을 모델링하였다. 오더 매니저 에이전트, 셔틀 에이전트, 리프트 에이전트로 구성되는 시뮬레이션 모델을 구현하여 오더 프로파일에 따른 시스템 처리량과 평균 사이클 타임의 변화를 분석하였다.

Lee[8]는 단일 물품 토트 도크와 복수의 오더 토트 도크로 구성된 자동화 워크스테이션의 레이아웃에 대한 연구를 수행했다. 도크의 배열, 토트의 도킹 방향에 따른 피킹 처리량을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

Knemann, Bosch, & de Looze[9]는 두 개의 물품 토트 도크와 네 개의 오더 토트 도크로 구성된 자동화 워크스테이션에서 작업자의 피킹 작업을 관찰하였다. 물품 토트 도크에서 화물을 꺼내고, 오더 토트 도크에 화물을 넣고, 버튼을 누르는 일련의 작업을 관찰하여 화물의 무게 및 물품을 놓아야 하는 도크의 위치에 따라 작업자가 피킹하는 방식이 어떻게 달라지는지 분석하였다.

Andriansyah, de Koning, Jordan, Etman, & Rooda[10]는 프로세스 대수 (process algebra)를 기반으로 하여 Miniload AS/RS 시뮬레이션 모델을 만들었다. 분산 모델의 장점을 살려 다양한 형태의 시스템에 적용이 용이한 시스템 모델을 제시하였다.

Bozer and White[11]는 Miniload AS/RS 시스템에서 적절한 피킹 작업자 수를 산정하는 수리 모델을 제시하였다. 피킹 작업자는 한 복도만을 전담하지 않고 복수의 복도를 이동하며 피킹 작업을 수행한다고 가정하였다. 또 한 작업자의 가동률을 높이기 위해 출고 토트의 순서를 조절하는 방법을 제시하였다.

Mahajan, Rao and Peters[12]는 Miniload AS/RS의 출고 성능을 높이기 위해 최근린 전략 (nearest-neighbour)을 사용하여 출고 작업의 순서를 변경하는 알고리즘을 제시하였다. 제시된 방법이 기존 방법에 비해 5 ~ 15 % 정도 향상된 결과를 낼 수 있음을 시뮬레이션을 통해 나타냈다.

Schmidt and Follert[13]는 루프 컨베이어를 가지는 Miniload AS/RS에 대해서 연구하였다. 복수의 AS/RS 입/출고 지점은 복수의 피킹 작업대와 루프 컨베이어를 통해 연결된다. 랙에서 출고된 토트는 다수의 작업대 중 한 곳으로 운반되어 피킹이 수행된다. 출고된 토트가 향할 작업대를 결정하기 위해 중앙 제어 방식과 분산 제어 방식을 각각 적용한 후 피킹 성능을 비교하였다.

Paul Hahn-Woernle & Willibald A. Günthner[14]는 미니로드 시스템의 에너지 효율, 전력 측정 등 관리 방법에 대해 연구하였다. 미니로드 시스템의 제어동작을 분석하여 운영방법에 따른 전력효율개선 및 운영 비용 절감에 관한 연구내용을 다루었다.

R. Gaku and S. Takakuwa[15]는 리프트, 셔틀차량형 미니로드(Shuttle Vehicle-type Mini-load), 컨베이어 등 시스템 적용에 관한 논문이며, 효율적인 시스템의 운영 레이아웃 분석에 관한 연구내용을 다루었다.

H. Kim, D. Lim and S. Lee[16]는 반도체 포백 시설(semiconductor fabrication facility-FAB)에 보관 자동화 기술 도입 및 운영 스케줄링을 제시하였다. 자동화 시스템의 리프트, 컨베이어 등 Bottle-neck을 고려하여 작업오더 할당방법에 관한 연구내용을 다루었다.

