〈研究論文〉

Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers
Vol. 15, No. 1, June, 1989

다품종 단위적재 자동창고 시스템의 운영정책 분석†
(An Analysis of Operating Policies for Multi-Product Unit Load AS/RS)

박 양 병*

Abstract

In the past few years, increasing numbers of automatic storage/retrieval system (AS/RS) using computer controlled storage/retrieval machine have been installed. This paper introduces two modeling approaches to determine the best operating policy for AS/RS : an M/G/1 queueing model and a computer simulation model. The operating policy consists of three elements. : the operation command cycle, the storage location method, and the operation dispatching rule.

The analysis based on M/G/1 model is suitable for a quick and approximate evaluation, due to its inherent strict assumptions. The computer simulation can be used to perform a more realistic analysis. It is shown through the study that a significant improvement in the throughput and/or the space requirement can be expected by determining the best operating policy to a particular system. Most important, the computer simulation demonstrates its powerful capability in evaluating dynamic stochatic systems with imperfect information.

1. 序 言

자동창고시스템(Automated Storage and Retrieval System : AS / RS)은 물자의 저장과 불출에 관련된 장비와 운영이 자동화된 창고로 좁은 바닥면적에서도 저장선반을 고층으로 설치할 수 있게 하여 공간비용을 최소화하는 첨단의 창고시스템이다. 따라서 자동창고시스템은 컴퓨터의 통제로 재래의 창고시스템보다 더욱 신속하고 안전하게

* 경희대학교 공과대학 산업공학과

† 이 논문은 1988년도 문교부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

그리고 효율적으로 저장 및 불출 기능을 수행하게 된다. 특히 최근의 공장자동화 추세에 따라 창고시스템의 자동화는 제조와 물자분배 기능을 연결시켜 주는 필수적인 기능으로서 그 중요성이 더욱 부각되고 있는 실정이다.

AS/RS의 생산성은 시스템의 운영정책(operating policies)에 크게 영향을 받는다. 중요한 운영정책으로는 작업수행방법(command cycle), 저장위치방법(storage location method), 작업독촉규칙(dispatching rule) 등을 들 수 있다. 저장위치방법으로는 임의위치저장(randomized storage), 지정위치저장(dedicated storage), 그룹 지정위치저장(class-based dedicated storage) 방법들이 있다. 작업수행방법으로는 단일명령(single command cycle), 복수명령(dual command cycle), 혼합명령(mixed command cycle)이 있다. 작업독촉규칙으로는 선입선출(first-in first-out), 저장작업우선(storage request-first), 불출작업우선(retrieval request-first)등을 고려할 수 있다.

AS/RS의 도입에 따른 중요한 문제중의 하나는 이러한 운영정책에 관련된 세부사항들의 과학적인 결정이다. 최근 여러 학자들에 의해 이에 관련된 연구가 활발히 수행되어 왔다.

Hausman, Schwarz and Graves [1, 2]는 단일 및 복수명령 수행시 임의위치저장, 지정위치저장, 그룹지정위치저장에 따른 S/R 기계(storage/retrieval machine)의 평균 이동시간 계산방법을 소개하였다. S/R 기계의 이동시간은 연속형함수로써 표현하였다. 곧이어 그들은[3] 컴퓨터 시뮬레이션(computer simulation)을 이용하여 확정적 상황에 입각하여 개발된 그들의 이론이 확률적이며 동적인 상황에서 얼마나 정확하게 적용되는 지를 실험하였다. 그러나 그들은 실험에서 저장선반(storage rack)의 소요크기가 저장위치방법에 따라 차이를 보여 S/R 기계의 이동시간 계산에 영향을 미친다는 사실을 무시하였다.

Bozer와 White[4]는 단일 및 복수명령 수행시 임의위치저장방법에 따른 S/R 기계의 평균 이동시간을 구하는 새로운 방법을 소개하였다. 여기서 그들은 i/o 장(input/output station)의 위치, S/R 기계의 거주위치(dwell-point)에 따른 이동시간의 차이를 지적하였다.

Chow[5]는 조립라인에 배치된 이동 로보트가 여러 작업장의 물자취급을 수행하는 시스템의 운영정책을 결정하는데 대기이론(queueing theory)과 시뮬레이션을 이용하였다. Azadivar[6]는 운영상 작업지시 수행의 지연에 대한 제약이 주어진 경우 처리할 수 있는 작업지시의 최대수를 결정하는 데 시뮬레이션 기법을 사용하였다.

본 논문은 다품종 단위적재(multi-product unit load)를 취급하는 AS/RS에서 여러가지의 다른 운영정책에 따른 시스템의 수행도를 대기이론과 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 이용 분석하여 최적의 운영정책을 결정하는 내용을 소개한다. M/G/1 대기모형을 이용한 분석은 고유의 엄격한 가정들에 기인하여 신속하고 대략적인 평가방법으로 적합하다. 컴퓨터 시뮬레이션은 좀 더 현실적인 분석을 수행하는 데 사용될 수 있다.

AS/RS의 수행도는 다양한 평가척도로써 측정될 수 있는데, 본 논문에서는 S/R

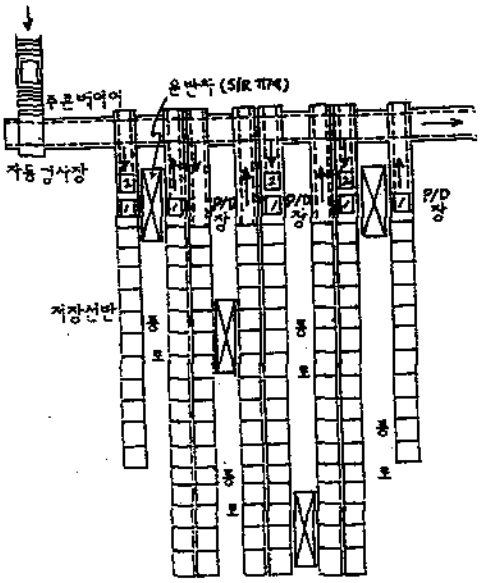
기계의 이용도, 저장선반의 소요량 및 이용도, 작업지시의 시스템내 거주시간, 대기시간, 대기길이, 그리고 수행불능 작업지시수 등이 고려된다. 이들 평가척도들은 때때로 상충하기도 한다. 예컨데, S/R 기계 이용도의 극대화는 작업지시의 오랜 대기시간을 초래한다.

