

스태커 크레인 능력을 고려한  
자동 창고 최적 설계에 관한 연구  
(Optimal Design of Automated Storage/Retrieval  
Systems Considering Capacity of Stacker Cranes)

이 영 해\*, 최 영 하\*\*, 이 문 환\*

### Abstract

AS/RS(Automated Storage/Retrieval Systems) has inflexibility in change after implementation and its initial cost is very high. Therefore, the proper and correct design of AS/RS is needed at the planning stage. Cost and performance are one of the most important factors in AS/RS design. There is a trade-off relationship between them. Velocity and number of stacker cranes have a deep relationship with performance of AS/RS. In this study, a model and a heuristic algorithm for finding optimal rack volumes and velocities of stacker cranes for design of AS/RS are proposed with a numerical example.

---

\* 한양대학교 산업공학과

\*\* LG - EDS

# 1. 서 론

## 1.1 연구 배경

시장 다변화에 따른 생산 및 유통 계획의 빈번한 변화, 수명 주기의 단축, 단납기화, 품질의 고신뢰성 등의 추세는 물품을 효율적으로 저장하고 관리할 용이하게 하는 자동창고에 대한 수요를 촉진하고 있다. 자동 창고는 기존의 창고에 비해 저장 공간의 효율 증가, 인건비의 감소, 재공품 재고의 감소, 재고 관리의 편리함 등의 장점을 지니고 있으나, 이를 설계, 건축하기 위해서는 많은 투자비용을 필요로 하게 된다.

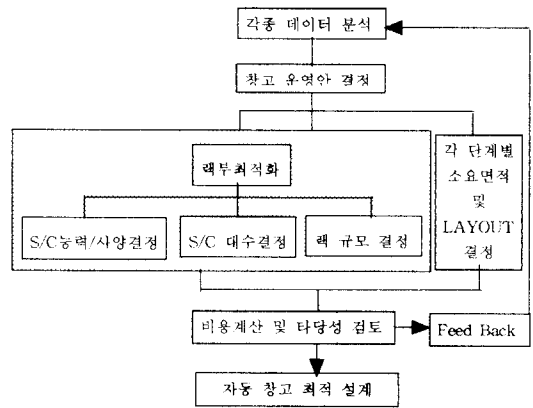
자동창고는 생산과 유통 프로세스에 주로 사용되며 그 규모와 능력에 따라 다양한 용도로 사용될 수 있다. 예를 들어 공장 내에서 제작한 부품이나 외부에서 납입된 부품을 보관하고 출하하기 위한 자재 창고, 생산공장의 중간에 위치하여 가공조립 라인의 능력에 따른 균형을 잡기 위한 중간 창고, 공장에서 생산된 제품의 보관과 발송을 위한 제품 창고, 판매나 지역별로 제품의 일차 보관과 발송을 담당하는 유통 창고 등으로 분류된다. 이와 같이, 자동창고는 여러 가지 장점과 기능을 가지는 반면, 투자비가 높고 도입 후 시스템 변경이 용이하지 못하므로, 설치 목적과 능력이 정확히 반영된 설계가 매우 중요하다.

자동창고의 운영 방법은 스택기 크레인의 운용 정책, 창고 내의 저장 공간에 물품을 어떻게 저장할 것인가 하는 보관 정책으로 대별된다. 스택기 크레인 운영정책은 입출고 방법은 교대로 입출고를 하나씩만 수행하는 단일 명령(Single-Command)방법, 입출고를 동시에 수행하는 이중 명령(Dual-Command)방법, 동시에 2개 이상의 입출고를 해줄

수 있는 다중(Multiple-Command)방법이 있으며, 그 밖에도 명령 수행 후 스택기 크레인의 위치에 대한 Dwell Point를 결정하는 방법 등이 있다. 보관 정책은 창고내의 Rack에 물품을 저장하는 방법으로, 크게 임의(Random)로 저장하는 Random Storage방법 입출고의 위치(I/O point)에서 가장 가까운 곳에 입출고를 해주는 Dedicated Storage방법 및 물품의 종류에 따라 창고를 나누어서 입출고를 시켜주는 Class Based Storage 방법 등이 있다.

자동창고 설계 시에는 재고량, 입출고 빈도수, 입출고 시간 등의 각종 데이터 분석과 이에 따른 창고 운영 안 등이 먼저 결정되어야 한다. 예를 들면, 랙 구조물의 형식에 따라 Building 랙과 Unit 랙으로 대별되는 창고의 유형, 저장단위, 랙(rack)의 형태, 화물의 입출고 지점의 위치, 반송장치의 종류, 보관 정책, 스택기 크레인 운영 방법, 제어 형태 등이다.

자동창고의 설계는 크게 다음 그림 1.1에서와 같은 흐름을 가지며, 기존 연구와 본 연구에서 주로 대상으로 하는 부분은 랙의 규모, 즉 랙의 행, 열, 단수(level)와 스택기 크레인(Stacker Crane, S/C) 대수와 능력을 결정하는 랙 최적화에 해당하는 부분이다.



< 그림 1.1 > 자동창고 설계 흐름도

설계시 랙의 규모와 스택어 크레인의 능력은 상호 연관이 깊다. 예를 들면 랙의 통로(aisle) 개수와 스택어 크레인의 대수, 랙의 높이와 스택어 크레인의 승강속도, 랙의 길이와 스택어 크레인의 주행속도 등은 동시에 고려하여 설계에 반영해야 할 요소이다. 그러나 자동창고 설계에 관한 기존 연구들을 살펴보면 대부분 스택어 크레인의 수행도가 주어진 상황에서 랙 규모를 선정하는 프로세스를 따르고 있다. 이와 같은 방법으로는 정확한 스택어 크레인의 수행도를 정확히 결정하기 어려우며, 복잡한 설계과정을 거쳐야만 한다.

본 연구에서는 위에서 열거한 요소들을 동시에 고려하여 보관량, 요구 입출고 빈도수, 부지 조건의 제약이 주어졌을 때 최소의 비용으로 이들을 만족시키는 자동창고의 랙 규모와 스택어 크레인의 수행도를 산출해 내기 위한 최적화 모델 및 알고리즘을 개발하였다.

## 1.2 기존 연구

지금까지 많은 이들이 자동 창고 문제에 관한 여러 가지 연구와 문제 해결 절차를 제시해 왔다. 이들을 내용상 구분해 보면 크게 세 가지로 구분해 볼 수 있다. 첫째는 자동창고의 최적설계에 관한 연구이며, 둘째는 수행도 평가 및 저장 및 입출고 방법에 관한 연구, 셋째는 스택어 크레인을 포함한 자동창고의 모델링 및 제어 등에 관한 연구 등이다.

이중 자동창고의 최적설계에 관한 문제에 대한 해결방안으로서 수리계획 방법과 시뮬레이션 방법이 있다. 수리모델 방법은 Bassen, et al.(1980)은 총비용을 초기투자비와 운영유지비로 구분하여 이들을 최소화하는 자동창고의 규모를 결정하는 모형을 개

발하였고, Karasawa, et al.(1980)은 스택어 크레인 수와 창고 규모와의 상충관계(trade off) 하에서 비용을 최소화하는 비선형 정수계획의 모형을 제시하였다. Rosenblatt와 Roll(1984)은 총비용을 초기투자비와 저장공간 부족비용 및 저장정책관련 비용으로 구분하고 이를 최소화하는 최적설계를 분석적 방법과 시뮬레이션 방법을 사용하여 구하였다. Ashayeri, et al.(1985)은 임의 저장법 하에서 수명주기기간 동안 총비용을 최소화하는 모형을 개발하였고, Rosenblatt, et al.(1993)은 열의 수보다 스택어 크레인의 수가 같거나 적을 때 비선형정수계획법과 시뮬레이션을 이용하여 총비용을 최소화하였다.

현재까지 자동창고 시스템 설계와 관련하여 여러 가지 수리 모델이 제시되었지만 스택어 크레인의 속도 사양과 같은 시스템 구축시 고려해야 할 사항들이 제대로 반영되지 못한 경우가 많다. Hwang, et al.(1990)은 주어진 랙의 규모와 S/R(Storage and Retrieval) 기계의 능력이 주어졌을 때 이에 적합한 S/R 기계의 속도를 찾아내는 것은 흥미있는 일이며, 추후 연구과제라고 밝혔다.

시뮬레이션에 의한 연구로는 Emerson과 Schmatz(1981)가 창고 크기와 스택어 크레인 수에 의해 변화하는 비용요소만을 고려하여 자동창고 설계시 투자비에 대한 최적화를 시도하였고, Shunmugam, et al.(1985)은 bin사이의 비용을 거리단위로 환산하여 bin간의 이동거리를 최소화함으로써 전체 비용을 최소화할 수 있는 모델을 개발하였다. Rosenblatt, et al.(1993)은 최적화 모델을 통한 해를 시뮬레이션을 통하여 수정하는 Recursive Optimization/Simulation Procedure를 사용하였다. 시뮬레이션 모델을 사용하는 연구들의 공통점은 설

계에 관한 파라미터 값이 알려진 것을 가정하고 알맞은 수행도, 운영정책, 또는 보관정책을 결정하였다.

