

# Dwell Point Polices for Shuttles on Shuttle-Based Storage/Retrieval(SBS/RS) System

Yun-Soo Ha · Junjae Chae<sup>†</sup>

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

## Shuttle-Based Storage/Retrieval System(SBS/RS)에서의 셔틀 대기점 연구

하윤수 · 채준재<sup>†</sup>

한국항공대학교 항공교통물류학과

Shuttle-Based Storage/Retrieval System (SBS/RS) is relatively new to industry. The system is in the category of Automated Storage/Retrieval System (AS/RS), but it is different in that the SBS/RS uses shuttles as Storage/Retrieval (SR) machine instead using a stacker crane. The shuttles are assigned to each tier on multi-tier system and operated for pick-up or drop-off order. Since the system can handle multiple orders simultaneously, it can provide much higher throughput than that of general AS/RS with single stocker crane. Thus, this new system is well fit to recent tendency of increasing small quantity batch production and orders. One of the drawback of this system is that it needs a lot of investment to set up. The efficient operation of the system would be one of the critical matters to increase economic efficiency of capital investment. In this study, we focused on the dwell point policy for shuttles to find efficient way of operating the system. There are four basic policies for the dwell point and we had simulation-based experiment for two different scenarios based on the speed of the shuttle and inter-arrival time of the loads coming to the system combined with four different policies. As it was mentioned above, this SBS/RS relatively new to the field and there is no such experiment shown on previous research and the study of dwell point policy for this SBS/RS could provide the direct comparison of each policy with different hardware specification; the capability of the system. The policy that achieves most efficient operation among the given environment is proposed and the usability of the system is discussed.

**Keywords** : SBS/RS, AS/RS, Dwell point policy, Shuttle

### 1. 서 론

최근 전자상거래 및 소매 유통업, 의약품 산업, 화장품 산업 등이 급속히 성장하고 있고, 이에 따라 물류시장에서 경량화물에 대한 수요가 증가하고 있으며, 많은 물동량을 효율적으로 처리할 수 있는 경량화물 처리 자동화

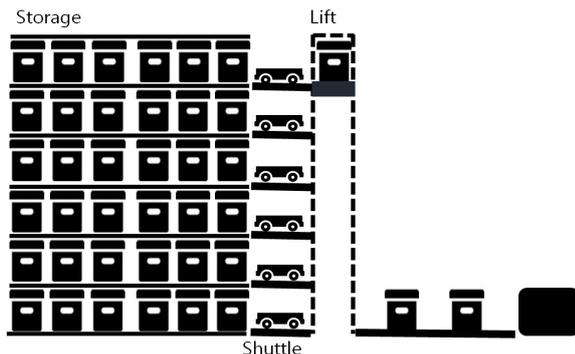
물류장비의 필요성이 강조되고 있다[18].

자동창고(Automated storage & retrieval system; AS/RS)는 현대 가장 잘 알려진 자동화 물류 시스템 중 하나이다. AS/RS의 장점은 높은 처리 능력 및 공간 활용도, 안전성 증가를 들 수 있다[6]. AS/RS는 화물을 입고, 불출하는 기기로 stacker-crane을 쓰는 경우가 일반적이다. 이에 반해 shuttle based storage & retrieval system(SBS/RS)은 <Figure 1>과 같이 리프트(lift)와 셔틀(shuttle)이 화물을 처리하게 되며, 각 층에 하나의 셔틀이 존재하게 된다.

Received 26 May 2016; Finally Revised 24 July 2016;  
Accepted 9 August 2016

<sup>†</sup> Corresponding Author : jchae@kau.ac.kr

AS/RS와 SBS/RS는 화물을 작업자의 개입 없이 화물을 처리할 수 있다는 점에서 유사하나, 기본적인 구동이 다르기 때문에, 한 번에 하나의 화물을 처리할 수 있는 AS/RS에 비해 여러 셔틀로 한 번에 여러 화물을 처리할 수 있는 SBS/RS가 동시 간 대비 처리능력이 훨씬 뛰어나다고 볼 수 있다. 따라서 SBS/RS는 다품종 소량 다빈도 물품에 AS/RS보다 더 적합하다[18].



<Figure 1> SBS/RS Structure

AS/RS의 화물처리능력은 물리적 설계(physical design)와 화물을 자동으로 처리하도록 하는 제어정책(control policy)에 따라 달라진다. 대기 장소의 결정(Dwell point policy 또는 Home Position)은 이 시스템을 제어하기 위한 정책 중 하나로 어떠한 정책을 사용하느냐에 따라 stacker-crane 및 셔틀의 가동률, AS/RS의 화물처리속도, 화물처리능력 등 그 수행능력(performance)에 영향을 미친다[17].

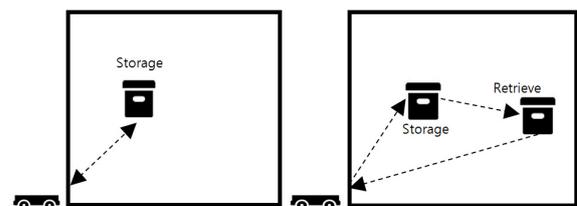
최근 전자상거래 시장 및 소매유통 시장의 성장으로 인해 다품종 소량 다빈도 물동량이 증가하면서, SBS/RS의 활용도 또한 점차 넓어질 것이다[18]. 하지만 SBS/RS의 가장 큰 단점으로 큰 투자비용이 필요하다. 따라서 같은 투자비용 대비 효율적인 SBS/RS의 사용을 위해, 제어정책 연구는 상당히 중요하다. 하지만 상대적으로 시장에 새롭게 대두된 시스템으로 많은 연구가 되어있지 않기 때문에 이전 연구에서도 관련된 연구를 찾기가 쉽지 않다. 상대적으로 많은 연구가 이루어진 AS/RS에서 사용된 기본적인 여러 가지 대기 장소에 대해 셔틀을 기본으로 한 시스템에 적용하여 그 효율성을 검토하는 것이 새 시스템의 활용에 있어서 중요한 요소라 할 수 있다. 본 연구는 SBS/RS의 셔틀 속도 및 화물도착시간의 차이에 따라 2가지 시나리오로 구분하고 각각에 대해 자동창고 등에서 사용되던 정책을 적용하여 시뮬레이션 분석을 실행하고 새로운 셔틀 기반 자동물류시스템에 적용 가능한 정책을 발굴하는데 그 목표를 두고 있다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 자동화 창고에서 사용되는 AS/RS와 이와 유사하거나 비교되는 시스템에 대한 소개와 관련된 연구에 대해 설명하고, 제 3장