대기이론을 이용한 분석에서 S/R 기계의 이동시간 확률분포가 연속형 이동시간 모델에 근거하여 구해진다. 컴퓨터 시뮬레이션은 Pritsker[7]에 의해 개발된 SLAM II/PC를 이용하며, S/R 기계의 이동시간은 이산형 이동시간 모델을 근거로 산정된다. 본 논문에 소개된 분석방법은 현재 가동중인 AS/RS의 생산성 향상은 물론, 새로운 AS/RS를 최적으로 설계하는 데도 매우 효과적으로 사용될 수 있다.

2. 연구대상 AS/RS

2.1 AS/RS의 운영

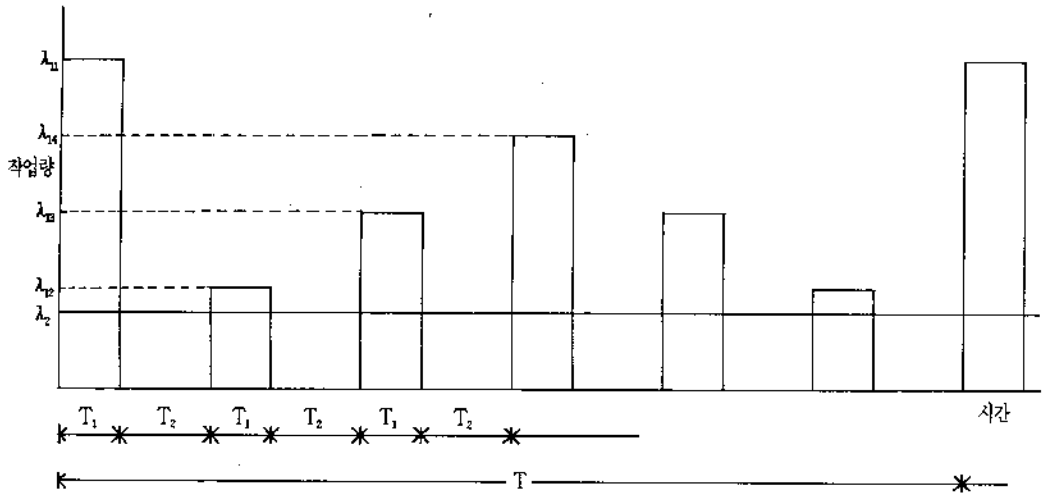
그림 1은 연구의 대상이 되는 다품종 단위적재를 취급하는 AS/RS의 평면배치도를 보여준다. i/o 장에 옮겨진 단위적재는 도착순서대로 각 통로(aisle)에 할당되어 있는 S/R 기계에 의해 저장선반위치(storage rack opening)로 옮겨져 저장된다. 한편 불출작업지시는 컴퓨터 네트워트를 통하여 지정된 i/o 장으로 전달되어 대기중인 S/R 기계가 수행하게 된다. 저장선반위치에서 불출된 단위적재는 S/R 기계에 의해 i/o 장으로 옮겨진 다음, 컨베이어상에 놓여져 외부로 이동된다.



[그림 1] 다품종 단위적재 AS/RS

선반에 저장될 단위적재는 주기적으로 일정 수량씩 하루중 규정된 시간대에 걸쳐 생산라인 또는 외부로부터 도착하며, 각 품목의 1회 주문량은 안전재고를 고려한 EOQ 모델에 의해 결정된다. 한편 불출작업은 지속적으로 이루어진다. 따라서 규정된 시간대에 선반에 저장된 어떤 품목의 수량은 다음번 저장작업이 반복될 때까지 불출작업이 지속적으로 수행될 수 있도록 충분히 많아야 한다. 예로서, 5종류의 품목에 작업의 기본주기는 그림 2와 같이 묘사될 수 있다.

그림에서 보는 바와 같이 하루동안 저장과 불출 작업지시가 함께 발생하는 기간은 T_1, 그리고 불출 작업지시만이 발생하는 기간은 T_2가 된다. 정상적인 작업상태에서는 작업의 대주기 T 기간 동안에 저장된 총 단위적재수와 불출된 총 단위적재수는 대략 같게 된다. 즉, $\sum_{k=1}^{n}\lambda_{1k}\,T_1=\lambda_2 T$, 여기서 λ_{1k}는 T 기간중 k 번째 저장작업 시간대에서



[그림 2] 작업의 기본주기

품목들의 단위시간당 평균 저장지시수의 합 그리고 λ_2는 전품목들의 단위시간당 평균 불출지시수의 합을 나타낸다. 1회의 작업지시는 1개의 단위적재에 해당된다.

실제 AS/RS에서는 그림 1에서와 같이 여러개의 저장선반과 통로로써 구성되어 있지만, 본 논문의 연구에서는 편의상 1개의 저장선반과 1개의 통로만이 고려된다. 이 연구의 결과는 전체 AS/RS에 똑같이 적용될 수 있다.

2.2 가정

본 논문에서는 다음과 같은 가정들을 채택한다.

(1) 각 팔렛은 한종류의 품목으로써 동일한 크기의 단위적재를 구성한다.

(2) 모든 저장선반위치는 동일한 크기이다. 따라서 팔렛은 어느 저장선반위치에도 저장될 수 있다.

(3) 저장선반의 수평거리 최대이동시간과 수직거리 최대이동시간은 같다. 즉, 저장선반은 이동시간상 정방형이다.

(4) S/R 기계는 한개의 단위적재를 취급할 수 있는 능력을 가지며, 수평과 수직방향으로 동시에 그리고 일정한 속도로써 이동한다.

(5) 시스템 내부로 운반되어 온 물자는 i/o장을 거쳐 반드시 일단 선반에 저장된 다음 불출된다. (이것은 i/o장에서 저장될 물자와 불출된 물자에 대한 검사 및 기록 작업이 독립적으로 별도로 수행되기 때문이다.)

