Journal of the Korean Institute
of Industrial Engineers
Vol.21, No.2, June. 1995

복수운반형 자동창고*

Multi-load Automated Storage/Retrieval Systems

임석철** 김용진**

Suk-Chul Rim, Yong-Jin kim

Abstract

Automated Storage/Retrieval (AS/R) systems have been used mostly in manufacturing or distribution industry in order to store or retrieve palletized items automatically. Since the items are heavy or bulky, only one pallet at a time is moved by the stacker crane. In this study, however, we introduce the "multi-load" AS/R system in which the items to be stored are data storage devices of equal size such as video tape or compact disc. Since the items are small and light, multiple items can be stored and retrieved in each trip by using a magazine and a robot arm mounted on the crane.

Given the magazine capacity, and the locations of retrieval items and empty cells in the rack, the throughput of the multi-load AS/R system will depend on the selection of storage locations and the sequence of visits. We propose four heuristic algorithms for the multi-command. Computer simulation is used to evaluate the four algorithms in terms of throughput and number of back tracking of the crane.

I. 서론

최근 국내 각 기업에 물류관리의 중요성이 급속도로 확산됨에 따라 물류 전반에 관한 기업차원의 종합적인 검토 필요성이 많이 제기되고 있으며, 특히 창고관리 합리화의 일환으로 자동창고나 물류설비의 도입을 고려하는 기업이 늘고 있다. 산업용 자동창고는 주로 제조업이나 유통업에서 원부자재, 중간제품 또는 완성품을 팔렛(pallet) 단위로 자

* 본 연구는 상공부 공업기반기술과제 연구비의 지원으로 수행되었음.

** 아주대학교 산업공학과

동 저장 및 불출하는 유닛로드(unit-load)형 자동창고가 주종을 이루고 있다. 최근에는 버켓(bucket)을 사용하여 공정간 재고나 소형 부품 등을 공간절약형으로 저장하는 미니로드(mini-load)형 자동창고도 그 보급이 늘고 있는 추세이다. 이 밖에도 회전형 선반(carousel) 등의 자동화된 물류설비가 다수 있으나 그 이용도는 미미한 실정이다.

유닛로드형 자동창고는 그 취급물이 팔렛 단위의 대형, 중량물이기 때문에 크레인이 한 번에 한개의 팔렛만을 저장 또는 불출하는 single command가 기본이며, 저장소요와 불출소요가 동시에 있을 때에는 크레인이 저장품을 가지고 입출고점을 출발하여 저장점에 저장한 후 불출점으로 이동하여 불출품을 가지고 입출고점으로 돌아오는 dual command를 수행할 수 있다.

이러한 산업용 자동창고와는 달리 본 연구에서 소개하는 복수운반형 자동창고란 비디오 테이프나 컴팩트 디스크(CD) 등 동일규격의 소형, 경량 정보매체를 대량으로 저장하면서 수요자의 요청에 따라 정보매체를 불출하고, 사용 후 다시 자동창고에 저장하는 시스템이다[14]. 저장물이 소형, 경량물이기 때문에 그림 1에서 보듯이 복수개의 저장물을 담은 운반함(magazine)을 크레인에 실은 후 입출고점을 출발하여 복수개의 저장점과 불출점을 차례로 방문하면서 크레인에 부착된 로봇 팔을 사용하여 저장작업이나 불출작업을 하나씩 수행하고 다시 입출고점으로 돌아오는 "multi-command"를 수행할 수 있어 single command나 dual command에 비해서 일반적으로 시스템의 처리능력(throughput)을 크게 향상시킬수 있다.

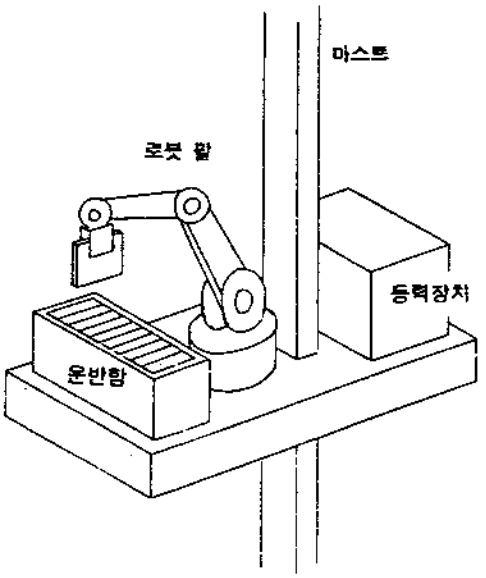


그림 1. 복수운반형 크레인에 장착된 운반함과 로봇 팔

여기서 저장작업이란 로봇 팔이 운반함으로부터 저장품을 하나 꺼내서 선반상의 빈 칸에 집어넣는 작업을 말하며, 불출작업이란 로봇 팔이 불출품목을 선반으로부터 꺼내어 이를 운반함의 빈 칸에 집어넣는 작업을 말한다. 따라서 운반함에 여유공간이 없으면 불출작업은 수행할 수 없다는 제약조건이 생긴다. 또한, 로봇 팔이 선반으로부터 저장품을 꺼내는 동작이 완료되는 순간부터 크레인은 다음 방문지점을 향해 이동을 시작할 수 있으며, 크레인이 이동하는 중에 로봇 팔은 불출품목을 운반함의 빈칸에 저장하는 동작을 계속 수행할 수 있다. 따라서 비록 크레인이 다음 방문지점에 도착했더라도 로봇팔의 동작이 완료되지 않았을 경우에는 이를 기다려야 하기 때문에 multi-command의 수행시간은 단순히 크레인의 이동시간의 합이 아니

고, 이동시간과 로봇 팔의 동작시간중 긴 시간들의 합이 된다. 이에 대해서는 4절에서 자세히 설명하기로 한다.

이러한 복수운반형 자동창고의 용도로는 각국에서 계속적으로 발행되는 특허정보를 담은 CD를 대량으로 저장하고, 수요자의 요청에 따라 해당 CD를 불출하여 사용한 후 다시 저장하는 특허정보 조회시스템; 또는 CD로 된 전자도서를 보관하는 미래형 전자도서관; 이 밖에도 멀티미디아 시대의 음악, 영상 정보매체를 다루는 유선방송국 등의 정보문화산업에서도 이와 유사하게 대량의 독립적인 정보매체를 고속으로 사용자에게 불출해 주는 시스템이 폭넓게 활용될 것으로 기대된다.

본 연구는 이러한 복수운반형 자동창고 운영시 복수개의 저장 및 불출작업을 효율적으로 수행할 수 있는 경험적인 운영방식들을 제안하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 이들의 평균적인 수행도를 비교, 평가한다.

