

피라미드 형태 적재장에서 적재동의 개수와 적재동의 저장 공간 배치*

박퇴경**† · 김갑환**

Determining the Number of Storage Rooms and the Layout of
the Storage Room in Warehouses for Pyramid-typed Stacks*

Twae-Kyung Park** · Kap Hwan Kim**

■ Abstract ■

This paper proposes a method for determining the number of storage rooms and designing the storage layout in warehouses for pyramid type stacks whose example are stacks for steel coils, paper rolls, and drums for oils. Formulas are derived for estimating the expected values and the variances of various handling times by cranes. From the derived formulas, the expected queuing time of road trucks is estimated. Base on the derived formulas, this study derives the cost function for determining the optimal numbers of rows, bays, and tiers of stacks and sizing cranes under the condition that the requirement for storage space is satisfied. Results of numerical analysis are provided.

Keyword : Rehandling, Warehouse, Design, Queuing Model

1. 서 론

대부분의 바닥적재(Block Stacking) 적재장에서
는 적재층을 높여서 공간부족을 해결하려고 하나 적

재층이 높아지면 필연적으로 재취급(Rehandling)이
발생되며, 이 재취급 문제는 창고의 취급 효율을 결
정짓는 중요한 문제이다. 재취급은 인출될 두-낫 로
드(Unit Load)의 상단이나 앞에 쌓여 있어서 인출

논문접수일 : 2006년 10월 08일 논문제재확정일 : 2007년 02월 14일

* 본 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았음.

** 부산대학교 산업공학과

† 교신저자

을 위해 필수적으로 취급해야만 하는 유닛 로드를 말한다. 적재장에서 적재능력을 향상시키기 위해서는 적재층을 높임으로써 공간의 이용률은 높이고 비용을 최소화시키려 한다. 그러나 적재층이 높아지게 되면 외부 트럭이 특정 대상 유닛 로드 인출 요구시 크레인이 해당 유닛 로드를 인출하기 위하여 필요한 재취급 소요 시간은 늘어나게 된다. 적재장의 적재 효율을 높이고 크레인의 생산성을 향상시키기 위해서는 적재층을 적정하게 운영할 필요가 있다.

적재장은 여러 개의 적재동(Storage Room)으로 나누어지고 하나의 적재동에는 한 개의 크레인이 설치되어 있다고 가정하자. 이 경우 적재동의 개수가 일정한 경우에 적재 공간을 더 많이 사용할 수 있다면 유닛 로드를 적재하는 적단수는 낮아질 것 이므로 인출 작업에서 발생하는 재취급 작업의 횟수는 감소하나 크레인이 더 먼 거리로 이동할 필요가 있고, 적재장 소요 면적에 따른 더 많은 투자비가 소요된다. 또한 주어진 적재 공간에 더 많은 적재동을 만들어 더 많은 대수의 크레인을 투입한다면 유닛 로드 인출 요구시 외부 트럭에 대한 서비스 시간을 줄일 수 있다는 장점은 있으나 크레인의 구입 및 운영을 위한 더 높은 투자가 요구된다. 따라서 적재장의 밀도, 접근 용이성, 투자비 그리고 운반차량에 대한 서비스 사이에는 경제적인 트레이드 오프 관계가 존재한다. 적재장 운영의 고객인 운반차량의 비용을 포함한 시스템 전체의 비용을 최소화 시키는 과정을 통해 트레이드 오프의 관계를 분석적으로 규명하고, 이에 근거하여 적절한 적재동의 개수와 적재동내의 저장공간의 배치를 결정한다.

적재장 내 운영에 관한 연구들 중에서 재취급을 고려한 디자인 연구들은 많지 않지만 몇 가지 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Bassan et al.[1]는 저장 할 공간의 랙의 총의 높은 고단적 랙(Rack)이 배치된 적재장에 대해서 랙의 레이아웃에 대해서 논의하였고, 랙의 개수와 사양을 결정하는 방법을 제시하였다. Larson and Odoni[8]의 제안된 방법은 평면과 선에서 불규칙적으로 생성되는 두 개 점 사

이의 기대 거리를 확률적인 분포를 이용하여 유도하였다. Bozer and White[2]는 저장위치를 무작위 저장 규칙(randomized storage policy)에 의해 결정 된다는 조건에서 AS/RS에 있어서의 단위 유닛 로드 기대 취급 시간을 유도하였다. Bozer and White [3]는 Miniload AS/RS(Automated Storage/Retrieval System)에서 주어진 처리능력을 만족시키는 통로의 개수와 랙의 사양을 결정하는 문제를 다루었다. Kim[4]은 저장물 야드 내에서 하나의 컨테이너를 처리하는데 예상되는 재취급의 수와 초기에 베이의 장치현황이 주어진 경우의 총 재취급 기대 횟수를 평가하는 방법론을 제시하였다. Kim and Kim[6, 7]은 수입 장치장을 운영하는데 특징적으로 나타나는 재취급 작업을 분석하고, 이것을 수입 장치장 운영과 관련된 의사결정에 포함해 다루었다. 연구 내용은 장비 대수 및 공간 크기를 결정하는 부분[6]과 공간 할당에 대한 부분[7]으로 크게 나누어진다. Myung[9]는 판매류의 주문별 출고순서 결정문제를 동일한 주문에 속한 판매를 두 개 이상의 다른 베드에 나누어 적치하는 경우와 하나의 주문에 속한 판매를 하나의 베드에 적치하는 경우를 나누어 재취급을 고려한 주문별 출고 순서를 결정하는 것을 제시하였다. 하나의 주문에 속한 판매를 하나의 베드에 적치하는 경우에는 최단경로문제(Shortest Path Problem)으로 문제를 해결하고, 동일한 주문에 속한 판매를 두 개 이상의 다른 베드에 나누어 적치하는 경우에는 NP-hard임을 증명하고 있다. Kim and Hong[5]는 블록 적재형태에서의 재취급을 최소화 하는 분지한계법(Branch and Bound Method) 알고리즘을 제시하였다. Yang and Kim [12]은 블록 적재에서의 저장공간의 제약 때문에 혼적 결정을 해야 할 때 적절한 장치 위치 선정의 근거로서 최소 기대 재취급 횟수를 이용하여 정적인 의사결정과 동적인 의사 결정 문제로 나누어서 접근하였다. Park and Kim[10]은 피라미드 형태의 적재장을 설계하는 문제를 다루었다. 취급장비 (크레인)의 기대처리 소요시간에 대한 추정식을 유도하였다. 이 논문은 적재동이 하나인 적재장에서 적재

장의 가로, 세로 규격, 적재 높이, 한 베이의 열의 개수, 베이의 개수를 결정하기 위한 비용 모형을 수립하였다. 저장시설의 운영에 관한 연구 중 재취급에 관한 연구는 그 중요성에 비하여 연구가 그다지 많지 않은 설정이고, 피라미드 형태 적재장의 디자인에 대한 연구는 이제까지 없었다.

