생산주기를 활용한 AGV 운용에 관한 연구*

김 지 표**

A Study on the AGV Operation Using Production Cycle Time*

Jipyo Kim**

Abstract

The ever-growing demands for more responsiveness and more flexibility in manufacturing generate greater expectation for the AGV system. So far, a significant amount of research has been carried out to fulfill those requirements. However, the dynamic characteristics of manufacturing systems make it hard to solve the problem analytically. In this paper, the AGV system is analyzed in the production environments which adopt a cycle time to produce materials. The use of the cycle time could eliminate much of uncertainty inherent in the manufacturing process so that it is possible to build the deterministic model for the AGV systems, which eventually produce better results on the important issues such as AGV dispatching, determination of the number of AGVs, and empty vehicle travel time.

Keyword : production cycle time, AGV system, dispatching, empty vehicle travel

1. 서 론

생산시스템 자동화와 관련되어 가장 주목받는 물자운반 도구로써 무인운반차(AGV : automated guided vehicle)를 들 수 있다. AGV는 그 유연성과 청정성으로 생산현장의 물자운반에 인기가 있을 뿐만 아니라, 주 컴퓨터와의 지속적인 교신으로 운반중인 물자의 종류, 수량, 위치 등과 같은 정보를 실시간으로 파악할 수 있기 때문에 신속한 물자운반 뿐만 아니라 효율적인 재고관리를 통하여 생산성

논문접수일 : 2001년 12월 15일 논문게재확정일 : 2002년 2월 14일
* 이 논문은 서울산업대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.
** 서울산업대학교 산업정보시스템공학과

향상에 기여할 수 있다. 따라서 미래에 이상적인 무인 생산시스템이 실현 될 경우 AGV가 물자운반 시스템의 중추적인 역할을 하리라 예상되고 있다.

AGV시스템의 성능 향상을 위하여 많은 연구가 진행되고 있는 데 이러한 연구의 방향은 대략적으로 AGV시스템의 설계와 운용 및 통제에 관한 부분으로 구분된다. 설계 부문에서는 AGV의 유도경로 및 운행방향, 작업장에서의 상·하차 위치의 결정 등에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 운용 및 통제 부문에서는 AGV의 할당정책 및 운행 스케줄, 트래픽 통제 및 라우팅, 소요 AGV 대수 결정, 유휴차량의 대기위치 결정 등과 같은 이슈들이 다루어지고 있다. 물자운반 및 시스템 통합의 역할을 하고 있는 AGV시스템에 대한 최적해를 찾는 일은 쉽지 않기 때문에, 문제의 해결 방법으로는 수리모형을 활용한 분석적인 접근보다는 시뮬레이션이 많이 쓰이고 있다.

AGV시스템은 생산시스템의 일부분으로서 생산시스템과 함께 고려되는 것이 바람직하나 대부분의 연구가 문제의 복잡성을 고려하여 생산량 및 공정 순서 등과 같은 최소한의 생산조건으로 AGV시스템의 설계 및 분석을 행하고있다. 본 연구에서는 이와 같이 일반적으로 주어지는 조건 외에 생산 스케줄에 대한 조건, 즉 생산주기시간(production cycle time)을 고려를 하여 AGV 운용에 대한 분석을 하고자 한다.

많은 생산작업의 경우, 특히 조립작업의 경우는 주어진 시간에 계획된 작업량을 생산하기 위하여 작업에 대한 일정계획 및 기준을 가지고 있으며, 이러한 것들은 시간 당 생산율 혹은 주기시간으로 표현된다. 주기시간을 갖는 생산시스템의 경우, 각 작업장에 대한 작업량의 균등한 배분이 가능하며 이는 인력, 장비, 시간 등의 적절한 배분 및 배치를 통한 효율적인 생산활동을 의미한다. 또 주기시간을 통해 작업장 별 공정시간에 대한 예측이 가능해져 보다 효과적인 물자운반을 할 수가 있다.

AGV시스템을 복잡하게 만드는 이유 중에 하나는 동적인 작업환경에 대한 고려이며, 이는 대부분의 연구를 시뮬레이션에 의존하게 하는 원인이 되고 있다. 동적인 환경을 제공하는 요인 중에는 각 작업장에 운반되는 작업물의 도착시간 및 공정시간, AGV 이동시간에 대한 불확실성, 작업순서의 변경 및 작업 추가, AGV의 기능장애와 통로상에서의 교착상태 등과 같은 것들이 있다. 이 중에서 작업장에 운반되는 작업물의 도착시간 및 작업완료 시간에 대한 조건이 시스템 분석에서 가장 많이 고려되고 있으며, 일반적으로 확률분포를 가정하여 문제를 모형화하고 있다. 반면, 생산 주기시간을 활용하면 공정에 대한 구체적인 일정을 생성해낼 수 있기 때문에, AGV시스템 분석 시 AGV 운용의 불확실성 요인들을 제거할 수 있다. 본 연구에서는 적정 주기시간의 설정을 통하여 작업물 도착시간과 공정시간을 예측하고, 이에 따른 AGV 소요대수 결정, AGV 할당정책, 공차운행 시간 최소화 및 유휴차량의 대기위치 문제 등에 대한 해결책을 제시하고자 한다.

