

## ■ 연구논문

### 혼합 직렬형태 자동반송시스템의 설계

- Design of the Hybrid Tandem Configuration

Automated Guided Vehicle Systems -

장석화\*

Chang, Suk Hwa

#### Abstract

This paper is concerned about the hybrid tandem configuration as the design of the automated guided vehicle system(AGVs). The hybrid tandem configuration is that the manufacturing system is divided into several non-overlapping zones, workstations of each zone are linked by network configuration including loop. That is, the manufacturing system is divided into several non-overlapping small size networks, and at most two automated guided vehicles can be available in each network. The transit point is located at proper point between adjacent networks. The parts are transported to workstations in other network through the transit points.

One of the objective functions in dividing into the hybrid tandem configuration is to minimize the maximum travel time of the divided networks, and other is to minimize the total travel distance of parts moved to workstations in other networks for the next processing. The model formulation is presented, and a numerical example is shown. Also, the performances of system for the hybrid tandem, tandem and network configuration are compared through the simulation.

The results of this research will contribute to the development of material handling systems in the manufacturing system. Also, it will be applied in determining the transportation area of transportation vehicles and the number and size of the transportation fleet in the transportation problem of logistics management.

#### 1. 서 론

제조시스템에서 총 운영비용의 15-70%는 물류흐름 처리와 관련된 비용으로 평가되고 있고, 그리고 효율적인 설비설계와 계획은 적어도 10-30%의 비용을 절감할 수 있는 것으로 인식되고 있다 [19]. 이와 같이 물류흐름과 관련된 문제는 비용절감을 위한 공장운영의 중요한 부분이다.

---

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(981-1014-080-1)지원으로 수행되었음.

\* 인천대학교 산업공학과 교수

최근에 기업환경은 단품종 소량생산을 하게 한다. 이는 고객의 제품에 대한 수요는 다양해지고 제품 수명은 짧아지고 있기 때문이다. 이러한 수요환경에서 기업은 동일 제조시스템에서 동시에 여러 종류의 제품을 생산하는데, 이는 제품생산의 빈번한 교체를 필요로 한다. 제조시스템이 여러 작업장들(workstations)로 구성되어 있고, 떨어져 있는 작업장사이에 작업물의 운송수단으로 자동반송차(Automated Guided Vehicle(AGV))가 이용되고 있다. 이는 자동반송시스템(Automated Guided Vehicle systems(AGVs))이 유연생산시스템에서 많이 사용되는 것으로 전래의 물류흐름 처리 장비보다 작업물의 이동위치에 있어 유연성을 제공하여 주기 때문이다. 이 자동반송차는 작업물을 필요한 어느 위치에서 pickup 하여 다른 작업장으로 전달하는데 있어 다른 운반수단보다 유연성에서 우수하게 평가되고 있다.

제조시스템이 여러 작업장으로 구성되어 있고, 여러 종류의 작업물이 각각의 공정순서에 따라 작업장을 거치며 공정이 이루어진다. 작업장사이에 작업물의 운송수단으로 AGV를 이용할 때, 운반차의 통제, 작업물의 체류시간 등을 고려하여 작업장사이를 어떻게 연결하느냐는 중요한 문제이다. 지금까지 연구된 방법으로는 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 운반차가 어느 작업장으로든지 직접 갈 수 있도록 모든 작업장을 네트워크(network)형태로 연결하는 방법이 있다. 두 번째는 작업장을 중첩되지 않는 여러 개의 단일루프(single-loop)로 나누고, 각 단일루프에 하나의 운반차를 할당하는 직렬(tandem)형태를 취하는 것이다. 세 번째는 가능한 경우에 모든 작업장을 하나의 단일루프로 연결하는 방법이 있다. 이 3가지 방법의 특징은 다음과 같이 설명될 수 있다.

#### ① 네트워크(network) AGVs

여러 운반차가 동시에 이용되고, 모든 운반차는 필요에 따라 어떠한 작업장에도 도달할 수 있고, 어떠한 작업장에도 서비스할 수 있도록 허용되는 것이다. 이의 장점은 유연성과 신뢰성에 있어서 유리하나 경로설계, 필요한 운반차의 수, 작업물을싣고 내리는 위치, 운반차 관리와 경로, 운반차 형태의 선택, 교통관리 등의 문제가 존재한다.

