

A Simulation Evaluation of Aisle Design and Operation Policies for an Automated Storage and Retrieval System with Narrow-/Wide-Width Racks

Bosung Kim · Jeongtae Park · Soondo Hong[†]

Department of Industrial Engineering, Pusan National University

다품종 조립라인 자동화 물류창고의 이형 랙 배치 및 운영정책 시뮬레이션 평가

김보성 · 박정태 · 홍순도[†]

부산대학교 산업공학과

In an automotive plant, an automated storage and retrieval system (ASRS) synchronizes material handling flows from a part production line to an auto-assembly line. The part production line transfers parts on small-/large-sized pallets. The products on pallets are temporarily stored on the ASRS, and the ASRS retrieves the products upon request from the auto-assembly line. Each ASRS aisle is equipped with narrow-/wide-width racks for two pallet sizes. An ASRS aisle with narrow-/wide-width racks improves both storage space utilization and crane utilization while requiring delicate ASRS aisle design, i.e., the locations of the narrow-/wide-width racks in an ASRS aisle, and proper operation policies affect the ASRS performance over demand fluctuations. We focus on operation policies involving a common storage zone using wide-width racks for two pallet sizes and a storage-retrieval job-change for a crane based on assembly-line batch size. We model a discrete-event simulation model and conduct extensive experiments to evaluate operation policies. The simulation results address the best ASRS aisle design and suggest the most effective operation policies for the aisle design.

Keywords : Logistics, Manufacturing, Simulation, ASRS

1. 서 론

최근 제조시스템은 다각화되는 고객 니즈 변화에 신속히 대응하기 위한 유연한 생산시스템 구축이 필수적이다. 다품종 소량 생산과 혼류 생산체제로의 변화는 물류 복잡성을 극대화하며 효과적인 공정간 물류를 위한 물류시스템과 운영정책이 필요한 실정이다. 특히, 자동차 공장(Automotive plant)의 부품생산공정(Part production line)과 자동화 조립

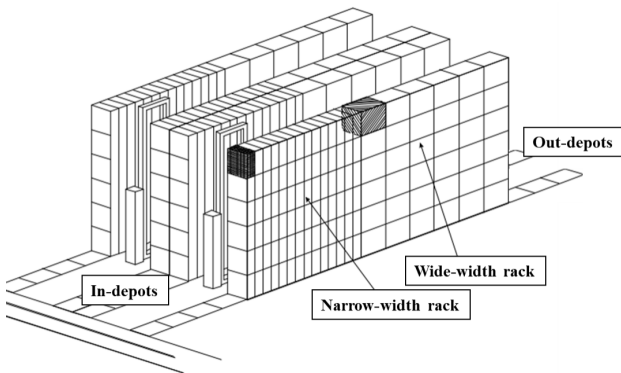
공정(Auto-assembly line)으로의 부품(Parts)의 적시 공급이 공장의 생산성을 극대화하는데 중요하다. 하지만, 부품생산 및 조립공정의 서로 다른 생산주기와 처리시간으로 인해 공정간 수요-공급 불균형을 유발하며, 이는 다양한 부품을 임시 저장할 수 있는 자동창고 시스템(Automated Storage and Retrieval System, ASRS)의 필요성을 강조한다[14].

ASRS는 제조공장과 물류창고에서 부품 혹은 자재가 적재된 팔레트(Pallet)의 저장과 반출을 수행하며 수요와 공급 사이에 완충공간 역할을 수행한다[5]. 일반적인 ASRS는 저장 및 반출 작업 요청이 발생하는 입출고지점과 자재가 저장되는 랙(Rack)으로 구성되어 있으며, 입출고 지점

Received 17 February 2023; Finally Revised 17 March 2023;
Accepted 17 March 2023

[†] Corresponding Author : soondo.hong@pusan.ac.kr

과 랙 사이의 자재의 저장 및 반출 작업은 S/R 크레인 (Storage/Retrieval machine)이 수직 및 수평 방향으로 동시에 이동하며 수행한다. 입고와 출고지점은 ASRS의 운영 환경과 목적에 따라 단일 및 복수지점에서 통합 혹은 분리하여 운영한다. 본 연구에서는 <Figure 1>과 같이 부품생산 및 조립공정간 다품종의 부품 물류를 처리하기 위한 분리된 입출고 지점과 단위 길이가 다른 이형 랙 ASRS (Separated I/O Depots and Two-types of Racks ASRS, SDTR-ASRS)을 연구 대상시스템으로 한다.



<Figure 1> Automated Storage and Retrieval System with Separated I/O Depots and Two-Types of Racks [3]

부품생산 및 조립공정 사이에 위치하는 SDTR-ASRS는 입고지점과 출고지점을 분리하여 운영함으로써 공정간 생산일정을 동기화하기 위한 부품의 저장과 반출을 수행한다. 또한 단위 길이가 다른 이형 랙 구조는 다품종 소량 생산을 용이하게 한다[11]. 이형 랙 활용의 다른 장점으로는 대형랙을 공동저장영역(Common storage zone)으로 활용하는 유연한 저장 운영이 있다[12]. SDTR-ASRS의 운영자는 생산환경에 따라 적합한 운영정책을 활용할 수 있다. 본 연구에서는 이형 랙 배치, 공동저장영역 활용, 저장-반출 작업전환 운영정책의 시뮬레이션 연구를 통해 운영환경별 적합한 운영정책과 정책조합을 제시한다. 본 연구의 제2장에서는 문헌연구를 소개하고, 제3장에서는 SDTR-ASRS 시뮬레이션의 가정사항과 운영환경 및 운영정책을 상세히 설명한다. 제4장은 시뮬레이션 실험 결과로 운영환경별 운영정책 및 정책조합을 평가한다. 마지막으로 제5장은 결론을 내리는 순서로 논문을 구성하였다.

