

## 무인운반차 기반 물류시스템에서의 이동시간 분석

구평희\* · 장재진\*\*

### Vehicle Travel Time Analysis in Automated Guided Vehicle Systems

Pyung-Hoi Koo\* · Jaejin Jang\*\*

#### ■ Abstract ■

Design and evaluation of AGV-based material handling systems are very complicated due to the randomness and the large number of variables involved. Vehicle travel time is a key parameter for designing and evaluating AGV systems. Although loaded travel time is relatively easy to estimate, determination of empty vehicle travel time is difficult due to the inherent randomness of material handling systems. Most previous studies assume that the empty vehicle travel time is the same as the loaded travel time or assume very specific environments. This paper presents new vehicle travel time models for AGV-based material transport systems. The research effort is focused on the estimation of empty vehicle travel time under various vehicle dispatching policies. Simulation experiments are used to verify the proposed travel time models.

Keyword : Vehicle travel time model, AGVS, Empty vehicle travel, AGV dispatching

### 1. 서 론

무인운반차(AGV : Automated Guided Vehicle)는 배터리 동력에 의해서 차량의 자율 제어장치에 의해 주로 유도선로를 따라 물건을 운반하는 차량

이다. 초기에는 사람이 운반하기 어려운 중량물의 운반을 위해 많이 이용되었으나 최근에는 AGV의 특성인 유연성과 청정성, 고 생산성을 달성할 수 있다는 점에서 자동차, 반도체 공장과 같은 제조현장뿐만 아니라 병원, 우체국, 항만 등의 서비스 분야

논문접수일 : 2000년 10월 5일      논문게재확정일 : 2001년 2월 17일

\* 부경대학교 산업공학과

\*\* 한국외국어대학교 산업정보시스템 공학부

에서도 사용 범위가 확대되고 있다. AGV를 기반으로 하는 물류 시스템은 그 성능을 결정 짓는 변수가 많기 때문에 설계나 운영에서 고려해야 할 점이 많고 또한 복잡하다. 따라서, 시스템의 보다 효율적인 운영을 위해서는 설계 단계부터 매우 조심스러운 접근이 필요한데, 이에는 적절한 AGV의 댓수 선택, AGV 유도경로 (guide path)나 물류 흐름 pattern의 결정, buffer의 용량, 차량할당정책 (vehicle dispatching)의 결정 등이 포함된다[5].

AGV 운행 시간은 위에서 열거한 운반시스템의 설계 및 운영에 있어서 중요한 요소이며, 특히 차량의 규모를 결정하거나 차량 운행 계획을 수립하기 위해 기본적으로 고려해야 할 사항이다. AGV 운행 시간은 크게 적재운행시간 (loaded vehicle travel time)과 공차운행시간 (empty vehicle travel time)으로 구성되어 있다. 적재운행시간은 운반 되어야 할 물건이 차량에 적재되어 이동되는 시간을 말하며, 공차운행시간은 AGV가 하나의 운반 작업을 마친 후에 다른 곳에서 운반 요구가 있을 때 해당 부품을 적재하기 위하여 공차 상태로 이동하는 시간을 말한다. 적재운행시간은 AGV의 출발지와 목적지를 명시하는 부품의 배달 요구량과 작업장간의 이동 시간이 주어지면 비교적 쉽게 구할 수 있다. 공차운행은 적합한 차량할당정책을 이용하여 줄일 수는 있으나 대부분의 경우 다음 작업 요구가 항상 하역 한 장소에서 발생하지는 않기 때문에 완전히 제거할 수는 없다. AGV에 대한 운반 요청이 있을 때에 어느 장소에 가용한 AGV가 있을 지 미리 알 수가 없으므로, 공차운행시간은 일반적으로 확실성을 포함하고 있으며 따라서 예측이 상대적으로 어렵다.

이러한 복잡성 때문에 일반적으로 기존의 많은 연구에서는 공차운행시간을 무시하거나 또는 공차운행시간을 적재운행시간과 같다는 가정 하에 시간모형을 다루었다. 그러나 공차운행시간은 물류시스템의 운영의 효율성에 매우 큰 영향을 미치기 때문에[8] 공차운행시간을 무시하거나 간단한 가정으로 차량운행시간을 예측하는 것은 물류시스템의

설계와 분석에 있어 중대한 오류를 가져올 수 있다. 본 연구는 확실적인 접근법을 이용하여 공차운행시간을 예측하는 모델을 제시한다. 특히 일반적으로 널리 사용되는 근거리 할당 정책 하에서의 차량이동 시간모형을 제시하고 시물레이션을 통해 이를 검증한다. 또한 최장유휴차량 할당정책과 최소이용차량 할당정책에서의 이동시간이 기존의 임의차량할당정책의 모형을 이용하여 추정됨을 시물레이션을 통해 보여준다.

## 2. 기존 연구

차량운행시간의 두 가지 구성 요소 중 적재차량 운행시간은 앞서 논의한 대로 비교적 쉽게 구할 수 있기 때문에, 주로 공차운행시간의 예측에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 공차운행시간에 대한 연구는 그 중요성에도 불구하고[9] 문제의 복잡성 때문에 대부분 문제를 단순화 시켜 간단한 예측 방법으로 운행시간을 추정하였다. 가장 간단한 방법으로는 Egbelul[3]가 공차운행시간을 적재운행시간과 동일하다고 가정된 것이 있지만 오차가 크다는 단점이 있다. Egbelul은 또한 각 작업장에서 AGV가 가용 하게 되는 확률과 각 작업장에서 물품이 운반 시작 될 확률을 고려하여 장기적으로는 AGV가 어떤 작업장의 물건을 운반하기 시작하는 것이 random할 것이라는 가정 하에 공차 운반시간을 확률적으로 구하는 모델을 제시하였다. Maxwell 과 Muckstadt[7]는 AGV 시스템 운영의 분석적인 모델링 과정에서 net flow 개념을 이용하여 공차운행시간을 예측하는 모델을 제시하였다. Net flow란 작업장에 대해 제품이 운반되어 들어오는 횟수와 운반되어 나가야 하는 횟수의 차이이다. 물건이 운반되어 들어온다는 것은 AGV가 물건을 적재하고 와서 하역 한다는 것이므로, 이 횟수는 AGV가 다음 물건을 운반하기 위해 새 사이클을 시작하는 횟수를 의미한다. 여기서, 양수의 net flow를 갖는 작업장에 도착한 AGV중의 일부는 음수의 net flow를 갖는 작업장에 있는 물건을 나르기 위해 공

