

유닛로드형 자동창고의 수행도 분석

Performance Analysis of Unit-load AS/R Systems

김남하, 임석철¹⁾, 홍석교²⁾, 이수훈³⁾, 홍만표⁴⁾

Nam Ha Kim, Suk Chul Rim,
Suk Kyo Hong, Soo Hoon Lee, Man Pyo Hong

Abstract

Most research results on the throughput of unit-load automated storage retrieval (AS/R) systems assume the randomized storage; that is, all slots in the entire rack are equally likely to be selected for the storage location. However, for the most existing AS/R systems which use Closest Open Location storage policy, Park[5] mathematically showed that this assumption results in a significant difference from the actual performance of AS/R systems.

In this study, we present more details about the performance of the unit-load AS/R systems by considering the rack utilization and rack density; and examine their impact on the throughput of AS/R systems by using computer simulation. A new storage policy named Shortest Cycle Location(SCL) is proposed. Simulation results indicate that the performance of SCL policy consistently outperforms the Closest Open Location storage policy. We also define the "Extra-Cost Zone" compared to the "No-Cost Zone"[3] and explore its geometric and practical meaning.

1. 서론

자동창고는 재래식 창고와 비교할 때 컴퓨

터 및 데이터베이스와 연계하여 저장품을 체계적으로 관리할 수 있고, 입출고 소요시간을 단축할 수 있어서 제조업 뿐만 아니라 유

- 1) 아주대학교 산업공학과
- 2) 아주대학교 제어계측 공학과
- 3) 아주대학교 생산자동화 공학과
- 4) 아주대학교 컴퓨터 공학과

(본 연구는 상공부 공업기반기술과제 연구비의 지원으로 수행되었음.)

통업 및 정보서비스 산업에서도 그 응용분야가 확대될 것으로 보인다. 예를 들면 비디오 테이프나 콤팩트 디스크(CD) 등 일정한 크기의 정보매체들을 대량으로 관리하면서 고객의 불출소요에 신속하게 대응하기 위한 Intelligent Media Service System[10]을 개발하기 위하여 제어계측, 컴퓨터, 및 자동화기술과 산업공학의 최적화기술이 종합적으로 요구되고 있으며, 이러한 고밀도, 고속 자동창고는 향후 도서관의 CD library기능, 또는 각국에서 CD로 제작되는 특허정보를 대량보관하면서 신속하게 조회하는 첨단정보시스템의 주요 구성품이 될 것으로 보인다.

이와 같이 고속도, 고처리능력이 요구되는 자동창고를 효율적으로 운영하기 위해서 그 처리능력을 정확하게 추정하는 것은 자동창고의 설계단계와 운영단계에서 공히 매우 중요하다. 유닛로드형 자동창고의 처리능력(throughput), 즉 단위시간당 처리품목수는 하나의 저장 또는 불출주문을 처리하기 위한 평균소요시간의 역수로 정의된다. 그러나 유닛로드형 자동창고의 처리능력을 추정하는 기존의 모형들은 대부분 비현실적인 가정사항을 내포함으로써 말미암아 실제로 사용되는 자동창고에 적용할 경우 상당한 오차가 발생하게 된다.

유닛로드형 자동창고의 처리능력을 추정하기 위하여 저장 또는 불출명령을 수행하는 크레인의 평균이동시간을 산출하는 모형으로 Travel Time Model[1]이 대표적이다. 이 모형의 가정사항으로는 첫째, 선반(rack)의 모든 빈 칸(slot)이 저장점으로 선택될 확률이 동일하다고 가정하였고; 둘째, 수식을 단순화하기 위해서 선반을 연속평면으로 가정하

였으며; 셋째, 크레인의 가감속에 따른 속도 변화를 단순화하기 위하여 평균속도를 사용하였다. 실제로 대부분의 자동창고에서 저장정책으로 最近点(Closest Open Location: COL) 저장방식이 사용되고 있는 바, 첫째 가정으로 인하여 Travel Time Model의 결과는 크레인의 평균이동시간을 실제보다 과대평가하게 된다. 둘째 가정에 의해서는 실제 선반 입출고점이 어디에 위치한다고 가정하는가에 따라서 평균이동시간을 실제보다 과대평가 또는 과소평가할 수 있다.

Park[6]의 연구에서는 COL 저장방식을 사용하는 자동창고에서 크레인의 평균이동시간은 Travel Time Model에서 가정하는 것처럼 선반의 전체면적에 대하여 균일한 분포를 갖지 않는다는 것을 수학적으로 보였다. 이 연구에서는 저장요구의 도착간 시간과 저장품의 선반내 저장기간을 각각 Poisson(λ)와 Exponential(μ) 분포로 가정하고 $a = \lambda\mu$ 로 표시되는 평균저장소요(offered load)를 사용하며, a 값이 증가할 때 선반의 총 칸수 N 이 a 에 비해 상대적으로 크면 평균이동거리는 총 칸수가 a 인 선반내에 임의점 저장방식하에서의 평균이동거리에 수렴한다는 것을 수학적으로 보였다. 본 연구에서는 평균저장소요 a 대신에 전체선반면적에 대한 평균사용면적, 즉 선반이용율(rack utilization)이라는 개념을 고려한다. 선반이용율은 사용자에게 보다 직관적으로 의미가 전달될 뿐 아니라 평균저장소요에서 사용하는 두 확률분포에 무관하게 사용할 수 있는 장점이 있다.