2. 기존연구

AGV 운용에 대한 연구를 생산계획 문제와 구체적으로 연결시켜서 수행한 경우는 매우 드물다. 여기서는 AGV 운용에 관한 이슈를 분석 환경을 중심으로 살펴본다. Maxwell과 Muckstadt[7]는 일일 작업을 수행하기 위해서 필요한 총 AGV 운행 시간을 AGV 가용시간과 비교하여 AGV 소요 대수를 결정하였으며, 할당정책은 AGV의 균등한 활용을 통한 교착과 소요공간을 줄이는 방향으로 논의가 되었으며, 이 때 사용한 작업량은 단순히 각 장업장 간에 운반되어야할 양을 나타내는 from-to chart로 표시하였다. Tanchoco 등[9]은 수리적 모델인 CAN-Q에서 얻는 AGV 소요 대수를 시뮬레이션의 입력 데이터로 활용하여 AGV 대수를 산정 하였고, 분석을 위한 입력 데이터로는 부품별 작업 순서가 주어졌으며 각 작업장에서의 작업시간은 지수분포로, 작업물은 30분 간격으로 작업장에 도착함을 가정하였다. Mahadevan과 Narend-

ran[5, 6]도 역시 하루(one shift)에 할당된 작업량 운반에 필요한 AGV 소요 시간을 추정하여 AGV 가용 시간으로 나누어 AGV 소요대수를 구하였고, 분석에 사용된 데이터는 from-to chart와 대체 가능한 2개의 공정계획, 작업물에 따른 작업장별 공정시간이 주어졌으며 이를 활용하여 작업장간 작업물이 이동할 확률을 계산하였다.

Bozer와 Srinivasan[2]는 AGV 유도 경로를 여러개의 루프로 나누고 각 루프를 하나의 AGV가 담당하는 tandem AGV시스템을 제안하였으며, 여기서는 작업물별 작업장 라우팅 순서와 시간당 작업량을 가정하여 제안한 시스템의 성능 분석을 하였다. Klein과 Kim[4]은 AGV 할당 정책을 실험하는 연구에서 작업물의 도착시간으로 연속 일양분포를 가정하였으며 작업장에서의 공정시간은 일정하다고 보았다.

그밖에 유휴차량의 대기위치 결정방법에 대한 연구에서 김재연과 김갑환[1]은 고정대기위치 방법과 새롭게 유휴차량이 생겼을 때마다 새롭게 대기위치가 바뀌는 동적 대기위치 방법을 제시하였으며, 각 방법의 성능을 작업물의 도착시간 간격은 지수분포를 따르며 작업장별 가공시간은 연속 일양분포를 따르는 가정 하에서 비교하였다. Bruno 등[3]은 유휴차량이 발생할 때마다 location-allocation 문제를 풀어서 새롭게 대기위치를 결정하는 방법을 제시하였으며 역시 작업물의 도착시간 간격이 지수분포를 따르는 환경 하에서 제시한 방법의 성능 비교를 하였다.

3. 생산주기시간

3.1 생산시스템의 정의

AGV와 관련된 많은 연구들이 새로운 방법론을 제시하고, 성능에 대한 분석을 위하여 시뮬레이션에 많이 의존하고있다. 수리적인 모형을 제시한 경우에도 최적해에 대한 증명보다는 시뮬레이션의 결과와 비교하여 해의 우수성을 보여주는 경우가 대부분이다. 이러한 이유 중의 하나는 AGV 생산시스템의 복잡성뿐만 아니라 작업장에서 일어나는 동적인 상황을 수리적으로 적절히 표현하기가 쉽지 않기 때문이다.

AGV의 운용에 대한 연구의 경우 동적이며 불확실한 생산환경에 대한 표현으로 작업물의 작업장 도착시간과 작업장에서의 부품별 작업시간에 대한 확률분포의 적용이 대표적이다. 일반적으로 작업시간 혹은 작업물의 도착간격에 대한 분포로 기하분포나 연속 일양분포를 많이 사용하고 있으며 분석의 용이함을 위하여 그 밖의 동적요인들, 예를 들면 AGV 운행속도, 작업물 상하차 시간, AGV의 운행경로 등은 일정하다고 가정하고 있다.

본 연구에서는 AGV 운용분석 시 생산주기시간을 고려하면 생산환경에서 이러한 동적인 요인들을 제거할 수 있다는 점을 이용하여 AGV시스템을 분석하고자 한다. 실제로 AGV시스템은 생산시스템의 부분집합으로 서로 밀접한 연관성을 가지고 있기 때문에 같이 고려가 되어야 함에도 분석의 어려움으로 인하여 AGV시스템에 대한 많은 연구가 생산환경에 대한 최소한의 가정으로 이루어져 왔다.

본 연구에서 한 종류의 작업물에 대한 공정을 처리하는 생산시스템을 가정한다. 작업물은 생산/조립 라인에 들어와서 작업장을 거치면서 필요한 작업을 받고 라인을 떠난다. 하루(one shift)에 주어진 작업량이 있으며 작업은 주기시간(cycle time)에 맞추어서 이루어진다. 주기시간은 생산능력 및 일정을 고려하여 결정이 되며, 일단 결정이 되면 모든 작업이 주기시간을 중심으로 진행이 되기 때문에 작업형태는 확정적 모형으로 표현이 될 수 있다. 따라서 작업장간의 물자운반을 하는 AGV 운용 형태에 대한 예측이 가능하게 된다.

