

# 다부하를 운반하는 무인운반차시스템에서 운반거리의 분석\*

장 석 화

인천대학교 산업공학과

## Analysis of the Travel Distance in the Multiple-load Carrying Automated Guided Vehicle Systems

Suk-Hwa Chang

Dept. of Industrial Engineering, University of Incheon

This paper is to analyze the travel distance and the transport size of the vehicle when the AGV carries multiple-load in the tandem automated guided vehicle systems. The size of multiple-load represents the number of load that the AGV can carry simultaneously. The AGV can carry simultaneously multiple-load that load types are different. The transport system of the manufacturing system is a tandem configuration automated guided vehicle system, which is based on the partitioning of all the stations into several non-overlapping single closed loops. Each loop divided has only one vehicle traveling unidirectionally around it. The AGV of each loop has to have sufficient transport capacity that can carry all loads for given unit time. In this paper, the average loaded travel distance and the size of feasible multiple-load of the vehicle are analyzed. A numerical example is shown.

**Keywords :** AGVs, Multiple-load, Travel distance, Transport size of the vehicle

### 1. 서 언

제조시스템에서 총 운영비용의 15-70%는 자재흐름 처리와 관련된 비용으로 평가되고 있다[19]. 그리고 효율적인 설비설계와 계획은 적어도 10-30%의 비용을 절감할 수 있는 것으로 인식되고 있다. 공장운영에서 자재흐름과 관련된 문제는 비용절감을 위한 중요한 부분이다. 자재는 원자재, 반제품, 완제품 등을 나타내는 것으로 자재 흐름과 관련된 내용은 원자재 및 반제품 등이 생산에 투입되어서 완제품으로 완료되기까지 생산 중에 발생하는 운반 및 저장 등을 말한다. 그러므로 운반 및 저장에서 발생하는 비용을 줄일 수 있도록 제조시스템을 설계하고 운영하여야 한다.

제조시스템의 반송시스템을 어떻게 설계하고 운영할

것인가는 운반과 관련된 물류비용을 줄일 수 있는 중요한 요인이기 때문에 이제까지 중요한 연구대상이 되어 왔다.

유연제조시스템(Flexible Manufacturing System)에서 작업물의 운반수단으로 무인운반차시스템 Automated Guided Vehicle System(AGVS))이 많이 이용되고 있다. 무인운반차시스템은 필요한 작업물을 필요한 위치로 운반하는데 있어 유연성이 뛰어나기 때문이다. 작업물은 제조시스템에서 생산 투입에서 최종완료까지 작업장을 거치며 가공 또는 조립이 이루어지는 원자재, 부품, 반제품, 완제품 등을 총칭하여 나타낸다. 다품종 소량생산을 하는 유연제조시스템에서 공정순서와 공정시간이 다른 여러 종류의 작업물을 동시에 생산하게 된다. 작업물의 종류에 따라 공정순서가 다르기 때문에 작업물이 거치게 되

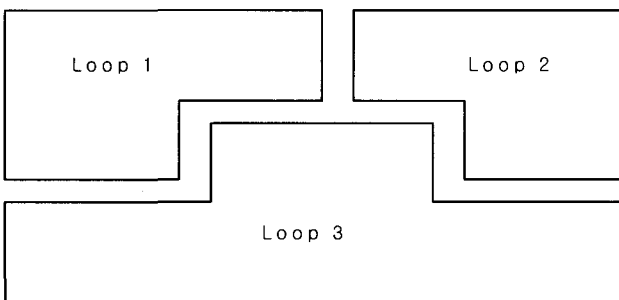
\* 본 연구는 2003년 인천대학교 교내연구비의 지원과 한국과학재단 지정 인천대학교 동북아 전자물류연구센터의 지원에 의한 것임

는 작업장의 순서가 다르다. 이와 같이 매번 pickup 및 delivery 위치가 다른 작업물을 운반하는데 있어 무인 운반차(AGV)와 같은 유연성이 우수한 운반수단이 필요하다.

제조시스템에서 작업물의 운반이 생산 활동에 병목역할을 할 가능성이 높기 때문에 이를 해소하기 위한 방법으로는 운반차의 수를 늘리는 방법, 운반능력이 큰 운반차를 이용하는 방법, 운반속도가 좀더 빠른 운반차를 사용하는 방법 등이 있을 것이다. 이 중에서 운반능력이 큰 운반차를 사용하는 방법은 동시에 많은 작업물을 운반할 수 있기 때문에 운반차의 효율적인 운영방안이 필요하다. 운반차의 운반능력이 클지라도, 운반 시마다 단일 종류의 작업물만을 운반하는 방법을 사용할 수도 있을 것이고, 또는 여러 종류의 작업물들을 동시에 운반하는 것을 허용하는 방법을 사용할 수도 있을 것이다. 운반차의 운반능력이 클 경우에 운반시마다 동일한 종류의 작업물만을 운반하는 경우는 운반차의 이동관리는 편리하지만, 운반수량이 크므로 작업장에서 작업물의 재고수준이 증가할 수 있다. 한 작업장에서 운반크기에 해당하는 만큼의 여러 종류의 작업물들을 동시에 pickup하여 운반하는 경우는 동시에 운반되는 작업물 종류가 다르기 때문에 운반차가 경유하게 되는 목적지 작업장들이 다른 여러 곳이 될 수 있다. 여러 종류의 작업물들을 동시에 운반하는 다부하(multiple-load)인 경우에 운반차의 크기에 대한 시스템의 성과에 대한 분석이 필요하다.