3. 자동화 시스템 도입

N社 Miniload AS/RS 도입은 현장 분석, 프로세스 구축, 하드웨어, 소프트웨어 설계 및 개발 단계를 거쳐 수행되었다. 현장 분석단계에서는 기존 작업 프로세스와 상품 특성, 공간 특성, 물동량 분석을 수행하였다. 선반 위치를 숙지하지 못한 작업자들은 작업 대상 선반 위치를 탐색하는 데 많은 시간이 소요되었으며, 작업 대상 선반 내에서도 물품을 찾는 데 한번 더 시간이 소요되고 있었다. 1개의 상품을 피킹하는데 작업 선반까지 이동하는 시간, 선반 위치를 탐색하는 시간, 선반 안에서 상품을 찾는 시간 등 많은 시간이 소요되었다. N社 물류 관리 담당자는 이를 개선하기 위한 해결책을 모색하고 있었다.

프로세스 구축단계에서는 Miniload AS/RS 운영계획, Miniload AS/RS의 소프트웨어와 N社 소프트웨어의 연계 방안 및 실제 현장 작업자들의 의견을 반영하여 적용 방안을 도출하였다. 설계 및 개발 단계에서는 기존 프로세스와 Layout 및 N社을 의견을 기반으로 하드웨어 및 소프트웨어를 개발하였다.

3.1 프로세스 분석

Miniload AS/RS 도입을 위해 AS-IS 프로세스 분석이 우선적으로 시행하였다. Pack Area 모든 화물은 전 공정인 Final Test에서 작업이 끝난 화물들은 4시간 기준으로 Final Test 소속 작업자에 의해 LOT 단위로 운반이 된다. Pack Area로 운반된 화물들은 Incoming Shelf에 우선적으로 1차 집화가 된다. 그 이후, 작업자는 MES 오더에 의해 지정된 Pack Machine 근처에 위치한 지정 선반으로 2차 집화가 이루어진다. MES에서 Pack Machine 가동 오더가 생성되면, 해당 LOT을 찾아 Pack Machine을 가동한다.



Figure 4. 기존 작업 프로세스

3.2 화물 특성 분석

Miniload AS/RS가 보관할 토트박스 선정하기 위해, 보관 상품에 대한 특성을 고려하였다. 먼저 N社는 상품의 10가지 중, Tray, Cassette, J-Dec 및 FFC 4가지 상품을 우선적으로 Miniload AS/RS에 보관하여 시범운행을 한 후, 차후에 상품 종류 수를 증가할 계획이었다. 하지만 향후 다른 10가지 상품 모두 Miniload AS/RS에 보관 가능성을 염두에 두어 Miniload AS/RS 설계에 반영하였다. Miniload AS/RS은 반도체 후 공정 라인에 도입되었기 때문에 보관상품의 파손 방지를 위해 정전기 방지를 위한 Electro Static Discharge(ESD) proof 자재 사용이 요구된다. 또한 토트박스를 보관하는 랙, 크레인 등 시스템 외관은 Anti-Static 자재를 사용하여 조립 및 설치하였다.

items	Type	width (cm)	long (cm)	high (cm)	Weight (Kg)	pic	pic
1	Tray	23	57	7	6.1		
2	J-DEC	16	37	24	5.2		
3	cassette	30	29	12(8)	7.1		
4	FFC	29	15	28	8		
5-1	Box LOV(S)	9	53	2	0.4		
5-2	Box LOV(M)	10	55	5	2.4		
5-3	Box LOV(L)	15	56	8	3.2		
6	J-DEC LOV	16	37	24	3		
7	Instrip LOV	7	25	12	1.5		
8	FFC LOV	34	35	3	1.3		
9	Can	7	7	8	0.5		
10	Tube	0.5	52	0.1	0.5		

Figure 5. N社 貨物 種類

3.3 貨物량 분석

貨物량 분석은 N社 泰國 製造工廠의 2018년 04월부터 06월까지의 入口 데이터를 基반으로 分析을 試行 하였다. Figure 5는 N社 Miniload AS/RS에 試行 運轉하고자 하는 4가지 貨物의 日別 入口量, 最大 入口量에 對해서 分析하였다. 日別 入口量은 N社가 指定한 4가지 貨物의 各別 入口量을 示한 結果이다. 日別 入口量 分析 結果, 入口量은 Tray, Cassette, FFC, J-Dec 順으로 많으며, 他貨物에 比해 Tray 入口量이 현저히 높음을 알 수 있었다.