Ⅱ. 관련연구

자동창고에 관한 기존의 연구는 주로 유닛로드형 자동창고의 효율적인 운영을 위한 설계 또는 운영방식에 관한 연구로서 그 수행도는 주로 단위시간당 처리량(throughput)의 최대화를 목적함수로 하였다. 유닛로드형 자동창고의 이동시간 산정모형은 Bozer and White[3]의 모형으로 일반화 되었다. 미니로드형 자동창고의 수행도에 관한 연구는 Bozer and White[2]와 Foley and Frazelle[5]을 참고하기 바란다.

Multi-command를 수행하는 크레인의 이동경로는 외견상 Chebyshev Traveling Salesman Problem(CTSP)와 흡사하다. 그러나 multi-command를 수행하는 크레인의 최단경로를 찾기 위해서 이를 CTSP로 모델링할 수는 없다. 그 이유는 첫째, 저장점의 위치들이 미리 결정되어 있는 것이 아니고 일반적으로 N(≥ M)개의 빈 칸중 M개를 저장점으로 선택함과 동시에 이동경로를 결정해야 하며; 둘째, 운반함에 빈칸이 없으면 불출작업을 수행할 수 없다는 제약조건이 추가되고; 셋째, 유닛로드형 자동창고에서는 크레인이 어떤 지점에 정지 후 저장 또는 불출에 소요되는 시간, 즉 pick/deposit time이 경로에 무관하게 일정하지만, 멀티로드형 자동창고에서는 1절에서 설명한 바와 같이 시스템의 처리능력 계산에 필요한 총 소요시간은 크레인의 이동시간 뿐만 아니라 방문지점에서 발생할 수도 있는 크레인 대기시간도 고려해야 하기 때문이다.

다만 multi-command의 작업순서를 결정하기 위한 경험적 방법으로서 CTSP의 경험적 해법중 일부를 사용할 수는 있다. CTSP의 경험적 해법으로 Nearest Neighbor Heuristic (NNH)은 아직 방문하지 않은 점들 중에서 가장 가까운 점을 선택하여 차례로 이동하는 방법이다. 반면에 convex hull을 사용하는 방법은 주어진 방문점들의 가장 외부를 연결하는 convex hull을 구하고 이에 포함되지 않은 방문점들을 특정 기준에 따라 convex hull에 하나씩 삽입해 나가는 방법이다. 삽입기준으로는 Greatest Angle Method, Most Eccentric Ellipse Method, Minimum Cost Insertion 등이 있으며 구체적인 내용은 Bozer et al.[1]을 참고하기 바란다.

작업자 탑승식(man-on-board: MOB) 창고

시스템은 작업자가 직접 크레인에 탑승하여 선반의 여러 지점을 차례로 방문하면서 주로 소형, 경량의 부품을 order picking하는 반자동 창고이다. 특히 이 시스템은 작업자의 안전성 확보를 위하여 크레인이 안전 한계높이 이상에서는 수평 또는 수직으로만 이동하는 rectilinear travel을 사용한다는 특성을 가지고 있다. MOB의 운용정책과 최적 설계방안을 다룬 연구로서 송진영[12]은 크레인의 주행 특성을 고려한 주행시간 모형을 개발하였으며, 이광희[10]는 평균 주행시간을 기초로 MOB의 세 가지의 주문 수행정책을 제시하였고, limit line (rack을 두개의 지역으로 구분하는 수평선의 높이)를 변화시킴으로 인한 주행시간의 변화를 모의실험과 수학적인 분석을 통하여 살펴보았다. 이문규[11]는 space filling curve를 사용하여 MOB 자동창고에서 저장물을 랙에 배치하는 경험적인 방법을 제시하였다. MOB는 주로 소형 부품의 order picking에 사용되고 있으며, 작업자의 안전을 위한 안전한계(safety factor)를 갖는다는 점에서 복수운반형 자동창고와 많은 차이가 있다.

Han et al. [6]의 연구에서는 100% dual command 수행시 불출요청을 접수순으로 처리하는 대신 일정크기의 block 내에서 순서를 조정하여 저장점과 불출점간의 이동거리(Travel-Between)를 줄임으로써 처리능력을 향상시키는 방법을 제안하였으며, 빈칸 수(N)가 1일때는 block size 11, N=3일때는 block size 4에서 불출순서를 NNH로 수행할 때보다 15%의 처리능력 향상을 얻었다. 그밖에 Keserla and Peters[9]는 크레인에 두개의 포크를 장착한 "Dual Shuttle" 크레인을 제안하고 경험적인 알고리즘과 이에 따른 처리능력의 개선폭을 제시하였다. Dual Shuttle 크레인은 최대 4개의 작업을 수행할 수 있기 때문에 "Quadruple Command(QC)"라는 용어를 사용하였다. 본 연구에서 제시하는 "Multi-command"는 QC의 확장이라고도 볼수 있으나 하드웨어 메카니즘의 차이때문에 운영방식과 처리능력의 개선폭이 QC와는 현저하게 다르다.

Ⅲ. 복수운반형 자동창고의 운영방식

일정한 운반함(magazine) 용량을 갖는 복수운반형 자동창고에서 불출요청 품목들의 위치와 저장가능한 빈 칸들의 위치가 주어져 있을 때 입출고점을 출발한 크레인이 저장 및 불출을 모두 수행하고 다시 입출고점으로 돌아오는 경로를 선정하는 방법, 즉 운영방식에 따라서 총 소요시간이 달라지고, 따라서 처리능력(throughput)이 달라진다. 운반함의 용량을 M이라 하고, 크레인이 입출고점을 출발할 때 M개의 저장품을 운반함에 싣고 출발하며, 불출요청된 또다른 M개의 품목을 불출한다고 가정하자. 불출점의 위치는 불출요청이 접수되는 시점에서 이미 결정되어 있다. 한편, 저장점의 위치는 N(≥M)개의 빈 칸들 중에서 M개의 저장점을 임의로 선정할 수 있으며, 저장 및 불출을 모두 수행하는 하나의 폐회로 경로를 구성함에 있어서 저장점들을 적절히 선정하고 작업순서를 적절히 선택함으로써 그 총 소요시간을 최소화하여 multi-command의 처리능력을 극대화할 수 있다.

그러나 multi-command 수행시의 제약조건

으로는 첫째, 최초에 운반함에 M개를 싣고 출발하기 때문에 첫 작업은 반드시 저장작업이 되어야 한다는 점과; 둘째, 운반함에 빈 칸이 없으면 불출작업을 할 수 없고 저장작업만이 가능하다는 점을 고려해야 한다. 본 연구에서는 멀티로드형 크레인의 이동경로를 결정하는 네개의 경험적인 알고리즘을 다음과 같이 제안한다.

(1) ROSO (Retrieve One, Store One) 방식

ROSO방식은 크레인이 하나의 불출작업을 수행한 후, 방금 불출한 위치에 저장품중 하나를 저장하는 방식이다. 불출점들의 위치를 방문하는 순서는 NNH 방식을 사용한다. ROSO방식은 불출위치들의 방문순서만 결정하면 되기 때문에 알고리즘이 가장 단순하다는 장점이 있다. 또한, 별도의 저장점들을 추가적으로 방문할 필요가 없기 때문에 방문지점의 수가 적어서 크레인의 이동시간만 비교한다면 다른 운영방식에 비해 상당히 짧다.