(6) 지정위치저장에서 각 품목의 저장위치는 활동/공간 비율(activity/space ratio, turnover frequency)을 기준으로 결정된다.

(7) 품목들의 수요는 ABC커브 형태를 따르며, 형태 파라미터는 계산 편의상 1/3로 한다.

(8) T_1기간 i/o장에 도착하는 저장될 단위적재수는 단위시간당 평균 λ_1의

포아손분포를 따르며, 전기간 불출작업 지시수는 단위시간당 평균 λ_2($\lambda_1 > \lambda_2$)의 포아손 도착분포를 따른다. 저장 및 불출 작업지시는 상호독립적이다. 여기서 $\lambda_1 = \sum_{k=1}^{n} \lambda_{1k} / n$ 그리고 $n = T / (T_1 + T_2)$로 정의된다.

3. S/R 기계의 이동시간과 활동/공간 비율의 연속적 표현

i/o장으로부터 저장선반위치까지의 이동시간 및 품목들의 활동/공간 비율은 실제로 이산형 함수를 갖는다. 그러나 이들 이산형 함수들을 개략적인 연속형 함수로 표현함으로써 AS/RS의 수행도 분석이 매우 용이하게 된다. 연속형 함수에 의한 분석결과가 이산형 함수에 의한 결과와 매우 근사하다는 사실은 이미 몇몇 학자[1, 2, 3]들의 실험에 의해 입증되었다.

3.1 이동시간 함수

i번째 백분위수에 해당되는 저장선반위치까지의 정규화된 이동시간은 $y(i) = i^{\frac{1}{2}}$, $0 < i \leq 1$로써 정의된다. 이 함수에서 i는 저장선반위치중 i%가 (100−i)%보다 i/o장에 근접해 있다는 것을 의미한다. 그리고 i%에 해당되는 저장선반위치는 이동시간상 정방형으로 정리된다. 구해진 정규화된 이동시간을 실제 이동시간으로 환산하기 위해서는 y(i)에 L / S_h 또는 H / S_v를 곱하면 된다. 여기서 L과 H는 저장선반의 최대 수평거리와 최대 수직거리를 각각 나타내고, S_h와 S_v는 S/R 기계의 단위시간당 수평, 수직 이동속도를 각각 나타낸다.

3.2 활동/공간 비율 함수

활동/공간 비율함수는 Hausman et al. [1] 이 제안한 ABC커브와 EOQ모델을 이용하는 방법을 토대로 유도할 수 있다. ABC커브는 수요가 큰 순서대로 정리된 저장품목들에 대한 누적 수요량의 플롯으로서,

$$G(i) = i^s \quad \text{for } 0 < s \leq 1,\ 0 < i \leq 1$$
$$\int_0^i D(j)dj \,/\, \int_0^1 D(j)dj$$

로 나타낸다. 여기서 s는 ABC커브의 형태 파라미터로서, 커브의 형태를 결정한다. G(i)식에서 편의상 $\int_0^1 D(j)dj = 1$로 간주하면, 품목 i의 수요량은 다음과 같이 정의된다.

$$D(i) = si^{s-1} \quad \text{for } 0 < s \leq 1,\ 0 < i \leq 1$$

만약 모든 품목들이 EOQ모델에 의해 주문된다면, 품목 i의 1회 경제적 주문량은 다음과 같다.

$$Q(i) = [2KD(i)]^{\frac{1}{2}}$$

여기서 K는 재고유지비에 대한 주문비의 비율로서, 모든 품목에 대해 동일하다고 가정한다. 만약 주문량 Q(i)가 대략 일시에 입고된다고 가정할 수 있다면, 품목 i의 활동/공간 비율은 $D(i) / Q(i) = [D(i) / 2K]^{\frac{1}{2}}$이 된다.

i/o장으로부터 j번째 가까운 저장선반위치의 지표 i(j)는 다음과 같이 구해진다.

$$j = \int_0^{i(j)} [2KD(k)]^{\frac{1}{2}}\, dk$$

$$i(j) = \left[\frac{j^2(s+1)^2}{8Ks}\right]^{\frac{1}{s+1}},\ j \in [0, L]$$

여기서 L은 필요한 최대 저장선반위치수로서, $L=\int_0^1 Q(i)di$. j대신 j=j/L을 사용하여 정규화시키면,

$$i(j)=j^{\frac{2}{s+1}},\ j\in[0,1].$$

따라서 i/o장으로부터 j번째 가까운 선반위치에 저장되는 품목의 활동/공간 비율, m(j)는 다음과 같이 정의된다.

$$m(j)=\left[\frac{D_{i(j)}}{2K}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$=\left(\frac{s}{2K}\right)^{\frac{1}{2}} j^{(s-1)/(s+1)}$$

s를 1/3로 가정하면,

$$m(j)=Mj^{-\frac{1}{2}},\ j\in[0,1]$$

여기서 M은 상수로써 K값에 의해 결정된다. m(j)는 감소곡선임을 알 수 있다.

4. S/R기계 이동시간 확률분포

S/R기계가 정해진 운영정책에 따라 실제 작업을 수행할 때 소요되는 시간은 S/R기계의 이동시간과 p/d(pick up/deposit)시간에 의해 결정된다. S/R기계 이동시간은 작업수행방법과 저장위치방법에 영향을 받는다. 그리고, p/d시간은 작업수행방법에 좌우되어 복수명령의 경우 단일명령의 배수가 된다. 따라서 S/R기계의 이동시간은 선택된 작업수행방법과 저장위치방법에 따라 고유의 확률분포를 갖게 된다.

S/R기계의 이동시간 확률분포를 유도하는 과정에서는 왕복이동에 대해 정규화된 이동시간을 사용한다. 본 연구의 수행과정에서 이론적으로 유도된 이동시간 확률분포의 타당성을 입증하기 위해 S/R기계 이동시간과 그 빈도수를 계산하는 컴퓨터 프로그램을 개발하여 시뮬레이션을 실시해 보았다. 프로그램 결과는 저자로부터 구할 수 있다.