크레인의 가감속도를 고려한 연구로 Hwang & Lee[5]는 수평 및 수직 가속도의 크기와 수평 및 수직방향의 최대이동시간들

간의 관계에 따라 세가지의 경우로 분류하고, 각 경우에 대하여 one-way travel과 travel-between 이동시간의 기대치에 관한 수식을 유도하였다. 그러나 가감속도 이외의 가정은 그대로 사용하였고, 결과식이 매우 복잡하기 때문에 사용하기가 어렵다.

본 연구에서는 선반 이용율(rack utilization)과 선반면의 세밀도(rack density)가 자동창고의 수행도에 미치는 영향을 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 상세히 고찰한다. 선반 이용율이란 선반 전체의 면적중 저장에 사용되는 면적의 평균적인 비율을 말하며, 일반적으로 자동창고 설계시의 저장용량과 입출고율 및 계절성 등에 기인하여 변화한다. 한편, 선반의 세밀도란 선반상의 빈 칸들이 실제로는 이산적(discrete)이지만 선반전체의 면적에 대하여 상대적으로 얼마나 연속평면에 가까운가를 나타내는 척도이다.

컴퓨터 시뮬레이션 모형에서는 선반(rack)의 각 칸(slot)이 저장점으로 선택될 확률이 동일하다고 가정하는 randomized storage 가정 대신에, 보다 현실적인 세 가지 저장정책을 사용하여 크레인의 평균이동시간을 측정한다. 일반적으로 수평속도와 수직속도는 그 크기가 다르지만, 선반의 수평 및 수직거리를 수평 및 수직속도로 각각 나눔으로써 얻어지는 normalized rack에서는 거리와 시간이 비례하기 때문에 크레인의 평균이동거리는 곧 평균이동시간을 의미한다. 본 연구에서는 크레인의 가감속도는 무시하였고, 편의상 100% dual command를 가정한다. 또한, dual command들은 도착순서대로 처리하는 방식이 보편적으로 사용된다고 판단되어 FCFS(First Come First Served) 방식을 따른다고 가정하

였으며, 불출순서를 조정하는 order sequencing[3]은 고려하지 않는다.

2. 저장방식

자동창고의 저장방식은 크게 지정위치 저장방식(dedicated storage), 임의점 저장방식(randomized storage), 그리고 群別 저장방식(class-based storage) 등으로 구분될 수 있다. 지정위치 저장방식은 각 저장단위마다 고유의 저장위치가 미리 지정되어 있는 경우이며, 운영방식이 비교적 간단하고 시스템 이상시 수작업으로 쉽게 전환할 수 있다는 장점이 있지만, 저장공간을 공유하지 않음으로 인하여 많은 공간을 필요로 하는 단점때문에 산업용 자동창고에서는 거의 사용되지 않는 방식이다.

임의점 저장방식은 모든 빈 칸이 저장점으로 선택될 가능성이 있으며, 특정한 기준하에서 가장 적합한 빈 칸이 저장점으로 선택된다. 임의점 저장방식의 대표적인 예로는 最近위치(Closest Open Location) 저장방식으로서, 이는 저장소요 발생시 입출고점으로부터 가장 가까운 빈칸에 저장하는 방식이며, 개념이 단순하여 널리 사용되고 있다. 그러나 단점으로는 장기저장품이 입출고점 근처에 위치하게 될 경우 평균이동거리가 증가할 수 있다는 점과, 선반이용율이 높아짐에 따라 지정위치 저장방식에 비하여 저장점 선정에 긴 시간이 소요될 수 있다는 점 등이 있다.

群別 저장방식은 입출고 빈도에 따라서 저장품들을 몇개의 群으로 나누고 입출고 빈도가 높은 群일수록 입출고점에 가깝게 배치하며, 각 群내에서는 임의의 빈칸 또는 最近위

치에 저장하는 방식이다. 군별 저장방식은 일반적으로 운영개념이 비교적 단순하면서도 운영효율을 개선할 수 있다는 장점이 있으나, 저장품들에 대한 grouping 문제, 각 군별 저장공간 할당문제 등이 따른다.

본 연구에서는 임의점 저장방식에 속하는 세 가지 저장방식, 즉 COL, COLN, 그리고 SCL 저장방식에 대하여 고찰하고, 선반이용율과 선반세밀도 및 선반의 shape factor가 변할 때 세 가지 저장방식의 수행도를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 비교하고자 한다.

