

## 移動랙(rack) 자동창고의 走行시간 분석\*

### Travel-Time Analysis for an Automated Mobile Racking System

이 문 규\*\*

Lee, Moon-Kyu

#### Abstract

Higher utilization of warehouse space can be achieved by using automated mobile racking systems. Therefore, those systems may be employed for factories or distribution centers as a good option of increasing the storage capacity. In this paper, travel-time models are developed to estimate the average performance of the system assuming randomized storage. Expected travel times are determined for both single- and dual-command cycles. Two extreme input/output-point locations are considered. Some numerical results obtained from the models are given.

#### 1. 서론

본 연구는 자동화된 저장시설의 일종인 이동랙 자동창고(automated mobile racking system)를 대상으로 한다. 이동랙 자동창고는 국내외적으로 이미 보편화된 유닛로드(unit-load) 자동창고나 미니로드(miniload) 자동창고와는 달리 국내에는 거의 보급되지 않은 새로운 유형의 자동창고이다.

이 시스템은 일반 자동창고와는 근본적으로

로 다른 시스템 특성인 이동 가능한 저장랙으로 이루어져 있기 때문에 저장/불출 기계(storage/retrieval(S/R) machine)의 주행통로가 극소수(1~3개)로서 공간효율이 현저히 높다는 결정적인 장점이 있다[3]. 일반 자동창고의 공간효율은 50%~60%에 불과하나 이동랙 자동창고는 85% 이상까지 기대되기 때문에 공장부지가 협소한 유럽 등지에서는 이미 상당히 실용화된 상태이다. 그러나, 비슷한 상황에 처한 국내의 산업체에 이 시스템

\* 본 연구는 1993년도 계명대학교 비사연구기금으로 이루어졌음.

\*\* 계명대학교 산업공학과

템의 보급이 극히 부진한데, 그 이유로는 시스템 가격이 상대적으로 고가이고 랙을 이동시키는 전동기 장치의 개발에 높은 기술수준이 요구되므로 국내 제작업체에 의한 국산화가 지체되었기 때문인 것으로 풀이 된다.

일반적으로, 자동창고 시스템은 고가일 뿐만 아니라 일단 설치된 이후에는 그의 확장이나 축소가 용이하지 않기 때문에 초기 도입시 신중하고도 합리적인 설계절차를 거치는 것이 필수적이다. 시스템이 실제 수요보다 너무 크면, 불요불급한 투자로 인하여 타 부분의 투자기회를 상실하게 될 것이고, 반대로 규모가 너무 작으면 물품을 저장할 공간이 너무 적어 시스템이 재 구실을 못하게 된다. 그러므로 시스템 설계시 주어진 대안에 대한 성능을 미리 효과적으로 평가할 수 있는 분석방법이 절실하게 요망된다.

일반 자동창고의 분석방법으로는, 단위 입출고 주문(storage and/or retrieval orders)을 처리하는 데 소요되는 저장/불출 기계의 기대주행시간(expected travel time)을 산출해내는 분석적 모형(analytic models)이 개발되어 시뮬레이션[15, 16, 17]과 함께 널리 사용되고 있다. 대표적인 유형의 자동창고인 유닛로드 시스템에 대한 기존의 분석적 연구는 박[2], Bozer & White[5], Eynan & Rosenblatt[6], Graves 外[8, 10], Kim & Siedmann[13], Hwang & Ko[11], Hwang & Lee[12] 등이, 미니로드 시스템의 경우는 Foley & Frazelle[7]의 연구가, 그리고 회전랙(crausel) 시스템에 대한 연구는 이[4], Han & McGinnis[9], Lee & Hwang[14] 등이 발표되었다. 최근에는, 김 外[1]의 연구에서 기존의 분석적 모형의 단점 즉, 선반의 연속평면

화와 동일한 저장공간 이용률 등의 비실용적인 가정들을 극복하기 위하여 시뮬레이션을 이용한 보정 결과가 제시되었다.

이와 같이 일반창고의 경우에는 상당량의 연구가 이미 수행되어 활용되고 있으나, 본 연구의 대상시스템인 이동랙 자동창고의 경우에는 그 필요성에도 불구하고 국내의를 막론하고 아직 연구가 극히 미진한 실정이다. 향후 이 시스템의 수요가 점차 증대될 것으로 예상되기 때문에, 우선 이 분야의 기초적인 연구로서, 시스템의 성능평가를 위한 수행시간 분석모형을 개발하여 시스템 설계시 주요 참고자료를 제공하고자 한다.

## 2. 이동랙 자동창고 시스템

일반적으로 팔릿(pallet) 적재형 자동창고는 한쌍의 저장랙 사이에 통로(aisle)가 고정적으로 설치되어 있고 그 사이로 저장/불출 기계가 이동하여 물품의 저장과 불출 작업을 수행하는 구조로 되어 있다. 반면에, 이동랙 자동창고는 공간효율의 극대화를 위하여 고안된 시스템으로서 전체적으로 극소수의 통로가 가변적으로 설정되어 있다. 따라서, 팔릿이 저장된 선반의 위치가 일정 장소에 고정되어 있지 않고 구동장치에 의해 좌우로 동시에 또는 순차적으로 이동될 수 있다. 당연히, 설정된 통로의 수가 하나일 때 공간효율이 극대화 된다.

