

작업처리능력 제약하에서 자동창고 건설비용 최소화를 위한 연구

나윤균 · 이동하 · 오근태

수원대학교 산업정보공학과

A Solution Procedure for Minimizing AS/RS Construction Costs under Throughput Rate Requirement Constraint

Yoon Kyoon Na · Dhong Ha Lee · Gun Tae Oh

Dept. of Industrial Information Engineering, University of Suwon

An AS/RS construction cost minimization model under throughput rate requirement constraint has been developed, whose objective function includes S/R machine cost, storage rack cost, and interface conveyor cost. S/R machine cost is a function of the storage rack height, the unit load weight, and the control logic used by the system, while storage rack cost is a function of the storage rack height, the weight and the volume of the unit load. Since the model is a nonlinear integer programming problem which is very hard to solve exactly with large problem size, a solution procedure is developed to determine the height and the length of the storage rack with a fixed number of S/R machines, while increasing the number of S/R machines one by one to meet the throughput rate requirement.

Keywords: AS/RS, S/R machine cost, throughput rate requirement

1. 서론

자동창고는 일반적으로 일련의 저장랙 및 저장통로들로 구성되어 있으며, 각 저장통로는 하나의 S/R (저장/반출) 기계에 의해 운용된다. 각 통로는 물건을 저장하는 저장칸으로 이루어져 있으며 S/R 기계는 저장칸에 물건을 저장하거나 저장칸으로부터 물건을 반출하는 일을 수행한다. 각 저장칸의 크기는 저장하는 하물의 종류에 따라 결정된다. 자동창고는 또한 하나 이상의 P&D(Pick-and-Deposit) 스테이션을 통해서 저장될 물건이 창고로 입고되고 반출된 물건이 출고가 되며, 일반적으로 P&D 스테이션들은 콘베이어 시스템 또는

AGVS와 같은 자동운반 시스템과 접속된다.

자동창고는 투자비용이 많이 들고 미래 환경의 변화에 대응하는 유연성이 부족하기 때문에 성공적인 시스템의 수행을 위해서는 초기 단계의 시스템 설계가 매우 중요하게 된다. 자동창고 시스템 설계의 초기 단계에서 결정되어야 하는 기본 요소에는 저장랙의 높이와 길이, 저장통로당 저장칸의 수 등이 있으며, 이러한 요소들은 S/R (저장/반출)기계 비용, 저장랙 건설비용, S/R 기계의 단위시간당 처리 능력 등을 결정하게 된다.

자동창고의 도입 단계에서는 미래의 확장성을 고려한 총저장 능력이 결정된 후에 경제적 타당성 분석이 선행되어야 하며 비용 산출을 위해서는 자동창고의 설계가

먼저 이루어져야 한다. 자동창고 설계에 있어서 총비용의 최소화를 위한 최적화 모델은 목적함수에 포함되는 비용 요소들과 결정 변수들에 따라 다양한 모델들이 제시되고 있다. Hausman et al.[8]은 자동창고 시스템이 운용되는 방법과 장점들을 묘사하고 있으며, Graves et al.[7]은 장기적 처리량을 증가시키기 위한 최적 정책들을 개발했다. Karasawa et al. [9]은 각 저장통로당 한 대의 전담 S/R 기계가 단일명령하에 작업을 수행한다는 가정하에 저장칸의 비용, S/R 기계 비용, 토지 및 건축 비용을 최소화하는 모델을 제시하였다. Ashayeri et al. [1]은 각 저장통로당 한 대의 S/R 기계가정을 완화하여 한 대의 S/R 기계가 두 개 이상의 저장통로를 담당할 수 있게 하였으며, 또한 이중명령 수행을 가정하였다. Rosenblatt et al. [13]은 역시 통로당 한 대의 S/R 기계의 가정을 완화한 단일명령 수행하에서 최적화 방법과 시뮬레이션 방법을 병행한 해법을 제시하고 있다. Egbelu[5,6]와 Chang et al.[3,4]은 작업요구가 없을 경우 S/R 기계의 위치 선정에 관한 방법들을 비교하고 있다. Na[11,16]는 저장칸의 높이가 고정되어 있다는 가정하에서 저장모듈 크기를 결정하는 방법 및 비용을 최소화하는 모델의 해법을 제시하고 있다. Malmberg[10]는 자동창고의 설계에서 단일명령과 이중명령의 비율이나 입의 저장과 전용저장 방법에 관계없이 저장칸 형상을 평가하는 방법을 수정 제시하고 있다.

