

자재취급 지연을 고려한 자동창고의 저장능력 추정

Storage Capacity Estimation for Automated Storage/Retrieval Systems Considering Material Handling Delay

조면식*

Myeonsig Cho

Abstract

Considering material handling delay which occurs between storage and processing stations, we propose an algorithm to estimate the required storage capacity, i.e., number of aisles and number of openings in vertical and horizontal directions in each aisle, of an automated storage/retrieval(AS/R) system. Due to the random nature of storage and retrieval requests, proportion of single and dual commands is not known in advance. Two design criteria, maximum permissible overflow probability and maximum allowable storage/retrieval(S/R) machine utilization, are used to compute the storage capacity. Most of studies assume that storage capacity of AS/R systems is given, although it is a very important decision variable in the design phase. Therefore, the proposed model can be effectively used in the design phase of new AS/R systems.

Keywords: AS/RS, S/R machine, storage capacity estimation, material handling delay, stochastic demand

* 경기대학교 산업공학전공

1. 서론

자동창고 시스템(AS/RS : automated storage/retrieval system)은 높은 공간이용도, 정확한 재고관리, 낮은 운영비용 등의 이점으로 인하여 제조 및 물류센터에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 자동창고는 원자재와 완성품뿐만 아니라 재공품을 중앙집중식으로 저장하기 위해 많이 사용되고 있다. 자동화 공장에서 자동창고는 가공 혹은 조립 설비와는 달리 원자재/재공품/완성품을 저장·불출하는 부가가치가 없는 임무를 수행하는 보조설비로 간주될 수 있지만, 자동창고를 적절히 설계하지 않는다면 전반적인 생산흐름을 방해하는 애로공정이 될 수 있다. 다시 말해 생산소요시간 증가, 재공품 증가, 기계 이용도 저하 등을 초래하는 애로공정이 된다. 특히 자동창고를 설치하기 위한 초기 투자비용이 높고 또한 설치 후 시스템을 구조적으로 변경하기 어려우므로, 자동창고 설계시 많은 주의가 요구된다.

자동창고 시스템은 적용 대상에 따라 여러 가지로 분류되지만, 본 논문에서는 S/R(storage/retrieval) 기계를 이용하여 단위하물(unit load)을 저장 혹은 불출하는 단위하물 자동창고 시스템의 저장능력 추정에 관하여 연구를 한다. 단위하물 자동창고 시스템은 하나 이상의 통로로 구성되어 있으며, 각 통로에는 일반적으로 하나의 입/출고점(I/O point)과 한 대의 S/R 기계가 할당되며, 저장공간인 저장랙이 통로 양면에 위치한다. 즉, 통로양면에 저장면(storage side)이 있다. 자동창고를 측면에서 보았을 때, 일반적으로 입/출고점은 저장랙의 왼쪽 아래에 위치하며, 입고를 위한 컨베이어와 출고를 위한 컨베이어가 입/출고점의 역할을 수행한다. 즉, 저장하고자 하는 단위하물은 S/R 기계가 가용할 때까지 입고점에서 기다리며, S/R 기계에 의해 불출된 자재는 출고점에 놓여진 후 컨베이어에 의해 목적지로 이동한다.

S/R 기계는 저장 및 불출요구의 유무에 따라, 단일명령(SC : single command) 혹은 이중

명령(DC : dual command)을 수행한다. 단일명령은 저장임무만을 수행하는 저장 SC와 불출임무만을 수행하는 불출 SC로 분류되며, 이중명령은 저장임무를 수행한 후 불출임무를 수행한다.

S/R 기계가 명령을 수행한 후, 더 이상의 저장·불출 요구가 없을 경우에는 항상 입/출고점으로 이동하여 다음 명령이 발생될 때까지 기다리거나 혹은 유희상태가 된 지점에서 다음 명령을 기다리는 거주정책(dwelling point strategy)을 사용한다. 본 연구에서는 S/R 기계가 유희상태가 된 지점에서 추후 명령을 기다리는 거주정책을 사용하며, 이러한 정책은 Bozer와 White[4], Egbelu와 Wu[9], Cho와 Bozer[8] 등에서도 사용되었다.

자동화 공장에서 단위하물 자동창고는 원자재 혹은 각 공정간의 재공품을 저장하며, 제조/조립 작업장에서 원자재/재공품을 요구할 때마다 필요한 하물을 불출하여 컨베이어 등과 같은 자재취급장비를 이용하여 목적지로 원자재/재공품을 이송한다. 그러므로 저장 및 불출요구는 랜덤하게 발생되며, 또한 S/R 기계가 작업을 종료한 시점에서 저장·불출요구의 존재유무에 따라 단일 저장명령, 단일 불출명령, 혹은 이중명령을 수행한다.

본 논문에서는 작업장, 자동창고, 그리고 컨베이어로 구성된 자동화공장 설계시 저장·불출 요구가 임의로 또한 독립적으로 발생한다는 가정하에, 단위하물 자동창고의 저장용량을 추정하는 알고리즘을 개발한다. 자동창고의 저장용량을 계산하기 위해 최대 허용 S/R 기계 이용도와 허용 가능한 최대 범람(overflow) 확률이라는 설계 제약조건을 적용한다. S/R 기계의 이용도가 1에 근접할수록 S/R 기계자체가 애로공정이 되므로 시스템 전체의 성능을 저하시키며, 또한 범람확률을 인정하지 않는다면 최대 수요를 저장하기 위해 필요없이 많은 저장능력이 요구된다. 이러한 알고리즘을 이용하여, 자동창고 시스템 설계자는 필요한 통로수, 각 저장랙에서의 수평 및 수직방향 저장공간 수를 쉽게 계산할 수 있다.