(1) COL (Closest Open Location)

COL 저장방식은 저장소요가 발생했을 때 불출점의 위치와는 무관하게 입출고점(I/O)으로부터 가장 가까운 빈 칸에 저장물을 저장하는 방식이며, 만일 입출고점으로부터 동일한 거리에 위치한 빈 칸이 여러 개 존재할 경우에는 그 중에서 임의의 빈 칸을 선택하여 저장한다. 따라서 이 정책을 적용하면 시간이 흐름에 따라 창고내의 저장품들은 입출고점 근처로 모이게 되고, 반면에 빈 칸은 입출고점으로부터 멀리 위치하게 된다. 만일 선반이용율이 일정하다면 선반은 입출고점으로부터 가까운 일정면적만이 계속해서 저장에 사용될 것이다.

(2) COLN (Closest Open Location in the No-Cost Zone)

COLN 저장방식은 COL 저장방식과 기본적인 운영방식은 같으나, 입출고점으로부터 거리가 같은 빈 칸이 복수개 존재할 경우 No-Cost Zone에 포함되는 빈 칸에 우선적으로 저장하는 방식이다. No-Cost Zone이란

Han et al.[3]에서 정의된 선반상의 구역으로서, 크레인의 수평 및 수직속도의 차이를 고려한 normalized rack에서 불출점의 위치가 정해지면 No-Cost Zone은 그림 1에서 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.

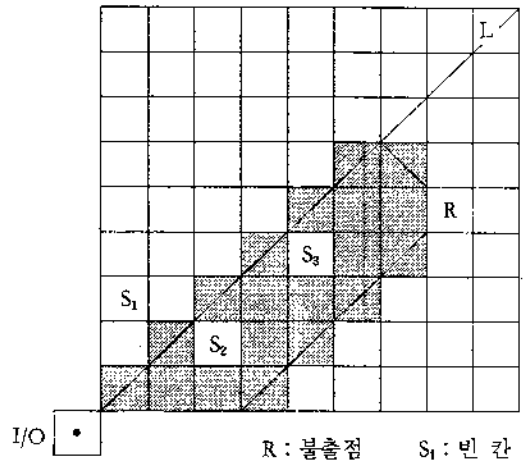


그림 1. 불출점과 빈 칸들의 위치 예 (빛금부분은 No-Cost Zone)

예를 들면 그림 1에서 불출요구에 의하여 불출점 R이 정해지면 저장점 후보는 입출고점에서 가장 가까운 S1과 S2가 되고, 이들 중 No-Cost Zone에 속하는 S2에 저장하는 방식이다. 그러나 입출고점으로부터 동일한 거리

의 빈 칸중 No-Cost Zone에 들어있는 빈 칸이 없을 경우에는 그 중에서 임의로 선택하여 저장한다. COLN 방식은 COL 방식보다 언제나 이동거리가 같거나 짧다.

(3) SCL (Shortest Cycle Location)

SCL 저장방식은 매 dual command마다 주어진 불출위치에 대하여 dual command를 수행하는 이동시간을 최소화하는 빈 칸에 저장한다는 myopic optimum의 개념으로 저장점을 선택한다. 따라서 입출고점으로부터의 거리가 멀더라도 No-Cost Zone에 포함되는 위치라면 SCL 저장방식하에서는 저장점으로 선택된다. 즉, 불출점 R이 지정되면 먼저 No-Cost Zone의 내부를 입출고점에서 가까운 점부터 순차적으로 찾아나가다가 가장 먼저 발견되는 빈 칸에 저장하는 방식이다. 만일 No-Cost Zone 내부에 빈 칸이 없으면 선반 전체에 대하여 빈 칸들 중에서 불출점의 위치를 고려한 dual command의 이동시간이 가장 짧은 점에 저장한다. 예를 들면 그림 1에서 S_2 가 없다면 비록 S_1 이 S_3 에 비해 입출고점으로부터 가까이 있지만 SCL 저장방식하에서는 S_3 에 저장한다. SCL 저장방식은 myopic optimum을 선택한다는 관점에서 Han et al.[3]에서 제시한 Shortest-leg heuristic(SLH)과 유사하나, SLH는 불출순서를 재조정하는 경우에 사용할 수 있는 반면에 본 연구에서는 dual command를 도착순서로, 즉 FCFS로 처리한다는 점에서 구별된다.

3. 평균이동시간

본 절에서는 저장정책으로 각각 COL,

COLN, 및 SCL을 사용할 경우에 대하여 크레인의 평균이동시간을 측정하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 모형에서 가정사항으로는 100% dual command를 수행하고, 크레인의 pick/deposit 소요시간은 일정하므로 이동시간에서 제외하였으며, 크레인의 가속속도는 무시하였다. 또한, 대부분의 기존연구에서는 선반을 연속형으로 가정하였고 입출고점은 선반의 하단 끝점에 위치한다고 가정하였으나, 본 연구에서는 현실에 충실하기 위하여 이산형(discrete) 선반구조를 사용하였고, 그림 1에서 보듯이 대부분의 실제 자동창고에서와 같이 입출고점은 선반의 하단 끝점으로부터 수평 및 수직방향으로 한 칸만큼 떨어져 있는 것으로 가정하였다. 이에 따라 평균이동거리는 Travel Time Model의 결과보다 약간 커지게 되나, 이러한 가정이 실제 자동창고를 보다 정확하게 반영할 것으로 보인다. 또한 선반의 세밀도가 증가하여 연속형 선반에 수렴할 경우에는 입출고점은 Travel Time Model에서와 같이 선반의 좌측하단점에 수렴하게 된다.