본 연구에서는 팔릿 단위로 저장이 이루어지고, 총 N개의 2면저장랙(double-sided storage rack)에 1대의 저장/불출 기계가 전용으로 할당된 이동랙 자동창고를 고려한다. 이 시스템의 설계시 주요 결정변수는, 저장랙의

수와 그 구조(행과 열의 수), 저장/불출 기계의 주행속도, 저장랙의 이동속도, 입출고점(input/output point)의 위치, 생산라인이나 외부와의 연계를 위한 콘베이어의 위치와 구조 등을 들 수 있다. 한편, 주어진 설계 대안들을 평가하기 위한 성능평가 기준으로는 “단위시간당 수행가능한 입출고 물량” 또는 역으로 “단위 입출고 작업에 소요되는 저장/불출 기계의 평균주행시간”으로 나타내어 진다. 이와 같이 정의되는 시스템 성능은 위에서 언급한 여러 결정변수의 값에 좌우된다. 특히, 대부분의 이동랙의 높이는 락 이동에 따른 負荷를 고려하여 10m이내로 설계되어 있으므로 저장/불출 기계의 수직방향으로 걸리는 주행시간이 상대적으로 작기 때문에 총 평균주행시간에 미치는 영향이 무시되는 것이 타 자동창고와 다른 점이다. 입출고점의 위치에 따라 주행시간의 차가 크기 때문에, 본 연구에서는 입출고점이 시스템 前面의 왼쪽 끝에 있는 구조(구조 1)와 중앙에 있는 구조(구조 2)를 모두 고려한다.

일반적인 자동창고의 주행시간 모형은 저장/불출 기계 1대가 오직 한쌍의 저장랙만을 담당하는 경우와 여러 쌍의 저장랙을 담당하는 경우로 나뉘어서 개발되어 왔다. 그러나, 이동랙 자동창고의 경우에는 전자의 경우가 현실적으로 의미가 없기 때문에, 후자의 경우만 고려하여 단일명령주기(single-command cycle)와 복수명령주기(dual-command cycle) 각 경우의 기대주행시간(expected travel time) 추정모형을 개발한다. 본 연구에서 설정된 가정은 다음과 같다:

- 1) 시스템내의 빈 통로의 수는 1개이다.
- 2) 물품은 임의저장(randomized storage)방

식에 따라 저장된다.

3) 저장/불출 기계의 수직방향 주행시간은 무시한다.

4) 저장/불출 기계의 가속속은 고려하지 않는다.

5) 저장/불출 기계가 팔릿을 집어 올리고(pick up) 일정위치에 내려 놓는(deposit) 시간은 주행시간에서 제외한다.

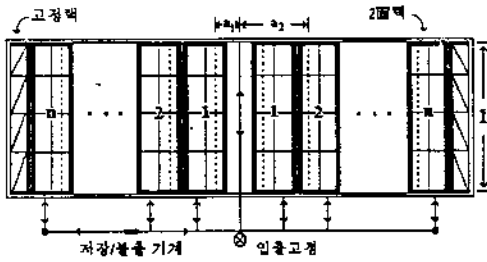
### 3. 주행시간 모형

본 연구에서 다루는 이동랙 시스템의 두가지 구조 즉, 구조 1과 구조 2를 통로의 최대 주행시간을 1로 정규화하여 그림 1에 도식화하였다. 그림 1-a에서 점선은 해당랙의 전면 에 통로를 열기 위하여 락을 이동시켰을 때의 위치를 나타내고 있다. 구조 1은 입출고점이 시스템 중앙에 위치하여 입출고 효율이 가장 높은 구조인 반면, 구조 2는 실제 현장의 제약조건으로 인하여 구조 1을 선택하기가 불가능할 경우에 일반적으로 사용될 수 있는 대표적인 구조이며 운영면에서 간편하다는 이점이 있다.

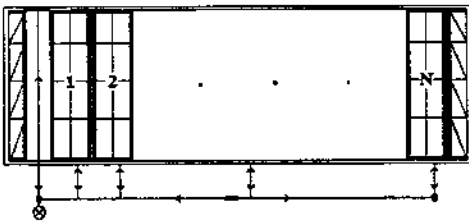
시스템의 총 저장랙의 수를 편의상 짝수로 가정한다( $N$ 이 홀수일 경우의 주행시간 추정 모형은 본 논문에서 제시한 방법을 약간 수정하면 쉽게 구할 수 있다). 그러면, 구조 1과 구조 2의 저장랙 수는  $N=2n$ 의 관계에 있다. 모형을 쉽게 기술하기 위하여 사용하는 용어를 다음과 같이 정의한다:

$T$  = 저장/불출 기계가 통로내에서 저장랙의 왼쪽 끝에서 오른쪽 끝까지 이동하는 데 걸리는 주행시간,

$a_1$  = 저장/불출 기계가 입출고점에서부터



a. 구조 1



b. 구조 2

그림 1. 입출고점에 따른 이동랙 자동창고의 구조

$i$  번째 랙의 앞 면(한쌍의 저장랙 중 왼쪽랙의 앞면)에 이르기까지 걸리는 주행 시간으로서  $T$  대비 비율로 나타냄(단,  $a_1$ 는  $i$ 의 비감소함수이고  $a_0=0$ 임),

$b_k = k$ 개의 저장랙을 통로의 폭만큼 이동시키는 데 걸리는 시간으로서  $T$  대비 비율(단,  $b_k = k$ 의 비감소함수이고  $b_1=0$ 임),

$X_1 =$  입출고점으로부터 저장하고자 하는 랙의 전면에 도달하기 위한 저장/불출 기계의 통로밖 주행시간을 나타내는 확률변수,

$X_2 =$  저장랙의 이동시간을 나타내는 확률변수.