2. 관련 문헌 고찰

자동창고 시스템에 관한 연구는 크게 단일 명령 혹은 이중명령에 소요되는 시간의 평균값 혹은 분포에 관한 연구(Bozer와 White[4], Chang 등[5], Foley와 Frazelle[11] 등), S/R 기계 거주 정책, 저장-불출순서 결정, 저장방법 등의 운영적 요소에 관한 연구(Chang과 Egbelu[6, 7], Egbelu와 Wu[9], Elsayed와 Lee[10], Hwang과 Lim[13], Lee and Schaefer[16] 등), 그리고 저장-불출요구의 매칭(matching) 혹은 자동창고 시스템의 통제 및 설계 등에 관한 연구(Han 등[12], Linn과 Wysk[17], Rosenblatt 등[19] 등)로 분류될 수 있다.

그러나, 대부분의 연구들은 자동창고 시스템을 단일 시스템으로 간주하여 연구를 수행하였다. 즉, 자동창고 시스템과 제조설비와의 상호관련성을 무시하였다. 한편 저장·불출요구의 발생 시각은 미리 알려져 있거나 혹은 시스템을 운영하기 직전 모두 발생되었다고 가정하였거나, 저장·불출요구가 랜덤하게 발생할 경우에는 시뮬레이션을 이용하여 연구를 수행하였다.

최근, Lee[15]는 물품회전을 저장정책(full turnover based storage policy)을 사용하여 주어진 서비스 수준하에서 재고부족비용을 최소화하는 저장 공간량을 결정하는 방법을 연구하였다. 그러나 S/R 기계의 이동시간 및 단일·이중명령에 관한 명확한 구별을 하지 않았다.

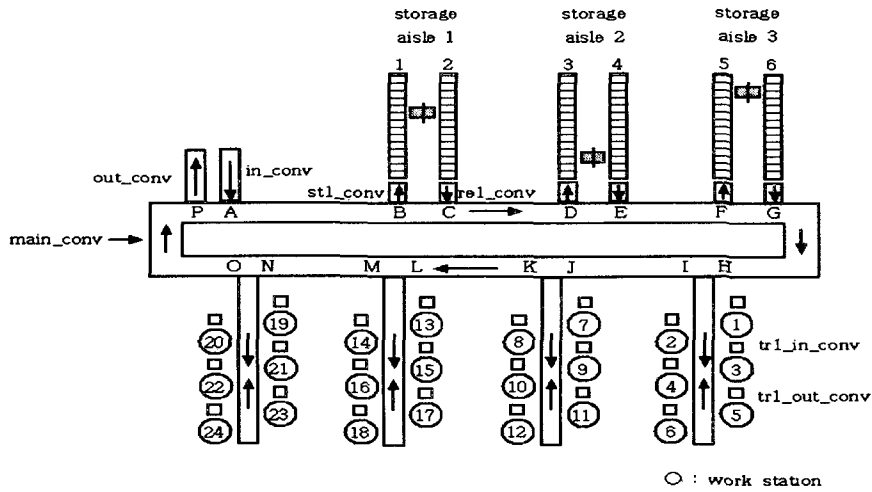
Bozer와 Cho[2]는 S/R 기계가 유희상태가 된 지점에서 다음 저장 혹은 불출 요구가 발생할 때까지 대기하는 거주정책을 사용하여, 설계된 자동창고가 확률적 저장·불출 요구하에서 주어진 생산량(throughput)을 처리할 수 있는지를 평가하는 해석적 방법을 연구하였다. 즉, 자동창고 시스템이 안정적인지 평가하였으며 또한 S/R 기계의 이용도를 구하였다. 이를 위하여, 단일 혹은 이중명령의 수행 여부는 S/R 기계가 작업을 종료한 후 저장·불출 요구의 유무에 의하여 결정된다고 가정하였다. 다시 말해, 단일·이중 명령의 수행비율은 미리 알지 못한다.

Bozer와 Cho[3]는 S/R 기계는 유희상태가 된 지점에서 다음 저장 혹은 불출요구가 발생할 때까지 대기하는 거주정책하에, 저장·불출 요구가 랜덤하게 발생하는 경우에 서비스 받기 위해 대기하는 평균시간을 근사적으로 구하는 방법을 연구하였다. 저장요구의 대기시간을 구함으로써 입고점에서 대기하는 자재의 평균 숫자를 구할 수 있으며, 또한 불출요구의 대기시간을 구함으로써 불출요구가 실행되었으나 저장랙에서 대기하는 자재의 평균 숫자를 계산할 수 있다.

Cho와 Bozer[8]는 저장요구가 외부 및 시스템 내부의 작업장으로 부터, 불출요구는 작업장으로 부터 랜덤하게 발생하는 상황하에서 자동창고 저장용량, 즉, 통로의 수 및 수직/수평 방향의 저장 공간(opening) 수를 설계하는 알고리즘을 개발하였다. 그러나, 이들은 자동창고와 작업장간의 이동을 위해 필수적으로 발생하는 자재취급 장비에 의한 시간지연을 고려하지 않은 채 자동창고의 설계를 수행하였다.