둘째, 수행도 평가 및 저장 및 입출고 방법에 관한 연구로서, Hausman, et al.(1976)에 의하여 처음으로 SIT(Square In Time) 랙에 대한 연구가 시작되었는데, 서로 다른 저장 방식에 따라 단일 명령을 수행할 때 평균운행시간을 모델링하였고, Grave, et al.(1977)은 서로 다른 저장방식에 따라 이중 명령을 수행할 때 평균운행시간을 모델링하였다. Rosenblatt와 Eynan(1989)은 다등급 저장법(Multi Class Storage)에 따라 단일명령에 대한 평균운행시간을 모델링하였다. Bozer와 White(1984)는 Non-SIT 랙에 대한 연구를 처음으로 시작하였으며, 임의 저장법에 대한 단일명령과 이중명령을 수행할 때 평균운행시간을 모델링하였으며, Pan과 Wang(1996)은 이중명령에 대한 framework를 제시하였으며, Han, et al.(1987)은 이중명령을 연속 수행할 경우 명령의 순서를 결정함에 있어 Nearest Neighbor를 방문할 경우 평균운행시간을 구하였다.

또한 이형랙의 Cycle Time을 계산하는 방법에 관한 내용은 전과 이(1997), Lee and Chun(1998) 등이 연구했다. 출고의 Sequencing이 자동창고의 작업효율에 미치는 영향을 파악하고, 두 가지 형태의 저장공간(Random Access Space & Rack Space)상에서 최적 할당 방법을 분석한 Azadivar(1989)의 연구, 3가지 비용, 즉 초기투자에 관련된 비용, 물품 부족시에 발생하는 비용, 저장정책에 관련된 비용을 고려한 창고의 설계에 관한 연구, 창고용량에 관련된 Random Storage Policy와 Group Storage Policy를 비교, 분석한 Roli et al.(1983) 등의 연구가 있다. 자

동창고에서 발생하는 대기현상을 대기행렬이론으로 분석한 연구는 Lee (1997), Berg(1996), 조(1998) 등이 있다.

셋째, 자동창고 모델링 및 제어에 관한 연구는 Gerald와 Wang(1992) 및 Lin과 Wang (1995)이 Petri Nets를 이용하여 자동창고시스템을 모델링하였으며, Seidmann(1988)은 자동창고시스템에 대한 지능 제어 구조를 연구하였고, Linn과 Wysk(1990)는 전문가시스템을 이용한 제어기를 개발하였다.

자동창고 시스템을 설계할 때에는 다양한 랙 규모와 설비의 대안이 상존하고 있다. 창고의 규모를 결정하고, 적절한 설비의 사양을 선택하고, 우수한 운영, 보관 정책을 선택하는 것이 창고 설계의 주된 관심사가 된다. 그러나, 이러한 일은 다양한 창고 규모로 인하여 어려운 작업이 된다. 모든 가능한 창고 규모에 대하여 적절한 설비 사양을 결정하는 작업은 스택커 크레인 속도가 제약식에 주어지 있는 기존의 수리모델로는 부족하며, 특히 정확한 스택커 크레인의 수행도와 랙 규모를 결정하기 위해서는 시뮬레이션이나 선형 회귀모형과 같은 복잡한 설계 과정을 필요로 한다.

## 2. 문제의 정의 및 가정

### 2.1 가정 및 용어

본 연구의 대상이 되는 자동창고는 다음 그림 2.1과 같이 화물을 보관하는 랙(Rack), 각각의 화물이 보관되는 장소인 단위 Cell, 랙에 화물을 입출고하기 위한 장소인 I/O Point, I/O Point까지 화물을 이동시키고 동시에 버퍼의 역할을 하는 I/O Conveyor, 화물을 창고에 입출고 시키는 스택커 크레인 등으로

구성되어 있다. 하나의 Aisle는 스택기 크레인이 화물을 운반하기 위한 통로와 양쪽의 랙으로 구성되어 있다. 자동창고 시스템에서 필요한 너비와 길이가 모두 포함된 총 길이, 너비, 높이, 부지가 조건으로 주어진다.

본 연구에서는 초기 건설비용, 설비투자비, 운영비의 비용요소를 고려하며, 저장정책은 랜덤저장(Random Storage)정책, 스택기 크레인의 운영정책은 단일명령(Single Command)정책을 사용한다. 또한 스택기 크레인은 입출고를 수행한 후에는 항상 I/O Point에 위치한다고 가정한다. 스택기 크레인 대수와 Aisle수는 같다고 가정한다. 길이, 너비, 높이의 부지 조건과 요구처리물량을 입출고 회수로 환산한 빈도수, 창고 이용률과 화물 보관량으로부터 산출되는 총 요구 Cell수 등이 주요 제약 조건이 된다.

가용한 스택기 크레인의 승강, 주행속도의 최소한계값과 최대 한계값이 주어지며, 스택기 크레인이 화물을 입출고하는데 걸리는 시간인 싸이클 타임의 계산은 Bozer, et al.(1984)에서 제시한 식을 사용하기로 한다.

### 2.1.1 Rack부의 면적 정의

전체 창고 부지 중에서 랙부가 차지하는 총 길이, 너비, 높이 계산 방법은 다음 식(2.1)과 같다.

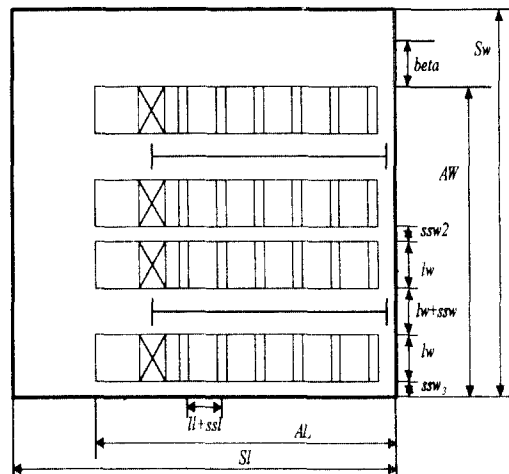
$$\begin{aligned}
 AL &= (ll + ssl) \times (Nb + 1) + ssl_2 \\
 AW &= (lw \times 3 + ssw + ssw_2) \times Na - ssw_2 + ssw_3 \\
 AH &= (lh + ssh) \times Nl + ssh_2 \\
 AL &\leq Sl, \quad AW + beta \leq Sw, \quad AH \leq Sh
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

#### Notation

$AL$ : 랙부가 차지하는 총 길이	$ll$ : 순수 화물 길이
$ssl$ : 단위 Cell의 여유길이	$ssl_2$ : 기타 여유길이
$AW$ : 랙부가 차지하는 총 너비	$lw$ : 순수 화물 너비
$ssw$ : Aisle의 여유 너비	$ssw_2$ : 랙간 여유길이
$ssw_3$ : 측벽과 랙과의 거리	$beta$ : 스템에서 부가적으로 필요한 폭
$AH$ : 랙부가 차지하는 총 높이	$lh$ : 순수 화물 높이
$ssh$ : 단위 Cell의 여유 높이	$ssh_2$ : 최저,최고층의 여유높이
$Sl$ : 길이방향 부지제한	$Nb$ : Bay 수
$Sw$ : 너비방향 부지제한	$Na$ : Aisle 수
$Sh$ : 높이방향 부지제한	$Nl$ : Level 수

그림 2.1은 랙부의 면적 정의에 관한 그림이다.

< 그림 2.1 > 랙부의 면적 정의



### 2.1.2 스택커 크레인 Cycle Time의 계산

스택커 크레인이 1회 입출고 작업 수행에 걸리는 시간을 Cycle Time이라고 한다. Cycle Time은 I/O Point에서 화물을 이동시키는 이동시간(Travel Time), 화물을 싣고 내리는데 드는 Forking Time 등으로 구성되며, 랙의 높이 방향에 대한 스택커 크레인의 승강속도와 랙의 길이방향에 대한 주행속도, 랙의 승강, 주행방향 길이에 의해 계산된다.

스택커 크레인이 승강, 주행하는 거리는 앞서 설명한 랙부의 면적 정의에서의 랙부 길이, 높이와는 약간의 차이가 있으므로 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} L &= (ll + ssl) \times Nb + ssl_3 \\ H &= (lh + ssh) \times (Nl - 1) \end{aligned} \quad (2.2)$$

#### Notation

$L$  : 스택커 크레인의 주행길이

$H$  : 스택커 크레인의 승강길이

$ssl_3$  :  $ssl_2$ 에서 랙과 후벽면 사이의 여유 거리를 뺀 값

여기서는 스택커 크레인의 평균 이동시간을 구함으로서 사이클 타임을 대신한다. Forking Time은 일반적으로 랙의 규모, 스택커 크레인의 승강, 주행 속도와는 무관하기 때문이다. Bozer, et al.(1984)에 의한 단일명령 평균 이동시간 계산은 식 (2.3)과 같다.

$$\begin{aligned} E(SC) &= \frac{1}{3}b^2 + 1 \\ \overline{E(SC)} &= E(SC)Y \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기에서 스택커 크레인의 주행속도를  $s_h$ , 승강 속도를  $s_v$ 라 정의하고, I/O Point로부터 위치하고자 하는 Cell까지 도달하는데 걸리는 스택커 크레인 주행속도에 대한 시간을  $t_h$ , 승강속도에 대한 시간을  $t_v$

라 하면,  $t_h = L/s_h$ ,  $t_v = H/s_v$ 가 된다.  $T = \text{Max}\{t_h, t_v\}$ ,  $b = \text{Min}\{t_h/T, t_v/T\}$ 라 정의하고, 이때  $b$ 를 "shape factor"라고 부른다.  $t_h = t_v$ 일때,  $b = 1$ 이 되며 이때 랙은 시간적으로 정사면체를 이루게 된다.

