

시뮬레이션 기반 제조 라인 공정-물류 통합 병목 분석 연구

Simulation-Based Integrated Bottleneck Analysis of Production and Logistics in Manufacturing Lines

2025.12.12

한국기술교육대학교

오주영*, 최민상, 정우진

배장원†

| 목차

1. Introduction
2. Simulation Modeling
3. Experimental
4. Conclusion

1. Introduction

연구 배경

▶ 제조 현장의 불확실성과 통합 분석의 필요성

[1] 스마트 팩토리 제조 환경은 디지털 전환과 자동화 기술 발전을 통해 고품질·고효율 생산을 목표로 운영됨.

[2] 그러나 실제현장에서는 수요 변동, 설비 고장, 물류 충돌과 같은 다양한 불확실성이 상시적으로 발생

[3] 문제는 이러한 불확실성으로 인해 발생한 단일 공정의 지연은 해당 공정에 국한되지 않고, 물류 흐름을 통해 전파되며 전체 생산 라인의 성능 저하로 확산되는 특성을 갖는다.

따라서 공정과 물류를 분리하여 분석할 경우 실제 병목 요인을 정확히 규명하기 어려움.

[1] Soori et al., "Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review", 2023

[2] "Situation-aware manufacturing systems for capturing and handling disruptions", Computers & Industrial Engineering, 2020

[3] Skoogh et al., "Throughput bottleneck detection in manufacturing" (2023)

연구 배경

▶ 기존 시스템의 한계

기존 MES(Manufacturing Execution System)/ERP(Enterprise Resource Planning) 시스템은 실시간 모니터링이나 계획 관리에서는 효과성을 보이고 있다.

그러나 이러한 시스템은

- (1) 공정과 물류의 동적 상호작용을 모델링할 수 없으며,
- (2) 운영 전략 변경 시 성능 변화를 사전에 검증할 수 없다는 한계를 가진다.

▶ 연구 목적

본 연구는 스마트 팩토리의 운영 전략을 사전 검증하고 의사결정을 지원하는 시뮬레이션 기반 정책 실험 도구 개발을 목적으로 한다. 이를 위해 시뮬레이션 개발 도구인 AnyLogic을 활용하여 제조 공정의 처리 흐름과 물류 시스템의 동적 특성을 동시에 반영한 공정-물류 통합 모델을 구축하였다.

궁극적으로는 구축된 모델을 통해 상호작용에서 발생하는 병목 요인을 정량적으로 진단하고, 다양한 개선 시나리오의 효과를 비교 분석하고자 한다.

2. Simulation Modeling 시뮬레이션 모델링

▶ 모델링 범위

1. 모델링 대상 : 한국기술교육대학교 K-Factory (교육용 스마트 팩토리)
2. 제조 라인 구성 (총 3개 Zone, 14개 세부공정)
 - A-Zone : 전처리·조립 공정 (A1~A7, 7개 공정)
 - B-Zone : 검사·포장 공정 (B1~B5, 5개 공정)
 - C-Zone : 원자재 관리 공정(C1~C2, 2개 공정)
3. 물류 운영 프로세스
 - 컨베이어 시스템
 - AMR : AMR -1 , 2, 3 (3대)