그러나 ROSO방식을 사용하기 위해서는 최초의 불출작업을 위해서 운반함에 한개의 빈 칸이 있어야 하기 때문에 저장품을 (M-1)개만 가지고 입출고점을 출발해야 하므로 전체적인 처리능력을 약간 저하시킨다. 그러나 이보다 더욱 중요한 것은 크레인이 하나의 불출지점에 정지한 상태에서 불출 및 저장작업을 연속적으로 수행해야 하기 때문에 정지시간이 길어진다는 점이다. 다음에 소개할 다른 알고리즘들은 한 지점에서 다른 지점으로 크레인이 이동하는 동안에 크레인에 장착된 로봇팔과 운반함이 준비작업을 수행할 수 있기 때문에 정지시간을 상당히 단축할 수 있을 것으로 보인다. 이러한 크레인의 이동시간과 정지시간 간의 상충성(trade-off)은 모수(parameter)의 크기에 좌우되며, 다음 절에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 정량적으로 살펴 보겠다. 알고리즘을 구체적으로 서술하기 위하여 다음과 같은 표기를 사용하자.

R^o = 불출품목 위치들의 집합

E^o = 빈 칸 위치들의 집합

v^o = 입출고점의 위치

i = 크레인의 현재 위치

d_{ij} = 지점 i와 j 사이의 Chebyshev 거리

n_s = 크레인이 입출고점을 출발한 이후 수행한 저장작업 수

n_r = 크레인이 입출고점을 출발한 이후 수행한 불출작업 수

상기한 표기를 사용하면 ROSO 방식의 알고리즘은 다음과 같으며, 그림 2는 M=5, N=10일 때 ROSO방식에 따른 크레인의 이동경로 예를 보여 준다.

ROSO 방식의 알고리즘

Step 0 : Set $R = R^o$; $E = E^o$; $i = v^o$.

Step 1 : Find $j = \min_{k \in R} \{d_{ik}\}$. (If ties, select randomly.)

Step 2 : Set $R = R - \{j\}$; $i = j$.

Step 3 : If $R = \phi$, then $j = v^o$; stop.
Otherwise go to Step 1.

(2) SARA(Store All, then Retrieve All) 방식

SARA방식은 M개의 저장품을 차례로 모두 저장한 후, M개의 불출품목을 차례로 모두 불출하여 입출고점으로 돌아오는 방식이다. M개의 저장위치들과 또다른 M개의 불출위치들을 방문하는 순서는 각각 NNH 방식을 사용한다. 즉, 저장순서는 입출고점으로부터

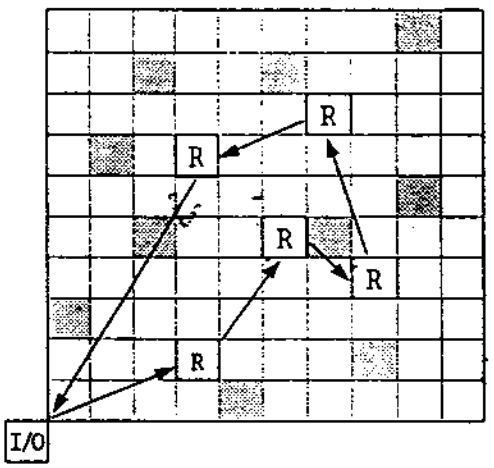


그림 2. ROSO방식에 따른 크레인의 이동경로 例
(M=5, N=10)

출발하여 빈 칸중 가장 가까운 빈 칸에 하나씩 저장한다(Nearest Open Location 방법). M번째 저장이 모두 끝나면 그 위치에서 가장 가까운 불출점으로 이동하여 NNH방법을 계속 적용하고, M개의 불출을 모두 마치면 다시 입출고점으로 돌아옴으로써 하나의 폐회로 경로를 형성한다. SARA 방식은 알고리즘이 비교적 간단한 반면에 저장경로와 불출경로를 각각 별도로 NNH방법을 사용하여 찾아 나가기 때문에 총 이동시간이 상대적으로 다소 길어질 수 있다는 단점이 있다. SARA 방식의 알고리즘은 다음과 같으며, 그림 3은 SARA방식에 따른 크레인의 이동경로 예를 보여 준다.

SARA 방식의 알고리즘

Step 0 : Set $R = R^0$; $E = E^0$; $i = v^0$; $n_s = n_r = 0$.

Step 1 : Find $j = \min_{k \in E}\{d_{ik}\}$. (If ties, select randomly.)
Set $E = E - \{j\}$; $n_s = n_s + 1$; $i = j$.

Step 2 : If $n_s = M$, go to Step 3; otherwise go to Step 1.

Step 3 : Find $j = \min_{k \in R}\{d_{ik}\}$. (If ties, select randomly.)
Set $R = R - \{j\}$; $i = j$.

Step 4 : If $R = \phi$, then $j = v^0$; stop. Otherwise go to Step 3.

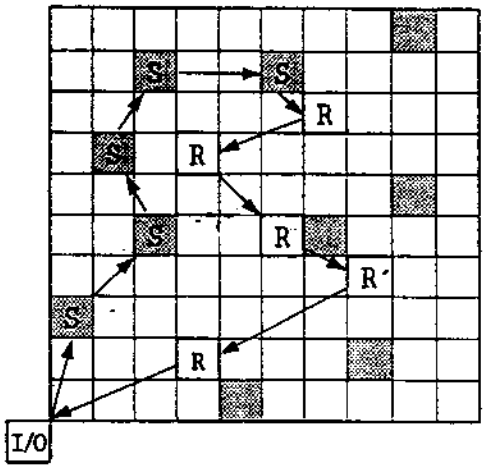


그림 3. SARA방식에 따른 크레인의 이동경로 例
(M=5, N=10)

(3) NSOR(Nearest Storage Or Retrieval) 방식

앞서 제시한 SARA 방식에서는 크레인이 먼저 저장지점을 모두 방문한 후에 비로서 불출지점을 방문하기 때문에 저장지점 사이에 위치한 불출지점을 효과적으로 활용하지 못하는 단점이 있다. NSOR 방식은 이러한

단점을 개선한 알고리즘으로서 크레인이 다음 방문지점을 결정할 때 저장점 또는 불출점 중 가장 가까운 지점을 선택한다. 단, 운반함에 남은 여유공간이 없으면 불출작업은 불가능하기 때문에 이 경우에는 빈 칸중에서 가장 가까운 점을 저장점으로 선택한다. NSOR 방식의 알고리즘은 다음과 같으며, 그림 4는 NSOR방식에 따른 크레인의 이동경로 예를 보여 준다.