3.2 생산주기시간의 결정

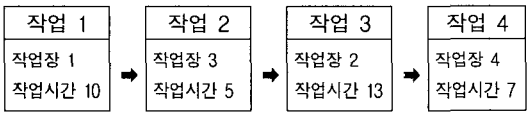
생산작업은 생산계획으로부터 시작이 되며, 생산계획을 수립하는 과정은 장기생산계획으로부터 시작하여 연간, 월간, 그리고 일간계획으로 세분된

다. 일반적으로 생산계획은 대일정계획(MPS)이 중심이 되며, 그 기간은 생산기간, 구매, 생산능력 변동에 따라 다르지만, 적어도 1개월이고 경우에 따라서는 2, 3개월이 될 수도 있다. 따라서 월중 생산계획이 확정되면 월간 필요생산량을 월간 작업일수로 나누어서 매일의 생산율을, 또 하루 생산량을 하루 작업시간으로 나누어 단위 시간당 생산율을 결정하며, 이 비율은 한달 동안 일정하게 유지된다. 일반적으로 월중 생산계획이 확정되면 매일 매일의 생산계획에는 변동이 없고, 구성품에 대한 수요가 규칙적으로 발생하며, 특정 최종품목의 조립계획이 규칙적으로 이루어진다.

일간 생산계획이 수립이되면 생산을 평준화하는 다음 단계로써 각 라인에 필요한 생산주기시간을 결정할 수 있다. 주기시간은 아래 공식을 이용하여 계산할 수 있으며, 이는 단위 시간당 생산율의 역수가 된다.

$$\text{주기시간} = \frac{\text{일간 작업시간}}{\text{일간 필요생산량}}$$

안정된 일정계획과 생산의 평준화는 효율적인 생산시스템 운영에 필수적인 요인이 되고있다. 생산을 평준화하려는 이유는 최종조립을 지원하는 모든 선행작업장에 균일한 부하를 유지하여 생산의 원활한 흐름을 달성하려는 것이다.



[그림 1] 작업물의 조립공정(단위 : 분)

[그림 1]은 어떤 작업물의 조립공정를 보여주고 있다. 공정은 4개의 작업으로 구성되며 필요한 작업을 수행하기 위해서 4개의 작업장을 거쳐야한다. 이 공정의 최대 작업시간은 작업장 2에서의 13분이므로 최소 주기시간 C는 13분이 되며, 하루 작업시간이 480분이라고 할 때 480/13 = 36.9개, 즉 36개를 생산해 낼 수 있다. 반면에 하루 생산량이 주어질 경우, 예를 들어 30개라고 할 때 주기시간은 C = 480 / 30 = 16이 되어 매 16분마다 한 개씩 작업물이 생산이 된다.

n : 작업의 수

m : 작업장의 수

t_i : 작업 i의 작업시간(i = 1, 2, …, n), $t_i \le C$이라 하고, 각 작업장에서는 하나의 작업만 수행된다고 할 때, 즉 m = n일 때, 작업라인의 효율(E_L)과 작업장 i의 효율(E_{Wi})은 다음과 같이 정의된다.

$$E_L = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{C \cdot m} \times 100$$

$$E_{w_i} = \frac{t_i}{C} \times 100$$

위 정의를 이용하면 C = 16일 때 [그림 1]의 작업라인 효율은 아래와 같다.

$$E_L = \frac{10+13+5+7}{16 \times 4} \times 100 = 54.7(\%)$$

<표 1>은 C = 16일 때 각 작업장별 효율을 정리한 것이다. 여유시간($S_i = C - t_i$)은 각 작업장에서 작업을 마치고 다음 작업장으로 작업물을 이동시키기까지 남는 시간이다.

〈표 1〉 작업장별 효율 및 여유시간

	작업시간 (t_i)	주기시간 (C)	여유시간 (S_i)	작업장 효율 (E_{wi})
작업장 1	10	16	6	10/16 = 63%
작업장 2	13	16	3	13/16 = 81%
작업장 3	5	16	11	5/16 = 31%
작업장 4	7	16	9	7/16 = 44%

주기시간의 결정은 하루 필요 작업량뿐만 아니라 각 작업장에서의 여유시간을 고려하여 정해질 수 있으며, 각 작업장에서는 이 여유시간을 통해서 작업시간의 변동요인을 흡수할 수 있다. 주기시간에 따른 생산형태를 AGV 운용 측면에서 살펴보면, 작업장에서는 주기시간 마다 작업물이 도

착하므로 작업물 도착시간에 대한 불확실성을 제거할 수 있으며, 각 작업장에서의 불규칙한 작업시간에 대한 문제 또한 여유시간을 활용하여 해결할 수 있다. 즉, 각 작업장의 여유시간 중 최소 여유시간(위의 예에서는 작업장 2의 여유시간 3분)을 작업시간의 최대 변동폭보다 크게 정하면, 작업물이 모든 작업장에서 주기시간 안에 작업을 마치고 다음 작업장으로 이동할 수 있게된다. 따라서 주기시간이 있는 생산시스템에서는 작업물의 도착시간과 작업시간에 대한 불확실성 요인들에 대한 예측을 할 수 있기 때문에 보다 효율적인 AGV 운용이 가능해 질 수 있다.