Figure 6. AS/RS 1차 保管 貨物

日別 出庫量 합은 N社가 指定한 4가지 貨物의 入口量 합을 示한 結果이다. 日別 出庫量 합의 分析 結果 異常點인 4월 13일~4월 16일 4개의 異常 點을 除外한 日 中 平均 700개의 LOT이 入口되었으며, 最大 900개의 LOT이 하루에 入口되었다.

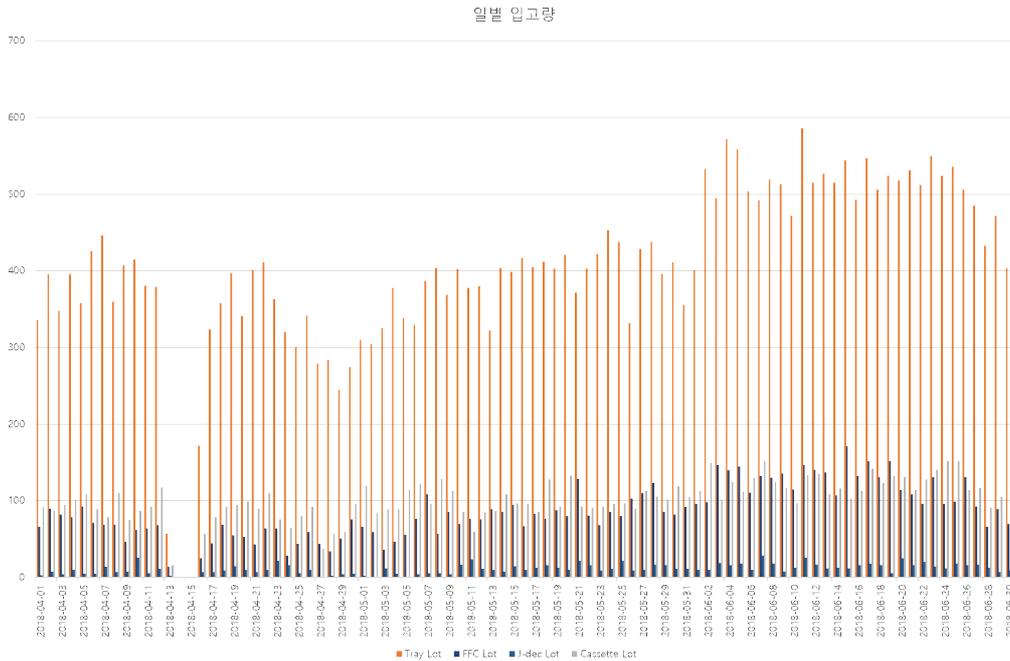


Figure 7. 일별 입고량

3.4 운영 요구사항 분석

Miniload AS/RS 설치를 위해 N社 측과 설치 가능 공간 및 설치 규모에 대한 논의가 이루어졌다. 논의 결과, Miniload AS/RS 설치 가능 공간은 Pack Area에 9m*7m를 지정해주었으며, 취급상품 10가지 중 4가지를 우선적으로 시범운행을 한 후 점진적인 확장을 결정하였다. 이런 N社 요구사항들을 고려하여 Miniload AS/RS 설계에 반영하였다.

N社 적용 시스템은 주행레일 8m, 랙 높이 2.3m, 워크스테이션 7기로 설계되어 적용되었으며, 시스템 1기 당 화물 보관량(높이 7칸 x 길이 21칸 x 랙 2개=294cell), 직/후진 주행 속도 2m/s, 승하강 속도 1m/s 규모로 적용되었다.

