

# 컨베이어 시스템에서 불균등한 입출력(I/O) 흐름의 균형 조정을 통한 시스템 운영 효율성 향상

채준재<sup>1\*</sup>, 허진혁<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>한국항공대학교 항공교통물류학부

## Improving Operational Efficiency by Balancing Uneven I/O Streams in Conveyor System

Junjae Chae<sup>1\*</sup>, Jinhyeok Heo<sup>2</sup>

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

The conveyor system is one of the most commonly used material transportation methods in factories and logistics centers. This system consists of a mainstream, responsible for directly transporting items, and a sorting branch that allows for inputs from the outside and for items to exit the mainstream. For a smooth flow of logistics, the mainstream must maintain appropriate spacing between items. However, collisions sometimes occur at the merging points, causing blockages in the flow. This research aims to study methods for evenly distributing items when specific materials are entering the mainstream and then being sent out to various branches, especially when the entry and exit points are randomly mixed and the numbers don't match. The goal is to achieve a balanced distribution to each branch, ensuring that the processes in each branch are temporally balanced, ultimately reducing process deviations between lines and contributing to overall production stability. We propose a logic to maintain balance in the conveyor line, which has multiple merge and diverge points, and validate its effectiveness using simulation analysis.

**Keywords:** Merge control, conveyors, Window reservation

논문접수일 : 2024.12.09.    논문수정일 : 2024.12.21.    게재확정일 : 2024.12.30.

1\*. 한국항공대학교 교수, Corresponding Author: [jchae@kau.ac.kr](mailto:jchae@kau.ac.kr)

2. 한국항공대학교 석사과정

## 1. 서론

컨베이어 시스템은 공장, 물류센터 등 다양한 산업에서 물류 이송의 핵심적인 역할을 담당하는 자동화 시스템이다. 특히, 물류의 처리 속도와 정확성을 높이기 위해 여러 가지 이송 경로와 분류 지점이 필요하며, 이를 통해 효율적인 물류 관리가 가능하게 된다. 그러나 이러한 시스템에서 병합 및 분류 지점의 원활하지 못한 제어 문제는 물류 흐름의 병목 현상과 시스템 전체의 비효율성을 초래할 수 있다. 특히, 불균등한 입출력 흐름은 각 라인의 처리량에 차이를 발생시켜 제어에 있어서의 난이도를 올리고 이를 잘 해결하지 않으면 생산성 저하로 이어질 수 있다.

본 연구는 불균형한 컨베이어 시스템에서의 입출력 흐름을 균형화하여 시스템 효율과 생산성에 있어서 문제시되는 영역을 다룬다. 다중 병합 제어 로직을 통해 이러한 불균등한 입출력을 균등화하여 물류흐름을 원활히 하고 이를 통해 시스템의 전반적인 운영 효율성을 높이는 것을 목표로 한다. 이를 위해, 기존의 단순한 컨베이어 운영 방식에서 사용되던 문제 해결 방식을 발전시켜 새로운 위치 선점 로직(MPR, Modified Position Reservation)을 제안하고, 이에 대한 효과를 시뮬레이션 분석을 통해 검증한다. 본 연구는 전기차 배터리 생산 공정을 대상으로 하여 물류흐름에 대한 분석을 진행할 때 기존의 건물 구조의 물리적 제한으로 여러 개의 입출력 지점을 균등하게 설치하는 것이 불가능했다. 이로 인해 여러 개의 라인의 지표들이 서로 다르게 되고 또 이로 인해 전체 생산성에 영향을 미치는 것을 최소화하기 위한 방법론을 제안하게 되었고, 이를 통해 생산성 향상과 비용 절감의 효과를 기대할 수 있다.

## 2. 배경 연구

현대 물류 및 제조 시스템에서 자동화된 컨베이어 시스템(Automated Conveyor Systems, ACS)은 생산성과 효율성 향상을 위한 핵심 요소로 자리 잡고 있다. 컨베이어 시스템은 단순한 물류 이송에서 출발했으나, 최근에는 다양한 기능을 통합하여 복합적인 역할을 수행하는 시스템으로 진화해왔다. 특히 병합, 분류, 타이밍 제어 등의 기능이 도입되면서, 전체 시스템의 운영 효율을 최적화하는 것은 물류 시스템에서 필수적인 과제가 되었다. 이러한 맥락에서 병목 구간에서의 최적 제어와 부하 분산, 실시간 처리 성능의 향상은 자동화 물류 시스템의 중요한 연구 주제로 떠올랐다.

Boysen et al. (2019)는 자동 분류 컨베이어 시스템(Automated Sorting System, ASS)의 중요성을 강조하며, 창고, 크로스도킹 터미널(cross-docking terminals), 우편 서비스, 공항 등 다양한 분야에서 이 시스템의 필수적인 역할을 조명했다. ASS는 물류 흐름의 정확성과 속도를 극대화하며, 다양한 환경에서 그 활용도가 높아지고 있다. 특히 공항의 수화물 처리와 같이 실시간으로 방대한 물류 데이터를 처리해야 하는 경우 ASS의 효율적인 운영은 필수적이다. 병합 지점에서의 효율적인 부하 관리가 물류 시스템의 성능에 결정적인 영향을 미친다. Jing et al. (1998)는 Arena 시뮬레이션 도구를 활용하여 컨베이어 네트워크의 병합 지점에서 발생하는 부하 불균형 문제를 해결하기 위한 연구를 수행했다. 이 연구에서는 주요라인(mainline)과 유도라인(induction line)이 균형을 이루도록 하여 시스템의 이송 부하를 효율적으로 관리하는 방법을 제시했다. 이러한 연구는 물류 네트워크에서 부하의 균형을 맞추는 것이 시스템 성능에 얼마나 중요한지 시사점을 제공한다. 또한, De Koster et al. (2014)는 Zone Picking System에서 병합 지점의 운영 효율성을 높이기 위해 새로운 대기행렬 모형(queueing model)을 개발하였다. 이 모델은 병합 지점에서의 처리 시간을 예측하고 평가하는데 유용한 도구로 작용하며, 시스템 설계와 성능 최적화를 위한 시작점을 제공한다. 특히 이 연구는 빠르게 변하는 물류 환경에서 실시간으로 성능을 평가할 수 있는 도구의 중요성을 부각시킨다.

