

선입선출법에 입각한 자동 유도 운반차량 시스템의 성능평가

조 면 식*

A Performance Evaluation Model of AGV systems under First-Come-First-Served Rule

Myeon-Sig Cho*

Abstract

We present an approximate analytical model to estimate throughput capacity and expected waiting times for move requests of an Automated Guided Vehicle System(AGVS) used in manufacturing. This analytical model considers an empty vehicle dispatching rule, namely, the First-Come-First-Served(FCFS) rule. The performance of the analytical model is tested extensively through simulation. Using this model one can rapidly evaluate a wide range of handling and layout alternatives for given flow data. Hence, the model would be most effective when used early in the design phase to narrow down the set of alternative handling systems and configurations prior to simulation.

1. 서 론

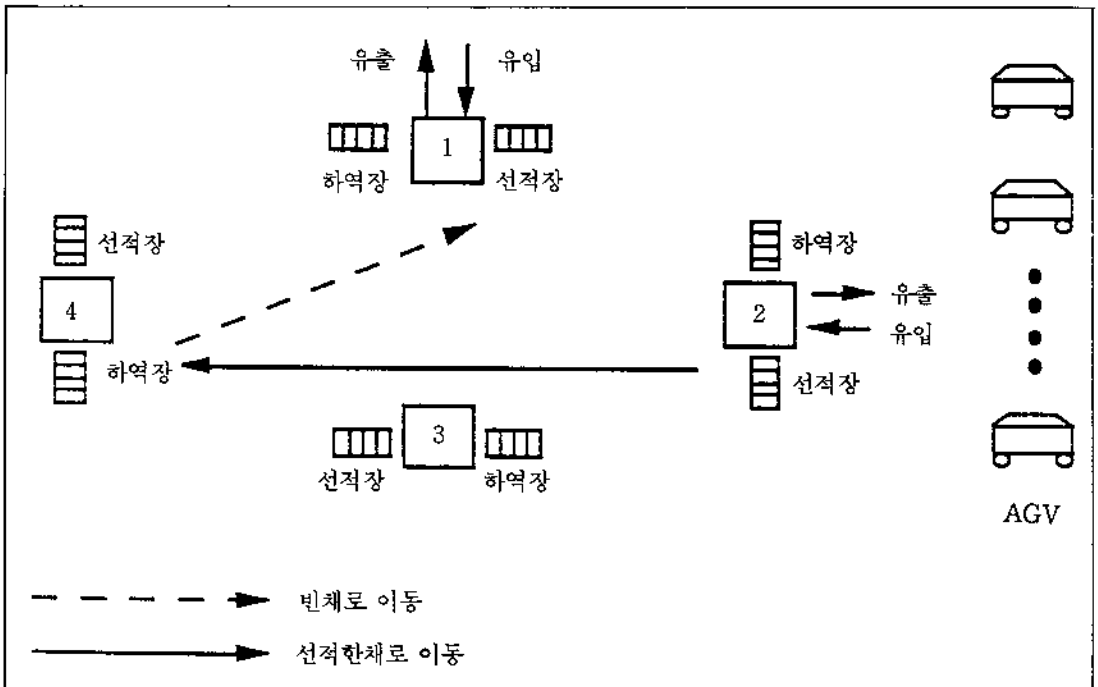
1.1 문제의 설정

본 연구에서는 최근 각광을 받고있는 유연생산체계(Flexible manufacturing System : FMS)의 중요한 구성요소인 자동 유도 운반차 시스템(Automated Guided Vehicle System : AGVS)과 같이 각 차량(AGV)들이 독립적으로, 비동시적으로 자재를 운반하는 시스템의 성능분석에 관한 연구를 시도하고자 한다. AGVS에 관한 연구는 1980년대 초반부터 활발히 수행되어 왔으나, 대부

분의 기존 연구들은 문제의 복잡성 때문에 시스템 분석을 컴퓨터 모의실험(simulation)에 의존해 왔다. 그러나 AGVS의 초기 설계시 고려해야 할 수 많은 대안들을 컴퓨터 모의실험을 통하여 평가하기 위해서는 많은 시간과 경비가 소요되는 단점이 있다. 그러므로 이러한 설계 대안들을 모의실험에 의존하지 않고 단시간내에 평가할 수 있는 분석기법이 필요하게 되었다.

본 연구에서 분석하고자 하는 자동 유도 운반차량 시스템의 간단한 예가 [그림1]에 나타나 있다. 이 시스템은 2개의 입/출고작업장(작업장1, 2)과 2개의 가공작업장(작업장3, 4)으로 구성되어 있으

* 경기대학교 산업공학과



[그림 1] 자동 유도 운반차량 시스템(AGVS).

며, 각 작업장들은 하나의 하역장과 하나의 선적장을 가지고 있다.

자재들은 항상 입/출고작업장의 선적장을 통하여 외부로부터 시스템에 유입되며, 모든 작업이 완료된 자재들은 입/출고작업장의 하역장에 도착하는 즉시 시스템으로부터 유출된다. 즉 입/출고작업장에서는 어떠한 형태의 가공작업도 수행하지 않는다.

AGV는 입/출고작업장의 선적장에서 대기하고 있는 자재들 중에서 대기시간이 가장 긴 자재를 선적하여 목적지의 하역장까지 운반한다. 이와 같이 자재를 싣고 운행하는 AGV를 선적된 AGV라 한다. 목적지에 도착하여 자재를 하역한 후 AGV는 빈 상태가 되므로 시스템내에 있는 다른 자재들을 운반할 수 있게 된다. (즉 AGV는 동시에 두 개 이상의 자재를 선적할 수 없다.) 이 때 시스템내에 운반할 자재가 없다면, 즉 모든 선적장들이 비어있다면, AGV는 현 위치에서 운반할 자재가 발생할 때까지 정지한다. 한편 운반해야 할 자재들이 있을

경우에는 대기시간이 가장 오래된 자재가 있는 선적장으로 AGV는 빈체로 이동하게 된다. 이와 같이 자재를 싣지 않고 이동하는 AGV를 빈 AGV라 한다. AGV는 가장 오래된 자재부터 운반하므로 빈 AGV에 적용되는 급송 규칙(dispatching rule)은 선입선출법(First-Come-First-Served: FCFS)이다. 빈 AGV가 목적지의 선적장에 도착하여 가장 오래된 자재를 선적한 후, 선적된 자재의 목적지까지 운반을 하게 된다.

가공작업장에서 가공이 끝난 자재는 즉시 그 작업장의 선적장으로 이동되어 AGV를 기다리게 된다. 이 경우 여러 대의 AGV가 정지상태에 있다면 이들 중 하나의 AGV가 이 자재를 운반하기 위하여 빈체로 이동하게 된다.

가공이 끝난 작업장은 선입선출 원칙에 따라 해당된 하역장에서 가장 오래 기다린 자재를 가공하기 시작한다. 한편 해당되는 하역장에 대기하는 자재가 없는 경우에는 새로운 자재가 이 작업장에 도착할 때까지 정지상태가 된다.

1.2 연구 목적

자동 유도 운반차량 시스템을 설계하기 위해서는, 설계자는 각 작업장간의 자재 흐름의 양을 파악한 후 작업장들을 배치하고 AGV의 통로를 결정해야 한다. 이후 설계자는 AGV의 사양 즉 속도, 선적/하역 시간 등을 선정하여, 요구되어지는 생산율(throughput)을 원활히 처리하기 위한 AGV의 최소 필요 댓수를 결정해야 한다. (생산율은 주어진 시간동안에 운반해야 할 자재의 양이다.) 또한 필요한 AGV의 댓수를 결정한 후 자재가 선적장에 머무르는 평균 시간을 산정한다면, 선적장에 대기하고 있는 자재의 평균 갯수 즉 재공품의 숫자를 파악할 수 있다.