### 3.1 구조 1

#### 3.1.1 단일명령 주행시간

단일명령 주행시간은 물품의 저장이나 불출을 동시에 처리하지 않고 한번에 한 개씩

처리할 때 소요되는 시간으로서, 입출고점으로부터 지정된 랙에 도달하기까지 걸리는 주행시간과 통로내에서 저장 또는 불출 작업을 수행하기 위하여 대상 물품의 저장 위치로 이동하는 데 걸리는 시간의 합으로 표현된다. 우선, 후자의 통로내 기대주행시간을  $ET_s$ 라 하면 임의저장방식과 수직축의 이동시간을 무시한다는 가정으로부터  $ET_s = T$ 가 된다. 다음으로, 확률변수  $X$ 를 지정된 랙으로 이동하는 데 필요한 주행시간으로 정의하면, 저장/불출 기계의 이동시간과 통로를 확보하기 위하여 관련된 랙을 이동시키는 시간 중 큰 값 즉,  $X = \max(X_1, X_2)$ 로 결정된다. 따라서, 이 경우 단일명령의 기대주행시간은 입출고점으로부터 저장랙까지의 기대이동시간  $E(X)$ , 통로내 기대주행시간  $ET_s$ , 그리고 저장랙으로부터 입출고점까지 돌아오는 데 걸리는 기대주행시간  $E(X_1)$ 의 합으로 다음과 같이 표현된다:

$$E_1(SC) = T \cdot E(X) + ET_s + T \cdot E(X_1) \quad (1)$$

$$= T(E(X) + E(X_1)) + T$$

로 나타내진다.

임의저장방식을 따르면,  $X_1$ 이  $a_1$ 일 확률은 구조 1의 경우 입출고점을 중심으로 좌우로 대칭이기 때문에  $c_1 = 2n + 1$ 로 놓으면 간단히

$$P(X_1 = a_1) = \begin{cases} 1/c_1, & i=0 \\ 2/c_1, & 1 \leq i \leq n \end{cases}$$

이 된다. 다음으로, 저장랙  $i$ 의 왼편(시스템 중앙의 중심선을 기준으로 왼편에 위치한 랙들의 경우) 또는 오른편(중심선의 우측에 위

치한 랙들의 경우에 위치하게 되는 통로  $i$  를 열기 위하여  $k$ 개의 저장랙을 이동할 확률은

$$P_i(X_2=b_k) = P(X_2=b_k | X_1=a_i) = \begin{cases} 2/c_1, & 1 \leq k \leq n-i \\ 1/c_1, & k=0, \text{ 또는 } n-i+1 \leq k \leq n+i \end{cases} \quad (2)$$

이다. 여기서,  $k_1 = \underset{k}{\operatorname{argmin}}(a_1 \leq b_k)$  로 정의하면,  $X_1=a_1$ 일 때  $X$ 의 조건부 기대값은

$$E_1(X) = E(X | X_1=a_1) = \sum_{X_2} \max(X_1, X_2) P_1(X_2=b_k) = a_1 \sum_{k=0}^{k_1-1} P_1(X_2=b_k) + \sum_{k=k_1}^{n+i} b_k P_1(X_2=b_k) \quad (3)$$

으로 표현된다. 특히,  $i=0$  이고 따라서  $k_1=0$ 이면,

$$E_0(X) = \sum_{k=0}^n b_k P_1(X_2=b_k)$$

가 되고, 또한  $b_k$ 를 다음과 같이 선형식으로 가정하면

$$b_k = v_0 + vk, \quad k=1, \dots, n \quad (4)$$

(단,  $v_0, v$ 는 상수이고  $b_0=0$  임)

$X_1 = a_0$  일 때의 기대값은  $E_0(X) = n(2v_0 + (n+1)v)/c_1$  이다. 여기서  $b_k$ 의 함수형태는 시스템의 구동 특성에 따라 다르나, 식(4)의 선형모형은 각각의 저장랙을 한꺼번에 동시에 구동시킬 경우( $v=0$ )와 저장랙을 하나씩 순차적으로 이동할 경우( $v \neq 0$ ) 모두를 다룰 수 있으므로 유연성 있는 모형이다.

$i \neq 0$  일 때는 식(2)에서 주어진 것과 같이

$X$ 의 조건부 확률이  $i$ 값에 따라 달라진다. 우선 식(3)은 간단한 경우로  $k_1=0$  이면

$$E_1(X) = \sum_{k=0}^{n+i} b_k P_1(X_2=b_k) = \sum_{k=0}^{n+i} b_k P_1(X_2=b_k) = (2nv_0 + (n^2+n+i^2)v)/c_1$$

이 된다. 일반적인 경우로서 식(3)의 우변 첫째항은  $1 \leq k_1 \leq n-i$  일 때는

$$a_1 \sum_{k=0}^{k_1-1} P_1(X_2=b_k) = a_1(P_1(X_2=b_0) + \sum_{k=1}^{k_1-1} P_1(X_2=b_k)) = a_1(2k_1 - 1)/c_1$$

이 되고,  $n-i+1 \leq k_1 \leq n+i$  일 때는

$$a_1 \sum_{k=0}^{k_1-1} P_1(X_2=b_k) = a_1 \left( \sum_{k=0}^{n-i} P_1(X_2=b_k) + \sum_{k=n-i+1}^{k_1-1} P_1(X_2=b_k) \right) = a_1(n-i+k_1)/c_1$$