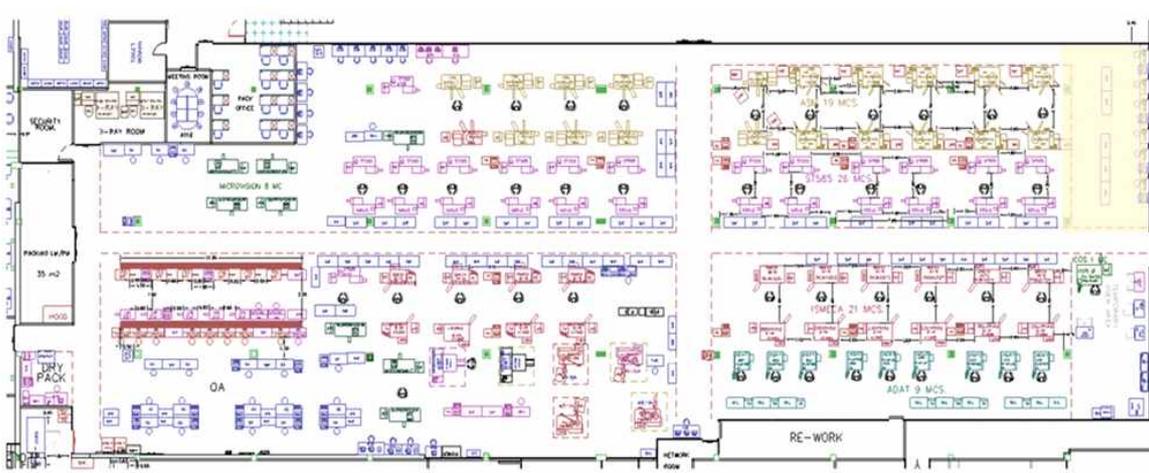


Figure 8. Miniload AS/RS 설치공간

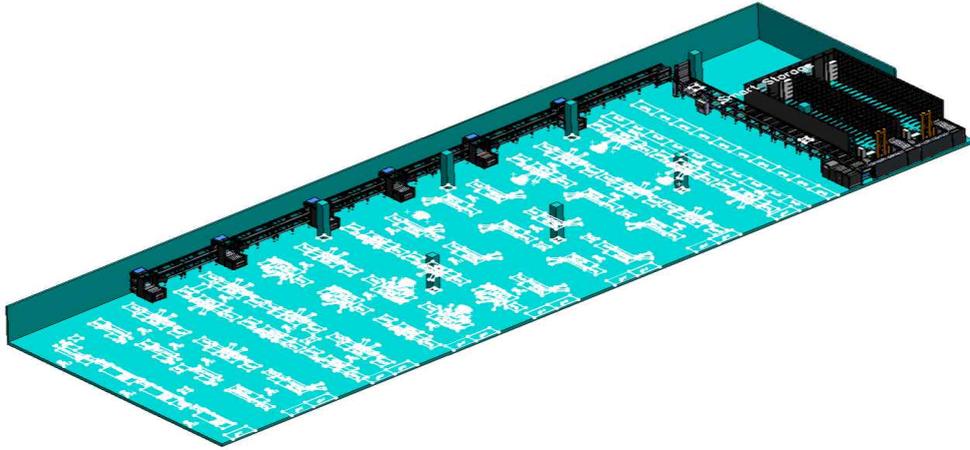
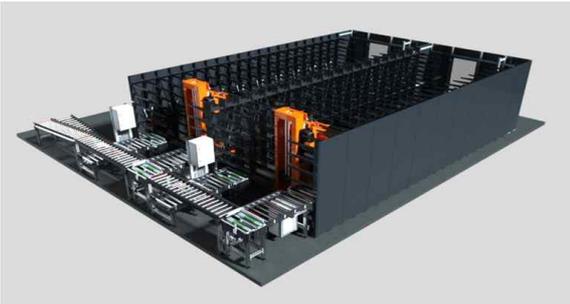


Figure 9. 도입 Miniload AS/RS의 3D 도면

3.5 운영 요구사항 분석

1) Miniload AS/RS 설계

Miniload AS/RS 설계는 자동화 도입 시 고려 사항과 N社의 현장 요구사항들을 고려하여 시행되었으며, 협의하에 주어진 설치 공간에 시스템 설계를 진행하였다. 그 이후, N社 상위 시스템과 작업 연계를 위한 소프트웨어에 및 하드웨어 개발이 동시에 진행되었다.