#### ② 직렬(tandem) AGVs

작업장을 중첩되지 않게 여러 개의 단일루프(single-loop)로 나누어 시스템을 구성하고, 각 단일루프에는 하나의 운반차를 두어 사용한다. 어떠한 루프의 작업장에서 다른 루프의 작업장으로 작업물이 이동될 수 있도록 루프사이에 전달점(transit point)을 설치하여 이 전달점을 통하여 작업물이 전달되도록 한다. 이 방법은 전래의 네트워크 방법보다 운반차 배송문제나 교통 관리문제에서 덜 복잡하게 하고, 운반차 충돌문제와 간섭을 없앨 수 있다. 그러나 이 방법은 작업물의 운송거리 및 시스템 내에서의 체류시간을 길게 할 수 있다. 그리고 운반차들의 이용에 불균형을 발생시킬 수 있다.

#### ③ 단일루프 AGVs

모든 작업장을 가능한 경우 하나의 루프로 연결하여 구축하는 것이다. 이것은 작업장사이의 물류흐름에 바탕을 둔 시스템에서 흐름을 최소화, AGV가 임무를 완료하기까지 이동하는 거리를 최소화하기 위해 사용되고 있다. 이러한 구조를 사용하는 것은 교통통제의 단순성과 작업장 막힘의 잠재적인 가능성을 줄일 수 있다. 그러나 이 방법은 작은 규모의 제조시스템에서 주로 이용된다.

위의 3가지 방법에 대한 제조시스템 형태에 대한 대략적인 배치의 예제로서 그림 1a, 1b 와 1c에 각각 나타나 있다.

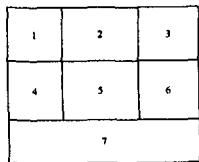


그림 1a 네트워크 구조

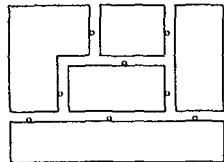


그림 1b 직렬 구조

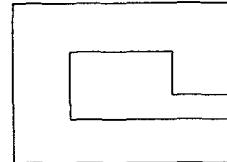


그림 1c 단일루프 구조

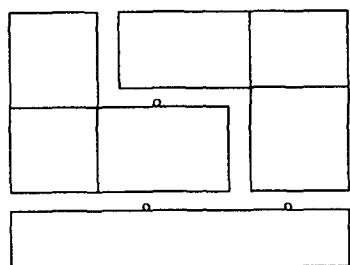


그림 2 혼합 직렬형태 구조

본 논문에서 연구된 내용은 그림 2에 나타난 것과 같이 지금까지 다루어지지 않은 것으로 새롭게 제시하는 혼합 직렬형태 구조 모형에 관한 것이다. 큰 규모의 네트워크 구조를 중첩되지 않는 여러 개의 작은 규모의 네트워크 구조로 분할하여 구축하는 문제에 관한 것이다. 혼합 직렬형태 구조에서 네트워크사이의 작업물이동을 위하여 적절한 위치에 전달점(transit point)을 둔다.

하나의 네트워크 구조인 제조시스템을 여러 개의 작은 규모의 네트워크 구조로 나누어 시스템을 구축하고, 나누어진 작은 규모의 네트워크에는 1대씩의 운반차 만이 아닌 소수이지만 여러 대의 운반차가 사용될 수 있도록 한다. 네트워크가 큰 규모일 경우에 많은 운반차가 하나의 네트워크에서 관리되므로 통제문제에 어려움이 존재한다. 그러나 이를 작은 규모의 네트워크 구조로 나누고, 나누어진 각 네트워크마다 운반차의 수가 1대 또는 2대인 경우와 같이 적은 수의 운반차를 둘 경우는 네트워크 구조의 시스템일지라도 많은 수일 경우에 비하여 통제문제에서 어려움이 적게 발생할 것으로 생각된다. 나누어진 네트워크 내에서 운반차의 통제문제는 단일 네트워크 구조에 비하여 원활하게 할 수 있을 것이다.

## 2. 연구 배경

제조시스템에서 작업장사이에 작업물 운반방법으로 무인반송시스템(AGVs)를 이용하는 경우에 네트워크(network) 구조, 단일루프 구조, 직렬 구조 등이 있다. 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], [23], [25], [28]). Egbelu([6], [24])는 운반차로 AGV를 이용하는 제조시스템에서 운반차가 단위부하로 운송하는 상황에서 운반차의 규모와 작업장의 설비 규모를 경제적으로 결정하는 문제를 다루었다.

제조시스템의 모든 작업장을 하나의 루프로 연결하여 운반차가 단일루프에서 움직이도록 제조시스템을 구축한 문제에 대하여도 연구되었다([14], [16], [18]).