4. AGV 운용 모델

본 연구에서의 AGV 운용 모델은 주기시간을 바탕으로 한 생산시스템을 기초로 하며, 각 부품은 독립된 공정라인이 있다고 가정하여, 하나의 공정라인을 갖는 작업물의 운반에 따르는 AGV 운용을 분석하였다. 또한 AGV의 작업장간 이동은 최단거리를 따른다고 보았다. 다음은 AGV 운용 분석에 사용되는 기호에 대한 정의이다.

k : 하루(one shift) 필요 작업량
m : 작업장수 ; $m < k$
W_i, : 작업물이 방문하는 작업장 중 i번째 작업장($i = 1, \cdots, m$) ; 따라서 W_1은 첫 번째 작업이 시작되는 작업장이고 W_m은 마지막 작업이 수행되는 작업장이다.
t_{ij} : 작업장 i와 j 사이의 AGV 이동시간
p_i : 작업장 i에서의 작업시간
S_i : 작업물의 작업장 i에서의 여유시간, 즉, $S_i = C - p_i$

4.1 AGV 할당 규칙(AGV dispatching rules)

효율적인 AGV 운용을 위해서는 적절한 AGV 할당 규칙이 필요하다. AGV 할당 규칙과 관련된 작업장 규칙을 살펴보면 다음과 같다.

i) 각 작업장에 작업물은 주기시간(C)마다 도착하며, 최대한 주기시간 만큼의 공정 수행시간을 가질 수 있다.
ii) 작업물에 대한 작업이 끝났을 경우는 작업물은 output buffer에 놓여지고 다음 작업장으로 이동을 기다린다. 이 때 AGV를 기다리는 시간은 작업장에서의 여유시간과 같다. 즉, 각 작업장에서는 작업물이 도착한 후 C 시간이 지나면 물자운반을 요청하게 된다.
iii) AGV의 할당은 작업장의 작업물 이동 요청 순서(FCFS)에 따른다.

위의 규칙에 따르면 각 작업장의 작업물 도착시간은 작업장 순서에 따라서 주기시간과 이동시간만큼 차이가 있게되며, 공정 스케줄이 확정적 성격을 갖게 됨으로써 작업 및 이동에 따른 스케줄을 사전에 산정 할 수 있다. <표 2>는 작업물에 따른 각 작업장에서의 작업 및 이동 스케줄을 보여주고 있다. S는 작업장에서의 작업시작시간, F는 작업완료시간, V는 작업물 적재(pickup)를 위한 AGV의 작업장 도착시간, T는 다음 작업장으로의 이동시간을 의미한다. 예를 들면 두 번째 작업장(W_2)의 세 번째 작업물의 경우 작업의 시작시간(S)은 $(3C + t_{12})$, 작업완료시간(F)은 $(3C + t_{12} + p_2)$, AGV 도착시간(V)은 $(4C + t_{12})$이며, 다음 작업장(W_3)으로 이동시간(T)은 t_{23}이다.

<표 2>를 자세히 살펴보면 다음과 같은 AGV 운행의 중요한 특징을 발견할 수 있다. W_1과 W_m을 제외하고 각 작업장에서는 선행 작업물의 적재를 위한 AGV 도착시간과 후속 작업물의 작업시작 시간이 일치한다. 즉, 작업장 i에서 j번째 작업물의 적재시간과 (j + 1)번째 작업물에 대한 작업시작시간을 각각 $V_{i,j}$와 $S_{i,j+1}$이라고 하면, 이 들의 값은 다음과 같다.

〈표 2〉 작업 및 운반 스케줄

작업장 순서 \ 작업물 번호		1	2	3	…	m	m+1	…	k
W_1	S	0	C	2C	…	(m-1)C	mC	…	(k-1)C
	F	p_1	C+p_1	2C+p_1	…	(m-1)C+p_1	mC+p_1	…	(k-1)C+p_1
	V	C	2C	3C	…	mC	(m+1)C	…	kC
	T	t_{12}	t_{12}	t_{12}	…	t_{12}	t_{12}	…	t_{12}
W_2	S	C+t_{12}	2C+t_{12}	3C+t_{12}	…	mC+t_{12}	(m+1)C+t_{12}	…	kC+t_{12}
	F	C+t_{12}+p_2	2C+t_{12}+p_2	3C+t_{12}+p_2	…	mC+t_1+p_{22}	(m+1)C+t_{12}+p_2	…	kC+t_{12}+p_2
	V	2C+t_{12}	3C+t_{12}	4C+t_{12}	…	(m+1)C+t_{12}	(m+2)C+t_{12}	…	(k+1)C+t_{12}
	T	t_{23}	t_{23}	t_{23}	…	t_{23}	t_{23}	…	t_{23}
W_3	S	2C+t_{12}+t_{23}	3C+t_{12}+t_{23}	4C+t_{12}+t_{23}	…	(m+1)C+t_{12}+t_{23}	(m+2)C+t_{12}+t_{23}	…	(k+1)C+t_{12}+t_{23}
	F	2C+t_{12}+t_{23}+p_3	3C+t_{12}+t_{23}+p_3	4C+t_{12}+t_{23}+p_3	…	(m+1)C+t_{12}+t_{23}+p_3	(m+2)C+t_{12}+t_{23}+p_3	…	(k+1)C+t_{12}+t_{23}+p_3
	V	3C+t_{12}+t_{23}	4C+t_{12}+t_{23}	5C+t_{12}+t_{23}	…	(m+2)C+t_{12}+t_{23}	(m+3)C+t_{12}+t_{23}	…	(k+2)C+t_{12}+t_{23}
	T	t_{34}	t_{34}	t_{34}	…	t_{34}	t_{34}	…	t_{34}
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
W_i	S	(i-1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$	iC+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$	(i+1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$	…	(m+i-2)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$	(m+i-1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$	…	(k+i-2)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$
	F	(i-1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$+p_i	iC+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$+p_i	(i+1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$+p_i		(m+i-2)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$+p_i	(m+i-1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$+p_i	…	(k+i-2)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$+p_i
	V	iC+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$	(i+1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$	(i+2)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$	…	(m+i-1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$	(m+i)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$	…	(k+i-1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{i-1,i}$
	T	$t_{i,i+1}$	$t_{i,i+1}$	$t_{i,i+1}$	…	$t_{i,i+1}$	$t_{i,i+1}$	…	$t_{i,i+1}$
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
W_m	S	(m-1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{m-1,m}$	mC+t_{12}+t_{23}+…+$t_{m-1,m}$	(m+1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{m-1,m}$	…	(2m-2)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{m-1,m}$	(2m-1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{m-1,m}$	…	(m+k-2)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{m-1,m}$
	F	(m-1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{m-1,m}$+p_m	mC+t_{12}+t_{23}+…+$t_{m-1,m}$+p_m	(m-1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{m-1,m}$+p_m	…	(2m-2)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{m-1,m}$+p_m	(2m-1)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{m-1,m}$+p_m	…	(m+k-2)C+t_{12}+t_{23}+…+$t_{m-1,m}$+p_m
	T	t_{m1}	t_{m1}	t_{m1}	…	t_{m1}	t_{m1}	…	t_{m1}