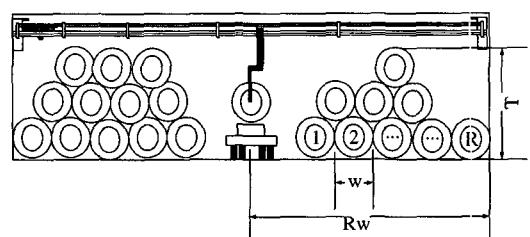
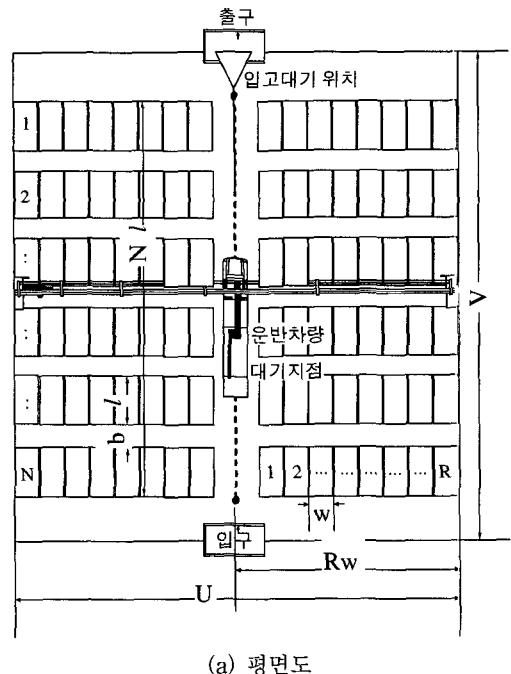
제 2장에서는 문제의 정의, 본 연구에서 사용 될 가정과 기호, 모형, 해법에 대해서 기술하고, 제 3장에서는 피라미드 형태의 적재장에서 입고, 인출, 재취급시에 크레인의 소요 시간을 분석하여 크레인의 입고, 인출, 재취급에 대한 각각의 평균 이동 기대 시간과 분산을 식으로 유도하고, 유도된 식을 이용하여 적재장에서 사용되는 비용과 $M/G/1$ 의 대기 행렬 모형의 평균 대기 시간을 식으로 유도한다. 제 4장에서는 제 3장에서 유도 된 비용 분석의 식을 이용하여 최하층 열의 수, 베이 수, 층의 수를 변화 시켜 가면서 적재동의 사양과 적재동의 수를 산정 한다. 또한 비용의 변화에 따른 적재동의 수 변화, 적재동의 사양, 소요공간 비용 변화에 따른 민감도를 분석한다. 끝으로 제 5장에서는 결과를 요약하고 앞으로 연구 계획에 대하여 기술한다.

2. 문제의 정의

[그림 1](a)는 일반적인 피라미드 형태의 적재장 중에서 대표적이 되는 코일 적재장의 평면도를 보여 주고 있다. 각 작업장에서는 입구를 통하여 운반 차량이 진입을 하게 되고, 진입된 운반차량은 인출 할 대상 유닛 로드 옆에 정차를 하게 되며, 크레인은 인출 대상 유닛 로드를 인출하여 운반차량에 실으면 운반차량은 출구를 통하여 목적지로 출발하는 형태로 작업이 진행 된다. [그림 1](b)는 피라미드 적재장의 정면도를 보여주고 있다. 피라미드 적재 형태를 보여 주며, 피라미드 적재 형태에서 크레인이 인출대상 유닛 로드를 인출하여 운반차량에 실는 모습을 보여 주고 있다.

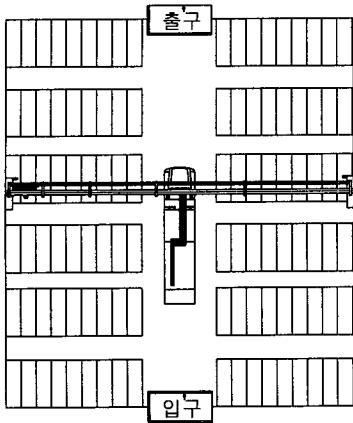
파라미드 적재장은 하나 또는 그 이상의 적재동(棟)으로 구성이 된다. [그림 2]은 피라미드 적재장

에서의 적재동의 구조를 나타내고 있다. (a)는 1개의 적재동으로 구성된 적재장으로 크레인 1대가 담당을 하고, (b)는 3개의 적재동으로 구성된 적재장으로 각 적재동마다 1대의 크레인이 설치되어 있다. (a)와 (b)를 비교하여 보면 (a)와 (b)가 같은 적재 능력을 갖고 있다면, (a)는 1대의 크레인이 담당하는 유닛 로드의 수가 많아지게 되어 운반차량에 대한 크레인의 서비스 시간이 길어지게 되며, (b)는 1 대의 크레인이 담당하는 유닛 로드의 수가 적어지게 되어 운반차량에 대한 서비스 시간이 짧아지게 되어 운반차량이 기다리는 시간도 짧아지게 된다.

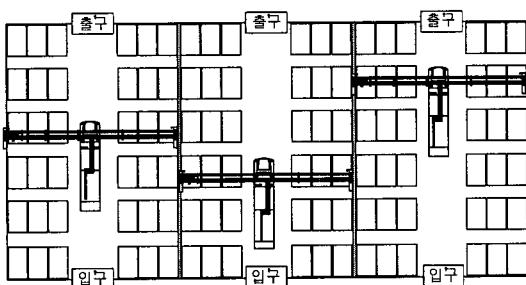


(b) 정면도

[그림 1] 피라미드 적재장의 배치



(a) 1개 적재동으로 구성 된 피라미드 적재장

(b) 3개의 적재동으로 구성 된 피라미드 적재장
[그림 2] 피라미드 적재장의 동간 구조

본 연구에서는 전체비용을 최소화할 수 있는 적재동의 개수, 적재장의 모양, 적재장 내부의 저장공간의 사양을 결정하는 문제를 다루고자 한다.

본 연구에서 사용되는 가정은 다음과 같다.

- (1) 유닛 로드는 바닥에 저장한다. 유닛 로드는 위에서 아래로 접근할 수 있는 크레인으로 인출을 한다.
- (2) 유닛 로드의 입고시 대기 위치는 [그림 1]에서 보는 바와 같이 운반차량의 통로인 상단 끝에 있는 출구 쪽 통로의 중앙에 위치를 한다.
- (3) 입고와 인출은 동시에 이루어지지 않는다. 따라서 입고시에는 운반차량이 도착하지 않는 것으로 가정한다.
- (4) 하나의 운반차량은 1개의 유닛 로드만 실을 수 있고, 운반차량은 인출 대상의 유닛 로드와 같

은 열에 대기하며, 운반차량의 대기지점은 [그림 1]과 같다.

- (5) 크레인은 작업이 끝나는 지점에서 멈들고, 다음 차량이 도착한 후 다음 작업이 시작하는 곳으로 이동한다.
- (6) 적재장은 여러 개의 적재동으로 구성되고, 1개의 적재동에는 1대의 크레인으로 운영되며, 한번에 유닛 로드를 1개만 취급할 수 있다.
- (7) 인출대상의 유닛 로드를 처리하기 위하여 발생하는 재취급의 유닛 로드는 같은 열의 임의의 장소로 옮기며, 통로를 넘어가서 저장되지는 않는다.
- (8) 유닛 로드의 적재 모양은 일정 형태로 유지한다는 가정하에 재취급의 기대 횟수를 산출하였다. 즉 단위 시간당 입고와 출고가 일정하게 유지 된다.
- (9) 적재장의 크레인이 길이 방향으로 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝까지 운행하는데 소요되는 시간이 폭 방향으로 중앙 통로에서 끝까지 운행하는데 소요되는 시간보다 길다. 이 가정이 성립되지 않는 경우에도 유사한 분석을 할 수 있으며 이 가정은 현실적인 사례를 볼 때 타당하다.
- (10) 계산의 단순화를 위하여 운반차량에 대한 통로의 폭은 무시한다.
- (11) 크레인의 이동은 트롤리 이동(외부 트럭의 통로 즉 종의 방향)과 갠트리 이동(횡의 방향)으로 구분 할 수 있다. 그러나 크레인의 이동이 종과 횡의 방향으로 구분이 되지 않고 트롤리 이동과 갠트리 이동을 동시에 수행하는데 체비세프 주행을 한다.

본 연구에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

• 상 수

- w : 유닛 로드의 폭.
 l : 유닛 로드의 길이에 유닛 로드와 유닛 로드 사이의 폭을 더한 값.
 v_t : 운반차량의 주행속도.
 v_r : 크레인의 트롤리 속도.

- v_y : 크레인의 갠트리 속도.
- p : 크레인이 유닛 로드를 집는 시간과 놓는 시간을 더한 시간.
- d : 연간 유닛 로드 총 처리량(throughput rate).
- s : 적재장에서 요구되는 적재능력.
- c_c : 크레인의 초당 운영비(운전자의 인건비, 재료비 등이 포함).
- c_f : 크레인의 고정비(장비의 감각 상각비, 보험, 유지보수비 등이 포함).
- c_t : 운반차량 초당 운영비(운전자의 인건비, 연료비, 차량의 감각 상각비, 보험, 유지보수비, 이자비용, 기회비용 등이 포함).
- c_s : 연간 단위 면적당(m^2) 1개 적재동 공간비용 (토지 구입비에 대한 기회 비용, 건물의 감각 상각비, 건물 유지비용 등이 포함).
- λ : 운반차량의 도착이 포아송 과정(Poisson process)을 따른다고 가정할 때 단위 시간당 평균 도착율.
- TC : 적재장의 연간 총비용.