차 상태로 운행 되어야 한다고 가정하고, 이러한 공차운행에 필요한 시간이 최소화 되도록 공차운행계획을 수립하는 수리모형을 제시하였다. 이러한 가정은 시간을 고려하지 않았을 경우에는 적용 가능하나 동적으로 환경이 변화하는 일반적인 물류 흐름의 경우에는 적용되기 어렵다. 즉, 한 작업장에서 도착하는 물량과 떠나가는 물량이 같다고 (즉  $\text{net flow} = 0$ ) 하더라도, 어떤 작업장에 AGV가 배달을 완료 했을 때 (즉, 공차 상태로 되었을 때) 대상 작업장에 운반되어 나가야 할 물건이 없는 경우가 발생 할 수 있다. 이때 다른 작업장에서 물건 운반 요청이 오면 그 장소로 공차로 이동해야 하는데 이러한 상황을 고려하지 않고 있다.

Maxwell 과 Muckstadt[7]의 공차운행시간 예측의 단점을 보완하기 위해 Rajotia 등[8]은  $\text{net flow}$ 가 '0'이 되더라도 공차 운행이 발생할 수 있다고 가정하고 이를 기반으로 공차 운행을 최소화 시키는 수학적 모형을 제시하였다. 즉 한 장소에서 유휴상태로 된 AGV는 운반될 물건이 있는 여러 장소의 요청 확률을 고려하여 공차로 이동되고 이 이동거리를 최소로 하기 위한 공차운행을 탐색한다. Mahadevan과 Narendran[6]은 FMS에서 대체 가능한 여러 공정계획을 갖는 제품들이 제한된 Buffer를 갖는 기계들 사이를 이동할 때 동일한 확률로 유휴 중인 AGV를 선택 하는 경우의 차량 이동 시간을 구하는 방법을 제시하고 이를 차량 소요 댓수를 구하는데 사용하였다. 구평희 등[1]은 자동화된 제조시스템에서 동적인 상황을 고려하여 차량 이동시간 모델을 제시하고 이를 이용하여 운반 요청을 하는 작업이 차량을 기다리는 시간을 예측하는 모형을 발표하였다. 이 모형은 생산시스템 내의 AGV 소요량을 구하는데 이용 되었으나, 모형이 차량을 임의로 선택하는 환경에서만 적용될 수 있다는 한계가 있다.

위에서 설명한 차량 이동시간에 대한 연구들은 시간을 고려하지 않거나 임의로 차량을 할당하는 상황에서 적용 가능하다. 그러나, 실제로 AGV를 기반으로 하는 물류시스템에서는 시간이 지남에

따라 현장의 상황이 변화되고 또한 차량의 할당 방법에서도 임의 차량 할당 보다는 공차운행시간을 줄이기 위하여 유휴 차량의 상대적인 위치에 의해 차량을 선택하거나 유휴시간을 고려하여 차량을 선택하는 정책 등이 효율적인 방안으로 인식되고 있다. 특히 근거리차량 할당정책(nearest vehicle selection policy)은 공차운행 시간의 최소화를 위해 널리 사용되는 정책인데, 이 정책에서의 공차운행에 관한 연구는 Kobza 등[4]에 의해서 시도 되었다. 이들의 연구에서는 각 작업장에 있는 AGV 댓수를 시스템 상태로 정의하고, 시스템의 상태를 출발지와 도착지를 알고 있는 제품의 운반요구량을 이용해 구한다. 시스템의 상태 전이 확률을 Markov Chain을 이용하여 계산하고 이를 공차운행시간을 구하는데 이용하였다. 이 모형에서는 운반요구가 AGV의 운반 능력보다 아주 작아 모든 AGV가 항상 가용 하다고 가정하는데, 따라서 이 모형은 AGV의 이용율이 낮은 경우에는 공차운행 시간을 비교적 정확하게 예측할 수 있지만, AGV의 이용율이 높은 경우에는 많은 오차를 발생시킨다.

### 3. AGV 운행 시간 모형

본 절에서는 AGV의 운행 시간을 추정하는 절차를 제시한다. 적재운행시간과 공차운행시간에 대한 모형을 제시하고, 특히 공차운행에서는 dispatching 방법에 따라 시간모형을 제시한다.

$n$  : 설비 수

$m$  : AGV 수

$f_{ij}$  : 설비  $i$ 에서 설비  $j$ 로의 단위시간 당 물류 이동 횟수

$t_{ij}$  : 설비  $i$ 에서 설비  $j$ 로의 AGV 이동 소요 시간

$u$  : AGV 이용율. 적재운행시간과 공차운행시간을 포함한 총 차량이동시간을 총 가용시간으로 나눈 값.

$F$  : 단위 시간당의 전체 물류 이동 요구량  $F =$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij}.$$

### 3.1 적재운행시간

시스템의 배치, AGV 운행 경로, 그리고 AGV의 속도가 알려지면, 설비 간의 AGV 운행 소요 시간은 쉽게 계산될 수 있다. (AGV blocking이나 고장, deadlock등은 발생하지 않는 것으로 가정한다.) 부품의 적재나 하역에 소요되는 시간은 일반적으로 일정하므로 이 시간은 적재운행시간에 포함하여 생각 할 수 있다. 기대 적재운행시간,  $t_i$ ,은 다음의 식에 의해 계산된다 :

$$t_i = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=1}^n (f_{ij} t_{ij}) \right], \quad (1)$$

여기서 설비간의 시간당 부품 이동량(flow rate)은 주어진 시간 동안 부품의 생산량과 부품의 공정 계획 정보로부터 얻을 수 있다.