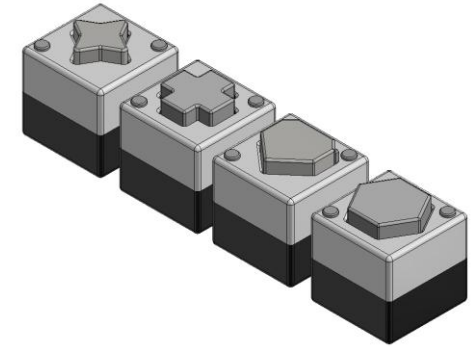


Figure. 생산 제품
3D 프린터 결과물의 다단계 조립

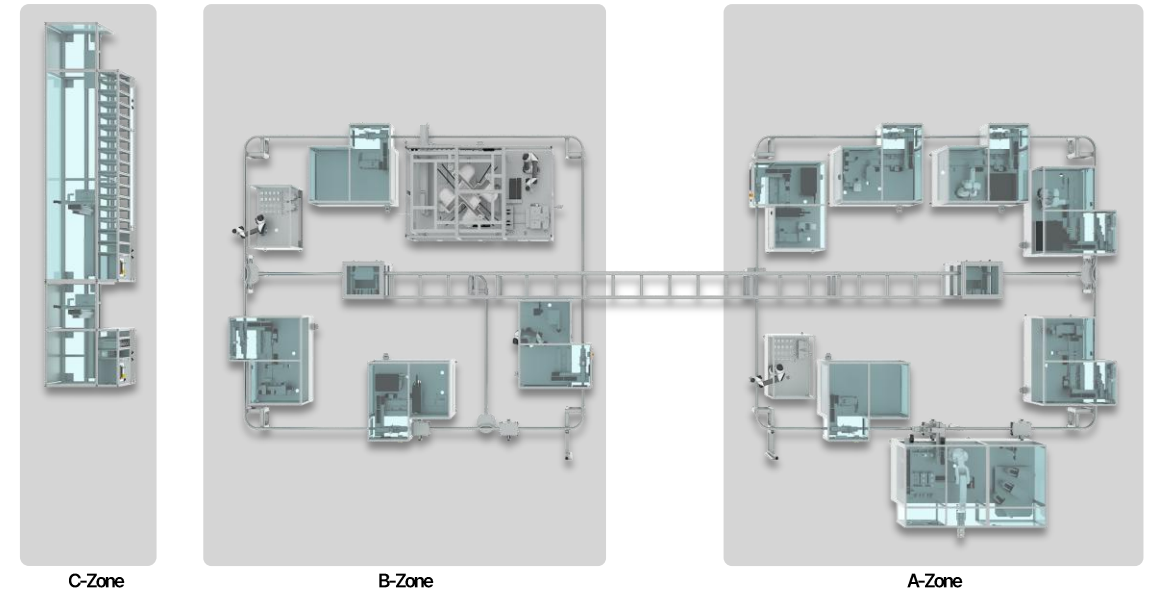


Figure. 제조라인

2. Simulation Modeling 시뮬레이션 모델링

▶ 시뮬레이션 모델링

하이브리드 시뮬레이션(DES + ABM)

생산 공정은 처리 시간을 기반으로 이산사건 시뮬레이션(DES, Discrete Event Simulation) 방식으로 구현하였고, AMR은 에이전트 기반 시뮬레이션(ABM, Agent Based Modeling) 방식으로 설계하였다.

