

Twin Fork 자동창고의 성능 평가 모형 - Performance Evaluation Model for Twin Fork AS/RS -

金 成 泰 *
金 在 連 **

Abstract

In this paper, We develop performance evaluation model for Twin fork Automated Storage/Retrieval systems. The system is modeled as a modified bulk service queueing system consisting of one exponential server with limited system capacity. The difference between this model and general bulk service queueing model is the inequality of transition service rate of each stage. The objective of this model is to provide system characteristics for Twin fork AS/R system design problems, which are the number of customers in system, wait time in system and queue, the system queue size.

1 서론

본 연구에서는 Twin Fork S/R 기계의 성능을 평가하는 모형을 제시하고자 한다. S/R 기계의 성능을 평가하는 것은 자동창고 시스템 설계와 운영에 있어 매우 필요한 정보가 된다. 본 연구에서 제시하는 모형은 Twin Fork S/R 기계에 대한 것으로, S/R 기계가 입고고지점(I/O Point)에 되돌아 왔을 때, 도착한 주문의 형태에 따라 단일명령, 이중명령, 삼중명령, 사중명령 중 하나를 실행하는 모형을 구성하고자 한다. 따라서, 단일명령 혹은 단지 이중명령만을 처리하는 Single Fork S/R 기계의 분석방법과는 상당한 차이가 있다. 즉, S/R 기계가 명령을 묶음(Bulk)단위로 처리할 수도 있다.

Single Fork S/R 기계에서 대해 Queueing 모형을 이용한 분석을 하였으나, S/R 기계가 단일명령(Single Command)만을 경우이거나, 오직 이중명령(Mandatory Dual Command)만을 수행하는 것으로 하는 모형[10]을 구성하였다.

Rizo-Patron[11]은 Twin Fork S/R 기계에 대해 시뮬레이션방법을 이용한 분석을 하였으나, 삼중명령과 사중명령을 실행함에 있어, 주문처리 방법이 삼중명령인 경우 3 점을 방문하고, 사중명령인 경우 4 점을 방문한다는 것을 고려하여 S/R 기계의 기대 운행 시간을 산출하였다. 본 연구에서는 S/R 기계의 성능을 평가하기 위하여 묶음 서비스 대기행렬모형($M/M^x/1$)[8]을 Twin Fork S/R 기계의 특성을 고려하여 수정된 묶음 서비스 대기행렬모형(Modified $M/M^x/1$ Queueing Model)을 개발하였다. 본 연구에서 제시한 수정된 묶음 서비스 대기행렬모형과 일반적인 묶음 서비스 대기행렬모형의 차이점은 서비스 단위와 서비스율이 상황에 따라 변하는가, 일정인가 따라 구분할 수 있다.

* 明知實業專門大學 工業經營科

** 漢陽大學校 産業工學科

접수 : 1993년 9월 15일

확정 : 1993년 9월 27일

2 가정 및 용어설명

본 절에서는 Twin Fork S/R 기계의 성능평가 모형을 개발하기 위하여 다음과 같은 가정을 설정한다.