### 3.2 공차운행시간

공차운행시간은 부품의 이동이 필요한 경우 해당 부품이 위치한 곳 이외의 다른 장소에 있는 AGV가 운반을 담당해야 하는 경우에 발생한다. 주어진 부품을 운송하기 위한 공차운행시간은 선택된 AGV의 현 위치와 운반을 요청한 부품의 위치에 따라 변한다. 따라서 AGV가 운반작업을 마쳤지만 현재 운반 요구가 더 이상 없을 때 유휴 AGV의 위치를 결정하는 대기위치 결정 방법에 의해서도 공차운행시간은 영향을 받는다[2]. 본 연구에서는 운영이 간단하고 운반작업이 많은 경우에 유용한 방법인 작업종료위치대기 전략, 즉 차량이 운반작업을 완료한 후 다음 작업에 할당될 때 까지 현 위치에 머물러 있는 정책을 사용하는 것으로 가정한다. 또한 여러 대의 유휴 차량이 존재하는 경우 할당할 AGV를 결정하는 차량 할당 정책에 따라 공차 운행 시간이 다른데 본 절에서는 여러 가지 차량 할당 정책에 대하여 공차운행시간 모형을 제시한다.

#### 3.2.1 임의차량 할당정책 하의 공차운행시간 모형

우선 여러 대의 유휴 AGV가 있을 때 임의로 한 AGV를 선택하는 임의차량 할당정책을 적용하는 경우를 고려한다. 여기에서,  $fd_j$ 는 전체 물류 (AGV 요청 횟수) 중에서 설비  $j$ 로 운반되어 하역 되는 물류의 비율이고,  $fs_i$ 는 전체 물류 중에서 설비  $i$ 에서 운반되어 나갈 물류의 비율이라고 정의하자. 그러면, 모든 운반 물동량 중에서 설비  $i$ 에 있는 부품의 운반 요청이 설비  $j$ 에 위치한 AGV에 의해 운반 될 확률은  $fs_i \times fd_j$  이 된다. 따라서, 기대 공차운행시간,  $t_{ev}$ , 은 다음 식과 같이 계산 된다[1].

$$t_{ev} = \sum_{i=1}^n \left[ fs_i \sum_{k=1}^n (fd_k t_{ki}) \right], \quad (2)$$

$$\text{단, } fd_k = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n f_{ik}, \quad fs_i = \frac{1}{F} \sum_{j=1}^n f_{ij}.$$

식 (2)는 임의차량 할당정책 하에서 하역이 많은 위치에 유휴차량이 존재할 확률이 많을 것이고 차량요구에 대응할 확률도 따라서 클 것이라는 점을 보여준다.

식 (2)에서 제시된 모형은 현재 가장 오랫동안 유휴 상태에 있는 AGV를 선택하는 최장유휴차량 할당정책과 현재까지 가장 이용율이 낮은 AGV를 선택하는 최소이용차량 할당정책을 사용하는 경우에도 동일하게 적용될 수 있다. 즉, 공차 이동시간은 운반요구의 위치와 선택된 차량의 현재 위치에 의해 결정되는데, 이들 두 정책은 차량의 선택 기준이 유휴지속시간 등과 같은, AGV의 위치와는 독립적인 차량 자체의 상태이기 때문에, 임의차량 할당 정책에서와 같이 선택 될 차량의 위치가 설비  $k$ 가 될 확률은  $fd_k$ 이고 운반요구가 설비  $i$ 에서 발생할 확률은  $fs_i$ 이다. 따라서 최장유휴차량 할당정책과 최소이용차량 할당정책을 사용하는 경우의 공차 운반 시간 모형은 위의 식 (2)와 동일하다.

#### 3.2.2 근거리차량 할당정책 하의 공차운행시간 모형

실제 운반 시스템에서는 공차운행시간을 줄여

주고 따라서 AGV를 좀더 효율적으로 사용할 수 있게 하는 근거리차량 할당정책을 자주 사용한다. 근거리차량 할당정책을 사용하였을 경우는 유티(가용) 차량들의 상대적인 위치가 중요하다. 이 경우의 공차운행시간을 계산하기 위하여,  $Z$ 를 가용한 AGV의 숫자라고 하자. 또한 AGV  $i$ 가 가용할 경우, 확률 변수  $X_i = 1$ , 그리고 그렇지 않을 경우에  $X_i = 0$ 이라고 하자. 그러면,  $Pr(X_i = 1) = p = 1 - u$ 이 되고,  $Z = X_1 + X_2 + \dots + X_m$ 는 가용한 AGV의 숫자가 된다. 여기서  $X_1, X_2, \dots, X_m$ 이 서로 확률적으로 독립이라고 하면, 확률변수  $Z$ 는 아래의 확률밀도 함수를 갖는 이항분포를 따른다.

$$\begin{aligned} P(z) &= Pr(Z = z) = b(z; m, p) \\ &= {}_m C_z (1-u)^z u^{m-z} \\ z &= 0, \dots, m \end{aligned} \quad (3)$$

만일 현장에 하나의 가용한 AGV만 있다고 가정하면, 이 AGV가 설비  $k$ 이외의 장소에 위치할 확률은  $(1-fd_k)$ 이다. 만일  $z$ 대의 가용 AGV가 있다고 하면, 설비  $k$ 에 가용한 AGV가 하나도 없을 확률은  $(1-fd_k)^z$ 이 되고, 따라서 적어도 한대의 유티 AGV가 설비  $k$ 에 위치할 확률은  $1 - (1-fd_k)^z$ 가 될 것이다. 이제,  $S$ 를 어떠한 설비들의 집합이라 하자. 설비 집합  $S$ 에 AGV가 하나도 없는 상태에서,  $S$ 에 속하지 않는 설비  $k$ 에 적어도 하나의 AGV가 위치할 확률,  $A_k$ ,는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_k &= 1 - (1-fd_k / \sum_{r \in S} fd_r)^z, \\ k &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (4)$$

$S(k, i)$ 를 모든 설비에 대해 설비  $i$ 까지의 거리가, 설비  $k$ 와 설비  $i$ 의 거리보다 더 가까운 설비들의 집합이라고 하고,  $q(k, i)$ 를  $S(k, i)$ 에는 가용한 AGV가 하나도 없고, 설비  $k$ 에 적어도 하나의 가용한 AGV가 있을 확률이라고 하자. (이때, 근거리차량 할당정책에서는 설비  $k$ 에 있는 AGV를 이용하여 설비  $i$ 에서 운반 요청한 부품을 운반할 것이다.) 그러면  $S(k, i)$ 에 적어도 하나의 가용한