운반차가 동시에 운반하는 다부하의 크기에 따라서 운반차의 평균운반거리와 운반차의 사용시간이 다르다. 이를 고려하여 물류시스템의 운영에 병목역할을 하지 않은 차량의 운반크기의 결정을 필요로 한다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 직렬구조의 반송시스템으로 된 제조시스템에서 여러 종류의 작업물을 동시에 생산하고, 운반차가 여러 종류의 작업물로 구성된 다부하(multiple-load)를 동시에 운반하는 경우에 반송시스템을 분석한다. 운반차가 운반하는 다부하의 크기에 따라서 운반차의 평균운반거리, 루프에서 하나의 운반차를 사용하기 위하여 필요한 운반차의 운반크기 등을 분석한다.



<그림 1> 직렬구조의 배치

## 2. 연구배경

반송시스템의 종류는 단일루프(single loop)구조, 네트워크(network)구조, 직렬(tandem)구조 등이 있다. 기존의 많은 연구에서 운반차가 동일 종류의 작업물을 단위부하(unit load)로 운반하는 경우의 반송시스템에 대하여 다루고 있다.

네트워크 구조는 운반차가 한번에 작업물을 운반할 수 있도록 모든 작업장을 네트워크 타입으로 연결하는 것이다. 네트워크 구조로 구축하는 경우에 주로 연구된 내용은 운반차의 이동경로 결정, 필요한 최소 운반차의 수, 운반차의 dispatching 규칙, 교차로에서의 통제, pickup/delivery point의 위치 결정 등이 있다 ([4], [5], [7], [8], [9], [12], [13], [15], [20]). Egbelu[6]은 운반차로 AGV를 이용하는 제조시스템에서 운반차가 단위부하로 운반하는 상황에서 운반차의 규모와 작업장의 설비규모를 경제적으로 결정하는 문제를 다루었다.

단일구조는 모든 작업장을 하나의 루프로 연결하고 모든 운반차가 한 방향으로 이동하면서 작업물을 pickup하여 delivery 한다. 제조시스템의 모든 작업장을 하나의 루프로 연결하여 운반차가 단일루프에서 운반할 때의 문제에 대하여도 연구되었다.([14], [16], [18]).

직렬구조는 작업장들을 중첩되지 않게 여러 개로 나누고, 각 나누어진 구역의 작업장을 루프로 연결하고 각 루프에 하나의 운반차를 두고, 그리고 인접하고 있는 두 루프사이에 전달점(transit point)을 두어 이 점을 이용하여 루프사이에 작업물을 이동시킨다. 이 경우는 여러 개의 단일루프로 나누는데 있어서 몇 개의 루프로 어떻게 나누며, 각 단일루프에 어떠한 공정이 처리되도록 묶을 것인가와 시스템의 효율을 평가하는 내용 등이 연구되어 왔다 ([1], [2], [3], [10], [11]).

Ozden[23], Occena와 Yokota[22], 그리고 Bilge와 Tanchoco[21]은 운반차가 다부하를 운반하는 내용을 연구하였다.

운반차가 다부하를 운반할 때 동일한 종류의 작업물로 된 다부하를 운반하는 경우와 여러 종류의 작업물로 된 다부하를 운반하는 경우로 나눌 수 있다. 동일한 종류의 작업물로 된 다부하를 운반하는 경우는 운반하고 있는 작업물들의 delivery 위치가 동일하다. 이 모형은 단위부하를 운반하는 경우와 동일하다. 반면 여러 종류의 작업물로 된 다부하를 운반하는 경우는 작업물의 종류가 다르기 때문에 pickup 위치는 동일하지만 delivery 위치는 작업물 종류마다 다르기 때문에 여러 delivery 위치를 방문하게 된다.

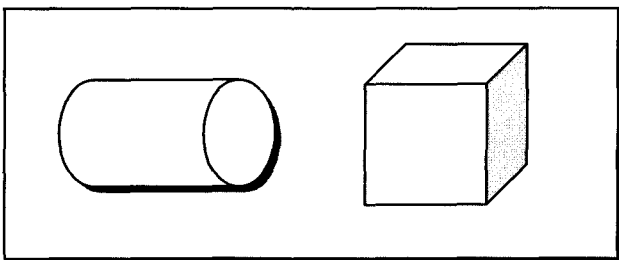
단일루프 구조와 직렬 구조는 운반차가 각 루프내에서 작업물을 운반한다. 운반차가 종류가 다른 작업물로

된 다부하를 운반할 경우에 루프를 이동하면서 delivery 위치들을 차례로 방문하게 된다. 따라서 다른 종류의 작업물로 구성된 다부하를 운반하는 경우는 반송시스템의 구조가 네트워크 구조일 경우보다 단일루프 구조나 또는 직렬구조일 때 효율적이고 편리하게 사용될 수 있다. 그러나 네트워크 구조일 경우에 delivery 위치가 다른 여러 가지 종류의 작업물을 동시에 운반하는 경우에 순서를 정하여 delivery 위치들을 차례로 방문하여야 한다. 이 경우에 방문순서를 정하는 것은 중요한 규칙이고, 규칙에 따라 시스템의 효율이 다를 수 있다. 그리고 종류가 다른 작업물로 된 다부하를 운반하면 delivery 위치들 사이의 운반거리가 길기 때문에 직렬구조에 비해 크게 효율적이지 않을 수 있다.

### 3. 운반거리의 분석 및 차량의 운반크기의 결정

운반차가 작업물을 동시에 다부하(multiple-load)를 운반하는 경우이다. 다부하는 동일 종류의 작업물로 구성된 경우와 이종의 작업물로 구성된 경우가 있지만 여기서는 운반차가 여러 종류의 작업물로 구성된 다부하를 운반하는 문제이다. 다부하 운반 중에는 동일한 종류의 작업물로 구성된 경우도 포함될 수 있다.