### 2.1.3 요구 Cycle Time 계산

한편 랙 규모의 대안 각각에 대해, 요구되는 단위 시간당 이동 회수와 스택커 크레인 대수, 이용률을 만족시키는 스택커 크레인의 1회 이동시간을  $ct$ 라 하자. 이는 스택커 크레인이 적어도  $ct$ 시간 안에는 1회 이동을 완료해야 한다는 의미를 가진다.

$$ct = \frac{R}{tpt \cdot su} \quad (2.4)$$

#### Notation

$tpt$  : 요구되는 단위시간당 이동 회수

$su$  : 스택커 크레인 이용률

$R$  : 스택커 크레인 대수 (=  $Na$  : Aisle 수)

## 2.2 문제 정의

먼저, 자동창고의 랙부 설계시 필요한 입력 자료와 출력 자료를 현실적인 시각에서 제시해 보자. 자동창고시스템에 보관해야 할 총 pallet의 개수 (Storage Volume)와 요구되는 입출고 빈도수 (throughput requirement), 스택커 크레인의 승강/주행 최소/최대 속도 한계치, 건설하고자 하는 부지 조건의 제약이 주어졌을 때, 이러한 사항들을 만족시키기 위한 자동창고의 랙 규모(행, 열, 단 수)를 산출하고, 입출고 능력을 만족시키는 스택커 크레인 (Stacker Crane)의 승강, 주행 속도를 선정하고 비용을 산출하여 가장 경제적인 자동창고를 최적 설계하는 것을 최종 목적으로 한다. 이때 고려되는 입력변

수는 다음 표2.1과 같다.

한편, 이때 총 저장 요구 Cell 수와 창고 이용률이 주어졌을 때 이에 따른 실제로 존재해야 할 창고의 보관Cell수를  $n$ 이라 할 때 다음과 같이 계산된다.

$$n = \lceil tn/pn \rceil \quad (2.5)$$

여기에서  $n$  은 올림으로 계산된 정수이고,

$tn$  : 총 저장 요구 Cell 수,

$pn$  : 창고 이용률

### 3. 자동 창고 최적 설계 모델 및 알고리즘

부지조건, 스택커 크레인 대수와 능력은 랙 규모 결정에 큰 변수가 된다. 랙은 주어진 부지조건과 스택커 크레인의 능력을 초과하는 규모로 선정되어서는 안되며, 스택커 크레인의 능력은 요구되는 단위

< 표 2.1 > 입력 변수

분류	입력변수
부지 관련	- 총 저장 요구 Cell 수와 창고 이용률 - 창고 시스템의 총 길이, 너비, 높이 - 순수 화물의 길이, 너비, 높이
설비 관련	- 단위시간당 처리요구 물량 - 스택커 크레인 이용률 - 스택커크레인의 승강 최소/최대속도한계치 - 스택커크레인의 주행 최소/최대속도한계치
비용 관련	- 벽, 천정, 부지의 m <sup>2</sup> 당 공사 및 구입 비용 - Cell당 랙 설치비용 - 스택커크레인용 Rail의 단위길이(m) 당 비용 - S/C 단위높이당 설치비용 - Aisle 및 S/C에 대한 설비 고정비 - 연간 설비 유지비용 - 감가상각률 - 자동창고의 경제적 수명(년)

시간당 이동 회수를 처리할 수 있어야 한다. 이러한 내용을 반영하여, 스택커 크레인의 속도를 결정변수 화하고, 랙 규모에 대한 제약을 충분히 반영시킨 최적화 모델을 제시한다. 또한 제시한 최적화 수리 모델의 단점을 보완하고 이들을 적은 계산량으로 산출해 낼 수 있는 알고리즘을 제시한다.

### 3.1 목적 함수와 제약식

본 연구에서 제시하는 최적화 모델에는 스택커 크레인의 최소, 최대 속도 한계치가 주어진 입출고 빈도수를 만족하도록 하는 제약식, 부지조건 및 요구 저장량을 고려한 제약식, 주행 길이, 승강 길이에 대해 주어진 입출고 빈도수를 만족하는 스택커 크레인의 속도 범위 만족 여부에 대한 제약식이 포함되어 있다. 제안하는 목적함수와 제약식은 다음과 같으며 결정변수는 랙의 행, 열, 단수, 스택커 크레인의 승강 및 주행 속도가 된다.

$$\text{목적함수 : } \mathit{Min} \quad TC = CC + CE + CO \quad (3.1)$$

( $CC$  : 건축비,  $CE$  : 설비비,  $CO$  : 운영비)

제약식 :

$$sch \min \leq \frac{4L}{3ct} \leq sch \max \quad (3.2)$$

$$scv \min \leq \frac{4H}{3ct} \leq scv \max \quad (3.3)$$

$$Nb \leq nbmax \quad (3.4)$$

$$Nh \leq nhmax \quad (3.5)$$

$$Na \leq namax \quad (3.6)$$

$$Na \geq \frac{n}{2 \cdot nbmax \cdot nhmax} \quad (3.7)$$

$$2 \times Nb \times Nh \times Na \leq n \quad (3.8)$$

$$G_1, G_2, G_3, G_4 \quad (3.9)$$

부등식  $G_1, G_2, G_3, G_4$ 는 다음과 같은 조건과 식에 의해, 네 가지 제약 조건 중 두 가지의 조합으로 결정된다.

(1)  $G_1, G_2$

$tv=H/scvmax$ 이라 두면

$$th = \begin{cases} \frac{\sqrt{3 \cdot ct \cdot tv - 3 \cdot tv^2}}{2} & \text{for } th \leq tv \\ \frac{ct + \sqrt{ct^2 - \frac{4}{3}tv^2}}{2} & \text{for } th > tv \end{cases} \quad \text{이며,}$$

$schmin \leq \frac{L}{th}$  이면,

$$\begin{cases} G_1 \equiv schmin \leq \frac{L}{th} \leq sh \\ G_2 \equiv sv \leq scvmax \end{cases} \quad (3.10)$$

혹은,  $schmin > \frac{L}{th}$  이면,

$th=L/schmin$  이고

$$tv = \begin{cases} \frac{\sqrt{3 \cdot ct \cdot th - 3 \cdot th^2}}{2} & \text{for } tv \leq th \\ \frac{ct + \sqrt{ct^2 - \frac{4}{3}th^2}}{2} & \text{for } tv > th \end{cases} \quad \text{이며,}$$

$$\begin{cases} G_2 \equiv sv \leq \frac{H}{tv} \leq scvmax \\ G_1 \equiv schmin \leq sh \end{cases} \quad (3.11)$$

(2)  $G_3, G_4$

$th=L/schmax$ 이라 두면

$$tv = \begin{cases} \frac{\sqrt{3 \cdot ct \cdot th - 3 \cdot th^2}}{2} & \text{for } tv \leq th \\ \frac{ct + \sqrt{ct^2 - \frac{4}{3}th^2}}{2} & \text{for } tv > th \end{cases} \quad \text{이며,}$$

$schmin \leq \frac{H}{tv}$  이면

$$\begin{cases} G_3 \equiv svmin \leq \frac{H}{tv} \leq sv \\ G_4 \equiv sh \leq schmax \end{cases} \quad (3.12)$$

혹은,  $schmin > \frac{H}{tv}$  이면,

$tv=H/scvmin$  이고

$$th = \begin{cases} \frac{\sqrt{3 \cdot ct \cdot tv - 3 \cdot tv^2}}{2} & \text{for } th \leq tv \\ \frac{ct + \sqrt{ct^2 - \frac{4}{3}tv^2}}{2} & \text{for } th > tv \end{cases} \quad \text{이며,}$$

$$\begin{cases} G_4 \equiv sh \leq \frac{L}{th} \leq schmax \\ G_3 \equiv scvmin \leq sv \end{cases} \quad (3.13)$$

목적함수는 3.1.2, 제약식은 3.1.3에서 자세히 설명한다.

### 3.1.1 스택어 크레인 비용 함수

본 연구에서는 랙 규모의 대안별 수행도에 대한 비용 평가를 위해, 스택어 크레인에 대한 비용함수를 도출하여 설비비용에 추가시켰다. 스택어 크레인의 비용은 승강 속도에 대한 비용함수, 승강 길이에 대한 비용함수, 주행 속도에 대한 비용함수, 주행 길이에 대한 비용함수, 고정비의 다섯 개의 값으로 구성된다.

