

자동 유도 운반차량 시스템의 성능평가를 위한 근사적 방법⁺

이효성* · 조면식**

An Approximation Method for the Performance Evaluation of AGV Systems⁺

Hyo-Seong Lee* and Myeonsig Cho**

Abstract

A unit-load automated guided vehicle system is considered in which a single vehicle is operated on a unidirectional path in a closed loop.

The vehicle serves a manufacturing cell moving pallets from one station to another based on the "First-Encountered-First-Served" dispatching rule.

An approximation method is developed to compute the mean waiting time of an arbitrary pallet at each station. Extensive numerical experiments, performed for various problems, yield fairly good results in most of the cases compared with those obtained by simulation method.

1. 문제 제기 및 연구의 필요성

자동 유도 운반차(Automated Guided Vehicle : AGV)는 자동공장 조직의 한 부분으로서 각 작업 공간의 물자 수송을 담당하는 무인 운반차이다.

자동 유도 운반차는 기존의 다른 운송설비들에 비하여 부대설비가 상대적으로 적으며, 또한 적은 공간을 차지한다는 장점이 있어 새로운 운송 수단으로서 각광을 받고 있다. 이와 같은 자동 유도차의 장점과 최근의 공장 자동화 추세에 따라 자동 유도 운반차량 시스템의 설계 및 성능분석에 대한 연구가

+ 본 연구는 1989년도 학술진흥재단의 지원으로 수행되었음

* 경희대학교 산업공학과

** 경기대학교 산업공학과

과거 수년간 활발히 수행되어 왔다.

대부분의 기존 연구들은 주로 자동 유도 운반차량 시스템의 경로 선정이나 경제적 차량대수 결정에 관한 것으로서, 문제 자체에 내재하는 복잡성으로 인해 확률적 모형을 사용할 경우에는 분석을 대부분 시뮬레이션(simulation)에 의존하는 등 분석적 방법이 극히 낮은 수준에 머물러 왔음이 사실이다.

이와 같은 현실에 비추어 볼 때 수학적 모형을 이용한 자동 유도 운반차량 시스템의 분석은 매우 중요한 문제로 생각되어지며, 본 연구는 이러한 판단에 따라 단순화된 자동 유도 운반차량 시스템에 대한 확률적 모형(stochastic model)을 수립하고 이에 대한 수학적 분석을 시도하고자 함이 목적이 다.

본 연구에서 분석하고자 하는 자동 유도 운반차량 시스템은 그림 1에서 보는 바와 같이 N개의 작업장이 폐쇄 고리(closed loop) 형태로 연결되어져 있다. 작업장 i에서 다른 작업장으로 운반되어야 할 팔렛(pallet)은 단위 시간당 평균 λ_i 의 비율을 갖는 Poisson 과정에 따라 작업장 i의 하역/선적

장에 도착한다. 작업장 i를 시발점으로 갖는 팔렛의 운송 목적지가 작업장 j가 될 확률은 $P_{ij}(i=1, \dots, N, j=1, \dots, N)$ 로 주어져 있다.

자동유도 운반차(AGV)는 2개 이상의 팔렛을 동시에 운송할 수 없으며(unit load system), 한대의 자동 유도 운반차가 N개의 작업장을 시계방향으로 순회하면서 팔렛을 시발지의 하역/선적장으로부터 목적지의 하역/선적장까지 다음과 같은 급송 규칙(dispatching rule)에 따라 운송하고 있다.

빈 차량(AGV)이 작업장 i에 도착하였을 때 혹은 팔렛을 선적한 차량이 작업장 i에 도착하여 하역을 끝마쳤을 때 작업장 i의 하역/선적장에 다른 작업장으로 운송되어지기를 기다리는 팔렛이 존재하면, 선입선출 원칙(FCFS)에 따라 대기행렬의 가장 앞에 위치한 팔렛을 차량에 선적하여 목적지의 하역/선적장까지 운송한다. 반면에 작업장 j의 하역/선적장에 대기중인 팔렛이 존재하지 않으면 차량은 즉각 다음 작업장인 작업장 i+1의 하역/선적장으로 떠나게 된다. 차량이 작업장 i+1의 하역/선적장에 도착했을 때 대기중인 팔렛이 있

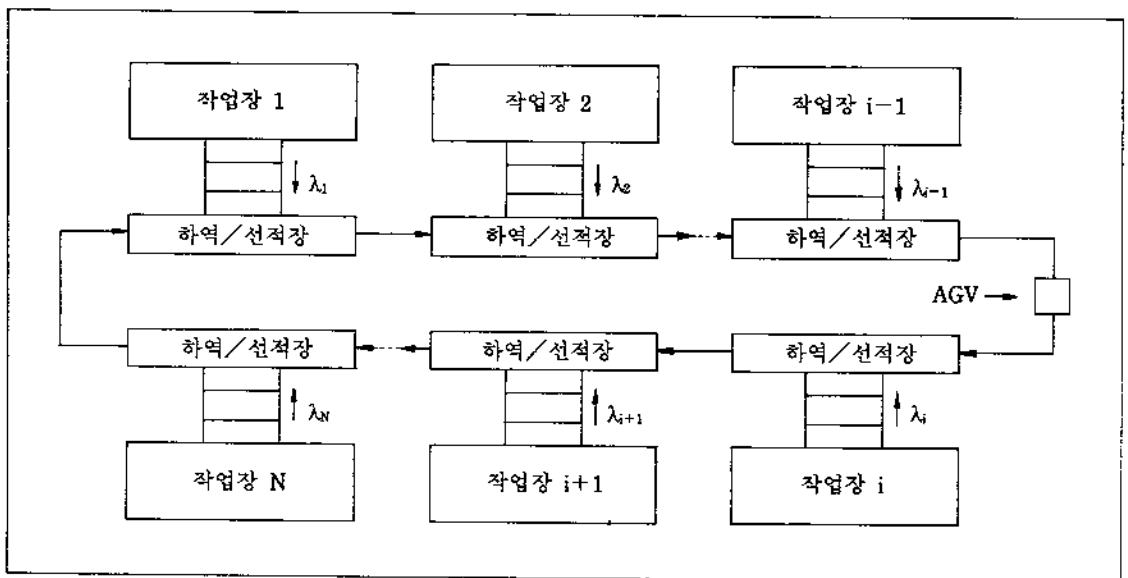


그림 1.

으면 차량은 선입선출 원칙에 따라 팔레트를 선적하여 목적지까지 운송하고 만일 대기중인 팔레트가 없으면 차량은 다시 다음 작업장인 작업장 $i+2$ 의 하역/선적장으로 떠나게 된다.

이러한 급송 규칙(dispatching rule)에 따라 차량은 N 개의 작업장을 계속 순회한다. 이러한 급송 규칙은 First-Encountered First Served(FEFS) 규칙으로 알려져 있으며 Bartholdi와 Platzman[1], Stone과 Fuller[16], 그리고 Bozer와 Srinivasan[4]의 연구에서 이미 이용되어진 바 있다.

차량이 작업장 i 의 하역/선적장에서 팔레트를 선적하기 시작한 후 목적지인 작업장 j 의 하역/선적장에 도착하여 팔레트의 하역을 끝마치는 데까지 걸리는 총 시간은 확정적인(deterministic) 값 τ_{ij} 로 주어져 있다고 가정한다. 또한 팔레트를 선적하지 않은 빈 차량이 작업장 i 의 하역/선적장을 떠나 다음 작업장인 작업장 $i+1$ 의 하역/선적장에 도착할 때까지 걸리는 시간은 역시 확정적인 값 σ_i 로 알려져 있다고 가정한다.