다부하는 단위부하(unit-load)가 여러 개인 것으로, 다부하를 구성하는 단위부하들은 같은 종류의 것도 있을 수 있고, 그림 2와 같이 2개의 다른 종류의 단위부하를 운반하는 것을 나타낸다. 그렇지만 각 단위부하는 동일한 종류의 작업물로 구성된 것이다. 운반차가 다부하를 운반하는 것은 여러 개의 단위부하를 동시에 운반하는 것을 나타내는 것이므로, 이 작업물의 목적지가 작업물 종류마다 다를 수 있기 때문에 운반차는 여러 작업장을 경유한다. 운반차가 다부하를 싣고 운반 중에 작업물의 목적지 작업장에 따라서 어느 작업장을 방문하여 작업물을 내려놓고, 또 다음 작업장을 방문하여 작업물을 내려놓고 하는 순서로 모든 작업물을 운반할 때까지 작업장을 방문한다.



<그림 2> Two-load 운반

제조시스템의 반송시스템이 직렬구조로 되어 있다. 운반차의 운반크기를 운반차가 운반할 수 있는 작업물의 수로 정의한다. 루프내의 각 작업장에서 마지막 운반이 아닐 경우에는 작업물에 대한 운반요청은 대기하고 있는 작업물의 수가 운반차의 운반크기 이상일 때 하게 된다. 그러나 마지막 운반일 경우는 작업물의 수가 운반차의 운반크기보다 미달할 경우에도 운반하게 된다. 작업장에서 대기하고 있는 작업물의 수가 운반차의 운반크기 이상일 경우에 운반차가 작업장을 방문하여 작업물을 pickup 한다. 마지막인 운반의 경우를 제외하고, 대기하는 작업물의 수가 운반크기 이하일 경우는 pickup 하지 않는다.

제조시스템에서 운반차의 운반시간과 관련된 것으로 운반차의 운반크기에 따라서 운반차가 작업물을 다부하를 pickup 하여 모든 작업물을 drop off 하기까지 운반차가 이동한 평균운반거리를 구한다. 그리고 직렬구조 시스템이 실현가능하기 위하여 필요한 운반차의 운반크기를 결정한다.

#### 3.1 가정과 부호

내용과 관련하여 가정을 정리하고, 수리적 모형을 나타내기 위하여 부호를 정의한다.

##### 1) 가 정

- ① 제조시스템의 반송시스템은 직렬구조이다.
- ② 각 루프에는 한 대의 운반차가 있다.
- ③ 여러 종류의 작업물이 동시에 생산된다.
- ④ 각 작업물은 종류별로 공정순서가 주어진다.
- ⑤ 단위부하는 동일 종류의 작업물로 구성되어 하나인 것처럼 함께 운반된다.
- ⑥ 운반차는 다부하를 동시에 운반할 수 있다.
- ⑦ 어떠한 pickup 점에서 작업물을 pickup 한 후 모든 작업물을 운반하기 전에 운반 중에 다른 작업물을 pickup 하지 않는다.

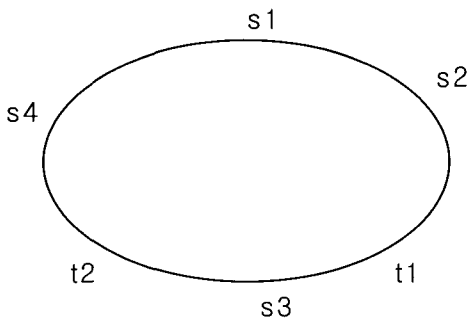
##### 2) 부 호

- $i$  = 작업물 종류를 나타내는 첨자
- $r_i$  = 작업물  $i$ 의 단위기간동안의 생산량
- $m, n, t$  = 작업장 및 전달점 번호를 나타내는 첨자
- $l$  = 루프의 번호를 나타내는 첨자
- $q$  = 운반차의 운반크기로 다부하의 크기를 말함
- $V$  = 운반차의 평균속도
- $\alpha$  = 운반차의 평균이용률
- $A_l$  = 루프  $l$ 에 있는 작업장 및 전달점의 번호

- $d_{mn}$  = 두 작업장 또는 전달점  $m$ 과  $n$ 사이의 거리
- $f_{mn}$  = 작업장 또는 전달점  $m$ 에서 작업장 또는 전달점  $n$ 까지 운반될 단위부하의 수
- $\theta$  = pickup 및 delivery 시간

### 3.2 운반차의 평균 운반거리 및 운반차의 운반크기

반송시스템이 직렬구조로 되어 있어 여러 개의 루프가 존재한다. 이 루프들 중에서 그림 3과 같이 하나의 루프를 생각한다. 이 루프에는 루프를 따라서 작업장,  $s_1, s_2, s_3, s_4$  이 여러 곳에 있고, 또한 전달점,  $t_1, t_2$ 이 있다. 작업장에서는 공정시간이 발생하지만, 전달점에서는 공정시간이 발생하지 않는 것이 차이가 있지만 모두 작업장으로 가정하고 분석한다. 작업장과 전달점에서 작업물이 pickup 되고, delivery 된다.