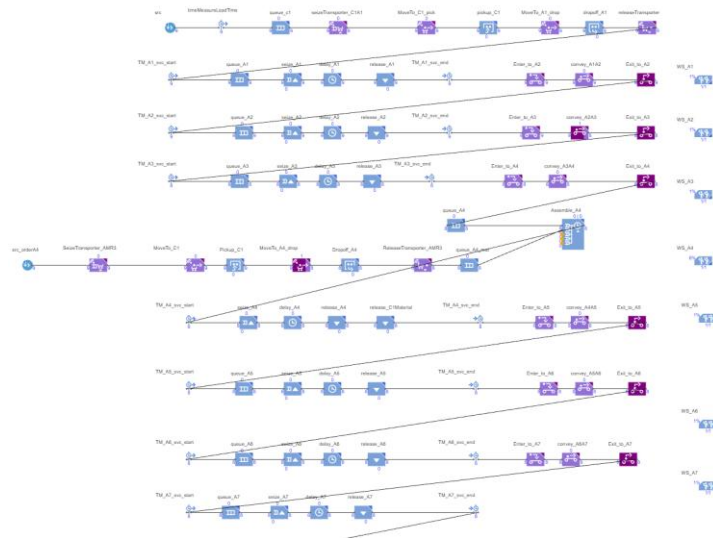


Figure. Anylogic으로 구현한 로직 일부

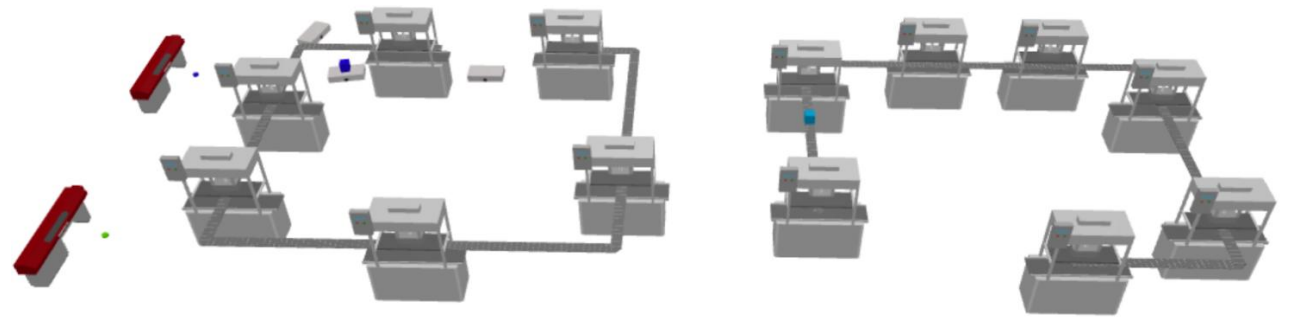


Figure. Anylogic으로 구현한 공정

2. Simulation Modeling 시뮬레이션 모델링

▶ 시뮬레이션 모델링 - 제조라인

- DES 기반
- 세부 공정 : 단순 Delay 모델
- Cycle Time :

Cycle Time = 실제 장비 로그 기반
확률분포 X, 고정값(평균값) 설정

→ 시나리오 비교 일관성 확보하여, 공정과 물류 상호작용의 순수 영향 분석 가능

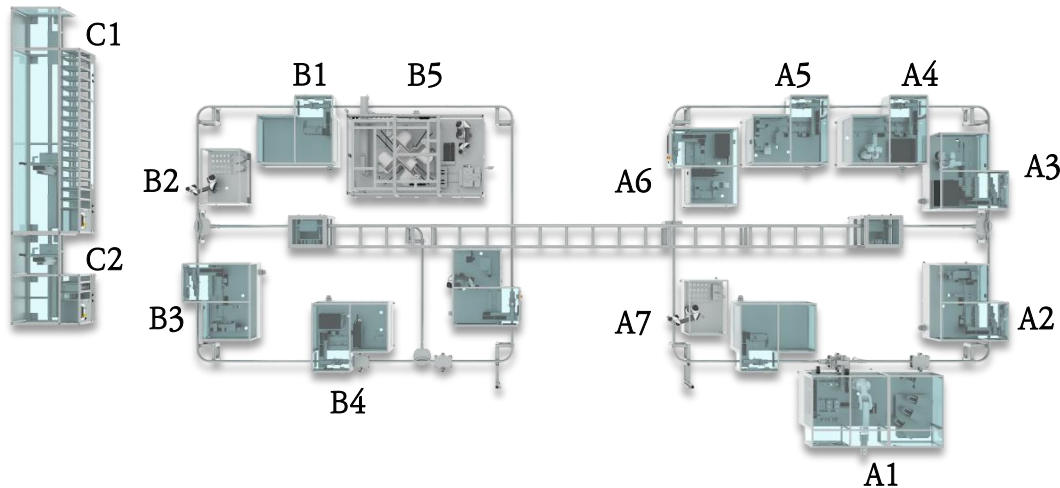


Figure. 공정 구조도



Figure. 공정 구조도

2. Simulation Modeling

시뮬레이션 모델링

▶ 시뮬레이션 모델링 - 물류 시스템

- 물류 시스템 구성 요소
 - Conveyor System
 - AMR(Autonomous Mobile Robot)
- Conveyor System
 - Zone 내부의 제품 이동을 담당
 - 제조라인 DES 모델 상에서 구현