본 연구에서는 따라서 팔레트를 선적한 차량의 운행속도와 팔레트를 선적하지 않은 빈 차량의 운행속도에 차이를 둘 수 있으며, 각 하역/선적장에서의 하역 및 선적시간을 모두 고려해 주고 있다. 만일 각 하역/선적장에서 대기중인 팔레트의 존재 유무를 검사하는데 시간이 소요되면 이러한 검사시간은 τ_{ij} 와 σ_i 에 단순히 더해 줌으로써 해결된다. 또한 각 하역/선적장에는 충분한 여유 공간(buffer)이 있어서 어떠한 형태의 blocking도 발생하지 않는다고 가정한다.

본 연구의 목적은 이러한 가정하에서 작업장 j ($j=1, \dots, N$)에 도착한 팔레트가 작업장 i 에서 선적되기 전 기다려야만 하는 평균 대기(지체) 시간과 작업장 j 에서 대기중인 팔레트의 평균 개수 등 관련되는 주요 수행도 평가치(performance measure)를 구하기 위한 근사적 방법을 개발하고자 함이다. 본 연구는 자동 유도 운반차량 시스템의 확률적 모형을 해석적으로 접근하려는 시도라는 점에서 그 의의가 있

으며, 연구결과는 비단 자동 유도 운반차량 시스템의 설계 뿐만이 아니고 순환 고리형태로 연결되어 현대의 차량에 의해 물자가 운반되는 일반적인 물자 취급 시스템(material handling system)의 설계에도 직접적인 도움이 되리라고 생각한다.

2. 관련된 기존 연구

자동유도 운반차량 시스템에 대한 연구는 1980년대 이후 활발히 수행되어져 왔다. 대부분의 기존 연구들은 주로 자동 유도 운반차량의 경제적 대수 결정[6, 13, 14, 18, 21]이나 경로선정[2, 17], 하역/선적장의 위치결정[12], 각 작업장에서의 차량의 급송 규칙[7, 10, 11, 15]에 대한 연구들로 구분된다. 이들 기존의 연구에서는 수송계획법 등과 같은 확정적 모형을 많이 사용하거나, 확률적 과정이 존재하는 경우에는 주로 시뮬레이션을 통하여 분석을 행하고 있다. 따라서 확률적 모형에 대한 분석적 접근방법(analytic approach)은 아직 초기 단계로서 극히 제한적인 수의 연구만이 수행되어졌다[1, 4, 6]. 자동유도 운반차량 시스템의 연구중 급송규칙의 평가에 대한 연구로는 Newton[15], Egbelu와 Tanchoco[7], Hodgson 등[10], King 등[11]의 논문이 있다. 이들 연구에서도 특정한 기준에 대하여 여러 급송규칙을 평가하는 수단으로서 기본적으로는 시뮬레이션을 이용하고 있다.

본 논문에서 채택하고 있는 FEFS 급송규칙은 Stone과 Fuller[16]가 드럼(drum)으로부터 레코드(record)를 불출(retrieve)하기 위한 규칙으로 처음 사용하였으며, 자동유도 운반차량 시스템에서는 최근 Bartholdi와 Platzman[1] 그리고 Bozer와 Srinivasan[4]의 연구에서 사용되어졌다. Bartholdi와 Platzman의 연구는 폐쇄 고리(closed loop) 상에서 운행되고 있는 자동 유도 운반차량 시스템에 대한 연구로서, 그들은 안정상태 하에서 필요 생산율(desired throughput)을 얻기 위한 조건을 유도해

났다. 그러나 이 연구에서는 하역/선적시간이 무시되었으며 차량의 운행속도가 팔레트를 운반중일 때나 그렇지 않을 때나 동일하다는 제한적인 가정 하에서 연구가 행해졌다. Bozer와 Srinivasan[4]은 본 연구에서 제시하고 있는 운송 시스템과 동일한 가정하에서 운행되는 운송 시스템을 연구하고 있다. 단 이 논문에서는 작업장 i 의 하역/선적장에 들어오는 팔레트의 도착과정이 반드시 Poisson 과정일 필요가 없다고 가정하였으며, 이점에 있어서는 본 연구에 비해 가정이 보다 일반적이라 할 수 있다. 그러나 이 논문에서는 안정 상태에 도달하기 위한 조건과 생산율 분석(throughput analysis)만을 수행하는데 그쳤으며 보다 중요한 문제인 작업장에서 의 팔레트의 평균 대기시간 및 대기중인 팔레트의 평균 갯수와 같은 수행도 평가치는 분석하지 못하였다. 이러한 점에서 본 연구는 Bozer와 Srinivasan의 연구를 확장한 것으로 볼 수 있으며, 앞으로 본 연구에서는 분석을 행하는데 있어 이들의 연구 결과를 일부 이용하게 된다.

본 연구에서 제시한 문제는 근거리 통신망을 모형화 하는데 많이 사용하는 non-exhaustive 서비스 원칙을 갖는 포울링 시스템(polling system)과 직접적인 유사성이 있다. Non-exhaustive 포울링 시스템은 한명의 서어버가 순환 고리상에 존재하는 N 개의 스테이션(station)을 차례로 순회하며 서비스 하는 순환 서어버 시스템(cyclic server system)으로 다음과 같은 특성을 갖는다. 외부로부터 스테이션 $i(i=1, \dots, N)$ 에는 평균 λ_i 의 도착율을 갖는 Poisson 과정에 따라 고객이 도착한다. 서어버가 스테이션 i 에 도착했을 때 서비스를 기다리는 고객이 스테이션 i 에 존재하지 않으면 서어버는 즉시 다음 스테이션인 스테이션 $i+1$ 으로 가게 된다(여기서 스테이션 $N+1$ 은 스테이션 1로 간주함). 반면 스테이션 i 에 고객이 존재하면 서어버는 1명의 고객만을 서비스 한 후 스테이션 $i+1$ 로 가게 된다. 이와 같은 방식으로 서어버는 순환 고리상의 스테이션을 차례로 방문하며 서비스를 수행하게 된다.

이 때 스테이션 i 에서 스테이션 $i+1$ 로 가는데 걸리는 시간을 switch-overtime이라 부르며 각 스테이션에서 1명의 고객을 서비스 하는데 걸리는 시간은 스테이션마다 독립적인 확률 변수를 따른다고 가정한다.

따라서 본 연구에서 제시한 자동 유도 운반차량 모형과 non-exhaustive 포울링 시스템은 일종의 순환 서어버 시스템이라는 점에서는 유사하나 다음과 같은 기본적인 차이점이 있음을 알 수 있다. 기존의 포울링 시스템에서는 스테이션 i 에서 서비스를 끝낸 서어버는 다음 서비스를 위해 반드시 스테이션 $i+1$ 로 가게 되나 본 연구에서는 작업장(스테이션) i 에서 서비스를 끝낸 서어버(AGV)는 작업장 i 를 떠나는 팔레트의 목적지가 작업장 j 일 경우 다음 서비스를 작업장 j 에서 하게 된다. 이러한 차이점은 본 모형이 기존의 포울링 시스템에 비해 서어버의 routing 방식이라는 관점에서 보아 보다 일반화 된 모형임을 말해준다. 즉 작업장 i 를 떠나는 팔레트의 목적지가 항상 작업장 $i+1$ 일 경우 본 모형은 기존의 non-exhaustive 포울링 모형으로 귀결된다.