(1) 승강 속도에 대한 비용함수

승강속도에 따른 비용함수는 식 (3.14)로 표시하며, 계단함수(step function)의 형태를 가진다.

$$f_1 = Csv, \quad (3.14)$$

(2) 승강 길이에 대한 비용함수

단위 길이당 비용을  $Cah$ 로 표시하며, 식 (3.15)와 같다.

$$f_2 = Cah \cdot H \quad (3.15)$$

(3) 주행 속도에 대한 비용함수

주행 속도에 따른 비용함수는 식 (3.16)로 표시하며, 계단함수(step function)의 형태를 가진다.

$$f_3 = Csv_j \quad (3.16)$$

(4) 주행승강 길이에 대한 비용함수

단위 길이당 비용을  $Cal$ 로 표시하며, 식(3.17)과



같다.

$$f_4 = Cal \cdot L \quad (3.17)$$

(5) Aisle과 스택어 크레인에 대한 고정비

Aisle 및 스택어 크레인에 관련된 소방기구, detector, stopper 등에 대한 비용인 고정비는  $C_B$ 로 표시한다. 스택어 크레인 및 Aisle의 해당 비용( $C_s$ )은 이들의 합으로 나타내며 식(3.18)과 같다.

$$C_s = \sum_i C_{sv_i} + Cah \cdot H + \sum_j C_{sh_j} + Cal \cdot L + C_B \quad (3.18)$$

### 3.1.2 목적 함수

목적 함수는 건축비, 설비비, 운영비의 세 부분으로 이루어져 있으며, Rosenblatt, et al.(1993)의 비용 모델을 수정한 것이다. 본 논문에 사용된 비용 파라미터는 다음과 같다.

$C_{c_1}$  : 벽의  $m^2$ 당 공사비

$C_{c_2}$  : 천정의  $m^2$ 당 공사비

$C_f$  :  $m^2$  당 기초 공사비 및 부지 비용

$C_p$  : Cell당 랙 설치비용

$C_{sv_i}$  : 스택어 크레인 승강 속도에 대한 비용

$C_{sh_j}$  : 스택어 크레인 주행 속도에 대한 비용

$Cal$  : 스택어 크레인용 Rail의 단위길이(m)당 설치 비용

$Cah$  : 스택어 크레인 단위높이(m)당 비용

$C_B$  : Aisle 및 S/C에 대한 설비 고정비

$I$  : 연간 설비 유지비용

$r$  : 감가상각률

$T$  : 자동창고의 경제적 수명(년)

$Z$  : 이자율을 고려한 현재 가치율

$$Z = \sum_{t=1}^T (1+r)^{-t} \quad (3.19)$$

(1) 건축비(Construction Cost) :  $CC$

시스템이 차지하는 길이, 너비 높이가 각각  $AL$ ,  $AW$ ,  $AH$ 일 때, 부지에 대한 구입 및 기초공사 비용과 벽, 천정의 건축비용은 다음과 같다.

$$CC = C_{c_1} \times (AW + AL) \times AH + (C_{c_2} + C_f) \times (AW \times AL) \quad (3.20)$$

(2) 설비비(Equipment Cost) :  $CE$

랙 구조물, 팔렛(pallet), 스택어 크레인의 비용( $C_s$ )을 합하면 다음과 같다.

$$CE = C_s \times Na + Nb \times Na \times Ni \times Cp \quad (3.21)$$

(3) 운영비(Operating Cost) :  $CO$

운영비는 설비비( $CE$ )에 대한 %로 주어지는 연간 유지비용  $I$ 와 감가상각을 고려한 비용으로 다음과 같다.

$$CO = CE \times Na \times I \times Z \quad (3.22)$$

건축비, 설비비, 운영비를 합한 총 비용( $TC$ )은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$TC = CC + CE + CO \quad (3.23)$$

따라서 목적 함수는 다음과 같이 간략하게 쓸 수 있다.

$$\text{Min } TC = CC + CE + CO \quad (3.24)$$

### 3.1.3 제약식

기존 연구를 보면 랙 규모 결정시 스택어 크레인의 능력은 주어지는 경우가 대부분이었다. 예를 들어 Rosenblatt, et al.(1993)은 비용에 대한 최적화 모델을 도입하여 랙의 행, 열, 단수를 결정하였으나, 부지 조건과 총 Cell수의 제약은 포함되어 있는 반면, 스택어 크레인의 능력을 결정하지는 못했다.

Ashayeri, et al.(1985)의 최적화 모델에 평균 이동시간을 제약식으로 포함시켰으나 높이를 고정시킨 제한적인 모델이다.

Aisle의 개수와 스택커 크레인의 대수, 랙의 길이와 높이는 스택커 크레인의 승강, 주행 속도와 직접적인 관계가 있으므로 랙 규모 결정시 반드시 함께 고려해 주어야 한다.

부지에 대한 최대 행, 열, 단수는 다음과 같이 구한다.

$$\text{최대 행수} : n_{lmax} = (Sl - ssl_2) / (ll + ssl) - 1 \quad (3.25)$$

$$\text{최대 단수} : n_{hmax} = (Sh - ssh_2) / (lh + ssh) \quad (3.26)$$

최대 열수 :

$$na = (Sw + ssw_2 - ssw_3) / (lw \times 3 + ssw + ssw_2) \quad (3.27)$$

( $n_{lmax}$ ,  $n_{hmax}$ ,  $na$ 값은 올림으로 계산된 정수)

스택커 크레인 최소 속도 한계치에 대한 최대 Aisle수  $ne$ 를 다음과 같이 계산하여 위에서 구한  $na$  값과 비교하여 작은 값을 최대 열수( $namax$ )로 삼는다.

$$tv = \frac{Sh - ssh_2}{scvmin}, \quad th = \frac{Sl - ssl_2}{schmin} \quad (3.28)$$

여기에서,

$schmin$  : 스택커 크레인 최소 주행 속도 한계치

$scvmin$  : 스택커 크레인 최소 승강 속도 한계치

$schmax$  : 스택커 크레인 최대 주행 속도 한계치

$scvmax$  : 스택커 크레인 최대 승강 속도 한계치

만일  $tv > th$  면,  $b = \frac{th}{tv}$ ,  $T = \max\{tv, th\} = tv$ 가 되므로 이때의 Cycle Time  $ctmin$ 는

$$ctmin = \left[ \frac{1}{3} (th/tv)^2 + 1 \right] \times tv \quad (3.29)$$

가 되고,  $tv < th$  이면,  $b = \frac{tv}{th}$ ,  $T = \max\{tv, th\} = th$ 가 되며 이때의 Cycle Time  $ctmin$ 는

$$ctmin = \left[ \frac{1}{3} (tv/th)^2 + 1 \right] \times th \quad (3.30)$$

가 되며, 스택커 크레인 최소 속도에 대한 최대 Aisle수  $ne$ 는

$$ne = ctmin \times tpt / 60 / su \quad (3.31)$$

( $ne$ 값은 올림으로 계산된 정수)

가 된다. 따라서 최대 열수,  $namax$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$namax = \min(ne, na) \quad (3.32)$$

또한, 랙 규모의 각 대안에 대해 스택커 크레인이 승강/주행해야 할 총 길이( $H$ ,  $L$ )와 속도( $sv$ ,  $sh$ )를 알고 있을 때 소요되는 승강/주행 시간인  $tv$ ,  $th$ 를 구해 낼 수 있으며 그 방법은 다음과 같다.

식(2.3)에 요구되는 Cycle Time  $ct$ 값을 적용하여 보면

$$\left[ \frac{1}{3} b^2 + 1 \right] \times T = ct \quad (3.33)$$

이며, 다음 식을 통하여  $tv$ 가 주어졌을 때의  $th$ 값과,  $th$ 가 주어졌을 때의  $tv$  값을 계산해 낼 수 있다.

$$th > tv \text{ 이면 } \left[ \frac{1}{3} \frac{tv^2}{th^2} + 1 \right] \times th = ct \text{ 이므로}$$

$$th^2 - ct \times th + \frac{1}{3} tv^2 = 0 \quad (3.34)$$

$$\text{그렇지 않으면 } \left[ \frac{1}{3} \frac{th^2}{tv^2} + 1 \right] \times tv = ct \text{ 이므로}$$

$$tv^2 - ct \times tv + \frac{1}{3}th^2 = 0 \quad (3.35)$$

이상과 같은 이론을 바탕으로 구성된 각 제약식의 의미는 다음과 같다.