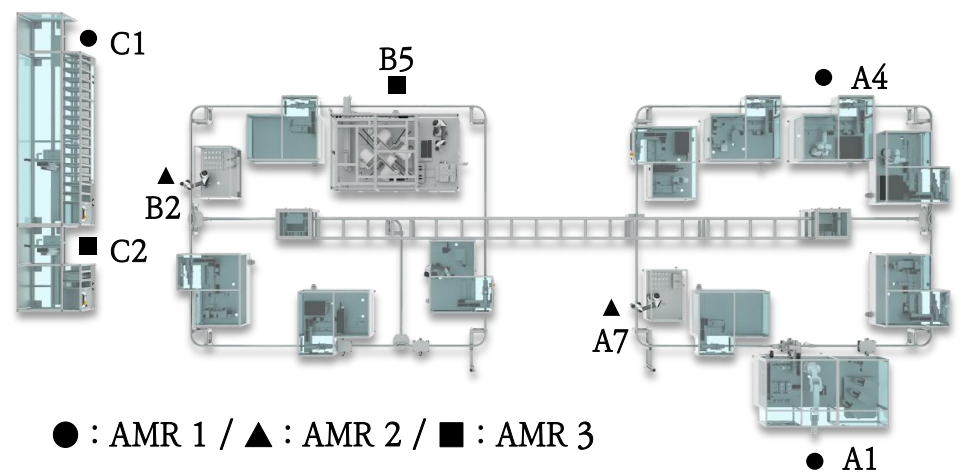


Figure. AMR 출발/도착 노드

Table. AMR 수행 역할

AMR	주요 이동 경로	수행 역할
AMR-1	C1 → A1, A4	원자재 출고 및 생산 투입 지원
AMR-2	A7 → B2	조립 완료 제품 이송
AMR-3	B5 → C2	최종 완제품 이송 및 출하

2. Simulation Modeling 시뮬레이션 모델링

▶ 시뮬레이션 모델링 - 물류 시스템

- AMR 모델링 방식 : ABM (Agent Based Modeling)
AMR은 독립적 행동 규칙을 갖는 에이전트로 정의하였으며,
다음 요소를 포함하여 설계됨: 이동속도, 가감속, 충돌 회피, 도킹 대기 및 적재/하역 로직, 우선순위 기반 디스패칭 규칙
- ABM 도입의 목적
DES만으로 표현하기 어려운 동적 물류 상호작용을 정밀하게 반영
공정-물류 복합 병목 요인의 정량적 분석 가능
물류 정책 변화(AMR 속도, 충돌 회피 반경, 경로 전략 등)의 사전 검증이 가능해짐