(1) 선반이용율의 변화에 따른 평균이동시간

선반이용율(rack utilization)이란 주어진 선반의 면적중 저장에 사용되고 있는 면적의 평균비율을 말하며, 이는 입고율과 출고율이 동일할 경우에는 시간이 지나도 거의 일정하게 유지된다. 기존의 거의 모든 연구에서 사용하는 randomized storage 가정이란 선반상의 모든 칸이 저장점으로 선택될 확률이 동일하다는 가정이다. 실제의 자동창고에서 이 가정이 성립하려면 선반이용율이 100%이어

야 한다. 즉, 이 경우 dual command 중 저장 직후에는 빈 칸이 없고, 불출 직후에는 단 하나의 빈 칸이 존재하며, 불출품목이 랜덤하기 때문에 불출 후 생기는 빈 칸의 위치도 선반 전체면적에 대하여 랜덤하게 분포한다고 볼 수 있다. 그러나 실제로 사용되고 있는 자동창고의 선반이용율은 대부분 50% 내지 80%에 그친다고 볼 때, randomized storage 가정은 현실과 상당한 차이가 난다. 즉, 선반이용율의 변화에 따라서 크레인의 평균이동시간이 크게 영향을 받는다.

선반이용율의 변화에 따른 크레인의 평균 이동시간을 비교하기 위하여 shape factor b 가 1이고 수평방향 및 수직방향의 칸수가 각각 10개씩인 경우와 각각 40개씩인 선반을 대상으로 선반이용율의 변화에 따른 저장정책별 평균이동시간을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과는 표 1과 같고, 이 중에서 40x40칸의 경우를 세 가지 저장정책에 대해서 그래프로 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2에서 수평축은 선반이용율을 나타내며, 수직축은 dual command를 수행하기 위한 크레인의 평균이동시간을 나타내고, 그 단위는 scale factor T 이다. 선반이용율을 시뮬레이션에서 구현하는 방법으로는 주어진 선반이용율에 해당하는 칸수를 임의의 위치에 초기배치한 후, dual command를 FCFS로 수행함으로써 선반이용율을 일정값으로 유지하였다.

선반의 세밀도가 다른 두 선반, 즉 가로 및 세로칸 수가 10x10과 40x40인 두 선반에 대하여 비교할 때 본 시뮬레이션에서는 선반 전체의 수평 및 수직길이와 속도를 일정하게 유지한 채 각 칸의 크기를 작게 함으로써 세밀도를 증가시키기 때문에 선반세밀도에 관

계없이 T 값은 일정하다. 즉, 10x10인 선반의 한 칸의 가로 및 세로길이는 40x40인 선반의 그것의 4배이다.

표 1과 그림 2가 의미하는 바는 다음과 같다. 첫째, 세가지 저장정책 모두에 대하여 일반적으로 선반이용율이 증가함에 따라 평균 이동거리가 당연히 증가한다. Dual command를 여러 번 수행하면 저장품의 위치는 초기의 분포와 관계없이 점차적으로 입출고점 방향으로 모이게 되고 결국 사각형을 이루는 "안정상태"에 도달한다. 예컨대 $b=1$ 인 normalized rack에서 선반이용율이 50%로 일정할 경우, 안정상태가 되면 저장위치들은 입출고점을 한 모서리로 하며 한 변의 길이가 $\sqrt{0.5} = 0.707$ 보다 (Stochastic behavior로 인하여) 약간 큰 정사각형을 형성하게 된다[6]. 둘째, 선반이용율이 100%일 경우, 세 저장정책의 평균이동시간이 동일한 값으로 나타나는데, 그 이유는 불출후 단 하나의 빈 칸만이 존재하기 때문에 저장방식에 관계없이 동일한 저장점을 사용하게 되기 때문이다. 셋째, 세가지 저장방식 사이의 평균이동시간의 차이는 일반적으로 선반이용율이 증가할수록 커지나 100% 근처에서 급격히 감소하여 빈 칸이 하나일 경우에는 동일해진다. 넷째, 실제로 운영되고 있는 자동창고의 평균 선반이용율은 업종별 또는 시기별로 상당한 차이가 있겠으나 일반적으로 50% 내지 80%라 볼 때 100% 선반이용율 가정하에 도출된 Travel Time Model의 결과를 실제 자동창고에 적용한다면 커다란 오차가 발생함을 알 수 있다. Travel Time Model에서는 선반이용율이 항상 100%라고 가정하기 때문에 평균이동시간을 실제 선반이용율에 무관하게 항상 $1.8T$ 로 추