컨베이어 시스템의 시뮬레이션 모델링과 성능 분석은 많은 연구자들에게 중요한 연구 주제가 되어왔다. Cavada et al. (2017)는 산티아고 국제공항의 수화물 처리 시스템을 시뮬레이션으로 분석하여 체크인 카운터의 할당 방식 변경, 수화물의 균형 적재 등 다양한 운영 시나리오를 평가했다. 이 연구는 공항 운영 효율

성을 높이기 위한 다양한 방안을 시뮬레이션을 통해 검토함으로써, 공항 물류 시스템의 운영 효율성을 개선하는 데 기여할 수 있음을 보여준다. Rijsenbrij & Ottjes et al. (2007)는 트럭에 설치된 컨베이어를 활용한 수화물 자동화 처리 시스템을 제안했다. 이 시스템은 자동화를 통해 비용을 절감하고, 보안 강화 및 수화물 파손 방지에 긍정적인 영향을 미쳤다. 이 연구는 자동화된 물류 시스템이 비용 절감 외에도 보안과 안정성 측면에서도 매우 중요한 가치를 지닌다는 것을 증명했다.

최근에는 인공 지능과 머신러닝 기법이 컨베이어 시스템의 성능 향상에 기여하고 있다. Khosravi et al. (2017)는 인공 신경망(Artificial Neural Networks)을 활용한 메타 모델을 개발하여 수화물 처리 시스템의 성능을 실시간으로 예측하는 연구를 수행하였다. 시뮬레이션 데이터의 로그를 기반으로 신경망을 학습시켜, 시스템 운영자가 실시간으로 의사 결정을 내릴 수 있는 지원 도구를 개발했다. 이는 데이터 기반 예측 모델이 물류 시스템의 실시간 제어에 중요한 역할을 할 수 있음을 강조한다. 또한, Johnstone et al. (2015)는 수화물 처리 시스템에서 병합 제어 알고리즘과 물리적 배치가 시스템의 처리량과 지연 시간에 미치는 영향을 분석했다. 그들은 Fixed Gap Algorithm을 통해 컨베이어 시스템의 운영 효율을 개선하는 방법을 제시했다. 이러한 알고리즘은 다양한 병합 레이아웃과 운영 조건에서 부하를 효율적으로 조정할 수 있는 기법으로 평가된다.

컨베이어 시스템에서의 실시간 스케줄링과 부하 조정 문제는 여전히 중요한 연구 주제이다. Haneyah et al. (2011)는 실시간 스케줄링 알고리즘인 Priority-based Algorithm (PBA)을 개발하여 병합 지점에서의 작업 부하 균형과 처리량 최대화를 달성하였다. 이 알고리즘은 자동화 물류 시스템의 다양한 레이아웃과 운영 조건에서 적용 가능하며, 병합 구성에 따른 최적의 작업 순서를 제공하는 도구로 사용된다.

이 외에도 Tarău et al. (2009)는 DCVs(Destination-Coded Vehicles)를 활용한 수화물 처리 시스템에서 중앙 집중식 모델 예측 제어(MPC: Model Predictive Control)와 분산식 MPC, 휴리스틱 접근법을 비교하였다. 연구 결과, 중앙 집중식 MPC는 최적의 성능을 제공했지만 계산 비용이 높은 반면, 분산식 MPC는 최적성과 비용 간의 균형을 이루는 방법으로 제안되었다. Wu et al. (2017)는 다양한 SKU를 처리하는 Zone Automated Picking System (ZAPS)에서 병합 순서를 최적화하는 연구를 수행했다. 그리디(greedy) 알고리즘을 통해 주문 처리 시간을 단축하여 생산 공정의 효율성을 크게 향상시켰다. 이는 주문 처리 시스템의 자동화에서 병합 순서 결정이 매우 중요한 역할을 한다는 것을 보여준다. Wang (2010)은 고성능 컨베이어 시스템의 설계와 운영에 관한 연구를 진행하였는데 대규모 시스템의 성능을 효율적으로 평가하고 최적화하는 데 유용한 도구로 사용될 수 있는 컨베이어 네트워크 모델링 방법을 제시하였다. Wang은 컨베이어 시스템이 복잡한 물류 환경에서 최적의 성능을 발휘할 수 있도록 분석 기법을 개발하고, 이를 통해 시스템 성능을 종합적으로 분석할 수 있는 프레임워크를 제안하였다. 이러한 분석 방법은 시스템의 규모가 커질수록 그 효용성이 증대되며, 대규모 물류센터나 생산라인의 효율성을 극대화하는 데 중요한 역할을 한다. Han (2010)는 선입선출(FIFO) 컨베이어 시스템에서 작업 순서 결정 문제를 해결하기 위한 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 이진 정수 프로그램(BIP)을 모델링하고, 이를 기반으로 휴리스틱 알고리즘을 적용하여 작업 순서의 최적화를 목표로 했다. 특히, 각 작업 대기열에 발생하는 설정 비용(set-up cost)을 최소화하는 방식으로 작업 순서 재배열을 제안하였다. 이를 통해 컨베이어 시스템에서의 운영 효율성을 높이고, 작업 순서 최적화가 물류 프로세스의 성능에 미치는 긍정적인 영향을 입증하였다.

마지막으로, Van Der Gaast, De Koster and Adan (2018)는 자동화 주문 피킹 시스템에서 병목 현상이 발생하는 병합 지점이 시스템 처리량에 미치는 영향을 분석하였다. 그들은 근사 대기(Queueing) 모델을 제시하여 복잡한 물류 시스템 설계에서 병목 현상을 예측하고 시스템 최적화를 도울 수 있는 도구로 활용될 수 있음을 입증했다.