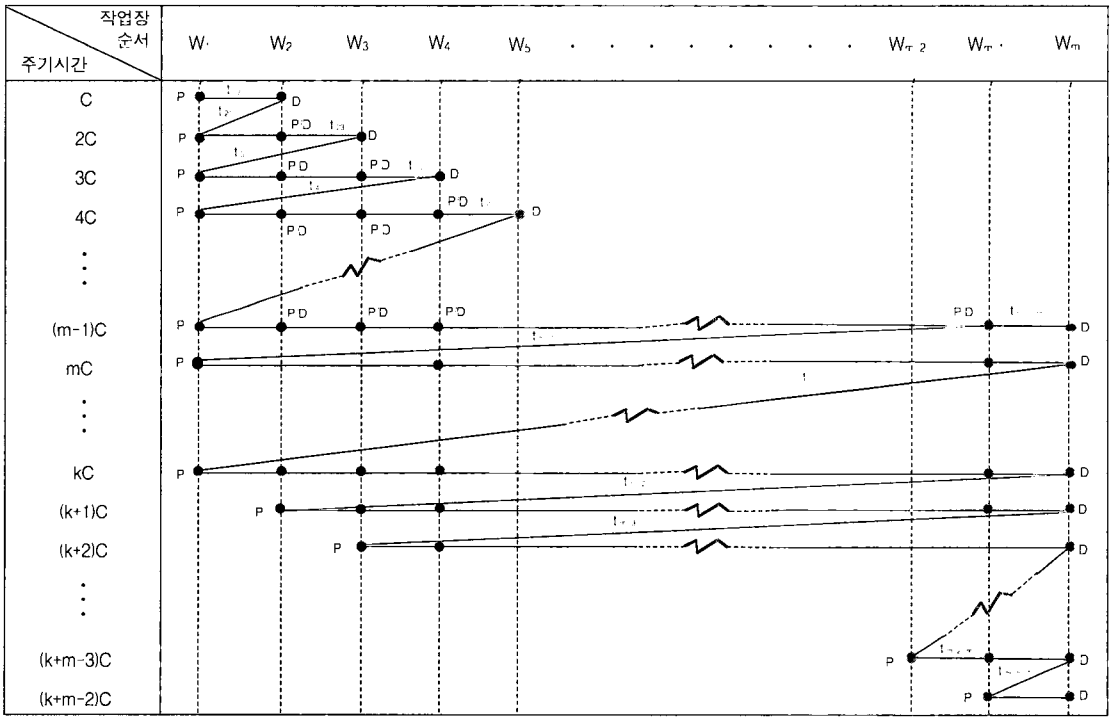
$$V_{ij} - S_{i,j-1} = \{(i-1)+j\}C + t_{12} + t_{23} + \cdots + t_{i-1,i},$$
$$(i = 2, 3, \cdots, m-1 ; j = 1, \cdots, k)$$

이는 곧 i작업장에 (j + 1)번째 작업물을 운반한 AGV가 작업이 완료된 j번째 작업물을 싣고 바로 (i+1)번째 작업장으로 이동할 수 있음을 의미하며, 이러한 현상은 (i + 1)번째 작업장에서도 반복된다. 따라서 AGV가 첫 번째 작업장에서 작업물을 싣고 출발하면 최종 작업장에 도달할 때까지 작업장 순서대로 계속 작업물을 운반 할 수 있게되며, 오직 첫 번째 작업장에서만 작업물을 기다리는 경우가 발생된다. 이러한 현상은 AGV 운행 시 유휴차량 대기위치 문제와 함께 공차운행 문제를 획기적으로 개선할 수 있음을 시사한다.

4.2 소요 AGV 대수 결정

AGV시스템 운용에서 필요한 AGV 대수의 결정은 비용과 운용측면에서 매우 중요한 일이나 복잡한 작업환경과 가변적 요인들로 인하여 대부분의 경우 시뮬레이션을 통해서 소요 대수를 추정하고 있다. 그러나 본 연구에서는 주기시간을 고려함으로써 생산 및 AGV시스템을 확정적 모형으로 표현할 수 있기 때문에 생산작업에 필요한 최소한의 AGV 소요 대수를 산정할 수 있다.