NSOR 방식의 알고리즘

Step 0 : Set $R = R^o$; $E = E^o$; $i = v^o$; $n_s = n_r = 0$.

Step 1 : If $n_s > n_r$, then set $P = E + R$; otherwise $P = E$.

Step 2 : Find $j = \min_{k \in P}\{d_{ik}\}$. (If ties, select randomly.)

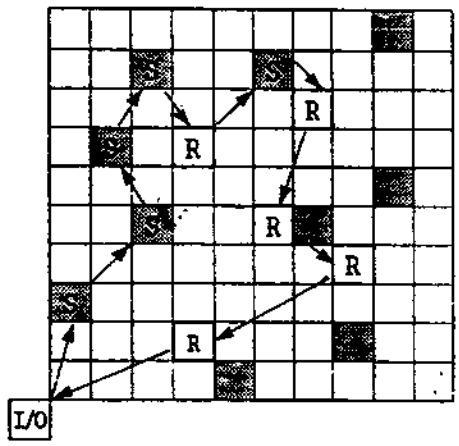
Step 3 : If $k \in E$, set $E = E - \{j\}$; $n_s = n_s + 1$; $i = j$.
Otherwise set $R = R - \{j\}$; $n_r = n_r + 1$; $i = j$.

Step 4 : If $n_s = M$, set $E = \phi$.

Step 5 : If $R = \phi$, then $j = v^o$; stop.
Otherwise go to Step 1.

(4) ASRI(Alternate Storage & Retrieval after Insertion) 방식

앞서 제시한 NSOR방식은 근시안적(myopic)인 접근방법이기 때문에 두 세 스텝 이후를 내다보지 못한다. 즉, 운반함의 빈 자리가 소진되는 순간에는 불출작업은 불가능하고 저장작업을 위하여 빈 칸중에서만 선택해야 하는 경우가 발생하여 불필요하게 긴 이동경로를 택해야 하는 경우가 생길 수 있다. ASRI방식은 이를 보완하기 위하여 먼저 불출점들만을 방문하는 경로를 NNH 방법으로 결정한 후, 연속한 두 불출점 사이에 각각 하나씩의 저장점을 미리 선정하여 경로에 삽입해 준다. 즉, 입출고점과 첫번째 불출점 사이에 삽입될 저장위치를 선정하기 위하여 각 빈 칸중 크레인의 추가이동시간이 최소인 빈 칸을 선정한다. 다음에는 첫번째와 두번째 불출점 사이에 삽입될 저장위치를 선정하기 위하여 나머지 빈 칸중 크레인의 추가이동시간이 최소인 빈 칸을 선정한다. 이와 같은 방법으로 얻어지는 최종경로는 입출고점으로부터 출발하여 저장과 불출이 각각 한번씩 번갈아 가면서 수행된 후 다시 입출고점으로 되돌아 오는 폐경로를 형성하게 된다.



: 빈칸, S : 저장점, R : 불출점

그림 4. NSOR방식에 따른 크레인의 이동경로 例 (M=5, N=10)

ASRI방식의 특징은 불출지점 간을 이동할 때 No-Cost Zone에 위치한 저장위치를 활용할 가능성이 매우 높다는 점이다. No Cost Zone이란 Han et al.[6]의 연구에서 제안된 개념으로서, normalized rack상에서 dual com-

mand 수행시 불출점의 위치가 정해지면 No-Cost Zone은 그림 5a에서 보듯이 입출고점으로부터 수평축과 45도를 이루는 선(L)과 불출점(R)으로부터 L에 내린 수직선, 그리고 R을 지나며 L에 평행한 직선 및 수직 또는 수평축으로 이루어지는 사각형의 구역을 말한다. 저장점이 No Cost Zone 내부에 위치할 경우에는 dual command를 수행하기 위한 크레인의 이동시간은 불출만을 수행하는 single command의 이동시간과 동일하다. 즉 저장을 위한 추가적인 이동시간이 발생하지 않는다.

그러나 multi-command에서의 No-Cost Zone은 입출고점이 아닌 두개의 (불출)지점에 의해 결정되는 구역으로서, 그림 5b에서 보듯이 그 형태는 역시 평행사변형 꼴이며, 두 지점이 형성하는 선분이 수직 또는 수평에 가까울수록 No-Cost Zone은 넓어지는 반면에, 그 선분이 45도선에 가까우면 No-Cost Zone은 좁아지게 된다. ASRI 방식의 알고리즘은 다음과 같으며, 그림 6은 ASRI방식에 따른 크레인의 이동경로 예를 보여 준다.

ASRI 방식의 알고리즘

Step 0 : Set $R = R^0$; $E = E^0$; $i = v^0$, $m = 1$.

Step 1 : Find $j = \min_{k \in R}\{d_{ik}\}$.
(If ties, select randomly.)
Set $R = R - \{j\}$; $i = j$.

Step 2 : If $R = \phi$, then $j = v^0$; go to step 3.
Otherwise go to step 1.

Step 3 : For m-th arc (from the I/O point) between u and v,
Find $j = \min_{k \in E}\{d_{uk} + d_{kv,}\}$.
(If ties, select randomly.) Set $E = E - \{j\}$.

Step 4 : If $m < M$, then $m = m + 1$; go to step 3.
Otherwise stop.

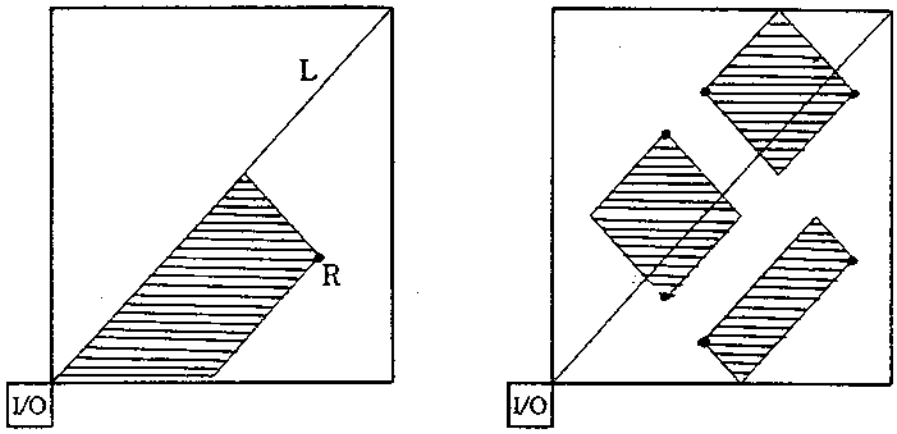
4. 수행도 평가

4.1 컴퓨터 시뮬레이션

본 절에서는 앞서 제시한 네개의 경험적 운영방식의 수행도를 비교하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다. 자동창고의 선반은 한 변의 길이가 12.5cm, 두께가 1cm인 CD (Compact Disc)를 눕혀서 저장하기 위하여 각 칸의 길이가 15cm, 높이 2.5cm인 칸이 가로 40행, 세로 40단인 단면 선반이다. 크레인의 속도는 수평 및 수직방향으로 각각 초속 15cm와 2.5cm로서 선반은 square-in-time이다. 입출고점의 위치는 선반 좌측 하단보다 한칸 좌측 아래에 위치한다[13]. 불출주문은 접수순으로 M개씩 처리하되, 그 block 내에서는 각 운영방식에 따라 불출순서를 결정한다. 저장품도 항상 M개 이상이 대기중인 것으로 가정한다.