이다. 마찬가지로, 식(3)의 우변 두번째 항은

$$\sum_{k=k_1}^{n+i} b_k P_1(X_2=b_k) = \begin{cases} [2(n-k_1+1)v_0 + (n^2+n+i^2-k_1^2+k_1)v]/c_1, & 1 \leq k_1 \leq n-i \\ (n+i-k_1+1)(v_0 + (n+i+k_1)v/2)/c_1, & n-i+1 \leq k_1 \leq n+i \end{cases}$$

이 된다. 따라서 위 식들을 정리하면

$$E_i(X) = \begin{cases} (2nv_0 + (n^2+n+i^2)v)/c_1, & k_1=0 \\ [a_1(2k_1-1) + 2(n-k_1+1)v_0 + (n^2+n+i^2-k_1^2+k_1)v]/c_1, & 1 \leq k_1 \leq n-i \\ [a_1(n-i+k_1) + (n+i-k_1+1)(v_0 + (n+i+k_1)v/2)]/c_1, & n-i+1 \leq k_1 \leq n+i \\ a_1, & k_1=n+i+1. \end{cases} \quad (5)$$

이로부터

$$E(X) = \sum_{i=0}^n E_i(X) P(X_1=a_i) \quad (6)$$

를 계산할 수 있고, 이것을 식(1)에 대입하면 시스템 구조 1에서의 단일명령 기대주행 시간을 구할 수 있다.

간단한 경우의 예로서  $v=0$  이면,

$$k_i = \operatorname{argmin}_k (a_i \leq v_0) = \begin{cases} 0, & i \leq m \\ n+i+1, & i > m \end{cases}$$

(여기서,  $m = \operatorname{argmin}_i (a_i \leq v_0)$ )

이므로, 식(5)로부터

$$E_i(x) = \begin{cases} 2nv_0/c_1, & 0 \leq i \leq m \\ a_i, & m < i \leq n. \end{cases}$$

본 논문에서는, 저장/불출 기계의 주행시간인  $a_i$ 를 간단한 모형이지만 대부분의 실제 시스템을 표현할 수 있는 선형식[11]으로 다음과 같이 가정한다:

$$a_i = ui \quad (u \text{는 상수}).$$

그러면,  $E(X)$ ,  $E(X_1)$  및  $E_1(SC)$  는 각각

$$\begin{aligned} E(X) &= \sum_{i=0}^n E_i(X)P(X_1=a_i) & (7) \\ &= [2n(1+2\min(m,n))v_0 + uc_1 \max(n-m, 0)(n+m+1)]/c_1^2 \end{aligned}$$

$$E(X_1) = \sum_{i=0}^n a_i P(X_1=a_i) = un(n+1)/c_1, \quad (8)$$

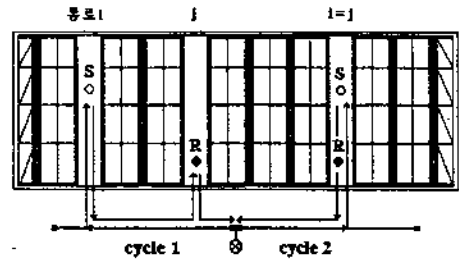
$$E_1(SC) = T[2n(1+2\min(m,n))v_0 + uc_1(\max(n-m, 0) \cdot (n+m+1) + n(n+1))]/c_1^2 + T$$

가 된다.

### 3.1.2 복수명령 주행시간

복수명령의 경우는 한쌍의 저장작업과 불

출작업을 저장/불출 기계의 1회 주행주기(travel cycle)에서 한꺼번에 수행된다. 그림 2에서는 저장과 불출이 서로 다른 통로에서 이루어지는 경우(cycle 1)와 동일한 통로에서 이루어지는 경우(cycle 2)를 예시하고 있다. 각 경우에 따라 통로내 복수명령 기대주행시간  $ET_d$ 의 값은 다르다. 즉, cycle 1의 경우에는  $2T$ 가 되나 동일 통로내에서 수행되는 경우인 cycle 2에서는  $4T/3$ 가 된다. 그런데, cycle 1의 발생확률이  $2n/c_1$ 이고 cycle 2의 확률이  $1/c_1$  이므로 전체적인  $ET_d = (4n+4/3)T/c_1$  이 된다.



S: 저장위치 R: 불출위치

그림 2. 구조 1에서의 복수명령에 의한 주행 경로의 예.

결과적으로, 복수명령의 기대주행시간  $E_1(DC)$ 는, IT를 저장위치로부터 불출위치로의 이동시간(interleaving time)을 의미하는 확률 변수라 하고  $E_1(IT)$ 를 그의 기대값이라 하면

$$E_1(DC) = T(E(X) + E_1(IT) + E(X_1)) + (4n+4/3)T/c_1 \quad (9)$$

이 된다.

$Y$ 를 임의의 통로에서 저장작업을 한 후, 불출작업을 하도록 다른 통로를 열기 위하여

이동시켜야 하는 저장랙의 수를 나타내는 확률변수로 정의하면, 통로  $i$ 에서 저장작업을 수행했을 때  $Y$ 의 조건부 확률은 (2)식의 확률과 같게 된다. 즉,

$$\begin{aligned} P_1(Y=k) &= P(Y=k | X_1=a_i) \\ &= P(X_2=b_k | X_1=a_i) \\ &= P_1(X_2=b_k). \end{aligned}$$

그러므로,

$$\begin{aligned} P(Y=k) &= \sum_{i=0}^n P_1(Y=k) \cdot P(X_1=a_i) \\ &= \begin{cases} 1/c_1, & k=0 \\ 2(c_1-k)/c_1^2, & 1 \leq k \leq 2n \end{cases} \end{aligned}$$