그러나 지금까지의 모델들은 작업처리량의 조건을 이미 확정된 정적인 양으로 처리함으로써 S/R 기계가 수행할 수 있는 작업처리 시간이 각 저장통로당 설치되는 저장칸의 수에 의존한다는 사실을 간과하고 있거나 ([1],[7],[8],[13]) 저장랙의 높이가 고정되어 있는 것으로 가정하여 설계의 유연성에 제한을 두고 있다([11],[16]). 그러나 Zollinger[15]에 의하면 S/R 기계 비용과 저장랙 건설비용은 저장랙의 높이에 따라 결정된다. 따라서 본 연구에서는 저장랙 높이가 고정되어 있다는 가정을 완화하여 설계의 유연성을 보장함으로써 보다 나은 자동창고 설계를 위한 수리모형 및 그 해법을 제시하고자 한다.

2. 수리모형

본 연구에서 고려하는 자동창고 시스템은 모든 팰릿과 저장칸들이 같은 크기를 갖는 단위하물 AS/RS 시스템(그림1)을 대상으로 하고 있으며 다음과 같은 특성들을 가지고 있다.

- (1) 각 저장통로는 한 대의 S/R 기계에 의해 전담된다.
- (2) 통로에서 P&D 스테이션은 저장 모듈의 좌하단 구석에 위치한다.

- (3) S/R 기계의 수평, 수직 운행 속도는 일정하며 수평 및 수직으로 동시에 이동한다.
- (4) 모듈에서의 저장 및 반출요구 발생 위치는 임의적이다.
- (5) 단위 시간당 저장 및 반출 요구는 일정하며 알려져 있다.
- (6) 접속콘베이어가 저장통로 및 작업장을 연결하고 있다.
- (7) 하나의 S/R기계에 의해 작업이 수행되는 각 저장모듈단위는 일정하다.

본 연구에서 사용되는 수학적 표기는 다음과 같다.

- R : S/R 기계의 댓수
- W : 저장통로의 넓이
- P : 총처리건수
- C_{SR} : S/R 기계의 한 대당 비용
- C_Q : 콘베이어의 단위당 비용
- C_R : 저장칸 한 개당 건설비용
- V_v : S/R 기계의 수직 운행 속도
- V_ℓ : S/R 기계의 수평 운행 속도
- n_v : 수직 저장칸의 수
- n_ℓ : 수평 저장칸의 수
- d_v : 저장칸의 높이
- d_ℓ : 저장칸의 길이
- d_w : 저장칸의 깊이
- ℓ₁, ℓ₂ : 창고의 최소, 최대 허용 길이
- h₁, h₂ : 창고의 최소, 최대 허용 높이
- x : 단위하물의 깊이 (inch)
- y : 단위하물의 넓이 (inch)
- z : 단위하물의 높이 (inch)
- v : 단위하물의 부피 (ft³)
- w : 단위하물의 무게 (lb)
- N : 총소요 저장칸의 수
- T_{RQ} : S/R 기계에 요구되는 평균 사이클 시간
- T_{PD} : 물건을 꺼내거나 집어 넣는데 소요되는 시간
- T_{SC} : 단일명령 사이클 평균소요시간
- T_{IX} : 이중명령 사이클 평균소요시간
- α : 전체 사이클에서 이중명령 사이클로 운용되는 비율

S/R 기계의 운용 방법은 한 번의 사이클에 저장 또는 반출 한 가지 만을 수행하는 단일명령 사이클 방식과 한 번의 사이클에 저장 및 반출을 수행하는 이중명령 사이클 방식이 있다. 본 논문에서는 단일명령 사이클 및 이중명령 사이클에 소요되는 평균 시간을 산출하는 식은 Bozer and White[2]의 결과를 사용하기로 한다.