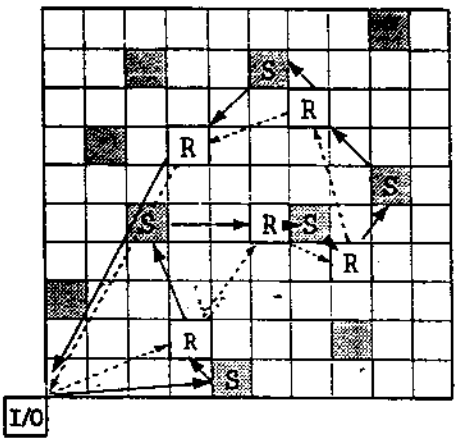
복수운반형 자동창고에서 크레인이 복수개의 저장품을 운반하면서 저장 또는 불출작업을 수행하는 기계적 메카니즘은 여러 형태로 설계할 수 있으나, 여기서는 가장 단순하게 그림 1과 같이 관절형 로봇 팔이 크레인에 장착된 형태를 고려하기로 하자. Multi-command를 수행하는 동안 필요한 로봇 팔의 단위동작은 다음과 같다.

R(rotate) : 선반과 운반함 사이에서 방향을 90도 회전하는 동작



(a) Dual command 수행시 (b) Multi-command 수행시

그림 5. No-Cost Zone 例



▒ : 빈칸 S : 저장점, R : 불출점

----→ 불출지점만을 NNH로 결정한 경로

——→ 각 arc마다 하나의 저장점을 삽입한 후의 경로

그림 6. ASRI방식에 따른 크레인의 이동경로 例
(M=5, N=10)

P(pick) : 선반 또는 운반함으로부터 CD를 꺼내는 동작

D(deposit) : 선반 또는 운반함에 CD를 집어넣는 동작

MV(move) : 운반함의 한 위치로부터 다른 위치로 로봇 팔이 이동하는 동작

크레인이 multi-command를 수행하는 동안 연속되는 두 작업의 종류에 따라 로봇 팔의 동작이 달라진다. 예를 들면 저장작업 후 또 다른 저장작업을 수행하는 경우를 살펴 보자. 로봇 팔이 선반에 CD를 집어넣는 동작(D)이 끝나면 크레인은 다음 저장위치로 이동을 시작할 수 있다. 이 때 다음 저장작업을 위한 로봇 팔의 준비동작은 운반함을 향하여 90도 회전(R); 다음 저장물을 집음(P); 그리고 선반을 향하여 90도 회전(R)이 필요하다. 이러한 로봇 팔의 준비동작 소요시간과 크레인의 다음 저장위치로의 이동시간 중 긴 시간에 의해서 다음 저장작업까지의 소요시

간이 결정된다. 이러한 로봇 팔의 준비동작 소요시간은 연속되는 두 작업의 종류에 따라 모두 여덟 가지가 존재하며, R과 MV의 소요시간을 각각 $1T_e$, P와 D의 소요시간을 각각 $3T_e$라고 가정하고, T_e=1초로 가정하면 각 종류별 준비 소요시간은 표 1과 같다.

표 1. 연속되는 작업 쌍의 종류별 로봇팔의 동작 및 소요시간(t_e=1초인 경우)

연속작업의 종류	로봇팔의 동작	소요시간
I/O → 저장	P+R	4초
I/O → 불출	R	1초
저장 → 저장	R+P+R	5초
저장 → 불출	-	0
불출 → 저장	R+D+M+P +R	9초
불출 → 불출	R+D+R	5초
불출 → I/O	R+D	4초
저장 → I/O	R	1초

저장점 및 불출점은 선반상의 임의의 점에 위치한다고 가정하였고, 각각 1000번을 반복 수행하여 평균치를 얻었다. 네개의 운영방식에 대한 상대적 비교에 중점을 두기 위해서 매번 생성된 동일 문제에 대하여 네가지 운영방식의 수행도를 각각 구하였으며, 이를 위하여 저장점과 불출점의 위치를 매번 새로이 지정해 주는 "restart" 방식을 사용했다. 프로그램은 C언어로 작성하였으며, 486 PC상에서 수행하였다.

4.2 수행도 평가 기준

수행도를 비교하기 위한 평가기준으로는 다음의 세 가지를 사용하였다.

(1) 평균 이동시간 (T_t: Average Travel Time)

Multi-command를 수행하는 동안의 크레인의 이동시간의 평균을 말하며, 각 지점에서 로봇 팔의 준비동작에 따른 크레인의 대기시간이나 입출고 작업시간을 고려하지 않은 순수한 이동시간만을 의미한다. ROSO방식은 M개의 불출점만을 방문하고, 나머지 세 방식들은 2M개의 지점을 방문하기 때문에 평균 이동시간에 차이가 나타나겠지만, 나머지 세 방식에서 No-Cost Zone을 많이 이용한다면 그 차이는 크지 않게 될것이다.

(2) 단위시간당 처리능력

크레인이 입출고점을 출발하여 저장 및 불출점을 차례로 방문한 후 다시 입출고점으로 돌아올 때까지 소요되는 총 시간을 T_c(Total Cycle Time)로 표시하자. 즉 T_c는 크레인의 이동시간 뿐 아니라 각 지점에서 입출고 준비에 따른 크레인의 대기시간이나 입출고 작업시간을 고려한 실제 소요시간이다. 한번의 multi-command를 수행하는 동안 J개의 저장 또는 불출작업을 수행할 경우, 자동창고의 단위시간당 처리능력(throughput)은 J/T_c 로 표시되며, 이는 다량의 정보매체를 고속으로 불출 및 저장해야 하는 multi-load형 자동창고의 중요한 평가척도가 된다.

(3) Back Tracking

Back Tracking이란 크레인이 한 지점을 방문한 후 다음 지점을 향해 이동할 때 수평 또는 수직방향으로 종전의 이동방향과 반대방향으로 이동하는 경우를 말한다. 기계들은 일반적으로 Back Tracking 빈도를 최소화하는 것이 바람직한데, 그 이유는 Back Tracking이 발생할 때마다 기어(gear)간의 미세한 공간(back lash)으로 인한 기계적 충격 및 마모

가 발생하여 기계적 오차 및 고장의 원인이 되기 때문이다.