(1) 식 (3.2), (3.3) : 스택커 크레인의 최소, 최대속도가 주어진 입출고 빈도수를 만족하는가를 고려한 제약식

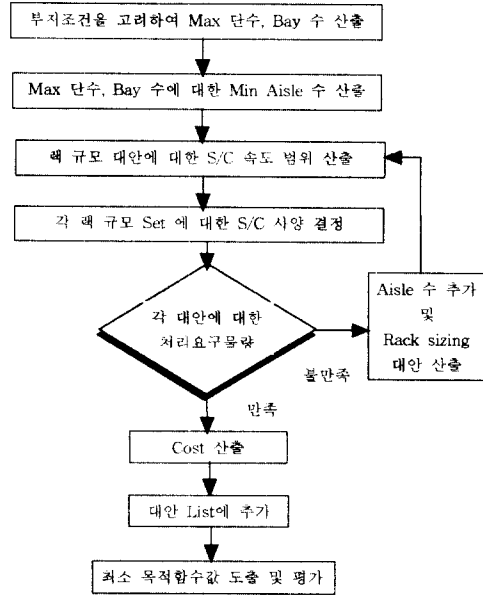
(2) 식 (3.4), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8) : 부지조건과 총 요구 Cell수를 만족하는가를 고려한 제약식

(3) 식 (3.9) : 입출고 빈도수를 통한 스택커 크레인의 속도 범위의 만족 여부에 대한 제약식

### 3.2 알고리즘

앞서 제시한 최적 수리 모델은 여러 가지 조건과 경우가 들어 있는 비선형 혼합 정수 계획법으로 그 해법이 난해하다. 또한 스택커 크레인 속도에 관한 변수가 연속적인 값을 가지므로 일반적으로 불연속적인 사양을 가지는 실제 문제에 적용하기에 부적합한 단점을 가지고 있다. 따라서, 제시된 최적 수리 모델을 풀고, 이의 단점을 보완하기 위한 방법으로 총 Cell 수, 창고 시스템의 부지 제한, 요구 입출고 빈도수, 스택커 크레인의 승강/주행 최소/최대 속도 한계치를 만족하는 랙 규모의 대안 set을 구성하는 알고리즘과, 각 대안에 대한 가용 스택커 크레인의 속도 범위를 산출하는 알고리즘, 또 이 범위를 기준으로 각 대안에 대한 스택커 크레인의 속도 사양을 결정하는 알고리즘을 제시한다 (그림 3.3참조).

결정변수들에 대해 랙 규모의 대안과 가용한 속도의 범위를 계산하고, 각 랙 규모 대안과 속도 범위 사이의 값으로 구성되는 Set에 대해 주어진 제약들을 만족시키는 Feasible Set을 도출한다. 또한 이들



< 그림 3.3 > 자동창고 최적 설계 알고리즘 순서도

알고리즘을 통해 구성된 Feasible Set을 평가하기 위하여, 건설비용, 스택커 크레인의 비용이 포함 된 설비비용, 운영비용으로 구성된 목적 함수를 제안한다. 마지막으로 각 대안에 대한 비용 평가와 수행도 평가를 통해 주어진 수행도를 만족시키면서 최소의 비용을 달성하는 랙 규모와 스택커 크레인의 사양을 구해내는 방법을 설명한다.

#### 3.2.1 랙 규모의 대안 set 구성 알고리즘

Aisle의 수와 단(Level)의 수는 열(Bay)의 개수에 비해 변동시 이들로 구성되는 총Cell의 개수 변화가 크다. 따라서 Aisle과 단의 수를 변화시켜 가면서 이들의 조합을 통해 다양한 랙 규모를 산출하는 방법을 먼저 생각해 볼 수 있다. 그러나 부지 조건이 주어졌을 때의 모든 가능한 랙 규모들 중에는 가장 우수한 성능을 가지는 스택커 크레인조차 단위시간당

요구되는 입출고 빈도수를 만족시키지 못하는 대안들도 포함되어 있다.

모든 가능한 종류의 랙 규모는  $b=1$ 일 때의 스택 크레인 속도를 구할 수 있다. 다시 말해  $b=1$ 일 때 가능한 랙 규모의 종류는 모든 가능한 랙 규모의 종류가 되며,  $b < 1$ 일 때의 랙 규모의 종류는  $b=1$ 일 때의 모든 가능한 랙 규모의 대안에 포함된다. 앞서 설명한 바와 같이 어떤 종류의 랙 규모에서 랙이 시간적으로 정사각형이 되었다( $b=1$ )는 것은  $t_h = t_v$ 를 의미한다. 이는 어느 Cell까지 이동하는데 걸리는 시간인  $T = \text{Max}\{t_h, t_v\}$ 를 최소화할 수 있는 조건이 된다.

어떤 주어진 랙 규모에 대해서는  $L$ 과  $H$ 를 알 수 있다. 알려진  $L$ 과  $H$ 에 대해  $b=1$ 인 경우 식 (2.3)에 식 (2.4)에서 구한  $ct$ 를 적용하면

$$\frac{4}{3} \times T \leq ct \quad (3.36)$$

$b=1$ 일 때  $T = t_h$  또는  $T = t_v$ 가 되고  $t_h = L/s_h$ ,  $t_v = H/s_v$ 이므로 식 (3.36)으로부터 유도된 다음 식 (3.37)을 만족하는  $s_h$ ,  $s_v$ 의 최대값  $M_{s_h}$ ,  $M_{s_v}$ 을 식 (3.38)을 통해 계산해 낼 수 있다.

$$\begin{cases} s_h \geq L/ct/0.75 \\ s_v \geq H/ct/0.75 \end{cases} \quad (3.37)$$

$$\begin{cases} M_{s_h} = L/ct/0.75 \\ M_{s_v} = H/ct/0.75 \end{cases} \quad (3.38)$$

$M_{s_h}$ ,  $M_{s_v}$  값은 어떤 랙 규모의 최소의 이동시간에 대한 주행방향과 승강방향에 대한 최대 주행, 승강 속도가 됨을 알 수 있다. 따라서 이 값이 입력변수로 주어진 스택 크레인의 최대 속도 한계치보다 큰 경우에는 이 랙 대안을 만족시킬 능력을 가진 스택 크레인이 존재하지 않게 되므로 랙 규모로서의 의미를 잃게 된다. 따라서 랙 규모 결정의 최종 대

안으로부터 삭제가 가능하다. 이상의 이론에 근거하여 랙 규모결정 대안을 산출하여 랙 규모의 대안 리스트를 만들 수 있으며, 이의 알고리즘은 다음과 같다.

**Step 1.** 최대 행, Aisle, 단수, 최소 Aisle수를 각각 구한다.  $nlmax$ ,  $namax$ ,  $nhmax$ ,  $na$ 를 구한다.

**Step 2.** 최소 Aisle수  $na$ 와 최대 단수  $nhmax$ 로부터 총 Cell수  $n$ 에 대한 행(Bay)수를 구하고, 이를 현재의 랙 규모로 삼는다. 식 (3.38)을 사용하여 구한  $M_{s_u}$ ,  $M_{s_h}$ 값이 다음 식 (3.39)을 만족하면 대안 리스트에 현 랙 규모를 추가한다.

$$scvmin \leq M_{s_v} \leq scvmax \text{ and } schmin \leq M_{s_h} \leq schmax \quad (3.39)$$

**Step 3.** 현재 랙 규모로부터 단 수를 하나 줄여 이에 대한 행수를 구하여 현재의 랙 규모로 삼고, 이때 구한  $M_{s_u}$ ,  $M_{s_h}$ 값이 식(3.39)를 만족하면 대안 리스트에 현 랙 규모를 추가한다. 이를 단 수나 행수가 1이 될 때까지 반복한다.

**Step 4.** Aisle수를 하나 늘리고 단수를 최대 단수  $nhmax$ 로부터 하나씩 줄여가면서 Step 3을 반복한다.

**Step 5.** Aisle수가  $namax$ 값이 될 때까지 Step 4를 반복한다.

Step 1.부터 Step 5.를 통하여 총 Cell 수, 창고 시스템의 부지제한, 단위시간당 처리요구 물량, 스택 크레인의 승강/ 주행 최소/최대 속도 한계치를 만족하는 랙 규모의 대안 리스트를 작성할 수 있다.

### 3.2.2 스택 크레인 속도 범위 결정

랙 규모의 각 대안에 대해 스택 크레인이 승강/

주행해야 할 총 길이( $H, L$ )와 속도( $sv, sh$ )를 알고 있을 때 소요되는 승강/주행 시간인  $tv, th$ 를 구해 낼 수 있다. 또한 최적화 모델의 제약식을 구성하기 위해 설명했던 식 (3.34)와 (3.35)에 의해 스택커 크레인의 최소/최대 승강/주행 속도의 범위를 구할 수 있다.

다음은 랙 규모의 각 대안에 대한 스택커 크레인의 최소/최대 속도 범위를 구하는 알고리즘과 이를 위한 *Notation*이다.

**Notation :**

- $minsh$  : 스택커 크레인 최소 주행 속도
- $maxsh$  : 스택커 크레인 최대 주행 속도
- $minsv$  : 스택커 크레인 최소 승강 속도
- $maxsv$  : 스택커 크레인 최대 승강 속도

**Step 1.** 최대승강 속도로부터 최소주행 속도 구하기

- 1)  $maxsv = scvmax$
- 2)  $tv = H / maxsv$  ( $tv$ 는 상수)
- 3)  $th \leq tv$  라고 가정하면 (3.35)식에 의하여

$$th = \sqrt{3ct \cdot tv - 3tv^2} \quad (3.40)$$

$th \leq tv$  를 만족하지 않는 경우에는 (3.34)식에 의하여

$$th = \frac{ct + \sqrt{ct^2 - \frac{4}{3}tv^2}}{2} \quad (3.41)$$

가 된다.

- 4) 위에서 구한  $th$ 가  $schmin \leq L/th$  를 만족하면

$$maxsv = scvmax \quad (3.42)$$

$$minsh = L / th \quad (3.43)$$

가 되며 Step 1.을 종료하고 Step 3.로 간다.

- 5)  $th$ 가  $schmin \leq L/th$  를 만족하지 않는 경우에는 Step 2.로 간다.