<그림 3> 루프 구조

루프에 있는 모든 작업장 및 전달점은 pickup점 또는 delivery 점이 될 수 있다. 설명의 편리를 위해 작업장 또는 전달점을 상황에 따라 pickup 위치 또는 delivery(혹은 목적지) 위치로 용어를 정의하여 사용한다. Pickup 위치  $m$ 에서 delivery 위치  $n$ 으로 운반되는 작업물 종류의 집합을  $B_{mn}$ 이라 하면,  $f_{mn} = \sum_{i \in B_{mn}} r_i$ 을 통하여 구해진다. Pickup 위치  $m$ 에서 모든 delivery 위치로 운반될 총 수량은  $\sum_n f_{mn}$ 이다. 운반차의 운반크기가  $q$ 이므로 운반수량이  $q$ 에 미달할 가능성이 있는 마지막 운반을 제외하고 운반차는 항상 운반크기에 해당하는 수량  $q$ 만큼 운반한다. 따라서  $\sum_n f_{mn}$ 을 운반크기가  $q$ 인 운반차를 이용하면 운반횟수는  $[\sum_n f_{mn}/q]^+ ([A]^+는 A보다 적지 않은 가장 적은 정수)가 된다. 그러므로 각$

작업장에서 마지막 운반의 경우에 운반차의 운반수량은  $\sum_n f_{mn} - q([\sum_n f_{mn}/q]^+ - 1)$ 이 되고, 마지막을 제외한 이전 운반의 경우에 운반수량은  $q$ 가 될 것이다. 그러나 운반횟수가 많으면  $[\sum_n f_{mn}/q]^+$ 을 근사적으로  $\sum_n f_{mn}/q$ 로 대신할 수 있을 것이다.

여기서는 운반횟수를 근사적으로  $\sum_n f_{mn}/q$ 을 사용하는 모형으로 분석하려고 한다. 운반횟수로  $[\sum_n f_{mn}/q]^+$ 을 사용하는 경우도  $\sum_n f_{mn}/q$  경우에 비해 일부의 표현만 다를 뿐이다. Pickup 위치  $m$ 에서 pickup 되는 총 작업물 수량  $\sum_n f_{mn}$  중에서 delivery 위치  $n$ 에 운반될 수량은  $f_{mn}$ 이기 때문에 이 delivery 위치로 운반될 확률은  $f_{mn}/\sum_n f_{mn}$ 이 된다. 그리고 pickup 위치  $m$ 에서 pickup 된 작업물의 수는  $q$ 이고, 이 작업물들의 종류는 다를 수 있다. 그러므로 작업물을 운반하기 위하여 운반차가 방문하는 delivery 위치는 여러 곳이 된다. 운반하고 있는 작업물의 종류에 따라 차례로 delivery 위치를 방문하며 운반한다.

운반차가 작업물을 한번 pickup하여 신고 있는 모든 작업물을 drop off 하기까지 운반차의 운반거리는 작업물을 pickup한 위치부터 운반하고 있는 작업물 종류의 마지막 delivery 위치까지의 거리이다. 하나의 루프에 대하여 pickup 위치  $m$ 에서 다른 delivery 위치로 작업물을 운반하기 위하여 운반한 운반차의 평균 운반거리를 구한다.

어떠한 pickup 위치에서 다부하를 pickup하여 delivery 위치로 운반할 때 마지막 작업물을 delivery 하기까지 pickup 위치부터 마지막 delivery 위치까지의 거리를 분석한다. Pickup 위치  $m$ 에서 pickup 되는 모든 작업물들에 대하여 이 작업물들의 종류에 따른 목적지의 가능한 위치를 루프에서 이동방향으로 차례로  $n_1, n_2, \dots, n_L$ 이라 하자. 그리고 위치  $m$ 에서 pickup되어 목적지  $n_1, n_2, \dots, n_L$ 에 운반될 작업물의 수량을 각각  $f_{mn_1}, f_{mn_2}, \dots, f_{mn_L}$ 이다. 그러면 pickup 위치  $m$ 에서 pickup될 총 수량은  $\sum_{n=1}^{n_L} f_{mn}$ 이 되고, 이 총 수량에 대한 목적지  $n_s$  ( $s = 1, 2, \dots, L$ )에 운반되는 수량의 비율은 식 (1)과 같이 나타내진다. 이 비율은 확률과 동일한 의미를 갖는다.

$$p_{mn} = \frac{f_{mn}}{\sum_{t=n_1}^{n_L} f_{mt}}, \quad n = n_1, n_2, \dots, n_L \dots\dots\dots (1)$$

그리고 목적지  $n_1, n_2, \dots, n_L$ 에 운반될 비율에 식 (1)에서 구한 확률을 이용하여 차례로 누적확률을 구하면 식 (2)과 같이 나타내진다.

$$P_{mn} = \sum_{t=n_1}^n p_{mt}, \quad n = n_1, n_2, \dots, n_L \dots\dots\dots (2)$$

어떠한 pickup 위치에서 pickup 될 모든 작업물들의 가능한 목적지는 다수가 있다. 한번에 모든 작업물이 pickup 되는 것이 아니고, 매 pickup에는 운반차의 운반 크기에 해당하는 일부의 수량만을 pickup하므로 pickup에 포함된 작업물 종류의 목적지만 방문하게 된다. 그러므로 매 pickup 마다 pickup되는 작업물이 다르고 또한 목적지가 다르다. 매 pickup에서 pickup된 작업물 종류의 목적지 중에서 가장 늦은 delivery 위치가 pickup 위치로부터 가장 먼 delivery 위치가 된다. 어떠한 pickup 위치에서 pickup 될 모든 작업물들의 가능한 여러 목적지의 각 목적지 위치는 임의의 pickup에서 이러한 가장 먼 delivery 위치가 될 수 있다. 그러므로 임의의 pickup에서 각 목적지 위치가 pickup위치로부터 가장 먼 목적지 위치가 될 확률을 구해 pickup 위치에서 마지막 delivery 위치 사이의 주어진 거리를 이용하여 평균 운반거리를 구한다.