$$t_v = n_v d_v / V_v$$

$$t_\ell = n_\ell d_\ell / V_\ell$$

$$\begin{aligned}
 T &= \max(t_\ell, t_w) \\
 Q &= \min(t_\ell/T, t_w/T) \\
 T_{SC} &= T(Q^2+1) + 2T_{PD} \\
 T_{DC} &= T(4/3+Q^2/2-Q^3/30) + 4T_{PD}
 \end{aligned}$$

단일명령 사이클과 이중명령 사이클이 혼용되는 경우에 평균작업처리시간 T_C 는 다음과 같이 구할 수 있다 :

$$T_C = (1-\alpha)T_{SC} + \alpha T_{DC}/2.$$

자동창고의 설치 비용은 S/R 기계 비용, 창고 저장칸 설치비용, 접속콘베이어 비용을 포함하며, 제약조건으로 단위시간당 작업처리 능력, 총소요 저장칸의 수, 그리고 창고의 길이와 높이를 포함한다. S/R 기계의 한 대당 비용, 콘베이어의 단위당 비용, 그리고 저장칸 한 개당 건축비용은 수명, 잔존가, 수익률 등을 고려한 연간자본회수 비용으로 산출된다. 자동창고의 설계를 위해서는 전체 필요한 저장칸의 숫자가 산출되어야 하며 또한 각 S/R 기계의 평균 작업처리 시간이 설정되어야만 한다. S/R 기계의 작업 능력은 기계가 담당하는 저장 모듈의 높이 및 길이의 함수로 표시된다.

S/R 기계 비용은 저장랙 높이, 단위하물 무게, 그리고 시스템에서 사용되는 제어방법의 함수로 주어지며, 다음과 같이 산출된다(Tompkins[14]):

$$C_{SR} = A+B+C$$

$$A = \begin{cases} \beta & \text{if } n_v(z+10'') < 35' \\ 2\beta & \text{if } 35 \leq n_v(z+10'') \leq 50' \\ 3\beta & \text{if } 50 \leq n_v(z+10'') < 75' \\ 4\beta & \text{if } 75 \leq n_v(z+10'') < 110' \\ 5\beta & \text{if } n_v(z+10'') \geq 50' \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} \gamma & \text{if } w < 1000lb \\ 2\gamma & \text{if } 1000lb \leq w < 3500lb \\ 3\gamma & \text{if } 3500lb \leq w < 6500lb \\ 4\gamma & \text{if } w \geq 6500lb \end{cases}$$

$$C = \begin{cases} \delta & \text{if manual control logic is used} \\ 2\delta & \text{if on-board control is used} \\ 3\delta & \text{if end-of-aisle control is used} \\ 4\delta & \text{if central console control is used} \end{cases}$$

저장랙의 건설비용은 다음 식으로 주어진다:

$$\begin{aligned}
 & \$\$\$\$[0.92484+0.025v+0.0004424w-(w/82500000)+0.23328n_v-0.00476n_v^2]2RN. \\
 & K=0.92484+0.025v+0.0004424w-(w/82500000)
 \end{aligned}$$

최적화 모형의 목적함수 및 제약조건 식들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P : \text{Minimize } & C_{SR} * R + C_Q * (W+2d_w)R + C_R[K+0.23328n_v-0.00476n_v^2](n_v * n_\ell)(2R) \\
 \text{subject to } & \\
 & 2(n_v * n_\ell)R \geq N \quad (1) \\
 & h_1 \leq n_v * d_v \leq h_2 \quad (2) \\
 & \ell_1 \leq n_\ell * d_\ell \leq \ell_2 \quad (3) \\
 & T_{SC} \leq T_{RQ} \quad (4) \\
 & n_v, n_\ell, R : \text{자연수}
 \end{aligned}$$

목적함수의 첫 번째 항은 S/R 기계 비용으로 S/R 기계 대수 즉 저장통로의 갯수에 비례한다. S/R 기계의 단위비용 C_{SR} 은 저장랙의 높이, 단위하물의 무게, 그리고 자동창고의 제어방식의 함수가 된다. 단위하물의 무게와 제어방식은 저장칸의 설계와 별도로 결정되는 사항이므로 C_{SR} 은 건물의 높이, 즉 수직 저장칸 갯수(n_v)의 단계함수가 된다.