포울링 시스템에 대한 연구는 최근들어 Takagi [19], Boxma[3], Ferguson[9] 등 많은 학자들에 의해 활발히 수행되어 왔다. 특히 exhaustive 시스템에 대해서는 정확한 해(exact solution)를 구하는 방법이 발견되는 등[9] 많은 연구성과가 있었다. 그러나 non-exhaustive 시스템에 대해서는 많은 학자들의 연구에도 불구하고 스테이션의 수가 2인 경우를 제외하고는[3, 8] 아직까지 정확한 해를 구하지 못하고 있는 실정이다. Non-exhaustive 포울링 시스템의 보다 일반적인 경우를 다루는 본 연구에 있어서도 정확한 해를 구하기는 현재로서는 불가능할 것으로 판단하며, 단지 근사해를 구하는 합리적인 기법을 개발코자 한다.

3. 근사적 방법

본 연구에서 근사해를 구하기 위하여 사용하고자

하는 접근방식은 일종의 분해법(decomposition method)으로서 상호 연관관계하에 있는 각 스테이션을 따로 분리시켜 각각의 스테이션을 독립적으로 분석하는 방법이다. 이와 같이 각 스테이션을 독립적으로 분리시켜 놓고 살펴보면 각 스테이션은 M/G/1 서버 휴가 모형(server vacation model)으로 해석되어질 수 있음을 알게 된다. 본 연구의 분석을 위해 M/G/1 서버 휴가 모형을 이용하게 되므로 아래에 간단히 이에 대해 설명하고자 한다.

M/G/1 서버 휴가 모형에서는 외부로부터 고객은 Poisson 과정에 따라 도착하며, 서버가 일단 서비스를 시작하면 서비스는 시스템에 고객이 존재하지 않을 때까지 계속된다. 서비스가 끝나고 대기행렬 시스템이 비게 되면 서버는 휴가를 떠난다. 휴가를 마치고 서버가 시스템에 돌아왔을 때 서비스를 위해 대기중인 고객이 존재하지 않으면 서버는 즉시 또 다시 휴가를 떠나며 서버의 휴가는 서버가 시스템에 돌아왔을 때 대기중인 고객이 존재하지 않는 한 같은 형태로 반복된다. 서버가 휴가를 마치고 시스템에 돌아왔을 때 대기중인 고객이 존재하면 서비스는 시작되고 시스템에 대기중인 고객이 더 이상 존재하지 않을 때까지 서비스는 계속된다. M/G/1 서버 휴가 모형은 특히 과거 10년간 많은 연구성과가 있었으며, 이러한 연구결과들은 Takagi[20]나 Doshi[5]의 서베이 논문에 잘 요약되어 있다.

M/G/1 서버 휴가모형에서는 고객 한명을 서비스 하는데 걸리는 시간을 확률변수 S라 하고, 휴가시간을 확률변수 V라 했을 때 고객의 평균 대기시간 W(서비스 시간은 포함 안됨)는 몇가지 가정하에서 다음과 같이 표시됨이 알려져 있다.

$$W = \frac{E(V^2)}{2E(V)} + \frac{\lambda E(S^2)}{2(1-\lambda E(S))} \dots\dots\dots (1)$$

식(1)을 주의깊게 살펴보면 식의 첫번째 항은 휴가시간의 residual life time의 기대치를 나타내고,

두번째 항은 휴가가 없는 일반적인 M/G/1 시스템에서 고객의 평균 대기시간을 표시함을 알 수 있다.

이제 서버 휴가시스템의 관점에서 우리가 분석하고자 하는 자동유도 운반차량 시스템을 살펴 보도록 하자. 자동유도 운반차량이 작업장 i에 도착했을 때 대기중인 팔렛이 작업장 i에 존재하면 대기행렬의 가장 앞에 위치해 있는 팔렛이 선적되어 목적지로 가게 된다. 그 후 차량은 FEFS 규칙에 따라 몇개의 작업장들을 방문한 후 작업장 i로 되돌아오게 된다. 차량이 작업장 i로 되돌아 온 후 (하역이 있는 경우는 작업장 i에서 하역을 마친후)에야 비로소 작업장 i에 대기중인 다음 팔렛이 선적되어 질 수 있으므로 이 기간-차량이 작업장 i에서 선적을 시작한 시점으로부터 다시 작업장 i를 방문하여 다음 선적을 할 수 있는 시점까지-이 곧 작업장 i에서 대기중인 팔렛의 관점에서 보면 한 명의 고객을 서비스해 주는데 걸리는 서비스 시간이 된다.

반면에 차량이 작업장 i에 도착했을 때 대기중인 팔렛이 존재하지 않으면 차량은 FEFS 규칙에 따라 즉시 작업장 i+1으로 떠나게 되며, 그 후 몇개의 작업장들을 방문한 후 작업장 i로 되돌아 온다. 작업장 i의 관점에서 보면 이 기간-빈 차량이 작업장 i를 떠난 시점으로부터 다시 작업장 i를 방문하여 선적을 시작할 수 있는 시점까지-이 곧 서버의 휴가시간이 됨을 알 수 있다. 따라서 이들 두 값의 1차, 2차 판성치(moments)만 구할 수 있으면 식(1)을 이용하여 작업장 i에 도착하는 팔렛의 선적전 평균 지체시간을 구할 수 있게 된다.

그러나 이들 판성치의 정확한 값을 구하기는 불가능하며, 다음에 이 값들의 근사치를 얻는 합리적인 방법을 제시하고자 한다. 편의상 앞으로는 팔렛을 싣고 작업장에 도착한 차량의 경우에는 차량이 작업장에 도착한 시점의 정의를 작업장에 도착한 후 팔렛의 하역을 끝마친 시점으로 한다.

모형의 전개를 위해 다음의 기호를 도입한다.

U_{ij} =차량이 작업장 i에 도착한 시점으로부터 처음으로 작업장 j에 도착한 시점까지의 경과시간, r. v.

$$\mu_{ij} = E(U_{ij})$$

$$v_{ij} = E(U_{ij}^2)$$

π_i =차량이 작업장 i에 도착했을 때 작업장 i에 대기중인 팔렛이 존재하지 않을 확률

U_{in} =차량이 작업장 i에 도착했을 때 작업장 i에 대기중인 팔렛이 있다는 조건하에서의 U_{ij} , r. v.

U_{io} =차량이 작업장 j에 도착했을 때 작업장 i에 대기중인 팔렛이 없다는 조건하에서의 U_{ij} , r. v.

τ_{ij} =작업장 j에 도착한 차량이 작업장 i에서 대기중인 팔렛을 선적하기 시작한 시점으로부터 목적지인 작업장 j에 도착하는데까지 걸리는 시간

σ_i =빈 차량이 작업장 i로부터 작업장 i+1까지 가는데 걸리는 시간

서어버 휴가 모형의 관점에서 보면 U_{in} 은 작업장 i의 서비스 시간을 나타내고, U_{io} 은 작업장 i에서 본 서어버의 휴가시간이 된다. 따라서 우리의 목적은 U_{in} 과 U_{io} 의 1차, 2차 관성치를 구하는 것으로 귀착된다. 그러나 이들 값들은 직접 구하기가 힘들고 U_{ij} 의 1차, 2차 관성치로부터 얻어질 수 있으므로 우선 U_{ij} 의 1, 2차 관성치 μ_{ij} 과 v_{ij} 의 값을 구해 보도록 한다.