AGV가 존재할 확률은  $\sum_{r \in S(k, i)} q(r, i)$ 이고, 따라서  $S(k, i)$ 에 가용한 AGV가 하나도 없을 확률은  $1 - \sum_{r \in S(k, i)} q(r, i)$ 이다. 이제 이 내용과 식 (4)를 이용하면,  $q(k, i)$ 는 운반을 요청한 설비에서 가까운 설비로부터 시작하여 순서대로 아래의 식과 같이 계산 된다.

$$\begin{aligned} q(k, i) &= \left[ 1 - \sum_{r \in S(k, i)} q(r, i) \right] \left[ 1 - (1 - fd_k / \sum_{r \in S(k, i)} fd_r)^z \right], \quad (5) \\ k, i &= 1, 2, \dots, m; \\ z &= 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

이제 근거리차량 할당정책에서의 공차운행시간을 예측하는 모형을 만들 수 있다. 모든 운반량 중에서 설비  $i$ 로부터 운반이 요청되고 총  $z$ 대의 유티 AGV중 설비  $k$ 에 있는 AGV가 운반을 수행할 확률은  $fs_i \times P(z) \times q(k, i)$ 가 된다. 따라서, 유티 중인 AGV가 존재하는 경우 공차운행시간의 기대치,  $t_{em}$ ,는 다음과 같다:

$$t_{em} = \sum_{i=1}^n \left[ fs_i \sum_{z=1}^n \left[ P(z) \sum_{k=1}^n \{q(k, i) t_{ki}\} \right] \right] \quad (6)$$

위 식에서의  $P(z)$ 는 식 (3)에서 보여주듯이 AGV의 이용률  $u$ 의 함수이다. AGV의 이용율은 공차운행시간을 알고 있어야 구할 수 있고, 공차운행시간은 다시 식 (6)과 같이 AGV 이용율이 있어야 구할 수 있다. 본 모델에서는 우선 임의차량할당정책 하에서 공차운행시간과 차량 이용율을 계산하고 이를 식 (6)에 사용한다. 그리고, 여기서 얻어진 공차운행시간을 이용하여 AGV 이용율을 다시 계산하고 이를 다시 식 (6)을 이용하여 공차운행시간을 계산하는데 반복적으로 사용한다. 근거리차량할당정책에서의 기대 공차운행시간은 임의차량할당정책 하에서 기대 공차운행시간보다 항상 적다. 따라서 반복되는 절차에서 식 (6)에서 얻어지는 공차운행시간은 점차 감소한다. 즉, 공차운행시간이 감소하면 AGV 이용율이 감소하고 따라서 유티 중인 AGV의 댓수가 증가하여 가까이에 있는 AGV를

선택할 확률이 높아져, 결국은 다음 반복 계산 과정에서 얻어지는 AGV의 공차운행시간이 더 작아지게 된다. 이러한 반복이 계속되면 AGV의 이용율은 근거리차량할당정책에서의 실제 AGV 이용율에 가까워지고, 따라서 연속된 두 반복수행에서 새로운 값과 이전 값의 차이가 점점 줄게 되어 결국은 일정한 공차운행시간으로 수렴하게 된다.

위에서 계산한 기대 공차운행시간은 부품의 운반요구가 있을 때 적어도 하나 이상의 AGV가 유희한 상태로 있고 이 중 하나의 AGV가 할당되는 경우에만 적용된다. 반면에 어느 부품이 운송을 요구할 때에 가용한 AGV가 없다면, 후에 한 AGV가 유희상태가 되었을 때 이 AGV가 부품을 선택하여 운반할 것이다. 이때, 여러 개의 부품이 운반을 기다리는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우에는, AGV가 적당한 부품을 선택해야 하는 차량주도 부품할당(vehicle-initiated dispatching) 문제가 발생한다. 차량주도 부품할당은 확률  $u^m$ 으로 발생된다. AGV의 수가 많은 경우나 AGV 이용율이 낮은 경우는 차량주도 부품할당상황이 자주 발생하지 않을 것이다. 예를 들어 9대의 AGV가 운영되는 시스템에서 AGV 이용율이 70%라면,  $4\%(=0.7^9=0.04)$  정도가 차량주도 부품할당정책이 적용된다.

본 연구에서는 차량주도 부품할당정책으로 먼저 운반을 요청한 Job을 우선 할당하는 FCFS 정책을 적용한다. FCFS는 차량주도의 할당으로 일반적으로 많이 사용되는 정책이다. FCFS의 공차시간 모형은 설비주도의 할당(workcenter-initiated dispatching)에서 임의 할당을 위한 식(2)와 동일한 모형에 의해서 공차 운행 시간을 표현할 수 있다. 그러면, 기대 공차운행시간,  $t_e$ , 는 식 (7)과 같다.

$$t_e = t_{em} + u^m t_{ev} \quad (7)$$

### 3.3 전체 운행소요시간

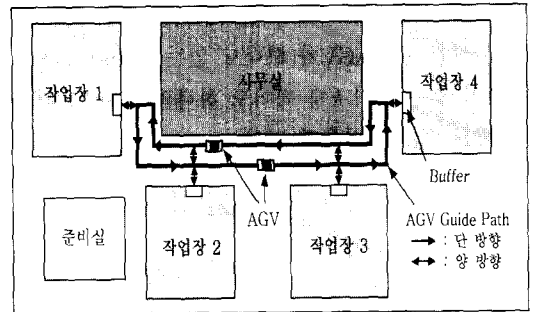
하나의 부품을 운송하는데 소요되는 AGV의 기대 운행소요시간,  $t_i$ , 는 적재운행시간과 공차운행

시간의 합으로 구할 수 있다.

$$t_o = t_i + t_e \quad (8)$$

## 4. 수치 예제

제시된 모델의 이해를 돕고자 간단한 예를 들어 위의 절차를 설명한다. 대상 제조 시스템은 [그림 1]과 같이 4개의 작업장(번호 1~4)과 2대의 AGV로 이루어져 있다. AGV는 단 방향의(Unidirectional) 간선유도로(Guide Path)를 따라 제품을 1대씩 운반한다. 간선유도로를 연결하는 유도도로와 간선유도로-장업장을 연결하는 지선(Spur)은 AGV가 어느 방향으로도 운행되는 양 방향(Bidirectional) 유도도로이다. 두 AGV는 충돌 방지를 위한 매커니즘을 채택하여 충돌이 발생하지 않는 것으로 가정하고, 상호 간섭에 의한 시간지연은 무시될 수 있다고 가정한다. 대상 시스템에는 3가지 종류의 부품을 생산하고 있다. 각 제품에 대해서 거쳐야 할 작업장을 정의한 생산 경로(routing)와 각 작업장에서 필요로 하는 작업 시간, 그리고 1일 (480분) 동안에 생산해야 할 수량이 <표 1>에 주어져 있다.