3. 자재취급 지연을 고려한 저장능력 모델

이 절에서는 자재취급 장비에 의해 발생하는 시간 지연을 고려한 자동창고의 저장공간을 계산하는 알고리즘을 소개한다. <그림 1>은 여러 개의 작업장, 컨베이어, 그리고 자동창고로 구성된 자동화 공장을 나타내고 있다. 외부에서 시스템에 도착하는 자재는 그림의 왼쪽 상단에 위치한 컨베이어(in_conveyor)를 통하여 주 컨베이어(main_conveyor)로 이동된 후, 주 컨베이어에 의해 해당 저장랙으로 이동되며, 이후 저장 컨베이어(st_conveyor)에 의해 입고점으로 이동된다. 입고점으로 이동된 자재는 S/R 기계에 저장요구를 발생시키며, 이후 S/R 기계에 의해 입고점에서 (이동)시간적으로 가장 가까운 빈 공간(closest open location)에 저장된다. 저장된 자재는 작업장에서 불출요구가 발생된 후 S/R 기계에 의해 불출될 때까지 저장랙에서 대기한다. 불출 요구된 자재는 S/R 기계에 의해 출고점으로 이동한 후 불출 컨베이어(re_conveyor)에 의



<그림 1> 작업장, 자동창고, 컨베이어로 구성된 자동화 공장

해 주 컨베이어로 이동되며, 이후 해당 작업장과 연결된 컨베이어(tr_in_conveyor)에 의해 작업장의 완충장소(buffer storage)로 이송된다.

자동화 공장에서 작업장 완충장소 크기는 일반적으로 제한되어 있으므로, 본 연구에서는 각 작업장 완충장소의 크기는 1이라고 가정한다. 완충장소에 있는 자재에 대한 작업을 시작한 순간, 작업장 i 는 저장랙에서 대기중인 자재 중 다음 행선지가 작업장 i 인 자재에 대한 불출요구를 발생한다. 불출요구가 발생되면 저장랙에서 가장 오랜 시간동안 저장된 자재를 S/R 기계가 불출한다. 각 작업장에서는 독립적으로 불출요구가 발생하며, S/R 기계는 이러한 불출명령들을 선입선출법에 의해 서비스한다.

작업장에서의 가공시간은 지수분포를 따르며, 작업장에서 가공이 완료된 자재는 작업장과 주 컨베이어를 연결하는 컨베이어(tr_out_conveyor)를 통해 주 컨베이어로 이동된다. 가공 완료된 자재가 이 시스템에서 더 이상의 가공을 필요로 하지 않을 경우에는 좌측 상단에 표시된 컨베이어(out_conveyor)를 통하여 시스템 외부로 빠져 나가지만, 추가적인 가공을 필요로 하는 경우에는 가장 이용도가 적은 저장랙의 빈 공간 중 입

/출고점에서 가장 가까운 위치에 저장된 후 불출요구가 발생할 때까지 대기한다. (이용도가 동일한 경우에는 가장 가까운 저장랙, 즉 저장통로 1에 저장된다.) 그러나, 추가적인 가공을 필요로 하지만 저장랙이 포화상태인 경우에는 주 컨베이어에 의하여 즉시 이동을 시작하지 않고, 저장랙에 저장공간이 생길 때까지 작업장과 주 컨베이어를 연결하는 컨베이어(tr_out_conveyor) 혹은 in_conveyor)에서 대기한다. 즉 범람(overflow)이 발생한다.

자재취급 장비에 의한 시간 지연을 고려한 저장공간의 크기를 결정하는 알고리즘을 단계별로 소개한다. 이를 위하여, 자재가 각 작업장의 완충장소에 도착하는 시간 간격은 지수분포를 따른다고 가정한다.

단계 1 : 각 작업장의 완충장소 크기가 무한하다는 가정하에, 작업장 i 에서 대기하는 자재의 평균 수(ν_i) 및 분산(σ_i^2)을 다음과 같이 계산한다 (Kobayashi[14]). 여기서 ρ_i 는 작업장 i 의 이용도이다.

$$\nu_i = \frac{\rho_i^2}{1 - \rho_i}$$

$$\sigma_i^2 = \frac{\rho_i^2(1 + \rho_i - \rho_i^2)}{(1 - \rho_i)^2}$$

한편 이들의 합을 $M(= \sum_{i=1}^N \nu_i)$ 과 $V(= \sum_{i=1}^N \sigma_i^2)$ 라 한다. 여기서 N 은 시스템 내에 있는 작업장의 수이다.

단계 2 : 각 작업장 완충장소의 크기는 1이므로, 각 완충장소에서 대기하는 자재의 평균 숫자(γ_i)는 다음과 같이 계산되며(Cho와 Bozer[8]), $\gamma_i = \rho_i^2 - \rho_i^3$, 이들의 합을 $X(= \sum_{i=1}^N \gamma_i)$ 라 한다.

단계 3 : 통로 수(NAISLE, OLD NAISLE)를 0으로 초기화한다.

단계 4 : 통로 수를 1 증가시킨다(NAISLE = NAISLE + 1). 각 저장통로는 양면에 저장면이 있으므로, 총 저장면의 수(NSIDE)는 $2 \times$ NAISLE이다.

단계 5 : 자동창고에는 여러 개의 저장통로가 있을 수 있으므로, 즉, 이들의 위치는 서로 다르므로, 각 저장랙에 같은 비율로 자재가 저장되었다는 가정하에, 각 작업장에서 발생하는 불출요구량을 가중치로 하여 모든 통로로부터 작업장까지의 가중 평균이동거리($CWDIST_{NASRS}$)를 계산한다. 컨베이어 속도와 가중 평균이동거리를 이용하여, 저장랙으로부터 작업장까지의 가중 평균이동시간($CONVYT_{NASRS}$)을 계산한다.

단계 6 : 저장랙에 저장해야 할 자재의 평균량(\hat{M})을 다음과 같이 계산한다.

$\hat{M} = M - X + \lambda \times CONVYT_{NASRS}$. 여기서, λ 는 모든 작업장에서 발생하는 시간당 불출요구량의 합이다. 컨베이어에 의한 지연이 없다면, 저장랙에 저장해야 할 자재의 평균량은 $M - X$ 로 계산될 수 있다. 그러나 컨베이어에 의한 시간지연이 발생하고, 지연된 자재가 작업장에 도착한 후 가공을 시작하면서 다음 자재에 대한 불출명령을 받

생하므로, 저장랙에 저장해야 할 자재의 양은, 컨베이어에 의한 시간지연이 없는 경우에 비하여 약 $\lambda \times CONVYT_{NASRS}$ 증가된다.