• 의사결정 변수

- M : 적재동의 수.
- R : 1개 적재동의 유닛 로드의 가로축(최하층 열)의 수.
- T : 1개 적재동의 적재높이(높이 방향으로 쌓인 유닛 로드의 최대 개수).
- N : 1개 적재동에서 적재되는 유닛 로드의 세로 방향의 베이 수.

• 목적함수

목적함수에 포함되는 비용항목은 다음과 같다 :

- (1) 크레인의 가변비용과 고정비용 ; (2) 운반차량의 가변비용 ; (3) 적재장의 건설과 유지비용. 크레인의 고정비용은 각 적재동에는 하나의 크레인이 설치되므로 적재동의 개수에 비례하는 항목으로 감가상각비 등과 같은 비용이 포함된다. 크레인의 고정비용은 사용시간에 상관없이 설치되면 일정하게 지출되는 경비다. 크레인의 가변비용은 작업시간이 증가

하면 그에 비례하여 증가하는 항목으로서 운전자 인건비, 에너지 비용, 보수유지 비용 등이 포함된다. 크레인의 작업시간은 입고소요시간, 인출소요시간으로 나눌 수 있고 인출소요시간은 대상 유닛 로드 인출작업소요시간과 대상 유닛 로드 인출을 위한 재취급 소요시간으로 나눌 수 있다. 운반차량의 가변비용은 적재장에 들어와서 소모하는 시간에 비례하는 항목으로서 운전자의 인건비, 차량유지비, 감가상각비 등이 포함된다. 운반차량의 적재장내 소요시간은 운반차량의 적재장내 주행시간, 운반차량의 대기시간, 크레인의 인출소요시간의 합으로 나타난다. 이를 기호로 나타내면 다음과 같다.

$T_c(R, T, N)$: (R, T, N)의 사양을 가진 적재동에서, 한 개의 유닛 로드를 처리하는데 소요되는 크레인의 처리시간(초).

$T_t(R, T, N)$: (R, T, N)의 사양을 가진 적재동에서, 한 개의 유닛 로드를 처리하는데 소요되는 운반차량의 소요시간(초).

목적함수값은 M, N, R, T 의 함수로서 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \underset{M, N, R, T}{\text{Minimize}} \quad TC = & \{c_c \times M \times d_m \times T_c(R, T, N)\} \\ & + \{c_t \times M \times d_m \times T_t(R, T, N)\} \\ & + (c_s \times M \times 2Rw \times Nl) \\ & + (c_f \times M). \end{aligned} \quad (1)$$

제약조건으로는 적재장의 요구적재능력 (s)을 만족시켜야 한다. 즉, 적재장의 사양이나 적재동의 개수가 필요로 하는 유닛 로드의 적재요구량을 만족하여야 한다는 뜻이다. 이 적재요구량은 연간 처리량에 유닛 로드의 평균 적재시간의 곱으로 구할 수 있는데 이 두 가지 값은 모두 외부에서 주어지는 값으로 적재장의 설계 문제와는 상관이 없다고 가정하였다. 그리고 적재장의 건설비용과 유지비용이 적재장의 면적에 비례한다고 가정하면 바닥의 면적은 $2Rw \times Nl$ 로 표현되고, 적재장의 최대 적재 능력은 $S(R, T, N) = 2NT(R - T/2 + 1/2) = NT(2R - T + 1)$ 이다. 따라서 제약식은 아래와 같이 표현된다.

$$S(R, T, N) = NT(2R - T + 1) \geq s/M. \quad (2)$$

최적의 해의 탐색은 먼저 하나의 동에서 제약 조건을 만족하면서 가능한 모든 N, R, T 에 대해 목적 함수를 만족하는 해를 구한다. 2개의 동에서 구해진 목적 함수의 값과 비교하여 목적 함수값을 갱신한다. 이렇게 계속하여 적재동수를 증가시켜가면서 비용이 최소화 되는 목적함수의 해를 갱신하고, 이 때의 N, R, T, M 의 값도 같이 갱신한다.

최적해를 탐색하는 절차는 아래와 같으며, $x = [s / 2M], k$ 는 $[x]$ 보다 크지 않은 정수이다.

단계 1 : M 을 1부터 M 까지 1씩 증가.

만약 $M = M$ 이면 중지 한다.

단계 2 : R 을 1부터 k 까지 1씩 증가.

만약 $R = k$ 이면 단계 1로 간다.

단계 3 : N 을 1부터 k 까지 1씩 증가.

만약 $N = k$ 이면 단계 2로 간다.

단계 4 : T 을 1부터 ∞ 까지 1씩 증가.

만약 제약조건 (2)가 만족하지 않으면 단계 3으로 간다.

단계 5 : 만약 R 이 T 보다 적거나 같으면 단계 3으로 간다. 아니면 목적함수 (1)의 값을 계산한다.

단계 6 : 현재까지 발견 된 최소 목적함수값 TC^* 와 비교하여 현재 해의 목적함수값 TC 가 더 작으면 현재 해의 목적함수값 TC 를 최적 해인 TC^* 로 갱신한다.

단계 7 : 단계 4로 간다.

남은 문제는 목적함수 식 (1)을 어떻게 계산하느냐 하는 것인데 그 중에서도 $T_c(R, T, N)$ 과 $T_t(R, T, N)$ 을 계산하는 것이 문제이다. 이를 시간차들을 좀 더 세분화 한다면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_c(R, T, N) &= \text{입고시평균취급소요시간}(U_1) \\ &\quad + \text{인출시평균취급소요시간}(U_2) \\ &\quad + \text{재취급시평균소요시간}(U_r). \end{aligned}$$

인출시평균소요시간(U_2)

$$\begin{aligned} &= p + \text{인출시비적재평균운행소요시간}(T_{21}) \\ &\quad + \text{인출시평균적재취급시간}(T_{22}). \end{aligned}$$

그리고

$$\begin{aligned} T_t(R, T, N) &= \text{인출시평균취급소요시간}(U_2) \\ &\quad + \text{재취급시평균소요시간}(U_r) \\ &\quad + \text{운반차량평균소요시간}(T_4) \\ &\quad + \text{운반차량평균대기시간}(W_s). \end{aligned}$$

와 같이 세분할 수 있는데 이 각각에 대해서 그 값을 구하는 것을 다음 장에 서술하게 된다.

3. 취급소요 시간 분석

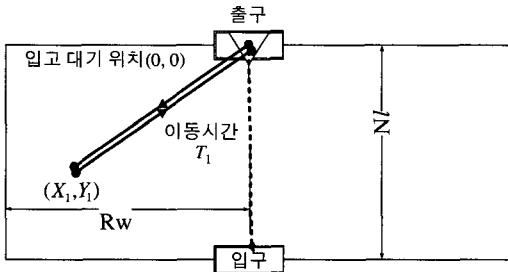
[그림 1]에서 보면 크레인은 천장에서 전후, 좌우로 이동할 수 있고, 좌우 양쪽의 벽면으로 유닛 로드가 적재된다. 크레인의 이동에는 첫째 입고를 위한 크레인의 이동, 둘째 인출 대상 유닛 로드의 인출을 위한 크레인의 이동, 인출시 발생하는 재취급을 위한 크레인의 이동으로 세가지가 있다. 이를 분석하기 위하여 다음과 같은 두 가지 상수를 정의 한다.

t_x : 크레인의 트롤리의 원점(외부 트럭의 통로지점)에서 한쪽 방향으로 끝 지점까지 트롤리 이동시간.

t_y : 크레인의 캔트리의 한쪽 끝 지점에서 반대편 끝 지점까지 캔트리 이동시간. $t_y > t_x$ 라고 가정하였다. 그렇지 않은 경우에도 유사한 분석을 할 수 있다[10].