**Step 2.** 최소주행 속도로부터 최대승강 속도 구하기

- 1)  $minsh = schmin$ 로 두며 이에 대응되는  $th$ 는  $th = L / minsh$ 가 된다.

- 2)  $th \geq tv$  라 가정하면 (3.34)식에 의하여,

$$tv = \sqrt{3ct \cdot th - 3th^2} \quad (3.44)$$

$th \geq tv$  를 만족하지 않는 경우에는 (3.35)식에 의하여

$$tv = \frac{ct + \sqrt{ct^2 - \frac{4}{3}th^2}}{2} \quad (3.45)$$

가 된다.

- 3) 랙 규모의 대안은 처음부터 스택커 크레인의 최대 속도 한계치를 고려한 것이므로 위에서 구한  $tv$ 는  $H/tv \leq scvmax$ 를 만족하며,

$$maxsv = H / tv \quad (3.46)$$

$$minsh = schmin \quad (3.47)$$

이 된다. Step 3.으로 간다.

**Step 3.** 최대주행 속도로부터 최소승강 속도 구하기

- 1)  $maxsh = schmax$
- 2)  $th = L/maxsh$ 일 때  $th$ 는 상수가 됨.
- 3)  $th \geq tv$  라 가정하면 (3.34)식에 의하여,

$$tv = \sqrt{3ct \cdot th - 3th^2} \quad (3.48)$$

$th \geq tv$  를 만족하지 않는 경우에는 (3.35)식에 의하여

$$tv = \frac{ct + \sqrt{ct^2 - \frac{4}{3}th^2}}{2} \quad (3.49)$$

가 된다.

- 4) 위에서 구한  $tv$ 가  $scvmin \leq H/tv$  를 만족하면,

$$minsv = H / tv \quad (3.50)$$

$$maxsh = schmax \quad (3.51)$$

가 되며 알고리즘을 종료한다.

- 5)  $tv$ 가  $scvmin \leq H/tv$  를 만족하지 않는 경우에는, Step 4.로 간다.

**Step 4.** 최소승강 속도로부터 최대주행 속도 구하기

- 1)  $minsv = scvmin$ 로 두며 이에 대응되는  $tv$ 는

$tv = H / mansu$  가 된다.

2)  $th \leq tv$  라고 가정하면 (3.35)식에 의하여

$$th = \sqrt{3ct \cdot tv - 3tv^2} \quad (3.52)$$

$th \leq tv$  를 만족하지 않는 경우에는 (3.34)식에 의하여

$$th = \frac{ct + \sqrt{ct^2 - \frac{4}{3}tv^2}}{2} \quad (3.53)$$

가 된다.

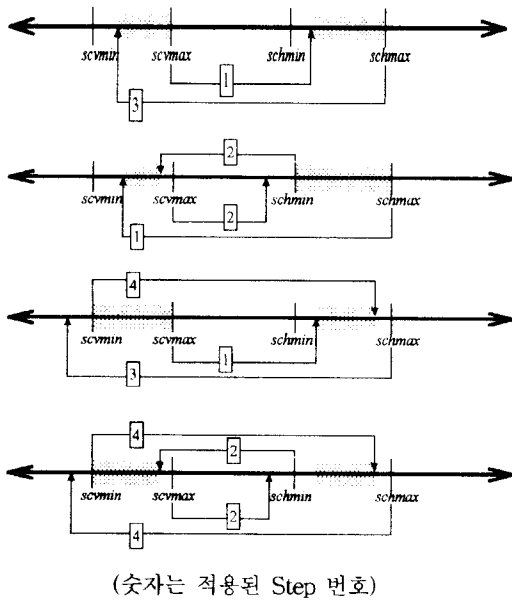
3) 랙 규모의 대안은 처음부터 스택어 크레인의 최대 속도 한계치를 고려한 것이므로 위에서 구한  $th$ 는  $L/th \leq schmax$  를 만족하며,

$$minsv = scvmin \quad (3.54)$$

$$maxsh = L / th \quad (3.55)$$

이 된다. 알고리즘을 종료한다.

상기한 알고리즘을 통하여 가능한 속도 범위를 구할 때 발생 가능한 경우는 모두 네 가지이며, 이를 도식화하면 그림 3.4와 같다.



< 그림 3.4 > S/C 속도 범위를 구하는 방법

### 3.2.3 스택어 크레인 속도 대안 도출

스택어 크레인의 속도 한계치로 구성된 하나의 범위를 몇 개의 구간으로 나누어 볼 수 있다. 각 구간은 실제로 적용 가능한 스택어 크레인의 사양을 의미하며, 실제 문제에 이것을 적용할 경우에는 실제 스택어 크레인의 사양에 대해 적용 가능하도록 구간 개수를 조절해 주는 것이 중요하다. 예를 들어 승강 속도가 10m/min ~ 60m/min, 주행속도가 60m/min ~ 160m/min의 한계치를 가지는 경우, 승강속도의 1개 구간이 5단위로 구성될 때 구간 수는 10개가 된다. 또한, 주행속도의 1개 구간이 10단위로 구성되는 경우의 구간수도 10개가 된다.

앞서 설명한 알고리즘을 통해 구한 각 랙 규모별 스택어 크레인 범위를 구간에 맞추어 환산한다. 예를 들어 승강속도의 구간당 단위수가 5개일 때 최소/최대 범위 49.3m/min ~ 54.3m/min는 50m/min ~ 55m/min으로 환산한다. 환산 후의 각 범위를  $iminsv, imaxsv, iminsh, imaxsh$ 라 하고 승강속도의 1개 구간당 단위 수를  $Usv$ , 주행속도의 1개 구간당 단위 수를  $Ush$ 라 할 때 환산 식은 다음과 같다.

$$imaxsv = [ maxsv / Usv + 1 ] \times Usv \quad (3.56)$$

$$iminsv = [ minsu / Usv + 1 ] \times Usv \quad (3.57)$$

$$iminsh = [ minsh / Ush + 1 ] \times Ush \quad (3.58)$$

$$imaxsh = [ maxsh / Ush + 1 ] \times Ush \quad (3.59)$$

랙 규모의 각 대안에 대한 스택어 크레인의 승강 속도 조합수와 주행속도 조합의 수는 다음과 같이 구한다.

$$Nscv = \frac{imaxsv - iminsv}{Usv} \quad (3.60)$$

$$Nsch = \frac{imaxsh - iminsh}{Ush} \quad (3.61)$$

( $Nscv, Nsch$ 는 올림으로 계산된 정수)

이렇게 각각의 랙 규모에 대해 조합을 구하고, 이 중에서 한가지 랙 대안에 대해 상대적으로 승강과 주행 속도 모두 우수한 대안은 상대적으로 높은 비용을 가지므로 제외시킨다. 스택커 크레인 비용 함수를 보면 그 이유를 쉽게 알 수 있다. 이러한 대안들을 제외시킨 후 수행도와 비용을 계산하여 평가한다.

### 3.2.4 수행도 및 비용 평가

랙 규모 대안 각각에 대해 스택커 크레인의 속도 구간에 대한 조합을 구하고, 각 경우에서의  $b$ 값과 Cycle Time을 구해 낼 수 있다. 이때  $b$ 값은 반드시 1이 될 필요는 없으며, (2.3)식에 의해 계산된 Cycle Time은  $\alpha$ 값보다 큰 값을 가질 수도 있다. 왜냐하면 스택커 크레인 속도 범위 계산 알고리즘을 통한 주행속도와 승강속도의 범위는 서로 독립적인 것이므로 수행도를 만족시키지 못하는 속도의 조합이 나올 수도 있기 때문이다. 여기서 Cycle Time이  $\alpha$ 보다 큰 값을 가지는 즉,  $[\frac{1}{3}b^2 + 1] \times T > \alpha$  인 속도 조합은 후보에서 제외시킨다. 마지막으로 최적화 수리모델에서 제시한 비용함수를 사용하여 가장 저렴한 대안을 최적 대안으로 삼는다. 이때, 비용이 같은 경우에는 계산된 Cycle Time이 작은 대안을 선택한다.

## 4. 수치 예 제

다음의 수치예제에서 사용된 데이터는 자동창고물 제작하는 회사들의 자료를 토대로 한 것이다.

스택커크레인사양 ( $m/min$ ) :  $scvmin = 10$  ;  
 $scvmax = 60$  ;  $schmin = 60$  ;  $schmax = 160$   
 $Usv = 5$  ;  $Ush = 10$

창고 시스템의 부지 조건 ( $m$ ) :  $Sl = 150$  ;

$Sw = 50$ ;  $Sh = 30$ .

화물 조건 ( $m$ ) :  $ll = 1$  ;  $lw = 1$ ;  $lh = 1$ .

운영 요구사항(개) :  $tn = 10000$  ;  $tpt = 400$ ,

$pn = 0.85$  ;  $su = 0.85$ .