이처럼 다양한 연구들이 컨베이어 시스템의 병합, 분류, 부하 관리 문제를 해결하기 위한 새로운 방법론을 제시하고 있으며, 이는 복합적인 물류 시스템의 운영 효율을 극대화하는 데 필수적인 도구로 자리 잡고 있다. Table 1. 에서는 이 연구들의 핵심 내용을 정리하였다. 본 연구는 이러한 기존 연구들을 바탕으로 병

합 지점에서의 최적 제어 전략을 제안하고, 이를 통해 물류 시스템의 처리 효율성을 높이는 방안을 모색하고자 한다.

Table 1. Comparative overview of key highlights and methods in the literature

Literature	Core Concept	Key Method	Highlight
Boysen et al. (2019)	ASS (Automated Sorting System)	Case Study	Highlighted system efficiency in logistics and airports
Jing et al. (1998)	Merging Point Load Balancing	Simulation	Balancing load distribution for main and feeder lines
De Koster et al. (2014)	Zone Picking System	Queueing Model	Predicted waiting times at merging points to improve mering point efficiency
Cavada et al. (2017)	Airport Baggage Handling System	Simulation	Industry-specific analysis of airport operations for logistics efficiency
Rijsenbrij & Ottjes et al. (2007)	Conveyor-Based Automated Baggage Handling System	Automation Design	Utilized truck conveyors for automation to reduce cost, to enhance security, and to minimize the damage of baggage
Khosravi et al. (2017)	Real-Time Logistics Data Prediction	Artificial Neural Network	Applied AI to logistics forecasting to develop the decision-making supporting tool
Johnstone et al. (2015)	Merging Control	Fixed Gap Algorithm	Analyzed the performance of merging control algorithms
Haneyah et al. (2011)	Real-Time Job Scheduling	Priority-Based Algorithm	Managed workload with real-time scheduling to maximize the throughput
Tarǎu et al. (2009)	Centralized and Decentralized Control	MPC, Heuristic	Compared different control strategies Balanced performance and costs
Wu et al. (2017)	Automated Zone Picking System	Greedy Algorithm	Optimized merging sequence and reduced order processing time
Wang (2010)	Large-Scale Conveyor Networks	Conveyor Network Modeling	Proposed design and analysis methods to optimize large-scale logistics center
Han (2010)	FIFO-Based Job Order Optimization	Binary Integer Programming, Heuristic	Reduced costs in queue configuration
Van Der Gaast et al. (2018)	Bottleneck Analysis in Automated Picking Systems	Queueing Model	Optimized performance and throughput in bottleneck sections by bottleneck prediction

3. 현행 물류 흐름 구조 분석

컨베이어 시스템의 주요 목적은 지정된 물체를 사전에 유도된 경로를 따라 효율적으로 이송하는 데 있다. 물류센터에서 컨베이어 시스템은 물류의 분류와 이송을 주된 임무로 하며, 하위 물류센터로의 물류 이송이나 최종 고객에게 배송을 지원하는 데 중요한 역할을 한다. 한편, 제조 현장에서의 컨베이어 시스템은 가공 및 조립 단계에 맞춰 원재료를 이송하고, 최종 제품이 완성될 때까지 그 전체 과정에 걸쳐 물류를 관리하는 중요한 역할을 수행한다.

본 연구는 전기 자동차용 배터리 제조 공정을 대상으로 컨베이어 시스템의 최적화를 목표로 하여 시작되었다. 전기차 배터리는 일반 배터리와 비교하여 크고 무거운 특성을 보여, 이를 이송하기 위한 장치의 크기가 커지며 이에 따른 비용 부담도 증가한다. 특히, 배터리 이송에 필요한 팔레트는 특수 제작이 요구되

며, 그 제작 비용 역시 상당하다.

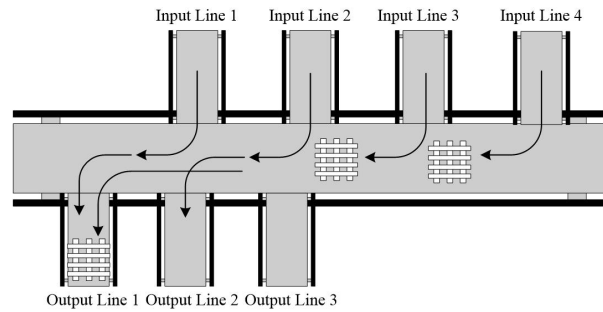


Figure 1. Unbalanced Production Line

현재의 생산 공정에서 4개의 투입 라인과 4개의 불출 라인을 계획하고 있었으나, Figure 1. 에서와 같이 4개의 투입 라인에서 3개의 불출 라인으로 축소된 공정 계획이 고려되고 있다. 그 첫 번째 이유로는 기존 공장의 구조로 인해 4개의 불출라인을 구성하기에는 충분한 공간이 있지 않았고 두 번째 이유로는 특수한 컨베이어 제작에 필요한 비용이 매우 커서 전체 비용 효율을 고려하여 3개의 불출라인을 고려하게 되었다. 그러나, 투입 라인과 불출 라인의 불균형은 이송 부하의 편차를 유발하여 생산성 저하로 이어질 위험이 있다. 구체적으로, 투입 라인1은 불출 라인 3으로의 이송이 불가능한 반면, 투입 라인 2, 3, 4는 모든 불출 라인으로 이송이 가능하다. 이러한 이송 부하의 불균형은 공정의 흐름을 방해하고 전체 시스템의 효율성을 떨어뜨리게 된다.

본 연구의 목표는 각 라인의 이송 부하를 균등화하여 생산성 저하를 최소화하고, 이를 통해 추가적인 시설 투자나 자원 낭비 없이도 목표한 생산량을 안정적으로 달성할 수 있도록 하는 것이다. 이를 위해 배터리 이송 공정을 A 구역과 B 구역으로 나누어 제어할 계획이며, A 구역에서는 불규칙적으로 배치된 4개의 배출구로부터 배터리가 배출되고, B 구역에서는 각 배터리가 동일한 공정을 거치도록 관리할 것이다. B 구역에서의 라인 불균형 문제는 시간이 지남에 따라 심화되며, 생산 지연 문제로 이어질 가능성이 크다. 따라서, 각 라인에 배터리를 균등하게 분배할 수 있도록 제어 알고리즘을 개발하고, 이를 통해 생산성 향상과 자원 최적화를 달성하는 것이 본 연구의 핵심 목표이다.