Mini-load AS/RS	
• System speed	- Max 5 m/s
• System Volume	- Height : 2285mm - Length : 8446mm - Width : 2878mm
• Handling weight	- Max 50kg
• Handling weight	
• Remark	- Material : ESD Proof - Tote size : 610(L) x 350(W) x 200(H)

Figure 10. N社 적용 Miniload AS/RS

4. 도입 시스템 효과 분석

4.1 분석 방법

시뮬레이션 분석 전 AS-IS, TO-BE 프로세스에 대한 상세한 분석을 시행하였으며, 이를 기준으로 시뮬레이션 설계 및 데이터 입력이 진행되었다.

조사 및 분석된 자료를 기반으로 Miniload AS/RS 도입 전후 작업 시뮬레이션을 구축하였다. 시뮬레이션 툴은 Flexsim을 사용하였으며, Miniload AS/RS 도입에 따른 도입 효과를 비교·분석하기 위해 24시간 작업 기준으로 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 시나리오는 N社 입고 데이터를 바탕으로 최대 입고량인 900개 LOT을 처리하기 위해, Miniload AS/RS를 도입 후 작업자 이동 거리 및 작업 소요 시간을 분석하였다.

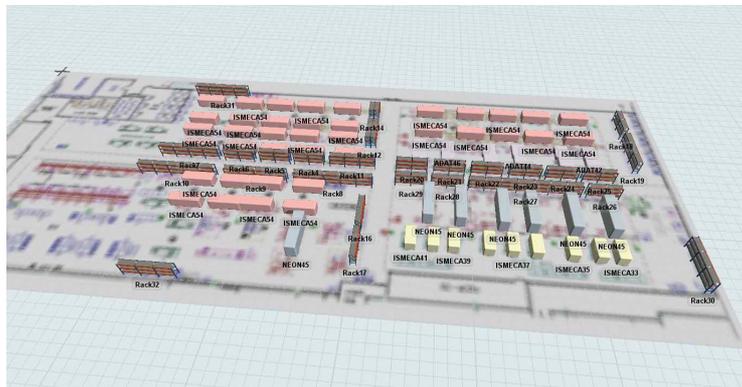


Figure 11. Miniload AS/RS 도입 전 시뮬레이션

Figure 11은 기존 Miniload AS/RS도입 전 작업 프로세스 기반으로 시뮬레이션을 구현하였다. 시뮬레이션 가정 사항은 N社가 프로세스를 기준으로 Pack area 입고, 집화, MES 등록 및 분배, Pack Machine 전달 단계로 구분하여 구축하였다. Searching 시간은 최대 120초, 최소 30초로 실제 측정된 시간을 기초로 한 데이터를 입력하였으며, 시뮬레이션 시간은 24시간 900개 LOT이 입고되는 것으로 설정하였다. 작업자 수는 기존 N社 작업 프로세스와 동일하게 입고 인원 4명, Pack Machine 운반 인원 4명 총 8명(1회 최대 5개 LOT 이동)으로 설정하였다.