에서는 시뮬레이션 실험을 위한 여러 제반 조건과 가정, 물리적 구조, 제어를 위한 조건 등을 시나리오 구성과 함께 설명한다. 해당 실험에 대한 구체적인 결과와 이에 대한 분석은 제 4장에서 이루어진다. 마지막으로 제 5장에서는 실험에 대한 종합과 결과 분석에 대한 결론과 새로운 시스템 도입을 위한 기본 정책에 대한 제시를 하고 있다.

## 2. 배경연구

AS/RS에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 되어왔다. Ro and Lee[16]는 AS/RS 투자비를 최소화 시키면서, 성능을 최대화하기 위한 crane의 속도 및 숫자 등에 대해서 제시하고 있다. Roodbergen and Vis[17]는 AS/RS에 대해서 기본적인 내용과 함께 그간의 연구를 정리해 주고 있다. 위 논문들에 따르면, AS/RS 디자인에는 물리적 설계(physical design)와 제어(control)가 있고 물리적 설계는 랙(Rack)의 크기, 베이(bay), 층의 개수 등 시스템의 물리적인 구성을 결정한다. 제어(Control) 부분은 크게 4가지로 보관구역 할당(storage assignment), 작업목음, 작업순서, 그리고 SR (Storage/Retrieval) 기기의 대기 장소로 구성되어 있다. 이어서 SR 기기의 제어에는 SC(single command)와 DC(dual command)가 존재한다. SC는 <Figure 2(a)>에서 제시된 것과 같이, SR 기기가 입고 혹은 불출을 1회 실행하고, 대기 장소로 돌아가는 것을 의미한다. DC는 <Figure 2(b)>에서 제시된 것과 같이, SR 기기가 한 번의 구동에 입고와 불출을 같이 진행하는 것을 의미한다.



<Figure 2> Single Command and Double Command

본 연구에서 연구하고자 하는 SR 기기의 대기 장소의 정책(Dwell point policy)은 유휴 상태의 crane 혹은 셔틀이 주차하는 위치를 결정하는 것을 말하는데 이 논문에서는 통상적으로 쓰이는 Dwell point policy라 명명하도록 한다.

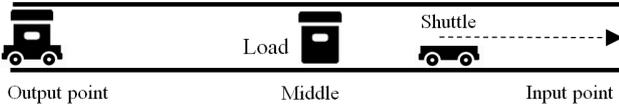
Chang[2]은 AS/RS는 아니지만 차량이 창고 내에서 하나의 통로에서 여러 주문들을 배치로 인출할 경우에 배치크기에 따른 평균 인출 소요시간을 제시하였으며, 차량의 반응거리를 최소화 하는 차량의 대기 장소를 구하였다. Chung and Kim[3]은 AS/RS를 스토커 시스템이라 명명하고, 두 개의 반송로봇을 사용하는 듀얼 로봇 스토커 시스템의 반송율을 계산하는 모델을 제시하였다.

기존 AS/RS 대기 장소 정책에 연관된 연구는 크게 2가지로 종류로 최적 대기 장소를 찾는 연구논문과 다양한 대기 장소를 실험하고 효과를 분석하는 연구논문으로 나눌 수 있다.

Peters et al.[14]는 다양한 AS/RS 형태에서 최적 대기 장소를 찾도록 수학적 모델을 구성하여 폐쇄형 모델의 해(closed form solution)를 제시하였다. Park[13]은 보관할 당구역으로 지정장소(Dedicated storage)를 사용하는 AS/RS에서 최적 대기 장소 연구를 진행하였다. Meller and Mungwattana[12]는 시뮬레이션을 이용하여, 다양한 대기 장소에서의 상대적인 수행능력을 비교 분석하였다.

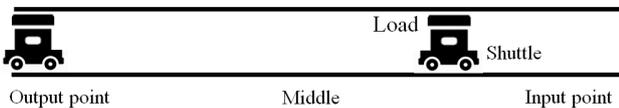
Regattieri et al.[15]는 기준이 되는 기본 대기 장소 4개의 경우를 소개하며 이에 따른 평균 셔틀의 이동 시간을 각각 비교 분석하고 있다. 본 논문에서는 Regattieri et al.[15]가 소개한 정책을 기본으로 사용하였으며 이 4가지 대기 장소 정책은 다음과 같다.

첫 번째로 SC 적입(put away)이 끝난 후 입고 위치(input point), SC 불출이나, DC가 끝난 후 불출 위치(output point)로 이동하는 Policy를 I/O 대기 장소 정책이라 하고 각 SR기기의 명령 수행에 따라 그 위치가 달라지는 것이 특징이다. <Figure 3>은 이를 나타내고 있다.



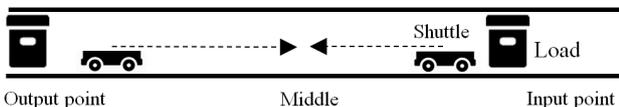
<Figure 3> I/O Dwell Point Policy

두 번째로 SC 입고가 끝난 후 해당 위치(Destination cell), SC 불출이나, DC가 끝난 후 불출 위치(output point)로 이동하는 정책을 Stay 대기 장소 정책이라 명명하고 I/O 대기 장소 정책과는 SC의 적입 명령 수행 후 그 자리에 머물러 있는 점이 다르며 <Figure 4>에서 보이고 있다.