대부분의 기존 연구들은 이러한 시스템의 수행도 평가치(performance measure) 즉 AGV의 댓수와 선적장에서의 대기시간을 컴퓨터 모의실험에 의해 얻었으나, 본 연구에서는 자동 유도 운반차량 시스템을 확률적 모형(stochastic model)으로 수립하여 이러한 수행도 평가치를 구하고자 한다. 확률적 모형을 개발하기 위하여 본 연구에서는 각 작업장간의 흐름량, 작업장들의 배치, AGV의 사양은 결정되어 있다고 가정한다.

요구되어진 생산율을 만족시키는 AGV의 최소 댓수를 구하는 문제는 각 AGV의 이용율(utilization)이 1보다 적게되는 AGV의 최소 댓수를 구하는 문제와 동일하다. AGV의 이용율은 AGV가 자재를 선적한 채로 혹은 빈채로 이동하게 되므로, 선적 이용율(loaded utilization)과 빈 이용율(empty utilization)의 합으로 표시할 수 있다.

선적 이용율은 각 작업장간의 흐름량, 작업장들의 배치, AGV의 운행통로 및 속도가 주어질 경우 쉽게 구할 수 있다. 그러나 빈 이용율은 AGV가 자재를 하역한 후 여러 개의 자재가 선적되기를 기다리는 상태에 있다면, 이 중 어떤 자재를 먼저 선적할 것인가에 따라 빈채로 이동하는 거리가 영향

을 받으므로, 빈 이용율은 AGV의 급송규칙에 영향을 받는다. (본 연구에서 사용되는 빈 AGV의 급송 규칙은 앞에서 소개한 선입선출법이다.)

한편 자재가 선적장에 도착했을 때 여러 대의 AGV가 정지상태에 있다면 그 중 한 대의 AGV를 호출하여, 호출된 AGV는 현재의 위치로부터 자재가 도착한 선적장으로 빈채로 이동하게 된다. 이와 같이 빈채로 이동하는 시간 역시 빈 이용율에 영향을 미친다. 그러나 생산율을 만족하기 위한 최소 댓수만 있을 경우에는 여러 대의 AGV가 동시에 정지상태에 있을 확률은 상대적으로 적으므로 앞에서 언급한 빈채로 이동하는 시간보다 빈 이용율에 대한 영향력은 상대적으로 적다. (AGV가 빈채로 이동하는 것은 비생산적 활동이지만 자재 운반시에 완전히 제거할 수 없는 활동이다.)

2. 관련된 기존 연구

자동 유도 운반차량 시스템에 관한 대부분의 기존 연구들은 필요한 차량댓수 결정, 차량의 통행 경로 결정, 선적/하역장의 위치 결정등과 같이 설계시 고려해야 할 요소들에 관한 연구와 설계후 AGV의 급송규칙들에 관한 수행도 평가 연구, 즉 시스템의 운용에 관한 연구로 분류할 수 있다.

작업장의 배치와 각 작업장간에 운반해야 할 자재 운반량이 결정된 상황에서 Maxwell과 Muckstadt[13]는 주어진 생산율을 만족시키기 위한 AGV의 최소 댓수를 확정적 모형(deterministic model)을 이용하여 구했으며, 또한 각 작업장의 하역장과 선적장을 배치하는데 유용한 지침을 제시하였다. Leung 등[11]은 Maxwell과 Muckstadt의 모형을 다른 종류의 AGV가 사용될 경우로 확장하였다.

Egbelu[5]는 작업장의 배치와 각 작업장간에 운반해야 할 자재 운반량이 주어진 상황에서 필요한 AGV의 댓수를 구하기 위하여 빈 AGV의 급송규

칙을 고려하지 않은 4개의 간단한 모형을 제시하였다. 이 모형들의 수행도를 Egbelu와 Tanchoco [6]에 사용된 급송규칙들을 사용하여 평가한 결과 이들 모형들의 성능은 급송규칙에 의해 영향을 받는다는 것이 실험적으로 입증되었다.

Tanchoco 등[16]과 Wysk 등[19]은 주어진 상황에서 필요한 AGV의 댓수를 구하기 위해 Solberg[15]가 개발한 CAN-Q를 사용했으며, Yao와 Buzacott[20,21,22]는 FMS를 분석하기 위해 자재운반 시스템을 중앙 서버(central server)로 간주하여 FMS를 대기행렬 네트워크(network of queues)로 모델링하였다. CAN-Q나 중앙 서버 모델은 자재운반 시스템을 하나의 서버로 모형화하였기 때문에, 각 작업장간의 운반 시간은 항상 동일하며, 작업장 i 에서 선적한 자재나 작업장 j 에서 선적한 자재나 목적지는 확률적으로 항상 같다. 즉 작업장 i 에서 선적한 자재가 작업장 i 로 운반될 수도 있다는 불합리한 점이 존재한다. 또한 AGV의 급송규칙을 간과하였기 때문에 자재운반 시스템의 수행도를 명확히 평가하기 어려운 단점이 있다.

Toro-Ramos와 McGinnis[17,18]는 micro load 자동창고 시스템(Automated Storage/Retrieval System : AS/RS)에서 선적장과 하역장의 저장용량이 정해져 있다는 가정하에 하나의 저장/불출 기계(S/R machine)가 자재를 운반하기 위한 평균 시간 및 자재의 평균 대기시간을 구하였다. 이러한 수행도 평가치를 구하기 위해 저장/불출 기계를 중앙 서버로 모델링하였으며, 또한 저장/불출 기계의 급송규칙을 고려하지 않았으므로 위에서 언급한 것과 같은 문제점이 있다.

Bozer와 Srinivasan[2]은 자재운반 시스템을 여러 개의 겹치지 않는 루우프(loop)로 분할하여, 각 루우프에 한 대의 AGV를 할당함으로써, AGV의 통제를 용이하게 할 수 있는 Tandem AGVS를 제안하였다. 각 루우프내에서의 AGV의 급송규칙은 Bartholdi와 Platzman[1]이 제안한 FEFS(First-Encountered-First-Served : FEFS)을 사

용하였으며, 안정상태에 도달하기 위한 조건과 생산율분석을 수행하였다. 이효성과 조면식[10]은 이러한 시스템에서 자재의 도착이 Poisson 과정일 경우에 자재의 평균 대기시간을 근사적으로 구하였다.

Chow[3]는 micro load 자동창고(AS/RS)에서의 저장/불출 기계의 이용율과 자재가 선적장에서 기다리는 평균 대기시간을 M/G/1/FCFS로 모델링하여 근사적으로 구하였다. 그러나 저장/불출 기계의 서비스 시간을 근사적으로 구한 후, 각 자재의 운반시간은 자재의 현재 위치, 운반되어야 할 장소, 저장/불출 기계의 위치 등에 관계없이 동일하다고 가정하였다. Chow[4]는 micro load 자동창고에서, 선입선출법(FCFS)이외의 급송규칙에 관한 수행도 평가를 컴퓨터 모의실험에 의해 수행하였다.