U_{ij} 를 식으로 표시하기 위해 차량이 작업장 i에 도착했을 때의 서로 다른 2가지 경우에 대해 살펴 보도록 하자. 차량이 작업장 i에 도착했을 때 작업장 i에 대기중인 팔렛이 존재하지 않을 확률은 π_i 이다. 이 경우에 차량은 σ_i 만큼의 시간이 경과한 후 작업장 i+1에 도착하게 되며, 이 차량이 작업장 i+1으로부터 작업장 j까지 가는데 걸리는 시간은 $U_{i+1,j}$ 가 된다(N+1은 1로 간주). 반면에 차량이 작업장 i에 도착했을 때 작업장 i에 대기중인 팔렛이 존재할 확률은 $1-\pi_i$ 이며 작업장 i에서 선적한 팔렛의 목적지가 작업장 k가 될 확률은 P_{ik} 이다. 이 때 작업장 i에서 선적을 시작한 차량이 작업장 k에 도착할 때까지 걸리는 시간은 τ_{ik} 이며 이 차량이 다시 최초로

작업장 j에 도착할 때까지는 U_{kj} 만큼의 시간이 소요된다. 따라서 차량이 작업장 i에 도착했을 때 대기중인 팔렛의 유무에 따라 조건화 하면 U_{ij} 는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$U_{ij} = \begin{cases} \sigma_i + \delta_{i+1,j} U_{i+1,j} \text{ w.p. } \pi_i & i=1, \dots, N \dots (2a) \\ \tau_{ik} + \delta_{kj} U_{kj} \text{ w.p. } (1-\pi_i)P_{ik} & \end{cases}$$

$$i=1, \dots, N, k=1, \dots, N \dots (2b)$$

$$\text{where } \delta_{kj} = \begin{cases} 0 & \text{if } k=j \\ 1 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

식(2)는 정확한 식이 아니고 근사식에 불과하며 그 이유는 다음과 같다.

식 (2a)에서 차량은 팔렛을 실지 않은 상태로 작업장 i+1에 도착하게 되며 그 후 작업장 i+1에서 최초로 작업장 j에 도착하는데 걸리는 시간을 위 식에서는 $U_{i+1,j}$ 로 표시했다. 그러나 이 경우 작업장 i+1에 도착한 차량은 작업장 i로부터 팔렛을 실지 않은 채 작업장 i+1에 도착한 특수한 조건하에서의 차량이다. 이와같이 특수한 조건하에서 작업장 i+1에 도착한 차량은 작업장 i+1에서 대기중인 팔렛이 존재하지 않음을 볼 확률이 일반적으로 π_{i+1} 이 아니며 따라서 식(2a)는 근사식임을 알 수 있다.

식(2b)도 같은 논리로 근사식임이 설명된다. 팔렛을 실고 작업장 i로부터 작업장 k에 도착했다는 특수한 조건하에서의 차량은 도착시 작업장 k에 대기중인 팔렛이 존재하지 않음을 볼 확률이 일반적으로 π_k 가 되지 않는다.

식(2)를 이용하여 U_{ij} 의 기대치(1차 관성치)를 구하면 다음과 같다.

$$\mu_{ij} = \pi_i(\sigma_i + \delta_{i+1,j} \mu_{i+1,j}) + (1-\pi_i) \sum_{k=1}^N P_{ik}(\tau_{ik} + \delta_{kj} \mu_{kj})$$
$$i=1, \dots, N$$
$$j=1, \dots, N$$

..... (3)

일단 π_i 의 값을 알고 있다고 가정하자. 그러면 식(3)은 방정식의 수가 N^2 , 미지수(μ_{ij})의 수가 N^2 인

1차 연립방정식이 되므로 연립방정식을 풀음으로써 μ_{ij} 의 값을 모든 i, j 에 대해 구할 수 있게 된다.

같은 방식으로 식(2)를 이용하여 U_{ij} 의 2차 관성치를 표시하면 다음과 같다.

$$v_{ij} = E(U_{ij}^2) = \pi_i E\{(\sigma_i + \delta_{i+1,j} U_{i+1,j})^2\} + (1 - \pi_i) \sum_{k=1}^N P_{ik} E\{(\tau_{ik} + \delta_{ij} U_{kj})^2\}$$

..... (4)

이 식을 정리하면,

$$v_{ij} = \pi_i (\sigma_i^2 + 2\delta_{i+1,j} \sigma_i \mu_{i+1,j} + \delta_{i+1,j}^2 v_{i+1,j}) + (1 - \pi_i) \sum_{k=1}^N P_{ik} (\tau_{ik}^2 + 2\delta_{ij} \tau_{ik} \mu_{kj} + \delta_{ij}^2 v_{kj})$$

..... (5)

π_i 의 값을 안다는 조건하에서는 식(3)으로부터 μ_{ij} 의 값을 구할 수 있으므로 식(5) 역시 방정식의 수가 N^2 , 미지수(v_{ij})의 수가 N^2 인 1차 연립방정식이 되므로 간단히 v_{ij} 의 값을 구할 수 있다.

일단 μ_{ij}, v_{ij} 의 값이 구해지면 작업장 i 에서의 평균 지체시간 W_i 를 구하기 위해 필요한 $\mu_{i0}, \mu_{i1}, v_{i0}, v_{i1}$ 의 값은 다음 식에 의해서 얻어진다.

$$\mu_{i0} = \sigma_i + \mu_{i+1,i} \text{ (6a)}$$

$$\mu_{i1} = \sum_{k=1}^N P_{ik} (\tau_{ik} + \mu_{ki}) \text{ (6b)}$$

$$v_{i0} = E(\sigma_i + U_{i+1,i})^2 = \sigma_i^2 + 2\sigma_i \mu_{i+1,i} + v_{i+1,i} \text{ (6c)}$$

$$v_{i1} = \sum_{k=1}^N P_{ik} E\{(\tau_{ik} + U_{ki})^2\} = \sum_{k=1}^N P_{ik} (\tau_{ik}^2 + 2\tau_{ik} \mu_{ki} + v_{ki})$$

..... (6d)

식(6) 역시 식(2)와 같은 이유로 정확한 식이 아니고 근사치임을 유의하여야 한다.

위의 절차에 따라 $\mu_{i0}, \mu_{i1}, v_{i0}, v_{i1}$ 의 값이 얻어지면 서어버 휴가모형의 일반식 (1)로부터 작업장 i 에서 선적되기 전 기다리는 팔렛의 평균 대기시간 W_i 는 다음과 같이 구해진다.

$$W_i = \frac{v_{i0}}{2\mu_{i0}} + \frac{\lambda_i v_{i1}}{2(1 - \rho_i)} \text{ where}$$

$$\rho_i = \lambda_i \mu_{i1} \quad i=1, \dots, N \text{ (7)}$$

위 과정을 통해 W_i 의 값이 얻어지면 작업장 i 에서 선적을 위해 대기중인 팔렛의 평균대수 L_i 는 다음과 같이 Little의 공식에 의해 간단히 구해진다.

$$L_i = \lambda_i W_i \quad i=1, \dots, N \text{ (8)}$$

따라서 π_i 의 값만 구할 수 있으면 위에서 기술된 과정에 의해서 모든 작업장에서의 팔렛의 평균 지체시간 W_i 를 구할 수 있게 된다.