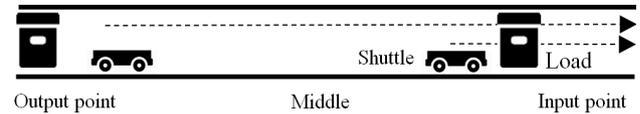
<Figure 4> Stay Dwell Point Policy

세 번째로 수행명령에 관계없이 각 층의 중간 위치(mid-point)로 이동하는 Policy를 Return to middle 대기 장소 정책이라 하고 <Figure 5>에 나타나 있다.



<Figure 5> Return to Middle Dwell Point Policy

마지막으로 수행명령에 관계없이 입고 위치(input point)로 이동하는 Return to start 대기 장소 정책이 있으며 <Figure 6>에서 보여지고 있다.



<Figure 6> Return to Start Dwell Point Policy

SBS/RS의 경우 직접적으로 관련된 연구 논문이 그리 많지 않다. 따라서 이와 유사한 물리적 설계를 가지고 있는 SP-AS/RS와 AVS/RS에 대해서 연구하였다. SP-AS/RS는 Split-Platform AS/RS로서 구동적인 부분에서 SBS/RS와 유사하게 구동하나, 취급 화물이 컨테이너라는 점에서 차이점이 존재한다. AVS/RS는 Autonomous vehicle storage/retrieval system으로 AS/RS와 유사하나 리프트와 셔틀이 나누어져 있다는 점과 셔틀이 리프트를 사용하여 각 aisle과 tier를 이동할 수 있다는 점에서 차이점을 가진다.

### 2.1 SP-AS/RS 관련 연구

SP-AS/RS는 stacker-crane을 사용하는 기본적인 AS/RS에서 발전된 것으로, 컨테이너화물과 같은 중량 화물의 적재를 위하여, 수직적 움직임(vertical movement)과 수평적 움직임(horizontal movement)을 셔틀과 리프트로 나누어 구동한다.

Hu et al.[5]은 SP-AS/RS를 처음으로 소개하며, 셔틀 및 리프트가 1회 구동 할 때의 시간 기반 모델(Travel time model)을 제시하였다. 해당 시간 기반 모델은 랙의 모양에 대한 변수(shape factor)와 입고, 불출의 확률 값을 이용하여 모델링 되었다. Vasili et al.[20]는 Hu et al.[5]의 시간기반모델을 다양한 대기 장소 정책에 맞추어 연구하였다. Hu et al.[5]와 Vasili et al.[20]는 SC에 한정 되어있다는 한계가 있는 반면, Liu et al.[8]는 DC에 따라 I/O 대기 장소 정책에서의 travel time model을 제시하고 있다. Vasili et al.[19]는 SP-AS/RS에서의 새로운 랙의 형태를 연구하여, 이에 따른 운송시간모형(Travel time model)을 제시하고 있다.

### 2.2 AVS/RS 관련 연구

AVS/RS의 경우 리프트와 셔틀이 나누어져 있다는 점에서 SP-AS/RS 및 SBS/RS와 물리적 설계가 유사하나, 몇 개의 복도(aisle)를 묶어 존으로 나누어 해당 존에 리프트를 하나만 두게 된다는 점에서 차이가 존재한다. 따

라서 셔틀이 각 복도 및 층을 리프트를 타고 이동이 가능하며, 셔틀의 개수 또한 사용자 임의로 정할 수 있다.

AVS/RS는 Malmborg[9]에서 처음으로 연구되었다. Malmborg [9]는 AVS/RS와 AS/RS 간의 구동적인 차이점을 잘 설명하였을 뿐만 아니라, 성능비교 또한 자세히 연구하였다. 이어서 Malmborg[10]은 AVS/RS에서 DC의 확률을 예측하기 위한 상태 방정식 모델을 제시하였다.

Ekren et al.[4]은 AVS/RS에서 존 내부의 셔틀 개수를 3, 4개로 나누어 성능비교를 실험하였다. Marchet et al. [11]은 AVS/RS 셔틀의 층간 이동이 가능한 tier-to-tier와 셔틀이 각 층마다 존재하는 tier-captive에 대해서 설명하고, 아레나(Arena simulation tool)를 이용하여 AVS/RS tier-captive에서 비용 최소화를 위한 물리적 설계를 제시하고 있다. 이외에도 AVS/RS에 관련된 연구는 많이 진행되어 있다. 하지만 대부분이 대기모형 모델을 기본으로 하기에 3D 시뮬레이션을 통해 정책결정을 위한 실험을 기본으로 한 본 연구와의 관련성은 그리 많지 않다.

## 2.3 SBS/RS 관련 연구

SBS/RS는 Carlo and Vis[1]에서 처음으로 다루어진다. Carlo and Vis[1]은 SBS/RS에서 리프트가 2개 일 때, 구동 범위를 정한 후, 이를 스케줄링 하는 문제를 다루고 있다.

Lerher et al.[6]는 이산 사건 시뮬레이션(Discrete event simulation)을 이용하여 DC에서 셔틀과 리프트의 속도를 다르게 할 때, 성능 비교를 연구하였다. Lerher et al.[7]은 Lerher et al.[6]에 이어서 리프트와 셔틀 각각의 운송시간모형을 제시하고 있다. Suh[18]은 SBS/RS와 Crane-based AS/RS 간의 시스템 성능 및 구축비용 분석을 시행하였다. Lerher et al.[6]의 경우 오직 DC만을 가정하고 있으며, Tier를 10층 이상으로 실험하여, 리프트에 부하가 걸릴 수 밖에 없는 상황에서 실험하였다는 점에서 한계가 존재한다. Lerher et al.[7]의 경우 또한 DC를 강제적으로 가정하고 있으며, 리프트와 셔틀 각각의 운송시간모형을 제시하고 있다는 것에 한계점이 존재한다. 이와 달리 본 논문에서는 현실적인 SBS/RS의 사용을 고려하여, SC 및 DC를 모두 이행하고 있으며, 셔틀과 리프트의 속도를 다르게 했을 뿐만 아니라, 셔틀의 다양한 대기 장소를 실험하였다.