Egbelu와 Tanchoco[6]는 여러 대의 AGV가 있는 경우에 빈 AGV에 대한 급송규칙의 수행도를 모의실험에 의해 평가하였다. Russell과 Tanchoco[14]는 한 대의 AGV가 있는 경우에 급송규칙의 수행도를 역시 모의실험에 의해 평가하였다. Hodgson 등[7]은 한 대의 AGV가 있는 경우에 하나의 급송규칙을 제안 평가하였으며, Hodgson 등이 제안한 급송규칙을 King 등[8]은 두 대의 AGV가 있는 경우로 확장 평가하였다. 이러한 연구중에서 Bartholdi와 Platzman를 제외한 나머지 연구들에서는 모두 모의실험에 의하여 급송규칙의 성능을 비교 평가하였다.

3. 모형의 개발

3.1 모형의 가정 및 기호

본 논문에서 유도하고자하는 AGV의 평균 이용율과 각 선적장에서 자재의 평균대기시간을 구하기 위한 모형을 개발하기 위해 다음과 같은 가정과 기호를 사용한다.

가 정

- 가) 한 대의 AGV가 모든 자재를 운반한다.
- 나) 각 선적장에 도착하는 자재는 Poisson 과정을 따르며 독립적이다.
- 다) 각 하역장과 선적장의 크기는 무한하므로 blocking은 발생하지 않는다.
- 라) 각 하역장과 선적장의 위치, AGV의 사양 및 이동통로는 결정되어 있다.
- 마) 각 작업장의 선적장과 하역장의 거리는 무시할 수 있다.

기 호

- N=입/출고작업장의 수,
- M=입/출고작업장을 포함한 모든 작업장의 수,
- λ_i =선적장 i에 도착하는 자재의 도착율,
- A_T =자재 도착율의 합 = $\sum_{i=1}^M \lambda_i$,
- P_{ij} =선적장 i에서 선적된 자재가 하역장 j로 운반될 확률,
- τ_{ij} =선적장 i에서 하역장 j까지 자재를 선적한 채 이동하는 시간과 선적/하역 작업에 필요한 시간의 합,
- σ_{ij} =하역장 i에서 선적장 j까지 AGV가 빈채로 이동하는 시간,
- α_i =선적한채로 이동하기 위해 소요되는 AGV의 평균 이용율,
- α_e =빈채로 이동하기 위해 소요되는 AGV의 평균 이용율,
- ρ =AGV의 평균 이용율 = $\alpha_i + \alpha_e$.

주어진 상황하에서, 즉 N, M, P_{ij} , τ_{ij} , σ_{ij} , $i, j=1, \dots, M$ 과 $\lambda_i, i=1, \dots, N$ 을 알고 있을 때, 각 가공 작업장에 대한 $\lambda_i, i=N+1, \dots, M$ 의 값은 흐름보존의 법칙(flow conservation law)에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^M \lambda_j P_{ji}, \quad i=N+1, \dots, M. \dots \dots \dots (1)$$

또한 α_i 는

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \lambda_k P_{kj} \tau_{ij} \dots \dots \dots (2)$$

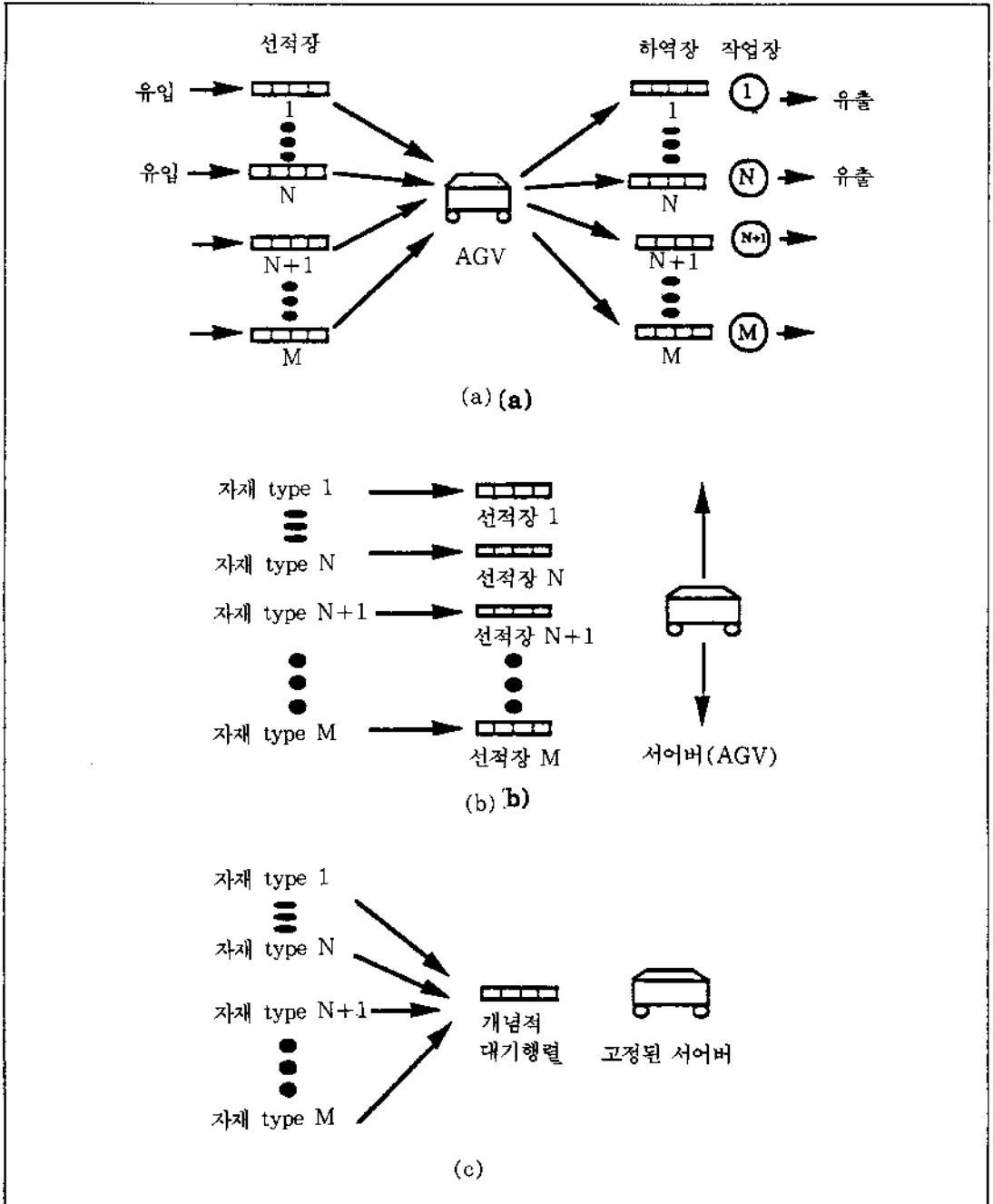
로 부터 쉽게 구할 수 있다. 즉 AGV의 평균 이용율(ρ)을 구하기 위해서는 α_e 만을 구하면 된다.

3.2 모형 개발

자동 유도 운반차량 시스템은 자재를 운반하는 AGV와 입/출고작업장 혹은 가공작업장 같은 작업장이라는 두 종류의 서어버로 구성되어 있다. [그림2.a]에 나타나 있는 것처럼 AGV는 각 작업장의 선적장에서 자재를 선적하여, 선적된 자재의 목적지의 하역장까지 운반을 한다. 한편 가공 작업장에서 가공이 완료된 자재는 이 작업장의 선적장에 즉시 저장되며, 외부에서 유입되는 자재는 입/출고작업장의 선적장에 도착을 하며, 입/출고 작업장의 하역장에 도착하는 자재는 외부로 유출된다.

