저장캐러셀의 최소 댓수 결정을 위한 해법
- A Hierarchical Solution Procedure for Determining the Minimum Number of Storage Carousels -

나 윤 균*
Yoon Kyoon Na

Abstract

A solution procedure to minimize the number of storage carousels has been developed under the carousel throughput rate and total storage capacity requirements. The number of carousels can be reduced by increasing the throughput rate of carousels which depends upon the size of carousels, the storage item allocation to carousels, and the item position assignments in each carousel. Since the problem is very complicated and hard to solve optimally, the following solution procedure to solve the problem hierarchically is proposed: With a given number of carousels, the storage items are allocated to carousels so that the slowest average transaction time among carousels may be minimized, and then the position of each item is assigned in the allocated carousel so that the throughput of the carousel can be maximized.

1. 서론

캐러셀 저장시스템은 저장에 사용되는 일련의 빈이나 배스킷이 서로 연결되어 긴 타원형 궤도 주위를 회전하는 시스템이다. 궤도시스템은 트롤리 콘베이어와 유사하며, 타원 끝에 있는 적재/하역 스테이션에 빈들을 위치시켜 작업자에 의해 저장 또는 반출작업이 수행되도록 한다. 저장캐러셀은 비교적 낮은 비용, 다양한 기능, 높은 신뢰도 등의 장점들로 인하여 소하물 AS/RS의 매력적인 대안이 될 수 있으며 제조공정에서의 응용사례가 증가하는 추세에 있다. 공장에서의 재공품, 저장실에서의 원자재, 공구실에서의 공구, 도매점에서의 서비스 품목이나 기타 품목들의 저장 및 반출작업에 흔히 사용된다.

캐러셀의 운용방식은 기계식 또는 자동식이 있으며, 기계식은 전담작업자가 저장/반출 스테이션에 상주하여 작업의뢰에 따라 캐러셀을 작동시켜 원하는 물품을 저장 또는 반출하게 된다. 자동식은 부품을 필요로 하는 현장의 작업자가 바코드 스캐너 또는 컴퓨터 입력에 의해 원하는 부품을 지시하면 부품이 저장되어 있는 빈이 저장/반출 스테이션에 위치하여 현장의 작업자에 의해 수거되어 작업장에서 사용되는 형태이다.

자재운반 시스템에 관한 문헌이 McGinnis et al.[5]에 의해 정리되어 있으며, Han and McGinnis[3]는 캐러셀이 중앙 저장설비로서 사용되어질 때의 오더픽킹 비용을 최소화하는 연구를 수행하였다. Bengü[1]는 자동회전 캐러셀에서의 최적 저장위치 할당정책을 제시하였다.

* 수원대학교 산업공학과

캐러셀은 타원의 길이가 10ft에서 100ft에 이르는 다양한 크기가 있으며 캐러셀의 길이가 증가할수록 저장밀도는 증가하게 되지만 평균 작업처리시간은 길어지게 된다. 캐러셀의 길이가 증가하게 되면 일정한 수의 부품들을 저장하는데 소요되는 캐러셀의 댓수는 감소하고 따라서 이에 소요되는 인건비, 운전비용, 기계비용 등도 감소하게 된다. 또한 캐러셀 길이의 지나친 증가는 작업처리시간의 상승을 초래하여 요구되는 작업량을 수행할 수 없게 만들 수도 있다. 본 연구에서는 저장품목의 수가 고정되어 있는 저장캐러셀 시스템의 설계시 최소의 비용으로 단위시간당 요구되는 작업량을 처리할 수 있는 최소의 저장캐러셀 댓수를 결정하기 위한 모델의 수립 및 해법을 제시하고자 한다.

2. 대상시스템 및 수식모형

저장캐러셀이 저장할 수 있는 재고는 한정되어 있으며 운용비용은 기본적으로 작업처리 비용이다. 즉 저장캐러셀의 작업처리율이 작업능률의 관심사이다.