3.1 입고시 크레인의 취급 소요 시간 분석(U_1)

[그림 3]에서 보면 입고할 때는 입고 대기위치에서 크레인이 출발하는 지점이 된다. 이 위치는 좌표상 $(0, 0)$ 이 되고, 크레인은 입고되는 유닛 로드를 저장해야 할 위치 (X_1, Y_1) 으로 이동하여 적재를 하게 된다. 따라서 한 개의 유닛 로드를 입고하기 위한 크레인의 이동 경로는 $(0, 0) \rightarrow (X_1, Y_1) \rightarrow (0, 0)$ 된다. 크레인의 이동시간은 $t_x = Rw/v_x$, $t_y = Nl/v_y$ 이고, 유닛 로드의 위치는 $X_1 \sim U(0, Rw/v_x)$, $Y_1 \sim U(0, Nl/v_y)$ 을 따른다.



[그림 3] 입고시 크레인의 이동

유닛 로드 입고 대기 위치에서 입고 대상의 유닛 로드의 저장 위치까지의 이동 시간을 T_i 으로 표시하면 $T_i = \max\{|0 - X_1|, |0 - Y_1|\}$ 가 되고, 누적 확률 밀도함수 $G_i(z)$ 는 아래와 같다.

$$G_i(z) = \Pr(T_i \leq z) = \Pr(X_i \leq z)\Pr(Y_i \leq z),$$

$$\Pr(X_i \leq z) = \begin{cases} z/t_x, & 0 < z < t_x \text{ 일 때} \\ 1, & t_x < z \text{ 일 때} \end{cases}$$

이고,

$$\Pr(Y_i \leq z) = \begin{cases} z/t_y, & 0 < z < t_y \text{ 일 때} \\ 1, & t_y < z \text{ 일 때} \end{cases}$$

이므로

$$G_i(z) = P(T_i \leq z) = \begin{cases} z^2/t_x t_y, & 0 < z < t_x \text{ 일 때} \\ z/t_y, & t_x < z < t_y \text{ 일 때} \\ 1, & t_y < z \text{ 일 때} \end{cases}$$

이다. 이동 시간 T_i 의 확률 밀도함수를 $g_i(z)$ 라 하면,

$$g_i(z) = \begin{cases} 2z/t_x t_y, & 0 < z < t_x \text{ 일 때} \\ 1/t_y, & t_x < z < t_y \text{ 일 때} \\ 1, & t_y < z \text{ 일 때} \end{cases}$$

이다. 입고시 크레인의 평균 이동 기대 시간을 $E[T_i]$ 라 하면, $E[T_i] = 2 \int_0^\infty z g_i(z) dz = (t_x^2 + 3t_y^2)/3t_y$ 가 된다. t_x, t_y 를 대입하고, 크레인이 유닛 로드를 집고, 놓는 처리 시간을 감안하면 입고시 크레인의 평균 이동 기대 시간은 아래와 같다.

$$E[U_i] = p + Nl/v_y + R^2 w^2 v_y^2 / 3Nl v_x^2. \quad (3)$$

입고시 크레인 이동 시간의 분산을 $V[T_i]$ 라 하면,

$$E[T_i^2] = 4 \int_0^\infty z^2 g_i(z) dz = \{2(t_x^3 + 2t_y^3)\}/3t_y \text{ 이므로}$$

$$\begin{aligned} V[T_i] &= E[T_i^2] - (E[T_i])^2 \\ &= (-t_x^4 + 6t_x^3 t_y - 6t_x^2 t_y^2 + 3t_y^4)/9t_y^2 \end{aligned}$$

이다. t_x, t_y 를 대입하면, 입고시 크레인의 이동 시간의 분산은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} V[T_i] &= (-R^4 w^4 v_y^2 / N^2 l^2 v_x^4 + 6R^3 w^3 v_y / N l v_x^3 \\ &\quad - 6R^2 w^2 / 3v_x^2 + 3N^2 l^2 / v_y^2)/9. \end{aligned} \quad (4)$$

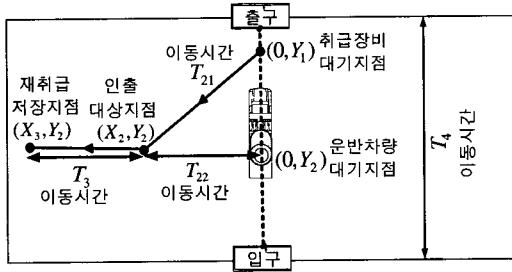
크레인의 분산에서는 크레인이 유닛 로드를 집고, 놓는 처리 시간은 상수이므로 감안하지 않아도 되므로 $V[U_i] = V[T_i]$ 가 된다.

3.2 인출시 소요 시간 분석

인출을 하기 위해서는 인출 대상 유닛 로드 위에 놓인 유닛 로드를 동일한 베이의 다른 위치로 옮겨 놓는 재취급 작업과 인출 대상 유닛 로드를 트럭에싣는 인출 작업이 수행되어야 한다.

[그림 4]에서 보면 인출일 때에는 앞의 작업이 끝난 임의의 지점 $(0, Y_1)$ 에 크레인이 위치하게 된다. (X_2, Y_2) 지점에 인출할 대상의 유닛 로드가 있다고 한다면, 운반차량이 인출 대상의 유닛 로드 옆인 $(0, Y_2)$ 지점의 통로에 정차를 하게 된다. 크레인은 인출을 위하여 작업을 하게 될 때, 재취급이 발생하게 되는데 크레인은 (X_2, Y_2) 근처에 위치한 재취급 대상 유닛 로드를 같은 열의 임의의 위치인 (X_3, Y_2) 지점에 재취급 유닛 로드를 옮기게 되고, 크레인은 다시 인출 대상지점인 (X_2, Y_2) 지점으로 되돌아 오게 된다. 또 재취급이 있으면 크레인은 같은 열의 임의의 지점인 (X_4, Y_2) 지점에 재취급 유닛 로드를 옮기게 되고, 크레인은 다시 인출 대상지점인 (X_2, Y_2) 지점으로 되돌아 오게 된다. 이렇게 재취급이 없을 때까지 반복하다가 재취급이 완료되면 인출대상 지점인 (X_2, Y_2) 에서 인출 대상 유닛 로드를 운반차량의 지점인 $(0, Y_2)$ 로 옮기게 된다. 따라서 크레인의 운행 경로는 다음과 같다.

$$(0, Y_1) \rightarrow (X_2, Y_2) \rightarrow \begin{cases} (X_3, Y_2) \rightarrow (X_2, Y_2) \\ (X_4, Y_2) \rightarrow (X_2, Y_2) \\ \vdots \\ (X_k, Y_2) \rightarrow (X_2, Y_2) \end{cases} \rightarrow (0, Y_2).$$



[그림 4] 인출시 크레인의 이동

크레인의 이동시간은 $t_x = R w / v_x$, $t_y = N l / v_y$ 이고, 유닛 로드의 위치는, $X_2 \sim U(0, R w / v_x)$, $X_3 \sim U(0, R w / v_x)$, $Y_1 \sim U(0, N l / v_y)$, $Y_2 \sim U(0, N l / v_y)$ 을 따른다.