## 3. Design of Experiments

AutoMod® simulation tool을 이용하여 실험하였으며, 이번 실험의 목적은 다양한 대기 장소 정책에 따른 SBS/

RS의 성능비교에 있다. 성능 비교 변수(performance measure)로는 화물의 평균 처리 시간, 화물의 최대 처리 시간, 셔틀의 가동률, 리프트의 가동률(utilization)을 사용하였다. 해당 평균 처리 시간 및 최대 처리 시간의 경우, 화물이 발생하는 순간(부터 화물이 입고되어, 저장 시간을 거쳐 불출 되어 시스템을 나가는 순간 까지를 시뮬레이션 상에서  $T_{end} - T_{start}$ 를 통하여 계산된다. 이 때,  $T_{mean}$ 의 경우, 각각 화물들의 처리 시간의 평균을 나타내며,  $T_{max}$ 의 경우, 각 화물들의 처리 시간들 중 최대 값을 나타낸다. 성능 비교 변수로 화물의 최소 처리 시간을 고려하지 않은 이유로는 최소 처리 시간의 경우, 수많은 화물들 중 가장 빠르게 화물이 처리된 경우를 뜻하므로, 시스템의 성능 평가에서 크게 중요하지 않다. 또한, 최소 처리 시간의 경우, 각 상황에서 대기시간이 없이 바로 입, 출고가 진행되었을 경우이기 때문에, 어느 정도 예상이 가능하다.

### 3.1 Main Assumptions

실험의 조건과 기본적인 환경에 대한 가정을 다음과 같이 한다. 시뮬레이션에 사용되는 모든 분포들은 시뮬레이션 상에서의 이상치 발생을 방지하기 위해 삼각 분포를 사용하였다. 화물의 평균저장시간의 경우, 경량 화물의 짧은 저장 시간을 고려하였으며, 또한 해당 실험에서의 랙의 물리적 설계 측면에서 랙의 활용도를 고려하여 임의 설정하였다.

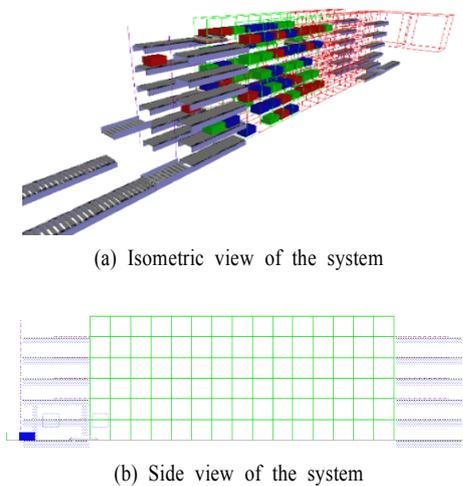
1. 층(Tier)을 무작위로 선정하여 각 층의 Input point에서 가장 가까운 곳부터 채워나가는 형식의 저장 공간 할당(random load assignment)한다.
2. Picking 또는 Drop-off 작업 후 다음 작업에 대한정보를 사전에 인지하지 않는다. 따라서 해당 작업 완료 후 이어지는 작업 명령은 무작위로 일어나며 그 작업의 형태 또한 무작위를 따른다. 즉 SC와 DC가 정해져 있지 않고 후속작업이 이어진 후 알 수 있다.
3. 대기 컨베이어는 각 층에 오른쪽, 왼쪽 두 개가 존재하며, 각 대기 컨베이어에 화물은 최대 2개씩 대기할 수 있다.
4. 화물 평균저장시간( $T_{storage}$ )은 삼각분포를 따른다.;  
 $T_{storage} = \text{Tri}(15, 20, 25)$ (단위 : 분)
5. 셔틀에서 화물을 싣고 내리는 시간이 존재한다.;  
 $c = 5$ (단위 : 초)

#### Notations

- $l_{bay}$  베이(Bay)의 길이
- $h_{bay}$  베이(Bay)의 높이

$w_{bay}$	베이(Bay)의 넓이
$l_{load}$	화물(Load)의 길이
$h_{load}$	화물(Load)의 높이
$w_{load}$	화물(Load)의 넓이
$l_{shuttle}$	셔틀(Shuttle)의 길이
$h_{shuttle}$	셔틀(Shuttle)의 높이
$w_{shuttle}$	셔틀(Shuttle)의 넓이
$T_{max}$	화물최대처리시간
$T_{mean}$	화물평균처리시간
$T_{load}$	화물 도착 시간 간격
$T_{start}$	화물의 발생 시간
$T_{end}$	화물이 SBS/RS를 나가는 시간
$l_{buffer}$	대기 컨베이어의 길이
$w_{con}$	컨베이어의 넓이
$v_{con}$	컨베이어의 속도
$a_{shuttle}$	셔틀(Shuttle)의 가속도
$v_{shuttle}$	셔틀(Shuttle)의 속도
$a_{lift}$	리프트(Lift)의 가속도
$v_{lift}$	리프트(Lift)의 속도

### 3.2 Simulation configuration



<Figure 7> AutoMod® Simulation Display

본 실험의 기본적인 물리적 설계는 <Figure 7>과 같이 6개의 층과, 각 층당 15개의 bay로 구성되어, 총 180개의 저장 공간을 가진다. 해당 실험의 경우, 화물의 입고, 불출 명령은 무작위로 발생하게 된다. 하나의 화물이 발생하여, SBS/RS에 저장 된 후, 불출 되어 나가는 과정 까지를 시뮬레이션 하며, 모든 과정은 확률 분포 값을 이용하여 무작위로 진행된다. 이에 따라 모든 작업은 무작위로 진행 되게 된다. 셔틀은 tier-captive 형식을 따르고 있

으며, 리프트는 좌우 각각 2개씩 구성되어있다. SBS/RS 이전의 컨베이어의 경우, 화물이 입고되어 SBS/RS로 이동 시키는 역할을 하고 있으며, SBS/RS에서의 대기 컨베이어의 경우, 화물이 셔틀에 의해 이동되기 위해 각 층 별로 대기하는 장소로써, 오른쪽과 왼쪽 랙 별로 하나씩 존재한다. 리프트와 셔틀을 각각 움직이게 하여 주었을 때, 대기 컨베이어가 존재하지 않는다면, 리프트의 작업이 끝났음에도, 셔틀의 작업이 진행 중이라면, 리프트가 셔틀을 기다려야만 한다.