단계 7 : 평균이 \hat{M} , 분산이 V 인 절단(truncated) 정규분포를 사용하여 허용 가능한 최대 범람(overflow) 확률을 만족하는 저장공간의 수(T)를 결정한다. (저장공간의 수는 0보다 커야 하므로 절단 정규분포를 사용하였으나, 저장공간의 수는 항상 정수임에도 불구하고 계산된 값은 실수이다.) 그러므로, 각 저장통로 저장면(storage rack side)의 저장공간 수는 $T/NSIDE$ 이다.

단계 8 : 실수개의 저장공간을 지닌 저장랙을 건축할 수 없으므로, 각 저장면에 대한 정수개의 저장공간 수(K)를 구한다. 즉, 각 저장면 저장공간 수는 수평·수직방향의 저장공간 수의 곱이므로, 저장랙의 평균면적은 단계 7에서 구한 저장랙의 면적($T \times (\text{area per opening})/NSIDE$)보다는 커야하며, S/R기계의 이동시간을 최소화하기 위해 가능한 시간적으로 정사각형(SIT)이어야 한다. 그리고, 각 저장공간의 수평·수직방향 저장공간 개수 및 길이, S/R기계의 속도를 이용하여 저장랙의 형성모수 b 를 계산한다 (Bozer and White[4]).

단계 9 : 저장랙은 평균적으로 \hat{M} 개의 자재를 저장하므로, 이들을 저장하기 위해서 필요한 각 저장면의 평균 면적은

$$C = \frac{\hat{M} \times (\text{area per opening})}{NSIDE}$$

이며, 입/출고 점으로부터 가장 가까운 장소(COL: closest open location)인 C 에 자재를 저장한다. 저장랙의 이용도(R)를 다음과 같이 계산한다.

$$R = \frac{\hat{M}}{K \times NSIDE}$$

단계 10 : 저장랙의 이용도(R)와 형성모수(b)를 이용하여 COL에 대한 수평 및 수직방향의 길이를 계산한다 (Bozer[1]).

단계 11 : 위에서 계산된 COL인 면적에 대한 수평·수직길이에 대하여 Bozer와 Cho[2]에

소개된 알고리즘을 이용하여 안정화 조건 (stability condition) 값과 S/R기계의 평균 이용도를 계산한다. 안정화 조건값이 1보다 작고 계산된 S/R 기계의 이용도가 허용가능한 S/R 기계의 이용도보다 작으면 단계 12를 수행한다. 그렇지 않다면, 단계 4를 수행한다.

단계 12 : $OLD\ NAISLE = NAISLE$ 이면 알고리즘을 종료한다. 그렇지 않다면, $OLD\ NAISLE = NAISLE$ 으로 하고 단계 13을 수행한다.

단계 13 : Bozer와 Cho[3]에 소개된 대기시간 모델을 이용하여, 각 통로에서 불출요구가 되었으나 S/R 기계를 기다리고 있는 자재의 수(L)를 계산하고, 이를 \hat{M} 값에 더한 후, ($\hat{M} = \hat{M} + L \times NAISLE$), 단계 7을 수행한다. (저장랙에 저장된 양의 분산 V 는 변화하지 않는다고 가정한다.)

4. 수치실험

앞에서 소개된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해, 자동창고, 컨베이어, 그리고 작업장으로 구성된 자동화공장(<그림 1>)에 대한 시뮬레이션 수치실험을 수행한다. 수치실험을 위해 필요한 자동창고, 컨베이어, 작업장에 대한 운영전략 및 데이터에 관한 설명을 한 후, 두 개의 예제를 이용하여 알고리즘의 성능을 평가한다.

자동창고에 대한 저장 요구는 외부로부터 혹은 각 작업장으로부터 발생하며 이들은 선입선출법에 의해 서비스된다. 한편 불출 요구는 작업장에서 작업이 시작된 즉시 발생하며, 이들 역시 선입선출법에 의해 서비스된다. (각 작업장 완충장소의 크기는 1이다.) 즉, 저장요구와 불출요구는 각각 선입선출법에 의해 서비스된다. 그러나, S/R 기계를 저장 혹은 불출요구의 존재형태에 따라 저장 SC와 불출 SC와 같은 단일명령 혹은 이중명령을 수행하므로, 시간 t_2 에 도착한 불출(저장)요구가 시간 t_1 에, $t_1 < t_2$, 도착한 저장(불출)요구보다 빨리 서비스될 수도 있다. 한편 단

일 혹은 이중명령을 수행한 직후, 더 이상의 저장 혹은 불출요구가 없는 경우에 S/R기계는 명령이 종료된 지점에서 다음 저장 혹은 불출요구가 발생할 때까지 대기한다.

저장되어야 할 자재는 자동창고의 여러 저장면 중에서 가장 이용도가 낮은 저장면을, 이용도가 동등한 경우에는 가장 인접한 저장면을 선택한 후, 주 컨베이어에 의해 목적지 저장면으로 이동되어 S/R 기계에 의해 입/출고점에서 시간적으로 가장 가까운 빈 공간에 저장된다. 만약 저장면에 저장된 자재의 수와 자동창고에 저장하고자 주 컨베이어에 의해 이송중인 자재 수의 합이 저장능력보다 큰 경우에, 자재는 주 컨베이어에 연결된 지점(A, I, K, M, 혹은 O)까지 이동하여 창고에 여유능력이 발생할 때까지 대기한 후, 주 컨베이어를 통해 선택된 저장랙으로 이동한다. 즉, 창고능력에 여유가 없을 때에는 범람(overflow)이 발생한다.