자재운반 시스템의 수행도 평가에 관한 연구가 본 논문의 목적이므로, [그림2.a]는 한 대의 AGV가 여러 선적장을 서비스하는 [그림2.b]로 국한시킬 수 있다. 작업장 i의 선적장에 도착하는 자재를 자재 type i로 표시한다면, [그림2.b]는 AGV가 고정되어있고 하나의 개념적인 대기행렬이 고정된 서어버(AGV)의 앞에 형성이 되어있는 [그림2.c]와 같은 시스템으로 변형할 수 있다.

[그림2.c]에서는 모든 자재들의 type이 다름에도 불구하고 모든 자재들은 하나의 개념적인 대기행렬에 저장되며, 저장된 자재는 선입선출법에 의해 서비스 된다. 결과적으로 [그림2.c]와 같은 시스템은 여러 종류의 자재 type을 서비스하는 M/G/1/FCFS 대기행렬로 모형화할 수 있다. 그러나 각 자재들의 서비스 시간은 앞에서 서비스된 자재의 type에 영향을 받으므로 일반적인 M/G/1/FCFS 대기행렬과는 다르다.



[그림2] AGVS를 단일 서버 모델로의 변환.

AGV의 평균 이용률

자재 type i 의 서비스 시간은 AGV가 현재 위치하고 있는 장소로부터 빈채로 선적장 i 까지 이동하

는 시간과, 자재를 선적한 후 목적지까지 이동하여 하역할 때까지의 시간의 합으로 정의된다. 서비스 시간의 1차, 2차 관성치를 구하면 AGV의 평균 이용률과 각 선적장에서의 대기시간을 구할 수 있

다. 이러한 관성치들을 구하기 위해서는 빈채로 이동하는 시간과 선적하여 이동하는 시간의 1차, 2차 관성치를 구해야 한다. 각 선적장에 도착하는 자재들의 도착과정은 독립이기 때문에 빈채로 이동하는 시간과 선적하여 이동하는 시간은 독립이다.

선적장 i 까지 빈채로 이동하는 시간은 현재 AGV가 위치하고 있는 장소에 영향을 받으며, AGV의 현위치는 바로 전에 운반된 자재의 type에 영향을 받는다는 사실로부터 빈채로 이동하는 시간의 1차, 2차 관성치들은 다음과 같이 구할 수 있다.

E_{ij} 를 바로 전에 운반된 자재 type이 j 인 경우에 선적장 i 까지 AGV가 빈채로 이동하는 조건부 평균시간이라면, 자재 type j 의 목적지가 k 일 확률은 P_{jk} 이므로 E_{ij} 는 다음과 같다.

$$E_{ij} = \sum_{k=1}^M P_{jk} \sigma_{ki} \dots \dots \dots (3)$$

그러므로 AGV가 선적장 i 까지 빈채로 이동하는 평균시간, 즉 빈채로 이동하는 시간의 1차 관성치를 E_i 라 하면

$$E_i = \sum_{j=1}^M E_{ij} P(\text{자재 type } i \text{ 전에 자재 type } j \text{ 가 개}$$

념적 대기행렬에 도착), \dots \dots \dots (4)

로 표시된다. 여기서 자재 type i 전에 자재 type j 가 개념적 대기행렬에 도착할 확률은, 모든 선적장에 도착하는 자재들의 도착과정이 Poisson과정을 따르고 또한 독립이므로, λ_i / A_T 로 주어진다. 즉 식 (4)는

$$E_i = \sum_{j=1}^M E_{ij} \frac{\lambda_j}{A_T} = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M P_{jk} \sigma_{ki} \frac{\lambda_j}{A_T}, \dots \dots \dots (5)$$

로 표시된다.

위와 비슷한 방법으로, AGV가 선적장 i 까지 빈채로 이동하는 시간의 2차 관성치 $E_i^{(2)}$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$E_i^{(2)} = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M P_{jk} \sigma_{ki}^{(2)} \frac{\lambda_j}{A_T} \dots \dots \dots (6)$$

여기서 $\sigma_{ki}^{(2)}$ 는 AGV가 하역장 k 로 부터 선적장 i 까지 빈채로 이동하는 시간의 2차 관성치이다.

또한 AGV가 선적장 i 에서 선적을한 후 이 자재의 목적지까지 이동하는 시간의 1차, 2차 관성치를 각각 $L_i, L_i^{(2)}$ 로 정의하면, 이들은 다음과 같이 구해진다.

$$L_i = \sum_{j=1}^M P_{ij} \tau_{ij}, \dots \dots \dots (7)$$

$$L_i^{(2)} = \sum_{j=1}^M P_{ij} \tau_{ij}^{(2)}, \dots \dots \dots (8)$$

여기서 $\tau_{ij}^{(2)}$ 는 선적장 i 로부터 하역장 j 까지 선적한 채 이동하는 시간의 2차 관성치이다.

위에서 자재 type i 의 서비스 시간은 선적장 i 까지 빈채로 이동하는 시간과 선적장 i 로 부터 선적하여 목적지까지 이동하는 시간의 합이고, 또한 이들 시간들은 독립이므로, S_i 와 $S_i^{(2)}$ 를 자재 type i 의 서비스 시간의 1차, 2차 관성치라 하면 이들은 다음과 같이 구해진다.

$$S_i = E_i + L_i$$

$$= \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M P_{jk} \sigma_{ki} \frac{\lambda_j}{A_T} + \sum_{j=1}^M P_{ij} \tau_{ij}, \dots \dots \dots (9)$$

$$S_i^{(2)} = E_i^{(2)} + L_i^{(2)} + 2E_i L_i$$

$$= \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M P_{jk} \sigma_{ki}^{(2)} \frac{\lambda_j}{A_T} + \sum_{j=1}^M P_{ij} \tau_{ij}^{(2)} + 2 \left(\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M P_{jk} \sigma_{ki} \frac{\lambda_j}{A_T} \right) \left(\sum_{j=1}^M P_{ij} \tau_{ij} \right) \dots \dots \dots (10)$$

그러므로 AGV의 평균 이용률은 다음과 같이 구해진다.

$$\rho = \sum_{i=1}^M \lambda_i S_i \dots \dots \dots (11)$$

AGV의 평균 이용율은 α_r 와 α_e 의 합이고 α_r 는 식(2)에서 구하였으므로, α_e 는 $\rho - \alpha_r$ 이다. 앞에서 언급한 것처럼 ρ 가 1보다 적다면, AGV는 주어진 생산율을 만족시킬 수 있다.

선적장에서 자재의 평균 대기시간

자재가 선적장에 도착하는 과정이 Poisson과정이므로, 자재의 평균 대기시간을 구하기 위해서는 Kleinrock[9]에서 처럼 선적장 i 에 도착하는 자재

의 관점에서 본 평균 대기시간을 구하면 된다. 일단 자재가 선적장 i에서 대기하는 시간을, 자재가 선적장 i에 도착한 시점으로부터 AGV가 이 자재를 서비스하기 위해 현재 AGV가 위치하고 있는 장소로부터 빈채로 선적장 i를 향하여 출발한 시점까지의 경과한 시간이라고 가정한다.

선적장 i에 새로이 도착하는 자재를 표식된 (tagged) 자재라 하면, 표식된 자재의 선적장 혹은 개념적인 대기행렬에서의 대기시간은 현재 서비스를 받고있는 자재에 대한 서비스를 마무리하기 위해 기다리는 대기시간과 개념적 대기행렬에서 대기하고 있는, 즉 표식된 자재보다 먼저 도착한, 자재들을 서비스하기 위해 대기하는 시간의 합이다. 이러한 대기시간들의 평균치들을 각각 WO_i, WO_i'' 으로 정의하면, 선적장 i에 도착하는 자재의 평균 대기시간 WO_i 는 WO_i' 과 WO_i'' 의 합이다.