운반차는 pickup 위치  $m$ 에서  $q$ 개의 다부하를 pickup하여 이들의 목적지를 차례로 방문하며 delivery 할 때  $q$ 개의 다부하의 목적지들은  $n_1, n_2, \dots, n_L$ 중의 일부가 될 것이다. 목적지 후보자  $n_1, n_2, \dots, n_L$ 에 대해 이들 각 위치가 임의의 pickup에서 작업물의 목적지 중 pickup 위치로부터 가장 먼 목적지 위치가 될 확률을 구한다. 운반차가 pickup 위치  $m$ 에서 pickup한  $q$ 개의 다부하의 목적지 위치 중에서 위치  $n_s (s = 1, 2, \dots, L)$ 이 가장 먼 위치가 될 확률은 다음 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} M_{mn_1} &= \prod_{t=1}^q P_{mn_1} = (P_{mn_1})^q \\ M_{mn_s} &= \prod_{t=1}^q P_{mn_s} - \sum_{n=n_1}^{n_s-1} M_{mn} \\ &= \prod_{t=1}^q P_{mn_s} - \prod_{t=1}^q P_{mn_{s-1}} \\ &= (P_{mn_s})^q - (P_{mn_{s-1}})^q, \quad s = 2, 3, \dots, L \dots (3) \end{aligned}$$

그러므로 한번의 pickup에 대해 pickup위치  $m$ 에서 pickup된 작업물들의 운반을 완료하기까지 걸리는 평균 운반거리는 pickup 위치  $m$ 에서 마지막 delivery 위치까지의 거리에 발생확률을 곱하여 구하며 (4)와 같이 나타내진다.

$$D_m = \sum_{n=n_1}^{n_L} d_{mn} M_{mn}, \quad \forall m \dots\dots\dots (4)$$

그리고 주어진 생산시간동안 pickup 위치  $m$ 에서 발생한 pickup의 수는  $\sum_n f_{mn}/q$ 이기 때문에 pickup위치  $m$ 에서 pickup 되어 목적지로 운반되기까지 발생한 운반거리는 1회 평균 운반거리에 운반횟수를 곱하여 구하며 식 (5)과 같이 나타내진다.

$$\begin{aligned} TD_m &= D_m (\sum_{n=n_1}^{n_L} f_{mn}/q) \\ &= (\sum_{n=n_1}^{n_L} d_{mn} M_{mn}) (\sum_{n=n_1}^{n_L} f_{mn}/q), \quad \forall m \dots\dots (5) \end{aligned}$$

한 루프에서 발생한 운반차의 총 운반거리를 구한다. 어떠한 루프  $l$ 의 pickup위치  $m$ 에서 pickup 된 모든 작업물의 운반거리는 식 (5)과 같이 나타내었다. 루프  $l$ 에는 여러 곳의 작업장 또는 전달점이 있고, 다른 작업장에서 식 (5)과 같은 방법으로 이 작업장에서 pickup 된 작업물들의 운반거리를 구할 수 있다. 그러므로 루프  $l$ 에 있는 모든 pickup 위치에서 발생한 pickup 작업물들의 목적지까지 운반하는데 발생한 적재운반거리는 모든 pickup 위치에서 발생하는 모든 pickup 대하여 운반거리를 더하여 구하며, 식 (6)과 같이 나타내진다.

$$\begin{aligned} TDS_l &= \sum_{m \in A_l} TD_m \\ &= \sum_{m \in A_l} (\sum_{n=n_1}^{n_L} d_{mn} M_{mn}) (\sum_{n=n_1}^{n_L} f_{mn}/q), \quad \forall l \dots (6) \end{aligned}$$

루프에서 발생한 운반차의 실질운반시간을 구한다. 실질운반시간은 작업물 pickup 시간, 작업물의 적재 운반 시간, 작업물 drop off 시간의 합이다.

한 루프에서 발생하는 pickup 및 drop off 시간을 생각한다. 운반차의 운반크기가  $q$ 일 때 한번의 운반에서 pickup 위치에서 pickup할 작업물 수는  $q$ 이고, 목적지에서 drop off 작업물의 수는 마찬가지로  $q$ 이다. Pickup 및 drop off 시간은 단위부하의 수에 비례하는 것으로

한다. 그러므로 한번의 운반에서 pickup 시간 및 drop off 시간은 각각  $\theta q$ 가 된다. 따라서 한번의 운반에서 함께 발생하는 pickup 및 drop off 시간은  $2\theta q$ 이다. Pickup 위치  $m$ 에서 pickup되어 목적지에 운반되기까지 발생한 pickup 및 drop off 시간의 합은 식 (7)과 같다.

$$PD_m = 2\theta q \left( \sum_{n=n_1}^{n_l} f_{mn}/q \right) = 2\theta \sum_{n=n_1}^{n_l} f_{mn}, \quad \forall m \dots\dots\dots (7)$$

루프  $l$ 에서 발생한 총 pickup 및 drop off 시간은 모든 작업장 및 전달점에서 발생하는 모든 pickup 및 drop off 시간을 더하여 구한다. 식 (8)과 같이 나타내진다.

$$TPD_l = \sum_{m \in A_l} PD_m = 2\theta \sum_{m \in A_l} \sum_{n=n_1}^{n_l} f_{mn}, \quad \forall l \dots\dots\dots (8)$$

루프  $l$ 에서 운반차가 작업물을 pickup 하고, 적재 상태로 운반하고, drop off 하는때 걸린 운반차의 실질 운반시간  $TL_l$ 은 식 (9)과 같이 나타내진다.

$$TL_l = TDS_l/V + TPD_l = \sum_{m \in A_l} \left[ \left( \sum_{n=n_1}^{n_l} d_{mn} M_n \right) \left( \sum_{n=n_1}^{n_l} f_{mn}/q \right) / V + 2\theta \sum_{n=n_1}^{n_l} f_{mn} \right], \quad \forall l \dots\dots\dots (9)$$