캐러셀에 소요되는 비용은 각 캐러셀의 설치에 소요되는 비용, 캐러셀의 운전비용, 캐러셀에 배치되는 인건비 등을 포함한다. 전체 품목의 저장에 소요되는 빈의 수는 일정하기 때문에 일반적으로 총비용은 캐러셀의 댓수를 적게할수록 적어지게 된다. 그러나 저장캐러셀의 크기를 크게하여 하나의 캐러셀에 모든 품목을 저장하게 되면 저장품목의 수가 많을 경우에는 작업처리에 소요되는 시간이 길어지게 되어 단위시간당 요구되는 작업처리량을 수행하지 못할 수가 있다. 반면에 저장캐러셀의 크기를 작게하면 작업효율은 높아지지만 여러 대의 저장캐러셀이 필요하게 되어 전체 소요비용의 증가를 초래하게 된다.

본연구에서는 저장품목의 수가 주어졌을 때, 즉 총소요 빈의 수가 알려져 있을 때 단위시간당 작업처리조건을 만족시키면서 최소의 비용을 유발하는 저장캐러셀의 댓수를 결정하려고 한다. 하나의 캐러셀로 단위시간당 요구되는 작업처리량을 수행할 수 없는 경우에는 두 대 이상의 캐러셀이 소요되며, 이 때 각 캐러셀의 크기는 동일한 것으로 한다.

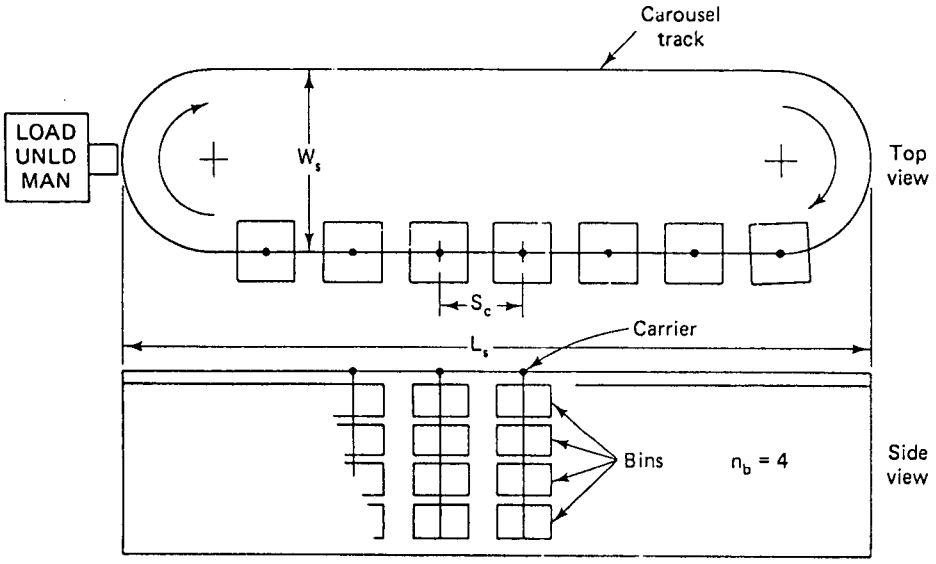
저장캐러셀은 다음과 같은 방식으로 운용됨을 가정하기로 한다.

(1) 작업처리 사이클은 저장 또는 반출의 한 가지로만 이루어지는 단일명령 사이클이다.
(2) 저장/반출 스테이션은 고정되어 있으며 빈들은 저장/반출 스테이션과 일치되어야 접근이 가능하다.
(3) 캐러셀의 속도는 일정하며 가속도와 감속도는 고려하지 않는다.
(4) 캐러셀은 양방향 이동이 가능하다. 즉 빈이 저장/반출 스테이션에 가까운 방향을 찾아서 시계방향이나 시계반대방향으로 이동할 수 있다.
(5) 현재 사용이 된 빈은 다음 작업이 요청될 때 까지 저장/반출 스테이션에 머물러 있는다.