표식된 자재가 도착하는 순간의 AGV의 상태와 서비스를 받고 있는 자재의 type에 대한 조건부 기대값을 이용하여 WO 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$WO_i' = \rho \sum_{j=1}^M \frac{\rho_j}{\rho} \frac{S_j^{(2)}}{2S_j} + (1-\rho)(0) = \sum_{j=1}^M \frac{\lambda_j S_j^{(2)}}{2} \dots\dots\dots(12)$$

여기서 $\rho_j = \lambda_j S_j$ 는 자재 type j를 위한 AGV의 평균 이용율이며, ρ_j/ρ 는 표식된 자재가 도착한 순간, AGV가 이동중이라는 사실을 알 때 이 AGV가 자재 type i를 서비스하고 있을 확률이다.

또한 표식된 자재가 도착한 순간에 개념적 대기행렬에서 기다리고 있는 자재들을 먼저 서비스하기 위해 대기하는 시간의 평균값 WO_i'' 은, 개념적 대기행렬에 각 type의 자재가 몇 개씩 있는지를 안다면 다음과 같이 구할 수 있다. 즉 표식된 자재에 의해 발견된 개념적 대기행렬에 있는 자재 type j의 평균갯수를 Q_j 라 한다면,

$$WO_i'' = \sum_{j=1}^M S_j Q_j, \dots\dots\dots(13)$$

이다. Little의 법칙에 의해 $Q_j = \lambda_j WO_j$ 이므로, 식

(13)은

$$WO_i'' = \sum_{j=1}^M S_j \lambda_j WO_j, \dots\dots\dots(14)$$

이 된다.

그러므로 선적장 i에 도착하는 자재의 평균 대기시간 WO_i'' 는 다음과 같다.

$$WO_i = WO_i' + WO_i'' = \sum_{j=1}^M \frac{\lambda_j S_j^{(2)}}{2} + \sum_{j=1}^M S_j \lambda_j WO_j, i=1, \dots, M. \dots\dots\dots(15)$$

식(15)로부터 평균 대기시간은 자재의 type에 영향을 받지 않는다는 사실을 알 수 있으므로, WO_i 는 다음과 같다.

$$WO_i = \frac{\sum_{j=1}^M \frac{\lambda_j S_j^{(2)}}{2}}{1 - \sum_{j=1}^M S_j \lambda_j} = \frac{\sum_{j=1}^M \frac{\lambda_j S_j^{(2)}}{2}}{1 - \rho}, i=1, \dots, M. \dots\dots\dots(16)$$

식(16)는 Kleinrock의 보존의 법칙을 만족한다.

위에서 평균 대기시간을 구하기 위해, 선적장에서의 대기시간은 자재가 선적장에 도착한 순간부터 AGV가 이 자재를 서비스하기 위해 빈채로 출발한 순간까지로 정의하였다. 그러나 표식된 자재의 실질적인 대기시간은 빈 AGV가 선적장 i에 도착한 순간까지이므로, 자재 type i의 실제 평균 대기시간 TW_i 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$TW_i = WO_i + E_i = \frac{\sum_{j=1}^M \frac{\lambda_j S_j^{(2)}}{2}}{1 - \rho} + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M P_k \sigma_{ki} \frac{\lambda_i}{\Lambda_T}, i=1, \dots, M \dots\dots\dots(17)$$

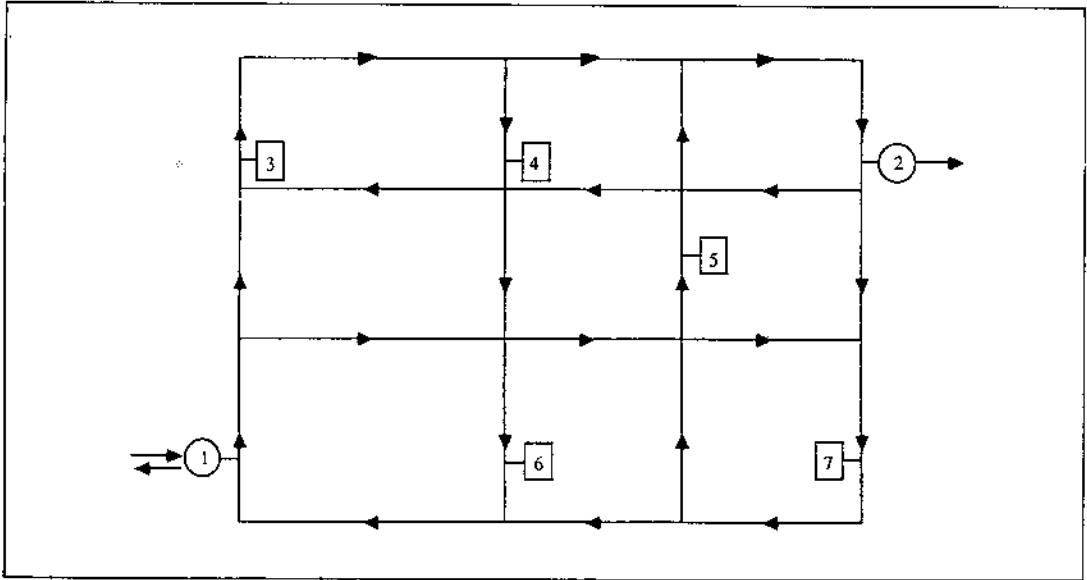
4. 모형의 성능평가

4.1 예제 설명

본 연구에서 개발한 근사적 방법의 정확도를 평가하기 위해 다음과 같은 세 개의 문제(P1, P2,

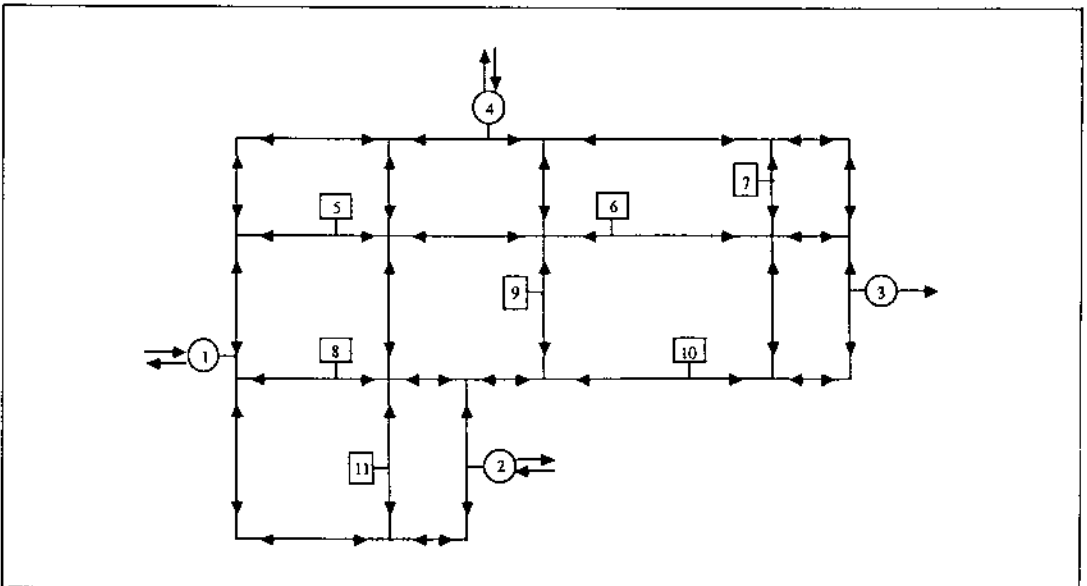
P3)들을 이용하여 모의실험을 수행하였다. 각 문제에서의 작업장의 배치도는 [그림3-5]에 나타나 있다. 문제 P1, P2, P3에서의 AGV의 속도는 빈채로 이동하거나 선적한채로 이동하거나 동일하며, 각 문제에서의 AGV 속도는 각각 분당 15m, 60m, 240m이며, 선적 혹은 하역 시간은 각각 1/3

분 1/12분, 1/24분이다. P1과 P3에서는 AGV가 한 방향으로만 이동하나, P2에서는 AGV가 양 방향으로 이동할 수 있다. 또한 선적한채로 혹은 빈채로 이동하는 AGV는 항상 가장 짧은 길을 택하여 이동한다.(한 작업장의 선적장과 하역장간의 거리는 무시할만큼 짧다고 가정하였다.)