3.2.1 인출시 크레인의 비 적재 이동 시간 분석 (T_{21})

크레인의 위치는 앞의 작업이 끝난 임의의 $(0, Y_1)$ 지점에 위치하게 되고, (X_2, Y_2) 지점에 인출할 대상의 유닛 로드가 있을 때의 크레인의 이동 경로는 $(0, Y_1) \rightarrow (X_2, Y_2)$ 가 된다. 크레인 대기 위치에서 인출 대상의 유닛 로드의 저장위치까지의 이동 거리를 T_{21} 로 표시하면 $T_{21} = \max\{|0 - X_2|, |Y_1 - Y_2|\}$ 가 되고, 누적 확률 밀도함수 $G_{21}(z)$ 는 아래와 같다.

$$G_{21}(z) = \Pr(T_{21} \leq z) = \Pr(|Y_1 - Y_2| \leq z) \Pr(X_2 \leq z)$$

$$\Pr(X_2 \leq z) = \begin{cases} z/t_x, & 0 < z < t_x \text{ 일때} \\ 1, & t_x < z \text{ 일때} \end{cases}$$

이고,

$$\Pr(|Y_1 - Y_2| \leq z) = \begin{cases} z(2t_y - z)/t_y^2, & 0 < z < t_y \text{ 일때} \\ 1, & t_y < z \text{ 일때} \end{cases}$$

이므로

$$G_{21}(z) = P(T_{21} \leq z)$$

$$= \begin{cases} (2t_y z - z^3)/t_x t_y^2, & 0 < z < t_x \text{ 일때} \\ z(2t_y - z)/t_y^2, & t_x < z < t_y \text{ 일때} \\ 1, & t_y < z \text{ 일때} \end{cases}$$

이다. 이동 시간 T_{21} 의 확률 밀도함수를 $g_{21}(z)$ 라 하면,

$$g_{21}(z) = \begin{cases} (4t_y z - 3z^2)/t_x t_y^2, & 0 < z < t_x \text{ 일때} \\ 2(t_y - z)/t_y^2, & t_x < z < t_y \text{ 일때} \\ 1, & t_y < z \text{ 일때} \end{cases}$$

이다. 따라서

$$E[T_{21}^2] = \int_0^\infty z^2 g_{21}(z) dz = -3t_x^4 + 10t_x^3 t_y + 5t_y^4 / 30t_y^2$$

이므로

$$V[T_{21}] = E[T_{21}^2] - (E[T_{21}])^2$$

$$= -\{(t_x^3 - 4t_x^2 t_y - 4t_y^3)^2\} / 144t_y^4$$

$$+ (-3t_x^4 - 10t_x^3 t_y + 5t_y^4) / 30t_y^2 \text{이다.}$$

3.2.2 인출시 크레인의 적재 취급 시간 분석 (T_{22})

인출대상의 유닛 로드의 저장위치 (X_2, Y_2) 에 위치하게 되고, $(0, Y_2)$ 지점이 운반차량의 대기지점 일 때의 크레인의 이동경로는 $(X_2, Y_2) \rightarrow (0, Y_2)$ 가 된다. 인출대상 유닛 로드의 저장위치에서 운반차량 대기지점의 거리는 T_{22} 로 표시하면 $T_{22} = \max\{|0 - X_2|, |Y_2 - Y_1|\}$ 가 되고, 이동시간의 누적 확률 밀도함수 $G_{22}(z)$ 는

$$G_{22}(z) = \Pr(T_{22} \leq z) = \Pr(X_2 \leq z)$$

가 되고,

$$G_{22}(z) = \Pr(X_2 \leq z) = \begin{cases} z/t_x, & 0 < z < t_x \text{ 일때} \\ 1, & t_x < z \text{ 일때} \end{cases}$$

이고, 이동 시간 T_{22} 의 확률밀도함수를 $g_{22}(z)$ 라 하면,

$$g_{22}(z) = \begin{cases} 1/t_x, & 0 < z < t_x \text{ 일때} \\ 0, & t_x < z \text{ 일때} \end{cases}$$

이다. 따라서

$$E[T_{22}] = \int_0^\infty z g_{22}(z) dz = t_x / 2 \text{이다,}$$

$$E[T_{22}^2] = \int_0^\infty z^2 g_{22}(z) dz = t_x^2 / 3 \text{이므로}$$

$$V[T_{22}] = E[T_{22}^2] - (E[T_{22}])^2 = t_x^2 / 12 \text{이다.}$$

3.2.3 인출시 크레인의 취급 소요 시간 분석 (U₂)

인출시 크레인의 평균 이동 기대 시간을 $E[T_2]$ 라 하면,

$$E[T_2] = E[T_{21}] + E[T_{22}] \\ = (-t_x^3 + 4t_x^2 t_y + 6t_x t_y^2 + 4t_y^3)/12t_y^2$$

가 된다. t_x , t_y 를 대입하고, 크레인이 유닛 로드를 집고, 놓는 처리 시간을 감안하면 인출시 크레인의 평균 이동 기대 시간은 아래와 같다.

$$E[U_2] = p - R^3 w^3 v_y^2 / 12N^2 l^2 v_x^3 \\ + R^2 w^2 v_y / 3Nl v_x^2 + R w / 2v_x + Nl / 3v_y. \quad (5)$$

인출시 크레인 이동시간의 분산을 $V[T_2]$ 라 하면,

$$V[T_{21}] = E[T_{21}^2] - (E[T_{21}])^2 \\ = -(t_x^3 - 4t_x^2 t_y - 4t_y^3)^2 / 144t_y^4 \\ = (-3t_x^4 + 10t_x^3 t_y - 5t_y^4) / 30t_y^2$$

이고, $V[T_{22}] = E[T_{22}^2] - (E[T_{22}])^2 = t_y^2 / 12$ 이므로

$$V[T_2] = V[T_{21}] + V[T_{22}] \\ = (-5t_x^6 + 40t_x^5 t_y - 152t_y^4 t_y^2 + 280t_x^2 t_y^3 \\ - 100t_x^2 t_y^4 + 40t_x^6) / 720t_y^4$$

이다. t_x , t_y 를 대입하면 크레인 이동시간의 분산은 아래와 같다.

$$V[T_2] = (40N^6 l^6 v_x^6 - 100R^2 w^2 N^4 l^4 v_x^4 v_y^2 \\ + 280R^3 w^3 N^3 l^3 v_x^3 v_y^3 - 152R^4 w^4 N^2 l^2 v_x^2 v_y^4 \\ + 40R^5 w^5 Nl v_x v_y^5 - 5R^6 w^6 v_y^6) \\ / (720N^4 l^4 v_x^6 v_y^2). \quad (6)$$

크레인 이동시간의 분산에서는 크레인이 유닛 로드를 집고, 놓는 처리 시간은 상수이므로 감안하지 않아도 되므로 $V[U_2] = V[T_2]$ 이 된다.

3.3 재취급시 크레인의 취급 시간 분석(U_r)

재취급이 발생하게 되면 크레인은 같은 열의 임

의의 지점 (X_3 , Y_2) 지점에 재취급 유닛 로드를 옮기게 되고, 크레인은 다시 인출 대상지점인 (X_1 , Y_2) 지점으로 이동하는데 크레인의 이동 경로는 (X_1 , Y_2) → (X_3 , Y_2)가 된다. 인출 대상지점에서 재취급 유닛 로드의 저장위치의 주행 시간을 T_3 로 표시하면, $T_3 = \max\{|X_3 - X_2|, |Y_2 - Y_1|\}$ 가 되고, 이동시간의 누적 확률 밀도함수 $G_3(z)$ 는

$$G_3(z) = \Pr(T_3 \leq z) = \Pr(|X_3 - X_2| \leq z)$$

가 되고,

$$G_3(z) = \begin{cases} z(2t_x - z)/t_x^2, & 0 < z < t_x \text{ 일 때} \\ 1, & t_x < z \text{ 일 때} \end{cases}$$

이므로 이동시간 T_3 의 확률 밀도함수를 $g_3(z)$ 라 하면,

$$g_3(z) = \begin{cases} 2/t_x - 2z/t_x^2, & 0 < z < t_x \text{ 일 때} \\ 0, & t_x < z \text{ 일 때} \end{cases}$$

이다.

3.3.1 재취급시 크레인의 이동시간에 대한 평균 이동 기대 시간과 분산

크레인의 평균 이동 기대 시간을 $E[T_3]$ 라 하면, $E[T_3] = 2 \int_0^\infty z g_3(z) dz = 2t_x / 3$ 이 된다. t_x , t_y 를 대입하면 재취급시 크레인의 평균 이동 기대 시간은 아래와 같다.

$$E[T_3] = 2Rw / 3v_x. \quad (7)$$

재취급시 크레인 이동시간의 분산을 $V[T_3]$ 라 하면, $E[T_3^2] = 4 \int_0^\infty z^2 g_3(z) dz = 2t_x^2 / 3$ 이므로, $V[T_3] = E[T_3^2] - (E[T_3])^2 = 2t_x^2 / 9$ 이다. t_x , t_y 를 대입하면 재취급시 크레인 이동시간의 분산은 아래와 같다.

$$V[T_3] = 2R^2 w^2 / 9v_x^2. \quad (8)$$

3.3.2 재취급 횟수에 대한 평균 기대 횟수와 분산

본 연구에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

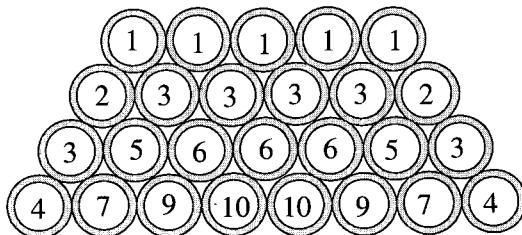
$E[H|R, T, N]$: (R, T, N)의 사양을 가진 적재동에 적재된 임의의 유닛 로드 인출시 기대 취급 횟수.