1.  $l_{bay} = 0.6m, w_{bay} = 0.5m, h_{bay} = 0.5m$
2.  $l_{load} = 0.55m, w_{load} = 0.4m, h_{load} = 0.24m$
3.  $l_{shuttle} = 1m, w_{shuttle} = 1.3m, h_{shuttle} = 0.23m$
4.  $l_{buffer} = 2.35m$
5.  $w_{con} = 0.5m, v_{con} = 0.35m/s$

베이, 화물, 셔틀, 대기 컨베이어의 크기 및 컨베이어의 속도, 넓이는 위에서 언급된 것과 같다. 베이 크기의 경우, <Figure 7>에서 (b) 중 하나의 베이, 즉 하나의 사각형의 크기를 뜻하며, 화물의 크기는 <Figure 7>에서 실질적으로 운반되는 한 화물의 크기를 뜻한다. 대기 컨베이어의 크기는 2.35m로 화물 2개를 이은 1.1m에 더해 화물 간의 간격을 고려하여 충분히 크게 설정하였다. 또한 컨베이어의 넓이는 0.5m로 베이의 넓이와 동일하게, 화물의 넓이 보다는 조금 큰 정도로 설정하였다. 해당 컨베이어 및 셔틀의 속도의 경우, 컨베이어의 길이나, 대기 컨베이어의 길이, 베이의 길이 등을 길게 한다면, 하나의 화물을 해당 장소로 입고, 불출 하는 시간이 더 오래 걸릴 수 있다. 하지만 이번 실험에서는 랙의 물리적 설계에 대해서 실험하는 목적을 가지고 있지 않기 때문에, 이러한 랙의 물리적 설계는 의사결정변수로 사용하지 않았다. 따라서 해당 값들은 모두 고정된 변수들이며, 셔틀 및 리프트의 속도를 다르게 하였을 경우, 대기 장소 정책을 다르게 하였을 경우에 집중하여 실험하였다.

본 실험에서는 속도 및 화물 도착 시간 간격에 변화를 주어 2가지 시나리오로 나뉘어 각각 위에서 언급했던 기본 4가지 대기 장소 정책에 대해서 실험하였다. 시나리오 1과 2의 경우 모두 셔틀의 가동률은 70~80%를 유지하도록 화물 도착 시간 간격을 설정하였다. 셔틀의 가동률이 이를 넘어 설 경우, 셔틀의 과부하에 의해, 시스템의 문제가 생길 수 있고, 이보다 낮은 가동률 일 경우, 시스템의 성능이 지나치게 뛰어나, 시스템에 대한 과 투자가 되기 때문에, 70~80%를 유지하도록 설정하였으며, 같은 화물 처리 능력을 가지는 시스템 중, 셔틀의 가동률이 낮다면, 오히려 셔틀의 부담은 덜한 상태에서, 같은 능력을 가지고 있음으로, 더 효율적인 시스템이라 할 수 있다.

시나리오 1의 경우 화물 도착 시간 간격은 위에서 언급한 바와 같이, 셔틀의 가동률을 70~80%로 유지할 수 있는 Tri(13.3, 16.6, 20)초를 따르게 된다. 리프트의 가속도는  $0.5m/s^2$ , 속도는  $0.5m/s$ , 셔틀의 가속도는  $0.5m/s^2$ , 속도는  $0.5m/s$ 로 설정하였다.

시나리오 2의 경우 화물 도착 시간 간격은 시나리오 1과 마찬가지로, 셔틀의 가동률을 70~80%로 유지할 수 있는 Tri(8.3, 10, 11.6)초를 따르게 된다. 리프트의 가속도는  $1.5m/s^2$ , 속도는  $1.5m/s$ , 셔틀의 가속도는  $1.5m/s^2$ , 속도는  $1.5m/s$ 로 설정하였다.

<Table 1> Description of Variables

category	Scenario 1	Scenario 2
$T_{load}$	Tri(13.3, 16.6, 20)	Tri(8.3, 10, 11.6)
$a_{shuttle}$	$0.5m/s^2$	$1.5m/s^2$
$v_{shuttle}$	$0.5m/s$	$1.5m/s$
$a_{lift}$	$0.5m/s^2$	$1.5m/s^2$
$v_{lift}$	$0.5m/s$	$1.5m/s$

시뮬레이션 총 시간은 10시간이며, 시간당 처리량을 분석한다. 첫 1시간은 준비 시간(warm up time)으로 사용하며, 준비 시간 전 시뮬레이션의 첫 시작 저장 상태는 SBS/RS 내 화물을 저장하지 않은 상태에서 시작한다. 또한 화물의 형태 및 종류는 한 종류로 가정하여 실험한다. 위와 같은 시뮬레이션을 총 30회 시행한다. <Table 1>은 위에서 언급 되어진 각 시나리오에서 사용할 파라미터들에 대한 정리이다.