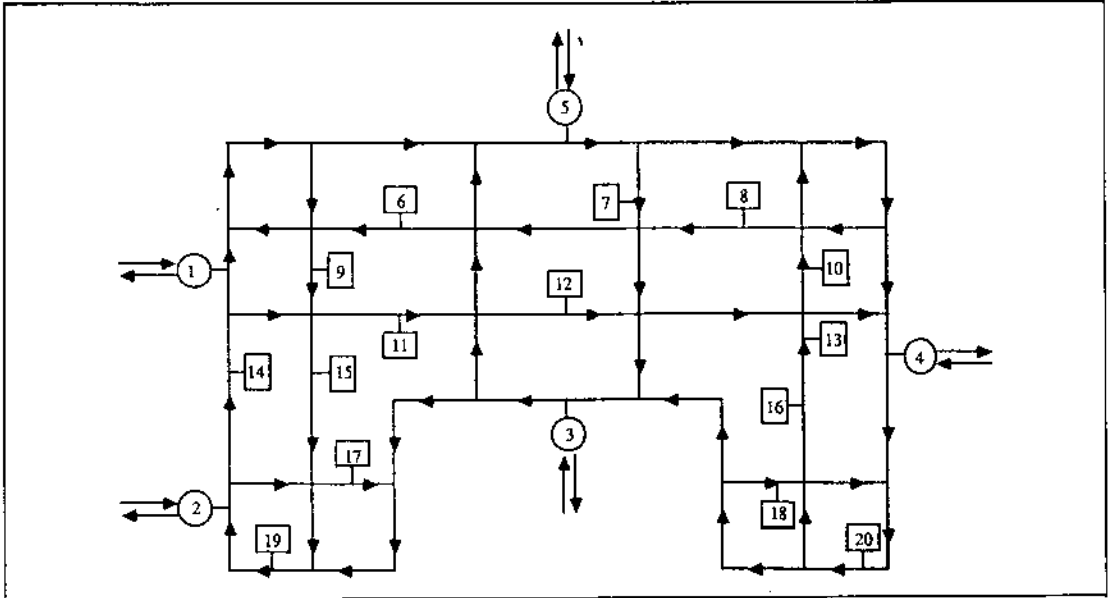
[그림3] 문제 P1에서의 작업장의 배치도.

□ : 가공작업장
○ : 입/출고작업장



[그림 4] 문제 P2에서의 작업장의 배치도

□ : 가공작업장
○ : 입/출고작업장



[그림 5] 문제 P3에서의 작업장의 배치도.

□ : 가공작업장
○ : 입/출고작업장

문제 P1은 2개의 입/출고작업장과 5개의 가공작업장으로 구성되어 있으며, 입/출고작업장 2는 외부로부터 자재를 받아들이지 못한다. 작업장간의 routing과 거리에 관한 데이터는 <표1>과 <표2>에 나타나 있으며, 외부로부터 입/출고작업장 1에 도착하는 자재는 평균 도착간격이 30분인 지수분포를 따르며, 빈채로 혹은 선적한채로 이동하는 시간은 확정적이다.

/출고작업장 1, 2, 4에 도착하는 자재는 평균 도착간격이 각각 7, 14, 21분인 지수분포를 따르며, AGV가 빈채로 이동하는 시간은 변동계수 (coefficient of variation)가 0.4인 구형분포 (uniform distribution)이다. 선적한채로 이동하는 시간은 확정적인 선적/하역 시간을 빈채로 이동하는 시간에 합하여 구하였다.

<표1> 문제 P1에서의 자재의 routing.

작업장	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.7	0.0
5	0.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.4	0.0
6	0.2	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.3
7	0.0	0.3	0.1	0.6	0.0	0.0	0.0

<표2> 문제 P1에서의 각 작업장간의 거리 (m).

작업장	1	2	3	4	5	6	7
1	0	62	16	42	36	28	48
2	58	0	38	64	44	36	16
3	64	46	0	26	50	42	62
4	38	50	18	0	24	16	36
5	50	26	30	56	0	28	42
6	22	84	38	64	58	0	70
7	42	54	58	84	28	56	0

문제 P2는 4개의 입/출고작업장과 7개의 가공작업장으로 구성되어 있으며, P1과 유사한 데이터가 <표3>과 <표4>에 나타나 있다. 외부로부터 입

〈표3〉 문제 P2에서의 자재의 routing.

작업장	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.2	0.2	0.0	0.2
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
5	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
6	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	0.2	0.2	0.0
7	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.2	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1
8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	0.1
9	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0
10	0.0	0.2	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2
11	0.2	0.0	0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0

〈표 4〉 문제 P2에서의 각 작업장간의 거리(m)

작업장	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	22	47	30	14	32	46	8	27	31	17
2	22	0	36	29	23	24	38	14	16	20	14
3	47	36	0	33	37	19	12	39	27	16	41
4	30	29	33	0	16	14	21	25	13	28	27
5	14	23	37	16	0	18	32	16	17	32	18
6	32	24	19	14	18	0	14	27	8	23	29
7	46	38	12	21	32	14	0	41	22	18	43
8	8	14	39	25	16	27	41	0	19	23	9
9	27	16	27	13	17	8	22	19	0	15	21
10	31	20	16	28	32	23	18	23	15	0	25
11	17	14	41	27	18	29	43	9	21	25	0

문제 P3는 5개의 입/출고작업장과 15개의 가공 작업장으로 구성되어 있으며, P1과 유사한 데이터가 〈표5〉와 〈표6〉에 나타나 있다. 외부로부터 입/출고작업장 1, 2, 3, 4, 5에 도착하는 자재는 평균 도착간격이 각각 5, 10, 15, 20, 25분인 지수 분포를 따르며, 빈체로 혹은 선적한체로 이동하는 시간은 확정적이다.

문제 P1-P3에서, 모든 가공작업장의 가공시간은 지수분포를 따르며, 작업장에서의 평균 가공시간은 각 가공작업장의 이용율이 0.75가 되도록 정하였다. 〈표7〉은 이러한 평균 가공시간을 나타내고 있다.

컴퓨터 모의실험은 Law와 Kelton[12]이 개발한 SIMLIB를 사용하였으며, 초기단계에 시스템이

비어 있고 AGV가 입/출고작업장에 대기하고 있다는 가정하에 하나의 긴 모의실험을 수행하였다. 안정상태에서의 실험결과를 구하기 위해 AGV가 5,000개의 자재를 운반한 이후부터의 데이터만을

수집 분석하였다. 즉, 시스템이 안정된 이후 각 수행도 평가치에 관한 10개의 관측치들을 분석하여 실험결과를 구하였다. 각 관측치들은 AGV가 5,000개의 자재를 운반할 때마다 구해졌다.

〈표 5〉 문제 P3에서의 자재의 routing.