여기서,  $k_s = \operatorname{argmin}_k (a_k \leq b_k)$ 라 하면,

$$\begin{aligned} E_1(IT) &= \sum_{k=0}^{2n} \max(a_k, b_k) P(Y=k) \\ &= \sum_{k=0}^{k_s} b_k P(Y=k) + \sum_{k=k_s+1}^{2n} a_k P(Y=k) \\ &= (2/c_1^2) \sum_{k=1}^{k_s} (c_1-k) b_k + 2 \sum_{k=k_s+1}^{2n} (c_1-k) a_k \end{aligned}$$

인데,  $c_2=k_s+1$ 로 놓고 앞에서 가정한  $a_k=uk$ 와  $b_k=v_0+vk$ 의 식을 대입하면

$$E_1() = \begin{cases} 2[k_s(c_1-c_2/2)v_0+k_s c_2(c_1/2-(c_2+k_s)/6)v+u(c_1(c_1-c_2) \cdot (c_1+k_s))/2- \\ \{ (16n^2-2c_2^2+12n^2+3c_2^2+2n-c_2)/6 \} /c_1^2, & 0 \leq k_s < 2n \\ 2n(v_0+2(n+1)v/3)/c_1, & k_s \geq 2n \end{cases} \quad (10)$$

이 된다. 따라서, 식(6), (8) 및 (10)를 식(9)에 대입하면 구조 1의 복수명령하의 기대 주

행시간  $E_1(DC)$ 가 계산된다. 특히,  $v=0$ 인 경우는  $k_s=m$ 이므로,

$$E_1(DC) = \begin{cases} T[2(n(1+2\min(m,n))+m(c_1-c_2/2))v_0+ \\ u(c_1(\max(n-m,0) \cdot (n+c_2)+n(n+1)+ \\ (2n-m)(c_1+m)) \cdot (16n^2-2c_2^2+12n^2+3c_2^2+ \\ 2n-c_2)/3)]/c_1^2+(4n+4/3)T/c_1, & 0 \leq m < 2n \\ Tn(4v_0+u(n+1))/c_1+(4n+4/3)T/c_1, & m \geq 2n \end{cases}$$

가 된다.

### 3.2 구조 2

구조 2는 앞서 지적한대로 작업효율면에서는 구조 1에 비하여 열등하나 실제현장의 공간상의 제약을 감안하거나 단순구조로 인한 운영상의 이점을 고려하여 사용될 수 있는 실용적인 구조이다(그림 1참고). 이 구조에 대한 주행시간 추정모형은 구조 1의 과정을 약간 수정함으로써 구할 수 있다.

#### 3.2.1 단일명령 주행시간

이 구조에서의 확률변수  $X_1$ 의 분포는,  $c_3=N+1$ 라고 하면

$$P(X_1=a_i) = 1/c_3, \quad i=0, 1, \dots, N$$

이고, 통로  $i$ 가 주어졌을 때 확률변수  $X_2$ 의 분포는,  $0 \leq i \leq \operatorname{int}(N/2)$ 일 때는(여기서  $\operatorname{int}(X)$ 는  $X$ 를 초과하지 않는 최대의 정수들의 미함)

$$P_{i(X_2=b_k)} = \begin{cases} 2/c_3, & k=1, 2, \dots, N-i \\ 1/c-3, & k=0 \text{ 또는 } k=i+1, \dots, N-i \end{cases}$$

으로 나타내어지고,  $\operatorname{int}(N/2)+1 \leq i \leq N$ 일 때는

$$P_i(X_2=b_k) = \begin{cases} 2/c_3, & k=1, 2, \dots, N-i \\ 1/c_3, & k=0 \text{ 또는 } k=N-i+1, \dots, i \end{cases}$$

로 주어진다. 이를 이용하여  $X_1 = a_1$ 일 경우 확률변수  $X$ 의 조건부 기대값은  $0 \leq i \leq \text{int}(N/2)$ 일 때

$$E_i(X) = \begin{cases} [Nv_0 + (2i^2 + N^2 - 2iN + N)v/2]/c_3, & k_1 = 0 \\ [a_1(2k_1 - 1) + (N - 2(k_1 - 1))v_0 + ((i - k_1 + 1)(i + k_1) + (N - 2i)(c_3/2)v)]/c_3, & 1 \leq k_1 \leq i \\ [a_1(k_1 + i) + (N - i - k_1 + 1)(v_0 + (N - i + k_1)v/2)]/c_3, & i + 1 \leq k_1 \leq N - i \\ a_1, & k_1 \geq N - i + 1 \end{cases} \quad (11)$$

이고,  $\text{int}(N/2) + 1 \leq i \leq N$ 일 때는

$$E_i(X) = \begin{cases} [Nv_0 + (2i^2 + N^2 - 2iN + N)v/2]/c_3, & k_1 = 0 \\ [a_1(2k_1 - 1) + (N - 2(k_1 - 1))v_0 + ((N - i - k_1 + 1)(N - i + k_1) + (2i - N)c_3/2)v]/c_3, & 1 \leq k_1 \leq N - i \\ [a_1(N - i - k_1 + 1) + (i - k_1 + 1)(v_0 + (i + k_1)v/2)]/c_3, & N - i < k_1 \leq i \\ a_1, & k_1 \geq i + 1 \end{cases} \quad (12)$$

이 된다.  $i = 0$  이면  $a_0 = 0$  이므로

$$\begin{aligned} E_0(X) &= \sum_{k \in \mathbb{N}^0} b_k P_0(X_2 = b_k) \\ &= \sum_{k=1}^N (v_0 + vk)/c_3 \\ &= N[v_0 + c_3v/2]/c_3 \end{aligned}$$

이다. 그러므로,  $X$ 의 기대값은 식(7)로부터

$$E(X) = N[v_0 + c_3v/2]/c_3 + \sum_{i=1}^N E_i(X)/c_3 \quad (13)$$

가 된다. 한편, 구조 2에서의  $X_1$ 의 기대값은

$$E(X_1) = \sum_{i=0}^N a_i P(X_1 = a_i) = uN/2 \quad (14)$$

이다.