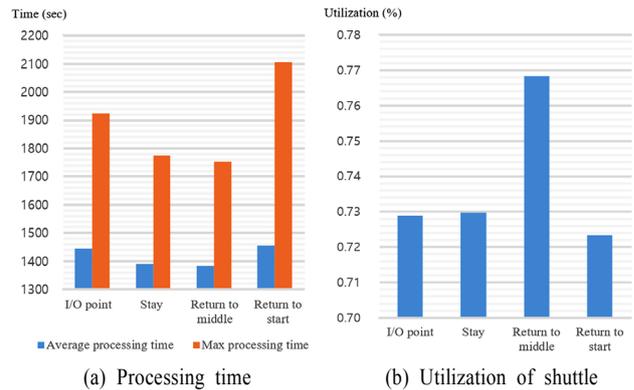
## 4. 결과 분석

### 4.1 시나리오 1

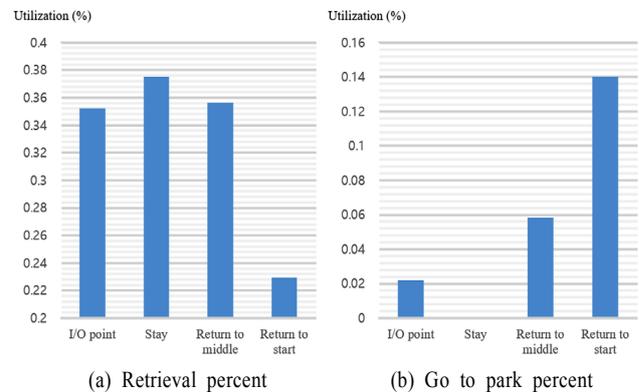
대기 장소 정책에 따른 화물처리시간의 차이는 <Figure 8(a)>에 제시하였다. 실험결과를 전체적으로 보았을 때 가장 빠르게 화물을 처리하는 대기 장소 정책은 return to middle policy로 볼 수 있다. return to middle policy의 경우  $T_{mean}$ 이 1,384초,  $T_{max}$ 이 1,753초이며, 이와 비슷한 수준으로는 stay policy가  $T_{mean}$ 은 1,390초,  $T_{max}$ 이 1,774초이다. 이와 달리 I/O policy 및 return to start policy의 경우  $T_{mean}$ 이 약 1,450초,  $T_{max}$ 은 각각 1,924초, 2,105초로 앞의 두 대기 장소 정책과는  $T_{mean}$ 이 약 60초 정도  $T_{max}$ 이 약 200~300초 정도 차이가 나게 된다.

대기 장소 정책에 따른 셔틀 가동률의 차이에 대해서 <Figure 8(b)>에서 제시하였다. return to middle policy와

stay policy의 경우가 좋은 결과 값을 가지고 있었지만, return to middle policy의 경우 높은 가동률을 가지고 있기 때문에, Stay policy가 가장 좋은 policy라 할 수 있다. <Figure 9>는 각각 대기 장소 변화에 따른 셔틀의 총 가동률 중 화물을 가지러 가기 위한 셔틀의 가동률(retrieval percent)과 셔틀의 총 가동률 중 대기 장소로 가는 셔틀의 가동률(go to park percent)를 나타내는 그래프이다.



<Figure 8> Result of Scenario 1



<Figure 9> Result of Scenario 1

Return to start policy의 경우 항상 작업(operation)이 끝나는 경우 입고 위치로 이동하기 때문에, retrieval이 현저히 낮고, 그에 반해 go to park percent가 타 대기 장소 정책에 비해 상당히 높다. 즉, Return to start policy의 경우 입고 위치에 중점(weight)을 주는 방식으로, 해당 실험에서 사용한 random load assignment 방식에서 입고 효율에서는 타 대기 장소 정책 보다 좋을 수 있지만, 전체적인 시스템 성능을 보았을 때, 타 대기 장소 정책 보다 좋지 않다. <Table 2>는 첫 번째 시나리오를 사용하여 시뮬레이션 분석을 통해 얻는 결과의 종합이다. <Table 2>의 처리시간 비교에서도 중간(Middle)지점과 작업 후 그 자리에 정지(Stay)하는 경우가 처리시간을 가장 작게 할 수 있는 방법으로 여겨진다.

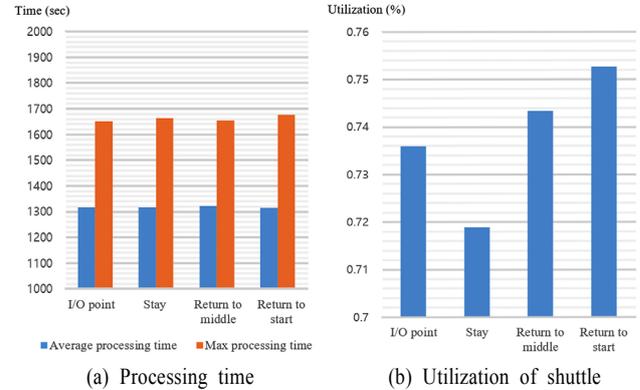
4.2 시나리오 2

<Figure 10(a)>는 시나리오 2에서의  $T_{mean}$ ,  $T_{max}$  을 제시하고 있다.  $T_{mean} = 1,314$ 초,  $T_{max} = 1,650$ 초로 시나리오 1과 달리 대부분 대기 장소 정책에 관계없이 같은 성능 지표(performance measure)를 가진다. 시나리오 2의 경우 셔틀의 속도 및 가속도의 상승으로 화물의 투입량이 비약적으로 상승하였다. 따라서 각 층의 Rack 활용이 전체적으로 이루어지기 때문에, 그림에서 보여지는 것과 같은 결과를 나타낼 수 있다.

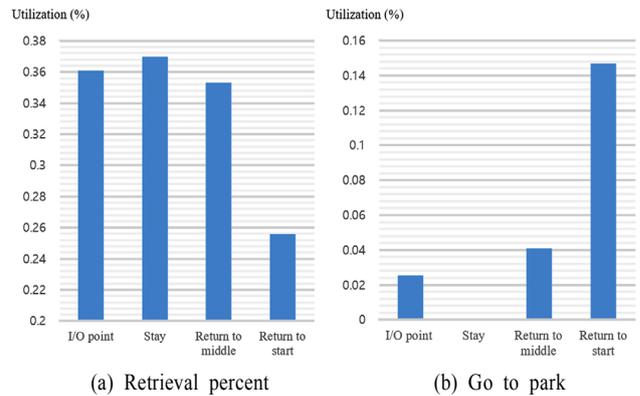
하지만 화물에 관련된 성능 지표는 대기 장소 정책에 관계없이 유사한 수준이나, <Figure 10(b)>에서 제시된 것과 같이 가동률 측면에서 보았을 때, stay policy가 가장 낮은 셔틀의 가동률로 같은  $T_{mean}$ ,  $T_{max}$  를 얻을 수 있다. 즉, Stay policy의 경우 셔틀의 부담을 가장 줄이는 상태에서 똑같은 화물처리수준을 얻을 수 있다. 따라서 시나리오 2에서 가장 효과적인 대기 장소 정책은 stay policy라 할 수 있다. <Table 3>에서 두 번째 시나리오를 기준으로 한 결과를 보이고 있다.