[그림 1] 모델 제조 시스템

<표 1> 각 부품별 생산량과 생산 경로

부품번호	생산량 (대)	생산경로 (작업장)	작업시간 (분)
1	10	1-2-4	3.6-7.8-9.4
2	20	2-1-3	5.1-2.4-5.4
3	20	3-4-2	3.6-4.3-4.8

본 예제의 작업장 간 부품운반 횟수와 차량이동

시간이 <표 2>에 나타나 있다. 각 설비간의 부품 이동 횟수는 제품의 생산경로와 생산량을 이용하여 계산 할 수 있다. 예를 들어 작업장 1에서 작업장 3으로 운반되어야 할 횟수는 제품 2의 두 번째 공정이 작업장 1에서 끝나서 다음 공정, 즉 작업장 3으로 운반되는 횟수이고, 제품 2는 1일 20대 생산되어야 하므로 20회의 운반이 필요하다. 작업장 간의 AGV 운행시간은 AGV가 적정한 운행 속도로 이동 할 때 가감속 까지도 포함한 평균 운행 시간이다.

<표 2> <표 1>에서 얻은 AGV 운행 정보

(a) 작업장 간의 부품운반횟수(AGV운반횟수)

i \ j	1	2	3	4
1	0	10	20	0
2	20	0	0	10
3	0	0	0	20
4	0	20	0	0

(b) 작업간의 AGV 운행 시간(분)

i \ j	1	2	3	4
1	0	1	2	3
2	1	0	1	2
3	2	1	0	1
4	3	2	1	0

식 (1)과 <표 2>를 이용하면 기대 적재운행시간은 운반 횟수와 두 지점간의 차량 운행 시간을 이용하여 쉽게 구해진다. 본 예에서는 기대 적재운행시간,  $t_l = (10 \times 1 + 20 \times 2 + 20 \times 1 + 10 \times 2 + 20 \times 1 + 20 \times 2) / 100 = 1.5$  이다. 반면에 기대 공차운행시간은 AGV 할당 방법에 따라서 달라진다. 임의할당정책을 사용할 경우, 기대 공차운행시간은 식 (2)에 의해서 구해지고,  $t_e$ 는 1.26이 된다. 여기서  $f_{sj} = (0.3, 0.3, 0.2, 0.2)$ 이고  $f_{dj} = (0.2, 0.3, 0.2, 0.3)$ 이다. 이 경우에 기대 운행소요시간은,  $t_0 = t_l + t_e = 1.5 + 1.26 = 2.76$ 이 되고 AGV의 기대 이용율은  $u = (2.75 \times 100) / (480 \times 2) = 28.7\%$ 이다.

근거리차량 할당정책을 사용할 경우, 식 (3)에서  $P(z) = (0.083, 0.410, 0.508)$ 이고, 식 (5)의  $q(k, i)$ 는,

예를 들어 설비 1에서 운반요청이 있는 경우에 근거리차량할당정책으로 설비 k에 있는 유티 AGV가 할당될 확률,  $q(k, 1) = (0.265, 0.321, 0.163, 0.169)$ 과 같이 구할 수 있다. 이렇게 하여 식 (6)과 (7)을 이용해 구한 공차운행시간은 1.006이 되고 이는 다시 AGV의 이용율을 계산 하는데 이용된다. 다시  $P(z)$  및  $q(k, i)$ 를 구하고 공차운행시간을 구하면 공차운행시간은 0.987이 되고 이러한 절차를 반복하면 공차운행시간은  $1.260(\text{Random}) \rightarrow 1.006 \rightarrow 0.987 \rightarrow 0.985 \rightarrow 0.985 \rightarrow 0.985$ 가 되어 0.985로 값이 수렴한다. 이때, 차량이동소요시간은  $t_0 = t_l + t_e = 1.5 + 0.985 = 2.485$ 가 되고 AGV의 기대 이용율은  $u = (4.536 \times 100) / (480 \times 2) = 25.9\%$ 로 임의할당정책을 이용할 때보다 2.8%가 낮아짐을 알 수 있다.

## 5. 시뮬레이션 검증

제시된 모델을 검증하기 위하여 여러 상황에서 시뮬레이션을 수행 하였다. 시뮬레이션 검증은 두 부분으로 구성 되어있다. 하나는 제4절의 수치예제와 동일한 시스템을 가지고 제시된 모형의 정확도를 검증 하기 위한 것이고, 또 하나는 제시된 모형을 기존에 제시된 다른 모형과 비교하기 위한 것이다.

### 5.1 제시된 모형의 정확도 검증

시뮬레이션에서는 제시된 수치예제 모형에서 사용한 것과 동일한 데이터에 대하여 여러 가지 차량 할당정책이 적용되었다. 각 시뮬레이션은 10만개의 부품이동 요구를 처리 하였고, 이들 중 1만개 부품의 이동 요구는 시뮬레이션의 warming up을 위하여 사용되었다. 이러한 시험이 동일한 조건 하에서 10번 반복적으로 수행되었다. 차량할당정책은 임의차량, 최장유티차량, 최소이용차량, 근거리차량 할당방법이 사용되었다. 시뮬레이션에서는 각 부품의 설비에서의 가공시간은 고려하지 않았고 물류 이동시간만을 고려하였다. AGV의 이용율이 제시된

모델의 수행도에 미치는 영향을 알아보기 위해 수요량과 AGV의 댓수를 변경하면서 분석하였다. 시뮬레이션 결과에 대해 유의수준 95%의 신뢰구간을 산출하였다. 시뮬레이션 분석은 두 개의 시스템으로 이루어 졌다.