여기서, 역시  $v = 0$ 인 특별한 경우를 생각해 보자.  $k_1$  값은

$$\begin{aligned} k_1 &= \underset{k}{\operatorname{argmin}}(a_1 \leq v_0) \\ &= \begin{cases} 0 & i \leq m \\ N - i + 1, & i > m, 0 \leq i \leq \text{int}(N/2) \\ i + 1 & i > m, \text{int}(N/2) + 1 \leq i \leq N \end{cases} \end{aligned}$$

이므로, 식(11)과 식(12)로부터

$$E_i(X) = \begin{cases} Nv_0/c_3, & 0 \leq i \leq m \\ a_1, & m < i \leq N \end{cases}$$

이고,  $E_1(X)$ 를 식(13)에 대입하면

$$E(X) = [N(1 + \min(m, N))v_0 + uc_3 \max(N - m, 0) \cdot (m + c_3)/2]/c_3^2$$

이 된다. 따라서, 구조 2의 단일명령 수행시간은 식(1)로부터

$$\begin{aligned} E_2(SC) &= T[N(1 + \min(m, N))v_0 + uc_3(\max(N - m, 0) \cdot (m + c_3) + Nc_3/2)]/c_3^2 + T \\ &\text{로 구해진다.} \end{aligned}$$

### 3.2.2 복수명령 수행시간

이 구조의 경우, 구조 1의 경우와 마찬가지로 cycle 1과 cycle 2의 발생 확률이 각각  $N/c_3$ 과  $1/c_3$ 이므로  $ET_d = (2N + 4/3)T/c_3$ 가 되고, 복수명령의 기대주행시간은

$$E_2(DC) = T(E(X) + E_2(IT) + E(X_1)) + (2N + 4/3)T/c_3 \quad (15)$$

로 나타내진다. 다음으로, 통로  $i$ 에서 저장작업이 이루어지는  $Y$ 의 조건부 확률분포와  $X$ 의 확률분포는 각각

$$P_i(Y = k) = P_1(X_2 = b_k),$$



$$P(X_1=a_i) = 1/c_3, \quad i=0, 1, \dots, N$$

= v/v<sub>0</sub> 라 하면 정규화된 기대주행시간은 α, β의 함수로서

으로 주어지므로, Y의 확률분포는

$$P(Y=k) = \sum_{i=0}^N P_1(X_2=b_k)P(X_1=a_i) \\ = \begin{cases} 2(N-k+1)/c_3^2, & 1 \leq k \leq N \\ 1/c_3, & k=0 \end{cases}$$

이 된다. 이로부터 IT의 기대시간은

$$E_2(IT) = \sum_{k=0}^{k_s} b_k P(Y=k) + \sum_{k=k_s+1}^N a_k P(Y=k) \\ = \begin{cases} 2[k_s(c_3-c_2)/2v_0 + k_s c_2(c_3/2 - (c_2+k_s)/6)v + u(c_3(N-k_s) \cdot \\ (c_3+k_s)/2 - (2(N^2-c_3^2) + 3(N^2+c_3^2) + N-c_2)/6)]/c_3^2, & 0 \leq k_s < N \\ 2N(v_0/2 + (N+2)v/6)/c_3, & k_s \geq N \end{cases}$$

과 같이 구해진다. 그러므로 복수명령 기대주행시간은 식(13), (14) 및 (16)을 식(15)에 대입함으로써 얻을 수 있다. 특히, v=0일 때는

$$E_2(DC) = \begin{cases} T[(N-m)c_2 + 2mc_3]v_0 + u(3c_3(N-m) \\ (m+c_3)/2 - (2(N^2-c_3^2) + 3(N^2+c_3^2) + N-c_2)/3 \\ + Nc_3^2/2)]/c_3^2 + (2N+4/3)T/c_3, & 0 \leq m < N \\ T(2Nv_0/c_3 + u/2) + (2N+4/3)T/c_3, & m \geq N \end{cases}$$

이 된다.

#### 4. 계산결과

단위 저장랙의 구조와 개수가 주어지면 통로내의 기대주행시간은 일정하게 된다. 여기서는 입출고점의 위치의 변화에 따른 구조상의 차이가 주행시간에 미치는 영향을 파악하기 위하여 상수항을 제외한 변동항만을 다음과 같이 정규화하여 분석한다. α = u/v<sub>0</sub>, β

$$ESC_1(\alpha, \beta) = (E_1(SC) - ET_s)/v_0 T \quad (17)$$

$$EDC_1(\alpha, \beta) = (E_1(DC) - ET_d)/v_0 T, \\ i=1, 2 \quad (18)$$

로 표현된다. 총 랙의 수 N=10 (즉, n=5)일 때 ESC<sub>1</sub>(α, β)와 EDC<sub>1</sub>(α, β)를 α, β의 여러가지 가능한 값에 대하여 계산한 결과 표 1에서 표 4까지에 주어져 있다. 표 1, 표 3과 표 2, 표 4를 각각 비교하여 보면, 동일한 β값에 대하여 α의 값이 증가함에 따라 저장/불출 기계의 이동시간의 상대적 비율이 커지므로 구조 1과 구조 2의 주행시간차의 폭이 그에 따라 증가하게 된다. 마찬가지로 경향이 β의 값이 감소할수록 나타나게 된다. 또한, 구조 1의 구조 2에 대한 상대적인 주행시간 감소율(%)을

$$RS(\alpha, \beta) = 100(ESC_2(\alpha, \beta) - ESC_1(\alpha, \beta))/ESC_2(\alpha, \beta),$$

$$RD(\alpha, \beta) = 100(EDC_2(\alpha, \beta) - EDC_1(\alpha, \beta))/EDC_2(\alpha, \beta)$$