<Figure 11>은 각각 대기 장소 변화에 따른 셔틀의 retrieval percent와 go to park percent를 나타내고 있다. 시나리오 2의 경우에도, 시나리오 1과 유사한 셔틀의 retrieval percent 와 go to park percent의 값을 나타내고 있다. 해당 결과를 통해 셔틀의 속도 및 리프트의 속도와 관계없이, 대기 장소 정책의 경우, 앞서 말했듯이, Return to start policy가 입고 효율에 좋음을 알 수 있다. 즉, 해당 결과는 셔틀이나 리프트의 속도 및 가속도의 변화에 의해 나타나

는 것이 아니라, 다양한 대기 장소 정책의 특성 및 성격을 나타내는 것이라 할 수 있다.



<Figure 10> Result of Scenario 2



<Figure 11> Result of Scenario 2

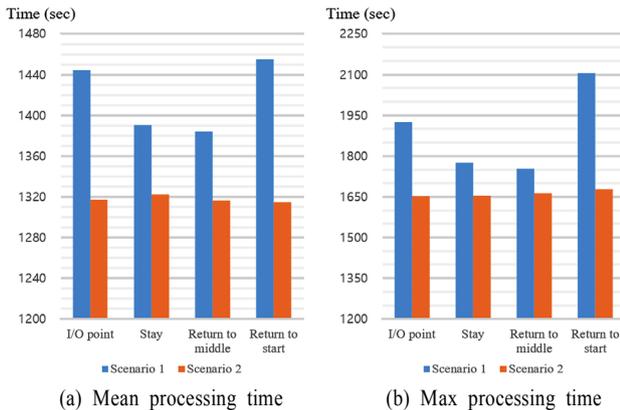
<Table 2> Result of Scenario 1

category	load			vehicle									
	Through put (unit)	$T_{mean}$ (sec)	$T_{max}$ (sec)	shuttle					lift				
				Utilization (%)	Parking (%)	Delivery (%)	Retrieval (%)	Go to park (%)	Utilization (%)	Parking (%)	Delivery (%)	Retrieval (%)	Go to park (%)
I/O point	217.1	1444.4	1924.6	0.7288	0.2711	0.3545	0.3521	0.0221	0.2344	0.7655	0.1178	0.0586	0.0579
Middle	215.8	<b>1384.1</b>	<b>1753.7</b>	<b>0.7684</b>	0.2315	0.3538	0.3561	0.0583	0.2350	0.7649	0.1181	0.0585	0.0583
Stay	216.8	<b>1390.3</b>	<b>1774.6</b>	<b>0.7297</b>	0.2703	0.3545	0.3752	0	0.2343	0.7656	0.1177	0.0586	0.0579
start	216.8	1455.2	2105.3	0.7233	0.2767	0.3541	0.2291	0.1400	0.2325	0.7674	0.1169	0.0582	0.0574

<Table 3> Result of Scenario 2

category	load			vehicle									
	Through put (unit)	$T_{mean}$ (sec)	$T_{max}$ (sec)	shuttle					lift				
				Utilization (%)	Parking (%)	Delivery (%)	Retrieval (%)	Go to park (%)	Utilization (%)	Parking (%)	Delivery (%)	Retrieval (%)	Go to park (%)
I/O point	381.3	1317.3	1653.0	0.7358	0.2641	0.3497	0.3607	0.0253	0.2507	0.7492	0.1266	0.0476	0.0764
Middle	379.9	1316.5	1663.2	0.7434	0.2565	0.3491	0.3532	0.0410	0.1933	0.8066	0.0978	0.0474	0.0481
Stay	379.3	1322.5	1654.7	<b>0.7188</b>	0.2811	0.3487	0.3700	0	0.1924	0.8075	0.0975	0.0468	0.0480
start	391.2	1314.8	1677.7	0.7526	0.2474	0.3497	0.2559	0.1468	0.1927	0.8072	0.0979	0.0471	0.0476

시나리오 1과 2에 대한 비교는 <Figure 12>에서 나타나고 있다. 시나리오 1의 경우 평균, 최대처리시간이 각 대기 장소 정책마다 차이를 보이며, 시나리오 2의 경우 평균, 최대처리시간이 대기 장소 정책과는 관계없이 거의 동일함을 알 수 있다. 또한 시나리오 1과 2의 경우 셔틀의 속도 차이가 있기 때문에 전반적으로 시나리오 2의 경우가 화물 처리 속도가 빠름을 알 수 있다.



<Figure 12> Comparison between Scenario 1 and 2

## 5. 결론

SBS/RS는 상대적으로 새롭게 구성된 시스템으로 아직 많은 연구가 진행되어 있지 않다. 특히 시스템 구성을 위한 많은 투자가 요구되어 효율적인 시스템 운영은 투자에 대한 효과를 이끌어내는 데에 매우 중요하다. 본 논문에서 SBS/RS의 셔틀(shuttle)의 대기 장소에 대한 실험을 통해 보다 효율적인 운영 정책에 대한 대기 장소 의사결정 제안을 하였다. 이 연구의 SBS/RS는 임의보관위치정책을 적용하였으며, 속도 및 화물 도착 시간 간격에 따라서 2가지 시나리오로 나뉘어 실험하였다.

상대적으로 낮은 속도의 셔틀을 이용하는 시나리오 1의 경우, 가장 처리 속도가 빠른 대기점 정책은 return to middle이다. 이는 예상되는 최대 이동거리를 줄이는 역할을 한다. 시나리오 2의 경우 상대적으로 셔틀의 속도를 높임으로 인해 각 대기점 정책이 확연히 다르게 나타나지 않지만 Utilization을 낮게 가져가는 Stay policy를 제안하게 되는데 이는 작업이 끝나고 대기점으로 이동하는 추가 작업을 없애는 효과를 가진다. 이를 통해 셔틀의 속도가 화물처리의 시간뿐 아니라 여러 가지 운영 정책 결정에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다.