다음은 여러 작업수행방법과 저장위치방법의 조합에 따른 S/R기계의 이동시간 확률분포 f(x)를 유도하는 과정을 소개한다.

(1) 단일명령/임의위치저장(SC/RS)

S/R기계 이동시간 확률분포는 RS경우의 저장위치방문 확률분포와 S/R기계 이동시간 함수에 의해 결정된다. RS경우의 저장위치방문 확률분포는 다음과 같은 일양분포를 따른다.

$$g(x_1)=1\quad,\quad 0<x_1\leq 1$$

$X=2X_1^{\frac{1}{2}}$을 이용한 변수변환과정을 거치면 S/R기계의 이동시간은 다음과 같은 右삼각(right-triangular)분포를 갖는다.

$$f(x)=\frac{1}{2}\,x\ ,\ 0<x\leq 2$$

이에 따라 $E(X)=4/3$, $E(X^2)=2$ 그리고 $\mu_x=4/3$, $\sigma_x^2=2/9$로 구해진다.

(2) 단일명령/지정위치저장(SC/DS)

S/R기계 이동시간 확률분포는 SC/RS경우의 이동시간 확률분포와 저장품목의 활동/공간 비율식에 의해 결정된다. 두식을 새롭게 정리하면 각각 다음과 같다. 식 m(j)에서 M은 임의로 0.5로 설정하였다.

$$g(x_1)=\frac{1}{2}x_1,\qquad 0<x_1\leq 2$$

$$g(x_2)=\frac{1}{2}x_2^{-\frac{1}{2}},\qquad 0<x_2\leq 1$$

$X=X_1X_2$, $X_1=2X_2^{\frac{1}{2}}$을 이용한 변수변환과정을 거치면 S/R기계의 이동시간은 다음과 같은 일양분포를 따른다.

$$f(x)=\frac{1}{2},\quad 0<x\leq 2$$

이에 따라 $E(X)=1$, $E(X^2)=4/3$ 그리고 $\mu_x=1$, $\sigma_x^2=1/3$로 구해진다.

(3) 단일명령 / 2그룹 지정위치저장(SC / 2C)

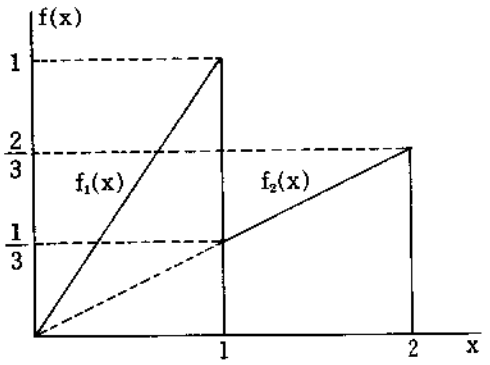
S / R 기계 이동시간 확률분포는 그룹지정위치 저장방법의 특성때문에 각 그룹에 대해 별도의 식을 갖는다. 그룹 Ⅰ과 그룹Ⅱ에 해당되는 이동시간 확률밀도함수를 각각 $f_1(x)$, $f_2(x)$라 하자. 그룹Ⅰ과 그룹Ⅱ에 해당하는 저장선반위치 구역은 i / o 장으로 부터 가까운 순서대로 각각 전체의 처음 0.25와 나머지 0.75이다. 따라서 각 그룹에 해당되는 저장품목의 활동 / 공간 비율의 합은 다음과 같이 계산된다.

그룹 Ⅰ : $\int_0^{0.25} m(j)dj = M\int_0^{0.25} j^{-\frac{1}{2}}\, dj = M$

그룹 Ⅱ : $\int_{0.25}^{1} m(j)dj = M\int_{0.25}^{1} j^{-\frac{1}{2}}\, dj = M$

두 그룹이 모두 M으로 동일하기 때문에, $F_1(1) = F_2(2) - F_2(1) = 0.5$가 성립된다. 각 그룹내에서는 임의위치저장방법이 적용되기 때문에 $f_1(x)$와 $f_2(x)$는 SC / RS 경우에서와 같이 각각 右삼각분포를 따르게 된다. 이러한 사실에 근거하여 f(x)는 다음과 같이 유도되며, 아래의 그림 3과 같다.

$$f(x) = x, \qquad 0 < x \le 1$$
$$= \frac{1}{3}x, \qquad 1 < x \le 2$$



[그림 3] SC / 2C 경우의 이동시간 확률분포

이에 따라 $E(X) = 10/9$, $E(X^2) = 1.5$ 그리고 $\mu_x = 10/9$, $\delta_x^2 = 43/162$으로 구해진다.

(4) 복수명령 / 임의위치저장(DC / RS)

복수명령에 의한 이동은 정의에 의해 단일명령의 이동과 두점사이의 중간이동의 결합으로 간주될 수 있다. 즉, 복수명령에 의한 이동시간은 두가지의 다른 이동시간의 합으로 결정된다. 따라서 DC / RS 경우의 이동시간 확률분포는 SC / RS 경우의 이동시간 확률분포와 임의위치저장의 중간이동시간(interleaving time) 확률분포의 합으로 구해진다.

SC / RS 경우의 이동시간 확률분포는 새로이 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$f(q) = 0.5q \quad , \quad 0 < q \le 2$$

또한 임의위치저장의 중간이동시간 확률분포는 Bozer와 White[4]가 개발한 식 f(z)에 b=1을 대입함으로써 다음과 같이 구해진다.

$$f(r) = 4r^3 - 12r^2 + 8r \quad , \quad 0 < r \le 1$$

따라서 DC / RS 경우의 이동시간 확률분포는 X = Q + R을 이용한 변수변환과정을 거쳐 다음과 같이 구해진다.

$$f(x) = 0.1x^5 - 0.5x^4 + \frac{2}{3}x^2, \quad 0 < x \le 1$$
$$= 0.5x - \frac{7}{30}, \qquad 1 < x \le 2$$
$$= -0.1x^5 + 0.5x^4 + \frac{10}{3}x^3 - 28x^2 + 64.5x - \frac{1431}{30}, \quad 2 < x \le 3$$

이에 따라 $E(X) = 1.8$, $E(X^2) = 3.5$ 그리고 $\mu_x = 1.8$, $\delta_x^2 = 0.27$로 구해진다.