운반차가 빈차로 이동한 거리 및 시간을 정확히 알 수는 없다. 이 거리는 Egbelu[24]가 네트워크 구조에서 운반차의 수를 평가하기 위한 해석적인 접근법을 나타내었다. 루프 구조에서는 하나의 운반차만 이용되기 때문에 운반차의 실질 사용시간이 이용가능시간보다 클 수 없다. 운반차의 실질 사용시간은 실질 운반시간과 빈차 이동시간의 합이다. 운반차의 빈차이동거리는 적재운반거리와 동일한 것으로 가정하여 나타낸다. 루프에서 운반차의 실질사용시간  $TT_l$ 은 다음의 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$TT_l = 2 \sum_{m \in A_l} \left[ \left( \sum_{n=n_1}^{n_l} d_{mn} M_n \right) \left( \sum_{n=n_1}^{n_l} f_{mn}/q \right) / V + 2\theta \sum_{n=n_1}^{n_l} f_{mn} \right], \quad \forall l \dots\dots\dots (10)$$

각 루프에서 한 대의 운반차가 사용되기 위하여 주어진 단위시간내에 모든 작업물을 pickup 하기위한 빈차 이동, pickup, 적재 운반, drop off를 수행해야 한다. 운반차의 평균이용률  $\alpha$ 와 주어진 생산시간  $T$ 을 고려하여 운반차의 실질 사용시간과 이용 가능한 시간 사이에  $TT_l \leq \alpha T$  관계가 성립한다. 즉 식 (11)의 관계가 성립해야 한다.

$$2 \sum_{m \in A_l} \left( \sum_{n=n_1}^{n_l} d_{mn} M_n \right) \left( \sum_{n=n_1}^{n_l} f_{mn}/q \right) / V + 2\theta \sum_{m \in A_l} \sum_{n=n_1}^{n_l} f_{mn} \leq \alpha T, \quad \forall l \dots\dots\dots (11)$$

각 루프에는 한 대의 차량만이 존재하고, 이 차량이 주어진 시간  $T$ 동안 모든 작업물을 운반하기 위해 빈차 이동, pickup, 적재 운반, drop off 등의 임무를 모두 수행하려면 식 (11)을 만족할 수 있도록 운반차의 운반크기가 충족되어야 한다. 운반차의 운반크기  $q$ 는 식 (11)을 만족하는 최소값 이상이 되어야 한다.

### 4. 수치적 예제

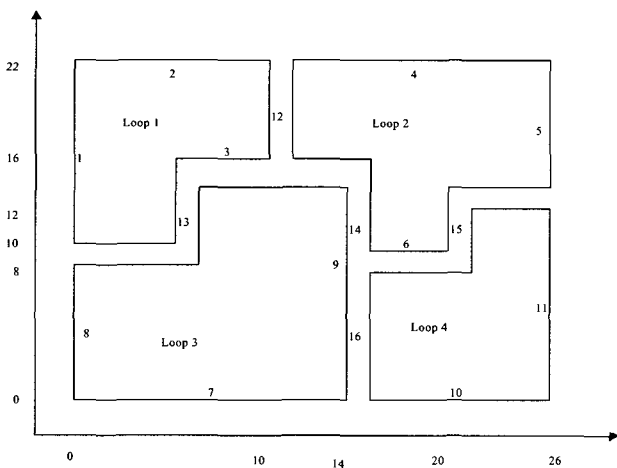
그림 4에서와 같이 반송시스템이 직렬구조의 무인차 운반시스템으로 임의로 만든 예제를 생각한다. 각 루프에서 운반차의 이동방향은 시계방향으로 가정한다. 무인차운반시스템은 4개의 루프가 있고, 루프 1, 2와 3에는 각각 3개, 루프 4에는 2개의 작업장이 있다. 인접하고 있는 루프사이에는 작업물의 전달위치로서 하나의 전달점이 주어졌다. 작업장 및 전달점의 위치를 나타내는 번호는 그림에서와 같이 번호 1번에서 16번까지로 1에서 11까지는 작업장을 나타내고, 12에서 16까지는 전달점을 나타낸다. 전달점을 나타내는 번호는 인접하고 있는 두 루프에서 동일하다. 운반차의 평균 이동속도는 단위부하의 크기, 운반여부에 관계없이 평균 30m/분이다. 운반차에 작업물을 pickup 및 drop off 시간은 각각 작업물당 0.25분이다. 운반차의 이용률을 0.9라 한다.

각 루프에서 작업장 및 전달점을 나타내는 마디를 기준으로 선의 거리는 표 1에서와 같다. 그리고 가공되는 작업물의 종류는 6개이고, 작업물의 생산량과 가공경로는 표 2에서와 같고, 이들에 대한 자료는 임의로 주어진 것이다.

표 2에 주어진 자료를 이용하여 각 루프에서 시간당 작업장 및 전달점 사이의 작업물의 흐름량을 구할 수 있다. 여기서는 해를 구하는 절차를 설명하기 위해 루프 1의 경우에 대해서만 나타내면 표 3과 같다.