2. 문헌연구

기존의 문헌연구에서는 ASRS의 효과적인 저장과 반출 작업을 위한 S/R 크레인 이동시간과 작업 응답시간 최소화를 위한 선행연구가 주로 수행되었다. ASRS의 구조에

따라 one-depot, two-depot ASRS로 구분할 수 있으며, 이 동시간 및 응답시간 평가 및 최소화 위한 확률모형과 스케줄링 연구가 선행되었다.

Bozer and White[1]는 one-depot, two-depot ASRS의 S/R 크레인의 단일 및 이중명령에 대한 기대 이동시간을 추정하는 확률모형을 제안하였다. Nam et al.[13]은 저장과 반출 작업 요청이 포아송 과정으로 발생하는 운영환경에서 이중명령을 우선 처리하는 ASRS의 평균 작업 응답시간을 추정하는 확률모형을 제안하였다. Hur et al.[6]은 one-depot ASRS의 저장 및 반출 작업 대기열 길이를 추정하는 확률모형을 제안하고 이를 시뮬레이션으로 검증하였다. Chung and Kim[4]은 ASRS와 유사한 LCD공정의 스토커 시스템의 단일 및 듀얼로봇의 기대 이동시간을 추정하는 확률모형을 제안하였다. 이와 같이 확률모형을 통한 S/R 크레인의 기대 이동거리와 작업 응답시간을 평가하는 선행연구에서는 ASRS의 형태와 운영환경에 따른 설계의 기준을 제시하고 있다[1, 4, 6, 13].

ASRS의 설계가 결정된 이후, S/R 크레인의 저장 및 반출 작업의 스케줄링이 생산성을 결정한다. Gharehgozli et al.[5]은 two-depot ASRS의 반출 작업 순서 결정 알고리즘을 제안하였다. Tanaka and Araki[16]는 동일한 ASRS에서 S/R 크레인 이동거리 최소화를 위한 MILP (Mixed-integer linear programming) 모형을 제안하였다. Gharehgozli et al.[5]과 Tanaka and Araki[16]의 연구를 통해 two-depot ASRS는 저장-반출 작업전환 빈도를 최소화함으로써 이동거리를 최소화할 수 있다. 하지만 이들의 연구에서는 저장 및 반출 작업 응답시간을 고려하지 않았다. Lee and Kim[8]은 저장 및 반출 작업에 납기가 존재하는 Just-in-time 운영환경을 고려한 one-depot ASRS의 스케줄링 연구를 수행하였으며 작업 응답시간을 평가하였다[5, 8, 16].

Ven den Berg and Gademann[17]은 one-depot ASRS의 운영정책 시뮬레이션 연구를 수행하여 작업 응답시간과 S/R 크레인 이동거리 사이에 절충이 발생함을 보였다. Moon and Kim[12]은 one-depot ASRS의 등급별 저장 (Class-based storage) 연구를 확장한 공동저장영역(Common storage zone)에 관한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 작업발생 빈도와 작업량을 고려한 시뮬레이션 연구를 통해 공동저장영역을 확장함으로써 S/R 크레인 이동거리 감소와 처리량이 개선됨을 보인다. Chun and Lee[3]는 다품종 소량생산 시스템에 대응하는 이형 랙 ASRS의 필요성과 S/R 크레인 이동거리 추정 확률모형을 제안하였다. Lee et al.[10]은 이형 랙 ASRS의 설비, 건축, 운영비용을 고려한 최적 설계 수리모형과 알고리즘을 제안하였다 [3, 10, 12, 17].

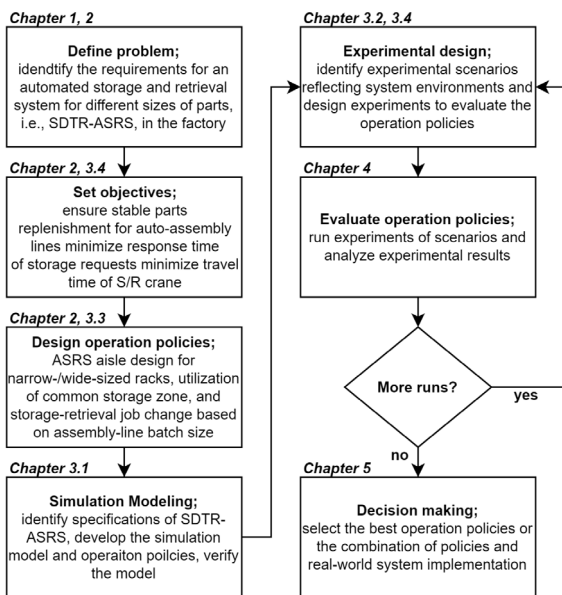
SDTR-ASRS와 관련된 연구로 분리된 입출고 지점이 있는 Separated I/O Depots ASRS의 스케줄링 연구[5, 16]와