그림1과 같은 대표적 저장캐러셀을 대상으로 수식모형을 구성하기 위하여 다음과 같은 기호들을 정의하기로 한다.

C : 캐러셀의 대당 비용
N : 총 소요 빈의 수
x : 캐러셀의 댓수
n_c : 캐러셀 1대가 포함하는 빈의 수
s_c : 빈 사이의 간격
V_c : 캐러셀의 이동속도
t_p : 부품을 적재 또는 반출하는데 소요되는 시간
t_r : 단위작업당 요구되는 평균 작업처리 소요시간
t_k : 캐러셀 k에서 소요되는 단위작업당 평균 작업처리시간

$d(i,j)$: 부품 i가 현재 입출고 지점에 위치할 때 부품 j에 접근하기 위한 이동거리
λ_i : 부품 i의 작업율 (부품 i의 단위시간당 작업요구 수)
N_k : 캐러셀 k에 속하는 부품의 집합
p_i : 캐러셀 내에서 부품 i의 작업요구 확률 ($= \lambda_i / \sum_{j \in N_k} \lambda_j,\ i \in N_k$)



<그림1> Layout and elevation drawing of a typical storage carousel.

각 품목의 작업요구율이 모두 같을 경우에는 캐러셀 내에서의 품목들의 저장위치할당은 임의로 해도 무방하며, 그러나 품목마다 작업요구율이 다른 경우에는 캐러셀 내에서의 품목들의 저장위치에 따라 평균이동거리 또한 달라지게 되므로 다음과 같이 작업요구율이 모두 같은 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 생각하기로 한다.

(1) $\lambda_i = \lambda$ 인 경우

품목마다 작업요구율이 같은 경우에는 각 작업을 위한 캐러셀의 평균이동거리는 $(n_c * s_c)/2$ 로 주어지며 다음과 같은 수학적 모델이 성립한다.

$$\textit{Minimize}\ \ C * x$$

subject to

$$n_c * x \geq N$$

$$(n_c * s_c)/2\, V_c + t_p \leq t_r$$

x는 자연수

첫 번째 제약조건식은 전체품목을 저장할 수 있는 빈의 수에 대한 것이며, 두 번째 제약조건식은 단위작업당 처리시간에 관한 것이다. 이 경우에는 두 번째 식을 만족시키는 최대의 정수 n_c 를 구해서 첫 번째 식에 대입한 후 식을 만족시키는 최소의 정수 x^*를 구하면 최적값이 된다.

(2) $\lambda_i \neq \lambda$ 인 경우

품목마다 작업요구율이 다른 경우에는 각 작업을 위한 캐러셀의 평균이동거리는 품목의 캐러셀내에서의 저장위치에 따라 변하게 된다. 한 캐러셀에 저장될 품목들이 결정이 되었을 때 평균이동거리를 최소화하는 저장위치 할당방법은 저장품목의 접근확률 p_i에 따른 최적 배치방법이 제시되어 있다 (Bengü[1]). 최적 배치방법은 접근확률이 가장 큰 품목을 먼저 배치하고 접근확률이 그 다음 큰 품목을 가장 큰 품목의 왼쪽에, 그 다음 큰 품목을 가장 큰 품목의 오른쪽에 배치하는 방식으로 번갈아 가면서 좌우에 배치하는 방식을 취하게 된다. 품목 i를 저장하고 있는 빈이 입출스테이션에 위치해 있을 때 품목 j를 저장하고 있는 빈을 입출스테이션에 위치시키기 위하여 이동하는 거리를 $d(i,j)$라고 할 때 최적배치방법에 의한 각 작업의 평균이동거리는 $p_i p_j d(i,j)$로 주어지며 다음과 같은 모델이 성립한다.