(5) 복수명령 / 지정위치저장(DC / DS)

S / R 기계의 이동시간 확률분포는 DC /

RS 경우에서와 동일한 논리를 근거로 SC/DS 경우의 이동시간 확률분포와 지정위치저장의 중간이동시간 확률분포의 합으로 구해진다.

SC/DS경우의 이동시간 확률분포는 다음과 같이 새롭게 정의된다.

$f(q)=0.5,\ 0<q\leq 2$

지정위치저장의 중간이동시간 확률분포 f(b)는 DC/RS경우에서 사용한 f(r) 식과 Graves et. al. [2]의 부록에 소개된 지정위치저장에서의 중간이동 빈도수의 결합밀도함수 $f_T(i, j)$를 이용하여 유도될 수 있다. f(r)과 $f_T(i, j)$는 다음과 같이 정리된다.

$f(r)=4r^3-12r^2+8r,\ 0<r\leq 1$

$f(i, j)=4z^2(ij)^{zz-1}$

여기서 i, j는 i/o장으로부터 가까운 거리 순서로 정리되어 정규화된 저장선반위치를 나타내며, $z=2s/(s+1)$ 그리고 $0<i\leq j\leq 1$ 이다. $z=0.5$가 되므로 $f_T(i, j)=1$인 일양분포가 된다. 따라서 f(b)는 f(r)과 같게 된다. 만일 s가 $\frac{1}{3}$이 아닌 다른 값을 갖게 되어 $f_T(i, j)$가 일양분포를 따르지 아니한 경우에는 확률변수의 변수변환방법이나 중간이동시간의 발생빈도를 나타내는 그래프를 사용하여 f(b)를 결정할 수 있을 것이다.

따라서 DC/DS경우의 이동시간 확률분포는 X=Q+B를 이용한 변수변환과정을 거쳐 다음과 같이 구해진다.

$$f(x)=\frac{1}{2}x^4-2x^3+2x^2,\quad 0<x\leq 1$$

$$=\frac{1}{2},\qquad 1<x\leq 2$$

$$=-\frac{1}{2}x^4+6x^3-26x^2+48x-\frac{63}{2},\qquad 2<x\leq 3$$

이에 따라 $E(X)=1.5$, $E(X^2)=2.625$ 그리고 $\mu_x=1.5$, $\sigma_x^2=0.375$로 구해진다.

5. 대기행렬 분석

저장 및 불출 작업지시가 포아손 도착분포를 따르고 이들에 대한 서비스가 S/R기계의 저장 및 불출작업으로 간주되면, AS/RS의 수행도는 M/G/1 대기모형을 이용하여 분석 평가될 수 있다. 대기모형에서 S/R기계는 도착되는 작업지시들을 서비스하는 서버(server)로 간주된다.

서버의 실제 서비스시간 Y는 정규화된 S/R기계 이동시간에 상수 L/s_h 또는 H/s_v를 곱하고 p/d시간을 합한 결과로써 정의된다. 서버의 평균서비스율 μ는 E(Y)의 역수로써 구해진다. 여기서 $\mu>(\lambda_1+\lambda_2)$. 대기원칙은 S/R기계의 선택된 독촉규칙으로 정의된다.

작업기간중 T_1과 T_2의 작업지시 도착상태가 상이하므로 나누어 분석한다. 즉, T_1기간에는 저장 및 불출 작업지시가 함께 존재하나 T_2기간에는 불출작업 지시만이 존재한다. 이에 따라 T_1기간의 분석에는 운영정책의 조합에 의해 모두 13가지의 경우, 그리고 T_2기간에 대해서는 모두 3가지의 경우가 고려될 수 있다.

T_1기간 작업이 모두 복수명령에 의해 수행되는경우, 도착된 작업지시는 반드시 대응하는 작업지시가 존재할 때 S/R기계에 의해 작업이 실시되고 $\lambda_1>\lambda_2$이기 때문에, 작업의 도착률은 불출지시의 도착률에 의해 결정되어 진다고 볼 수 있다. 따라서 저장지시에 대해서는 대기가 계속해서 증가하게 된다.

T_1기간 작업이 완전 복수명령이 아닌 단일

명령과 복수명령의 혼합으로써 수행이 가능하면, 즉 도착된 작업지시에 대한 대응 작업지시가 존재하지 않을 때 단일명령으로써 수행이 가능하면, 이 기간의 저장작업은 혼합명령(MC) 그리고 불출작업은 모두 복수명령으로써 이루워 진다고 간주할 수 있다. 결과적으로 단위시간동안 저장지시중 평균 $\lambda_1-\lambda_2$는 단일명령, 그리고 평균 λ_2는 복수명령에 의해 수행된다. 따라서 혼합명령에 따른 서비스시간의 기대치는 단일명령과 복수명령에 따른 서비스시간에 각각의 기대 비율을 고려하여 산정될 수 있다.

분석에는 3가지 측정치가 사용된다. W_{qi}는 작업지시에 따른 완수요구시간(due time)의 준수여부에 대한 가능성의 일반적 판단근거가 될 수 있다. 또한 시스템의 작업능력(throughput)을 산출하는 데 중요한 자료가 된다. L_{qi}는 대기의 상태를 알게 해 주며 i/o장의 공간 및 로울러 컨베이어의 길이를 결정하는 기본자료로서 사용될 수 있다. ρ는 S/R기계의 이용도로서 S/R기계의 기계적 특성(속도, 작동시간 등)을 조정하는 정보로도 사용될 수 있다. 이상의 측정치 표기에서 기호 i는 작업을 나타내는 것으로서, i=1이면 저장지시 그리고 i=2이면 불출지시를 의미한다.