다양한 랙 규격을 고려한 Two-types of Racks ASRS의 생산성 평가 연구 및 최적설계 연구[2, 3, 9, 10, 11]가 선행되었다. Gharehgozli et al.[5]과 Tanaka and Araki[16]의 연구를 통해 SD-ASRS의 저장-반출 작업전환 빈도가 작업 응답시간 및 S/R 크레인 이동시간에 영향을 미침을 확인하였다. Chun and Lee[3]와 Lee et al.[9]은 이형 랙 ASRS의 생산성 추정을 위한 크레인 이동거리 확률모형을 제안하였으며, 저자의 후속연구[10, 11]에서 최적 이형 랙 설계를 위한 수리모형을 제안하였다. Cardona and Gue[2]는 다양한 규격의 랙 배치에 따른 시뮬레이션 평가를 수행하여 이형 랙 활용이 ASRS 운영에 경제적 이점이 있음을 보였다.

선행연구는 다양한 구조의 ASRS 연구를 수행하였으나, 자동화 공장 내 부품생산 및 조립공정 사이의 완충 역할을 수행하는 SDTR-ASRS의 이동거리와 응답시간을 동시에 고려하는 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 논문은 SDTR-ASRS의 이형 랙 배치와 운영정책을 평가하는 시뮬레이션 연구를 통해 다양한 운영환경별 효과적인 운영정책 및 정책조합을 제시한다.

3. SDTR-ASRS 운영정책 시뮬레이션 평가

본 장에서는 SDTR-ASRS 시뮬레이션 평가 절차와 시뮬레이션 가정사항, 운영환경, 운영정책을 소개한다. 본 연구에서는 <Figure 2>와 같이 시스템 분석을 바탕으로 시뮬레이션 구현, 운영정책 수립, 실험계획 및 시뮬레이션 평가를 수행한다[7, 15].



<Figure 2> Procedure for Simulation Study of Operation Policies of SDTR-ASRS [7, 15]

3.1 시뮬레이션 가정사항

본 장에서는 SDTR-ASRS의 다양한 운영환경별 운영정책 평가를 위한 시뮬레이션과 가정사항을 소개한다. <Table 1>에 SDTR-ASRS의 제원과 가정사항을 나타낸다. 이형 랙은 소형 랙(Narrow-width rack)과 대형 랙(Wide-width rack)으로 구분한다. 소형 랙에는 소형 부품이 적재된 소형 팔레트(Small-sized pallet)만 보관할 수 있고 대형 랙에는 소형/대형 팔레트(Small-/large-sized pallet) 모두 보관할 수 있다. S/R 크레인은 수직-수평 방향으로 동시에 움직이며(Chebyshev distance) 단일명령과 이중명령을 모두 수행한다. 고정비용인 S/R 크레인의 Pick-up과 Deposit 시간은 1초로 가정한다. 팔레트는 무작위의 빈 슬롯에 저장하며 먼저 발생한 작업을 먼저 처리(FCFS)한다. 또한 작업 요청은 무한 대기열을 가정한다.

<Table 1> Specifications of SDTR-ASRS

Two-sided storage aisle configuration	
Number of aisles	1
Number of bays	20
Number of narrow-width rack bays	14
Number of wide-width rack bays	6
Number of tiers	16
Narrow-width rack size	L: 3, H: 2 (m)
Wide-width rack size	L: 4, H: 2 (m)
Number of types of pallets	2 (Small, Large)
Small-sized pallet size	L: 2.8, H: 1.8 (m)
Large-sized pallet size	L: 3.8, H: 1.8 (m)
Pick-up/deposit time	1 (sec)
S/R crane speed	1 (m/sec)
Single and dual command mode of S/R crane	
Chebyshev distance	
Random open location storage	
FCFS for storage and retrieval requests	
Infinite buffer for storage and retrieval requests queue	

3.2 SDTR-ASRS 운영환경

본 연구는 부품생산 공정과 조립공정의 다른 생산주기와 일정을 가정한다. 부품생산 공정은 일일 16시간, 조립공정은 일일 24시간 가동한다. 부품생산과 조립공정이 모두 운영되어 저장과 반출 작업이 동시에 발생하는 16시간은 저장이 반출 작업보다 빈번하게 발생한다. 저장과 반출 작업 요청 도착간격을 각각 α, β 라 하였을 때, $\beta/\alpha = 1.5$ 인 경우 저장과 반출 부품 수량 간 균형을 이룬다. 균형을 이룬 운영환경 예시는 $\alpha = 120$ 초, $\beta = 180$ 초이다. 본 연구에서는 α 를 고정하고, β 를 변경하며 다양한 운영환경을

분석한다. α, β 의 지수분포 도착간격을 가정한다. 부품조립공정의 소형 부품과 대형 부품 산출량 비율은 소형 랙과 대형 랙 수의 비율과 같이 7:3으로 가정한다.