$V[H|R, T, N]$: (R, T, N)의 사양을 가진 적재동에 적재된 임의의 유닛 로드 인출시 취급 횟수의 분산.

$N_B(R, T)$: 적재층의 수가 T, 최하층 열의 수가 R인 한 베이에 적재된 유닛 로드의 총 개수.

$T_B(R, T)$: 적재층의 수가 T, 최하층 열의 수가 R인 한 베이에 적재된 각 유닛 로드를 인출하기 위해 필요한 취급 횟수를 모든 유닛 로드에 대하여 더한 값.

[그림 5]는 적재층의 수 $T=4$, 최하층 열의 수 $R=8$ 인 피라미드 적재의 예를 보여 주고 있으며, 각 유닛 로드에 적힌 숫자는 해당 유닛 로드를 인출하는데 필요한 해당 취급 기대횟수를 보여주고 있다.



[그림 5] 피라미드 적재시 유닛 로드별 인출을 위한 소요 취급수.

1개 적재동의 한 베이에 쌓여 있는 유닛 로드의 총 개수는 $N_B(R, T) = T(R - T/2 + 1/2)$ 이고, 적재되어 있는 층이 맨 위쪽의 유닛 로드들에 대해서 소요 취급 횟수를 더한 취급수는 $T_1(R, T) = (R - T + 1)$ 이고, 적재되어 있는 층이 위쪽에서부터 두 번째 층인 유닛 로드들에 대해서 소요 취급 횟수를 더한 취급수는 $T_2(R, T) = [(1+2)(R - T + 1 + (-2+1)) + 2(1+2-1)]$ 이다. 따라서 적재되어 있는 층이 위쪽에서부터 k번째 층인 유닛 로드들에 대해서 소요 취급 횟수를 더한 취급수는 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$T_k(R, T) = \left(\sum_{i=1}^k i \right) (R - T + 1 - k + 1) \\ + 2 \sum_{j=1}^{k-1} \left\{ \left(\sum_{i=1}^k i \right) - \left(\sum_{i=1}^j i \right) \right\}$$

한 베이내의 모든 유닛 로드에 대해서 소요 취급 횟수를 더한 총 취급 횟수는

$$T_B(R, T) = \sum_{k=1}^t T_k(R, T) \\ = (6T + 8RT + 3T^2 + 12RT^2 - 6T^3 + 4RT^3 - 3T^4)/24$$

이고, 1개 적재동에서 임의의 유닛 로드를 인출하는데 소요되는 기대 취급수는 아래와 같다.

$$E[H|R, T, N] = \frac{T_B(R, T)}{N_B(R, T)} \\ = (6 + 8R + 3T + 12RT - 6T^2 + 4RT^2 - 3T^3) \\ / 12(2R - T + 1). \quad (9)$$

다음으로 취급 횟수에 대한 분산을 구하면, 한 베이에 대한 소요 취급 횟수의 제곱의 합은

$$T_B[H^2|R, T] \\ = \sum_{k=1}^t \left[\left(\sum_{i=1}^k i \right)^2 (R - T + 1 - k + 1) \right. \\ \left. + 2 \sum_{j=1}^{k-1} \left\{ \left(\sum_{i=1}^k i \right) - \left(\sum_{i=1}^j i \right) \right\}^2 \right] \\ = (30T + 12RT + 97T^2 + 90RT^2 + 45T^3 + 150RT^3 \\ - 80T^4 + 90RT^4 - 75T^5 + 18RT^5 - 17T^6)/360$$

이고, 따라서 적재동에서 임의의 유닛 로드를 인출할 때의 소요 취급 횟수는

$$E[H^2|R, T, N] = \frac{T_B[H^2|R, T]}{N_B(R, T)} \\ = [(2 + 3T + T^2) \{15 + 26T - 24T^2 - 17T^3 \\ + 6R(1 + 6T + 3T^2)\}] / \{180(2R - T + 1)\}$$

이므로 적재동에서 임의의 유닛 로드를 인출하는데 소요되는 취급 횟수에 대한 분산은 아래와 같다.

$$V[H|R, T, N] = E[H^2|R, T, N] - (E[H|R, T, N])^2 \\ = [(T^3 + 2T^2 - T - 2) \times \{(23T^3 + 6T^2 - 59T + 30) \\ + 16R^2(4T + 7) - 8R(11T^2 + 14T - 12)\} \\ / \{720(T - 2R - 1)^2\}]. \quad (10)$$

재취급 횟수의 분산은 취급 횟수의 분산과 같고, 재취급의 기대 취급 횟수는 식 (9)에서 인출 대상의 유닛 로드 1개를 빼야 한다.

3.3.3 재취급 작업에 대한 평균 기대 시간과 분산

재취급시 크레인의 평균 기대 시간과 분산, 재취급 횟수에 대한 기대 취급수와 분산을 각각 구하였다. 재취급의 작업은 재취급 횟수에 비례하여 재취급 시간이 길어진다. 따라서 재취급 작업에 대한 평균 시간은 크레인이 유닛 로드를 집고, 놓는 처리 시간을 감안하고, 재취급에 대한 크레인의 평균 기대 시간에 재취급 기대 횟수를 곱하여 구하면 식 (7)과 식 (9)에 의해 아래와 같다.

$$\begin{aligned} E[U_r] &= p + E[T_3] \times (E[H|R, T, N] - 1) \\ &= p + \left\{ R w (T-1) \times (-3T^2 - 9T + 4RT + 16R + 6) \right\} \\ &\quad / 18(2R - T + 1) v_x. \end{aligned} \quad (11)$$

재취급 작업에 대한 분산은 재취급시 크레인 작업 시간과 재취급 기대 횟수의 분산을 이용하여 도출할 수가 있다. 재취급 작업의 분산은 Ross[11]를 참고하여 식 (8), 식 (9)와 식 (7), 식 (10)에 의해 아래와 같이 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} V(T_r) &= (E[H|R, T, N] - 1) Var[T_3] \\ &\quad + (E[T_3])^2 Var[H|R, T, N] \\ &= [R^2 w^2 (T-1) \times \\ &\quad \{(23T^6 + 75T^4 + 95T^3 + 45T^2 - 478T + 240) \\ &\quad + 16R^2(4T^3 + 19T^2 + 44T + 74)\} \\ &\quad - 4R(22T^4 + 94T^3 + 179T^2 + 209T - 258)] \\ &\quad / \{1620(T-2R-1)^2 v_x^2\}. \end{aligned} \quad (12)$$

크레인 이동시간의 분산에서는 크레인이 유닛 로드를 집고, 놓는 처리 시간은 상수이므로 감안하지 않아도 되므로 $V[U_r] = V[T_r]$ 이 된다.