2.1 가정

- 1) Twin Fork S/R 기계를 사용하므로 단일명령, 이중명령, 삼중명령, 사중명령을 수행 할 수 있다.
- 2) S/R기계의 명령은 Twin Fork이므로 대기하는 주문이 4 건이상일 때는 4 건씩 묶어서 실행가능 여부를 판단하여 실행가능한 경우만 수행한다.
- 3) S/R 기계가 입출고지점에 돌아왔을 때, 도착한 주문의 형태에 따라 명령을 수행한다. 즉, 대기하고 있는 주문의 형태에 따라 다음 명령중 하나를 수행한다.
 - i) 단일명령: 대기하는 주문이 입고, 혹은 출고 주문 1 건인 경우
 - ii) 이중명령: 대기하는 주문이 입고, 출고 2 건만 있거나, 주문이 연속적으로 4개 이상이 입고 주문만 있거나 출고주문만 있는 경우
 - iii) 삼중명령: 대기하는 주문이 3건만 있는 경우 중 입고, 출고 2 건이고 나머지가 1 건이거나, 연속되는 주문중 1 건이 입고나 출고이고 나머지 주문은 모두 출고나 입고인 경우
 - iv) 사중명령: 연속되는 4 건의 주문중 입고가 2 건, 출고가 2 건인 경우
- 4) S/R 기계의 운행방식은 체비셰프 운행방법을 따른다.
- 5) 주문이 2 건만 있을 경우에 1 건만 처리하는 경우는 없다.
- 6) 시스템에 처리할 수 있는 입고와 출고주문의 최대 주문수는 M 건으로 한정한다.
- 7) 주문의 도착시간간격의 분포는 평균이 $\frac{1}{\lambda}$ 인 지수분포를 따르며, 서비스시간 간격의 분포는 평균이 $\frac{1}{\mu_i}$ ($i=1,2,3,4$)인 지수분포를 따른다.

2.2 용어설명

α : 단위시간당 입고주문의 평균도착율

β : 단위시간당 출고주문의 평균도착율

P_i : 주문이 입고일 확률 ; $P_i = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$

P_o : 주문이 출고일 확률 ; $P_o = \frac{\beta}{(\alpha + \beta)}$

λ : 주문(입고 혹은 출고)의 도착률 ; $\lambda = \alpha + \beta$

$E_1()$: Single Fork S/R기계의 기대운행시간

$E_2()$: Twin Fork S/R기계의 기대운행시간

μ_i : 서비스 i를 행할때 단위시간당 평균서비스율

- 서비스 i는 i=1 : 단일명령
 2 : 이중명령
 3 : 삼중명령
 4 : 사중명령

P_k : 시스템에 k개의 주문이 존재하고 있을 확률

β_{ik} : 시스템내에 k개의 주문이 존재하고 있을때 서비스 i를 행할 확률

$\beta_{i,k}$ 에 대하여

$$\beta_{1,1} = 1 \tag{2.1}$$

$$\beta_{2,2} = 1 \tag{2.2}$$

$$\beta_{2,3} = {}_3C_3 (P_i^3 + P_o^3) \tag{2.3}$$

$$\beta_{3,3} = 1 - \beta_{2,3} \tag{2.4}$$

$$\beta_{1,k} = 0, \quad 2 \leq k \leq M \tag{2.5}$$

$$\beta_{2,k} = (P_i^k + P_o^k), \quad 4 \leq k \leq M \tag{2.6}$$

$$\beta_{3,k} = {}_4C_3 (P_i^{k-1} P_o + P_i P_o^{k-1}), \quad 4 \leq k \leq M \tag{2.7}$$

$$\beta_{4,k} = 1 - \beta_{2,k} - \beta_{3,k}, \quad 4 \leq k \leq M \tag{2.8}$$

식(2.1)은 시스템에 도착한 주문이 1 건밖에 없는 경우이므로 단일명령을 수행한다. 식(2.2)는 시스템에 도착한 주문이 2 건이 있을 경우이므로 이중명령을 수행하며, 2 건의 주문중 한개만 처리하는 경우는 가정5)에 의해서 없다. 식(2.3)과 식(2.4)는 시스템에 도착한 주문이 3 건이 있을 경우이므로 3 건의 주문의 형태가 모두 동일하다면 이중명령을 수행하고, 2 건의 주문형태가 동일하고 다른 1 건이 다른형태의 주문이라면 삼중명령을 수행한다. 식(2.5)는 시스템내에 주문이 2 건이상인 모든 경우에는 단일명령을 수행하지 않는다.