<Table 2> Operational Environment of SDTR-ASRS

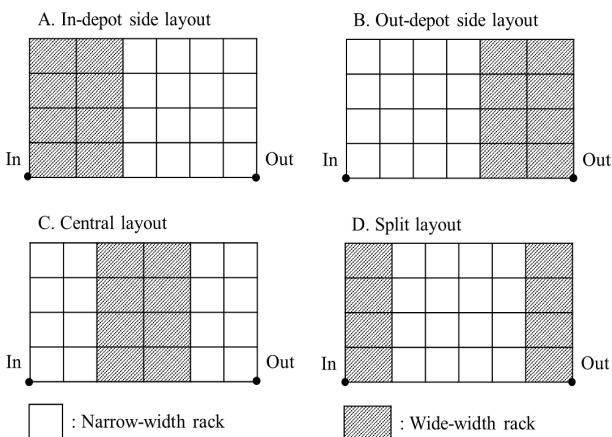
Storage operating time	16 (hour/day)
Retrieval operating time	24 (hour/day)
Arrival rate of storage (α)	120 (sec)
Arrival rate of retrieval (β)	192, 180, 168, 156 (sec)
Distribution of arrival rate	Exponential
Ratio of small/large-sized parts	7:3

3.3 운영정책 및 파라미터

SDTR-ASRS는 이형 랙 배치와 공동저장영역의 활용이 생산성에 영향을 미친다[3, 12]. 또한 입고지점과 출고지점이 분리되어 있으므로 저장-반출 작업전환 횟수가 S/R 크레인의 이동시간에 영향을 미친다[16]. 따라서, 본 연구에서는 이형 랙 배치, 공동저장영역 활용률, 저장-반출 작업전환 운영정책과 정책조합에 따른 시뮬레이션 연구를 수행한다.

3.3.1 이형 랙 배치

소형/대형 랙의 이형 랙 배치 의사결정은 공동저장영역 활용률, 저장-반출 작업전환 운영정책 이전에 결정한다. 따라서 다양한 운영환경과 운영정책 조합을 고려하여 강건한 생산성을 보장하는 이형 랙 배치가 필요하다. 본 연구에서는 <Figure 3>과 같이 4가지 이형 랙 배치를 고려한다. 이형 랙 배치(Aisle design, L)는 공용랙의 위치를 기준으로 In-depot side, Out-depot side, Central, Split으로 구분한다.



<Figure 3> Four Aisle Designs of ASRS Basis on Wide-sized Racks: A. In-depot side, B. Out-depot side, C. Central, D. split layout

3.3.2 공동저장영역 활용률

소형 부품만 보관할 수 있는 소형 랙과 달리 대형 랙은 소형/대형 부품 모두 보관할 수 있다. 따라서 대형 랙에 소형/대형 부품을 얼마나 혼합하여 저장할 것인지를 결정하는 공동저장영역 활용률(Utilization of common storage zone, U) 운영정책을 고려한다. $U=0\%$ 인 경우, 대형 랙에는 대형 부품만 보관하며, U 가 증가할수록 대형 랙에 보관할 수 있는 소형 부품의 수량이 증가한다.

3.3.3 저장-반출 작업전환

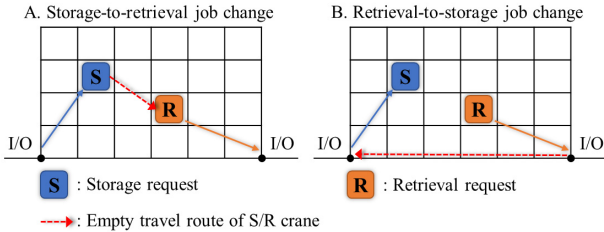
S/R 크레인은 입고지점에서 발생하는 저장 작업과 출고지점에서 발생하는 반출 작업을 처리한다. 선행연구에 따르면 SDTR-ASRS와 같이 입고지점과 출고지점이 분리된 ASRS의 경우, 높은 빈도의 저장-반출 작업전환은 S/R 크레인의 공차이동 시간을 증가시킨다[15, 16]. 또한 낮은 빈도의 저장-반출 작업전환은 작업 응답시간의 지연을 유발한다[17]. 따라서 본 연구에서는 운영환경별 적합한 작업전환 빈도를 조립공정에서 요청하는 조립공정 배치 크기 (Assembly-line batch size, R)를 통해 결정한다. SDTR-ASRS는 선행 부품생산 공정과 후속 조립공정 사이에 위치하므로 조립공정의 출고 요청에 따라 부품을 적시 공급하는 것이 가장 중요한 역할이다. 따라서 조립공정의 버퍼 수량이 안전재고수준에 도달하였을 때, 조립공정 배치 크기만큼 반출 작업을 수행하여 조립공정에 안정적으로 부품을 공급하는 작업전환을 고려하였다.

3.4 시뮬레이션 실험설계 및 성과척도

SDTR-ASRS는 저장 작업 요청 반응시간(Response time of storage requests)과 S/R 크레인 공차이동시간(Empty travel time of S/R crane) 및 가동률(Utilization of S/R crane)을 통해 생산성을 평가한다. 저장 작업 요청 반응시간을 평가한 이유는 다음과 같다. 3.3.3에서 설명된 바와 같이 반출 작업은 조립공정의 안정적인 부품 공급을 보장하므로, 저장 작업 요청 반응시간을 SDTR-ASRS의 주요 성과척도로 평가한다.