$$\begin{aligned} &\textit{Minimize} \quad C * x \\ &\textit{subject to} \\ &\qquad n_c * x \geq N \\ &\qquad \sum_{i \in N_k} \sum_{j \in N_k} p_i p_j d(i,j) / V_c + t_p \leq t_r, \quad k = 1, 2, \cdots, x \\ &\qquad\qquad x\text{는 자연수} \end{aligned}$$

3. 해법

위 모델은 캐러셀의 댓수 결정문제, 품목의 캐러셀간 할당문제, 품목의 캐러셀내에서의 위치결정문제가 복합적으로 얽혀 있어 최적해를 얻는 것이 매우 어렵다. 따라서 본연구에서는 캐러셀 댓수를 고정하여 각 캐러셀에 품목을 할당하고, 이어서 할당된 품목들을 캐러셀내에 배치하는 계층적 문제해결 방식을 제시한다.

초기화 단계에서는 캐러셀의 댓수를 한 대부터 시작하여 주어진 작업처리 요구율을 충족시킬 수 있는 지를 확인한다. 단계1의 캐러셀간 품목할당문제는 NP-complete 으로 분류되어 있는 clustering 문제로서 최적해를 구하는 것이 어려우므로, 캐러셀간 이용율의 균형과 캐러셀 내에서의 품목간 작업요구율의 차이를 고려하여, 다음과 같은 3가지 발견적 기법들을 비교하였다.

(방법1) 캐러셀간 이용율의 차이가 많이 나도록 할당하는 방법으로서 각 품목의 작업요구율이 큰 것 부터 첫번 째 캐러셀에 할당하고, 첫번 째 캐러셀이 모두 채워진 후에 다음 캐러셀로 넘어가게 된다.

(방법2) 캐러셀간 이용율의 균형을 유지하면서 캐러셀 내에서의 품목간 작업요구율 차이에는 변화를 주는 방법이다. 즉 전체품목을 작업요구율 순서대로 캐러셀 댓수의 배수가 되는 갯수의 그룹으로 나누어 첫 그룹을 첫번 째 캐러셀에, 두 번째 그룹을 다음 캐러셀에 할당하고 마지막 캐러셀에 할당한 다음에는 역순으로 마지막 캐러셀 다음부터 할당하는 방법이다. 이 경우 캐러셀내에서의 품목간 작업요구율의 차이는 마지막 캐러셀이 가장 작게 되며, 첫번째 캐러셀에서 가장 크게 된다.

(방법3) 캐러셀간 이용율의 균형을 유지하면서 캐러셀내에서의 품목간 작업요구율의 차이를 가급적 균등하게 할당하는 방법이다. 즉 각 품목을 작업요구율 순서대로 가장 큰 품목을 첫번 째 캐러셀에 두번 째로 큰 품목을 다음 캐러셀에 할당하고 마지막 캐러셀이 할당된 다음에는 역순으로 마지막 캐러셀 부터 할당하게 된다.

단계2의 캐러셀내 품목위치 결정은 Bengü이 제시한 최적배치방법을 사용하여 작업당 캐러셀의 최소 평균이동거리를 구할 수가 있다.

품목할당방법의 비교를 위하여 24개 품목으로 구성된 문제들을 사용하였으며 효율성의 판단기준으로는 가장 작업속도가 느린 캐러셀, 즉 평균이동거리가 가장 긴 캐러셀의 평균이동거리가 사용되어 모든 캐러셀이 평균 작업처리 요구시간을 만족시킬 수 있도록 하였다.