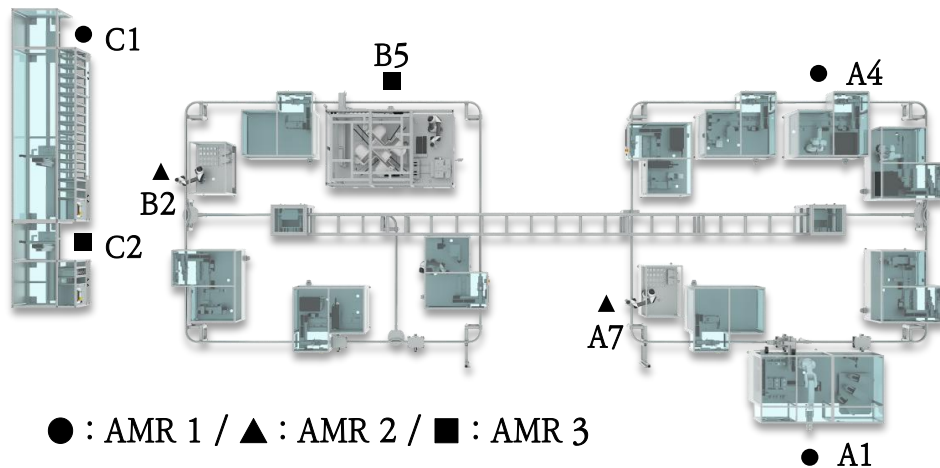


Figure. AMR 출발/도착 노드

Table. AMR 수행 역할

AMR	주요 이동 경로	수행 역할
AMR-1	C1 → A1, A4	원자재 출고 및 생산 투입 지원
AMR-2	A7 → B2	조립 완료 제품 이송
AMR-3	B5 → C2	최종 완제품 이송 및 출하

2. Simulation Modeling

시뮬레이션 모델링

▶ 시뮬레이션 모델링 - 파라미터

시뮬레이션 파라미터는 공정, 물류, 환경 요소들을 수치화하여 시스템의 동작을 정의하는 입력 변수. 본 연구는 시뮬레이션의 현실성과 완성도를 높이기 위해 다양한 파라미터들을 고려하여 설정했다.

- **공정 파라미터**
Cycle Time (공정 처리시간)
불량률
- **물류 파라미터**
AMR 이동 속도
AMR 가감속/충돌 회피 로직
AMR 사이즈
도킹 대기 시간
디스패칭 우선순위
Conveyor 이동 속도
- **환경 파라미터**
시뮬레이션 기간 (5 Hours)

Table. 주요 파라미터

구분	파라미터	단위	설명
공정	A1~A7 공정 Cycle Time	min/EA	실제 장비 로그 기반, 공정 처리시간
공정	B1~B5 공정 Cycle Time	min/EA	장비 사양서 및 공정 표준 시간
물류	컨베이어 속도	m/s	Zone 내부 공정 간 자동 이송 속도
물류	AMR 이동 속도	m/s	Zone 간 이송 시간에 영향을 주는 핵심 변수
물류	도킹·적재 시간	min	작업 전 준비/적재 과정에서 발생하는 시간
물류	AMR 충돌 회피 반경	m	AMR 간 충돌 방지를 위한 안전 거리
환경	시뮬레이션 기간	hours	KPI가 수렴을 위해 설정한 전체 시뮬레이션 시간

3. Experimental

실험 설정

▶ KPI 설정

제조 시스템의 성능을 평가하기 위해서는 명확한 지표가 필요하다. 본 연구는 공정-물류 상호작용이 시스템 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 다음 5가지 KPI를 설정하였다.

- KPI 선택 기준:
- ① 시간 관점: 평균 리드타임, 평균 사이클타임
 - ② 생산 관점: 시간당 처리량, 총 생산량
 - ③ 자원(설비) 관점: 가동률

5가지 KPI는 시간, 생산, 자원의 3가지 관점에서 시나리오별 개선 효과를 종합적으로 평가할 수 있게 한다.

Table. KPI

KPI	공식	의미	활용	구분
평균 라인 리드타임	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{finish,i} - t_{arrival,i})$	제품이 투입부터 출고까지 라인 내에서 머문 평균 시간	시나리오 간 시간 효율성 비교	시간
평균 사이클타임	$\frac{\sum Processing\ Time}{Time}$	각 공정(A1~A7 등)에서 실제 가공에 소요된 평균 시간	어느 공정이 가장 큰 제약인지 파악	시간
시간당 처리량	$\frac{Total\ Output}{Time}$	단위 시간(1시간) 동안 처리된 평균 제품 수	리드타임과 보완적으로 생산성 평가	생산
총 생산량	$\sum_{i=1}^t Output_i$	시뮬레이션 진행에 따라 누적 처리된 제품 총 수량	전체 생산 능력의 차이 비교	생산
가동률	$\frac{Busy\ Time}{Total\ Available\ Time} * 100$	시뮬레이션 시간 동안 설비가 실제 가동된 시간의 비율	유휴 시간 존재 여부 판단	자원

3. Experimental 실험 설정

▶ Baseline

실험을 통하여 스마트 팩토리에서 공정 개선과 물류 최적화 중 어느 개선이 시스템 성능에 더 큰 영향을 미치는지를 규명하고자 한다. 이를 위해 Baseline을 설정하고 3가지 시나리오를 통해 체계적으로 비교 분석하였다.