[그림 2]는 각 주기시간 대의 AGV 이동 경로와 소요시간을 함께 설명해주고 있다. P는 작업물의 적재(pickup), D는 하역(drop off)을 나타내며, P/D는 작업장에서 하역과 적재가 동시에 일어나는 경우를 말하며, t_{ij}는 각 작업장간의 이동시간을 표시하고 있다. P는 각 주기대의 시작 점(작업장)에서, D는 끝 점(작업장)에서만 발생하며, 중간 작업장에서는 P/D가 발생한다. [그림 2]에서 P와 D는 작업장에 모두 표시가 되어 있으며, P/D는 지면관계로 일부만 표시되고 나머지는 생략이 되어있다.



[그림 2] 주기시간 대에 따른 AGV 이동 경로

AGV의 이동 경로를 살펴보면, AGV는 W_1에서 작업물을 싣고 출발한 후 공정 순서대로 작업장을 방문하여 작업물을 운반하며, 다음 작업장으로 운반해야 할 작업물이 없을 경우 다시 처음 작업장(W_1)으로 돌아와 이동을 기다리는 일련의 순환경로를 거친다. 즉 첫 작업물이 공정을 다 끝내고 최종 작업장을 떠나기 전까지는 $(W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow W_1)$, $(W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow W_3 \rightarrow W_1)$, $\cdots$, $(W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow \cdots \rightarrow W_{m-1} \rightarrow W_1)$의 경로를 거치며, 작업이 안정화가 된 후에는 작업장 W_1에서 작업이 더 이상 없을 때까지 $(W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow \cdots \rightarrow W_m \rightarrow W_1)$의 경로로 작업물을 이동한다. 각 작업장에서 주어진 작업량을 완료해 감에 따라서 $(W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow \cdots \rightarrow W_m \rightarrow W_2)$, $(W_2 \rightarrow W_3 \rightarrow \cdots \rightarrow W_m \rightarrow W_3)$, $\cdots$, $(W_{m-2} \rightarrow W_{m-1} \rightarrow W_m \rightarrow W_{m-1})$, $(W_{m-1} \rightarrow W_m)$의 경로로서 하루의 작업을 끝마치게 된다.

정리 : A_i를 AGV가 $(W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow W_3 \rightarrow \cdots \rightarrow W_i \rightarrow W_1)$의 경로로 이동한다고 할 때 걸리는 이동시간이라 하면, 즉

$$A_i = t_{12} + t_{23} + \cdots + t_{i-1,i} + t_{i,1} = \sum_{j=1}^{i-1} t_{j,j+1} + t_{i,1}$$

이라고 할 때 A_i는 다음 조건을 만족한다.

$$A_i \geq A_{i-1}, \ (i = 2, \cdots, m)$$

증명) 만약에 $A_i < A_{i-1}$ 이라고 하면,

$$t_{12} + t_{23} + \cdots + t_{i-2,i-1} + t_{i-1,i} + t_{i,1} < t_{12} + t_{23} + \cdots + t_{i-2,i-1} + t_{i-1,1} \Rightarrow t_{i-1,i} + t_{i1} < t_{i-1,1}$$

그런데 $t_{i-1,1}$은 (i-1)번째 작업장에서 첫 번째 작업장으로의 최단거리 이동시간이므로 가정에 모순이 된다. 따라서 $A_i \geq A_{i-1}$ 이 성립한다. □

위의 정리에 따르면 A_m은 각 주기대의 AGV 순환경로 중 최장 경로가 되며, 이를 바탕으로 소요 AGV 대수 결정에 관한 조건을 살펴보면 다음과 같다.

i) AGV가 한 대 필요한 경우

$$A_m = t_{12} + t_{23} + \cdots + t_{m-1,m} + t_{m,1} \leq C$$

AGV 한 대로서 하루 동안의 필요한 물자 이동요구를 다 만족시킬 수 있음을 의미한다. 즉, AGV가 주기시간 C 안에 운반작업을 마치고 공차로 다시 처음 작업장(W_1)에 도달할 수 있기 때문에 W_1에서의 물자 이동요구를 만족시킬 수 있다.

ii) AGV가 두 대 필요한 경우

$$C < t_{12} + t_{23} + \cdots + t_{m-1,m} + t_{m,1} \leq 2C$$

이 경우는 AGV가 주기시간 안에 $(W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow \cdots \rightarrow W_m \rightarrow W_1)$의 운반 경로를 끝마치지 못하는 경우로써, AGV가 작업 순서에 따라서 이동 중에 첫 번째 작업장(W_1)에서 물자이동 요구가 발생하는 경우로, 이동 중인 AGV는 계속 진행 중인 경로를 따르며 새로운 AGV는 다음주기 대의 W_1에 투입되어 작업물을 운반한다.

iii) AGV가 n대 필요한 경우

$$(n-1)C < t_{12} + t_{23} + \cdots + t_{m-1,m} + t_{m,1} \leq nC$$

n대의 AGV가 각 주기시간 대에 차례로 W_1에 투입이 되어 작업물을 운반한다. 이 경우는 작업장 간 이동에 많은 시간이 소요되어 n번째 AGV가 W_1에 투입될 때까지 첫 번째로 출발한 AGV가 W_1에 귀환하지 못하는 경우이다. AGV는 작업물 운반을 끝내고 W_1에 되돌아오는 순서대로 다음 작업물을 싣고 순환경로를 시작한다.