작업장	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.15	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.05	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
7	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
8	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2
9	0.2	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.15	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
10	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
11	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
12	0.0	0.0	0.15	0.15	0.0	0.05	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.05	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
13	0.0	0.0	0.0	0.05	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.05	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1
14	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
15	0.1	0.05	0.05	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2
17	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.15	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
18	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3
19	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.25	0.1	0.1	0.0	0.05	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.06	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0

〈표 6〉 문제 P3에서의 각 작업장간의 거리(m)

작업장	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	46	52	60	28	42	36	61	20	55	28	38	91	54	26	87	35	91	40	74
2	14	0	46	54	42	36	50	55	34	49	22	32	85	8	20	81	9	85	14	68
3	48	34	0	38	26	20	34	39	28	33	36	16	69	42	34	65	43	69	28	52
4	90	76	42	0	68	62	76	41	70	35	78	58	31	84	76	27	85	31	70	14
5	72	58	24	32	0	24	8	33	32	27	40	40	63	66	38	59	47	63	52	46
6	48	34	40	48	36	0	44	49	8	43	16	26	79	42	14	75	23	79	28	62
7	64	50	16	24	22	16	0	25	24	19	32	32	55	58	30	51	39	55	44	38

8	69	55	21	29	27	21	35	0	29	24	37	37	60	63	35	56	44	60	49	43
9	40	26	32	40	28	22	36	41	0	35	8	18	71	34	6	67	15	71	20	54
10	75	61	27	25	33	27	41	6	35	0	43	43	56	69	41	52	50	56	55	39
11	62	48	24	32	20	14	28	33	22	27	0	10	63	56	28	59	37	63	42	46
12	62	48	14	22	40	34	48	23	42	17	50	0	53	56	48	49	57	53	42	36
13	79	65	31	9	37	31	45	10	39	4	47	47	0	73	45	36	54	40	59	23
14	6	32	38	46	34	28	42	47	26	41	14	24	77	0	12	73	21	77	26	60
15	34	20	66	74	62	56	70	75	54	69	42	52	105	28	0	101	9	105	14	88
16	83	69	35	13	41	35	49	14	43	8	51	51	4	77	49	0	58	44	63	27
17	35	21	67	75	63	57	71	76	55	70	43	53	106	29	41	102	0	106	15	89
18	89	75	41	19	47	41	55	20	49	14	57	57	10	83	55	6	64	0	69	13
19	20	6	52	60	48	42	56	61	40	55	28	38	91	14	26	87	15	91	0	74
20	76	62	28	26	54	48	62	27	56	21	64	44	17	70	62	13	71	17	56	0

〈표 7〉 가공작업장의 평균 가공시간.

문제 작업장	P1	P2	P3
1	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0
3	24.010	0.0	0.0
4	35.934	0.0	0.0
5	34.278	6.199	0.0
6	32.103	5.859	8.556
7	107.101	11.137	9.035
8		6.499	7.787
9		5.606	8.318
10		7.989	5.971
11		7.750	4.463
12			6.695
13			5.866
14			4.434
15			6.015
16			9.829
17			6.011
18			7.043
19			5.393
20			6.737

〈표 8〉 모의실험에 의한 개발된 모형과 Chow의 모형의 성능분석.

a) 문제 P1

		모의실험	개발된 모형	Chow의 모형
α_1		0.433	0.443	0.443
α_2		0.301	0.310 (3.0%)	0.290 (-3.7%)
α_3		0.266	0.247	0.267
선적장에서 평균 대기시간	1	11.32±0.93	11.80	10.19
	2	0.00±0.00	0.0	"
	3	10.47±1.01	10.68	"
	4	11.63±0.93	11.97	"
	5	11.49±1.05	11.54	"
	6	10.65±0.97	10.94	"
	7	12.03±0.97	12.27	"
가중 평균 대기시간		11.12±0.97	11.41 (2.6%)	10.19 (-8.4%)

b) 문제 P2

		모의 실험	개발된 모형	Chow의 모형
α_1		0.500	0.506	0.506
α_2		0.342	0.344 (0.6%)	0.329 (-3.8%)
α_3		0.158	0.150	0.165
선적장에서 평균 대기시간	1	3.16±0.41	2.96	2.69
	2	3.08±0.41	2.90	"
	3	0.00±0.00	0.00	"
	4	3.11±0.39	2.89	"
	5	3.17±0.47	2.87	"
	6	3.04±0.39	2.84	"
	7	3.28±0.40	2.98	"
	8	3.16±0.45	2.87	"
	9	3.07±0.44	2.80	"
	10	3.25±0.46	2.89	"
	11	3.25±0.49	2.90	"
가중 평균 대기시간		3.15±0.42	2.88 (-8.6%)	2.69 (-14.6%)

c) 문제 P3

		모의 실험	개발된 모형	Chow의 모형
α_1		0.441	0.458	0.458
α_2		0.388	0.397 (2.3%)	0.392 (1.0%)
α_3		0.171	0.146	0.150
선적장에서 평균 대기시간	1	1.30±0.20	1.46	1.38
	2	1.27±0.22	1.43	"
	3	1.25±0.19	1.39	"
	4	1.27±0.16	1.40	"
	5	1.25±0.21	1.40	"
	6	1.27±0.26	1.38	"
	7	1.29±0.18	1.43	"
	8	1.23±0.22	1.40	"
	9	1.25±0.19	1.39	"
	10	1.28±0.20	1.38	"
	11	1.29±0.21	1.39	"
	12	1.32±0.26	1.39	"
	13	1.36±0.19	1.49	"
	14	1.34±0.23	1.45	"
	15	1.26±0.19	1.38	"
	16	1.38±0.21	1.49	"
	17	1.32±0.23	1.40	"
	18	1.44±0.16	1.51	"
	19	1.25±0.18	1.40	"
	20	1.34±0.22	1.44	"
가중 평균 대기시간		1.30±0.20	1.42 (9.2%)	1.38 (6.2%)

4.2 실험결과 분석

각 선적장에 도착하는 자재의 도착과정들이 독립적인 Poisson과정이라면 본 연구에서 개발된 모형을 사용하여 정확한 해를 얻을 수 있으나, 실제 시스템에서는 독립적인 Poisson과정이 아니므로 본 연구에서는 개발한 모형의 평가를 위하여, 모의실험에 의해 구해진 값들을 실제값들과 거의 일치한다고 가정하고 실험결과치와 근사적 방법에 의해

얻어진 값을 비교하여 개발한 모형의 평가를 하였다. 또는 Chow[3]에 의해 개발된 모형과 본 연구에서 개발한 모형의 결과도 비교하였다.

모의실험, 본 연구에서 개발된 모형, Chow의 FCFS 모형들로부터 얻어진 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3=1-\alpha_1-\alpha_2$ 의 값들과, 각 선적장에서 자재의 평균 대기시간 및 가중 평균대기시간을 <표8>에 정리하였다. 교통혼잡이나 blocking과 같은 현상이 없을 경우에 α_i 값은 쉽게 구할 수 있으며 또한 불변이므로, 모

형의 정확성은 α 값을 얼마나 잘 예측하는가에 달려있다.

FCFS모형과 Chow의 모형은 모두 α 값을 매우 정확하게 예측하고 있음을 (표8)로부터 알 수 있다. 최대오차는 Chow의 모형을 사용했을 때 문제 P2에서 발생하였으며, 이때의 오차는 -3.8%이다. 개발된 모형은 α 값을 항상 약간 높게 예측하는 반면에 Chow의 모형은 개발된 모형보다 약간 낮게 예측하는 경향이 있다.