식(2.6)은 시스템내의 주문이 4 건이상 도착하였을 때, 빨리 도착한 순서로 4 건을 묶어서 보았을때, 모두 동일한 형태의 주문일 경우에 대한 확률이다. 즉 모두 입고주문이거나 모두 출고주문인 경우이다. 이때는 이중명령을 수행하게된다. 식(2.7)은 시스템내에 주문이 4 건이상 도착하였을때, 빨리도착한 순서로 4 건을 묶었을때, 3 건이 동일하고 1 건이 다른경우이며, 이러한 경우의 수는 ${}_4C_3$ 이 되며, 이때 동일한 주문의 형태가 입고인 경우와 출고인 경우로 나눌수 있다. 이때의 S/R기계에 대한 명령의 형태는 삼중명령이 된다.

식(4.8)은 시스템내에 도착한 주문이 4 건이상일 때, 빨리 도착한 순서로 4 건을 묶었을때, 입고주문이 2 건이고 출고주문이 2 건인 경우이며, 이러한 경우는 사중명령을 수행한다.

3. Twin fork S/R기계의 기대운행시간

S/R기계의 기대운행시간(Expected Travel Time)은 자동창고의 성능 평가의 중요한 기본 정보가 된다. 창고의 여러가지 저장정책에 따른 많은 연구들이 Single Fork에 대하여 기대운행시간을 분석하였다.[1,3,5,6,7,9] 본 연구에서는 이를 토대로 Twin Fork S/R기계의 기대운행시간을 제시한다.

3.1 단일명령

S/R기계가 입출고지점에 도착했을 때, 처리할 주문이 한개만 있을 경우는 단일명령을 수행하게 된다. 단일명령인 경우에는 싱글 포크 S/R기계의 기대운행시간과 동일하다.

$$E_2(SC) = E_1(SC)$$

3.2 이중명령

이중명령일 경우에는 크게 2 가지로 나누어 볼 수 있는데, 주문이 다른 종류(즉, 입고와 출고)와 주문이 동일한 경우로 나눌 수 있다.

(1) 주문이 다른 종류인 경우

S/R기계가 입출고지점에 도착했을 때 처리할 주문이 입고와 출고 2 건만 있는 경우이다. 주문이 입고와 출고로 이루어져 있다면, 1 개의 입고할 물건을 S/R기계에 적재하여, 출고해야 할 위치로 가서 물건을 출고한 후, S/R기계를 한칸 옆으로 움직여 그 자리에 입고시키면 된

다. 따라서 단일명령시간에 한칸 옆으로 움직이는 시간의 합이된다. ϵ 는 S/R기계를 한 칸 옆으로 이동한 시간을 말하며, T 는 선반의 최장거리까지의 소요시간, N_L 은 선반의 수평방향의 칸 수를 의미한다.

$$E_2(DC1) = E_1(SC) + \epsilon$$

$$\epsilon = \frac{T}{N_L} \quad \dots \dots \dots \text{일반시간의 선반인 경우}$$

(2) 주문이 동일한 경우

1 종류의 주문이 4개이상 연속되는 경우, 입고와 입고 또는 출고와 출고와 같이 2 건의 주문을 수행하게 되는데, 이때는 싱글 포크의 이중명령의 기대시간과 같아진다.

$$\begin{aligned} E_2(DC2) &= E_1(SC) + E_1(TB) \\ &= E_1(DC) \end{aligned}$$

3.3 삼중명령

삼중명령인 경우에는 입고주문 2 건과 출고주문 1 건으로 이루어지는 경우, 또는 출고주문 2 건과 1 건으로 이루어진 경우이다. 전자의 경우에는 1 개를 입고 시키고, 출고하여야 할 위치로 이동하여 출고하고 한칸 움직여 그 자리에 입고시키면 된다. 후자의 경우는 먼저 1 개를 출고하고, 그 자리에서 한칸 움직여 입고를 수행한 후 나머지 명령을 수행하면 된다. 따라서 싱글 포크의 이중명령 수행시간에 1 칸 움직이는 시간을 합한 시간이 기대운행시간이 된다.

$$\begin{aligned} E_2(TC) &= E_1(SC) + E_1(TB) + \epsilon \\ &= E_1(DC) + \epsilon \end{aligned}$$