S/R 크레인의 공차이동시간을 평가하는 이유는 다음과 같다. 먼저, S/R 크레인의 저장 작업흐름은 (1) 작업 시작 위치→(2) 입고지점→(3) 보관 슬롯이다. 반출 작업흐름은 (1) 작업 시작 위치→(2) 보관 슬롯→(3) 출고지점이다. 위 작업흐름 중 (1)→(2)는 S/R 크레인의 작업순서 및 작업전환에 의해 결정되는 공차이동시간에 해당한다. 반면, 작업흐름 (2)→(3)은 S/R 크레인의 이동시간 중 고정 이동시간에 해당한다. <Figure 4>는 저장-반출, 반출-저장 작업전환 시 발생하는 S/R 크레인의 작업흐름이다. SDTR-ASRS와 같이 입고와 출고지점이 분리된 경우에 반출-저장 작업전

환 시 비용이 큰 공차이동이 발생함을 확인할 수 있다 (<Figure 4B>). 따라서, 작업전환의 빈도가 S/R 크레인 운영 효율에 영향을 미치므로 본 연구에서는 S/R 크레인의 공차이동시간을 평가한다.



<Figure 4> Two Cases of Empty Travelling of S/R crane:
A. Storage-to-retrieval, B. Retrieval-to-storage

S/R 크레인의 가동률은 시스템 운영 부하를 나타내는 성과척도 지표이다. 본 연구에서 S/R 크레인의 가동률은 (총 작업시간 - 유ힴ시간)/(총 작업시간)×100으로 평가한다. <Table 3>에 SDTR-ASRS 시뮬레이션의 운영환경별 운영정책 및 정책조합을 평가하는 성과척도를 나타낸다.

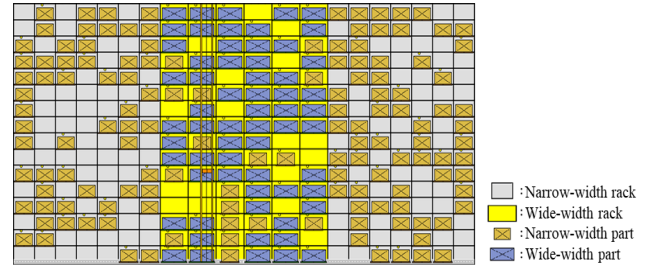
<Table 3> Performance Metrics

Response variables	Units
Response time of storage requests	sec
Empty travel time of S/R crane	sec
Utilization of S/R crane	%

4. 운영정책 시뮬레이션 실험 및 결과

SDTR-ASRS 시뮬레이션은 Tecnomatics Plant Simulation 16.1로 구현되었다. <Figure 5>는 이형 랙 배치 Central 배치, 공동저장영역 활용률 52.5% 시뮬레이션 런타임 환경 예시이다. <Table 4>에 나타난 각 실험조건 당 10회 반복 실험하였다. 운영환경과 운영정책에 따른 전체 실험 횟수는 총 9600회이다. 안정상태(Steady state)의 시뮬레이션 결과를 도출하기 위한

시뮬레이션 예비 가동시간(Warm-up time)은 2일이며 관측 시간은 3일이다. 시뮬레이션 실행환경은 Intel(R) Core(TM) i5-11600k @ 3.90GHz, 32.00GB Ram이 활용되었다.



<Figure 5> SDTR-ASRS simulation configuration at run time:
L = Central layout, U = 52.5%

<Table 4> Experimental Factors of Simulation

Factors	Levels
Retrieval/Storage rate ratio, β/α	1.6, 1.5, 1.4, 1.3
Narrow-/wide-with racks aisle design, L	In-depot side, Out-depot side, Central, Split
Utilization of common storage zone, U (%)	0, 17.5, 35, 52.5
Assembly-line batch size, R (unit)	1, ..., 15

4.1 이형 랙 배치 운영정책 분석

본 장에서는 4가지 이형 랙 배치(In-depot side, Out-depot side, Central, Split)에 따른 저장 작업 요청 응답시간과 S/R 크레인 가동률을 분석한다. <Table 5>는 $U=0\%$ 에서 각 운영환경(β/α)별 이형 랙 배치의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 평균 저장 작업 요청 응답시간과 S/R 크레인의 가동률은 β/α 가 증가할수록 증가한다. 운영환경이 가장 여유로운 $\beta/\alpha=1.6$ 에서 Out-depot side 배치가 가장 빠른 응답시간을 보인다. 이는 부품 중 70%를 차지하는 소형 부품이 입고지점과 가까운 위치에 보관되기 때문이다. 반면, 운영환경이 가장 바쁜 $\beta/\alpha=1.3$ 에서 Split 배치가 가장 빠른 응답시간을 보인다. 이는 운영환경이 바빠질수록 대

<Table 5> Simulation Results of Average Response Time of Storage Requests (Avg. Res) and Average Utilization of S/R Crane (Avg. Util) for Different β/α and L ($U = 0\%$)

β/α \ Layout	In-depot side		Out-depot side		Central		Split	
	Avg.Res. (sec)	Avg.Util. (%)	Avg.Res. (sec)	Avg.Util. (%)	Avg.Res. (sec)	Avg.Util. (%)	Avg.Res. (sec)	Avg.Util. (%)
1.6	997.4	63.3	816.0	62.9	957.2	63.5	849.4	62.8
1.5	1205.8	65.3	916.9	65.3	1118.5	65.7	987.2	64.9
1.4	1715.2	67.6	1343.5	67.6	1665.3	68.1	1438.7	67.3
1.3	2625.4	70.0	2473.1	70.0	2735.0	70.4	2374.7	69.6

부분의 부품을 중앙 측에 보관해야 효율적인 SDTR-ASRS 운영이 가능함을 나타낸다.