단위하물을 저장하는 각 공간(opening)의 가로·세로길이는 각각 9ft, S/R 기계의 수평 및 수직 이동속도는 각각 400ft/분와 100ft/분이며, 자재를 선적(pickup)하는 시간과 하역(deposit)하는 시간은 각각 0.05분이라고 가정한다.

시스템 외부에서 들어오는 자재를 위한 컨베이어(in_conveyor)와 완성된 제품을 배출하는 컨베이어(out_conveyor)의 길이는 각각 20ft이다. In_conveyor에서 주 컨베이어를 통하여 자동창고에 입고되는 자재는 범람현상 때문에 주 컨베이어로 옮겨지기 직전에 누적될 수 있으므로 누적(accumulating) 컨베이어로 모델링하나, out-conveyor에서는 자재의 누적현상이 발생하지 않으므로 비누적(nonaccumulating) 컨베이어로 모델링한다.

<그림 1>에서 주 컨베이어는 비누적 컨베이어이며 항상 시계방향으로 움직인다. 한편 그림에 표시된 각 지점들간의 거리는 다음과 같다. A-B(50ft), B-C(10), C-D(50), D-E(10), E-F(50), F-G(10), G-H(80), H-I(10), I-J(40), J-K(10), K-L(40), L-M(10), M-N(40), N-O(10), O-P(80), P-A(10). 즉, 주 컨베이어의 총 길이는 510ft이다.

주 컨베이어와 입고점을 연결하는 st_conveyor에서는 자재의 대기가 발생할 수 있으며, 출고점과 주 컨베이어를 연결하는 re_conveyor에서도 주 컨베이어의 혼잡에 의해 누적 발생할 수 있으므로 이들 모두를 누적 컨베이어로 모델링하며 길이는 각각 20ft이다. 한편 주 컨베이어에서 작업장까지 자재를 이송하는 컨베이어(tr_in_conveyor)는 비누적 컨베이어이며, 작업장에서 작업완료된 자재를 주 컨베이어로 이송하는 컨베이어(tr_out_conveyor)는 주 컨베이어의 혼잡과 저장능력의 초과로 인한 범람현상 때문에 누적 컨베이어로 모델링한다. 한편, 이들의 길이는 각각 80ft이다.

시스템에는 총 24개의 작업장이 있으며, 이들은 4개의 tr_in_conveyor 주변에 6개씩 배치되어 있다. 주 컨베이어의 지점 H에서 작업장 1까지의 거리는 30ft, 작업장 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6간의 거리는 각각 10ft이다. 한편, 지점 J에서 작업장 7까지의 거리는 30ft, 작업장 7-8, 8-9, 9-10, 10-11, 11-12까지의 거리는 각각 10ft이며, 지점 L과 N에서 작업장간의 거리도 위와 동일하다.

본 연구에서는 시뮬레이션 실험을 위해, 범용 시뮬레이션 언어인 SIMAN V[18]를 사용하였다. SIMAN V는 연속적인 컨베이어의 움직임을 이산적으로 표현하기 때문에, 컨베이어는 5ft인 셀로 구성되었다고 가정한다. 즉, 길이가 510ft인 주 컨베이어는 102개의 셀로 구성된다.

위에서 소개한 자동창고, 컨베이어, 그리고 작업장으로 구성된 자동화공장에 대한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 다음 2개의 문제(P1과 P2)를 사용한다. P1에서는 외부에서 들어오는 자재의 평균 도착간격시간이 평균 6분인 지수분포를 따르며, P2에서는 평균 4.5분인 지수분포를 따른다. 이들 문제에서, 도착하는 자재의 50%는 자재유형 1이며, 이들의 가공경로는 작업장 1, 3, 8, 10, 6, 15, 18, 23, 21, 그리고 14이다. 도착하는 자재의 30%는 자재유형 2이며, 이들의 가공경로는 작업장 2, 5, 9, 6, 8, 10, 12, 3, 16, 17, 24, 그리고 19이다. 나머지는 자재유형 3이며, 이

들의 가공경로는 작업장 11, 9, 6, 7, 4, 1, 13, 22, 그리고 20이다.

P1과 P2에서 각 작업장의 가공시간은 지수분포를 따르며, 이들에 대한 평균 가공시간이 <표 1>과 <표 2>에 각각 제시되어 있다. 도착율, 가공경로, 가공시간을 이용하여 안정 상태 하에서의 각 작업장 이용도를 해석적으로 쉽게 구할 수 있으며, 이들 값 역시 <표 1>과 <표 2>에 제시되어 있다. 문제 P1과 P2의 근본적인 차이점은 각 작업장 이용도의 차이이다. 즉, P1에서 작업장 이용도의 범위는 0.5~0.9이며, P2에서의 범위는 0.8~0.8889이다. 한편 P1에서 작업장 이용도의 산술평균은 0.727이며, P2에서의 산술평균은 0.8583이다. 다시 말해, P2에서의 작업장 이용도가 P1에 비하여 상대적으로 높다.

<표 1> P1에서 작업장 가공시간(분) 및 작업장 이용도

번호	가공 시간	이용도	번호	가공 시간	이용도	번호	가공 시간	이용도
1	7	0.8167	9	8	0.6667	17	15	0.75
2	12	0.6	10	6	0.8	18	10	0.8333
3	6	0.8	11	25	0.8333	19	14	0.7
4	16	0.5333	12	15	0.75	20	15	0.5
5	12	0.6	13	22	0.7333	21	8	0.6667
6	5	0.8333	14	10	0.8333	22	17	0.5667
7	20	0.6667	15	10	0.8333	23	10	0.8333
8	6	0.8	16	18	0.9	24	12	0.6

P1(P2)에서 자동창고로부터 각 작업장의 불출요구율 및 저장랙의 위치에 따라 모든 작업장까지 가중 평균된 컨베이어의 길이는 다음과 같다. 저장통로 1만 필요한 경우에, 창고로부터 작업장까지 가중 평균된 컨베이어의 길이는 319.99(320.00)ft, 저장통로 1과 2가 필요한 경우에 가중평균된 컨베이어 길이는 289.99(290.00)ft, 저장통로 1, 2, 그리고 3이 필요한 경우에 가중평균된 컨베이어 길이는 259.99(260.00)ft이다.