3.4 사중명령

사중명령인 경우에는 입고주문 2 건과 출고주문 2 건을 동시에 수행하는 경우로서 명령의 수행순서는 항상 입고-출고-입고-출고 순으로 행하도록 한다. S/R기계는 첫번째 입고주문을 수행하고 출고해야 할 위치로 이동한다. 이때 첫번째 출고명령을 수행하고, 그 위치에 두번째 입고명령을 수행하고나서 마지막 출고명령을 처리한다. 따라서 기대운행시간은 삼중명령의 기대운행시간에 2 지점간의 이동시간을 한번 더 추가한 것이 된다.

$$\begin{aligned} E_2(QC) &= E_1(SC) + E_1(TB) + E_1(TB) + \epsilon \\ &= E_2(TC) + E_1(TB) \end{aligned}$$

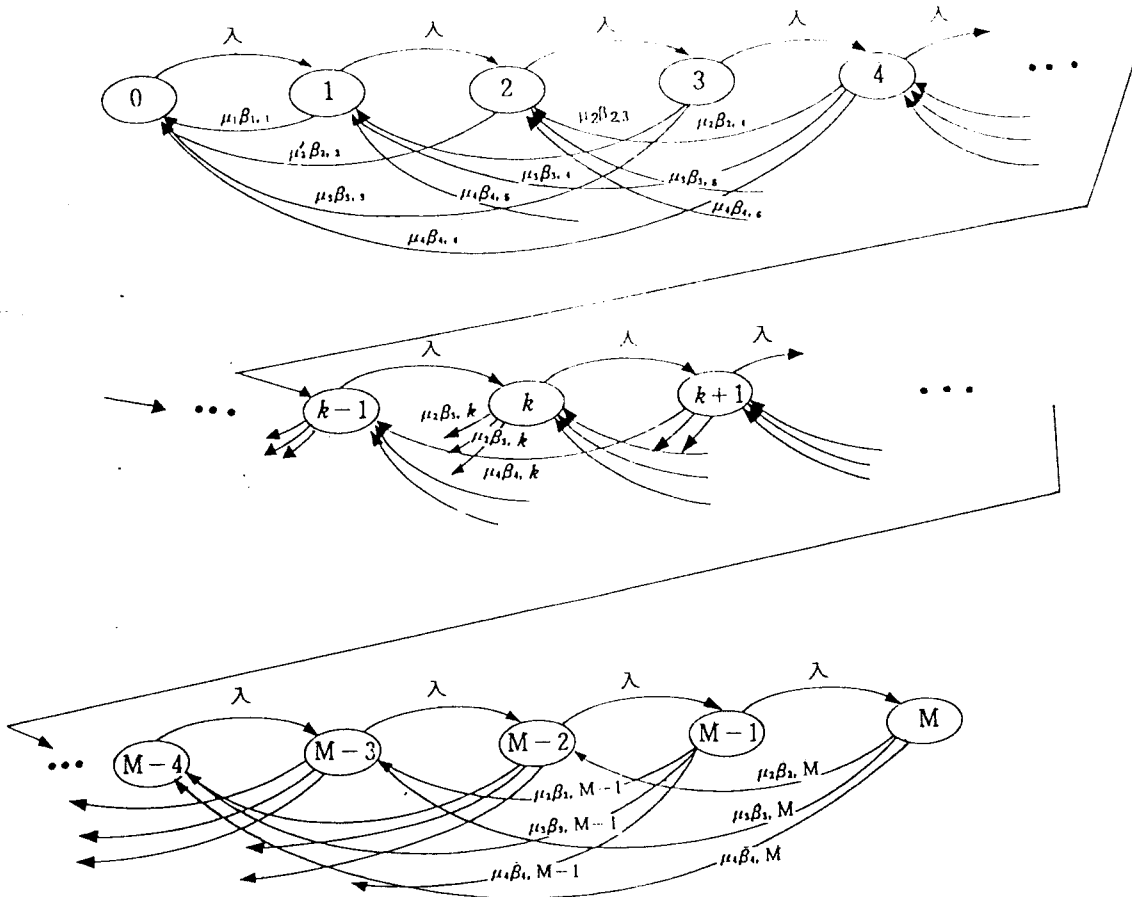
4. 시스템 분석 모형

본 절에서는 Twin Fork AS/RS의 성능을 평가하기 위하여 일반적인 $(M/M^X/1)$ 대기행렬모형을 수정한 수정된 묶음 서비스 대기행렬모형을 제시하고자 한다.