표 1. 선반이용율에 따른 평균이동시간 (b=1인 경우, 단위: T)

선반이용율		10	20	30	40	50	60	70	80	90	99(%)	
		선반세밀도										
저장방식	COL	10 × 10	0.710	0.940	1.113	1.261	1.391	1.507	1.619	1.719	1.820	1.896
		40 × 40	0.609	0.847	1.026	1.174	1.301	1.420	1.526	1.628	1.724	1.810
COLN	10 × 10	0.701	0.918	1.097	1.246	1.383	1.482	1.603	1.718	1.796	1.896	
	40 × 40	0.600	0.839	1.017	1.166	1.292	1.409	1.515	1.614	1.712	1.801	
SCL	10 × 10	0.696	0.904	1.063	1.200	1.316	1.423	1.522	1.616	1.705	1.896	
	40 × 40	0.565	0.780	0.940	1.072	1.186	1.290	1.385	1.476	1.562	1.656	

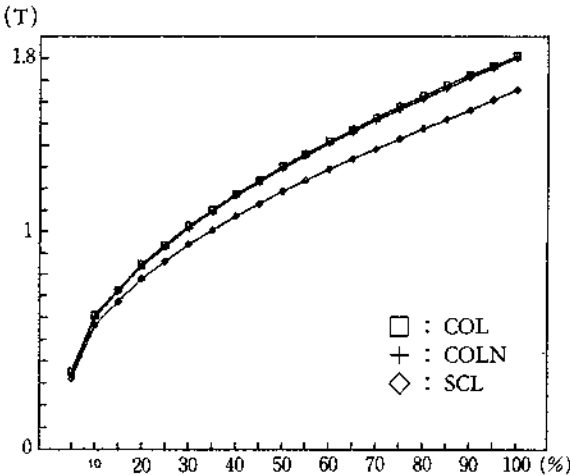


그림 2. 선반이용율에 따른 평균이동시간 (40×40인 선반의 경우)

정한다. 그러나 본 연구의 simulation 결과 40x40인 선반을 기준하여 SCL 저장정책하에서 선반이용율이 50%인 경우에는 1.186T, 80%인 경우에는 1.476T로 나타나, Travel Time Model을 적용할 경우 크레인의 평균이동시간을 실제보다 무려 51.8%와 22.0% 과대평가하게 된다. 다섯째, 세가지 저장방식의 효율을 비교하여 보면 그림 2에서 보듯이 선반이용율의 모든 범위에서 COL보다는

COLN이, COLN보다는 SCL이 평균이동시간이 짧다. 즉, 세밀도가 40×40, 선반이용율이 50%인 경우를 기준으로 할 때, COL방식의 평균이동시간에 비하여 COLN방식하에서 0.7%, SCL방식하에서 8.8% 각각 평균이동시간이 감소하였고, 선반이용율이 80%인 경우 COLN방식하에서 0.9%, SCL방식하에서 9.3% 감소한 것으로 나타났다.

(2) Shape factor의 변화에 따른 평균이동시간

앞절에서는 shape factor(b)가 1인 경우에 대하여 살펴보았다. 본 절에서는 shape factor (b)와 선반이용율(u)이 동시에 변화함에 따라 세가지 저장정책하의 평균이동거리를 컴퓨터 시뮬레이션으로 측정하였다. 가로 및 세로길이가 각각 40칸씩인 선반을 기준하여 이와 면적은 동일하나 shape factor가 상이한 두 선반, 즉 가로 및 세로길이가 50x32 및 80x20인 두 선반 등 모두 세가지 선반에 대하여 dual command를 수행하기 위한 크레인의 평균이동시간을 측정된 결과는 표 2와 같고, 이를 그래프로 나타내면 그림 3과 같다. 각 저

장정채별로 선반의 이용율이 증가할수록, shape factor가 작을수록 평균이동시간이 증가하는 것으로 나타났다. Travel Time Model에서도 면적이 동일하나 shape factor가 상이한 선반들을 비교할 경우, $b=1$ 일 때 평균이동시간이 최소화됨을 보였다[1]. 면적이 동일하면서 shape factor가 서로 다른 선반들은 scale factor도 다르기 때문에 그림 3의 세로축의 단위는 T가 아니고 denormalize시킨 시간의 상대적 크기로 비교해야 함을 유의해야 한다. 또한 shape factor가 작은 경우, 즉 $b=0.25$ 일 때 선반이용율이 높아짐에 따라 SCL 방식이 기타방식에 비해 평균이동시간이 크게 단축되는 것으로 나타났다.