두 번째항은 접속 콘베이어 비용으로 콘베이어의 길이는 저장통로의 넓이에 저장통로 양편에 설치되는 저장칸의 넓이 $2d_w$ 를 더한 것이 R 개 만큼 존재하므로 $(W+2d_w)R$ 이 된다. 세 번째 항은 창고 저장랙 건설비용으로 저장칸의 총갯수 $(n_v * n_\ell)(2R)$ 에 비례한다. 이때 저장칸 설치비용은 수직 저장칸 갯수(n_v)의 이차함수가 된다.

제약조건 (1)식은 창고의 총저장칸 수는 저장용량 요구조건을 충족시키기 위한 것이며, 제약조건식 (2)와(3)은 각각 자동창고의 높이와 길이의 최소 및 최대 허용치를 규정한다. 제약조건식 (4)는 건당 작업처리시간이 요구되는 작업처리시간보다 작아야하는 것을 나타낸다.

3. 해법

수리모형 P는 목적함수가 n_v 와 n_ℓ 의 비선형 이차함수이고 비선형 제약조건식이 존재하므로 문제 크기가 클 경우에는 최적해를 구하는 것이 매우 어렵기 때문에 다음과 같은 연구 결과를 이용하여 해결을 모색한다. 모델 P의 목적함수는 $2R(n_v * n_\ell)=N$ 일 때, 최소값을 갖게 되고 제약조건 (2)와 (3)은 각각 n_v 및 n_ℓ 의 개수의 제약조건 식으로 대체될 수 있다. 따라서 다음과 같이 새로운 수리모형을 얻을 수 있다.

$$P' : \text{Minimize } f(n_v) = C_{SR} * R + C_Q * (W+2d_w)R + C_R[K+0.23328n_v-0.00476n_v^2]N$$

subject to

$$h_1' \leq n_v \leq h_2' \quad (1)$$

$$l_1' \leq n_\ell \leq l_2' \quad (2)$$

$$T_C \leq T_{RQ} \quad (3)$$

n_v, n_ℓ, R : 자연수

P'의 목적함수는 n의 단계함수와 이차함수의 합으로 이루어져 있으며 일반적으로 C_{SR}의 값이 C_R의 값보다 현저하게 크므로, S/R 기계의 댓수 R을 가능한 적게 하는 것이 목적함수의 값을 최소화하게 된다. 그러나 R을 적게 하는 것은 저장랙의 길이와 높이를 크게 하므로 작업처리시간을 증가시켜 작업처리능력 제약조건을 만족시키지 못할 수가 있다. 또한 R은 최소한 N을 n_v와 n_ℓ의 상한값 h₂'와 l₂'의 곱, h₂'*l₂'로 나눈 값보다는 커야만 하므로 R의 하한값에서부터 시작하여 R을 고정시키고 제약조건식 (1)만을 고려한 상태에서 목적함수를 최소화하는 n_v를 구한다. 이어서 n_ℓ에 대한 제약조건식을 만족시키도록 n_v와 n_ℓ의 값을 조정하고, T_C를 구하여 작업처리능력 제약조건을 만족시키는지 확인한다. n_v와 n_ℓ의 값을 조정하여 작업처리시간을 단축시킴으로써 작업처리능력 제약조건을 만족시킬 수 있으면 원하는 해를 얻게 되며, 그렇지 못한 경우에는 R의 값을 증가시켜 제약조건을 만족시키는 n_v와 n_ℓ을 다시 찾게 된다.