4.1 시스템의 모형화

Twin Fork S/R 기계가 수행하는 명령중 사중명령의 시간이 가장 크므로 최대서비스율은 μ_4 가 된다. 또한 입고 또는 출고 주문의 도착율은 λ 이므로 시스템의 이용율 $\rho = \frac{\lambda}{\mu_4}$ 가 되며,

시스템의 안정화 조건은 $\rho < 1$ 이 된다. 시스템이 안정상태 일 때의 상태변환율도표(State Transition Rate Diagram)는 Figure 1 처럼 나타낼 수 있다.



<Figure 1>The Modified Bulk Service State Transition Rate Diagram

수정된 묶음 서비스 대기행렬 모형은 일반적인 $(M/M^k/1)$ 대기행렬모형과 유사하나, 서비스의 최대 묶음이 4개까지이며, 각 상태에서 다른 상태로 변환하는 확률이 각각 다르다는 점이 다르다.

시스템이 안정상태일 때의 평형 방정식(Equilibrium Equation)은 표1처럼 표현할 수 있다.

Table 1의 평형방정식중 $k=2$ 일 때 이중명령에 대한 서비스율 μ_2 값은 두가지 경우에 대한 기대값으로 구할수 있다. k 가 2라는 것을 주문이 2건 있는 경우인데, 2건의 주문이 입고와 출고로 이루어진 경우와 입고 또는 출고 중 동일한 주문 2건인 경우로 나눌 수 있다. 첫 번째 경우의 기대운행시간은 앞에서 제시한 이중명령의 기대운행시간 $E_2(DC1)$ 을, 두 번째 경우는 $E_2(DC2)$ 를 적용하여야 한다. 따라서 각 경우의 발생확률을 고려한 이중명령의 기대운행시간은 다음의 $E_2(DC)$ 가 된다.

<Table 1> The Equilibrium Equation for Modified $M/M^X/1$ Queueing Model

RATE IN	RATE OUT
CASE 1. for $M-3 \leq k$	
$\lambda P_{k-1} + \sum_{i=1}^{M-k} \mu_i \beta_{i,k} P_{k+i}$	$\lambda P_k + \sum_{i=1}^4 \mu_i \beta_{i,k} P_k$
CASE 2. for $4 < k < M-3$	
$\lambda P_{k-1} + \sum_{i=1}^4 \mu_i \beta_{i,k} P_{k+i}$	$\lambda P_k + \sum_{i=1}^4 \mu_i \beta_{i,k} P_k$
CASE 3. for $1 \leq k \leq 4$	
$\lambda P_{k-1} + \sum_{i=1}^4 \mu_i \beta_{i,k} P_{k+i}$	$\lambda P_k + \sum_{i=1}^4 \mu_i \beta_{i,k} P_k$ 단, $k=2, i=2$ 일때, μ_2 는 μ_2' 로 대치
CASE 4 for $k=0$	
$\sum_{i=1}^4 \mu_i \beta_{i,0} P_i$ 단, $i=2$ 일때 μ_2 는 μ_2' 로 대치	λP_k

입고율을 α 라하고 출고율을 β 라 하면, 임의의 주문이 입고주문일 확률은 $\frac{\alpha}{(\alpha + \beta)}$ 이고 출고주문일 확률은 $\frac{\beta}{(\alpha + \beta)}$ 이다.

$$E_2(DC) = P_E * E_2(DC1) + (1 - P_E) * E_2(DC2)$$

$$P_E = \left(\frac{\alpha}{\alpha + \beta}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta}\right)^2$$

따라서 $k=2$ 일때 μ_2 는 μ_2' 로 대치되어야 하며 $\mu_2' = 1/E_2(DC)$ 이다. 그러나 k 가 3 이상인 경우, 즉 시스템내에 도착한 주문이 3 건이상일 경우에 이중명령을 수행한다면, 이때는 도착한 주문이 모두 동일하다는 것을 의미하므로 $\mu_2 = 1/E_2(DC1)$ 이 된다.