<표 3>은 제4절의 수치예제에서 사용한 시스템에 대해 임의차량, 최장유휴차량, 최소이용차량, 근거리차량 할당방법에 따라 제시된 모델에 의해 추정된 적재운반시간 및 공차운행시간, 그리고 동일한 환경 하에서 수행된 시뮬레이션의 결과를 보여주고 있다. 어떠한 차량할당정책을 이용하더라도 적재운반시간에 대한 추정 모델은 동일한 시간치(1.5분)를 예측하며, 시뮬레이션에 의한 실험 결과치에 최대 0.1% 오차 내에서 예측하였다. 공차운행시간에 대해서는 임의차량, 최장유휴차량, 최소이용차량의 경우 제시된 모델이 0.1% 오차 이내로 예측함을 알 수 있다. 이러한 결과는 제시된 모형에서 최장유휴차량 할당정책과 최소이용차량 할당정책에서의 차량이동시간은 임의차량할당 정책을 위해 제시된 모델을 사용할 수 있다는 가정을 검증해 주고 있다. 공차운행 시간의 예측에서 근거리차량 할당 방법에서는 시뮬레이션의 결과가 0.995이고 제시된 모델은 0.985로서 1.0 %의 오차를 보이고 있다.

다음으로 AGV의 이용율이 제시된 모델의 수행도에 미치는 영향을 조사하기 위해 동일한 시스템에 주문 도착량을 25, 50, 75, 100, 125, 150 개로 변경 시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 생산량이 150이면 AGV의 이용율이 85%인데, 생산량이 더 많아지면 현재의 AGV 댓수로는 처리하기 어려운 과부하 상태로 되기 때문에 그 이상의 생산량은 비

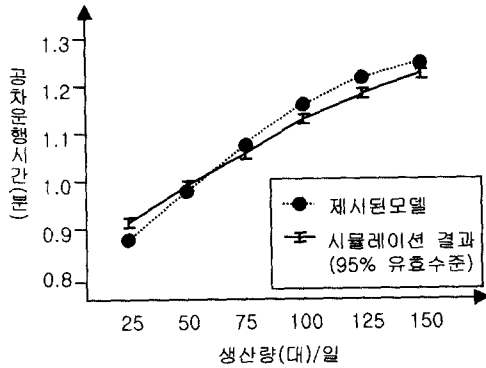
교하지 않았다. 모델에 의하면 임의차량, 최장유휴차량, 최소이용차량 할당 정책을 적용하는 경우는 생산량의 변화가 발생 하더라도 각 할당정책이 동일한 공차운행 시간을 예측한다고 가정했는데, 시뮬레이션에서도 동일한 결과를 얻었다. 또한 이들 차량 할당방법은 생산량이 변하더라도 적재운반시간 및 공차운행시간이 변하지 않는다는 가설 또한 시뮬레이션을 통해서 입증되었다. 반면에 근거리차량할당 정책에서는 주문 도착량의 변화에 따라 공차운행시간이 변한다. 주문 도착량이 적으면 AGV의 이용율이 낮아지고 이는 곧 물건의 운반요청시에 유휴중인 AGV가 많다는 것을 의미한다. 유휴차량이 많으면 상대적으로 가까이에 유휴중인 AGV가 위치할 확률도 높기 때문에 공차운행시간도 따라서 낮아질 것이다. [그림 2]는 주문 도착량이 변화할 때 제시된 모델의 공차운행시간 예측치와 시뮬레이션 결과를 비교하고 있다. 생산량(즉 운반량)이 많아지면 공차 운행 시간이 증가함을 보여준다. 제시된 모델은 주문 도착량이 변화하더라도 3.7 % 오차 내에서 비교적 정확하게 공차운행시간을 추정하고 있다.

AGV의 이용율은 주문 도착량에 따라서도 변하지만 일정한 주문 하에서 AGV의 댓수에 따라 변한다. AGV의 댓수가 제시된 모델의 수행도에 미치는 영향을 알아보기 위해 1일 150개의 주문을 생산해야 하는 시스템에서 2대에서 7대까지의 AGV에 대해 실험을 수행 하였다. AGV가 2대인 경우의 AGV 이용율은 85.7% 이고 6대인 경우의 AGV 이용율은 21.3%이다. 임의차량, 최장유휴차량, 최소이용차량 할당 정책을 적용하는 경우는

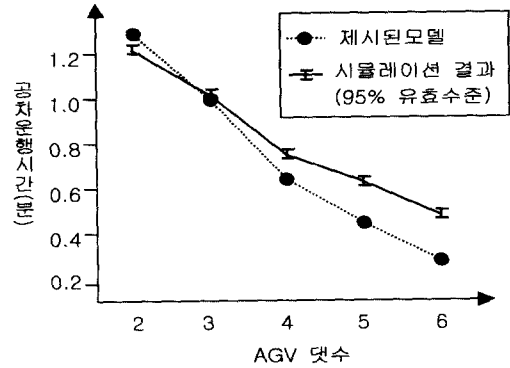
<표 3> 차량할당정책별 공차운행시간의 추정 기대치 및 시뮬레이션 결과

AGV할당 정책	적재운반시간			공차운행시간			총AGV이동시간		
	모델	실험	%오차	모델	실험	%오차	모델	실험	%오차
임 의 차 량	1.500	1.501	0.1	1.260	1.259	0.1	2.760	2.760	0.0
최장유휴차량	1.500	1.501	0.1	1.260	1.259	0.1	2.760	2.760	0.0
최소이용차량	1.500	1.501	0.0	1.260	1.260	0.1	2.760	2.760	0.0
근거리차량	1.500	1.500	0.0	0.985	0.995	1.0	2.485	2.495	0.4