품목의 λ_i를 결정하기 위하여 24개 품목을 4개의 그룹 G_1, G_2, G_3, G_4로 나누어 각 그룹간 λ_i의 합의 차이가 작은 경우(D_1)와 큰 경우(D_2)로 구분하였다. 각 그룹간 λ_i의 합의 차이가 작은 경우는 $\sum_{i \in G_2} \lambda_i = 2 \sum_{i \in G_1} \lambda_i$, $\sum_{i \in G_3} \lambda_i = 3 \sum_{i \in G_1} \lambda_i$, $\sum_{i \in G_4} \lambda_i = 4 \sum_{i \in G_1} \lambda_i$ 가 되게 하였고, 차이가 큰 경우는 $\sum_{i \in G_2} \lambda_i = 3 \sum_{i \in G_1} \lambda_i$, $\sum_{i \in G_3} \lambda_i = 5 \sum_{i \in G_1} \lambda_i$, $\sum_{i \in G_4} \lambda_i = 7 \sum_{i \in G_1} \lambda_i$ 가 되게 하였다. 또한 합의 차이가 큰 경우와 작은 경우 모두 그룹내에서의 λ_i 가 모두 동일한 문제(P_1)와, 그룹내에서의 λ_i 의 값이 일정한 차이가 나도록 조정한 문제(P_2)를 발생시켰다.

캐러셀간 품목할당은 24개 품목을 작업요구율이 높은 품목부터 1,2,…,24번으로 순위를 매겼으며 캐러셀 2대와 3대에 할당하는 경우 위의 3가지 방법에 의한 품목할당이 표 1과 표 2에 각각 주어져 있다. 방법(2)에서 2대의 캐러셀에 할당하는 경우에는 그룹당 6개 씩 4개의 그룹으로, 3대의 캐러셀에 할당하는 경우에는 그룹당 4개 씩 6개의 그룹으로 나누었다.

<표1> 2-캐러셀에서의 품목할당방법

캐러셀 / 방법	캐 러 셀 1	캐 러 셀 2
방법 1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12	13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24
방법 2	1,2,3,4,5,6,19,20,21,22,23,24	7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18
방법 3	1,4,5,8,9,12,13,16,17,20,21,24	2,3,6,7,10,11,14,15,18,19,22,23

<표2> 3-캐러셀에서의 품목할당방법

캐러셀 / 방법	캐 러 셀 1	캐 러 셀 2	캐 러 셀 3
방법 1	1,2,3,4,5,6,7,8	9,10,11,12,13,14,15,16	17,18,19,20,21,22,23,24
방법 2	1,2,3,4,21,22,23,24	5,6,7,8,17,18,19,20	9,10,11,12,13,14,15,16
방법 3	1,6,7,12,13,18,19,24	2,5,8,11,14,17,20,23	3,4,9,10,15,16,21,22

2-캐러셀 및 3-캐러셀에서 가장 작업처리가 오래 걸리는 캐러셀의 작업당 평균이동거리가 표 3 및 표 4에 각각 주어져 있다. 2-캐러셀 및 3-캐러셀 모두의 경우에 방법3의 작업당 평균이동거리가 가장 적었으며, 다음이 방법2, 방법1의 순이었다. 이것은 방법3이 다른 방법들에 비하여 캐러셀간 이용율의 균형을 유지함으로써 작업부하가 비교적 고르게 분산되는 효과를 가져왔을 뿐만 아니라 캐러셀내에서도 작업요구율의 차이를 적게함으로써 평균이동거리를 단축시킨 결과로 해석된다. 따라서 계층적 알고리듬의 단계1에서의 캐러셀간 품목할당 방법으로는 방법3의 선택이 바람직하게 된다.

<표3> 2-캐러셀에서의 작업당 평균이동거리 (단위: s_c)

구분 \ 방법		방법 1	방법 2	방법 3
D_1	P_1	2.981	2.936	2.766
	P_2	3.011	2.942	2.763
D_2	P_1	2.953	2.895	2.597
	P_2	2.962	2.932	2.637

<표4> 3-캐러셀에서의 작업당 평균이동거리 (단위: s_c)

구분 \ 방법		방법 1	방법 2	방법 3
D_1	P_1	1.990	1.981	1.841
	P_2	2.329	1.990	1.835
D_2	P_1	1.988	1.968	1.728
	P_2	1.991	1.954	1.733

알고리즘

(단계 0) 초기화

캐러셀 대수 x=1대로 시작한다.