M/G/1대기모형에서 선입선출(FIFO) 원칙에 따른 측정치 계산의 일반식[8]은 다음과 같다.

$$W=\frac{\lambda^2\delta^2+\rho^2}{2\lambda(1-\rho)},\ L_q=\lambda W_q,\ \rho=\frac{\lambda}{\mu}$$

불출작업우선(RF)과 저장작업우선(SF) 원칙 모형은 nonpreemptive priority-discipline 대기모형으로 간주될 수 있으며, 계산의 일반식[9]은 다음과 같다.

$$W_{s(k)}=\frac{\sum_{j=1}^{r}\lambda_j E_j(Y^2)}{2(1-\sum_{j=1}^{k-1}\rho_j)\ (1-\sum_{j=1}^{k}\rho_j)},$$

$$L_{s(k)}=\lambda_k\ W_{s(k)},\ \rho_j=\frac{\lambda_j}{\mu_j}$$

여기서 k는 등급(class), r은 총등급수, $E_j(Y^2)$은 j등급 작업지시에 대한 서비스시간의 2차 적률모함수, 그리고 ρ_j는 S/R기계가 j등급 작업지시를 수행하고 있을 확률을 나타낸다.

T_1, T_2기간의 S/R기계와 작업지시에 대한 측정치계산의 일반식은 위의 식들을 이용하여 유도할 수 있으며, 그중 일부는 표1과 같이 정리된다. 표에서 A는 L/s_h 또는 H/s_v 그리고 a는 S/R기계의 p/d 시간을 의미한다.

이들 표에 나타난 일반식을 토대로 한 모든 경우들의 일반적인 비교는 가능하지 않으며, 또한 의미가 없다. 왜냐하면, 첫째 p/d시간의 크기가 측정치의 계산에 영향을 미치고, 둘째 저장위치방법에 따라 선반위치 소요량의 크기가 달라져 상수 A의 값이 경우마다 변하기 때문이다. 하지만 일단 p/d 시간, 선반크기 등이 알려지면 유도된 일반식을 이용하여 최적 운영정책의 결정은 물론, 시스템의 설계에 대략적인 기초자료의 제공이 가능하게 된다.

6. 시뮬레이션 분석

AS/RS가 불확실한 정보로써 실제 가동중인 상황에서 여러 운영정책에 따른 시스템의 수행도를 분석하는 방법으로 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한다. 분석에서 작업수행방법은 단일명령만을 고려한다. 지정된 저장선반위

[표 1] 대기행렬분석을 이용한 측정치 계산식

운영정책 (기간)	ρ	W_{q1}	W_{q2}	L_{q1}	L_{q2}
1. SC / RS / FIFO (T_1)	$\frac{1}{3}(4A+3a)(\lambda_1+\lambda_2)$	$\frac{\frac{2}{9}(\lambda_1+\lambda_2)^2A^2+\rho^2}{2(\lambda_1+\lambda_2)(1-\rho)}$	좌 동	$\lambda_1 W_{q1}$	$\lambda_2 W_{q2}$
2. SC / DS / SF (T_1)	$\rho_1=(A+a)\lambda_1$ $\rho_2=(A+a)\lambda_2$	$\frac{(\lambda_1+\lambda_2)\{\frac{1}{3}A^2+(A+a)^2\}}{2(1-\rho_1)}$	$\frac{(\lambda_1+\lambda_2)\{\frac{1}{3}A^2+(A+a)^2\}}{2(1-\rho_1)(1-\rho_1-\rho_2)}$	$\lambda_1 W_{q1}$	$\lambda_1 W_{q2}$
3. SC / 2C / RF (T_1)	$\rho_1=(\frac{10}{9}A+a)\lambda_2$ $\rho_2=(\frac{10}{9}A+a)\lambda_1$	$\frac{(\lambda_1+\lambda_2)\{\frac{43}{162}A^2+(\frac{10}{9}A+a)^2\}}{2(1-\rho_1)(1-\rho_1-\rho_2)}$	$\frac{(\lambda_1+\lambda_2)\{\frac{43}{162}A^2+(\frac{10}{9}A+a)^2\}}{2(1-\rho_1)}$	$\lambda_1 W_{q1}$	$\lambda_2 W_{q2}$
4. DC / RS / FIFO (T_1)	$(1.8A+2a)\lambda_2$	$\frac{L_{q1}}{\lambda_1}$	$\frac{0.27A^2\lambda_2^2+\rho^2}{2\lambda_2(1-\rho)}$	$(\lambda_1-\lambda_2)T_1$	$\lambda_2 W_{q2}$
5. MC / RS / FIFO (T_1)	$(\frac{4}{3}A+a)(\lambda_1-\lambda_2)+$ $(1.8A+2a)\lambda_2$	$\frac{\frac{2}{9}A^2(\lambda_1-\lambda_2)^2+0.27A^2\lambda_2^2+\rho^2}{2\lambda_1(1-\rho)}$	좌 동	$\lambda_1 W_{q1}$	$\lambda_2 W_{q2}$
6. SC / RS / FIFO (T_2)	$(\frac{4}{3}A+a)\lambda_2$		$\frac{\frac{2}{9}A^2\lambda_2^2+\rho^2}{2\lambda_2(1-\rho)}$	$\lambda_2 W_{q2}$	

치까지의 S/R기계 이동시간은 수평거리 이동시간과 수직거리 이동시간중 최대치로써 결정된다.

6.1 모델링

창고는 총 5가지 품목을 취급하며, 저장선반의 크기는 20m×40m로서 각 선반위치는 2m×2m의 크기이다. T_1, T_2는 각각 4시간, 6시간으로 설정한다. 따라서 하루동안 시스템의 가동시간은 10시간이 된다. P/D장에 도착된 물품이 빈 선반위치가 없어 저장작업이 불가능한 경우는 외부로 되돌려 보내지며, 이에 따른 S/R기계의 작업시간은 0.4분이 소요된다. 한편 저장되어 있는 품목이 없어 불출작업이 불가능한 경우 작업지시는 일단 취소되었다가 30분후 다시 발생되어 진다. S/R기계의 수평, 수직 이동속도는 각각 분당 30m, 15m이다. 그리고 p/d 시간은 0.2분이다.