1) CASE 1

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^{M-k} (\mu_i \beta_{i,k+i}) P_{k+i} + \lambda P_{k-1}}{\sum_{i=1}^4 \mu_i \beta_{i,k} + \lambda}, \quad \text{for } M-3 \leq k \leq M$$

2) CASE 2

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^4 (\mu_i \beta_{i,k+i}) P_{k+i} + \lambda P_{k-1}}{\sum_{i=1}^4 \mu_i \beta_{i,k} + \lambda}, \quad \text{for } 4 \leq k \leq M-3$$

3) CASE 3

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^4 (\mu_i \beta_{i,k+i}) P_{k+i} + \lambda P_{k-1}}{\sum_{i=1}^4 \mu_i \beta_{i,k} + \lambda}, \quad \text{for } 1 \leq k \leq 4$$

단, 분포의 μ_i 중 $i=2$ 일때 μ_2 는 μ_2' 로 대치

4) CASE 4

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^4 \mu_i \beta_{ki} P_i}{\lambda}, \text{ for } k=0$$

단, i=2 일때 μ_2 는 μ_2' 로 대치

P_k 를 구하기 위하여 우측항의 분모를 P_k 에 곱하여 이항하면, $(\cdot) \cdot P_i - (\cdot) \cdot P_k = 0$ 형태의 방정식이 $M+1$ 개가 되며, $\sum_{k=0}^M P_k = 1$ 을 넣어 $\overline{BP} = \overline{b}$ 인 행렬연산의 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\overline{B} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & \cdots & k-1 & k & k+1 & \cdots & M \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ k-1 \\ k \\ k+1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ M \end{matrix} & \begin{bmatrix} -\lambda & \mu_1 \beta_{1,1} & \mu_2' \beta_{2,2} & \mu_3 \beta_{3,3} & \mu_4 \beta_{4,4} & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \lambda & -(\lambda + \mu_1 \beta_{1,1}) & \mu_1 \beta_{1,2} & \mu_2 \beta_{2,3} & \mu_3 \beta_{3,4} & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda & -(\lambda + \mu_2' \beta_{2,2}) & \mu_1 \beta_{1,3} & \mu_2 \beta_{2,4} & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & -(\lambda + \sum \mu_i \beta_{i,3}) & \mu_1 \beta_{1,4} & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & -(\lambda + \sum \mu_i \beta_{i,4}) & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -(\lambda + \sum \mu_i \beta_{i,k-1}) & \mu_1 \beta_{1,k} & \mu_2 \beta_{2,k+1} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \lambda & -(\lambda + \sum \mu_i \beta_{i,k}) & \mu_1 \beta_{1,k+1} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda & -(\lambda + \sum \mu_i \beta_{i,k+1}) & \cdots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & -(\lambda + \sum \mu_i \beta_{i,M}) & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$\overline{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} \quad (M+2 \times 1) \text{행렬} \quad \overline{P} = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \cdot \\ P_M \end{bmatrix} \quad (M+1 \times 1) \text{행렬}$$

$\overline{BP} = \overline{b}$ 의 행렬연산에서 \overline{B} 는 $(M+2 \times M+1)$ 행렬 이고, \overline{P} 의 $M+1$ 개의 행렬을 구하기 위하여, $\overline{BP} = \overline{b}$ 의 양변에 $(\overline{B}' \overline{B})^{-1} \overline{B}'$ 곱하면, $(\overline{B}' \overline{B})^{-1} \overline{B}' \overline{BP} = (\overline{B}' \overline{B})^{-1} \overline{B}' \overline{b}$ 이며, $\overline{P} = (\overline{B}' \overline{B})^{-1} \overline{B}' \overline{b}$ 가 되고, 따라서 P_k 의 $M+1$ 개의 해를 구할 수 있다.