개발된 모형에 의해 예측된 선적장에서의 자재의 평균 대기시간은, 문제 P2의 경우 모의실험 결과보다 약간 낮고, 문제 P1과 P3에서는 약간 높지만, 모의실험으로부터 구해진 95%신뢰구간 안에 항상 포함된다. 한편 선적장에서의 가중 평균치 역시 95%신뢰구간 안에 포함된다. 그러나 Chow의 모형에 의해 예측된 값들은 항상 95%신뢰구간에 포함되지 않는다. 문제 P2에서 Chow의 모형을 이용할 때 모든 선적장에서의 평균 대기시간의 가중치는 모의실험의 결과보다 약 14.6% 낮으며, 모의실험 결과 얻어진 95% 신뢰구간에 포함되지 않는다.

5. 결 론

최근 자동 유도 운반차량 시스템은 이 시스템이 제공하는 자재운반의 유연성(flexibility)때문에 공장자동화의 중요한 요소가 되었다. 이러한 시스템의 성능은 AGV의 급송규칙에 영향을 받음이 명백하므로, 본 연구에서는 AGV의 급송규칙이 선입선출이라는 가정하에 시스템의 성능평가를 위한 근사적인 확률적 모형을 개발하였다.

개발된 근사적 모형을 모의실험 결과와 비교한 결과, 개발된 모형은 시스템의 수행도 평가치 즉 생산물 분석과 각 선적장에서의 평균 대기시간을 매우 정확하게 예측한다는 것을 알 수 있었다.

자동 유도 운반차량 시스템내에서 차량들은 독립

적, 비동시적으로 자재를 운반한다는 특성이 있다. 이와 같은 특성을 산업용 로봇, micro load 자동창고의 저장/불출 기계, 리프트 트럭, 기중기 등도 공유하므로, 본 연구의 결과를 이러한 자재운반 설비들의 성능평가를 위해서도 적용할 수 있다.

본 연구에서 제시한 근사적 방법을 사용함으로써 설계자는 초기 설계단계에 더 많은 대안들을 더 짧은 시간에 테스트할 수 있으므로, 이들 중 우수한 대안들을 선택하여 제한된 시간과 비용하에 심도 깊은 모의실험을 수행한다면 결과적으로 더 좋은 설계 대안을 선택할 수 있다.

본 연구에서 사용한 선입선출법은, AGV가 자재를 하역한 작업장의 선적장에 대기중인 자재가 있음에도 불구하고 이 자재의 대기시간이 시스템내의 선적되기를 기다리는 자재들 중에서 가장 길지 않다면 선적/운반할 수 없으며, 또한 AGV가 빈채로 목적지까지 이동하는 중에 지나치는 선적장에 있는 자재도 선적할 수 없다. 즉 빈채로 이동하는 거리가 필요 이상으로 커질 수 있으므로 효율적인 급송규칙이라 할 수는 없다. 그러므로 본 연구에서 제시한 선입선출법을 사용할 경우의 수행도 평가치를 시스템의 하한치(lower bound)로 고려하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Bartholdi, J.J., III and Platzman, L.K., "Decentralized Control of a Fixed Route Automatic Guided Vehicle System," *IIE Transactions*, Vol.21, No.1, pp.76-81, 1989.
- [2] Bozer, Y.A. and Srinivasan, M.M., "Tandem Configurations for Automated Guided Vehicle Systems and the Analysis of Single Vehicle Loops," *IIE Transactions*, Vol.23, No.1, pp.72-82, 1991.
- [3] Chow, W.M., "Design for Line Flexi-

- bility," *IIE Transactions*, Vol.18, No.1, pp.95-108, 1986.
- [4] Chow, W.M., "An analysis of Automated Storage and Retrieval Systems in Manufacturing Assembly Lines," *IIE Transactions*, Vol. 18, No.2, pp.204-214, 1986.
- [5] Egbelu, P.J., "The Use of Non-Simulation Approaches in Estimating Vehicle Requirements in an Automated Guided Vehicle Based Transport System," *Material Flow*, Vol.4, pp.17-32, 1987.
- [6] Egbelu, P.J. and Tanchoco, J.M.A., "Characterization of Automatic Guided Vehicle Dispatching Rules," *International Journal of Production Research*, Vol.22, No.3, pp.359-374, 1984.
- [7] Hodgson, T.J., King, R.E., and Monteith, S.K., "Developing Control Rules for an AGVS using Markov Decision Processes," *Material Flow*, Vol.4, pp.86-96, 1987.
- [8] King, R.E., Hodgson, T.J., and Monteith, S.K., "Extracting Heuristic Control Rules for AGV's using Markov Decision Processes," *Belgian Jour. of OR, Stat. and Comp. Sci.*, Vol.27, No.2, pp.3-17, 1987.
- [9] Kleinrock, L., *Queueing Systems*, Vol.2, Ch.3, John Wiley & Sons Inc., 1976.
- [10] 이효성, 조면식, "자동 유도 운반차량 시스템의 성능평가를 위한 근사적 방법", *대한산업공학회지*, Vol.16, No.2, pp.23-36, 1990.
- [11] Leung, L.C., Khator, S.K., Kimbler, D. L., "Assignment of AGVS with Different Vehicle Types," *Material Flow*, Vol.4, pp.65-72, 1987.
- [12] Low, A.M. and Kelton, W.D., *Simulation Modeling and Analysis*, Ch.2, McGraw-Hill, 1982.
- [13] Maxwell, W.L. and Muckstadt, J.A., "Design of Automatic Guided Vehicle Systems," *IIE Transactions*, Vol.14, No.2, pp.114-124, 1982.
- [14] Russell, R.S. and Tanchoco, J.M.A., "An Evaluation of Vehicle Dispatching Rules and Their Effect on Shop Performance," *Material Flow*, Vol.1, pp.271-280, 1984.
- [15] Solberg, J.J., "The Optimal Planning of Computerized Manufacturing Systems; CAN-Q User's Guide," School of Industrial Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, U.S.A., 1980.
- [16] Tanchoco, J.M.A., Egbelu, P.J., and Taghaboni, F., "Determination of the Total Number of Vehicles in an AGV-Based Material Transport System," *Material Flow*, Vol.4, pp.33-51, 1987.
- [17] Toro Ramos, Z.R. and McGinnis, L.F., "Performance Modeling for a single Material Handling Device with Random Service Requests : Part I : Pure Blocking," *Proceeding of the 1990 Material Handling Research Colloquium*, pp. 271-283, Hebron, Kentucky, U.S.A., 1990.
- [18] Toro Ramos, Z.R. and McGinnis, L.F., "Performance Modeling for a Single Material Handling Device with Random Service Requests : Part II : Blocking with Recourse," *Proceeding of the 1990 Material Handling Research Colloquium*, pp.285-297, Hebron, Kentucky, U.S. A., 1990.
- [19] Wysk, R.A., Egbelu, P.J., Zhou, C., and Ghosh, B.K., "Use of Spread Analysis for Evaluating AGV systems," *Material Flow*, Vol.4, pp.53-64, 1987.
- [20] Yao, D.D. and Buzacott, J.A., "Modelling the Performance of Flexible

Manufacturing Systems," *International Journal of Production Research*, Vol.23, No.5, pp.945-959, 1985.

[21] Yao, D.D. and Buzacott, J.A., "Models of Flexible Manufacturing Systems with Limited Local Buffers," *International Journal of Production Research*, Vol.24, No.1, pp.107-118, 1986.

[22] Yao, D.D. and Buzacott, J.A., "Modeling a Class of Flexible Manufacturing Systems with Reversible Routing," *Operations research*, Vol.35, No.1, pp.87-93.