<표 2> P2에서 작업장 가공시간(분) 및 작업장 이용도.

번호	가공 시간	이용도	번호	가공 시간	이용도	번호	가공 시간	이용도
1	5.5	0.8556	9	7.5	0.8333	17	13	0.8667
2	13	0.8667	10	5	0.8889	18	8	0.8889
3	5	0.8889	11	18	0.8	19	13	0.8667
4	18	0.8	12	13	0.8667	20	18	0.8
5	13	0.8667	13	19	0.8444	21	8	0.8889
6	4	0.8889	14	8	0.8889	22	18	0.8
7	18	0.8	15	8	0.8889	23	8	0.8889
8	5	0.8889	16	13	0.8667	24	13	0.8667

시뮬레이션 실험에서 S/R 기계의 이동시간은 Bozer와 White[4]에서 개발된 단일명령과 이중 명령의 평균시간을 직접 사용하는 대신에, 저장 명령인 경우에는 입고점에서 가장 가까운 빈 공간까지의 이동시간, 저장명령을 완료한 직후 불출요구가 있는 경우에는 불출되는 자재가 저장되어 있는 장소로 이동하는 시간, S/R 기계가 저장랙에서 대기중 불출요구가 발생하는 경우에는 불출되는 자재가 있는 장소로 이동하는 시간 등의 실제 시간을 적용하였다.

위의 예제들에서 허용 가능한 최대 범람(overflow) 확률을 0.05, S/R 기계의 최대 이용도를 0.8로 설정한다. 범람을 허용하지 않을 경우에, 저장랙의 크기는 필요이상으로 커지는, 다시 말해, 이용도가 매우 낮은 비경제적인 저장랙을 설계하게 된다. 한편 S/R 기계의 이용도가 매우 높은 경우에는 S/R 기계 자체가 애로공정이 되므로, 저장공간이 필요없이 크게 설계되는 경향이 있다.

안정화된 실험 결과를 구하기 위해, 본 연구에서는 5,000개의 자재가 외부로부터 in_conveyor에 도착한 순간 모든 통계량을 초기화한 후, 2,000,000개의 저장 혹은 불출요구가 실행될 때까지 하나의 매우 긴 시뮬레이션을 수행하였다. 한편, 결과치의 신뢰구간을 형성하기 위한 독립적 데이터를 구하기 위해 SIMAN V에서 제공

하는 correlogram 명령을 적용한 결과, 200,000개의 저장 혹은 불출요구를 수행한 기간에 대한 관측치를 1개의 배치로 사용하였다. 즉, 총 10개의 배치를 이용하여 결과분석을 하였으며, 컨베이어 속도 변화에 따른 결과가 <표 3>(P1)과 4(P2)에 제시되어 있다.

<표 3> P1에 대한 해석적 결과와 시뮬레이션 결과

	컨베이어 속도	300ft/분	400ft/분	∞ft/분
해석적 결과	총 공간(opening) 수	95.03	94.61	93.35
	필요한 공간수	96	96	96
	S/R 기계의 이용도	0.510	0.509	0.506
	저장랙의 이용도	0.646	0.642	0.629
시뮬레이션 결과	S/R 기계 1의 이용도	[0.466, 0.492]	[0.458, 0.490]	[0.447, 0.470]
	S/R 기계 2의 이용도	[0.440, 0.470]	[0.432, 0.464]	[0.427, 0.450]
	범람확률	4.40%	2.91%	1.99%
	저장랙의 이용도	[0.501, 0.591]	[0.487, 0.579]	[0.483, 0.546]

<표 4> P2에 대한 해석적 결과와 시뮬레이션 결과

	컨베이어 속도	300ft/분	400ft/분	∞ft/분
해석적 결과	총 공간(opening) 수	189.41	188.91	187.40
	필요한 공간수	198	198	198
	S/R 기계의 이용도	0.513	0.512	0.510
	저장랙의 이용도	0.674	0.672	0.664
시뮬레이션 결과	S/R 기계 1의 이용도	[0.487, 0.521]	[0.480, 0.512]	[0.451, 0.481]
	S/R 기계 2의 이용도	[0.474, 0.515]	[0.469, 0.501]	[0.440, 0.470]
	S/R 기계 3의 이용도	[0.465, 0.506]	[0.457, 0.491]	[0.428, 0.457]
	범람확률	6.09%	4.12%	0.77%
	저장랙의 이용도	[0.598, 0.724]	[0.584, 0.683]	[0.517, 0.602]

문제 P1과 P2에 알고리즘을 적용한 결과 필요한 공간 수(단계 7)는 컨베이어의 속도가 300ft/분에서 무한대로 증가됨에 따라 약간 감소함을 알 수 있다. 즉, P1에서는 95.03개에서 93.35개로, P2에서는 189.41개에서 187.4개로 약간 줄어들음을 알 수 있다. 이는 컨베이어의 속도가 빨라짐에 따라, 자재가 컨베이어에서 지체되는 시간이 줄어들고, 이에 따라 작업장에서 발생하는 불출요구의 간격이 짧아짐에 따라 자재가 창고에 저장될 때마다 창고 내에서 저장되는 시간이 감소하므로 필요한 저장공간의 수가 감소하기 때문이다. 한편, P2에서의 외부 도착율이 P1에서의 도착율보다 33% 많으므로, P2에서는 P1보다 더 많은 저장공간이 요구된다.