Baseline은 현재 K-Factory 제조 시스템의 실제 운영 상태를 그대로 반영한 모델로, 어떠한 개선사항도 적용되지 않은 상태이다.



Figure. 대시보드(베이스라인의 KPI)

Table. Base Model 결과

지표	수치	의미
평균 라인 리드타임	9.39분	전체 제품 1개 생산에 약 9분 이상 소요
총 생산량	33 EA	동일 시간대 처리 가능한 생산 개수 제한
시간당 처리량	6.57 EA/h	생산 효율 저하
공정 밸런스(사이클타임, 가동률)	A4 공정의 사이클 타임/ 가동률이 타 공정 대비 현저히 길다	

3. Experimental 실험 설정

▶ Baseline

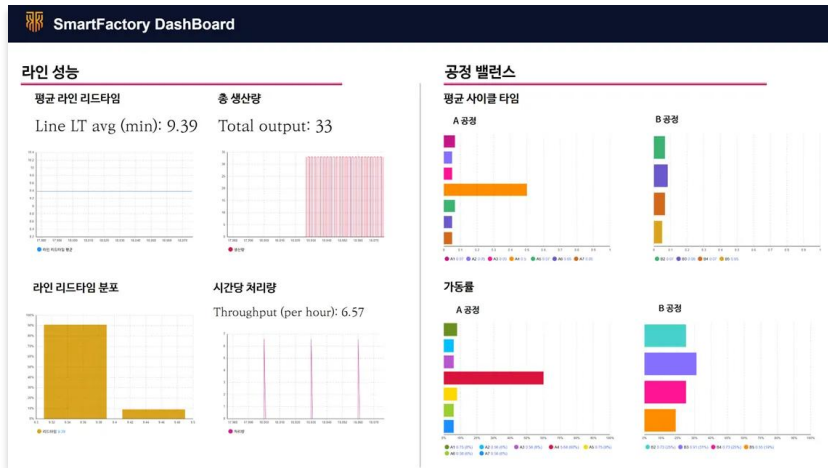


Figure. 대시보드(베이스라인의 KPI)

주요 문제점

A4 공정 병목: 다른 공정 대비 2배 이상의 처리시간/가동률

원인

1. A4공정의 높은 사이클 타임 (KPI)
2. A4 공정에서 간헐적 자재 결핍 현상 발생 (시각적 분석)
 → AMR이 A4공정에 자재를 공급 하는데 소요되는 시간 > A1~A3 공정이 진행에 소요되는 시간

Table. Base Model 결과

지표	수치	의미
평균 라인 리드타임	9.39분	전체 제품 1개 생산에 약 9분 이상 소요
총 생산량	33 EA	동일 시간대 처리 가능한 생산 개수 제한
시간당 처리량	6.57 EA/h	생산 효율 저하
공정 밸런스(사이클타임, 가동률)	A4 공정의 사이클 타임/ 가동률이 타 공정 대비 현저히 길다	

3. Experimental 실험 설정

▶ 시나리오 설정

S1(공정 개선) : 가장 큰 병목인 A4 공정의 Cycle Time을 40% 단축
→ 공정 개선만으로 시스템 성능이 얼마나 향상되는가

S2(물류 최적화) : AMR의 이동 속도를 4배 향상시키고 충돌 회피 반경, 가/감속 개선 등을 통한 효율 개선
→ 물류 최적화만으로 공정-물류 병목이 얼마나 해소되는가

S3(통합 개선)은 S1의 공정 개선과 S2의 물류 최적화를 함께 적용
→ 공정-물류 통합 개선의 복합 효과를 측정

이는 제조 시스템에서 공정 개선과 물류 최적화 중 어느 것이 더 우선순위가 높은지, 또는 둘의 조합이 최적인지를 판단하는 데 핵심적인 근거를 제공한다.