비용 파라미터 :  $I = 10$  (%/년) ;  $r = 8$  (%) ;

$T = 15$  (년) ;  $Cc_1 = 36$  (만원/ $m^2$ );

$Cc_2 = 36$  (만원/ $m^2$ );  $Cf = 64$  (만원/ $m^2$ );  $Cp = 4$

(만원/cell);  $Cal = 3$  (만원/m);  $Cah = 5$  (만원/m);

$C_B = 2400$  (만원/대);

$Csh_1 = 2000$ ;  $Csh_2 = 2300$ ;  $Csh_3 = 2700$ ;  $Csh_4$

$= 3500$ ;  $Csh_5 = 4500$  ;

$Csv_1 = 1000$ ;  $Csv_2 = 1200$ ;  $Csv_3 = 1500$ ;  $Csv_4$

$= 2000$ ;  $Csv_5 = 2700$ . (비용 단위 : 만원)

### 4.1 랙 규모의 대안 제시 결과

부지 조건, 총 요구 Cell수가 주어지고 요구 입출고 빈도수와 스택커 크레인 최소/최대 승강/주행 속도 한계치를 고려하지 않은 랙 규모 대안을 산출해 보면 다음 표 4.1과 같은 192개의 대안이 제시된다.

< 표 4.1 > 부지조건과 총 요구Cell수를 만족하는 대안 산출 결과

id	ct	승강 높이	주행 길이	Level	Aisle	Bay	총 Cell수
1	0.38217	27.28	109.37	23	3	86	11868
...	...	...	...	...	...	...	...
20	0.63694	24.8	72.54	21	5	57	11970
21	0.63694	23.56	75.08	20	5	59	11800
22	0.63694	22.32	78.89	19	5	62	11780
...	...	...	...	...	...	...	...
191	1.78344	4.96	108.1	5	14	85	11900
192	1.78344	3.72	134.77	4	14	106	11872

표4.1에서 1, 22, 191, 192번 등과 같은 대안은 스테커 크레인의 요구 입출고 빈도수 및 스테커 크레인 최소/최대 승강/주행 속도 한계치를 만족시키지 못하는 대안들이다. 이것은 가능한 스테커 크레인 중 가장 우수한 속도를 가지는 스테커 크레인을 사용한다고 해도 요구 입출고 빈도수를 만족시키지 못한다는 의미를 가지며, 그 결과 이들은 랙 규모 대안으로서의 의미를 상실하게 된다.

부지 조건, 총 요구 Cell수, 요구 입출고 빈도수 및 스테커 크레인 최소/최대 승강/주행 속도 한계치를 고려한 랙 규모의 대안을 산출해본 결과 표4.2와 같은 56개의 대안이 제시되었으며 이는 상기한 192개의 대안이 제시되는 결과에 비해 136개의 대안이 줄어든 것을 알 수 있다.

< 표 4.2 > 랙 규모의 대안 제시 결과

id	ct	승강 높이	주행 길이	Level	Aisle	Bay	총 Cell수
1	0.63694	27.28	66.19	23	5	52	11960
...	...	...	...	...	...	...	...
26	0.89172	13.64	90.32	12	7	71	11928
...	...	...	...	...	...	...	...
41	1.01911	8.68	116.99	8	8	92	11776
42	1.1465	18.6	52.22	16	9	41	11808
...	...	...	...	...	...	...	...
55	1.27389	9.92	83.97	9	10	66	11880
56	1.40127	11.16	68.73	10	11	54	11880

#### 4.2 스테커 크레인 속도 범위 산출 결과

각 랙 규모에 대한 적용 가능한 승강/주행 속도범위는 다음 표 4.3과 같다.

< 표 4.3 > 각 랙 규모에 대한 스테커 크레인 속도 범위

id	ct	승강 길이	주행 길이	min sv	max sv	min sh	max sh	단수	열수	행수	총 Cell수
1	0.64	27.28	66.19	55	65	140	170	23	5	52	11960
2	0.64	36.04	68.73	55	65	140	170	22	5	54	11880
3	0.64	24.8	72.54	50	65	140	170	21	5	57	11970
4	0.64	23.56	75.08	50	65	140	170	20	5	59	11800
5	0.76	27.28	54.76	40	65	90	170	23	6	43	11868
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
50	1.15	8.68	104.29	15	65	100	130	8	9	82	11808
51	1.27	14.88	58.57	15	20	100	170	13	10	46	11960
52	1.27	13.64	63.65	15	20	100	170	12	10	50	12000
53	1.27	12.4	68.73	15	20	100	170	11	10	54	11880
54	1.27	11.16	75.08	15	40	100	110	10	10	59	11800
55	1.27	9.92	83.97	15	65	70	100	9	10	66	11880
56	1.4	11.16	68.73	15	15	70	80	10	11	54	11880

#### 4.3 스테커 크레인 사양 결정 결과

각 랙 규모에 대해 위에서 결정된 범위 내에서 스테커 크레인의 속도의 조합을 구하고 Cycle Time을 계산하여  $\alpha$ 값보다 작은 값을 가지는 대안을 선별해 낸다. 그 결과 다음 표 4.4와 같이 311개의 대안이 나온다. 이 중에서 한가지 랙 대안에 대해 상대적으로 승강과 주행 속도 모두 우수한 대안은 상대적으로 높은 비용을 가지므로 제외시킨다. 스테커 크레인 비용 함수를 보면 그 이유를 쉽게 알 수 있다.

상대적으로 승강과 주행 속도 모두 우수한 대안들을 제외시킨 후의 총 대안은 97개가 나오며, 각각 비용계산을 해 보면 다음 표 4.5와 같다.



< 표 4.4 > 스택커 크레인 조합과 Cycle Time에 의해 선별한 대안

id	택 대안	승강 길이	주행 길이	sv	sh	ct	Cycle Time	b	Level	Aisle	Bay	총 Cell 수
1	1	27.28	66.19	55	150	0.63694	0.62686	0.88965	23	5	52	11960
2	1	27.28	66.19	60	140	0.63694	0.61853	0.96168	23	5	52	11960
3	1	27.28	66.19	65	140	0.63694	0.59697	0.8877	23	5	52	11960
4	2	26.04	68.73	55	150	0.63694	0.62127	0.96778	22	5	54	11880
5	2	26.04	68.73	60	140	0.63694	0.61882	0.88404	22	5	54	11880
6	2	26.04	68.73	65	140	0.63694	0.5999	0.81604	22	5	54	11880
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
308	55	9.92	83.97	55	70	1.27389	1.20661	0.15036	9	10	66	11880
309	55	9.92	83.97	60	70	1.27389	1.20717	0.13783	9	10	66	11880
310	55	9.92	83.97	65	70	1.27389	1.20604	0.12722	9	10	66	11880
311	56	11.16	68.73	15	70	1.40127	1.16978	0.75775	10	11	54	11880

< 표 4.5 > 상대적 우수 속도 대안 제거 및 비용계산 결과

id	Sv (m/min)	Sh (m/min)	요구 CycleTime (min/회)	Cycle Time (min/회)	TotalCost (만원)	단	Aisle	행	Total Cells
1	55	150	0.63694	0.62686	542570.33	23	5	52	11960
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	55	90	0.76433	0.74322	581974.44	23	6	43	11868
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21	35	130	0.76433	0.75642	614779.93	17	6	58	11832
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
39	40	80	0.89172	0.87177	651541.87	18	7	47	11844
40	25	140	0.89172	0.88042	660216.75	17	7	50	11900
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
89	15	110	1.1465	1.06582	909674.87	8	9	82	11808
90	20	100	1.1465	1.1031	909674.87	8	9	82	11808
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
96	20	70	1.27389	1.26793	924211.46	9	10	66	11880
97	15	70	1.40127	1.16978	944435.86	10	11	54	11880

#### 4.4 최소 비용 대안 도출

최소 비용을 가지는 대안을 우선적으로 선택하고, 비용이 같은 경우에는 Cycle Time이 작은 쪽을 택하는 것을 원칙으로 하여 순서대로 대안을 도출해보면 다음 표4.6과 같다.

< 표 4.6 > 최소 비용 대안 도출 결과

id	S	Sh	요구 CycleTime (min/회)	Cycle Time (min/회)	TotalCost	단	Aisle	행	Total Cells
2	60	140	0.636942667	0.618533000	542570.33	23	5	52	11960
1	55	150	0.636942667	0.626857667	542570.33	23	5	52	11960
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
7	50	160	0.636942667	0.626969333	553176.02	20	5	59	11800
8	60	140	0.636942667	0.632122167	553176.02	20	5	59	11800
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	55	90	0.764331167	0.743223000	581974.44	23	6	43	11868
13	40	120	0.764331167	0.753692667	590086.66	21	6	47	11844
22	50	110	0.764331167	0.749216667	614779.93	17	6	58	11832
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21	35	130	0.764331167	0.756418000	614779.93	17	6	58	11832
23	30	160	0.764331167	0.750704667	625210.81	16	6	62	11904
24	60	110	0.764331167	0.761847333	625210.81	16	6	62	11904
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
33	45	70	0.891719833	0.831712000	639202.24	21	7	41	12054
32	30	140	0.891719833	0.882767000	639202.24	21	7	41	12054
35	50	70	0.891719833	0.876892833	643957.93	20	7	43	12040
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
95	15	80	1.273885333	1.188519667	924211.46	9	10	66	11880
96	20	70	1.273885333	1.267933667	924211.46	9	10	66	11880
97	15	70	1.401273833	1.169778667	944435.86	10	10	54	11880

요구하는 수행도를 만족시키면서 최소의 비용을 가지는 최적의 대안은 23단, Aisle수 5개, 행수 52개의 총 11960 Cell의 랙 규모와 승강속도 60m/min, 주행속도 140m/min의 대안으로 결정되었으며 표 4.7과 같다.