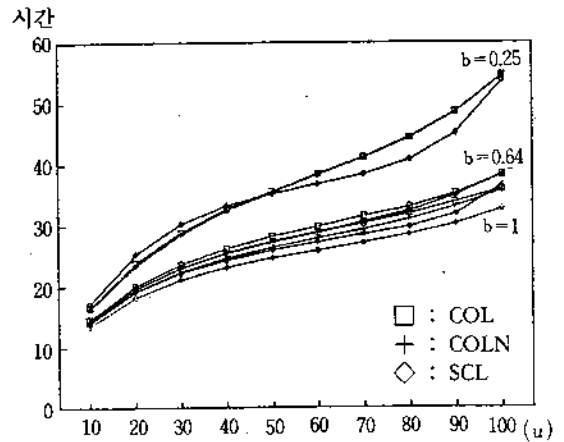


그림 3. Shape factor와 선반이용율 변화에 따른 평균이동시간(단위 : 시간)

표 3은 선반이용율이 100%일 때 shape factor

표 2. Shape factor(b)와 선반이용율(u)의 변화에 따른 평균이동시간

(단위:시간, 총칸수 1600)

u \ b	0.25 (20칸×80칸)			0.64 (32칸×50칸)			1.00 (40칸×40칸)		
	COL	COLN	SCL	COL	COLN	SCL	COL	COLN	SCL
10	16.52	16.32	17.16	14.58	14.35	14.00	14.14	13.94	13.38
20	23.84	23.48	25.32	20.08	19.70	19.15	19.56	19.16	18.20
30	28.92	28.56	30.32	23.63	23.05	22.25	22.90	22.34	21.14
40	32.76	32.48	33.28	26.23	25.55	24.28	25.36	24.64	23.12
50	35.48	35.24	35.04	28.23	27.40	25.93	27.18	26.36	24.58
60	38.36	38.28	36.64	29.83	28.93	27.18	28.70	27.80	25.82
70	41.08	41.00	38.36	31.55	30.65	28.53	30.32	29.28	27.10
80	44.36	44.32	40.68	33.08	32.38	29.78	31.94	30.98	28.46
90	48.52	48.48	45.00	35.23	34.95	31.85	33.78	33.04	30.22
100	54.48	54.48	53.64	38.35	38.33	36.58	35.88	35.66	32.74

(3) 선반세밀도의 변화에 따른 평균이동시간

선반이용율이 100%일 때 주어진 이산형 선반에 대하여 입출고점으로부터 각 칸까지의 거리를 계산하고 동일한 확률로 가중평균하여 크레인의 평균이동거리를 계산할 수 있다.

(b)의 값과 선반의 세밀도(d)를 변화시키면서 이산형 선반에서의 평균이동거리를 가중평균으로 계산한 결과이다. 표 3에서 d는 선반의 일정한 수평길이를 등분한 칸수이고, 이를 그래프로 표시하면 그림 4와 같다. 선반의 세밀도를 변화시킬 때 선반 전체의 수평

길이와 속도를 일정하게 유지한 채 각 칸의 크기를 변화시킴으로써 세밀도를 증감시켰다. 한편, shape factor에 관해서는 앞절과는 달리, 일정한 가로길이에 대하여 (즉, 일정한 scale factor값 T에 대하여) b값이 증가함에 따라 선반의 높이가 비례하여 증가하도록 하였는데, 그 이유는 이산형 선반에서 면적을 일정하게 유지한 채로 shape factor값을 변화시키는데 한계가 있기 때문이다. 앞절에서 shape factor가 증가함에 따라 평균이동시간은 감소됨을 보였으므로 오해가 없을 것으로 보이며, 여기서는 선반의 세밀도의 영향만을 살펴보기로 한다.

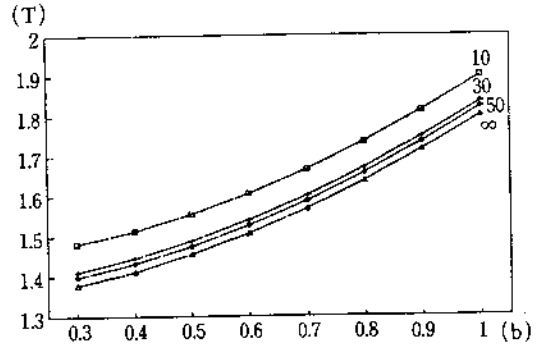


그림 4. Shape factor(b)와 선반의 세밀도(d)에 따른 평균이동시간(단위: T)

연속평면을 가정할 때보다 평균이동시간이 $(1.8299-1.8)/1.8=1.7\%$ 증가한다. 이러한 차이는 세밀도가 10x10인 경우 최대 5.4%에 그

표 3. Shape factor(b)와 선반의 세밀도(d)에 따른 이동시간 기대치

(단위: T)

d \ b	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
10	1.4814	1.5126	1.5541	1.6053	1.6655	1.7346	1.8121	1.8980
20	1.4284	1.4615	1.5041	1.5559	1.6166	1.6858	1.7636	1.8495
30	1.4112	1.4447	1.4875	1.5394	1.6001	1.6694	1.7472	1.8331
40	1.4027	1.4363	1.4792	1.5311	1.5918	1.6612	1.7389	1.8299
50	1.3976	1.4313	1.4742	1.5261	1.5868	1.6562	1.7340	1.8199
60	1.3942	1.4279	1.4708	1.5228	1.5835	1.6529	1.7306	1.8166
70	1.3918	1.4255	1.4685	1.5204	1.5812	1.6505	1.7283	1.8142
80	1.3900	1.4237	1.4667	1.5186	1.5794	1.6487	1.7265	1.8125
90	1.3886	1.4223	1.4653	1.5172	1.5780	1.6474	1.7251	1.8111
100	1.3875	1.4212	1.4642	1.5161	1.5769	1.6462	1.7240	1.8100
∞	1.3774	1.4112	1.4542	1.5061	1.5669	1.6363	1.7140	1.8