본 논문에서 대상으로 하고 있는 시스템은 대기행렬의 관점에서 보면 일종의 개방 시스템(open queueing system)이다. 따라서 시스템의 안정조건만 만족되면 각 작업장에서 단위시간당 팔렛을 선적하는 평균회수(작업장 i 의 throughput)은 팔렛의 도착률 λ_i 와 같게 된다. 차량이 팔렛을 운송하고 있거나 하역/선적하고 있는 시간적 비율을 차량의 이용률(utilization)이라 정의하면 안정상태 하에서의 차량의 이용률은 다음과 같이 구해질 수 있다.

차량이 작업장 i 에 도착한 팔렛의 선적을 시작한 시점으로부터 팔렛을 목적지에 운송하여 하역을 마치는때까지 걸리는 시간의 기대치는 $\sum_{k=1}^N P_{ik} \tau_{ik}$ 이며, 이는 곧 작업장 i 에 도착한 팔렛 1개가 차량을 점유하는 평균 시간이다. 작업장 i 에는 단위 시간당 평균 λ_i 개의 팔렛이 도착하므로 작업장 i 에 도착한 팔렛에 의해 차량이 점유되는 시간적 비율은 $\lambda_i \sum_{k=1}^N P_{ik} \tau_{ik}$ 가 된다. 한대의 차량이 N 개의 작업장을 모두 서비스하게 되므로 차량의 이용률, 즉 팔렛에 의해 차량이 점유되는 시간적 비율, u 는 다음과 같이 닫힌 형태(closed form)로 표시된다.

$$u = \sum_{i=1}^N \lambda_i \sum_{k=1}^N P_{ik} \tau_{ik} \text{ (9)}$$

여태까지 우리는 W_i 를 구하기 위한 근사적 방법을 개발하였다. W_i 를 구하기 위해 개발된 위 방법은 근사적 방법이지만 특별한 조건하에서는 정확한

해를 제공해 준다. 단일 운송을 요하는 팔렛의 목적지가 항상 다음 작업장이고($P_{i,i+1}=1$ for all i) 팔렛의 하역/선적시간을 무시할 수 있으며 팔렛의 선적지나 비선적지나 차량의 운행속도가 동일한 경우에는 위의 방법은 정확한 해(exact solution)를 산출해 준다.

따라서 작업장의 수가 들인 경우에는 팔렛의 운송 목적지가 항상 다음 작업장이므로 $\tau_{12}=\sigma_1$, $\tau_{21}=\sigma_2$ 의 조건만 성립하면 위의 방법은 정확한 해를 산출해 준다. 그러나 작업장의 수가 들인 경우는 위 조건이 성립하지 않는 경우라도 포울링 시스템의 연구결과를 직접 적용하여 정확한 해를 구할 수 있게 된다. 즉, $\sigma_1(\sigma_2)$ 를 스테이션 1(2)에서 2(1)으로의 switch-over time으로 간주하고, $\tau_{12}-\sigma_1$ 을 스테이션 1에서의 서비스 시간으로, $\tau_{21}-\sigma_2$ 를 스테이션 2에서의 서비스 시간으로 간주하면 위 문제는 스테이션의 수가 들인 non-exhaustive 포울링 모형으로 귀착된다. 따라서 Boxma와 Meister[3] 혹은 Eisenberg[8]의 연구결과를 직접 이용하여 정확한 해를 구할 수 있다.

4. π_i 의 값 구하기

앞에서 우리는 π_i 의 값을 구할 수 있다는 전제 하에서 모형을 전개하였다. π_i 의 값은 Bozer와 Srinivasan[4]이 생산율 분석(throughput analysis)을 행하면서 구하였으며, 그 절차를 요약하면 아래와 같다.

U_{11} 은 차량이 작업장 1에 도착한 후 다시 작업장 1에 도착할 때까지의 평균 경과시간이다. 이 기간중 차량이 작업장 j 에 도착하는 평균 회수를 v_j 라 하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$v_j \mu_{11} = \mu_{11} \dots\dots\dots (10)$$

흐름 보존법칙(flow conservation law)로부터 다음 식이 성립되고,

$$\pi_i = 1 - \lambda_i \mu_{11} \dots\dots\dots (11)$$

v_i 는 정의로부터 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$v_i = \sum_{j=1}^N (1 - \pi_j) P_{ji} v_j + \pi_{i-1} v_{i-1} \dots\dots\dots (12)$$

위 식을 정리하면 v_i 에 대한 다음 순환식을 얻는다.

$$v_i = v_{i-1} + \left(\sum_{j=1}^N \lambda_j P_{ji} - \lambda_{i-1} \right) \mu_{11} \dots\dots\dots (13)$$

식(10)과 식(11)로부터 π_i 의 값은 다음과 같이 표시된다.

$$\pi_i = 1 - \lambda_i \frac{\mu_{11}}{v_i} \dots\dots\dots (14)$$

v_i 의 값은 식(12)로부터 구해지므로 μ_{11} 의 값만 구할 수 있으면 π_i 의 값은 구할 수 있게 된다. 따라서 문제는 μ_{11} 을 구하는 것으로 귀결되며 이를 구하는 절차는 다음과 같다. 차량이 작업장 i 에 도착해서 다음 작업장에 도착할 때까지 걸리는 시간의 기대치를 T_i 라 놓으면, T_i 는 다음 식으로 표시되며,

$$T_i = \pi_i \sigma_i + (1 - \pi_i) \sum_{j=1}^N P_{ij} \tau_{ij} \dots\dots\dots (15)$$

T_i 와 v_i 의 정의로부터 μ_{11} 를 구하는 다음 식이 성립된다.

$$\mu_{11} = \sum_{i=1}^N v_i T_i \dots\dots\dots (16)$$

얼마간의 대수적 과정을 거쳐 식 (15), (16)를 정리하면 μ_{11} 의 값은 다음과 같이 닫힌 형태(closed form)로 표시될 수 있고 따라서 π_i 값은 구해진다.

$$\mu_{11} = \frac{\chi}{1 - \alpha - \varphi + \lambda_1 x} \dots\dots\dots (17)$$

$$\text{where } \alpha = \sum_{i=1}^N \lambda_i \sum_{j=1}^N P_{ij} \tau_{ij}$$

$$\chi = \sum_{i=1}^N \sigma_i$$

$$\varphi = \sum_{j=2}^N \left(\sum_{k=1}^N \lambda_k P_{kj} - \lambda_j \right) \sum_{i=j}^N \sigma_i$$

여기서 얻어진 π_i , μ_{11} 의 값은 정확한 값이다. 그러나 이 방법에 의해서는 μ_{11} 의 값은 구해지나, μ_{10}

μ_{ii} 의 값을 얻기 위해 필요한 $\mu_{ij}(i \neq j)$ 의 값은 구해질 수 없으며 2차 관성치인 v_{ij} 의 값 또한 구할 수 없게 된다. 따라서 이 방법은 π_i 의 값을 구하는데만 국한적으로 사용된다.

시스템이 안정되기 위해서는 식(18)의 조건이 모든 작업장에서 만족되어야 하며, 이를 위한 필요조건은 $\alpha + \phi < 1$ 이 된다.

$$\pi_i = 1 - \lambda_i \mu_{ii} > 0 \dots\dots\dots (18)$$

5. 근사적 방법의 성능평가

본 연구에서 개발한 근사적 방법의 일반적인 정확도를 검증하기 위하여, 그리고 어느 경우에 보다 정확한 해가 산출되고 어느 경우에 그렇지 못한지를 조사하기 위하여 많은 문제에 대해 실험을 하여 보았다.