시나리오 1에서의 셔틀의 가동률을 고려할 때 시나리오 2에서처럼 Stay policy가 유효함을 함께 생각한다면 전반적으로 작업이 끝난 후 그 지점에 셔틀을 머물러 있

도록 하는 것이 SBS/RS의 대기점 정책의 제안이 될 수 있다. 하지만 입고 효율의 측면에서 보면 Return to start policy 또한 유효함을 알 수 있는데 이는 각 대기점으로 인한 효과가 조금 다르게 나타나는 것을 유추할 수 있다.

이전의 자동 물류 시스템에 대한 대기점 정책은 주로 단일 SR 기기에 초점이 맞추어져 있어서 이전에 잘 적용되던 정책이 새롭게 시도되는 다중셔틀 시스템에 적용 가능한지는 밝혀져 있지 않았었다. 이 연구를 통해 여러 가지 경우의 셔틀의 대기점 정책의 효율성을 확인하였으며 화물의 보관위치 정책에 따른 대기점의 변화 또한 추후 연구로 이루어져야 할 내용이라 할 수 있다.

## Acknowledgement

This research was supported by the MSIP(Ministry of Science, ICT and Future Planning), Korea, under the ITRC (Information Technology Research Center) support program (IITP-2016-H8601-16-1010) supervised by the IITP(Institute for Information & communications Technology Promotion).

## References

- [1] Carlo, H.J. and Vis, I.F.S, Sequencing dynamic storage systems with multiple lifts and shuttles, in *International Journal of Production Economics*, 2012, Vol. 140, No. 2, pp. 844-853.
- [2] Chang, S.H., The order Picking Time of the S/R Vehicle in a Batch Picking Warehouse System, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2011, Vol. 34, No. 4, pp. 1-10.
- [3] 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.
- [4] Ekren, B.Y., Heragu, S.S., Krishnamurthy, A., and Malmberg, C.J., Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS, *Computers and Industrial Engineering*, 2010, Vol. 58, No. 1, pp. 175-185.
- [5] Hu, Y., Huang, S., Chen, C., Hsu, W., Toh, A., Loh, C., and Song, T., Travel time analysis of a new automated storage and retrieval system, *Computers and Operations Research*, 2005, Vol. 32, No. 6, pp. 1515-1544.
- [6] Lerher, T., Ekren, Y.B., and Sari, Z., Simulation Analysis of Shuttle Based Storage and Retrieval Systems,

- International Journal of Simulation Modelling*, 2015, Vol. 14, pp. 48-59.
- [7] Lerher, T., Ekren, Y.B., Dukic, G., and Rosi, B., Travel time model for shuttle-based storage and retrieval systems, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, Vol. 78, No. 9-12, pp. 1705-1725.
- [8] Liu, T., Xu, X., Qin, H., and Lim, A., Travel time analysis of the dual command cycle in the split-platform AS/RS with I/O dwell point policy, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2015.
- [9] Malmborg, C.J., Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems, *International Journal of Production Research*, 2002, Vol. 40, No. 8, pp. 1807-1822.
- [10] Malmborg, C.J., Interleaving dynamics in autonomous vehicle storage and retrieval systems, *International Journal of Production Research*, 2003, Vol. 41, No. 5, pp. 1057-1069.
- [11] Marchet, G., Melacini, M., Perotti, S., and Tappia, E., Development of a framework for the design of autonomous vehicle storage and retrieval systems, *International Journal of Production Research*, 2013, Vol. 51, No. 14, pp. 4365-4387.
- [12] Meller, R.D. and Mungwattana, A., AS/RS dwell point strategy selection at high system utilization : A simulation study to investigate the magnitude of the benefit, *International Journal of Production Research*, 2005, Vol. 43, No. 24, pp. 5217-5227.
- [13] Park, B.C., An optimal dwell point policy for automated storage/retrieval systems with uniformly distributed, rectangular racks, *International Journal of Production Research*, 2001, Vol. 39, No. 7, pp. 1469-1480.
- [14] Peters, B.A., Smith, J.S., and Hale, T.S., Closed Form Models for Determining the Optimal Dwell Point Location in Automated Storage and Retrieval Systems, 1996.
- [15] Regattieri, A., Santarelli, G., Manzini, R., and Pareschi, A., The impact of dwell point policy in an Automated Storage/Retrieval System, *International Journal of Production Research*, 2013, Vol. 51, No. 14, pp. 4336-4348.
- [16] Ro, I.K. and Lee, H.S., Design Problem of Automated Warehouse System Subject to Minimum Cost and Maximum Throughput, *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 1988, Vol. 16, No. 2, pp. 99-110.
- [17] Roodbergen, K.J. and Vis, I.F.A., A survey of literature on automated storage and retrieval systems, *European Journal of Operational Research*, 2009, Vol. 194, No. 2, pp. 343-362.
- [18] Suh, M.D., A Comparison on Performance of Shuttle-based AS/RS considering Retrieval Mechanism and Rack Configuration, [Master's Thesis], [Gyeonggi-do, Korea] : Korea Aerospace University, 2016.
- [19] Vasili, M., Hong, T.S., Homayouni, S.M., and Ismail, N., a Statistical Model for Expected Cycle Time of SP-AS/RS : an Application of Monte Carlo Simulation, *Applied Artificial Intelligence*, 2008, Vol. 22, No. 7-8, pp. 824-840.
- [20] Vasili, M.R., Tang, S.H., Homayouni, S.M., and Ismail, N., Comparison of Different Dwell Point Policies For Split-Platform Automated Storage and Retrieval System, *International Journal of Engineering and Technology*, 2006, Vol. 3, No. 1, pp. 91-106.

#### ORCID

Yun-Soo Ha | <http://orcid.org/0000-0002-9421-4768>

Junjae Chae | <http://orcid.org/0000-0002-2657-047X>