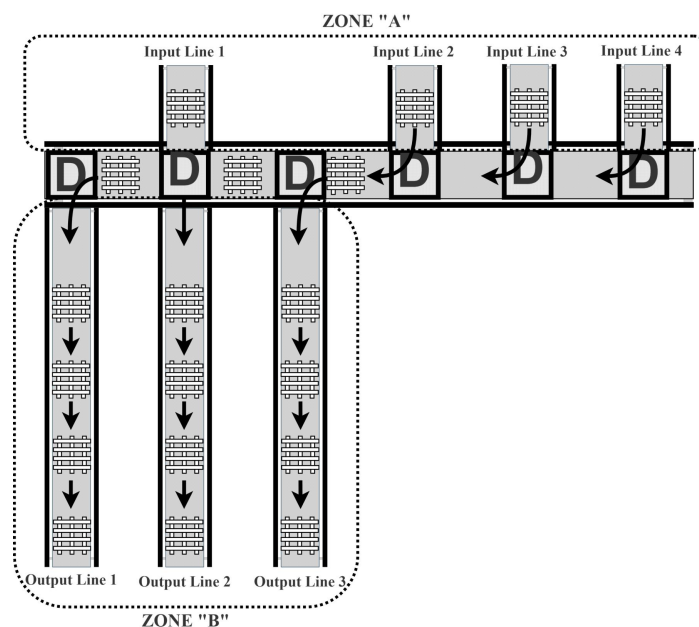


Figure 2. Production Flow Layout

Figure 2. 는 계획하고 있는 공정에서의 설계(layout)를 설명한다. 앞서 언급했던 것처럼 생산 공정 공간은 모든 장치를 효율적으로 정렬하기에는 제한적이다. 따라서 투입라인의 컨베이어를 등간격으로 할 수 없고 또한 불출라인 또한 등간격은 가능하지만 중심에 위치할 수는 없다. 이러한 이유로 Figure 2 에서의 Zone A와 Zone B의 균형을 맞추기 위해 속도를 조절한다고 하더라도 Zone B에서의 각 라인에서의 불균형은 발생할 수밖에 없다.

#### 4. 개선 물류 제어 방안

본 연구에서는 이러한 불균형 현상을 해소하기 위해 위치 선점 로직(Modified Position Reservation, MPR)을 도입하였다. 불균형의 원인 중 하나는 4개의 투입라인이 3개로 줄어들면서 나타나는 병목현상이다. 본 연구에서는 병목현상을 라인의 특정구간에서 물류흐름이 차단되거나 지연되어 다른라인의 작업효율성이 감소하는 상태로 정의하며, 현업에서는 일반적으로 특정 구간에 5개 이상의 제품이 대기할 경우 병목현상으로 간주한다. 특히 Figure 2의 투입 라인 4에서 지속적으로 팔레트가 투입될 경우 라인 2, 3에서의 투입 물량은 주요라인에 끼어들기가 어려워지고 이때 라인 2와 3의 입구에서부터 병목이 발생하게 된다. 투입 라인 1은 불출라인의 바로 앞에서 상대적으로 여유 있게 주요라인을 따라 팔레트를 보낼 수 있는 구조이다.

MPR은 주요 라인의 4개의 더미 포인트(dummy point)를 인위적으로 지정하고 배출 대기 중인 배터리가 선 할당된 자리를 확보할 수 있도록 지원하는 방식이다. 각 더미 포인트는 투입 라인 뒤쪽에 배치되어 있으며, 이 로직을 통해 불출되지 못한 배터리가 미리 예약된 포인트에 위치하여 여유 공간이 생길 때 배출이 이루어지도록 설계되었다. 선 할당된 자리에는 해당 자리를 요청한 배터리만 진입할 수 있으며, 배터리가 해당 자리에 도착하면 더미는 사라지고, 배터리가 주요 라인으로 진입하게 된다. 투입 라인1은 4개의 모든 더미 포인트에 선 할당 자리를 요구할 수 있는 반면, 투입라인2, 3, 4는 각각 자신보다 뒤쪽에 위치한 더미 포인트에만 선 할당 자리를 요구할 수 있다. 또한, 각 투입라인에서 불출되지 못한 배터리는 요청가능한 더미 포인트 중 하나를 균등한 확률로 선택하여 선 할당 자리를 요청한다. Figure 3과 Figure 4는 이러한 로직을 설명해 준다.