실험에 사용된 문제는 모두 안정조건(stability condition)을 만족하도록 설계되어 졌으며 테이블 1-7은 실험에 사용된 문제들의 일부를 추출하여 실험결과를 정리한 것이다.

이들 테이블에는 시뮬레이션에 의해 얻어진 값들이 실제값과 거의 일치한다고 가정하고 평균 대기시간의 관점에서 시뮬레이션에 의하여 얻어진 결과치와 근사적 방법에 의하여 얻어진 결과치를 비교하고 있다. 시뮬레이션은 Law와 Kelton에 의해 개발된 SIMLIB란 포터블 시뮬레이션 언어(portable simulation language)를 이용하였으며 보다 정확한 결과를 얻기 위하여 프로그램을 배정도(double precision)로 고친 후 사용하였다.

일반적으로 포olling 시스템의 시뮬레이션은 시스템이 안정 상태에 들어서기까지 매우 오랜 시간을 요한다. 따라서 본 연구에서는 각 작업장에서 선적된 팔렛의 갯수가 최소한 10,000개 이상이 될때 까지 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션을 통해 얻고자 하는 통계치는 시스템이 어느 정도 안정국면에 접어든 후부터 수집하기 시작하였다.

시뮬레이션을 수행해 본 결과 차량(AGV)의 이

용율(utilization)이 0.9 이상이 되면 신뢰성 있는 시뮬레이션 결과치를 얻기가 극히 어려운 것으로 판명되었다. 따라서 테이블에 나와 있는 예제는 시뮬레이션의 결과치를 신뢰할 수 있는, 즉 차량의 이용율이 0.9 이하인 경우에만 국한되어 있다.

Table 1-7에는 작업장의 수, 시스템의 균형여부, 차량의 이용율, 팔렛의 선적시와 비선적시의 차량속도의 동일성 여부 등에 따라 분류된 총 28개의 예제를 실험한 결과가 정리되어 있다.

각 테이블에서 근사적 방법에 의해 구해진 해는 App.로 표시되어 있고, 시뮬레이션에 의해 얻어진 해는 Sim.으로 표시되어 있으며 u 는 차량의 이용율을 나타낸다. 또한 E(%)는 시뮬레이션에 의해 구해진 해를 기준으로 하였을 때의 근사적 방법에 의해 구해진 해의 상대적 오차를 표시한다.

Table 1, 2, 3은 각각 작업장의 수가 3개, 4개, 6개이며 각 작업장의 형태가 모든 면에서 균형(symmetric)을 이루고 있는 경우를 나타낸다. 각 Table에는 팔렛의 선적시와 비선적시에 차량의 속도가 동일하고 하역/선적이 무시될 수 있는 경우($\sigma_i = \tau_{i+1}$ 이 만족되는 경우)와 그렇지 않은 경우로 나뉘어져 있으며, 각 경우는 다시 차량의 이용율에 따라 몇개씩의 예가 제시되어 있다. 테이블에서도 나타나 있듯이 균형 시스템의 경우에는 차량의 이용율이 팔렛의 도착율에 비례하며 σ_i 의 값과는 무관함을 알 수 있다. Table 1-3의 모든 예제들은 시스템이 균형을 이루고 있는 경우이므로 각 작업장에서의 팔렛의 평균 대기시간은 모두 동일한 값을 갖게 되며 이 값들을 W_i 로 표시되어 있다.

Table 4와 5는 작업장의 수가 3개이며 차량의 도착율, routing 확률, 차량의 속도 등의 관점에서 각 작업장이 균형을 이루고 있지 않은 비균형 시스템의 경우이다. Table 4는 $\sigma_i = \tau_{i+1}$ 의 조건이 만족되는 경우이고, Table 5는 이 조건이 만족되지 않는 경우로서 각 테이블에는 차량의 이용율에 따라 예제가 각각 2개씩 제시되어 있다. Table 6과 7은 작업장의 수가 4개인 경우로서 Table 6은 $\sigma_i = \tau_{i+1}$

의 조건이 만족되는 경우이고, Table 7은 이 조건이 만족되지 않는 경우이다. Table 4-7의 모든 예제는 비균형 시스템의 경우이므로 각 작업장에서의 팔렛의 평균 대기시간이 각 작업장마다 상이한 값을 갖게 된다.

실험결과 근사적 방법에 의해 구해진 해의 상대적 오차는 대략 10% 이내로 만족할만한 해를 산출해 주었으나, $\sigma_i = \tau_{i, i+1}$ 의 조건이 만족되지 않는 일부 시스템에서는 혼잡한 작업장의 경우에 30%까지의 상대 오차를 보이기도 했다. 그러나 본 연구에서 개발된 근사적 방법은 팔렛의 평균 대기시간을 추정할 수 있는 현존하는 유일한 방법이기 때문에 오차가 다소 큰 경우라도 대략적인 시스템의 수행도 평가치를 구하기 위해 매우 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다.

그외에 실험결과로부터 관측된 중요한 사실을 요약하면 아래와 같다.

(1) 근사적 방법에 의해서 얻어진 해는 거의 모든 경우에 있어서 실제치를 과소평가(실제치보다 작은 값을 산출해 줌)하고 있음이 관측되었다. 이는 w_{ij} 의 값이 실제치 보다 작은 값으로 계산되기 때문인 것으로 보이며, 이 현상은 혼잡도가 높아 지체시간을 크게 하는 작업장에서 특히 두드러지게 나타

난다. 결과적으로 근사적 방법은 각 작업장에서의 지체시간의 차이를 실제보다 줄여주는 효과를 갖는다.

(2) 일반적으로 차량의 이용율이 높아질수록 근사적 방법의 정확도는 떨어지는 것으로 보인다. 차량의 이용율이 0.6 이하에서는 특별한 경우를 제외하고는 매우 정확한 값을 산출해 준다.

(3) 작업장의 수가 많아질수록 근사적 방법의 정확도는 약간씩 떨어지는 것으로 관측된다. Table에서 볼 수 있듯이 작업장의 수가 3개나 4개의 경우에 비해 작업장의 수가 6개인 경우 상대적 오차는 높게 나타난다.

(4) 팔렛의 도착율, routing 확률, 차량의 운행 시간 등의 관점에서 본 시스템 균형 여부는 근사적 방법의 정확도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 오히려 근사적 방법의 정확도는 팔렛의 선적시와 비선적시에 차량의 운행속도가 동일한지의 여부에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 생각된다. 만일 차량의 운행속도가 두 경우에 동일하고 팔렛의 하역/선적시간을 무시할 수 있을 경우, 즉 $\sigma_i = \tau_{i, i+1}$ 의 조건이 성립하는 경우는 그렇지 않은 경우에 비해 근사적 방법의 정확도가 높은 것으로 관측된다.

$N=3$ (Symmetric case)

$$P_{ij} = 1/2 \quad \text{if } i \neq j$$

$$= 0 \quad \text{otherwise}$$

$$\tau_{12} = \tau_{23} = \tau_{31} = 0.1$$

$$\tau_{13} = \tau_{21} = \tau_{32} = 0.2$$

Table 1.