표 3에서 보듯이 동일한 shape factor(b)에 대해서도 선반의 세밀도(d)에 따라 평균이동거리가 다소 차이가 남을 알 수 있다. 예를 들면 b=1인 경우 세밀도가 40x40인 선반은

치는 것으로 나타나 대부분의 실용적인 세밀도에 대하여 그 차이는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 b=1인 경우 선반의 세밀도가 증가할수록 Travel Time Model의 값

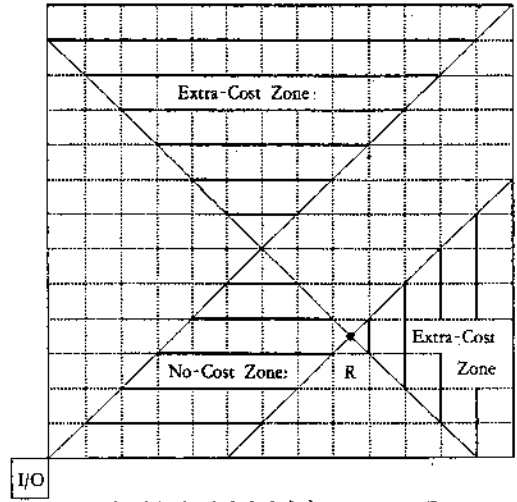
에 수렴하는 것이 확인되었다. 만일 이산형 선반의 입출고점 위치가 선반의 좌측 하단점과 일치한다고 가정한다면 이러한 이산형 선반은 연속형을 가정하는 Travel Time Model의 결과보다 평균이동거리를 작게 추정할 것이다.

한편, Bozer and White[1]는 연속형 및 이산형 선반의 차이가 0.25% 미만이라고 보고 하였으나, 이는 입출고점이 선반의 좌측하단점에 위치한다고 가정하였기 때문이다.

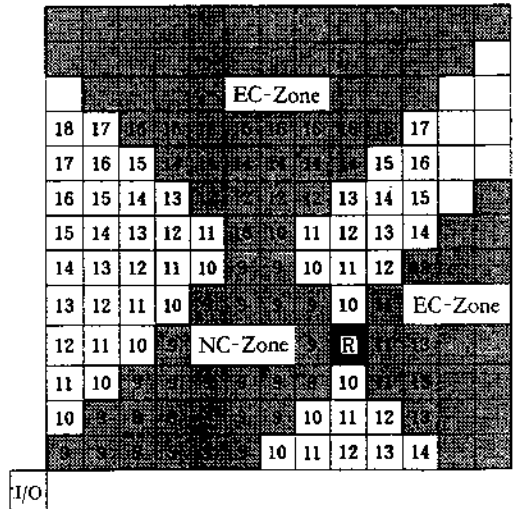
4. Extra-Cost Zone

본 절에서는 No-Cost Zone에 대응되는 개념으로서 Extra-Cost Zone을 정의하고 그 기하학적 및 실용적인 의미를 음미한다. 일반적으로 dual command를 수행하기 위해 소요되는 크레인의 이동시간은 입출고점으로부터 저장점까지의 이동시간, 저장점으로부터 불출점(R)까지의 이동시간, 그리고 불출점으로부터 입출고점까지의 이동시간의 합으로 표시된다. 저장점의 위치를 결정하는 방식에 따라서 상기 세 이동시간중 첫 두개가 영향을 받게 된다. 먼저 입출고점으로부터 저장점까지의 이동시간에 관하여 고찰하기 위해 normalized rack에서 입출고점으로부터 동일한 시간이 소요되는 점들의 집합, 즉 contour line은 입출고점으로부터 수평 및 수직방향으로 동간격인 ‘┄’자 모양으로 나타난다.

한편, 불출점으로부터의 contour line은 normalized rack에서는 불출점을 중심으로 하는 동심 정사각형으로 나타난다. 이러한 두 가지의 contour line을 동일평면상에 나타내면 그림 5(a)와 같다. 그림 5(a)에서 가는 실선은



(a) 연속형 평면상에서의 Extra-Cost Zone



(b) 이산형 선방상에서 Extra-Cost Zone과 입출고점으로부터의 거리

그림 5. No-Cost Zone과 Extra-Cost Zone

은 입출고점으로부터의 contour line을 나타내고, 점선은 불출점으로부터의 contour line을 나타내며, 굵은 실선은 두 contour line이 중복되는 선을 나타낸다. 실선과 점선이 중복되거나 직교하면서 평면을 분할하게 되는데 연속평면상에서 No-Cost Zone과 Extra-

Cost Zone은 각각 그림 5(a)와 같이 정의되며, 이산형 선반에서는 그림 5(b)와 같이 정의된다.