< 표 4.7 > 최종 결과

id	2	단 위
Sv	60	(m/min)
Sh	140	(m/min)
요구 CycleTime	0.636942667	(min/회)
Cycle Time	0.6185330	(min/회)
Total Cost	542570.33	(\$)
단	23	
Aisle	5	
행	52	
Total Cells	11960	

## 5. 결 론

부지조건과 보관 Cell수가 주어졌을 때, 이를 만족시키는 랙 규모의 가능해는 유한개이나 경우에 따라서는 개수가 매우 많다. 따라서, 기존의 방법으로는 최적 설계를 위해 모든 랙 규모와 모든 설비 사양에 대하여 설계 파라미터를 계산하고 평가하는 것은 많은 계산량과 시간을 필요로 하며 최적의 해를 얻어내는 것 또한 쉽지 않다.

본 연구에서는, 부지 조건, 보관 Cell수 외에 스테커 크레인의 최소/최대 승강/주행 속도 한계치와 요구 입출고 빈도수를 최적화 모델의 제약에 추가시키므로써, 스테커 크레인의 대당 능력과 창고 전체의 수행도를 감안한 랙 규모 산출이 가능해 졌으며, 스테커 크레인의 비용 함수를 목적식에 추가하고, 스테커 크레인의 속도 사양을 결정변수화하며, 랙 규모에 대한 스테커 크레인의 속도 범위를 산출해냄으로써 기존의 연구 방법으로는 불가능하던 스테커 크레인의 속도를 제시해 줄 수 있게 되었다.

또한, 최적화 모델의 제약이 늘어남에 따라, 제시된 최적화 모델의 랙 규모의 가능해는 기존의 최적

화 모델에 비해 그 개수가 훨씬 작아지는 장점을 이용하여, 최적 설계 모델의 단점을 보완하면서 최적해를 찾아내는 알고리즘을 개발하므로써 최적의 랙 규모와 스테커 크레인의 속도 범위 및 속도 사양을 산출하고, 자동창고의 랙 규모와 수행도, 비용간의 새로운 Trade-off 관계를 정립하였다.

한편, 자동창고를 설계함에 있어서 적용 가능한 스테커 크레인의 사양은 제한적인 경우가 대부분이므로 본 논문에서 사용된 스테커 크레인의 최소/최대 승강/주행 속도 한계치는 현실적으로도 쉽게 취득이 가능할 것으로 사료된다. 이중명령 및 다중 명령에 의한 최적설계 알고리즘 개발과 적정 스테커 크레인 선정에 관한 연구가 추후 진행된다면 좀 더 정확한 설계대안을 얻는데 기여할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Ashayeri, J., L. F. Gelders, and L. V. Wassenhove, "A Microcomputer-based Optimization Model for the Design of Automated Warehouses," *IJPR*, Vol.23, No.4, pp.825-839, 1985.
- [2] Azadivar, F., "Maximization of the throughput of a computerized automated warehousing system under system constraints", *IJPR*, Vol. 24, No. 3, pp.551-566, 1986.
- [3] Azadivar, F., "Optimum allocation of resources between the random access and rack storage spaces in an automated warehousing system", *IJPR*, Vol.27, No.1, pp.119-131, 1989.

- [4] Bassan, Y., Y. Roll, and M. J. Rosenblatt, "Internal Layout Design of a Warehouse," *AIIE Transactions*, Vol. 12, No.4, pp.317-322, 1980.
- [5] Berg, J. P., "Class-based storage allocation in a single-command warehouse with space requirement constraints", *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 21-28, 1996.
- [6] Bozer, Y. A., and J. A. White, "Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems," *IIE Transactions*, Vol.16, No.4, pp.329-338, 1984.
- [7] Emerson, C. R., and D. S. Schmatz, "Results of modeling automated warehouse system", *Journal of Industrial Engineering*, pp28-90, 1981.
- [8] Eynan, A., and M. K. Lee, "Establishing Zones in Single-Command Class-Based Rectangular AS/RS", *IIE Transactions*, Vol.26, No.1, pp.38-46, 1994.
- [9] Gerald M. K., and H.-P. Wang, "Modeling of Automated Storage/Retrieval Systems Using Petri Nets," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.11, No.1, pp.20-28, 1992.
- [10] Graves, S. C., W. H. Hausman, and L. B. Schwarz, "Storage-Retrieval Interleaving in Automatic Warehousing Systems," *Management Science*, Vol.23, No.9, pp.935-945, 1977.
- [11] Han, M. H., L. F. McGinnis, J. S. Shieh, and J. A. White, "On Sequencing Retrievals in an Automated Storage/Retrieval System," *IIE Transactions*, Vol.19, No.1, pp.56-66, 1987.
- [12] Hausman, W. H., L. B. Schwarz, and S. C. Graves, "Optimal Storage Assignment in Automatic Warehousing Systems," *Management Science*, Vol.22, No.6, pp.629-638, 1976.
- [13] Hwang, H., and S. B. Lee, "Travel-time Models Considering the Operating Characteristics of the Storage and Retrieval Machine", *IJPR*, Vol. 28, No. 10, pp.1779-1789, 1990.
- [14] Karasawa, Y., H. Nakayama, and S. Dohi, "Trade-off Analysis for Optimal Design of Automated Warehouses," *International Journal of Systems Science*, Vol.11, No.5, pp.567-576, 1980.
- [15] Knapp, G. M. And Wang, H. P., "Modeling of Automated Storage/Retrieval Systems Using Petri Nets", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.11, No.1, pp.20-28, 1992.
- [16] Lee, H. F., "Performance analysis for automated storage and retrieval systems", *IIE Transactions*, Vol. 29, No. 1, 15-28, 1997.
- [17] Lee, Young Hae and Sung Jin Chun, "Cycle Time Models for AS/RS with the Rack of Unequal Sized Cells Under Dual Command," 98춘계공동학술대회논문집, 대한산업공학회/한국경영과학회, 경성대, 부산, 1998.
- [18] Lin, S.-C., and H.-P. Wang, "Modeling an

- Automated Storage and Retrieval System Using Petri Nets," *IJPR*, Vol.33, No.1, pp.237-260, 1995.
- [19] Linn, R. J., and R. A. Wysk, "An Expert System Based Controller for an Automated Storage/ Retrieval System," *IJPR*, Vol.28, No.4, pp.735-756, 1990.
- [20] Malmberg, C. J., "Storage assignment policy tradeoffs", *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 2, pp. 363-378, 1996.
- [21] Mulcahy, D. E., *Warehouse Distribution and Operations Handbook*, McGraw-Hill, 1994.
- [22] Pan, C.-H., and C.-H. Wang, "A Framework for the Dual Command Cycle Travel Time Model in Automated Warehousing Systems", *IJPR*, Vol.34, No.8, pp.2099-2117, 1996.
- [23] Roll, Yaakov and Meir J. Rosenblatt, "Random versus Grouped Policies and Their Effect on Warehouse Capacity", *Material Flow*, Vol.1, pp.199-205, 1983.
- [24] Rosenblatt, M. J., and Y. Roll. "Warehouse Design with Storage Policy Considerations," *IJPR*, Vol.22, No.5, pp.809-821, 1984.
- [25] Rosenblatt, M. J., and A. Eynan, "Deriving the Optimal Boundaries for Class-Based Automatic Storage/Retrieval Systems," *Management Science*, Vol.35, No.12, pp.1519-1524, 1989.
- [26] Rosenblatt, M. J., Y. Roll, and V. Zyser, "A Combined Optimization and Simulation Approach for Designing Automated Storage/Retrieval Systems", *IIE Transactions*, Vol.25, No.1, pp.40-50, 1993.
- [27] Seidmann, A., "Inntelligent Control Schemes for Automated Storage and Retrieval Systems," *IJPR*, Vol.26, No.5, pp.931-952, 1988.
- [28] Shunmugam, M., S. A. Krishnamachar, and P. S. Passad, "Computerized Warehouse Layout", *Material Flow*, Vol.2, pp.151-156, 1985.
- [29] Sule, D. R., *Manufacturing Facilities Location, Planning, and Design*, 2nd Edition, PWS, 1994.
- [30] Tompkins, J. A., J. A. White, Y. A. Bozer, E. H. Frazelle, J. M. A. Tanchoco, and J. Trevino, *Facilities Planning*, 2nd Edition, John Wiley and Sons, 1996.
- [31] 이영해, 조용석, "Travel-Time Models for Class-based AS/RS Systems", *한국경영과학회지*, 14권, 1호, pp. 119-130, 1989.
- [32] 전성진, 이영해, "이형락을 가진 자동창고시스템의 운행시간 모형", *대한산업공학회지*, 23권, 2호, pp.421-432, 1997.
- [33] 조면식, 1998, "자동창고에서 발생하는 지장/불출 명령의 대기시간에 관한 추계론적 분석", 98 *춘계공동학술대회 논문집*, 대한산업공학회/한국경영과학회, 1998.