	$\sigma_i = 0.1 (\tau_i = \tau_{i+1})$			$\sigma_i = 0.05 (\sigma_i \neq \tau_{i+1})$		
	$\lambda_i = 1$	$\lambda_i = 1.5$	$\lambda_i = 2$	$\lambda_i = 1$	$\lambda_i = 1.5$	$\lambda_i = 2$
	w_i	w_i	w_i	w_i	w_i	w_i
Sim.	0.319	0.589	2.056	0.191	0.378	1.357
App.	0.315	0.574	2.033	0.178	0.326	1.145
E (%)	1.3	2.6	0.2	7.3	15.9	18.5
u	0.45	0.67	0.90	0.45	0.67	0.90

N=4(Symmetric case)

$$P_{ij} = 1/3 \quad \text{if } i \neq j$$

$$= 0 \quad \text{otherwise}$$

$$\tau_{12} = \tau_{23} = \tau_{34} = \tau_{41} = 0.1$$

$$\tau_{13} = \tau_{24} = \tau_{31} = \tau_{42} = 0.2$$

$$\tau_{14} = \tau_{21} = \tau_{32} = \tau_{43} = 0.3$$

Table 2.

	$\sigma_i = 0.1 (\tau_i = \tau_{i+1})$			$\sigma_i = 0.05 (\sigma_i \neq \tau_{i+1})$		
	$\lambda_i = 0.5$	$\lambda_i = 0.8$	$\lambda_i = 1$	$\lambda_i = 0.5$	$\lambda_i = 0.8$	$\lambda_i = 1$
	W_i	W_i	W_i	W_i	W_i	W_i
Sim.	0.413	0.801	1.579	0.237	0.478	1.010
App.	0.401	0.746	1.457	0.221	0.404	0.773
E (%)	3.0	7.4	8.4	7.2	18.3	30.7
u	0.40	0.64	0.80	0.40	0.64	0.80

N=6(Symmetric case)

$$P_{ij} = 1/5 \quad \text{if } i \neq j$$

$$= 0 \quad \text{otherwise}$$

$$\tau_{12} = \tau_{23} = \tau_{34} = \tau_{45} = \tau_{56} = 0.1$$

$$\tau_{13} = \tau_{24} = \tau_{35} = \tau_{46} = \tau_{51} = 0.2$$

$$\tau_{14} = \tau_{25} = \tau_{36} = \tau_{41} = \tau_{52} = 0.3$$

$$\tau_{15} = \tau_{26} = \tau_{31} = \tau_{42} = \tau_{53} = 0.4$$

$$\tau_{16} = \tau_{21} = \tau_{32} = \tau_{43} = \tau_{54} = 0.5$$

Table 3.

	$\sigma_i = 0.1 (\tau_i = \tau_{i+1})$				$\sigma_i = 0.05 (\sigma_i \neq \tau_{i+1})$			
	$\lambda_i = 0.1$	$\lambda_i = 0.2$	$\lambda_i = 0.3$	$\lambda_i = 0.4$	$\lambda_i = 0.1$	$\lambda_i = 0.2$	$\lambda_i = 0.3$	$\lambda_i = 0.4$
	W_i	W_i	W_i	W_i	W_i	W_i	W_i	W_i
Sim.	0.415	0.608	0.969	1.920	0.221	0.342	0.570	1.140
App.	0.409	0.580	0.893	1.636	0.217	0.313	0.472	0.833
E (%)	1.5	4.8	8.5	17.4	1.8	9.3	20.8	29.1
u	0.18	0.36	0.54	0.72	0.18	0.36	0.54	0.72

N=3(Non-symmetric case)

$$P_{12} = 0.8 \quad P_{13} = 0.2 \quad P_{21} = 0.5 \quad P_{23} = 0.5$$

$$P_{31} = 0.7 \quad P_{32} = 0.3 \quad \tau_{12} = 0.1 \quad \tau_{13} = 0.3$$

$$\tau_{21} = 0.3 \quad \tau_{23} = 0.2 \quad \tau_{31} = 0.1 \quad \tau_{32} = 0.2$$

$$\sigma_1 = 0.1 \quad \sigma_2 = 0.2 \quad \sigma_3 = 0.1 \quad (\sigma_i = \tau_{i+1})$$

Table 4.

	$\lambda_1=0.5 \lambda_2=0.5 \lambda_3=1 \quad \nu=0.33$			$\lambda_1=0.8 \lambda_2=0.8 \lambda_3=1.2 \quad \nu=0.42$		
	W_1	W_2	W_3	W_1	W_2	W_3
Sim.	0.329	0.271	0.439	0.438	0.351	0.676
App.	0.330	0.274	0.440	0.428	0.346	0.646
E (%)	-0.3	-1.1	-0.2	2.3	1.4	4.6

N=3(Non-symmetric case)

$P_{12}=0.8 \quad P_{13}=0.2 \quad P_{21}=0.5 \quad P_{23}=0.5$

$P_{31}=0.7 \quad P_{32}=0.3 \quad \tau_{12}=0.1 \quad \tau_{13}=0.3$

$\tau_{21}=0.3 \quad \tau_{23}=0.2 \quad \tau_{31}=0.1 \quad \tau_{32}=0.2$

$\sigma_1=0.05 \quad \sigma_2=0.15 \quad \sigma_3=0.05 \quad (\sigma_i \neq \tau_{i,i+1})$ Table 5.

	$\lambda_1=0.5 \lambda_2=0.5 \lambda_3=1 \quad \nu=0.33$			$\lambda_1=0.8 \lambda_2=0.8 \lambda_3=1.2 \quad \nu=0.42$		
	W_1	W_2	W_3	W_1	W_2	W_3
Sim.	0.228	0.192	0.272	0.302	0.252	0.403
App.	0.221	0.192	0.271	0.292	0.250	0.387
E (%)	3.2	0.0	3.7	3.4	0.8	4.1

N=4(Non-symmetric case)

$P_{12}=0.4 \quad P_{13}=0.4 \quad P_{14}=0.2 \quad \tau_{12}=0.1 \quad \tau_{13}=0.3 \quad \tau_{14}=0.4$

$P_{21}=0.4 \quad P_{23}=0.4 \quad P_{24}=0.2 \quad \tau_{21}=0.5 \quad \tau_{23}=0.2 \quad \tau_{24}=0.3$

$P_{31}=0.5 \quad P_{32}=0.3 \quad P_{34}=0.2 \quad \tau_{31}=0.3 \quad \tau_{32}=0.4 \quad \tau_{33}=0.1$

$P_{41}=0.4 \quad P_{42}=0.2 \quad P_{43}=0.4 \quad \tau_{41}=0.2 \quad \tau_{42}=0.3 \quad \tau_{43}=0.5$

$\sigma_1=0.1 \quad \sigma_2=0.2 \quad \sigma_3=0.1 \quad \sigma_4=0.2 \quad (\sigma_i = \tau_{i,i+1})$

Table 6.