해법을 단계별로 설명하면, 단계(0)에서는 가로저장칸과 세로저장칸을 최대로 하여 R의 최소값을 구하고, 단계(1)에서는 목적함수값을 최소로 하는 세로저장칸의 수를 구한다. 단계(2)에서는 단계(1)에서 구한 세로저장칸수를 사용하여 총소요저장칸수를 확보하기 위해 필요로 하는 가로저장칸 수를 계산하여, 이 값이 가로저장칸 수의 상한을 초과하면 가로저장칸 수를 상한 값으로 설정하고 그에 따른 세로저장칸 수를 계산한다. 단계(2)에서 구한 가로 및 세로저장칸 수를 사용할 때 평균 작업처리시간이 작업처리능력 제약조건을 만족시키는지를 단계(3)에서 점검한다. 작업처리능력 제약조건이 만족되지 않는 경우에는 세로저장칸 수를 제약조건 범위내에서 하나씩 증가시켜 그에 따른 가로저장칸 수를 계산하고 작업처리능력 제약조건을 만족시키는지를 점검한다(단계(4)-단계(7)). 허용범위내에서 작업처리능력 제약조건을 만족시키는 가로 및 세로저장칸 수를 찾을 수 없는 경우에는 R의 값을 하나 증가시켜 같은 과정을 반복한다.

$$(0) R = \left\lceil \frac{N}{h_2' l_2'} \right\rceil$$

(1) Find n_v* that minimizes f(n_v) where h₁' ≤ n_v ≤ h₂'.

$$(2) n_\ell = \left\lceil \frac{N}{2Rn_v} \right\rceil$$

If n_ℓ > l₂', then

$$n_v = \left\lceil \frac{N}{2Rl_2'} \right\rceil, \quad n_\ell = \left\lceil \frac{N}{2Rn_v} \right\rceil,$$

and go to (3)

else go to (3).

(3) Compute T_C.

If T_C ≤ T_{RQ}*R, then go to (10)

else go to (4).

$$(4) k = 0, \quad T_C^k = T_C$$

$$(5) k = k + 1, \quad n_v = n_v + 1$$

(6) If n_v > h₂', then go to (8)

else go to (7).

$$(7) n_\ell = \left\lceil \frac{N}{2Rn_v} \right\rceil$$

Compute T_C^k.

If T_C^k < T_C^{k-1}, then go to (9)

else go to (8).

(8) R=R+1 and go to (1).

(9) If T_C^k ≤ T_{RQ}*R, then go to (10)

else go to (5).

(10) Stop.

4. 예제

본 연구에서 제시한 해법을 예시하기 위하여 저장칸이 10,000개 필요한 자동창고 설계 문제를 고려해보기로 한다. 요구되는 시간당 저장 및 반출 활동 횟수는 각각 100회이며, 계산의 편의상 단일명령 사이클로만 운용되는 것으로 가정한다. S/R 기계의 수평운행속도는 400fpm이고 수직운행속도는 120fpm 이다. 단위하물의 깊이는 42", 넓이는 48", 길이는 46"이고, 저장칸의 깊이, 넓이, 길이는 단위하물에 10"씩 여유를 둔 52", 58", 56"로 한다. 저장통로의 넓이는 5ft이고, 단위하물의 무게는 2500lb이며 비용에 관한 매개변수들은 다음과 같다고 한다 :

$$\beta = \$25,000, \quad \gamma = \$25,000, \quad \delta = \$25,000, \quad C_R = \$30, \\ C_Q = \$300/\text{ft}.$$

저장랙의 길이 및 높이에 관한 상한 및 하한은 각각 10 ≤ n_v ≤ 30, 50 ≤ n_ℓ ≤ 100 로 한다.