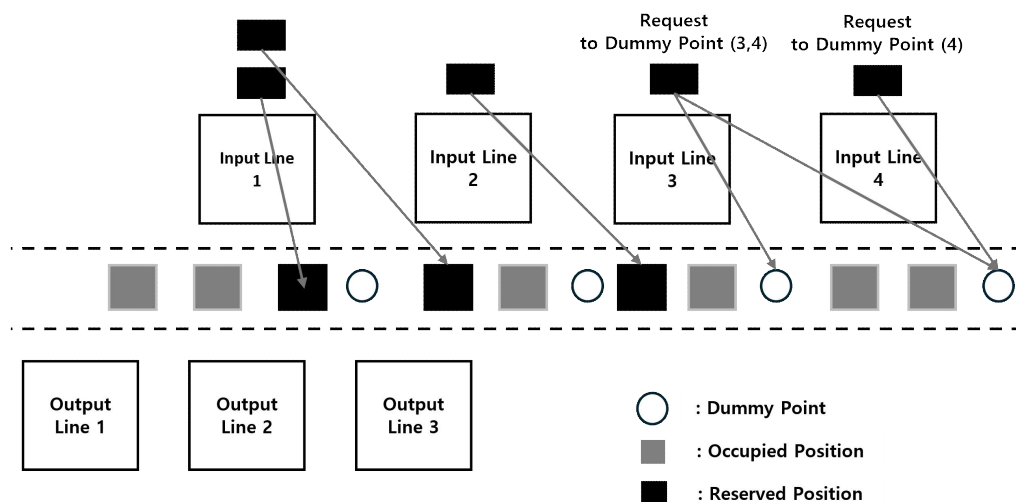


Figure 3. The role of dummy point in MPR logic

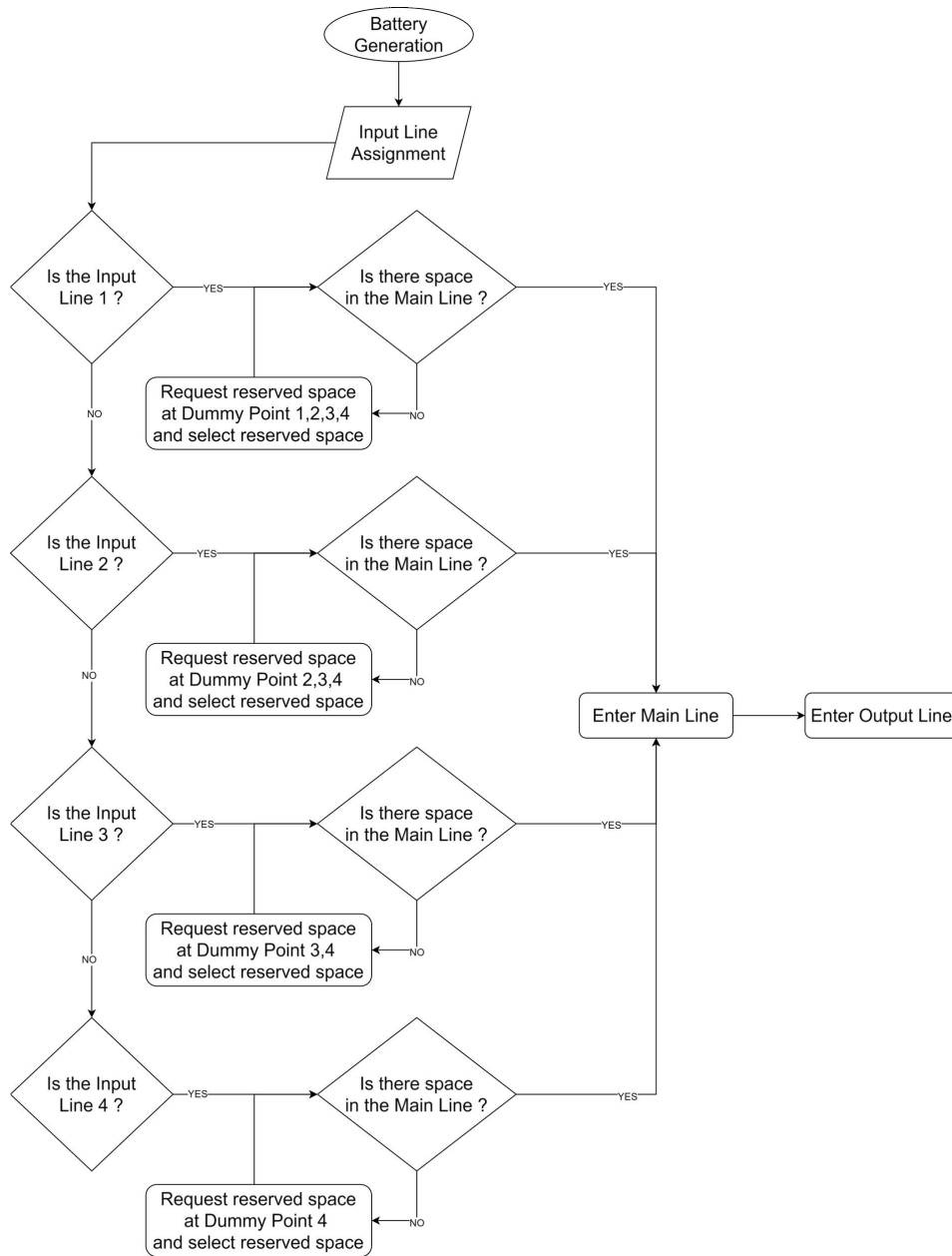


Figure 4. MPR process flow

## 5. 시뮬레이션 모델링

물류 시스템에서의 불규칙한 흐름과 복잡한 병목 현상을 분석하기 위해서 시뮬레이션은 필수적인 도구로 사용된다. (Boysen et al. 2019). 본 연구에서 사용된 컨베이어 시스템의 병합 및 분류 과정 또한 팔레트의 투입 빈도의 불규칙성으로 인해 직접적인 분석보다는 시뮬레이션 분석이 적절하기에 팔레트의 불규칙한 투입 빈도에 따른 라인 균등화 로직(MPR)을 시뮬레이션 분석을 통해 검증하고자 하였다.

본 연구에서는 Automod®V.12 시뮬레이션 툴을 사용하여 컨베이어 시스템의 병합 및 분류 과정을 모델링하였다. 모든 컨베이어는 시스템의 흐름을 유지하기 위해 고정된 속도로 운영된다. 컨베이어 속도는 0.225 m/sec로 설정되었으며, 주요 라인은 총 11개의 컨베이어 구간으로 구성되어 있다. 각 구간의 길이는 11m로 설정되었고, 실질적인 각 구간 용량(capacity)은 시스템 요구 사항에 따라 5개의 배터리로 시뮬레이

선에 적용되었다. 이 용량은 각 팔레트와 배터리의 평균 중량을 기준으로 컨베이어가 견딜 수 있는 하중을 계산한 결과이며, 구간 내에서 배터리 간 0.4m의 안전거리를 유지하도록 설계되었다. 특히, 주요 라인(Main Stream)에서 팔레트를 불출 라인으로 유도하기 위해 다이버터(Divert)가 설치되어 있으며, 불출 라인의 진입 시간을 고려하여 모형화하였다. 구체적인 조건의 데이터는 Table 2와 Table 3에 정리되어 있다.