[그림 2] 생산량 변화에 따른 공차운행시간 추정치와 시뮬레이션 결과



[그림 3] AGV 댓수 변화에 따른 공차운행시간 추정치와 시뮬레이션 결과

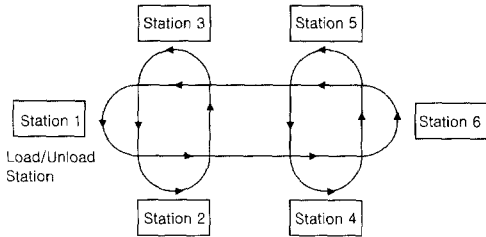
AGV의 댓수가 변하더라도 공차운행 시간의 차이가 없다는 것을 예비 시뮬레이션을 통해서 확인하였다. 그러나 근거리차량할당정책에서는 일정한 양의 제품을 운반해야 하는 환경에서 AGV 댓수가 증가하면 유틸차량이 많아지고 (즉, AGV의 이용률이 낮아지고) 이는 공차운행시간을 감소시키는 역할을 한다. [그림 3]에 여러 수준의 AGV의 댓수 하에서 근거리차량 할당정책에서의 공차운행시간 추정 모델과 시뮬레이션에 의한 결과를 비교 하였다. AGV의 댓수가 작은 경우에는 제시된 모델이 비교적 정확한 예측치를 제시하고 있으나, AGV의 숫자가 많아 질수록 예측오차가 커짐을 볼 수 있다. 이러한 오차는 분석적인 방법에서 여러 가지 가정, 예를 들어 이용률에 대한 AGV 간의 상호 영향을 주지 않는다는 가정 등이 실제 운영에서는 차이가 나기 때문으로 분석된다.

### 5.2 기존 모델과의 비교

일반적으로 근거리 차량 정책 하에서의 공차 운행시간 예측은 어려운 문제로 알려져 있고, [그림 3]에서도 본 연구에서 제시된 모델이 비교적 큰 추정 오차를 보여주고 있으므로, 본 연구에서 제시한 모델의 정확성을 상대적으로 평가하기 위하여, 이 경우에 대하여 본 모델을 기존의 다른 차량운행시간 예측 연구에서 제시된 방법들과 깊이 있게 비

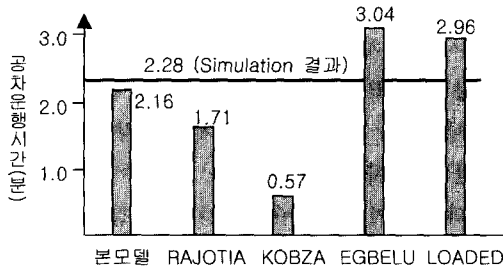
교, 분석하였다. 시뮬레이션 실험에서는 본 논문에서 제시한 공차운행 모형이 임의차량할당, 최소이용차량할당, 최장기유틸차량 할당정책에서는 정확히 운행시간을 예측하지만, 근거리 차량모형에서는 다소간의 오차를 발생시킴을 보여주었고, 특히 AGV의 댓수가 증가할수록 오차는 커짐을 보였다. 따라서, 타 모형과의 비교는 근거리차량 할당정책에 대해서만 실시하였다. 본 비교를 위하여 Rajotia 외(1998)가 사용한 [그림 4]의 시스템을 이용한다. 대상 시스템은 6대의 설비를 갖추고 3 종류의 제품을 생산한다. 각 제품은 load/unload station을 통하여 System에 들어오고 여러 기계를 거친 후 모든 작업이 완료되면 load/unload station을 통하여 시스템을 빠져나간다. 각 제품은 주어진 확률에 의해 대체공정계획 (flexible process plan)을 따라 작업이 수행된다. 제품별 작업순서, 설비간의 차량이동시간 및 이동 물량에 대한 데이터 등 자세한 시스템 설명은 Rajotia 외(1998)를 참조하기 바란다.

비교 대상이 될 기존의 접근법은 (1) Rajotia (1998)가 제시한 수학적 모델을 기반으로 한 모형 (RAJOTIA), (2) Kobza가 제시한 Markov Chain을 이용한 모형 (KOBZA), (3) Egbelu (1997)이 제시한 확률적 분석 모형 (EGBELU), (4) 여러 연구에서 적용한 적재운반시간으로 대신 추정하는 모형 (LOADED) 등의 4가지 다른 기존 모형이다.



[그림 4] 모델 FMS의 Layout (Rajotia et. al., 1998)

[그림 5]는 7대의 AGV가 근거리차량할당정책 하에서 운행 될 때 각 모형에 의해 예측되는 공차운행 시간을 시뮬레이션 결과와 함께 비교한 것이다.

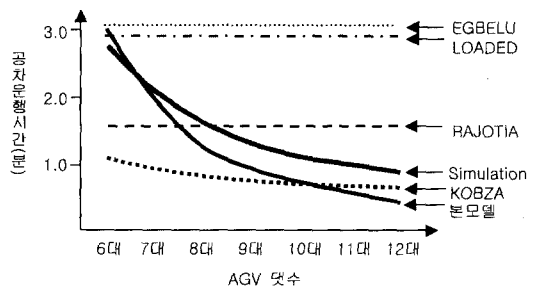


[그림 5] 기존의 모델과 본 연구의 모델과의 공차 운행시간 예측치 비교 (AGV 7대 경우)

EGBELU 및 LOADED 모형은 실제 공차운행시간 보다 크게 예측하고, RAJOTIA와 KOBZA의 경우는 작게 예측한다. EGBELU 모형에서의 차이는 AGV 선택 시 그 위치를 고려하지 않기 때문에 공차 운행시간이 커지게 된 것이고, LOADED의 경우에는 적재운행 시간에 의해 공차운행시간을 예측하므로 일반적으로 큰 오차를 보인다. RAJOTIA의 경우도 AGV의 위치를 고려하지 않기 때문에 차이가 발생하고, KOBZA 모형은 다른 모형과는 달리 AGV의 위치를 고려하지만, 모든 AGV가 항상 가용하다고 가정하기 때문에 공차운행시간을 작게 예측한다. 본 논문에서 제시된 모형 또한 공차운행시간을 작게 예측하고 있지만 그 오차의 크기가 타 모형보다 작다는 것을 알 수 있다.