<표 1> 작업장 및 전달점 사이의 선의 길이

루프번호	루프의 길이(m)	위치사이의 길이(m)
1	44	$d_{1,2}=11, d_{2,12}=8, d_{12,3}=6, d_{3,13}=6, d_{13,1}=13$
2	52	$d_{4,5}=11, d_{5,15}=13, d_{15,6}=3, d_{6,14}=4, d_{14,12}=11, d_{12,4}=10$
3	56	$d_{7,8}=11, d_{8,13}=15, d_{13,14}=11, d_{14,9}=3, d_{9,16}=5, d_{16,7}=11$
4	44	$d_{10,16}=10, d_{16,15}=12, d_{15,11}=11, d_{11,10}=11$



<그림 4> 제조시스템의 배치

<표 2> 작업물의 생산량과 가공경로

작업물	생산량 (loads/시간)	가공경로
1	2	1 - 2 - 3 - 13 - 7 - 9
2	4	2 - 3 - 12 - 4 - 6 - 15 - 10 - 11
3	3	1 - 3 - 13 - 8 - 9 - 14 - 4 - 5
4	3	9 - 7 - 14 - 5 - 6 - 12 - 2 - 1
5	4	11 - 10 - 16 - 8 - 7 - 13 - 1
6	2	10 - 11 - 15 - 5 - 6 - 14 - 9 - 8

<표 3> 루프 1의 작업장 및 전달점 사이의 흐름량 (거리)

to from	1	2	12	3	13	합
1	0	2(11)	0	3(25)	0	5
2	3(33)	0	0	6(14)	0	9
12	0	3(36)	0	0	0	3
3	0	0	4(48)	0	5(6)	9
13	4(13)	0	0	0	0	4
합	7	5	4	9	5	30

4.1 운반차의 평균거리 및 운반차의 운반크기

루프 1에 있는 작업장 및 전달점에 대해 pickup 위치  $m$ 에서 pickup 된 작업물 중에서 작업장  $n$ 까지 운반되는 작업물의 확률과 시계방향으로 누적확률을 나타내면 표 4와 같다.

<표 4> 루프 1에서 pickup 점에서 drop off 점으로의 확률 누적확률

to from		1	2	12	3	13
1	확률	0	0.40	0	0.60	0
	누적확률	0	0.40	0.40	1.00	1.00
2	확률	0.33	0	0	0.67	0
	누적확률	1.00	0	0	0.67	0.67
12	확률	0	1.00	0	0	0
	누적확률	0	1.00	0	0	0
3	확률	0	0	0.44	0	0.56
	누적확률	0.56	0.56	1.00	0	0.56
13	확률	1.00	0.	0	0	0
	누적확률	1.00	1.00	1.00	1.00	0

운반차의 운반크기가 1, 2, 3일 때 각 루프에서의 운반차의 적재운반거리와 실질사용시간을 구하면 표 5와 같이 나타내진다.

표 5에 나타난 차량의 적재운반거리와 실질사용시간을 구하는 일련의 절차를 설명하기 위해 차량의 운반크기  $q=2$ 일 때 루프 1의 예를 사용한다. 루프 1에 있는 작업장 및 전달점 위치번호는 1, 2, 3, 12, 13 이다.

먼저  $M_{mn}$ 의 값을 구하면 다음과 같다.

$$M_{12} = 0.4 \times 0.4 = 0.16$$

$$M_{13} = 1 - 0.16 = 0.84$$

$$M_{23} = 0.67 \times 0.67 = 0.449$$

$$M_{21} = 1 - 0.4489 = 0.551$$

$$M_{12,2} = 1$$

$$M_{3,13} = 0.56 \times 0.56 = 0.314$$

$$M_{3,12} = 1 - 0.3136 = 0.686$$

$$M_{13,1} = 1$$

$$TPD_1 = 2 \times 0.25 \times 30 = 15$$

루프 1에서 차량의 적재운반시간, 빈차운반시간, pick-up 및 drop off 시간의 합인 실질사용시간을 구하면 다음과 같다.

$$TT_1 = 2 \times (403.749/30) + 15.000$$

$$= 41.917$$

<표 5> 운반크기에 따른 적재운반거리와 실질사용시간

운반크기 $q$	루프번호 $l$	적재운반거리 $TDS_l$	실질사용시간 $TT_l$
1	1	659.750	59.533
	2	748.760	66.417
	3	1100.490	90.866
	4	435.560	39.037
2	1	403.749	41.917
	2	442.717	46.014
	3	623.874	59.092
	4	259.973	27.332
3	1	257.231	32.149
	2	321.626	37.942
	3	436.468	46.598
	4	187.191	22.479

루프 1의 각 pickup 위치에서 작업물을 pickup하여 운반할 때 운반당 차량의 평균 적재 운반거리를 다음과 같이 구한다.

$$D_1 = 11 \times 0.16 + 25 \times 0.84 = 22.76$$

$$D_2 = 14 \times 0.4489 + 33 \times 0.5511 = 24.471$$

$$D_{12} = 36 \times 1 = 36$$

$$D_3 = 6 \times 0.3136 + 48 \times 0.6864 = 34.829$$

$$D_{13} = 13 \times 1 = 13$$

루프 1에서 모든 pickup에 대해 모든 작업물의 차량의 적재운반거리를 구하면 다음과 같다.

$$TDS_1 = 22.76(5/2) + 24.4709(9/2) + 36.0(3/2)$$

$$+ 34.8288(9/2) + 13.0(4/2) = 403.749$$

루프 1에서 모든 작업물의 pickup 및 drop off 시간을 구하면 다음과 같다.

표 5에서 운반차의 운반크기가 1, 2, 3일 때 모든 루프에 대한 결과도 앞에서 전개한 운반차의 운반크기  $q=2$ 일 때 루프 1에서의 경우와 동일한 절차로 구해진다. 운반차의 운반크기가 1, 2, 3일 경우에 각 루프에서 운반차의 실질운반시간과 pickup 및 drop off 시간의 합인 실질사용시간을 구하였다. 식 (11)을 적용하여 실현가능한 운반차의 운반크기를 구한다. 운반차의 이용률이 0.9 이므로 운반차가 60분 동안 사용할 수 있는 시간은 54분이다. 따라서 루프에서 운반차가 실현가능하려면 모든 루프에서 운반차의 실질사용시간이 54분 이내가 되어야 한다. 이를 만족하는 경우는 운반차가 3개의 다부하를 운반하는 경우이다. 이 시스템에서 운반차의 운반크기는 최소 3이상이어야 한다.