	$\lambda_1=2/3 \lambda_2=1/3 \lambda_3=2/3 \lambda_4=1/4 \quad \nu=0.55$				$\lambda_1=1 \lambda_2=1/2 \lambda_3=1 \lambda_4=1/3 \quad \nu=0.85$			
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_1	W_2	W_3	W_4
Sim.	0.958	0.830	0.927	1.096	4.951	1.720	4.074	2.649
App.	0.934	0.789	0.901	0.944	4.011	1.736	4.045	2.484
E (%)	2.6	5.2	2.9	16.1	14.5	-0.9	0.7	6.6

N=4(Non-symmetric case)

$P_{12}=0.4 \quad P_{13}=0.4 \quad P_{14}=0.2 \quad \tau_{12}=0.1 \quad \tau_{13}=0.3 \quad \tau_{14}=0.4$

$P_{21}=0.4 \quad P_{23}=0.4 \quad P_{24}=0.2 \quad \tau_{21}=0.5 \quad \tau_{23}=0.2 \quad \tau_{24}=0.3$

$$\begin{aligned}
 P_{31} &= 0.5 & P_{32} &= 0.3 & P_{34} &= 0.2 & \tau_{31} &= 0.3 & \tau_{32} &= 0.4 & \tau_{34} &= 0.1 \\
 P_{41} &= 0.4 & P_{42} &= 0.2 & P_{43} &= 0.4 & \tau_{41} &= 0.2 & \tau_{42} &= 0.3 & \tau_{43} &= 0.5 \\
 \sigma_1 &= 0.05 & \sigma_2 &= 0.15 & \sigma_3 &= 0.05 & \sigma_4 &= 0.15 & (\sigma_i \neq \tau_{i,i+1})
 \end{aligned}$$

Table 7.

	$\lambda_1=2/3 \lambda_2=1/3 \lambda_3=2/3 \lambda_4=1/4 \nu=0.55$				$\lambda_1=1 \lambda_2=1/2 \lambda_3=1 \lambda_4=1/3 \nu=0.85$			
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_1	W_2	W_3	W_4
Sim.	0.683	0.645	0.657	0.731	2.844	1.542	3.075	2.174
App.	0.638	0.565	0.628	0.650	2.328	1.343	2.365	1.776
E (%)	7.1	14.2	4.6	12.5	22.2	14.8	30.0	22.4

6. 결 론

본 연구에서는 자동 공장조직의 한 부분으로써 필수적인 자동 유도 운반차량 시스템의 성능평가를 위한 근사적 방법을 제시하였다. 근사적 방법의 정확도를 검증하기 위하여 시뮬레이션을 통한 실험결과와 비교해 보았으며, 그 결과 전반적으로 만족할만한 해를 산출해 줌을 알 수 있었다.

본 연구는 자동 유도 운반차량 시스템의 확률적 모형으로서 시뮬레이션에 의존하지 않고 분석적 접근방식을 채택하였다는데 연구의 의의가 있으며, 팔렛의 평균 대기시간을 추정할 수 있는 적절한 방법이 존재하지 않는 현 시점에서 이 값을 구할 수 있는 유일한 방법을 개발했다는데 연구의 가치가 있다. 그 외에 본 연구가 가지고 있는 의의는 아래와 같이 요약되어질 수 있다.

첫째, 본 연구는 앞으로 수행되어야 할 보다 현실적이고 복잡한 시스템에 대한 기초 연구로서 이용되어질 수 있다.

둘째, 본 연구는 컴퓨터 근거리 통신망(LAN)을 모형화 하는데 많이 사용되어지는 포올링 시스템과 관련이 있으며 기존의 포올링 모형을 확장한 연구라는데 의의가 있다.

셋째, 본 연구는 자동 유도 운반차량 시스템 뿐만 아니라 순환 고리상에 존재하는 여러 부서의 물자

운반을 한대의 운송차량이 담당하는 일반적인 물자처리 시스템(material handling system)의 성능 분석을 위한 모형으로서도 직접 이용되어질 수 있다.

참고문헌

- [1] Bartholdi, J.-J., III and L.K. Platzman, "Decentralized Control of a Fixed Route Automatic Guided Vehicle System," IIE Transactions, Vol. 21, No. 1, pp.76-81, 1989.
- [2] Beisteiner, F., "Strategies for the Employment of Vehicles in an Automated Guided Transportation System," Proc. of the 2nd Intl. Conf. on Automated Guided Vehicle System, Stuttgart, W. Germany, June 7-9, 1983.
- [3] Boxma, O.J. and B. Meister, "Two Queues with Alternating Services and Switching Times." Rep. OS-R8712, Centre for Mathematics and Computer Science, Amsterdam, 1987.
- [4] Bozer, Y.A. and M.M. Srinivasan, "Tandem Configurations for Automated Guided Vehicle Systems and the Analysis of Single Vehicle Loops," to appear in IIE Transactions.
- [5] Doshi, B., "Queueing Systems with Vaca-

tions—a Survey,” *Queueing Syst.* 1, pp.29-66, 1986.

[6] Egbelu, P.J., “The Use of Non-Simulation Approaches in Estimating Vehicle Requirements in an Automated Guided Vehicle Based Transport System,” *Matl. Flow*, Vol. 4, pp.17-32, 1987.

[7] Egbelu, P.J. and J.M.A. Tanchoco, “Characterization of Automated Guided Vehicle Dispatching Rules,” *Intl. Journal of Production Research*, Vol. 22, No. 3, pp.359-374.

[8] Eisenberg, M., “Two Queues with Changeover Times,” *Operations Research*, Vol. 19, No. 2, pp.386-401, 1971.

[9] Ferguson, M.J. and Aminetzah, “Exact Results for Nonsymmetric Token Ring System,” *IEEE Transactions on Communications*, COM-33, No. 3, pp.223-231, 1985.

[10] Hodgson, T.J., R.E. King, S.K. Monteith, and S.K. Shultz, “Developing Control Rules for an AGV Using Markov Decision Processes,” *Matl. Flow*, Vol. 4, pp.85-96, 1987.

[11] King, R.E. and T.J. Hodgson, and S.K. Monteith, “Extracting Heuristic Control Rules For an AGV’s Using Markov Decision Processes,” *Belgian Jour. of OR, Stat. and Comp. Sci.* Vol. 27, No. 2, pp.3-17, 1987.

[12] Koff, G.A., “Automatic Guided Vehicle Systems: Applications, Controls, and Planning,” *Matl. Flow*, Vol. 4, pp.3-16, 1987.

[13] Leung, L.C., S.K. Khator and D.L. Kimbler, “Assignment of AGVs with Different Vehicle

Types,” *Matl. Flow*, Vol. 4, pp.65-72, 1982.

[14] Maxwell, W.L. and J.A. Muckstadt, “Design of Automatic Guided Vehicle Systems,” *IIE Transactions*, Vol. 14, No. 2, pp.114-124, 1982.

[15] Newton, D., “Simulation Model Helps Determine How Many Automated Guided Vehicles Are Needed,” *Industrial Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp.68-78, 1985.

[16] Stone, H.S. and Fuller, “On the Near Optimality of the Shortest-Latency-Time-First Drum Scheduling Discipline,” *Comm. of the ACM*, Vol. 16, No. 6, pp.352-353, 1973.

[17] Tanchoco, J.M.A., and R.J. Gaskins, “Flow Path Design for Automated Guided Vehicle Systems,” *Intl. Journal of Production Research*, Vol. 25, No. 5, pp.667-676, 1987.

[18] Tanchoco, J.M.A., P.J. Egbelu and F. Taghaboni, “Determination of the Total Number of Vehicles in an AGV-Based Material Transport System,” *Matl. Flow*, Vol. 4, pp.33-51, 1987.

[19] Takagi, H., “Queueing Analysis of Polling Models,” *ACM Computing Surveys*, Vol. 20, No. 1, 1988, pp.5-28.

[20] Takagi, H., “Queueing Analysis of Vacation Models,” *TRL Research Report*, IBM, Tokyo Research Laboratory, Tokyo 1987.

[21] Wysk, R.A., P.J. Egbelu, C. Zhou and B.K. Ghosh, “Use of Spread Analysis for Evaluating AGV Systems,” *Matl. Flow*, Vol. 4, pp.53-64, 1987.