로 정의할 수 있는데 α, β값에 따른 주행시간 감소율을 정리한 표 5로부터 위 사실을 쉽게 재확인할 수 있다. 한편, 단일명령의 감소율에 비하여 복수명령의 감소율이 작은 이유는, 작업간의 이동시간인 IT의 차가 그리 크지 않기 때문이다.

그림 3과 4에서는 β=0일 때 구조 1의 정규화된 기대주행시간인 ESC<sub>1</sub>과 EDC<sub>1</sub>의 N의

표 1. 구조 1의  $ESC_1(\alpha, \beta)$ .

$\alpha$	$\beta$					
	0	0.1	0.5	1.0	5.0	10.0
0.1	1.18	1.55	3.00	4.82	19.36	37.55
0.5	2.87	3.01	4.23	6.02	20.55	38.74
1.0	5.52	5.60	6.19	7.72	22.05	40.23
5.0	27.36	27.38	27.48	27.65	35.97	52.88
10.0	54.63	54.65	54.75	54.88	58.07	71.26

표 2. 구조 1의  $EDC_1(\alpha, \beta)$ .

$\alpha$	$\beta$					
	0	0.1	0.5	1.0	5.0	10.0
0.1	2.09	2.82	5.73	9.36	38.45	74.82
0.5	4.77	4.96	6.96	10.56	39.64	76.01
1.0	9.16	9.25	9.91	12.26	41.14	77.50
5.0	45.54	45.56	45.66	45.83	55.06	90.15
10.0	90.99	91.02	91.12	91.24	94.43	108.53

표 3. 구조 2의  $ESC_2(\alpha, \beta)$ .

$1\alpha$	$\beta$					
	0	0.1	0.5	1.0	5.0	10.0
0.1	1.41	1.77	3.23	5.05	19.59	37.77
0.5	5.11	5.23	5.93	7.48	21.81	39.99
1.0	10.07	10.16	10.60	11.40	24.67	42.72
5.0	50.08	50.13	50.31	50.66	55.54	68.79
10.0	100.08	100.13	100.31	100.54	104.09	110.70

변화에 따른 추이를 나타내고 있다.  $ESC_1$ 과  $EDC_1$ 의 식 (17)와 (18)이  $N$ 의 복잡한 비선형으로 표현되지만 그림으로부터 전체적인 함수형태가 볼록함수(convex function)임을 알 수 있다.

표 4. 구조 2의  $EDC_2(\alpha, \beta)$ .

$\alpha$	$\beta$					
	0	0.1	0.5	1.0	5.0	10.0
0.1	2.32	3.05	5.95	9.59	38.68	75.05
0.5	7.01	7.18	8.66	12.02	40.90	77.26
1.0	13.71	13.81	14.32	15.94	43.76	79.99
5.0	68.26	68.31	68.50	68.84	74.63	106.06
10.0	136.45	136.49	136.67	136.90	140.45	147.98

표 5. 구조 2에 대비한 구조 1의 기대주행시간의 감소율(%)\*.

$\alpha$	$\beta$					
	0	0.1	0.5	1.0	5.0	10.0
0.1	16.2/ 9.9	12.7/ 7.6	7.1/ 3.7	4.6/ 2.4	1.2/ 0.6	0.6/ 0.3
0.5	43.9/32.0	42.4/31.0	28.7/19.6	19.6/12.1	5.8/ 3.1	3.1/ 1.6
1.0	45.2/33.2	44.9/33.0	41.6/30.8	32.3/23.1	10.6/ 6.0	5.8/ 3.1
5.0	45.4/33.3	45.4/33.3	45.4/33.3	45.4/33.4	35.2/26.2	23.1/15.0
10.0	45.4/33.3	45.4/33.3	45.4/33.3	45.4/33.4	44.2/32.8	35.6/26.7

\* 표에서 분자와 분모는  $RS(\alpha, \beta)$ 과  $RD(\alpha, \beta)$ 의 값을 의미한다.

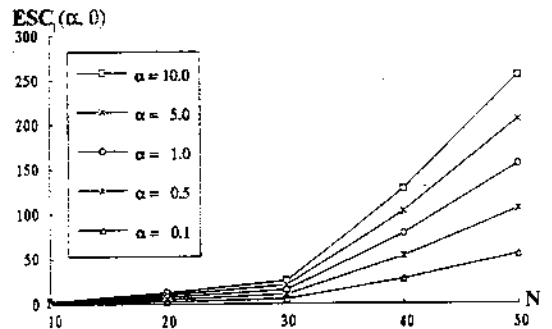


그림 3.  $N$ 의 변화에 따른  $ESC_1(\alpha, \beta)$ 의 추이.