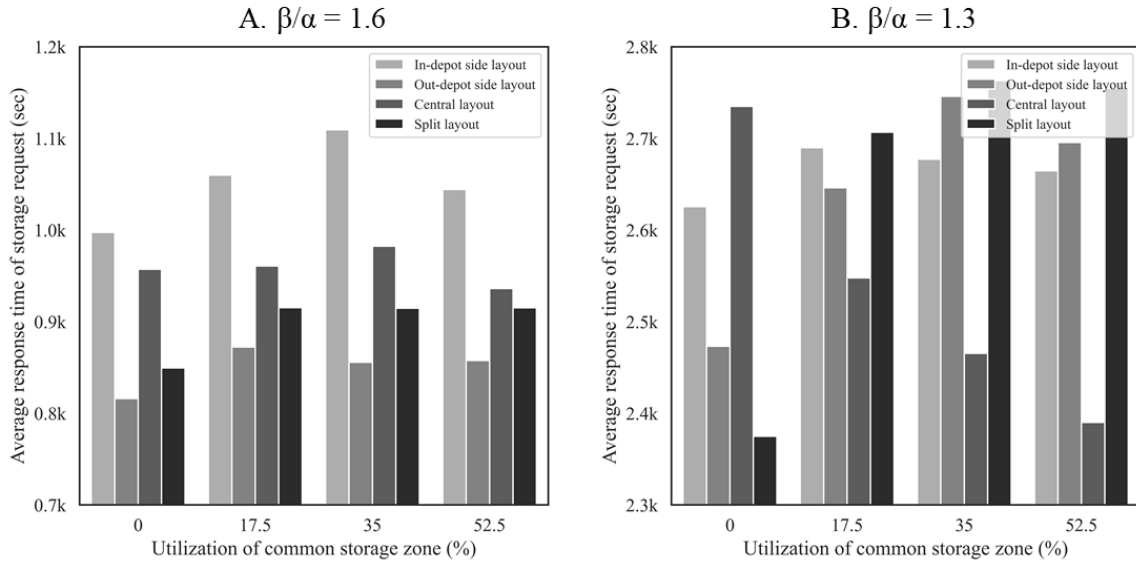
4.2 이형 랙 배치와 공동저장영역 활용률

이형 랙 배치 별 공동저장영역 활용률에 따른 저장 작업 요청 반응시간을 분석한다. <Figure 6>는 운영환경 $\beta/\alpha=1.6, 1.3$ 에서 이형 랙 배치 별 공동저장영역 활용률에 따른 저장 작업 요청 응답시간이다. <Figure 6A>의 $\beta/\alpha=1.6$ 일 때, 모든 공동저장영역 활용률에서 Out-depot side 배치가 가장 빠른 응답시간을 보인다. 반면 <Figure 6B>의 $\beta/\alpha=1.3$ 에서 공동저장영역 활용률이 낮을수록 Split 배치

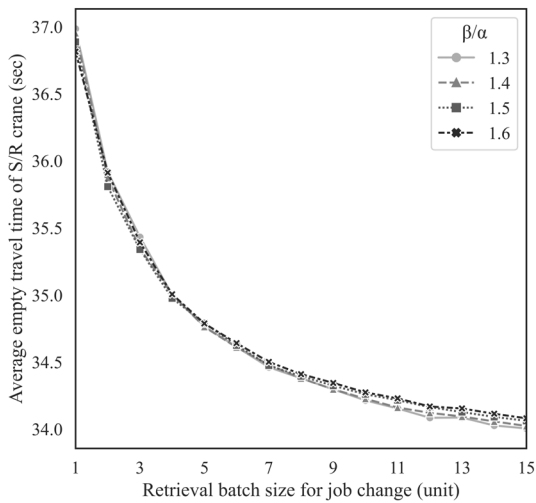
가, 공동저장영역 활용률이 높을수록 Central 배치가 빠른 응답시간을 보인다. 이는 4.1의 결과와 동일하게 운영환경이 바빠질수록 대부분의 부품을 중앙 측에 보관해야 효율적임을 나타낸다.

4.3 공동저장영역 활용률과 저장-반출 작업전환

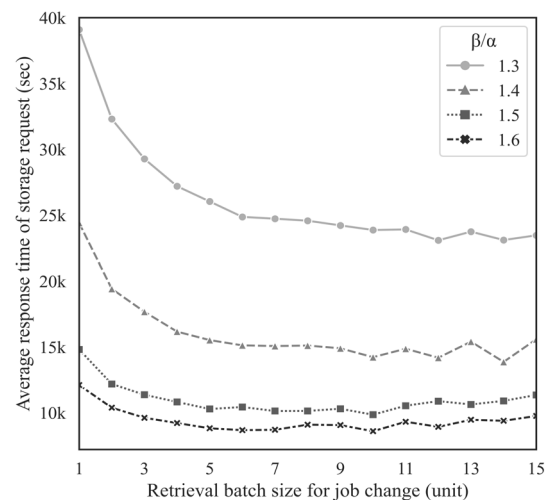
입고지점과 출고지점이 분리된 SDTR-ASRS는 작업전환 빈도가 S/R 크레인의 공차이동시간과 저장 작업 요청 응답시간에 영향을 미친다. 본 연구는 조립공정 배치 크기를 기준으로 저장-반출 작업전환을 수행하며, 조립공정 배치 크기가 클수록 저장-반출 작업전환 빈도는 감소한다.