4.3 결과 분석

시뮬레이션을 수행함에 있어서 다음과 같은 방법으로 상태변수 값들을 변화시키면서 네가지 운영방식의 수행도를 비교한다.

- 운반함의 용량(M): M=1, 2, 3, 5, 10, 20에 대하여 비교한다. M=1인 경우는 유닛로드형 자동창고와 동일한 결과를 얻을 것이다.
- 선반상의 빈 칸의 갯수(N): N값이 클수록 저장위치 선정시 선택의 폭이 넓어진다. 본 절에서는 1600개의 칸을 갖는 선반에 대하여 N값을 10에서 100까지 10씩 증가시키면서 비교한다.
- 로봇 팔의 단위동작 소요시간(T_e): 로봇 팔 동작의 제어가 고성능화 될수록 단위동작의 소요시간이 짧아지며, 극단적으로 $T_e=0$으로 수렴하면 T_c가 T_t에 수렴하게 되어 운영방식의 우열이 처리능력에 보다 큰 영향을 미치게 된다. 본 절에서는 $T_e=0$인 경우, 즉 크레인이 무한대로 빨리 이동하는 극한 경우; 그리고 $T_e=1$초인 경우, 즉 가장 현실적으로 근사한 경우를 비교하였다.

(1) 운반함 용량(M)의 변화에 따른 수행도 비교

일반적으로 운반함 용량이 클수록 through-put이 증가되기는 하지만 용량을 늘리는 데는 하드웨어의 제약상 한계가 있기 때문에 운반함 용량 확장과 처리능력 증대 간의 trade-off 관계를 살펴볼 필요가 있다. 표 2는 운반함 용량(M)을 변화시킬때의 운영방식별

표 2. 운반함 용량(M) 변화에 따른 운용방식 수행도 (N=100)

		M	ROSO	SARA	NSOR	ASRI
$t_e=0$	크레인 이동시간 (초)	1	52.96	53.98	53.98	53.04
		2	70.95	73.20	73.12	71.28
		3	83.18	87.10	86.74	83.88
		5	100.76	109.04	107.94	102.45
		10	131.91	153.00	148.62	138.33
		20	176.88	225.21	211.52	199.34
	분당 처리갯수	1	1.13	2.22	2.22	2.26
		2	2.54	3.28	3.28	3.37
		3	3.61	4.13	4.15	4.29
		5	5.36	5.50	5.56	5.86
		10	8.64	7.84	8.07	8.67
		20	13.23	10.66	11.35	12.04
$t_e=1$	총 소요시간 (초)	1	62.98	61.37	61.37	59.27
		2	93.95	89.09	89.11	85.81
		3	119.18	111.66	111.59	107.52
		5	162.76	151.32	151.04	145.81
		10	258.91	241.12	240.09	236.38
		20	433.88	410.11	408.16	412.01
	분당 처리갯수	1	0.95	1.96	1.96	2.02
		2	1.92	2.69	2.69	2.80
		3	2.52	3.22	3.23	3.35
		5	3.32	3.97	3.97	4.11
		10	4.40	4.98	5.00	5.08
		20	5.39	5.85	5.88	5.83

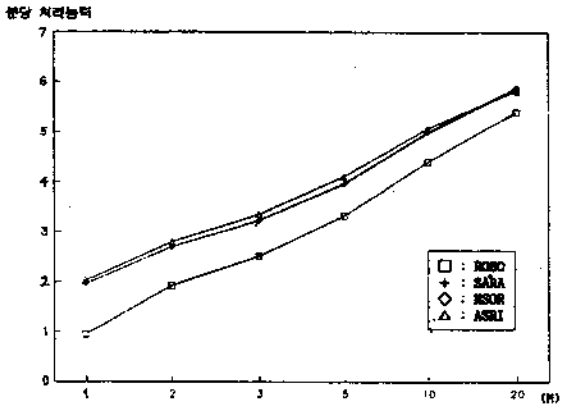


그림 7. 운반함 용량(M)변화에 따른 운영방식별 처리능력 (N=100인 경우)

수행도를 나타낸 것으로서, 일반적으로 운반함 용량이 증가할수록 방문지점 수가 늘어나므로 평균 이동시간과 총 소요시간, 그리고 Back Tracking 횟수 모두 당연히 증가하게 된다. 먼저 $T_e=0$ 인 경우를 살펴보자. 우선 방문지점의 수는 ROSO의 경우 M개의 지점을 방문하지만 최초 불출을 위하여 (M-1)개의 저장품만을 가지고 입출고점을 출발하기 때문에 처리 작업수는 (2M-1)개이다. 반면에 나머지 세 운영방식에서는 2M개의 저장 또는 불출작업을 수행한다. ROSO와 나머지 세 방식을 비교해 보면 M=10인 경우 방문지점 수는 10:20이다. 그러나 크레인 평균이동시간은 ROSO가 131.91초인데 반하여 나머지 세 운영방식의 크레인 평균이동시간은 ROSO의 104.9% 내지 116.0%에 불과하다. 이것은 방문지점 수는 두배이지만 No-Cost Zone을 많이 활용했기 때문에 추가적 이동거리가 매우 적게 발생함을 의미한다. 처리능력에 관해서는 M<5에서는 처리 작업수의 차이로 ROSO만이 뒤떨어지지만, M>5부터는 방문지점 수가 적은 ROSO가 우세하게 된다. 그러나 운영방식 간의 공정한 처리능력 비교는 로봇 팔의 준비시간을 고려한 $T_e=1$초에서 비교해야 하며, 다만 여기에서는 크레인의 이동거리만 비교할 때 M=20인 경우 ASRI의 처리능력이 SARA보다 12.9% 큰것으로 나타났다.

다음은 $T_e=1$초, 즉 가장 현실적인 상황에서 운영방식별 처리능력을 비교해 보면, N=100인 경우 그림 7에서 보듯이 M의 증가에 따라 처리능력은 증가하지만 그 증가율은 감소함을 알수 있다. ROSO 방식의 처리능력이 가장 낮은 이유는 나머지 세 운영방식은 크레인이 이동하는 동안에 로봇 팔이 준비작업을 수행할 수 있지만 ROSO 방식은 불출작업을 마친 후 그 자리에서 준비작업을 거쳐 저장작업을 수행해야 하므로 크레인의 정지시간이 길어지기 때문이다. 또한 ROSO를 제외한 세 운영방식은 N=100인 경우 그 최대 차이가 M=5에서 약 3.5%로서 수행도가 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 N값이 변하면 세 방식의 수행도는 상당히 달라진다는 것을 다음 절에서 보이겠다.