발주후 품목별 단위시간당 저장지시의 도착률은 $Q(i)/T_1$으로써 결정된다. 전체 선반위치중 20% 정도가 품목별 안전재고를 위해 할당되어 진다면, $\int_0^1 Q(i)di = 160$이 되어야 한다. 각 품목의 발주간격 b_i는 $Q(i)/D(i)$에 의해 산출된 값들을 그중 최소치를 기준일로 하여 조정하여 결정된다.

품목별 단위시간당 불출지시의 도착률은 $Q(i)/\{b_i(T_1+T_2)\}$로써 결정된다. 주요 설계변수들의 산정된 값들이 표 2에 정리되어 있다. 이 모형에서 작업의 기본주기는 그림 2와 같다.

[표 2] 시뮬레이션 모형의 주요 설계변수

품목	주문량 (개)	안전재고 (개)	저장지시 도착률 (개/시간)	불출지시 도착률 (개/시간)	발주간격 (일)	활동/공간 (비율)
1	55	13	14	5	1	0.77
2	32	8	8	2	2	0.39
3	27	7	7	1	3	0.33
4	24	6	6	0.8	3	0.29
5	22	6	5	0.7	3	0.27

모형의 시뮬레이션을 위한 SLAM Ⅱ 네트워크 모형을 도시하면 그림 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 3개의 user-written FORTRAN event subroutine이 포함된다.

모형에서 사용되는 서브루틴, 함수, 주요 SLAM Ⅱ 변수를 정리하면 다음과 같다.

EVENT(i)

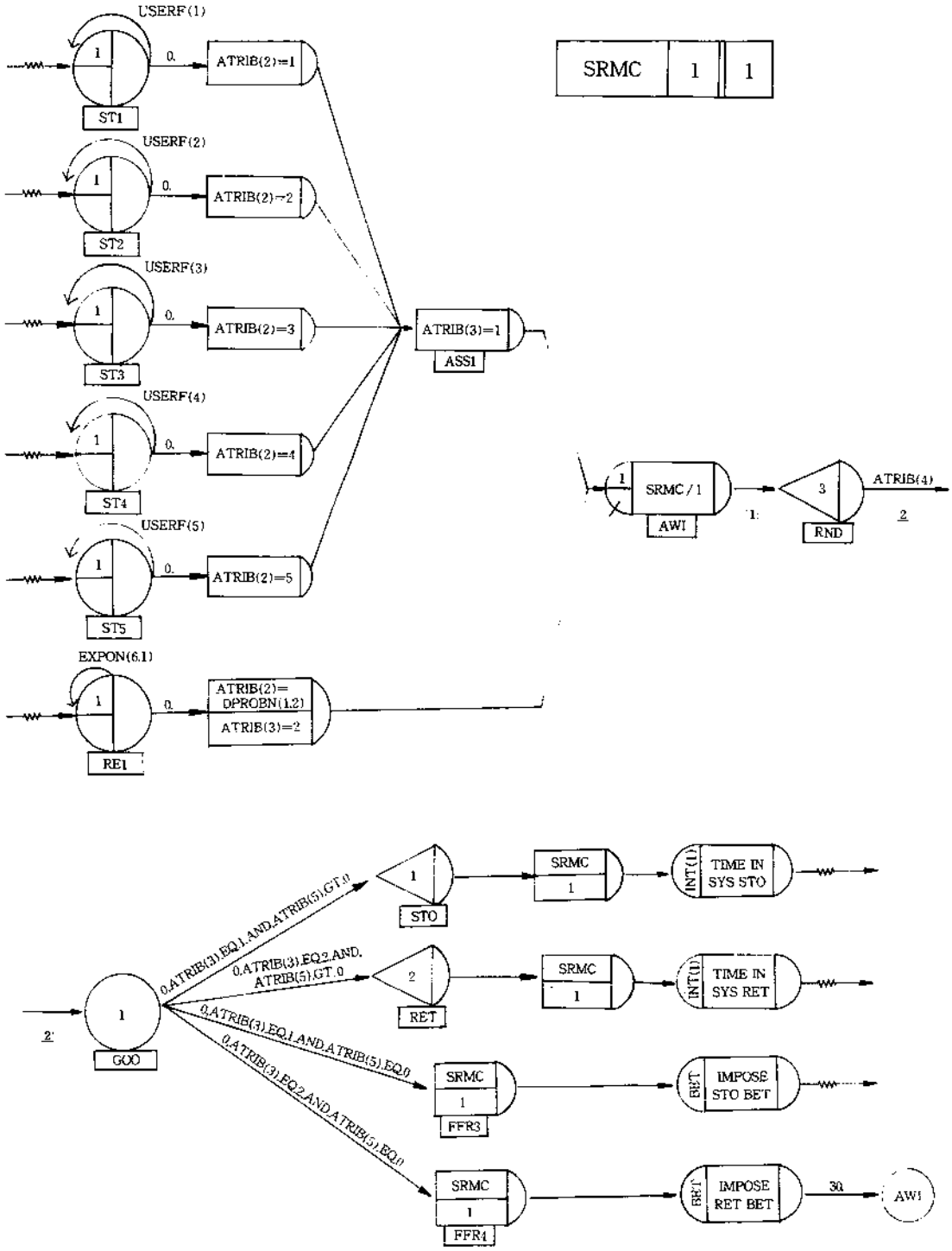
1 : S/R기계가 해당 선반위치에 품목을 저장하며, 이때 품목의 저장시간과 번호가 기록된다.

2 : S/R기계가 해당 선반위치로부터 품목을 불출한다.

3 : 작업의 가능성 여부조사와 함께 방문할 선반위치를 결정하고 작업소요시간을 산정한다.

Subroutine INTLC

각 선반위치까지의 S/R기계 이동시간을 계산하여 가까운 순서대로 위치들을 정리한다. 그리고 품목별 안전재고를 선반에 저장한다.



[그림 4] AS / RS의 SLAM Ⅱ 네트워크 모형

USERF(i)

발주간격과 함께 저장될 품목i의 P/D장 도착시간 간격이 산출된다.