만약 dual command를 수행하기 위한 저장점을 No-Cost(NC) Zone에서 선택할 수 있다면 그 dual command에 대한 크레인의 이동시간은 최소가 되며, 저장점을 한칸 이동하더라도 NC Zone 내부에 있다면 추가시간은 발생하지 않는다. 한편, 그림 5(b)에서 보듯이 NC Zone도 EC-Zone도 아닌 구역에서는 저장점이 상하 또는 좌우로 한칸 이동할 경우에 이동시간은 한 단위시간씩 증감한다. 반면에 저장점을 Extra-Cost Zone에서 선택해야만 할 경우에는 저장점이 상하 또는 좌우로 한칸 이동할 경우에 이동시간은 불변이거나 또는 두 단위씩 달라지는 특성을 갖는다. 그림 5(b)에서 이동시간이 동일한 칸들을 연결하여 dual command 수행시 크레인의 이동거리에 대한 contour line을 구성해 보면 No-Cost Zone을 중심으로 하는 칠각형을 얻게 되며, contour line이 Extra-Cost Zone을 지날때는 수직 또는 수평으로 지나감을 알수 있다.

5. 결론

자동창고의 처리능력에 관한 대부분의 기존연구에서는 선반(rack)의 각 칸(slot)이 저장점으로 선택될 확률이 동일하다고 가정하였고, 또한 수식을 단순화하기 위해서 선반을 연속평면으로 가정하였다. 이러한 두 가정사항하에 추정된 처리능력은 실제상황과 상당한 오차를 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 유닛로드형 자동창고의 처리능력을 보다

현실적으로 추정하기 위하여 선반의 이용율(utilization)과 선반의 세밀도(density)를 shape factor(b)와 함께 변화시키면서 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 크레인의 평균이동시간을 비교하였다. 저장정책으로는 最近저장정책(Closest Open Location)과 COLN, SCL 등 세 가지 저장방식에 대하여 비교하였다.

시뮬레이션의 결과로는 선반이용율의 변화에 따라 기존모형의 결과와는 현저한 차이가 나타났으며, 선반의 세밀도의 변화에 따라서는 shape factor가 1일때 최대 5.4%의 오차에 그쳐 그 차이는 비교적 크지 않은 것으로 나타났다. 한편, 저장방식별로는 본 연구에서 제시한 Shortest Cycle Location(SCL) 저장방식이 선반이용율 전 범위에 걸쳐 가장 효율적인 것으로 나타났다. 저장방식을 고찰함에 있어서 No-Cost Zone에 대칭되는 개념을 갖는 Extra-Cost Zone을 정의하였으며, 그 기하학적인 의미와 실용적인 의미를 고찰하였다.

참고 문헌

- [1] Bozer, Y. A. and White, J. A., "Travel Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems," IIE Transactions 16-4, pp. 329-338, 1984
- [2] Graves, S. C., Hausman, W. H., and Schwarz, W., "Storage Retrieval Interleaving in Automatic Warehousing Systems," Management Science, 23-9, pp. 935-945, 1977
- [3] Han, M., McGinnis, L. F., SHIEH, J. S., and White, J. A., "On Sequencing Retrievals In An Automated Storage/Retrieval System," IIE Transactions 16-4, pp. 339-348, 1984

- trieval Systems," IIE Transaction, 19-1, pp. 56-66. (March 1987)1985
- [4] Hausman, W. H., Schwarz, L. B., and Graves, S. C., "Optimal Assignment in Automatic Warehousing Systems," Management Science, 22-6, pp. 625-638, 1976
- [5] Hwang, H. and Lee, S. B., "Travel-time models considering the operating characteristics of the storage and retrieval machine", Int. J. of Prod. Res., 28-10, pp. 1779-1789, 1990
- [6] Park, B. C., "Closest Open Location Rules in AS/RS," Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers, Vol.13, No. 2, pp. 87-95, Dec. 1987
- [7] Park, B. C., "Analytical Models and Optimal Strategies for Automated Storage /Retrieval System Operation," Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 1991
- [8] Rizo-Patron, A., Bozer, Y. A., and McGinnis, L. F., "Analytic Simulation Models for Advanced Automated Storage /Retrieval Systems," MHRC-TR, 82-04, Material Handling Research Center, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 1983
- [9] Schwarz, L. B., Graves, S. C., and Hausman, W. H., "Scheduling Policies for Automatic Warehousing Systems: Simulation Results," AIIE Transaction, 10-3, pp. 260-270, 1977
- [10] 홍석교, 홍만표, 이수훈, 임석철, "화상 정보매체용 물류관리시스템," 상공부 공업기반기술과제 연구계획서, 아주대학교 공과대학, 1992