앞에서 언급된 대로 근거리 차량 모델에서는 AGV의 댓수 변화에 따라 제시된 모델의 정확도가

달라진다. [그림 6]은 AGV의 댓수를 6 대에서 12 대 까지 변화 시키면서 각 모델을 비교한 것이다. AGV가 6대인 경우는 AGV 이용율이 92.6% 이고, 12대인 경우는 32.8 %이다. 그림에서, 본 연구에서 제시된 모형은 AGV의 댓수가 변함에 따라 공차운행 시간에 대하여 시뮬레이션 결과치와는 약간의 차이를 갖고 근사적으로 따라감을 볼 수 있다. 기존의 대부분의 방법들은 AGV 댓수와는 무관하게 공차 운행 시간을 일정하게 예측하고, KOBZA 모델만 AGV 댓수의 변화에 따라 예측치를 변화시키나 항상 모든 AGV가 가용 한 상태라고 가정하기 때문에 공차 운행 시간을 작게 예측한다. [그림 6]은 AGV의 댓수가 적은(6대) 경우, 즉 AGV 이용율이 높은 경우는 EGBELU 모형이 비교적 정확한 예측치를 보이고 있다. 이는 AGV의 이용율이 높은 경우는 운반요구가 발생할 때 둘 이상의 AGV가 동시에 유휴 상태로 있을 확률이 적어지고 따라서 현재 유휴 중인 한대의 AGV, 또는 앞으로 가장 먼저 유휴상태로 될 AGV가 운반을 담당하게 되므로 해당 AGV의 상대적인 위치는 어떤 장소에서 AGV가 유휴 상태로 될 확률에 따라 결정된다. 이러한 가설을 이용한 것이 EGBELU 모형이고 따라서 AGV의 댓수가 적을 때 (즉, 이용율이 높을 때) 오차가 적다. 유휴 AGV의 댓수가 많은 (11대, 12대) 경우는 KOBZA 모형의 예측치가 비교적 정확함을 볼 수 있다. 이는 AGV의 상대적 위치를 고려하는 KOBZA 모형이 모든 AGV가 항상 가용하다는 가정을 두고 있는데, AGV의 수가 많으면 이용



[그림 6] AGV 댓수의 변화에 따른 여러 모델들의 공차시간 예측 비교

율이 작아져 KOBZA의 가정과 가까워지기 때문이다. 그러나, 이 경우는 AGV 이용율이 약 35 %로 매우 낮아서 현장에서는 일반적으로 이보다 높은 AGV 이용율을 유지하려고 한다. [그림 6]은 전체적으로 운영하는 AGV의 수에 따라 제시된 모델의 정확도가 차이가 나지만 기존의 타 방법보다 그 차이가 적음을 보여준다.

## 6. 결 론

AGV 운행 시간은 적재운행시간과 공차운행시간으로 크게 구성되어 있다. 적재운행시간은 비교적 용이하게 계산될 수 있지만 공차운행시간은 여러 가지 요소에 의해 영향을 받고 그 임의성과 복잡성 때문에 분석적인 방법에 의한 계산이 상대적으로 어렵다. 따라서 기존의 AGV 운행시간 모델링에 대한 연구에서는 주로 적재운행시간의 일정한 비율로서 공차운행시간을 다루었다. 많은 연구들이 제한된 차량할당정책 하에서 또는 정적인 상황 하에서의 시간모형을 제시하여 그 적용 범위에 많은 한계가 있었다. 공차운행이 물류시스템의 설계에서는 중요한 변수이기 때문에 좀더 정확하고 신속한 방법이 요구된다.

Rajotia 외(1998)는 공차운행에 대한 정확한 예측은 시스템의 동적인 상황 때문에 시뮬레이션을 통해서만이 가능하다고 지적하고 있다. 그러나 시뮬레이션은 모델링이 복잡하고 결과를 얻기 위해서는 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 새로운 확률적인 접근법에 의해 AGV 운행시간 예측을 위한 모델을 제시하였다. 특히 일반적으로 널리 사용되는 근거리 할당정책 하에서의 차량이동 시간모형을 제시하였고 그 결과를 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 또한 최장유휴차량 할당정책과 최소이용차량 할당정책에서의 차량이동시간이 기존의 임의차량 할당정책을 이용하여 추정될 수 있음을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

본 연구에서는 주로 운반 요청이 있는 경우 설비가 AGV를 선택하는 설비주도 할당정책에 대하여 차량 이동시간 모형을 개발하였다. 여러 대의 AGV가 운영되거나 AGV의 이용율이 높지 않은 경우에 대부분 이 전략을 이용하지만 AGV의 이용율이 높고 대수도 작은 경우에는 차량이 주도하는 할당정책을 이용하는 경우가 자주 발생할 것이다. 따라서 이와 같은 차량이 주도하는 경우의 차량이동 모형을 대한 연구가 향후 추가로 요구된다. 또한 AGV가 유휴 상태로 되었을 경우 유휴차량의 대기위치 결정방법에 따른 시간모형을 제시하는 것도 향후 연구 과제이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 구평희, 장재진, 이승우, "제조시스템에서의 대기시간을 고려한 무인운반차량 대수결정", 「대한산업공학회 99 추계학술대회 논문집」 (1999), pp.451-454
- [2] 김재연, 김갑환, "무인운반차시스템에서의 유휴차량 대기위치 결정방법에 대한 시뮬레이션 연구", 「대한산업공학회지」, Vol.25, No.4 (1999), pp.421-436
- [3] Egbelu, P.J., "The use of non-simulation approaches in estimating vehicle requirements in an AGV-based transport system", *Material Flow*, Vol.4, No.1 (1987), pp.17-32
- [4] Kobza, J.E, Shen, Y-C. and Reasor, R.J, "A stochastic model of empty-vehicle travel time and load request service time in light-traffic material handling systems", *IIE Transactions*, Vol.30, No.(1998), pp.133-142.
- [5] Mahadevan, B. and Narendran, T.T., "Design of an AGV-based material handling system for a flexible manufacturing system, *International Journal of Production Research*", Vol.28, No.9 (1990), pp.1611-1622.
- [6] Mahadevan, B. and Narendran, T.T., "Esti-

- mation of number of AGVs for a flexible manufacturing system; an analytical model, *International Journal of Production Research*", Vol.31, No.7 (1993), pp.1655-1670.
- [7] Maxwell, W.L. and Muckstad J.A., "Design of AGV systems, *IIE Transactions*", Vol.14, No.2 (1982), pp.114-124.
- [8] Rajotia, S., K. Shanker and J.L. Batra, "Determination of optimal AGV fleet size for an FMS, *International Journal of Production Research*", Vol.36, No.5 (1998), pp.1177-1198.
- [9] Sinriech, D. and Tanchoco, J.M.A., "Impact of empty vehicle flow on performance of single-loop AGV systems", *International Journal of Production Research*, Vol.30, No.10 (1992), pp. 2237-2252.