Table 2. System speed

Category	Speed
Conveyor	0.225 m/sec
Work Process Conveyor	0.225 m/sec

Table 3. Basic parameters

Category	Conditions
Input	Tri (40, 80, 120) sec
Process Time	Tri (56, 60, 66) sec
Segment Capacity	5 units
Minimum Spacing Between Batteries	0.4 m
Divert Process Time	1.63 sec

본 연구에서 사용된 컨베이어 시스템은 구역 A에서 투입되는 배터리의 주기가 평균 80초, 산포율 50%를 가진 삼각 분포로 설정되어 있다. 구역 B에서는 배터리가 평균 60초, 산포율 10%를 가진 삼각 분포의 주기로 작업 공정을 거쳐 가용 배터리로 전환되는데 이는 주요라인에서 투입되는 속도와 배출되는 속도를 같게 하여 속도에 있어서의 균형을 맞추려 한 것이다. 이는 현장에서 실제로 적용되는 속도이며 각 컨베이어의 제어 가능한 수준에 해당된다. 또한 각 컨베이어 구간에는 최대 5개의 배터리가 적재될 수 있다. 컨베이어는 일체형으로 설치되지 않고 여러 개의 부분 컨베이어로 이어 구성하는데, 각 컨베이어가 감당할 수 있는 팔레트와 배터리 조합의 무게가 5개로 제한된다. 또한 팔레트 간 최소거리인 0.4m가 안전거리 유지를 위해 요구되며 각 투입구와 배출구에는 팔레트의 방향 전환을 위해 설치한 다이버터(Divert)의 작동 시간은 1.63초로 설정되어 있다. 이러한 조건을 바탕으로 본 연구에서는 초기에 계획했던 물류시스템의 병목현상에 대해 분석하고 이를 해소하고 균형상태의 정도를 끌어올릴 수 있는 로직을 적용하여 그 효과를 검증한다.

6. 시뮬레이션 결과

6.1 불균등 라인(Unbalanced Line)

본 연구에서는 MPR 로직의 적용 여부에 따른 시스템 효율성을 비교하기 위해, 각 실험을 총 30회 수행하였으며, 실험 완료 기준은 6,000개의 물량 처리로 설정하였다. MPR 로직을 적용하지 않은 시뮬레이션 결과, 배터리 투입 및 불출 라인의 작업 공정 시간의 불규칙성과 3개의 불출 라인에 대한 부하 불균형으로 인해 시간이 경과함에 따라 투입라인 1에서 주요 라인(Main Stream)으로의 투입이 불가능한 상황이 발생했다. 이로 인해 시스템 전반에서 생산성 저하가 나타났다. 특히, 투입라인 1에서 배터리 병목현상이 발생해 주요 라인으로의 진입이 지연되었으며, 상대적으로 투입라인 2, 3, 4에서는 주요 라인을 통한 불출라인으로의 배출이 원활히 이루어지는 반면, 투입라인 1은 불출 라인 1과 2로만 배출이 가능하여 전체적인 부하가 비대칭적으로 분포되었다. 이에 따라 작업 공정 간 간격이 좁아지고, 목표 시간보다 작업 공정이 길어



지면, 불출 라인 2와 3의 빈자리가 부족하여 투입라인 2, 3, 4에서 몰린 배터리가 불출 라인 1에 집중되는 현상이 발생했다.

이 과정에서 병목 현상이 심화되었으며, 연쇄 효과로 인해 시간당 평균 약 20개의 배출 대기 제품이 발생하였다. 6,000개의 물량을 처리하는 데 약 2,110분이 소요되었고, 시스템 운영 50분 이후부터 불균등 상태가 발생했다. Figure 5에서 불균형적 배출 비율을 보여주고 있으며, (a)에서는 투입라인 1에서 발생한 병목현상이 명확하게 드러난다. 투입라인 2, 3, 4에서는 병목현상이 없이 원활한 배출이 이루어졌다.

Table 4. Unbalanced Line Simulation Result

Category	Conditions
Average of Emission Waiting unit	20.6 units per hour
Total Processing Time (Makespan)	2110 min
Onset of Unbalanced Status	After 50 mins of operation

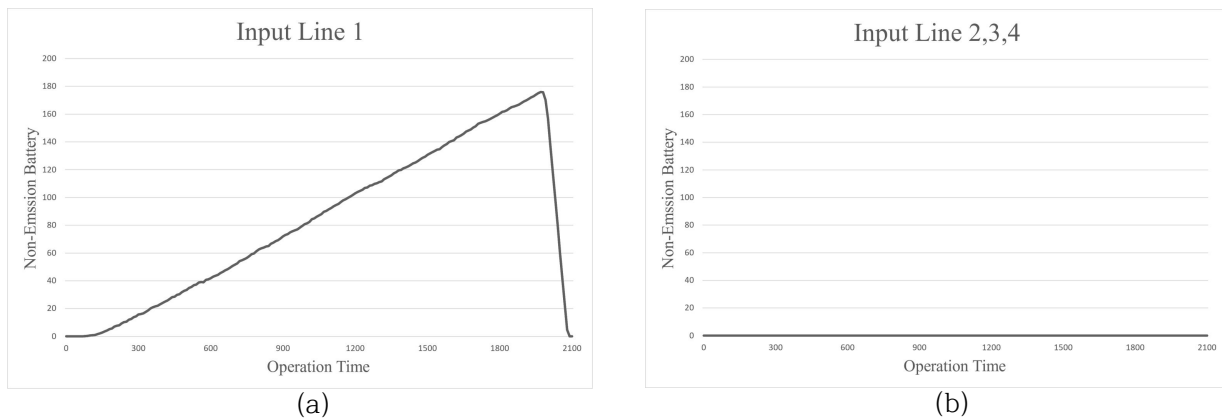


Figure 5. Unbalanced Non-Emission Rate in Production Line

Figure 6. 는 기존에 계획하던 생산라인의 미배출량을 나타낸다. 투입라인 2, 3, Figure 5. (b)에서 보이는 바와 같이 미 배출되는 제품이 없지만, 투입라인 1에서는 Figure 5. (a)와 같이 시간이 지남에 따라 병목 현상이 발생하여 제품이 투입되지 못하고 대기열에 쌓이게 된다. 투입라인 2, 3, 4에 할당된 제품이 모두 배출되고 난 후, 투입라인 1의 미 배출 제품이 불출라인 2, 3을 통해 한 번에 배출되게 된다.