Table. 시나리오

시나리오	적용대상	적용내용	주요 변경요소
S1	A4 공정	장비 교체 및 공정 속도 향상	Cycle Time 40% 단축
S2	AMR	이동 속도 및 충돌 회피 최적화	AMR 속도 4배 향상, 경로 효율 개선
S3	A4 공정 + AMR	공정 장비 개선 + 물류 정책 최적화	Cycle Time 단축 + AMR 속도 향상

3. Experimental 배경

▶ 실험 결과

3가지 시나리오의 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

Table. 실험 결과 KPI

시나리오	개선 내용	평균 리드 타임	시간당 처리량	총 생산량	변화율
Baseline	기준 상태	9.39 (분)	6.57 EA/h	33	-
S1	A4 공정 개선	9.18 (분)	6.58 EA/h	33	리드타임 2.2% 감소
S2	AMR 개선	6.17 (분)	13.39 EA/h	67	리드타임 34.3%감소, 처리량 약 200% 증가
S3	공정+AMR 개선	5.94 (분)	13.40 EA/h	67	리드타임 36.7% 감소

S1(공정 개선): A4 공정의 처리시간을 단축했음에도 리드타임 개선은 2.2%에 그치고 처리량은 거의 변화가 없었다.
이는 공정 개선만으로는 시스템 성능을 제약하는 물류 병목을 해소할 수 없음을 의미한다.

S2(물류 최적화) : AMR 이동 성능 개선은 리드타임 34.3% 감소, 처리량 및 생산량 약 2배 증가라는 매우 큰 성과를 가져왔다.
S1 대비 15배 이상의 개선 효과로, 시스템 성능의 핵심 결정요인이 물류 흐름임을 명확히 확인할 수 있다.

S3. 통합 개선 : S3는 S2 대비 추가 개선 폭이 거의 없으며, 처리량·생산량 모두 동일하고 리드타임도 2.4%p만 감소하였다.
이는 물류 병목이 해소된 상태에서는 공정 개선이 추가적인 성능 향상을 제공하지 못함을 보여준다.

3. Experimental

실험 결과

▶ 실험 결과

Table. ROI 분석

시나리오	투자비용 (상대 단위)	생산성 증가율	ROI
Baseline	0	기준	
S1	1.0	0.15%	-99.8%
S2	0.1	103.8%	+938%
S3	1.1	104%	+3.8%

종합적으로, 성능 지표(KPI)만을 기준으로 평가하면 통합 개선(S3)이 리드타임·처리량·가동률 등 전반적인 운영 성능에서 가장 우수한 대안이다. 그러나 ROI 관점에서 비용 대비 성능 향상을 고려하면, 최소 투자로 가장 큰 성능 개선을 달성한 물류 최적화(S2)가 경제적 효율 면에서 가장 우수한 선택지로 나타났다.

4. Conclusion

결론

▶ 한계점

- 시간 관련 파라미터들을 고정값으로 설정하여 실제 제조 환경의 확률적 변동성은 반영하지 못함
- 단일 라인·3대 AMR 기반 모델로, 대규모 시스템으로의 일반화에는 제한 존재
- 실시간 데이터 기반 제어 및 최적화 기능은 미구현 상태

▶ 향후 연구

- 반도체 제조환경과 같은 다라인·다중 AMR의 반도체 스마트 팩토리 환경에서 모델 확장 검증 예정
- 확률적 DES 모델로 확장하여 실제 운영 변동성 반영
- 강화학습(RL) 기반 AMR 운영 최적화 모델 개발