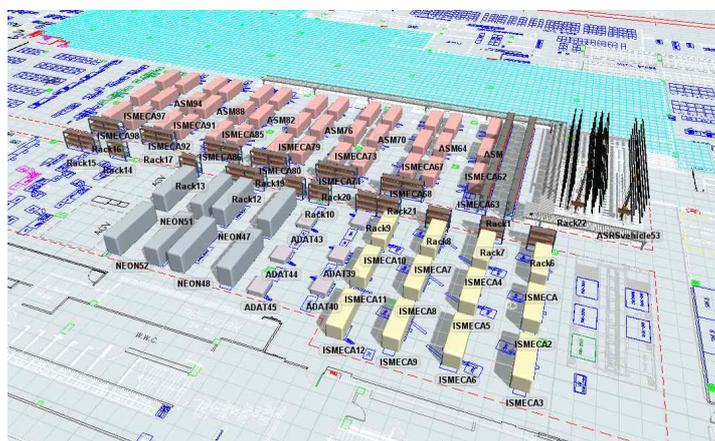


Figure 12. Miniload AS/RS 도입 후 시뮬레이션 설계

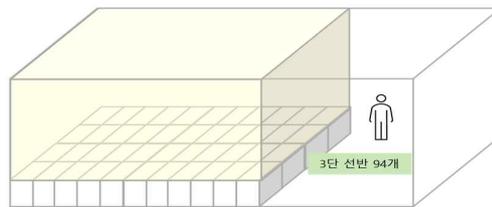
Figure 12는 Miniload AS/RS 설치된 현장에 대한 시뮬레이션을 구현하였다. 시뮬레이션 가정 사항은 Miniload AS/RS 분배 시간은 최소 30초, 최대 40초로 설정하였으며, 시뮬레이션 시간은 Miniload AS/RS 도입 전 시간과 동일하게 24시간 900개 LOT(4시간 간격으로 평균 150개 LOT 입고)으로 설정하였다.

4.1 분석 결과

Miniload AS/RS 도입 전후의 가장 큰 차이점은 크게 Picking 시간 및 작업자 이동 거리 감소 및 기존 수작업 작업공간 대비 사용 면적 절감하였다. 기존에 94개 선반에 화물이 보관되어 있었고 집하가 2번 이루어지는 반면 Miniload AS/RS 도입 후 집하는 1번에 처리되었다. N社 자체 Manufacturing Executing system(MES) 시스템에서 전달받은 작업리스트(Order list)의 시간 정보를 활용하여 예약 시스템을 도입함으로써 물품의 작업 시간에 맞춰 자동 분출을 통한 Picking 시간 감소를 기대할 수 있었다. Pack Area 중앙에 위치한 1차 선반이 아닌 Pack Area 입구에 위치한 Miniload AS/RS에 입고하여 이동 거리 및 작업 시간의 감소를 기대할 수 있었다.

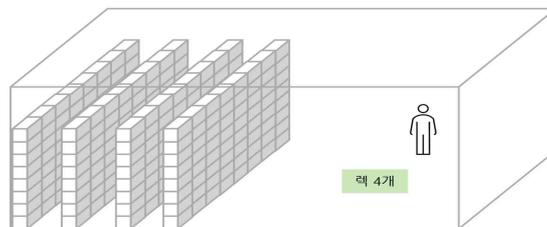
1) Miniload AS/RS 도입 후 공간 효율성 향상

기존 N社는 94개의 3단 선반(1340x290x1,230mm)에 모든 화물을 분산 보관하였다. 하지만 Miniload AS/RS 도입 후 상부 공간을 이용하여 수납 효율을 향상하며, 빈 공간이 최대한 없이 활용함으로써, 수납 효율을 크게 향상해 집약 보관이 가능해졌으며 기존 대비 60%의 선반을 절감하였다.



$$\text{사용공간} : (1.340 \times 94) \times (0.290 \times 94) \times 1.230 = 4223\text{m}^3$$

$$\text{낭비공간} : (1.340 \times 94) \times (0.290 \times 94) \times (2.800 - 1.230) = 5390\text{m}^3$$



$$\text{사용공간} : 8.4 \times 2.80 \times 2.8 = 65.856\text{m}^3$$

Figure 13. Miniload AS/RS 도입 전후 공간 효율성 비교

2) Miniload AS/RS 도입 후 피킹 시간 감소

기존 N社는 노동 집약적인 형태로 피킹 작업이 진행되고 있었다. 피킹 프로세스는 상위 MES 시간별 작업 리스트 하달, 94개 선반 중 해당 선반으로 이동, 화물 수색, 화물을 피킹 그리고 데스크 이동 후 일률 바코드 스캐닝 순이다. 모든 작업은 100% 인력에 의존하고 있는 형태였으며, 선반에서 물품을 꺼내는 작업에 소요 되는 시간은 선반의 위치, 품목 수량, 작업자의 숙련도 등의 요소에 의해 좌우되는 상황이었다.