ATRIB(i)

1 : P/D장에 작업지시 도착시간

2 : 품목번호

3 : 1=저장작업지시, 2=불출작업지시

4 : 작업소요시간

4 : 작업을 위한 선반위치번호(0=작업이 불가능한 경우)

XX(1)

품목을 저장하고 있는 선반위치수로서, 선반 이용도를 계산하는 데 사용된다.

Resource SRMC

S/R기계

6.2 결과분석

작업의 대주기인 6일(3600분)동안 시뮬레이션을 5회 반복하여 시행한 결과, 9가지의 다른 운영정책에 대한 시스템의 수행도 평가척도는 표3과 같이 정리된다.

저장위치방법에 따른 수행도를 비교해 보면, 표에서 보는 바와 같이 시스템내 거주시간과 선반위치 사용의 관점에서 임의위치 저장방법이 가장 뛰어나다. 특히 선반위치수는 임의위치저장이 지정위치저장에 비교하여 평균 약 13%가 적게 사용된다. 두 저장위치 방법의 이러한 차이가 이 시스템에서 임의위치저장에 의한 작업능력이 뛰어난 이유가 된다. 표2에 나타난 바와 같이 1번 품목외의 나머지 네품목들의 활동/공간 비율이 비슷하기 때문에, 저장위치방법에 따른 작업능력의 차이가 별로 크지 않게 나타난다.

독촉규칙에 관한 수행도를 비교해 보면, 우선작업 규칙에 따른 해당 작업지시의 시스템내 거주시간은 현격히 감소한다. 반면에 해당 작업지시의 불능횟수는 증가한다. 전체적으로 이 AS/RS에서는 RS/FIFO정책이 바람직한 것으로 나타난다.

시뮬레이션에서 사용된 p/d시간과 선반크기 자료를 가지고 대기행렬분석을 수행하

〔표 3〕 시뮬레이션을 이용한 AS/RS의 운영정책에 따른 수행도 비교(단일명령)

운영정책	시스템 내 거주시간 (저장작업지시)	시스템 내 거주시간 (불출작업지시)	저장불능 작업지시횟수	불출불능 작업지시횟수	사용된 선반위치수	저장선반 이용도	작업지시의 평균대기시간
RS/FIFO	33.4	20.7	0	13	173	0.63	24.7
RS/SF	17.7	45.4	12	19	200	0.52	28.64
RS/RF	39.6	3.3	0	40	147	0.71	19.24
DS/FIFO	39.3	20.6	13	4	200	0.51	29.0
DS/SF	23.8	39.1	33	5	200	0.45	30.38
DS/RF	50.5	2.3	8	11	200	0.51	25.22
2C/FIFO	37.9	20.9	0	3	173	0.64	27.64
2C/SF	22.1	39.7	18	5	200	0.50	29.83
2C/RF	46.3	2.3	0	9	171	0.62	22.86

면 모든 경우에서 표 2과 다른 측정치의 계산결과를 얻게 된다. 이것은 두 분석방법에서 설정된 가정과 분석기간이 각각 다르기 때문이다. 그러나 단일명령에 대한 대기행렬 분석결과는 시뮬레이션에서와 마찬가지로 RS/FIFO 정책이 대체적으로 바람직한 것으로 나타났다.

7. 결 론

막대한 초기투자를 필요로 하는 AS/RS 도입에 따른 중요한 문제중의 하나는 시스템의 최적 운영정책의 과학적인 결정이다. 본 연구는 다품종 단위적재 AS/RS에서 여러가지의 다른 운영정책에 따른 시스템의 수행도를 M/G/1 대기모형과 컴퓨터 시뮬레이션 모형을 이용 분석하여 최적의 운영정책을 결정하는 내용을 다루었다. M/G/1 대기모형을 이용한 분석은 고유의 엄격한 가정들에 기인하여 신속하고 대략적인 평가방법으로 적합하다. 컴퓨터 시뮬레이션은 좀 더 현실적인 분석을 수행하는 데 사용될 수 있다.

운영정책으로는 작업수행방법, 저장위치방법, 그리고 작업독촉규칙이 고려되었다. 대기모형을 이용한 분석에서 여러가지 운영정책에 대한 S/R 기계의 이동시간 확률분포가 연속형 이동시간 모델에 근거하여 구해졌다. 시뮬레이션은 SLAM Ⅱ/PC를 이용하였다.

연구과정을 통하여, 두가지 분석방법을 이용한 최적 운영정책의 선택은 시스템의 작업능력 향상과 저장공간소요 절약을 가능하게 해 준다는 사실을 확인하였다. 본 논문에 소개된 분석방법은 현재 가동중인 AS/RS 의 생산성 향상은 물론, 새로운 AS/RS를 최적으로 설계하는 데도 매우 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.

Reference

1. Hausman, W.H., L.B.Schwarz and S.C.Graves, "Optimal Storage Assignment in Automatic Warehouse Systems", Management Science, Vol 22, pp 629−638, 1976.
2. Graves, S.C., W.H.Hausman and L.B.Schwarz, "Storage/Retrieval Interleaving in Automatic Warehouse Systems", Management Science, Vol 23, pp 935−945, 1977.
3. Schwarz, L.B., S.C.Graves and W.H.Hausman, "Scheduling Policies for Automatic Warehousing Systems : Simulation Results" AIIE Transactions, Vol 10, pp 260−270, 1978.
4. Bozer, Y.A. and J.A. White "Optimum Design of AS/RS", Presentation to the TIMS/ORSA Joint National Meeting, Washington, D.C., May 1980.
5. Chow, W.M., "An Analysis of AS/RS in Manufacturing Assembly Lines", AIIE Transactions, pp 204−214, June 1986.

6. Azadiver, F., "Maximization of the Throughput of a Computerized Automated Warehousing System under System Constraints", Int. J. Prod. Res., Vol 24, pp 551-556, 1986.
7. A. Alan B. Pritsker, *Introduction to Simulation and SLAM II*, third edition, John Wiley & Sons, 1986.
8. Hiller, F.S. and G.J.Lieberman, *Introduction to Operations Research*, Holden-Day, Inc., San Francisco, 1980.
9. Giffin, W.C., *Queueing : Basic Theory and Applications*, Grid Inc., Columbus, 19 78.