(2) 빈칸의 갯수(N)의 변화에 따른 수행도 비교

표 3과 그림 8은 N값의 변화에 따른 각 운영방식의 분당 처리능력을 나타낸다. 그림 8은 M=5, $T_e=1$초인 경우로서, N값을 충분히 증가시켜 보면 ASRI 방식의 처리능력이 가장 커지는데, 그 이유는 선반상에 빈 칸이 많을수록 각 불출점들을 연결하는 arc주변의 저장위치 선택의 폭이 커지기 때문이다. 그러나 N값이 작으면 ASRI방식은 저장과 불출을 번갈아 수행해야 한다는 제약때문에 이동경로가 불필요하게 길어져서 처리능력이 작아지는 반면에, NSOR은 저장이나 불출중 어느 쪽이든 가까운 쪽으로 선택할 수 있기 때문에 처리능력이 커진다. ROSO의 처리능력은 N값에 무관하다.

여기서 복수운반형 자동창고, 즉 multi-command가 single command나 dual command에 비해서 처리능력이 얼마나 큰지 살펴보자. Bozer and White[3]의 표기를 사용하여 본절에서 다루고 있는 예제의 $T_e=1$초인 경우를 기준으로 하면 T=40초, b=1, $T_{p/d}$ = 3초이므로 $T_{SC} = (b^2/3 + 1)T + 2T_{p/d} = 59.33$초이며, 분당 처리능력은 60/59.33 = 1.01 작

표 3. 빈 칸 갯수(N)의 변화에 따른 운영방식별 총 소요시간 및 처리능력

		총 소요시간(초)				분당 처리갯수			
M	N	ROSO	SARA	NSOR	ASRI	ROSO	SARA	NSOR	ASRI
5	10	162.46	164.80	158.29	169.85	3.32	3.64	3.79	3.53
	20	162.61	156.28	153.22	153.94	3.32	3.84	3.92	3.90
	30	162.52	153.96	151.68	149.90	3.32	3.90	3.96	4.00
	40	162.91	152.53	151.23	148.56	3.31	3.93	3.97	4.04
	50	162.47	151.43	150.38	147.45	3.32	3.96	3.99	4.07
	60	162.53	151.43	150.45	147.12	3.32	3.96	3.99	4.08
	70	162.93	151.20	150.56	146.92	3.31	3.97	3.99	4.08
	80	163.23	152.24	151.69	146.92	3.31	3.94	3.96	4.08
	90	162.40	150.98	150.28	146.11	3.33	3.97	3.99	4.11
	100	162.76	151.32	151.04	145.81	3.32	3.97	3.97	4.11
10	10	258.30	293.10	261.19	359.68	4.41	4.09	4.59	3.60
	20	258.21	257.84	245.79	263.59	4.42	4.65	4.88	4.55
	30	258.11	248.24	242.18	248.61	4.42	4.83	4.95	4.83
	40	258.72	244.57	240.69	242.63	4.41	4.91	4.99	4.95
	50	258.43	242.77	240.62	239.89	4.41	4.94	4.99	5.00
	60	259.32	243.22	241.04	238.99	4.40	4.93	4.98	5.02
	70	258.81	242.68	239.96	237.89	4.40	4.94	5.00	5.04
	80	258.59	240.86	239.19	236.91	4.41	4.98	5.02	5.07
	90	258.97	241.00	239.53	236.74	4.40	4.98	5.01	5.07
	100	258.91	241.12	240.09	236.38	4.40	4.98	5.00	5.08

업/분 이다. 한편 b=1이므로 $T_{DC} = 1.8T + 4T_{p/d}$ = 84초이며, 2개 작업을 수행하므로 분당 처리능력은 2(60)/84 = 1.43 작업/분 이다. 이와 비교할 때 multi-command의 분당 처리능력은 그림 9에서 보듯이 M이 증가함에 따라 증가하지만, M이 커짐에 따라 그 증가율은 둔화된다. N=100, T_e=1초, M=5일때 ASRI방식을 사용하는 multi-command의 처리능력은 SC와 DC의 처리능력에 대하여 각각 4.07배와 2.87배에 달하며, M=10일 때는 각각 5.03배와 3.55배에 달하는 것으로 나타났다. 즉, 복수운반형은 유닛로드형에 비해 300% 이상의 대폭적인 처리능력 향상이 가능함을 의미한다.

(3) Back tracking 횟수 비교

운영방식별 Back tracking 평균횟수는 표 4에서 보듯이 X축방향이나 Y축방향에 무관하며, 그림 10에서 보듯이 M=10인 경우를 볼 때 ROSO는 방문지점 수가 다른 방식보다 적기 때문에 back tracking 횟수도 적다. ASRI 방식은 N>80, 즉 빈칸이 전체 칸수의 5%를 넘는 경우에는 SARA나 NSOR과 비슷한 것

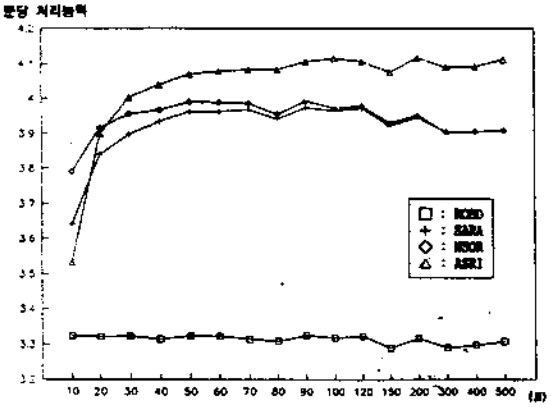


그림 8. 빈칸 갯수(N)의 변화에 따른 처리능력 비교 (M=5인 경우)

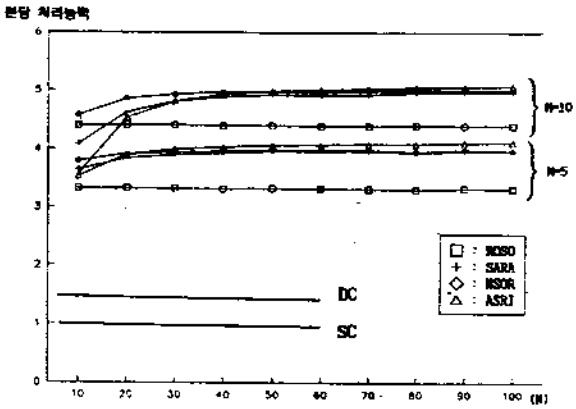


그림 9. 유닛로드형과 복수운반형 자동창고의 처리능력 비교 (t_e=1초인 경우)

으로 나타났으며, 모든 N값에 대해 NSOR이 SARA보다 약 12.7% 정도 적은 것으로 나타났다.

5. 결론 및 향후 연구

종래의 대부분의 자동창고는 제조업이나 유통업에서 팔렛단위의 대형, 중량물을 다룬다. 그러나 본 연구에서 소개하는 자동창고는 비디오 테이프나 컴팩트 디스크(CD) 등의 소형, 경량의 정보매체를 대량 보관하면서 소비자의 요청에 따라 저장품을 불출해 주고, 사용후 반납되는 품목을 다시 저장하는 특수기능의 자동창고이며, 보다 효율적인 운영을 위해서 크레인에 장착된 운반함(magazine)을 사용하여 복수개의 품목을 차례로 저장 또는 불출하는 multi-command를 수행한다.