## 6.2 MPR을 통한 균등화 라인

MPR 로직의 적용 후, 시간당 평균 배출 대기 제품 수는 약 20개에서 15개로 감소하였다. 6,000개의 물량을 처리하는 데 소요된 시간은 약 2,100분으로, 기존보다 10분가량의 차이가 있었다. Figure 6에서 보듯이, MPR 로직을 적용한 이후, 모든 생산라인에서 균등한 수준의 미 배출 제품이 발생하였으며, 각 라인의 병목 현상이 완화된 것을 확인할 수 있다.

Table 5. MPR Simulation Result

Category	Conditions
Average of Emission Waiting unit	20.6 units per hour
Total Processing Time (Makespan)	2110 min
Onset of Unbalanced Status	After 50 mins of operation

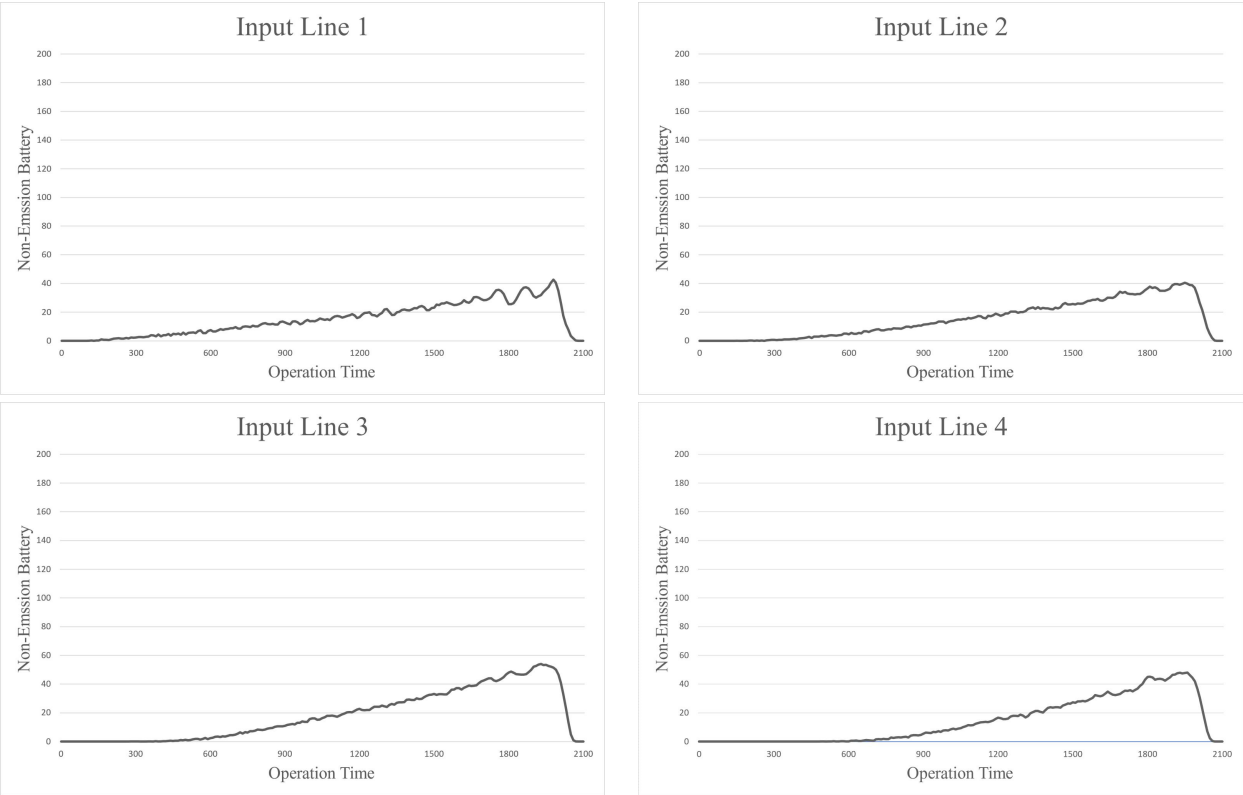


Figure 6. Balanced Non-Emission Rate in Production Line

MPR 로직 적용의 유효성을 검증하기 위해 t-test를 수행한 결과, p-value는 0.00000076으로 유의수준 0.05 이하에서 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다. 이로써 MPR 로직이 제조 공정에서 배터리 배출의 균등화를 유의미하게 개선했음을 확인하였고 구체적인 결과는 Table 6. 에 나타나 있다. 또한 효과 크기 (Cohen’s d)를 계산한 결과를 바탕으로 Table 7. 에 정량 수치를 정리하였는데, 이에 대한 값은 1.41로 나타났으며, 이는 큰 효과(Large Effect Size)를 나타낸다. 95% 신뢰구간(CI)는 0.9065에서 1.9187로, 최소 중간 정도에서 매우 큰 효과 까지를 포함하며, 결과의 신뢰성을 뒷받침한다.

Table 6. MPR Simulation T-test Result

Dependent Variable	Group N	Mean	Std	t	p
Non-Emission Rate	Unbalanced 30	20.67	2.98	5.37	.00000076
	MPR 30	15.94	3.67		

Table 6. MPR Simulation Effect size Result

Comparison	Cohen’s d	95% CI	
		Lower	Upper
Unbalanced, MPR	1.41	0.91	1.92

## 7. 결론

본 연구는 불균등한 컨베이어 시스템에서 발생하는 입출력 부하 불균형 문제를 해결하기 위해 수정된 위치 선점 로직(MPR)을 제안하고, 이를 전기차 배터리 제조 공정을 대상으로 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 기존의 불균등 라인에서는 특정 투입라인에서 지속적으로 병목 현상이 발생하여 전체 생산성과 운영 효율성이 저하되었으며, 시간당 평균 배출 대기 제품이 56개에서 28개로 대폭 감소하는 효과를 가져왔다. 총 처리시간 또한 다소 개선되는 효과를 보였고 무엇보다도 각 라인에서 균등한 수준으로 미배출 제품이 발생하여 병목 현상이 완화되었다. 통계적 검증 결과( $p\text{-value} = 0.00000076$ ), MPR 로직은 기존의 시스템 대비 유의미한 성능 향상을 이루는 것으로 확인되었다.