3.4 운반차량의 평균 이동시간(T_4)

운반차량은 세로 축 방향으로의 소요 거리는 Ml

이고, 주행 시간을 T_4 로 표시하면, 운반차량의 평균 이동 기대 시간을 $E[T_4]$ 라 하고 운반차량의 평균 이동 기대 시간은 아래와 같다.

$$E[T_4] = Ml/v_t. \quad (13)$$

운반차량의 분산을 $V[T_4]$ 라 하고, 운반차량의 분산을 구하면 아래와 같다.

$$V[T_4] = E[T_4^2] - (E[T_4])^2 = 0. \quad (14)$$

3.5 운반차량의 평균 대기 시간(W_s)

운반차량의 도착은 포아송 과정(Poisson Process)을 따르고 단위 시간당 도착율은 λ 이다. 유닛 로드의 입고시에는 전혀 인출 작업이 이루어지지 않는다. 따라서 입고시에는 취급차량의 대기 행렬에서의 대기 시간은 없는 것으로 한다. 크레인이 유닛 로드의 인출 작업 사이를 타임(U_c)은 인출시 취급소요시간(U_2)과 재취급시소요시간(U_r)으로 구성된다. U_c 의 기대시간과 분산은 아래와 같다.

$$E[U_c] = E[U_2] + E[U_r].$$

$$V[U_c] = V[U_2] + V[U_r].$$

〈표 1〉 수행도 측정 공식

평가 기준	공식
평균 도착율	λ
평균 서비스율	$\mu = \frac{1}{(E[U_2] + E[U_r])}$
혼잡도(Traffic intensity)	$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda(E[U_2] + E[U_r])$
서비스시간의 분산	$V = V[U_c] = V[U_2] + V[U_r]$
시스템 내 평균 고객수	$E[L_s] = \rho + \frac{\lambda^2 V + \rho^2}{2(1-\rho)}$
시스템에서의 평균 대기시간	$E[W_s] = \frac{L_s}{\lambda} = \frac{2(1-\rho)\rho + \lambda^2 V + \rho^2}{2(1-\rho)\lambda}$

운반차량의 도착은 포아송(Poisson) 도착율 따른다고 가정하였으므로, 유닛 로드의 인출 작업은

Larson[8]을 참고로 하여 $M/G/1$ 대기행렬 모형으로 정식화된다. 여러 가지 수행도를 평가하는 공식이 <표 1>에 제시되어 있다.

4. 피라미드 적재장의 비용 분석 및 적재동수 산정 수치 예제

피라미드 1개 적재동의 제원과 고정 비용으로 앞에서 제시한 비용 함수를 이용하여 적재능력 (s)이 10,000개 일 때 적재동의 수가 몇 개로 산정하는 것이 가장 적은 비용으로 처리가 가능한지를 결정한다. 이와 함께 가장 적은 비용이 소요되는 적재동의 사양을 결정한다. 또한 적재동의 수에 따른 각종 비용을 비교하고, 비용 함수를 변화시키면서 민감도를 분석한다.

<표 2>는 유닛 로드 1개의 제원과 1개 적재동의 고정 비용을 나타내고 있다. 유닛 로드의 폭과 길이, 운반차량의 속도, 크레인의 트롤리, 캔트리 이동 속도, 크레인의 연간 고정비, 크레인의 시간당 운영비, 운반차량의 시간당 운영비 단위면적당 연간 비용 등을 추정하였다.

<표 3>은 유닛 로드의 적재능력 (s)이 10,000일 때 각 적재동 (M)에서 총비용이 최소가 되는 최적 사양과 총비용, 각종 비용을 표시한 자료이다.

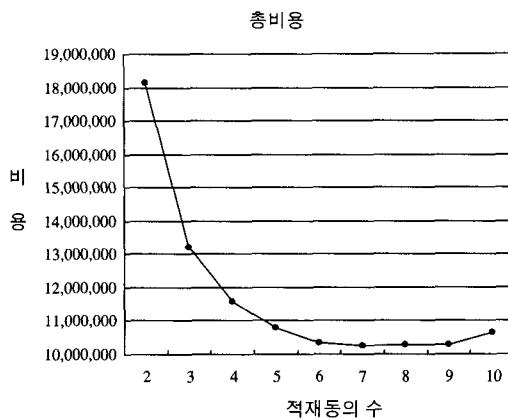
[그림 6]은 유닛 로드의 적재 능력 (s)이 10,000일 경우에 <표 3>의 총비용을 이용하여 몇 개의 적재동 수가 최소의 비용으로 결정 되는지를 보여주는 그림이다. [그림 6]에서 보면 적재동의 수가 7개, 즉 크레인 대수가 7대가 가장 적은 비용이 된다는 것을 보여 주고 있다. λ 는 <표 2>의 값을 적용하였는데 적재동의 수가 1개일 때는 ρ 가 1을 넘어서 처리할 수 없는 상태가 되었다.

<표 2> 1개 유닛로드 제원과 1개 적재동의 비용 계수

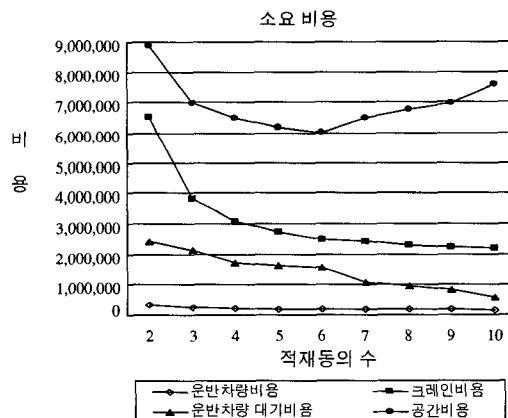
구 分		단위	
유닛 로드의 폭	w	1.1	m
유닛 로드의 길이 (여유공간 포함)	/	2.0	m
운반차량 속도	v_t	2.78	m/sec
차량도착율	λ	0.003171	대/sec
크레인의 트롤리속도	v_x	0.13	m/sec
크레인의 캔트리속도	v_y	0.25	m/sec
크레인의 들기/ 내리기 소요시간	p	20	sec
크레인 초당운영비	c_c	0.08	US\$
크레인의 연간 고정비	c_f	10,000	US\$
운반차량 초당운영비	c_t	0.01	US\$
단위면적당 연간비용 (m^2)	c_s	1,600	US\$

<표 3> 여러 가지 적재동 (M)의 최적 사양 및 총비용

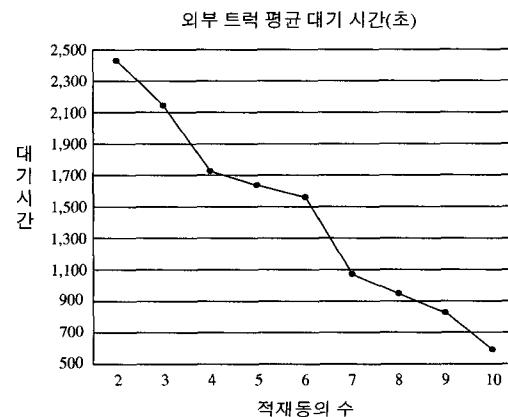
적재동의 수	R	T	N	평균대기 시간	운반차량 비용	크레인비용	운반차량 대기비용	공간비용	크레인 고정비	TC
2	10	5	63	2,431	333,927	6,509,541	2,431,381	8,870,400	20,000	18,165,249
3	11	7	30	2,142	237,808	3,832,349	2,141,440	6,969,600	30,000	13,211,198
4	11	8	21	1,726	211,129	3,104,751	1,726,284	6,504,960	40,000	11,587,124
5	11	9	16	1,633	197,707	2,716,390	1,633,305	6,195,200	50,000	10,792,603
6	11	10	13	1,556	190,463	2,493,230	1,555,852	6,040,320	60,000	10,339,865
7	11	8	12	1,072	188,277	2,421,924	1,072,034	6,504,960	70,000	10,257,196
8	10	9	12	950	175,445	2,309,709	949,520	6,758,400	80,000	10,273,075
9	10	8	11	824	173,225	2,237,916	823,813	6,969,600	90,000	10,294,533
10	9	7	12	590	162,706	2,198,815	589,866	7,603,200	100,000	10,654,586