<Figure 6> Average Response Time of Storage Requests over Aisle Designs: A. $\beta/\alpha = 1.6$, B. $\beta/\alpha = 1.3$



<Figure 7> Average Empty Travel Time of S/R Machine for Different Operational Environments



<Figure 8> Average Response Time of Storage Requests for Different Operational Environments

<Table 6> A Comparison of Response Time of Storage Requests with the Most Effective Policy Combination (Effect.Res) and others (Avg.Res) of SDTR-ASRS Simulation Results

β/α	Best Policy				Other Policies	Res. Gap (%)
	L	U (%)	R (unit)	Effect.Res (sec)	Avg.Res (sec)	
1.6	Out-depot side	0%	7	716.2	940.2	23.8
1.5	Out-depot side	0%	5	823.9	1096.9	24.9
1.4	Out-depot side	0%	14	1182.4	1609.4	26.5
1.3	Split	0%	15	2073	2622.2	20.9

<Figure 7>은 조립공정 배치 크기에 따른 S/R 크레인의 평균 공차이동시간을 나타낸다. 모든 운영환경에서 조립공정 배치 크기가 증가할수록 S/R 크레인의 공차이동시간은 감소한다. 이는 <Figure 4B>의 출고지점에서 입고지점으로 발생하는 공차이동 횟수가 감소하기 때문이다. <Figure 8>은 조립공정 배치 크기에 따른 저장 작업 요청 응답시간이다. $\beta/\alpha = 1.6$ 에서 조립공정 배치 크기가 6일 때, 가장 빠른 응답시간을 보이며 이후 조립공정 배치 크기가 증가함에 따라 응답시간은 지연된다. 이러한 추세는 다른 운영환경에서도 나타난다. 따라서 운영환경 및 이형 랙 배치, 공동저장영역 활용률 별 최적 조립공정 배치 크기 결정이 필요하다.

4.4 최적 운영정책 조합

본 장에서는 각 운영환경별 이형 랙 배치(L), 공동저장영역 활용률(U), 조립공정 배치 크기(R)의 가장 효과적인 운영정책 조합을 분석한다. <Table 6>에 각 운영환경별 가장 효과적인 운영정책 조합과 타 운영정책의 평균 저장 작업 요청 응답시간 비교이다. $\beta/\alpha = 1.6, 1.5, 1.4$ 에서 가장 효율적인 이형 랙 배치는 모두 Out-depot side 배치이며, 가장 효율적인 공동저장영역 활용률은 0%이다. 조립공정 배치 크기는 운영환경이 바빠질수록 증가하는 추세를 보인다. 각 운영환경의 가장 효과적인 운영정책 조합은 타 운영정책 조합 대비 평균 응답시간은 25.1% 개선된다. 다만, $\beta/\alpha = 1.3$ 으로 매우 바쁜 운영환경에서 가장 효율적인 이형 랙 배치는 Split 배치이고 공동저장영역 활용률은 0%, 조립공정 배치 크기는 15이다. 이때에 타 운영정책 조합과의 평균 응답시간 차이는 20.9%이다. $\beta/\alpha = 1.3$ 에서 Split 배치를 제외한 가장 효율적인 운영정책 조합은 Central 배치, 공동저장영역 활용률 52.5%, 조립공정 배치 크기 15이며, 타 운영정책 조합과의 평균 응답시간 차이는 19.4%이다. 이는 <Figure 6B>에 나타낸 결과와 마찬가지로 운영환경이 바빠질수록 대부분의 부품을 중앙 측에 보관하는 것이 효과적임을 나타낸다. 따라서 SDTR-ASRS의 신속한 저장 작업 요청 응답시간을 위해서 이형 랙 배치와 공동저장영역 활용률, 반출 작업 배치 크기 운영정책 조합의 결정이 중요함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 생산일정과 주기가 다른 부품생산공정과 조립공정 사이에 위치한 SDTR-ASRS의 효율적인 운영을 위한 운영정책 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 다양한 규격의 부품을 보관할 수 있게 고안된 이형 랙과 입고지점과 출고지점이 복도 양 끝으로 분리된 구조를 가진 SDTR-ASRS는 부품생산공정과 조립공정 사이에 부품의 임시 저장과 신속한 반출이 가능한 시스템이다. 이를 통해 SDTR-ASRS는 불균형한 수요와 공급 사이에서 생산일정에 유기적으로 대응하는 완충공간 역할을 수행한다. 그러나 이형 랙 구조와 입출고지점이 분리된 운영환경은 이형 랙 배치, 공동저장영역 활용률, 저장-반출 작업전환과 같은 운영자의 의사결정을 필요로 한다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 다양한 운영환경별 적합한 운영정책 및 정책조합을 도출하였다. 시뮬레이션 결과는 운영환경이 바빠질수록 조립공정 배치 크기를 증가시켜 공차이동시간을 감소시켜야 저장 작업 요청에 빠른 응답이 가능함을 보인다. 또한 시뮬레이션 결과는 운영환경이 바빠질수록 SDTR-ASRS의 중앙 측에 많은 부품을 보관해야 신속한 저장 작업 요청 수행이 가능함을 나타낸다. 이와 같은 운영은 이형 랙의 Split 배치와 낮은 공동저장영역 활용률(0%) 혹은 Central 배치와 높은 공동저장영역 활용률(52.5%)과 같은 운영정책 조합을 통해 가능하다.