### 5. 결 론

제조시스템의 반송시스템이 직렬구조에서 각 루프의 운반차가 이종의 작업물로 구성된 다부하로 운반할 때 운반차의 적재운반거리를 분석하였다. 그리고 각 루프에 하나의 운반차가 주어진 시간동안 주어진 모든 운반을 완료하기 위해 필요한 운반차의 운반크기를 구하는 것을 다루었다. 물류시스템을 설계할 때 운반차가 동종의 작업물이 아닌 이종 작업물의 다부하를 운반할 때 운반차의 크기를 결정하는데 있어 운반차의 평균운반거리의 분석결과가 중요하게 사용될 것이다.

향후 연구과제는 직렬구조에서 운반차가 양방향 운반을 하는 경우에 운반차가 이종으로 된 다부하를 운반하는 경우와 네트워크 구조에서 운반차가 이종으로 된 다부하를 운반하는 경우의 문제가 있다. 네트워크 구조에서 운반차가 목적지를 방문하는 규칙에 따라 운반차의 평균 운반시간을 구하는 것이 있다. 목적지를 방문하는 규칙으로 가장 가까운 위치부터 방문하는 방법, 무작위로 위치를 방문하는 방법, 전체 운반거리를 최소화하는 순서로 위치를 방문하는 방법 등이 있고 이에 대한 연구가 진행 중이다.



## 참고문헌

- [1] Bischak, D. P. and Stevens, K. B. JR., 1995, "An evaluation of the tandem configuration automated guided vehicle system," *Production Planning & Control*, Vol.6 438-444
- [2] Bozer, Y. A., and Shrinivasan, M. M., 1989, "Tandem configurations for AGV systems offer simplicity and flexibility," *Industrial Engineering*, Vol.21, 23-27
- [3] Bozer, Y. A., and Shrinivasan, M. M., 1991, "Tandem configurations for automated guided vehicle systems and the analysis of single vehicle loops," *IIE transactions*, Vol.23, 72-82
- [4] Egbelu, P. J. and Tanchoco, J. M. A., 1984, "Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.22, 259-274
- [5] Egbelu, P. J. and Tanchoco, J. M. A., 1986, "Potential for bidirectional guide path of automated guided vehicle based systems," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.24, 1075-1097
- [6] Egbelu, P. J., 1993, "Concurrent specification of unit load sizes and automated guided vehicle size in manufacturing system," *Int. J. of Prod. Economics*, Vol.29, 695-712
- [7] Gaskins, R. J., and Tanchoco, J. M. A., 1987, "Flow path design for automated guided vehicle systems," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 25, 667-676
- [8] Gaskins, R. J., and Tanchoco, J. M. A., 1990, "Optimal flow path design of unidirectional AGV systems," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.28, 1023-1030
- [9] Goetz, W. G., and Egbelu, P. J., 1990, "Guide path design and location of load pick-up/drop-off points for an automated guided vehicle system," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.28, 927-941
- [10] Lin, J. T., Chang, C. C. K. and Liu, W.-C., 1994, "A load-routing problem in a tandem-configuration automated guided-vehicle system," *Int. J. Prod Res*, Vol.32, 411-427
- [11] Lin, J. T. and Dgen, P.-K., 1994, "An algorithm for routing control of a tandem automated guided vehicle system," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.32, 2735-2750
- [12] Mahadevan, B. and Narendran, T. T., 1990, "Design of an automated guided vehicle-based material handling system for a flexible manufacturing system," *Int. J. Prod. Res.*, 1611-1622
- [13] Maxwell, W. L. and Muckstadt, J. A., 1982, "Design of automatic guided vehicle systems," *IIE Transactions*, Vol.14, 114-124
- [14] Sinriech, D. and Tanchoco, J. M. A., 1991, "The centroid projection method for locating pick-up and delivery stations in single-loop AGV systems," *J. of Manufacturing Systems*, Vol. 11, 297-307
- [15] Sinriech, D. and Tanchoco, J. M. A., 1992, "An economic model for determining AGV fleet size," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 30, 1255-1268
- [16] Sinriech, D. and Tanchoco, J. M. A., 1992, "Impact of empty vehicle flow on performance of single-loop AGV systems," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 30, 2237-2252
- [17] Tanchoco, J. M. A., 1994, *Material flow systems in manufacturing*, Chapman & Hall, London
- [18] Tanchoco, J. M. A. and Sinriech, D., 1992, "OSL-Optimal single-loop guide paths for AGVS," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 30, 665-681
- [19] Tomkins, J. A., and White, J. A., Bozer, Y. A., Frazelle, E. H., Tanchoco, J. M. A. and Trevino, J., 1996, *Facilities Planning*, Wiley, New York
- [20] Tanchoco, J. M. A., Egbelu, P. J., and Taghaboni, F., 1987, "Determination of the total number of vehicles in an AGV-based material transport system," *Material Flow*, 4, 33-51
- [21] Bilge, Umit, 1997, "AGV systems with multi-load carriers : basic issues and potential benefits," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 16, No. 3, 159-174
- [22] Occena, Luis G. and Yokota, Toshiya, 1991, "Modelling of an automated guided vehicle system (AGVS) in a just-in-time (JIT) environment," *Int. J. Prod. Res.* Vol. 29, No. 3, 495-511
- [23] Ozden, Mufit, 1988, "A simulation study of multiple-load-carrying automated guided vehicles in a flexible manufacturing system," *Int. J. Prod. Res.* Vol. 26, No. 8, 1352-1366
- [24] Egbelu, P. J., 1987, "The use of non-simulation approaches in estimating in an automated guided based transport system." *Material flow*, Vol. 4, 17-32