Miniload AS/RS 도입 후 MES는 Miniload AS/RS에 출고 명령이 자동 하달되었으며, 해당 워크스테이션으로 자동 운반을 통해 작업자가 상품을 찾는 데 필요한 시간을 단축할 수 있었다.

피킹 시간비교:

Miniload AS/RS 도입 전 : 작업자 화물 Searching time 최대 120sec

Miniload AS/RS 도입 후 : Miniload AS/RS 화물 분출 시간 최대 40sec

3) Miniload AS/RS 도입 후 이동 거리 감소

Miniload AS/RS 도입 전 작업자들은 1차 집하된 LOT을 MES에 생산된 작업 리스트를 통해 지정된 Pack Machine에 이동해야 했다. 하지만 Miniload AS/RS도입 후 Miniload AS/RS는 6개 워크스테이션중 Pack Machine 에 가장 가까운 스테이션으로 분출하여 작업자 이동 거리를 단축 및 작업자 작업 소요 시간을 단축할 수 있었다.



Figure 14. Miniload AS/RS 도입 후 2D 레이아웃 (6개 워크스테이션)

이동거리 비교:

Miniload AS/RS 도입 전 작업자 이동 거리 총 합 : 103,122.8 m

Miniload AS/RS 도입 후 작업자 이동 거리 총 합 : 40,576.14 m

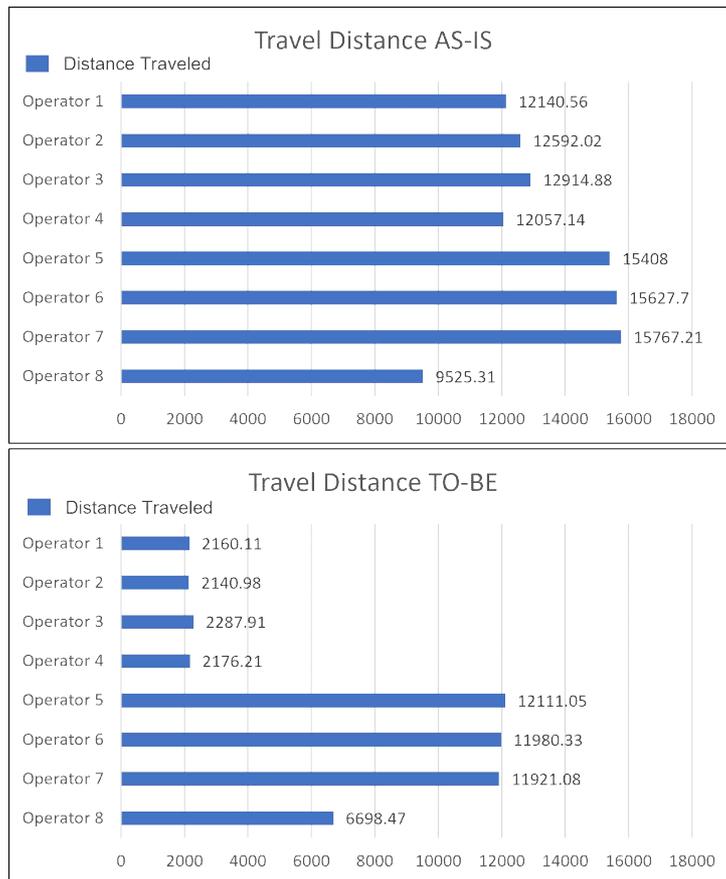


Figure 15. Miniload AS/RS 도입 전후 작업자 이동거리 비교

5. 결론

본 연구에서는 반도체 Back-end 공정 내 물류 작업을 개선하기 위한 Miniload AS/RS 도입에 대한 연구를 진행하였다. 기존 인력에 의존된 화물 이송, 피킹 작업 등 노동집약적인 비효율적인 작업환경을 자동화하여 피킹 작업 시간 및 작업자 이동 거리 최소화, 작업 공간 절감 등 개선 효과를 얻었다. Miniload AS/RS를 활용한 자동화 모델은 반도체 공장 외 물류 창고 및 전자 부품 제조 등 다양한 산업에 활용 및 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. A. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 194(2), 343-362.
- Gagliardi, J.-P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2012). Models for automated storage and retrieval systems: A literature review. *International Journal of Production Research*, 50(24), 7110-7125.
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2010). Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 203(3),
- Bozer, Y. A., & White, J. A. (1990). Design and performance models for end-of-aisle order picking systems. *Management Science*, 36(7), 852-866.
- Foley, R. D., & Frazelle, E. H. (1991). Analytical results for miniload throughput and the distribution of dual command travel time. *IIE Transactions*, 23(3), 273-281.
- Lee, E. Y., Kim, M. K., & Chang, Y. S. (2016). Development of an advanced picking station considering human factors. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 26(6), 700-712.
- Guller, M., & Hegmanns, T. (2014). Simulation-based Performance Analysis of a Miniload Multishuttle Order Picking System. *Procedia CIRP*, 17, 475-480.