5. 결론

본 연구에서는 자동창고 중에서 가장 공간 효율이 높은 이동랙 자동창고의 작업수행도

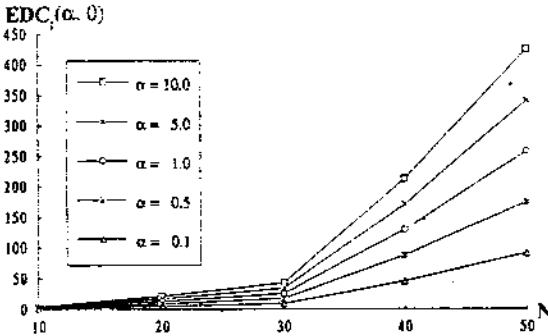


그림 4. N의 변화에 따른 EDC<sub>1</sub>(α, β)의 추이.

추정을 위한 분석방법을 제시하였다. 즉, 입출고 작업성능의 척도로서 단위시간당 작업건수의 역수인 작업건당 요하는 기대주행시간을 산출하는 수리모형을 개발하였다. 개발된 모형에서는 단일 명령과 복수 명령 그리고 구조상의 차이 중 가장 대표적인 것으로 입출고점 위치의 변화를 고려하였다. 총 랙의 수와 저장/불출 기계의 랙당 이동시간 및 저장랙의 랙당 이동시간이 주어지면, 모형으로부터 기대주행시간을 쉽게 산출할 수 있다. 서로 독립적인 전동모터가 장착된 저장랙들을 동시에 구동시키면 작업시간을 대폭 절감할 수 있는데, 이러한 경우도 본 모형에서는 특수한 경우로서 다룰 수 있다. 또한 본 연구에서는 저장/불출 기계와 저장랙의 이동시간을 편의상 모두 선형으로 가정하였으나 제시된 분석과정은 기타 복잡한 비선형 모형에도 그대로 적용될 수 있음을 부언한다.

이동랙에 대한 기존의 연구가 전무하다시피한 실정에서, 본 연구에서 제시된 기초적인 연구결과가 향후 추가연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 참고로, 현

재 본 연구진은 통로가 2개 이상일 때 기대주행시간을 추정하고 이를 이용하여 시스템의 최적구조 설계를 위한 수리모형을 개발하는 연구를 수행 중이다.

참고 문헌

- [1] 김 남하, 임 석철, 홍 석교, 이 수훈, 홍 만표, "유닛로드형 자동창고의 수행도 분석," 대한 산업공학회지, 20(2), pp. 39-50, 1994
- [2] 박 병춘, "Analytic Models and Optimal Strategies for Automated Storage/Retrieval System Operations," Georgia Institute of Technology, 산업공학과 박사학위 논문, 1991.
- [3] 物流 핸드북, 노 인규 감수, 도서출판 기술, 1992
- [4] 이 문규, "Travel Time Modeling and Analysis for an Automated Work-In-Process Carousel," 대한 산업공학회지, 15(1), pp. 77-87, 1989.
- [5] Bozer, Y. A. and White, J. A., "Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems," *IIE Transactions*, 16(4), pp. 329-337, 1984.
- [6] Eynan, A. and Rosenblatt, M. J., "Establishing Zones in Single-Command Class-Based Rectangular AS/RS," *IIE Transactions*, 26(1), pp. 38-46, 1994.
- [7] Foley, R. O. and Frazelle, E. H., "Analytical Results for Miniloading Throughput and the Distribution of Dual Command Travel Time," *IIE Transactions*, 23

- (3), pp. 273-281, 1991.
- [8] Graves, S. C., Hausman, W. H., and Schwarz, L. B., "Storage-Retrieval Interleaving in Automatic Warehousing Systems," *Management Science*, 23(9), pp. 935-945, 1977.
- [9] Han, M. H. and McGinnis, L. F., "Automated Work-In-Process Carousels: Modeling and Analysis," Technical Report Tr-86-06, Material Handling Research Center, Georgia Institute of Technology, 1986.
- [10] Hausman, W. H., Schwarz L. B., and Graves, S. C., "Optimal Storage Assignment in Automatic Warehousing Systems," *Management Science*, 22(6), pp. 629-638, 1976.
- [11] Hwang, H. and Ko, C. S., "A Study on Multi-Aisle System Served by a Single Storage/Retrieval Machine," *Int. J. Prod. Res.*, 26(11), pp. 1727-1737, 1988.
- [12] Hwang, H. and Lee, S. B., "Travel-Time Models Considering the Operating Characteristics of the Storage and Retrieval Machine," *Int. J. Prod. Res.*, 28(10), pp. 1779-1789, 1990.
- [13] Kim, J. and Seidmann, A., "A Framework for the Exact Evaluation of Expected Cycle Times in Automated Storage Systems with Full-Turnover Item Allocation and Random Service Requests," *Computers and IE*, 18(4), pp. 601-612, 1990.
- [14] Lee, M.-K., and Hwang, H., "An Approach in the Design of a Unit-Load Automated Carousel Storage System," *Engineering Optimization*, 13, pp. 197-210, 1988.
- [15] Medeiros, D. J., Enscoe, E. E., and Smith, A., "Performance Analysis of Miniload Systems," *Proc. 1986 Winter Simulation Conf.*, pp. 606-612, 1986.
- [16] Raghunath, S., Perry, R. and Cullinane, T., "Interactive Simulation Modeling of Automated Storage/Retrieval Systems," *Proc. 1986 Winter Simulation Conf.*, pp. 613-620, 1986.
- [17] Schwarz, L. B., Graves, S. C., and Hausman, W. H., "Scheduling Policies for Automatic Warehousing Systems: Simulation Results," *AIIE Trans.*, 10 (3), pp. 260-270, 1978.