문제 P1에 알고리즘의 단계 8을 적용하여 정수 개의 공간을 지닌 저장랙을 계산한 결과(<표 3>의 해석적 결과), 컨베이어의 속도에 관계없이 2개의 통로가 필요하며, 각 통로 양편 저장면의 수평방향 공간 수는 8개, 수직방향의 공간 수는 3개, 즉, 총 96개의 공간이 필요하다. 이 경우 저장랙의 형상모수값은 0.667이다(실수 개의 저장공간을 지닌 저장랙을 건축할 수 없으며, 또한 수평·수직 방향의 공간수는 정수이어야 한다.). 한편, 이러한 구조를 지닌 저장창고에서 S/R 기계의 이용도는 컨베이어 속도가 300ft/분인 경우에는 0.510, 400ft/분인 경우에는 0.509, 매우 빠른 경우에는 0.506으로 S/R 기계의 최대 허용이용도 제약조건(0.8)을 만족하며, 저장랙의 이용도는 각각 0.646, 0.642, 0.629로 계산되었다.

<표 3>에서 제시된 S/R 기계 1과 S/R 기계 2의 이용도는 S/R 기계의 최대 허용 이용도보다 적으며, 또한 시뮬레이션에서 구한 범람(overflow) 확률은 허용 가능한 최대 범람 확률(0.05)보다 적음을 알 수 있다. 다시 말해, 알고리즘을 이용하여 설계된 저장랙은 설계 제약조건을 만족하고 있다.

시뮬레이션 실험에서 S/R 기계 1의 평균 이용도는 S/R 기계 2의 평균 이용도보다 높다. 이는 자동창고에 저장될 자재는 저장면 선택시, 저장면의 이용도가 같은 경우에는 in_conveyor 혹

은 작업장으로부터 가까운 저장면을 선택하여 저장되므로, 저장되는 횟수 그리고 이에 따른 불출 횟수가 증가하기 때문이다. 한편, 시뮬레이션에서 구한 S/R 기계 이용도의 95% 신뢰구간은 해석적인 방법으로 구한 이용도를 포함하지 않으며, 시뮬레이션에서 구한 이용도는 해석적 방법으로 구한 이용도보다 약간 적은 경향이 있다(본 논문에서는 외부로부터 혹은 작업장간에 발생하는 저장요구 혹은 각 작업장에서 발생하는 불출명령의 존재유무에 따라 단일명령 및 이중명령을 랜덤하게 수행하므로, S/R 기계의 이용도를 정확하게 예측하는 것이 매우 어려울 뿐만 아니라, 본 논문의 주 목적은 허용 가능한 S/R 기계 이용도 및 최대 범람확률의 제약조건을 만족하는 저장랙을 설계하는 것이다.).

컨베이어의 속도가 빨라짐에 따라, 범람확률이 감소하는데 이는 컨베이어의 속도가 빠르면 해석적인 방법에서 구한 바와 같이 필요한 저장공간 수가 감소하지만, 알고리즘에서 구한 정수 개의 공간 수는 컨베이어의 속도에 관계없이 동일하기 때문에 판단된다. 다시 말해, 컨베이어의 속도가 빨라질수록 여유 공간이 많기 때문에 범람이 발생할 확률이 감소한다.

<표 3>(P1)에 제시된 알고리즘에서 계산된 저장랙의 이용도는 실제 저장랙 이용도를 과대 추정하는 경향이 있다. 그러나, <표 4>(P2)에서 계산된 저장랙의 이용도는 컨베이어의 속도가 300ft/분과 400ft/분인 경우에는 실제 저장랙 이용도의 95% 신뢰구간 내에 포함된다. 저장랙의 이용도는 자동창고, 컨베이어, 그리고 작업장의 성능에 의하여 영향을 받는 부차적인 측정치이지만, 저장랙의 이용도를 좀 더 정확히 계산할 수 있다면, S/R 기계의 이용도 역시 실제값과 근사해 질 수 있으리라 판단된다.

<표 4>에는 문제 P2에 대한 해석적 결과와 시뮬레이션 결과가 표시되어 있다. 알고리즘을 적용한 결과, 컨베이어의 속도에 관계없이 3개의 통로가 필요하며, 각 통로 양편 저장면에서 수평방향의 공간 수는 11개, 수직방향의 공간 수는 3개, 즉, 총 198개의 공간이 필요하다. 이 경우 저

장래의 형상모수값은 0.917이다.

P2에 대한 시물레이션 결과, S/R 기계의 이용도는 최대허용 이용도(0.8)보다 적으며, 즉 제약조건을 만족하며, 각 통로에 할당된 S/R 기계 이용도의 경향은 P1에서와 동일함을 알 수 있다. 한편, 컨베이어의 속도가 400ft/분과 매우 빠른 경우에는 시물레이션에서 구한 범람확률이 각각 0.0412와 0.0077로, 최대 허용 범람확률(0.05)를 만족하나, 컨베이어의 속도가 300ft/분인 경우에 범람확률은 0.0609로 최대 허용 범람확률을 초과하고 있다. 그러나 300ft/분인 경우에 범람확률의 95% 신뢰구간은 [0.0072, 0.115]로 0.05를 포함하고 있으나, 컨베이어의 속도가 느려짐에 따라 범람확률이 증가함을 실험적으로 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 자동창고, 컨베이어, 그리고 작업장으로 구성된 자동화 공장에서 재공품 저장을 위해 필요한 자동창고의 설계시 필수적으로 고려해야 할 의사결정변수인 저장공간의 수와 구조를 계산하는 알고리즘을 연구하였다. 자동창고는 여러 개의 저장통로로 구성될 수 있으며, 각 저장통로에는 한 대의 S/R 기계가 할당된다. S/R 기계는 외부 및 작업장으로부터 발생하는 저장요구와 작업장으로부터 발생하는 불출요구의 유무에 따라 단일명령 혹은 이중명령을 수행한다. S/R 기계가 명령을 수행한 후, 더 이상의 저장 혹은 불출요구가 없는 경우에는 작업을 종료한 시점에서 다음 저장 혹은 불출요구가 발생할 때까지 대기하는 거주정책을 사용한다.