이산사건 시뮬레이션은 ASRS와 같은 물류시스템의 다양한 운영환경에서 운영정책을 평가 및 결정하는데 적합한 도구이다. 본 연구에서는 <Figure 2>와 같은 절차를 따라 SDTR-ASRS 시뮬레이션을 구현 및 실험하여 최선의 운영정책을 도출하였다. 그러나 시스템이 복잡할수록 운영인자의 종류가 증가하고 운영환경과 운영정책이 다양해짐에 따라 시뮬레이션 평가 비용이 증가한다. 먼저 복잡한 시스템을 모사하기 위한 시뮬레이션 구현과 검증의 복잡성이 증가하므로, 대상 시스템과 시뮬레이션 모델링의 전문지식을 필요로 한다. 또한 시뮬레이션이 완성된 이후에도 수많은 운영인자와 운영대안으로 인해 시뮬레이션 수행 비용이 크게 증가한다. 마지막으로 방대한 시뮬레이션 결과는 의사결정자가 운영대안을 해석하고 최선의 운영정

책을 선택을 하는 것에 어려움이 따른다. 따라서 후속연구에서는 SDTR-ASRS에서 큰 영향을 미치는 운영인자를 통계모형을 바탕으로 선택하여 시뮬레이션 수행 비용을 최소화하는 시뮬레이션 최적화 연구를 수행하고자 한다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2020R1A2C2004320) and the by the BK21 FOUR of the NRF funded by the Ministry of Education (NO. 5199990914451)

References

- [1] Bozer, Y.A. and White, J.A., Travel-time Models for Automated Storage/Retrieval Systems, *IIE Transactions*, 1984, Vol. 16, No. 4, pp. 329-338.
- [2] Cardona, L.F. and Gue, K.R., Layouts of unit-load warehouses with multiple slot heights, *Transportation Science*, 2020, Vol. 54, No. 5, pp. 1332-1350.
- [3] Chun, S.J. and Lee, Y.H., Travel Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems with Racks of Different Size, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 1997, Vol. 23, No. 2, pp. 421-432
- [4] Chung, J.W. and Kim, P.S., A Performance Model for Stocker Systems in Liquid Crystal Display (LCD) Fabrication Lines, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2011, Vol. 34, No. 3, pp. 1-7.
- [5] Gharehgozli, A. H., Yu, Y., Zhang, X., and Koster, R.D., Polynomial Time Algorithms to Minimize Total Travel Time in a Two-depot Automated Storage/Retrieval System, *Transportation Science*, 2017, Vol. 51, No. 1, pp. 19-33.
- [6] Hur, S., Lee, Y.H., Lim, S.Y., and Lee, M.H., A Performance estimation model for AS/RS by M/G/1 Queuing System, *Computers & Industrial Engineering*, 2004, Vol. 46, pp. 233-241.
- [7] Law, A.M., Kelton, W.D., and Kelton, W.D., *Simulation Modeling and Analysis*, fourth ed, Mcgraw-hill, 2007, pp. 669-671.
- [8] Lee, M.K. and Kim, S.Y., Scheduling of Storage/Retrieval Orders under a Just-in-time Environment, *International Journal of Production Research*, 1995, Vol. 32, No. 12, pp. 3331-3348.
- [9] Lee, Y.H., Tanchoco, J.M.A., and Chun, S.J, Performance estimation models for AS/RS with unequal sized celles, *International Journal of Production Research*, 1999, Vol. 37, No.18, pp. 4197-4216.
- [10] Lee, Y.H., Cheon, S.J., and Lee, M.H., Mathematical Models and Algorithms for Optimal Design of Automated Storage/Retrieval Systems with Different Sized Cells, *Journal of Korean Institute of Plant Engineering*, 2000, Vol. 5, No. 1, pp. 59-77.
- [11] Lee, Y.H., Lee, M.H., and Hur, S., Optimal Design of Rack Structure with Modular cell in AS/RS, *International Journal of Production Economics*, 2005, Vol. 98, Issue. 2, pp. 172-178.
- [12] Moon, G.J. and Kim, G.P., Improvement of AS/RS Class-based Storage Policy by Common Zone Allocation, *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, 1999, Vol. 24, No. 3, pp. 39-47.
- [13] Nam, J.G., Hur, S., Jeong, S.Y., and Kim, J.K., A Performance analysis of AS/RS with Single and Dual Commands, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2004, Vol. 27, No. 3, pp. 26-30.
- [14] Ok, C.H., Kim, D.S, Gong, J.S., and Seo, Y.H., Study on Integrated Storage Systems for Automated Production, *Journal of the Korea Society for Simulation*, 2012, Vol. 21, No. 2, pp 91-101.
- [15] Rossetti, M.D., *Simulation Modeling and Arena*, John Wiley & Sons, second ed, 2015, pp 8-15.
- [16] Tanaka, S. and Araki, M., Routing Problem under the Shared Storage and Retrieval Systems with Separate Input and Output Points, *International journals of Production Research*, 2009, Vol. 47, No. 9, pp 2391-2408.
- [17] Ven Den Berg, J.P. and Gademann, A.J.R.M., Simulation Study of an Automated Storage/Retrieval System, *International Journal of Production Research*, 2000, Vol. 38, No. 6, pp 1339-135.

ORCID

- Bosung Kim | <http://orcid.org/0000-0002-7649-5383>
 Jeongtae Park | <http://orcid.org/0000-0002-3612-3913>
 Soondo Hong | <http://orcid.org/0000-0001-7817-6776>