AGV를 활용하는 물류시스템 설계에서 적정 AGV 수의 결정은 항상 중요한 문제로 간주되고 있기 때문에 다양한 조건과 가정하에서 최적의 AGV 대수 결정을 위한 연구가 진행되고 있다. 비용 절감을 위해서는 최소의 AGV 대수로 주어진 운반 작업을 처리하는 것이 바람직 하나 실제 상

황에서는 AGV의 유지보수 및 고장율을 고려할 때 AGV 활용율의 극대화보다는 상황에 맞는 적절한 AGV 대수 결정이 더 중요하다.

위의 조건을 이용하여 산정한 AGV 소요 대수는 주기시간을 따르는 AGV시스템의 운용을 위해서 필요한 최소한의 AGV 대수이다. 최적의 AGV 대수 결정이 실제적으로 어려운 상황에서 AGV의 최소 필요 대수는 적절한 AGV 대수 결정에 중요한 참고 기준이 될 수 있을 것이다.

4.3 공차 운행시간

AGV 운행시간은 적재운행시간과 공차운행시간으로 구분될 수 있다. 적재운행시간은 운반되어야 할 물건이 차량에 적재되어 이동되는 시간을 말하며 작업장간의 이동을 최단거리 기준으로 할 때는 쉽게 구할 수가 있다. 반면에 공차운행시간은 AGV가 하나의 운반 작업을 마친 후에 다른 곳에서 운반 요구가 있을 때 해당 작업물을 적재하기 위하여 공차상태로 이동하는 시간을 말하며 일반적으로 다음 작업의 요구가 항상 하역 한 장소에서 발생하지 않고, 운반 요구 또한 규칙적이지 않기 때문에 공차운행시간에 대한 예측이 상대적으로 어렵다.

이러한 이유로 공차 운행에 대한 고려가 많은 연구에서 무시되어왔으나 실제로 공차운행시간은 AGV 활용율 및 트래픽 통제 등과 같은 AGV시스템의 운영의 효율성 측면에서 매우 중요한 역할을 하기 때문에[8] 물류시스템의 계획과 분석시 반드시 추정이 되어야 한다.

본 연구에서 제시한 주기시간에 따른 AGV시스템에서는 AGV의 공차운행시간이 정확히 산정될 수 있다. 또한 앞 절에서의 AGV 운행시간 분석에서도 보았듯이 작업장에서 작업물의 하역과 적재가 동시에 이루어지게 하는 AGV 할당정책으로 공차운행이 획기적으로 감소될 수 있다. 하루 생산량이 k개이고 작업장 수가 m개인 경우 AGV의 총 공차운행시간 T_e는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$T_e = (t_{21} + t_{31} + \cdots + t_{m\,1,1}) + (k-m+1)t_{m,1} + (t_{m,2} + t_{m,3} + \cdots + t_{m,m\,1})$$

[그림 2]에서 보듯이 최종 작업장(W_m)에서 첫 작업물에 대한 공정이 완료될 때까지 AGV는 과도기적인 운행을 하게되는 데, T_e에서 $(t_{21} + t_{31} + \cdots + t_{m\,1,1})$는 이 시간 동안의 공차 운행 시간의 합이다. 다음에는 $(k - m + 1)$번의 W_m에서 W_1까지의 공차운행이 필요하며, W_1 작업장에서 주어진 양의 작업이 끝나는 시점부터 AGV는 W_m에서 출발하여 $W_2, W_3, \cdots, W_{m\,1}$의 순으로 공차 운행을 하게되는 데, 이 공차운행 시간의 합이 $(t_{m,2} + t_{m,3} + \cdots + t_{m,m\,1})$이다.

위와같이 계산된 공차 운행 시간에 대한 평가를 위해 다음 두 기준을 사용한다.

4.3.1 최소 공차운행 시간과의 비교

최소공차운행시간에 대한 공차운행시간의 비율 R_e를 계산하여 공차운행시간의 수준을 평가한다. R_e의 값이 작을수록 공차운행 시간이 작음을 의미하며 같은 조건에서 AGV시스템이 더 효율적임을 의미한다. 이때, 최소공차운행시간은 다른 조건은 무시하고 오로지 공차운행시간만을 고려할 때 얻을 수 있는 최소값을 뜻한다. 즉 주어진 작업량 생산시 AGV의 대기시간을 무시하고 공차운행시간 최소화만을 고려할 경우, 하나의 작업물 운반에 필요한 최소한의 공차운행시간은 최종 작업장(W_m)에서 첫 번째 작업장(W_1)까지의 운행시간이다. 이는 공차운행을 최소화하기 위해서는 작업물을 하역한 작업장에서 작업물을 선적하여 다음 작업장으로 이동해야 하기 때문이다. 따라서 k개의 작업물을 생산한다고 할 때 필요한 최소 공차운행 시간 T_{min}은 다음과 같다.

$$T_{min} = (k-1)t_{m,1}$$

따라서 최소공차운행시간에 대한 주기시간 AGV

시스템의 공차운행시간의 비율은 다음과 같다.

$$R_e = \frac{T_e}{T_{\min}} = \frac{(t_{21}+t_{31}+\ldots+t_{m-1,1})+(k-m+1)\,t_{m,1}+(t_{m,2}+t_{m,3}+\ldots+t_{m,m-1})}{(k-1)\,t_{m,1}}$$

위 식에서 작업량 k가 소요 작업장 수 m 보다 월등히 클 때, 즉 k >> m일 때, R_e가 1의 값에 수렴하게 되며 이는 주기시간 AGV시스템의 공차운행시간이 최소공차운행시간에 근접함을 의미한다. 즉, 첫 번째와 마지막 작업장을 제외한 모든 작업장에서 적재와 하역을 동시에 할 수 있기 때문에 공차운행시간을 상당히 줄일 수 있으며, 또한 작업장의 input/output buffer 공간을 절약할 수 있다.