MPR 로직은 불균형적인 물류 흐름을 개선함으로써 기존의 공장 구조나 장비 구성의 물리적 한계 내에서도 생산성을 향상시키고 비용 절감을 도모할 수 있는 효과적인 방법론으로 평가된다. 특히, 불출 라인의 수가 제한된 상황에서도 입출력 균형을 유지하며 시스템 효율성을 극대화할 수 있음을 보여주었다.

본 연구는 MPR 로직의 적용이 실제 산업 현장에서 병합 및 분류 과정에서 발생하는 부하 불균형 문제를 해결할 수 있는 잠재적인 가능성을 제시하며, 향후 더욱 복잡한 물류 환경에서도 유사한 접근법을 적용할 수 있는 기반을 마련하였다. 또한, 본 연구는 시스템 설계 초기 단계에서의 병목 현상 완화 전략 수립과, 실제 운영 단계에서의 효율적 제어를 위한 새로운 시사점을 제공한다.

향후 연구에서는 MPR 로직을 다양한 산업 현장에 적용하여 보다 복잡한 물류 흐름이나 비정형적인 상황에서의 성능을 분석하고, 실시간 제어 기능 및 머신러닝 기반 예측 모델과의 통합을 통해 추가적인 효율 향상을 도모할 예정이다. 이를 통해 물류 및 제조 시스템에서의 실질적인 기여를 확대할 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고문헌

- Boysen, N., Emde, S., Hoeck, M., & Kauderer, M. (2019). Automated sortation conveyors: A survey from an operational research perspective. *European Journal of Operational Research*, 274(2), 796-815.
- Cavada, J. P., Cortés, C. E., & Rey, P. A. (2017). A simulation approach to modelling baggage handling systems at an international airport. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 75, 146-164.
- De Koster, R., Le-Duc, T., & Roodbergen, K. J. (2014). Modeling conveyor merges in zone picking systems. In *Proceedings of the Productivity Measurement and Human Resources Conference 2014*. Georgia Southern University.
- Han, Y., Zhang, C., & Xie, L. (2010). Dynamic sequencing of jobs on conveyor systems for minimizing changeovers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9-12), 1251-1259.
- Haneyah, S. W. A., Hurink, J. L., Schutten, J. M. J., Zijm, W. H. M., & Schuur, P. C. (2011). Planning and control of automated material handling systems: The merge module. In A. Schmitt, S. Consoli, R. C. Dorne, & K. Luong (Eds.), *Operations Research Proceedings 2010*(pp. 281-286). Springer.
- International Conference on Automation, Robotics, and Computer Vision(pp. 1041-1048).
- Jing, G. G., Guo, L., He, W., & Deng, H. (1998). Modeling a controlled conveyor network with merging configuration. In *Proceedings of the*
- Johnstone, M., Sykora, M., & Kronlof, P. (2015). Simulation-based baggage handling system merge analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 53, 45-59.
- Khosravi, A., Mosadegh, M., Fattahi, M., & Parnianpour, M. (n.d.). Estimating performance indexes of a baggage handling system using metamodels.
- Rijsenbrij, J. C., & Ottjes, J. A. (2007). New developments in airport baggage handling systems. *Transportation Planning and Technology*, 30(4), 417-430.
- Tarău, A. N., De Schutter, B., & Hellendoorn, H. (2009). Route choice control of automated baggage handling systems. *Transportation Research Record*, 2106(1), 76-82.
- Van Der Gaast, J. P., De Koster, M. B. M., & Adan, I. J. B. F. (2018). Conveyor merges in zone picking systems: A tractable and accurate approximate model. *Transportation Science*, 52(6), 1428-1443.
- Wang, Y., & Zhou, C. (2010). A model and an analytical method for conveyor systems in distribution centers. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 19(4), 408-429.
- Wu, Y., Li, G., Zhu, Y., & Chen, H. (2017). Zone merge sequencing in an automated order picking system. *International Journal of Production Research*, 55(21), 6500-6515.

## 요약문

컨베이어 시스템은 공장 및 물류센터에서 가장 일반적으로 사용되는 자재 운송 방법 중 하나이다. 이 시스템은 아이템을 직접적으로 운송하는 주류(mainstream)와 외부에서의 투입 및 주류에서의 아이템 배출을 가능하게 하는 분기(branch)로 구성된다. 물류 흐름의 원활함을 위해 주류는 아이템 간의 적절한 간격을 유지해야 한다. 그러나 병합 지점에서 충돌이 발생하여 흐름에 장애를 일으키는 경우가 있다. 본 연구는 특정 자재가 주류로 투입된 후 다양한 분기로 배출되는 과정에서, 주류의 아이템 간격을 고르게 유지하는 방법을 연구하는 것을 목표로 한다. 특히, 투입 및 배출 지점이 무작위로 혼합되고 수량이 일치하지 않는 상황에서 균형 있는 분배를 달성하는 데 초점을 맞추고 있다. 이를 통해 각 분기 프로세스가 시간적으로 균형을 이루도록 하여, 라인 간 프로세스 편차를 줄이고 전체 생산 안정성에 기여하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서는 다중 병합 및 분기 지점을 가진 컨베이어 라인의 균형을 유지하기 위한 논리를 제안하고, 이를 시뮬레이션 분석을 통해 그 효과를 검증한다.

**주제어:** 병합제어, 컨베이어, 윈도우 레저베이션