4.2 Twin Fork S/R 기계의 성능 평가

4.1에서 구한 시스템의 상태에 대한 확률 P_k 를 이용하여 시스템의 특성을 분석하기 위하여, 시스템내의 주문수, 대기하고 있는 주문수, 시스템내에서의 주문수행을 완료하는 시간, 대기행렬에서 주문이 수행되기전 까지 기다리는 시간을 구하도록 한다.

$$L_s = \sum_{k=0}^M k P_k \quad (4.1)$$

$$L_q = \sum_{k=0}^M \sum_{i=1}^k (k-i) \beta_{i,k} P_k \quad \text{단 } k \geq i \quad (4.2)$$

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda} \quad (4.3)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (4.4)$$

식(4.1)에서 식(4.4)의 값은 P_k 를 알수 있으므로 구할수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 묶음서비스 대기행렬 모형에서 각 상태로 변환 확률이 다르고, 묶음의 단위도 달라질 수 있는 경우를 고려한, 수정된 묶음 서비스 대기행렬 모형(Modified $M/M^X/1$ Queueing Model)을 개발하였다. 이는 Twin Fork S/R 기계의 특성을 고려한 것으로서, S/R 기계가 입출고 지점에 도착할 때, 현재 도착한 입출고 주문의 형태에 따라 4 건씩 주문을 묶어서 처리하는 과정을 모형화한 것이다.

지금까지 시스템 특성을 설명하는 수학적 모형의 개발은 수학적으로 매우 어려운 부분이며, 따라서 Single Fork S/R 기계에 대해서도 명령이 단일명령일 경우, 혹은 이중명령인 경우는 이중명령만을 처리하는 매우 제한된 모형만이 개발되었다.

본 연구에서 제시한 모형은 서비스 시간의 분포가 지수분포인 경우를 가정하였으나, 일반적인 분포를 갖는 경우에 대한 수학적 모형의 개발이 필요하며, 본 연구에서 제시한 모형은 그 개발을 위한 바탕이 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Bassen, Y., Roll, Y. and Rosenblatt, M.J., "Internal Design of a Warehouse," *AIE Transactions*, Vol. 12, No.4, 1980.
2. Bozer, Y.A., "Optimizing Throughput Performance In Designing Order Picking Systems," Unpublished Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Dec., 1986.
3. Bozer, Y.A. and White, J.A., "Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems," *IIE Transactions*, Vol.16, No.4, Dec. 1984.
4. Francis, R.L. and White, J.A., *Facility Layout and Location: An Analytic Approach*, Prentice-Hall, 1974.
5. Graves, S.C., Hausman, W.H and Schwarz, L.B., "Storage-Retrieval Interleaving in Automatic Warehousing Systems," *Management Science*, Vol.23, No.9, May, 1977.
6. Han, M., McGinnis, L.F., Shieh, J.S. and White, J.A., "On Sequencing Retrievals in an Automated Storage/Retrieval System," *IIE Transactions*, Vol.19, No.1, March, 1987.
7. Hausman, W.H., Schwarz, L.B. and Graves, S.C., "Optimal Storage Assignment in Automatic Warehousing Systems," *Management Science*, Vol.22, No.6, Feb., 1976.

8. Kleinrock, L., *Queueing systems*, John Wiley & Sons, 1975.
9. Park, B.C., "Closest Open Location Rule in AS/RS." *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol.13, No.2, Dec. 1987.
10. Park, B.C., "Analytical Models and Optimal Strategies for Automated Storage/Retrieval System Operations," Unpublished Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Nov. 1991.
11. Rizo-Patron, A., Bozer, Y.A. and McGinnis, L.F., "Analytic and Simulation Models for Advanced Automated Storage/Retrieval Systems," Material Handling Research Center, Georgia Institute of Technology, 1983.