N=10,000

$$V_v = 150 \text{ fpm}, V_\ell = 400 \text{ fpm}$$

$$T_{RQ} = 60/200 = 0.3 \text{ 분}$$

$$x=42", y=48", z=46", v=53.7 \text{ ft}^3, w=2,500 \text{ lb}$$

$$A = \begin{cases} \$25,000 & \text{if } n_v < 8.84 \\ \$50,000 & \text{if } 8.84 \leq n_v < 12.63 \\ \$75,000 & \text{if } 12.63 \leq n_v < 18.95 \\ \$100,000 & \text{if } 18.95 \leq n_v < 27.79 \\ \$125,000 & \text{if } n_v \geq 27.79 \end{cases}$$

$$B = \$25,000$$

$$C = \$50,000$$

$$C_{SR} = A + 25,000 + 50,000$$

$$f(n_v) = (A + 75,000)R + 300(5 + 2x52/12)R + 30(2.285514 + 0.23328n_v - 0.00476n_v^2) * 10,000$$

$$(0) R > 10,000/(30 \times 100) = 3.33, \text{ and } R = 4$$

(1) $f(n_v)$ 의 최소값은 n_v 의 하한값인 10에서 발생하며, 따라서 $n_v = 10$

(2) $n_\ell = 125 > \ell_2' = 100$ 이므로 n_v 의 값은 13가 되고 n_ℓ 의 값은 97로 조정된다.

$$(3) t_v = 13 \times 56'' / (150 \times 12) = 0.404, t_\ell = 97 \times 58'' / (400 \times 12) = 1.172$$

$$T = 1.172, Q = 0.345, T_C = 1.311 > T_{RQ} = 0.3 \times 4 = 1.2$$

$$(4) k = 0, T_C^0 = 1.311$$

$$(5) k = 1, n_v = 14$$

$$(6) n_v < h_2'$$

$$(7) n_\ell = 90, t_v = 0.436, t_\ell = 1.088, T = 1.088, Q = 0.401,$$

$$T_C^1 = 1.263 < T_C^0$$

$$(9) T_C^1 > T_{RQ} = 0.3 \times 4 = 1.2$$

$$(5) k = 2, n_v = 15$$

$$(6) n_v < h_2'$$

$$(7) n_\ell = 84, t_v = 0.467, t_\ell = 1.015, T = 1.015, Q = 0.460,$$

$$T_C^2 = 1.230 < T_C^1$$

$$(9) T_C^2 > T_{RQ} = 0.3 \times 4 = 1.2$$

$$(5) k = 3, n_v = 16$$

$$(6) n_v < h_2'$$

$$(7) n_\ell = 79, t_v = 0.498, t_\ell = 0.955, T = 0.955, Q = 0.521,$$

$$T_C^3 = 1.214 < T_C^2$$

$$(9) T_C^3 > T_{RQ} = 0.3 \times 4 = 1.2$$

$$(5) k = 4, n_v = 17$$

$$(6) n_v < h_2'$$

$$(7) n_\ell = 74, t_v = 0.529, t_\ell = 0.894, T = 0.894, Q = 0.592,$$

$$T_C^4 = 1.207 < T_C^3$$

$$(9) T_C^4 > T_{RQ} = 0.3 \times 4 = 1.2$$

$$(5) k = 5, n_v = 18$$

$$(6) n_v < h_2'$$

$$(7) n_\ell = 70, t_v = 0.560, t_\ell = 0.846, T = 0.846, Q = 0.662,$$

$$T_C^5 = 1.217 < T_C^4$$

$$(8) R = 4 + 1 = 5$$

$$(1) n_v = 10$$

$$(2) n_\ell = 100 \leq \ell_2' = 100$$

$$(3) t_v = 10 \times 56'' / (150 \times 12) = 0.311,$$

$$t_\ell = 100 \times 58'' / (400 \times 12) = 1.208, T = 1.208, Q = 0.257$$

$$T_C = 1.288 < T_{RQ} = 0.3 \times 5 = 1.5$$

(10) stop.

가로저장칸의 개수는 100개, 세로저장칸의 개수는 10개인 저장랙 5개로 자동창고를 구성할 때 제약조건들을 만족시키면서 최소비용(\$1,888,194)으로 자동창고를 건설할 수 있으며, 이때 자동창고의 시간당 작업처리 능력은 $(60/1.288) * 5 = 232$ 사이클이다.