(단계 1) 캐러셀간 품목할당

각 품목을 작업요구율이 가장 큰 품목을 첫번 째 캐러셀에 두번 째로 큰 품목을 다음 캐러셀에 할당하고 마지막 캐러셀이 할당된 다음에는 역순으로 마지막 캐러셀 부터 첫번 째 캐러셀로 작업요구율 순서대로 할당한다.

(단계 2) 캐러셀내 품목위치 결정

접근확률이 가장 큰 품목을 먼저 배치하고 접근확률이 그 다음 큰 품목을 가장 큰 품목의 왼쪽에, 그 다음 큰 품목을 가장 큰 품목의 오른쪽에 배치하는 방식으로 번갈아 가면서 좌우에

배치한다

(단계 3) 작업처리율의 만족여부 확인

만약 모든 캐러셀이 평균 작업처리 요구시간을 만족하면 캐러셀 대수 x대, 단계1과 2에서 얻어진 품목할당 및 품목위치로 결정된다. 그렇지 않으면 캐러셀 대수를 1대 증가시켜 단계1로 돌아간다.

4. 결론

본연구에서는 일정한 품목들을 저장하기 위하여 캐러셀을 사용하는 경우에 단위시간당 요구되는 작업요구율을 만족시키는 최소 댓수 설계를 위한 해법을 제시하고 있다. 저장캐러셀의 댓수를 최소화하기 위해서는 캐러셀의 작업효율을 최대화하여야 하며, 캐러셀의 작업효율은 캐러셀의 크기, 캐러셀간 품목할당방법, 캐러셀내에서의 품목위치에 따라 좌우된다.

각 품목마다 작업요구율이 동일한 경우에는 임의의 할당방법이 사용될 수 있으나, 그렇지 않은 경우에는 캐러셀간 품목을 할당하는 방법이 작업처리율에 영향을 미치게 된다. 문제의 복잡성으로 인하여 최적해를 얻는 것이 매우 어렵기 때문에 캐러셀의 댓수를 증가시켜 가면서 작업요구율을 만족시키는 최소의 캐러셀 댓수를 구하고자 하였다. 2-캐러셀 및 3-캐러셀의 경우에 작업요구율이 다른 4 가지 문제 세트에 대하여 3 가지 발견적 기법들을 비교, 분석하였다. 그 결과 캐러셀간 이용율의 균형을 유지하면서 각 캐러셀내에서 품목사이에 작업요구율의 차이가 비교적 균등하게 발생하도록 할당하는 방법이 가장 우수한 것으로 판명되었다. 할당된 품목들의 캐러셀내에서의 위치결정은 Bengü에 의해 제시된 organ-pipe 방법이 사용되었다.

참고문헌

[1] Bengü, G., "An Optimal Storage Assignment for Automated Rotating Carousels," *IIE Transactions,* Vol. 27, No. 1, pp.105-107, 1995.

[2] Gary, M.R., and Johnson, D.S., *Computers and Intractability,* W.H. Freeman and Company, New York, 1979.

[3] Han, M.H., and McGinnis, L.F., "Automated Work-in-process Carousels: Modeling and Analysis," *MHRC-TR-86-06,* Material Handling Research Center, Atlanta, Georgia, 1986.

[4] Hardy, G.H., Littlewood, J.E., and Polya, G., *Inequalities,* Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1952.

[5] McGinnis, L.F., Trevino, J., and White, J., "A Bibliography on Material Handling Systems Analysis," *MHRC-TR-83-06,* Material Handling Research Center, Atlanta, Ga, 1983.

[6] Mongtgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments,* John Wiley & Sons, New York, 1976.

[7] Wilson, H.G., "Order Quantity, Product Popularity, and the Location of Stock in a Warehouse," *AIIE Transactions,* Vol. 9, No. 3, pp.230-237, 1977.

[8] Wong, C.K., *Algorithmic Studies in Mass Storage Systems,* Computer Science Press, Rockville, Maryland, 1983.