범람을 허용하지 않고 최대치의 재공품을 저장하기 위한 자동창고를 설계할 경우에는 저장공간의 비효율성으로 인한 막대한 고정비의 낭비를 초래하며, 또한 너무 작게 설계할 경우에는 자동창고 자체가 애로공정이 되어 작업이 지연될 수 있으므로, 적절한 크기의 자동창고를 설계하는 것은 매우 중요한 임무이다. 이를 위하여, 본 연구에서는 허용 가능한 최대 범람확률과 최

대 허용 S/R 기계 이용도라는 두 개의 설계 제약조건을 이용하여, 자동창고의 설계단계에서 주요한 의사결정변수인 통로 수, 수평·수직방향의 저장공간 수를 계산하는 알고리즘을 개발하였으며, 이의 성능을 검증하기 위해 시물레이션을 수행하였다.

REFERENCES

- [1] Bozer, Y.A., A Minimum Cost Design for an Automated Warehouse, Master's Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA., 1978.
- [2] Bozer, Y.A. and Cho, M.S., "Throughput Performance of Automated Storage/Retrieval Systems under Stochastic Demand", working paper, The University of Michigan, Ann Arbor, MI., 1998a.
- [3] Bozer, Y.A. and Cho, M.S., "Expected Waiting Times for Storage and Retrieval Requests in Automated Storage and Retrieval Systems", working paper, The University of Michigan, Ann Arbor, MI., 1998b.
- [4] Bozer, Y.A. and White, J.A., "Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems", *IIE Transactions*, Vol.16, No.4, 1984, pp.329-338.
- [5] Chang, D.T., Wen, U.P., and Lin, J.T., "The Impact of Acceleration Deceleration on Travel-Time Models for Automated Storage-Retrieval Systems", *IIE Transactions*, Vol.27, No.1, 1995, pp.108-111.
- [6] Chang, S.H. and Egbelu, P.J., "Relative Pre-Positioning of Storage/Retrieval Machines in Automated Storage/Retrieval Systems to Minimize Maximum System Response Time", *IIE Transactions*, Vol.29, No.4, 1997a, pp.303-312.

- [7] Chang, S.H. and Egbelu, P.J., "Relative Pre-Positioning of Storage/Retrieval Machines in Automated Storage/Retrieval Systems to Minimize Expected System Response Time", *IIE Transactions*, Vol.29, No.4, 1997b, pp.313-322.
- [8] Cho, M.S. and Bozer, Y.A., "Storage Capacity Estimation for Automated Storage/Retrieval Systems under Stochastic Demand", *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol.27, No.2, 2001, pp.169-175.
- [9] Egbelu, P.J. and Wu, C.T., "A Comparison of Dwell Point Rules in an Automated Storage/Retrieval System", *International Journal of Production Research*, Vol.31, No.11, 1993, pp.2515-2530.
- [10] Elsayed, P.J. and Lee, M.K., "Order Processing in Automated Storage/Retrieval Systems with Due Dates", *IIE Transactions*, Vol.28, No.7, 1996, pp.567-577.
- [11] Foley, R.D. and Frazelle, E.H., "Analytical Results for Miniload Throughput and the Distribution of Dual Command Travel Time", *IIE Transactions*, Vol.23, No.3, 1991, pp.273-281.
- [12] Han, M.H., McGinnis, L.F., Shieh, J.S., and White, J.A., "On Sequencing Retrievals in an Automated Storage-Retrieval Systems", *IIE Transactions*, Vol.19, No.1, 1987, pp.56-66.
- [13] Hwang, H. and Lim, J.M., "Deriving an Optimal Dwell Point of the Storage-Retrieval Machine in an Automated Storage-Retrieval Systems", *International Journal of Production Research*, Vol.31, No.11, 1993, pp.2591-2602.
- [14] Kobayashi, H., *Modeling and Analysis: An Introduction to System Performance Evaluation Methodology*, Addison-Wesley, 1978.
- [15] Lee, M.K., "An Approach to Determining Storage Capacity of an Automated Storage/Retrieval System under Full Turnover-Based Policy", *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol.24, No.4, 1998, pp.579-589.
- [16] Lee, H.F. and Schaefer, S.K., "Retrieval Sequencing for Unit-Load Automated Storage and Retrieval Systems with Multiple Openings", *International Journal of Production Research*, Vol.34, No.10, 1996, pp.2943-2962.
- [17] Linn, R.J. and Wysk, R.A., "An Expert System Based Controller for an Automated Storage-Retrieval Systems", *International Journal of Production Research*, Vol.28, No.4, 1990, pp.735-756.
- [18] Pegden, C.D., Shannon, R.E., and Sadowski, R. P., *Introduction to Simulation using SIMAN*, McGraw-Hill, Inc., 1995.
- [19] Rosenblatt M.J., Roll, Y., and Zyser, V., "A Combined Optimization and Simulation Approach for Designing Automated Storage-Retrieval Systems", *IIE Transactions*, Vol.25, No.1, 1993, pp.40-50.

● 저자소개 ●



조면식

1981년 고려대학교 산업공학과, 공학사

1983년 Wayne State University 산업공학과, 공학석사

1990년 University of Michigan 산업공학과, 공학박사

관심분야 : 시물레이션 모델링, 물류시스템 및 자동화시스템에 관한
설계 및 분석, SCM