- Lee, S. H. (2014). A study on the work efficiency considering the layout of picking station (Master's dissertation). Korea Aerospace University, Goyang, Republic of Korea.
- Konemann, R., Bosch, T., & de Looze, M. (2012). Movement strategy and performance in a high-volume order picking workstation. *Work*, 41(Supplement 1), 1311-1315.
- Andriansyah, R., de Koning, W. W. H., Jordan, R. M. E., Etman, L. F. P., & Rooda, J. E. (2011). A process algebra based simulation model of a miniload-workstation order picking system. *Computers in Industry*, 62(3), 292-300.
- Bozer, Y. A., & White, J. A. (1996). A generalized design and performance analysis model for end-of-aisle order-picking systems. *IIE Transactions*, 28(4), 271-280.
- Mahajan, S., Rao, B. V., & Peters, B. A. (1998). A retrieval sequencing heuristic for miniload end-of-aisle automated storage/retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 36(6), 1715-1731.
- Schmidt, T., & Follert, G. (2008). Analysis of decentral order-picking control concepts. In *Dynamics in Logistics* (pp. 457-465). Springer Berlin Heidelberg.
- Paul Hahn-Woernle & Willibald A. Günthner (2018) Power-load management reduces energy-dependent costs of multi-aisle mini-load automated storage and retrieval systems, *International Journal of Production Research*, 56:3, 1269-1285, DOI: 10.1080/00207543.2017.1395487
- R. Gaku and S. Takakuwa, "SIMULATION ANALYSIS OF LARGE-SCALE SHUTTLE VEHICLE-TYPE MINI-LOAD AS/RS SYSTEMS," 2018 Winter Simulation Conference (WSC), 2018, pp. 2966-2976, doi: 10.1109/WSC.2018.8632394.

H. Kim, D. Lim and S. Lee, "Deep Learning-Based Dynamic Scheduling for Semiconductor Manufacturing With High Uncertainty of Automated Material Handling System Capability," in IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, vol. 33, no. 1, pp. 13-22, Feb. 2020, doi: 10.1109/TSM.2020.2965293.

물류과학기술연구 제3권 제1호

- 인 쇄 : 2022년 06월 29일
 - 발 행 : 2022년 06월 30일
 - 발행인 : 하 현 구
 - 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 2022. The Society of Logistics Science and Technology all rights reserved.