본 연구에서는 이와 같은 multi-command를 수행할 수 있는 네개의 경험적인 운영방식, 즉 ROSO(Retrieve One, Store One) 방식; SARA(Store All, then Retrieve All) 방식; NSOR(Nearest Storage Or Retrieval) 방식; 그리고 ASRI(Alternate Storage and Retrieval after Insertion) 방식을 제시하였으며, 운영방식의 상대적 성능을 비교하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이들의 수행도는 사용되는 모수값에 따라 달라지지만 일반적으로 볼때 ASRI방식의 처리능력이 가장 커서, 가장 단순한 운영방식인 ROSO방식과 비교할 때 운반함 용량(M)이 5일 경우 최대 23.8% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 유닛로드형 자동창고를 single command나 dual command로 사용하는 경우와 비교할 때 멀티로드형 자동창고는 M=5인 경우 ASRI방식 사용시 처리능력이 각각 4.07배와 2.87배로 나타났으며, M=10일 때는 각각 5.03배와 3.55배에 달하는 것으로 나타났다. 이러한 처리능력의 증가는 자동창고의 처리능력 개선을 위한 다른 여러가지 노력에 비하여 획기적인 개선폭이라고 볼수 있다.

21세기 정보화 사회 및 멀티미디어 시대로

표 4. 운영방식별 Backtracking 평균횟수 (M=10 경우)

N	ROSO		SARA		NSOR		ASRI	
	X축	Y축	X축	Y축	X축	Y축	X축	Y축
10	3.64	3.68	7.79	7.90	6.80	6.68	13.11	13.17
20	3.67	3.65	7.43	7.39	6.58	6.57	10.20	10.17
30	3.65	3.65	7.29	7.24	6.43	6.45	8.98	9.10
40	3.67	3.67	7.07	7.23	6.32	6.46	8.21	8.23
50	3.65	3.62	7.10	6.93	6.44	6.26	7.77	7.73
60	3.61	3.65	7.05	7.08	6.31	6.45	7.39	7.56
70	3.69	3.66	6.99	7.02	6.43	6.26	7.24	7.13
80	3.68	3.65	6.96	6.85	6.34	6.19	6.91	6.89
90	3.64	3.73	6.86	6.95	6.25	6.29	6.79	6.86
100	3.73	3.66	6.93	6.83	6.28	6.23	6.73	6.65

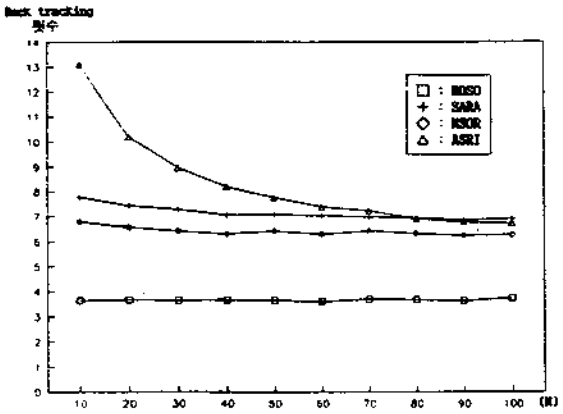


그림 10. 빈칸 갯수(N)변화에 따른 Back tracking 평균횟수 (M=10인 경우)

진입함에 따라 각종 정보매체가 홍수처럼 쏟아져 나오는 현 싯점에서 이들 다량의 정보매체를 체계적으로 고속 저장 및 불출하는 복수운반형 자동창고의 응용분야는 앞으로 특허정보, 전자도서관, 영상 문화산업 등에 걸쳐 더욱 커질 전망이다.

추가적인 연구로는 ASRI방식에 최적화 기법을 도입하는 방안 연구; 처리능력의 상한값 분석에 따른 알고리즘 최적성(optimality) 검토; 각 운영방식을 계속적으로 적용할 때 선반상의 빈칸위치들의 動的 분포 변화; 그리고 multi-command에 대한 총 소요시간을 N, M, T_e 등의 함수로 나타내는 근사식 유도 등을 수행중이다.

참 고 문 헌

[1] Bozer, Y. A., Schorn, E. C., and Scharp, G. P., "Geometric Approaches to Solve the Chebyshev Traveling Salesman Problem," *IIE Transactions*, 22(3), pp.238-254, 1990

[2] Bozer, Y. A. and White, J. A., "Design and Performance Models for End-Of-Aisle Picking System," *Management Science*, 36(7), pp.852-866, 1990

[3] Bozer, Y. A. and White, J. A., "Travel-

Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems," *IIE Transactions*, 16 (4), pp.329-337, 1984

[4] Elsayed, E. A. and Unal, O. I., "Order Batching Algorithms and Travel-Time Estimation for Automated Storage/Retrieval Systems," *Intl. J. Prod. Res.*, 27 (7), pp.1097-1114, 1989

[5] Foley, R. D. and Frazelle, E. H., "Analytical Results for Miniload Throughput and the Distribution of Dual Command Travel-Time," *IIE Transactions*, 23(3), pp. 273-281, 1991

[6] Han, M. H., McGinnis, L. F., Shieh, J. S., and White, J. A., "On Sequencing Retrievals in an Automated Storage/Retrieval System," *IIE Transactions*, 19(3), pp. 56-66, 1987

[7] Hwang, H. and Ko, C. S., "A Study on Multi-aisle System Served by a single Storage/Retrieval Machine," *Intl. J. Prod. Res.*, 26(11), pp.1727-1737, 1988

[8] Hwang, H., Back, W. J., and Lee, M. K., "Clustering Algorithms for Order Picking in an Automated Storage/Retrieval System," Intl. J. Prod. Res., 26(2), pp.189-201, 1988

[9] Keserla, A. and Peters, D. A., "Analysis of Dual-Shuttle AS/RSs," *Journal of Manufacturing System*, 13(6), pp.424-434, 1994

[10] Lee, K. H., "A Study on Order Picking Policies in Man-On-Board Automated Storage and Retrieval Systems," Master's Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1991

[11] Lee, M. K., "A Storage Assignment Policy in a Man-On-Board AS/RS," *Intl. J. Prod. Res.*, 30(10), pp.2281-2292, 1992

[12] Song, J. Y., "A Study on Man-On-Board Storage and Retrieval Warehousing System," Ph.D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1993

[13] 김남하, 임석철, 홍석교, 이수훈, 홍만표, "유닛로드형 자동창고의 수행도 분석," 대한산업공학회지, 20(2), pp.39-50, 1994

[14] 홍석교, 홍만표, 이수훈, 임석철, "화상정보 매체용 물류관리 시스템 개발," 상공자원부 공업기반기술 과제 최종보고서, 1995, 아주대학교