4.3.2 적재운행 시간과의 비교

공차운행시간을 평가하는 다른 방법 중의 하나는 적재운행시간과의 비교이다. 앞에서 언급한 바와 같이 많은 연구에서 공차운행시간 측정의 어려움으로 공차운행시간을 무시하거나 적재운행시간과 같다고 가정하고 있기 때문에 공차운행시간을 적재운행시간과 비교하는 것도 공차운행시간의 수준(Q)을 평가하는 방법이 될 수 있다. 즉,

$$Q = \frac{\text{공차운행시간}}{\text{적재운행시간}}$$ 이며,

Q의 값이 1 보다 작을 수록 효율적인 시스템을 의미한다.

따라서 주기시간 AGV시스템의 경우의 Q는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q = \frac{(t_{21}+t_{31}+\cdots+t_{m-1,1})+(k-m+1)\,t_{m,1}+(t_{m,2}+t_{m,3}+\cdots+t_{m,m-1})}{k\cdot(t_{12}+t_{23}+\cdots+t_{m-1,m})}$$

5. 결론 및 추후 연구 방향

지금까지 많은 연구가 생산량, 공정 순서 등과 같은 생산형태에 대한 최소한의 고려만으로 AGV 시스템 설계 및 분석을 행하였다. 그러나 실제로 AGV시스템은 생산시스템의 일부분으로 생산시스템의 형태와 함께 연구가 진행되는 것이 바람직하다. 본 연구는 AGV시스템 연구에서 일반적으로 주어지는 생산량 및 공정 순서에 대한 조건에다 작업시간, 즉 생산 주기시간에 대한 조건을 추가하였다. 일반적으로 생산작업의 경우, 특히 조립작업의 경우는 주어진 시간에 계획된 작업량을 생산하기 위하여 작업에 대한 일정계획 및 기준을 가지고 있으며, 이러한 것들은 시간 당 생산율 혹은 주기시간으로 표현된다. 주기시간을 통해서 각 작업장에 대한 작업량의 균등한 배분이 가능하며 또 작업장 별 작업물의 공정시간에 대한 예측이 가능해져 보다 효과적인 물자운반을 할 수가 있다.

본 연구에서는 생산일정에 대한 기준으로 주기시간이 주어졌을 경우 물자운반을 위한 AGV 운용에 대한 분석을 하였으며, 생산 주기시간을 고려함으로서 보다 효율적인 AGV 운용이 가능함을 보여주었다. 작업시간에 대한 불확실성 요인을 적절한 주기시간의 설정으로 해결하고 문제의 성격을 확정적 모형으로 바꿈으로써 AGV 운용에서 중요한 문제들에 대한 분석을 시도하였다, 즉 각 작업장에서 작업물의 도착과 AGV의 작업물 적재시간을 주기시간에 동기화 함으로 AGV 할당문제를 해결했으며, 작업장 간의 이동시간을 고려하여 AGV 대수 결정 기준을 제시하였고, 공차운행 시간을 산정 하였으며 작업량이 증가할수록 최소 공차운행 시간에 가까워짐을 보였다.

그러나 본 연구에서는 작업주기 결정을 위한 설비능력에 대한 고려를 하지 않고 주기시간이 이미 주어진 것으로 가정하였으며, 공장내에 여러 종류의 작업물이 다루어지는 경우는 서로 미치는 영향을 고려하지 않은 채 독립적인 AGV시스템을 가

정하였다. 따라서 추후 연구로서는 서로 다른 주기를 갖는 작업물이 공존하는 경우의 AGV 운용에 대한 분석이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] 김재연, 김갑환, "무인운반차시스템에서의 유휴차량 대기위치 결정방법에 대한 시뮬레이션 연구", 「대한산업공학회지」, Vol.25, No.4(1999), pp.421-436.

[2] Bozer, Y. and M.M. Srinivasan, "Tandem configurations for automated guided vehicle systems and the analysis of single vehicle loops," *IIE transactions*, Vol.23, No.1(1991), pp.72-82.

[3] Bruno, B., G. Ghiani and G. Improta, "Dynamic positioning of idle automated guided vehicles," *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.11(2000), pp.209-215.

[4] Klein, C.M. and J. Kim, "AGV Dispatching," *International Journal of Production Research*, Vol.34, No.1(1996), pp.95-110.

[5] Mahadevan, B. and T.T. Narendran,"Design of and 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 T.T. Narendran, "Estimation of number of AGVs for an FMS : an analytical model," *International Journal of Production Research*, Vol.31, No.7(1993), pp.1655-1670.

[7] Maxwell, W.L. and J.A. Muckstad,"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] Tanchoco, J.M.A., P.J. Egbelu and F. Taghaboni, "Determination of the total number of vehicles in an AGV-based material transport system," Material Flow, Vol.4(1987), pp.33-51.