[그림 6] 적재능력 (s)이 10,000일 경우의 적재동 (M)의 수 산정



(a) 적재동 별 소요 비용



(b) 적재동 별 외부트럭 대기 시간

[그림 7] 적재동 별 대기 시간과 비용 변화

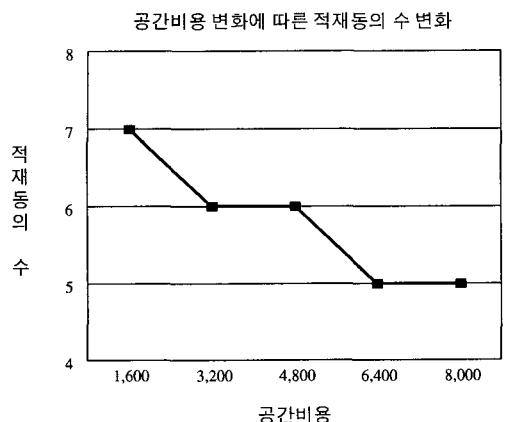
[그림 7](a)는 적재동의 수 별 운반차량, 운반차량 대기 비용, 크레인 비용, 공간비용 변화를 보여주는 그림이다. 크레인 비용과 운반차량 비용, 운반차량 대기 비용은 적재동의 수가 많아짐에 따라서 줄어 들고 있다. 이는 적재동의 수가 많다는 것은 고단적을 하지 않기 때문에 재취급이 적게 발생하므로 크레인의 취급 회수가 적고, 운반차량의 대기 시간이 짧기 때문에 운반차량의 비용과 운반차량 대기 비용이 줄어든다. 고단적을 하는 것은 재취급 비용이 증가하기 때문에 크레인 비용과 운반차량 비용이 증가함을 의미한다. 공간 비용은 적재동의 수가 증가함에 따라 공간 비용은 감소하다가 증가를 보이고 있다. 공간 비용은 적재동의 수가 6개가 가장 작은 공간 비용이 된다는 것을 보여 주고 있다. (b)는 외부 트럭의 평균 대기 시간을 나타내고 있다. 크레인의 대수가 많아짐에 따라서 외부 트럭의 대기 시간이 줄어 든다는 것을 알 수가 있다.

[그림 8]은 단위 면적당 (m^2) 공간 비용을 2배, 3배, 4배, 5배 변화시켜 공간비용과 적재장의 사양의 변화에 대해서 최적해의 변화를 보여주는 그림이다. 본 실험에서 보면 단위 면적당 공간비용을 증가시키면 적재동의 수가 줄어들게 되고, 적재장의 사양은 최하층 열의 수는 증가하게 되고, 베이의 수는 감소하게 되고, 적재층의 수는 증가하게 되는 현상을 나타낸다.

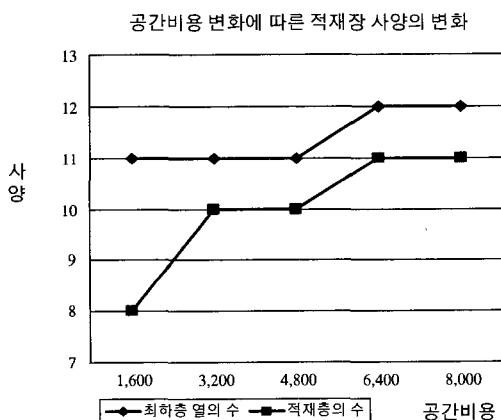
(a)는 공간비용을 증가하였을 경우 각각의 비용에 따른 적재동의 수 변화를 표시한 그림이다. 공간 비용이 증가할수록 적재동의 수를 적게 하면서 고단적을 하는 형태의 적재장이 좋다는 것을 의미한다.

(b)는 공간비용을 증가하였을 경우 각각의 비용에 따른 적재장의 사양 (최하층 열의 수, 적재층의 수) 변화를 표시한 그림이다. 적재층이 높아지는 것은 고단적을 하여 적재동의 수를 줄이는 것을 의미하며, 최하층 열의 수의 증가는 정사각형으로 움직이려는 성향을 보여 주고 있다. 따라서 단위 면적당 공간 비용을 높이면 최하층 열의 수의 증가로 적재장의 모양이 변화 된다.

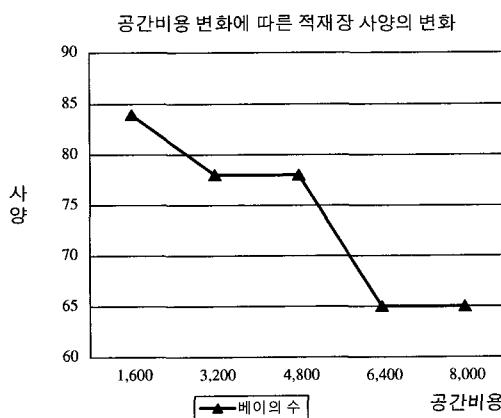
(c)는 공간비용을 증가하였을 경우 각각의 비용



(a) 적재동의 수 변화



(b) 적재장 사양(최하층 열의 수, 적재층의 수)의 변화



(c) 적재장 사양(베이의 수)의 변화

[그림 8] 공간비용 변화에 따른 민감도 분석

에 따른 적재장의 사양 (베이의 수) 변화를 표시한 그림이다. 적재능력이 정해져 있기 때문에 적재층의 수가 증가함에 따라 베이의 수는 낮아지게 된다.

결론적으로 단위 면적당 공간비용을 증가시키면 적재장의 바닥 면적이 가로는 길게 되고, 세로는 짧아지는 경향이 있다.

5. 결론 및 향후 계획

대부분의 적재장에서는 소요공간을 적게 차지하게 하기 위해서는 적재층의 수를 높일 필요가 있다. 적재층의 수를 높이게 되면 소요공간이 적게 차지하므로 비용의 감소로 이어지나 이것은 재취급의 문제가 발생하여 다시 비용의 증가로 이어진다. 따라서 본 연구는 전체 시스템 비용을 최소화 시키는 과정을 통해 적재동의 개수와 적재동의 사양을 결정하는 모형을 제시하였다. 이를 위하여 본 연구는 피라미드 형태의 적재장에서 발생하는 운반차량, 크레인, 공간 비용, 운반차량의 평균 대기비용 등 고려해야 할 사항들의 모든 비용들을 식으로 유도하고, 최적의 적재장의 규모와 크레인 대수 디자인 파라메타를 결정하는 방법을 제시하였다. 유닛 로드의 도착 시각이나 크레인의 대수가 운반차량의 대기시간 등을 좌우하여 서비스 시간 등에 영향을 미치게 될 것이다.

최적의 공간을 디자인하였다 하더라도 동적으로 발생하는 입고는 재취급의 횟수를 줄이기가 어렵게 만든다. 따라서 이렇게 동적으로 변화하는 입고에 대처하여 재취급의 횟수를 줄일 수 있도록 스케줄링하여 적재함으로써 근본적으로 재취급 횟수를 줄여서 생산성의 향상에 기할 수 있도록 더 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Bassan, Y., Y. Roll, and M.J. Rosenblatt, "Internal Layout Design of a Warehouse," *AIIE Transaction*, Vol.12, No.4(1980), pp.

- 317-322.
- [2] Bozer, Y.A. and J.A. White, "Travel-time Models for Automated Storage/retrieval System," *IIE Transaction*, Vol.16, No.4(1984), pp.329-338.
- [3] Bozer, Y.A. and J.A. White, "Design and Performance Models for End-of-aisle Order Picking Systems," *Management Science*, Vol.36, No.7(1990), pp.852-866.
- [4] Kim, K.H., "Evaluation of the Number of Rehandles in Container Yards," *Computer & Industrial Engineering*, Vol.32, No.4 (1997), pp.701-711.
- [5] Kim, K.H. and G.P. Hong, "A Heuristic Rule for Relocation Blocks," *Computers & Operations Research*, Vol.33(2006), pp.940-954.
- [6] Kim, K.H. and H.B. Kim, "Segregating Space Allocation Models for Container Inventories in Port Container Terminals," *International Journal of Production Economics*, Vol.59(1999), pp.415-423.
- [7] Kim, K.H. and H.B. Kim, "The Optimal Sizing of the Storage Space and Handling Facilities for Import Containers," *Transportation Research*, Vol.B36(2002), pp.821-835.
- [8] Larson, R.C. and A.R. Odoni, *Urban Operations Research*, Prentice-Hall, New Jersey, 1981.
- [9] Myoung, Y.S., "Optimal Sequencing of Orders for Picking in a Plate Warehouse," *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol.30, No.4(2004), pp.301-305.
- [10] Park, T.K. and K.H. Kim, "Designing Stacking Facilities of Pyramid Type," *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, To appear, 2007.
- [11] Ross, S.M., *Stochastic Processes*, 2nd Edition, Wiley, California, 1996.
- [12] Yang, G.H. and K.H. Kim, "A Grouped Storage Method for Minimizing Relocations in Block Stacking Systems," *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.17(2006), pp. 453-463.