5. 결론

본 연구에서는 요구되는 단위시간당 작업처리능력을 만족시키면서 S/R 기계비용, 저장칸 설비 비용, 접속 콘베이어 비용의 총합을 최소화하는 자동창고의 설계를 위한 수리모형을 제시하고 그 해법을 개발하였다. 작업처리 시간이 저장랙의 크기에 따라 변화하는 것을 고려하지 않거나, 저장랙의 높이가 고정되어 있는 것으로 가정한 기존의 연구에서 벗어나 자동창고 설계에 유연성을 보장하면서 비용을 최소화할 수 있도록 하였다.

비선형 정수계획법의 해법의 난해성으로 말미암아, 모델의 특성을 고려하여 S/R 기계 댓수를 증가시켜 가면서 작업처리능력 조건을 충족시키는 저장랙 높이와 길이를 결정하는 해법을 제시하였다.

참고 문헌

- [1] Ashayeri, J., Gelders, I. F., and Van looy, P. M., "A Simulation Package for Automated Warehouses," *Material Flow*, 1, 189-198(1983).
- [2] Bozer, Y.A., and White, J.A., "Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems," *IIE Trans.*, 16, 329-338(1984).
- [3] Chang, S., and Egbelu, P.J., "Relative Prepositioning of Storage/Retrieval Machines in Automated Storage/Retrieval Systems to Minimize Maximum System Response Time," *IIE Transactions*, 29, 303-312(1997).
- [4] Chang, S., and Egbelu, P.J., "Relative Prepositioning of Storage/Retrieval Machines in Automated Storage/Retrieval Systems to Minimize Expected

- System Response Time," *IIE Transactions*, 29, 313-322(1997).
- [5] Egbelu, P.J., "Framework for Positioning of Storage/Retrieval Machines in an Automated Storage/Retrieval System," *Int. J. Prod. Res.*, 29, 1, 17-37 (1991).
- [6] Egbelu, P.J., and Wu, C.T., "A Comparison of Dwell Point Rules in an Automated Storage/Retrieval System," *Int. J. Prod. Res.*, 31, 12, 2515-2530 (1993).
- [7] Graves, S.C., Hausman, W.H., and Schwarz, I.B., "Storage Retrieval Interleaving in Automatic Warehousing Systems," *Management Sci.*, 23, 935-945(1977).
- [8] Hausman, W.H., Schwarz, I.B., and Graves, S.C., "Optimal Storage Assignment in Automatic Warehousing Systems," *Management Sci.*, 22, 629-638(1976).
- [9] Karasawa, Y., Nakayama, H., and Dohi, S., "Trade-off Analysis for Optimal Design of Automated Warehouses," *Int. J. Systems Science*, 11, 5, 567-576(1980).
- [10] Malmberg, C.J., "Rule of Thumb Heuristics for Configuring Storage Racks in Automated Storage and Retrieval Systems Design," *Int. J. Prod. Res.*, 39, 3, 511-527 (2001).
- [11] Na, Y. K., "A Study on the Storage Module Size Decision Model," *J. of Inst. of Industrial Technology*, The Univ. of Suwon, 8, 55-59(1993).
- [12] Perry, R., F., Hoover, S., V., and Freeman, D., R., "An Optimun-seeking Approach to the Design of Automated Storage/Retrieval Systems," *Proceedings of the 1984 Winter Simulation Conference*, 349-354.
- [13] Rosenblatt, M. J., Roll, Y., and Zyser, V., "A Combined Optimization and Simulation Approach for Designing AS/RS," *IIE Trans.*, 25, 1, 40-50(1993).
- [14] Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Frazelle, E.H., Tanchoco, J.M.A., and Trevino, J., *Facilities Planning*, 2nd edn, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
- [15] Zollinger, H.A., "Planning, Evaluating, and Estimating Storage Systems," Presented at the Institute of Material Management Education First Annual Winter Seminar Series, Orlando, FL, February, 1982.
- [16] 나윤균, "자동창고 설계를 위한 최적화 모델 및 해법에 관한 연구", *공업경영학회지*, 제18권, 34집, 1995, pp. 9-14.