제조시스템이 작은 규모일 경우는 운반차의 통제문제를 어렵지 않게 해결할 수 있을 것이다. 그러나 작업장의 수가 증가하고, 운반차의 수가 많은 경우에도 전래의 방법으로 모든 작업장을 네트워크 구조로 연결하는 방법이 주로 사용되어 왔다. 그러나 이 방법은 많은 운반차가 동일 작업장에서 동시에 운영되기 때문에 운반차의 dispatching 규칙, 교차로에서의 충돌 등 통제문제에 어려움이 발생하고 있다. 이러한 통제문제를 해결하기 위하여 여러 개의 중첩되지 않는 단일루프(single-loop)로 나누고, 각 루프에 하나의 운반차를 할당하여 구축한 직렬 구조방법을 제시하고 있다. 이 방법에서 다른 루프로의 물류이동은 루프사이에 전달점을 두고, 이 점을 통하여 작업물을 이동시키고 있다. 이 방법에서는 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], [22]).

네트워크 구조와 직렬 구조 사이에는 설명된 것과 같이 차이가 존재한다. 네트워크 구조와 직렬구조를 절충한 시스템이 필요하다. 양쪽의 방법을 부분적으로 보완할 수 있는 경우의 시스템이 필요할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 네트워크 구조와 직렬 구조의 혼합 형태인 혼합 직렬형태 구조로 제조시스템을 설계하는 방법을 제시하고, 그리고 네트워크 구조, 직렬 구조 및 혼합 직렬형태 구조에 대하여 작업물의 평균이동거리, 완료된 작업량 등을 구하여 시스템의 성과를 비교하는 연구를 수행한다. 이들에 대한 연구는 아직까지 기존의 문헌에서 발견되지 않고 있다.

### 3. 운반차 수에 따른 평균 운반시간 비교

이 장에서는 동일한 네트워크 시스템에서 운반차의 수가 증가할 경우에 운반차의 1회 평균 운반시간이 증가하는지를 시뮬레이션을 이용하여 분석한다. 운반차가 작업물을 어떠한 작업장에서 실고, delivery 작업장으로 운반하고, 그 작업장에서 내리는데 걸리는 모든 시간을 이동시간 또는 운반시간으로 한다. 논문에서 운반시간은 운반차에 발생한 모든 시간을 나타내는 것을 의미하지만, 이 장에서의 평균 운반시간은 1회 운반에 발생하는 평균시간을 의미한다.

네트워크에 적은 수의 운반차를 두는 경우에 평균 운반시간에서 자연시간이 운반차가 1대 일 경우와 비교하여 크게 증가하지 않는지를 알기 위하여 동일한 네트워크 구조에서 운반차 수의 증가에 따른 작업물의 평균 운반시간을 비교 분석한다. 제조시스템에서 운반차의 수가 증가할 때 네트워크상의 교차로, 작업장의 pickup 점 및 delivery 점에서 운반차의 대기로 인하여 평균 운반시간이 증가하게 될 것이기 때문이다.

제조시스템에서 작업장사이에 작업물을 운송하는데 있어 운반차 수에 따른 평균 운반시간의 변화를 알기 위하여 시뮬레이션을 이용한다. 한 대의 운반차를 이용하여 작업물을 운송하여도 작업장의 가공시간과 비교하여 운반시간이 병목현상 역할이 되지 않도록 상대적으로 운반시간이 가공시간에 비하여 적게 발생하도록 제조시스템을 만든다. 운반차 수의 변화에 따른 운반 당 운반차의 평균 운반시간의 변화를 분석하기 위하여 동일한 시스템에 대하여 운반차 수의

증가 비율에 비례하여 생산률(생산량)을 증가시키고, 작업물 투입점에서 작업물의 도착간격시간을 반비례로 감소시키고, 작업장에서의 가공시간을 반비례로 감소시킨다. 이와 같이 하면 작업물의 총이동거리는 운반차의 수에 비례하지만, 운반차당 평균 이동거리는 동일하게 한다. 또한 각 작업장의 총 가공시간은 운반차의 수에 관계없이 동일하게 유지하게 되고, 각 운반차에 대하여 운반차를 요청하는 평균 시간간격은 동일하게 된다.

운반차의 수가 1대일 경우와 비교하여 운반차의 수가 여러 대일 경우에 각 운반차에 대해 작업물이 운반차를 요청하는 평균 시간간격과 운반차의 평균 이동횟수 및 이동거리, 시스템에 최종 작업물의 도착시간 등이 동일하게 된다. 그리고 운반차의 수에 비례하여 작업물의 생산량은 늘었지만, 비례하여 가공시간은 줄었기 때문에 각 작업장의 총 가공시간은 동일하게 된다.

운반차의 운반 중에 지연이 발생하지 않으면 운반차의 수에 관계없이 운반차의 평균 운반시간은 동일하게 될 것이다. 그러나 제조시스템에서 작업장의 배치구조가 동일한 상태에서 운반차의 수가 증가함에 따라 네트워크의 교차로와 작업장의 pickup 점과 delivery 점에서 운반차의 기다리는 평균 시간은 증가하게 되고, 이는 운반시간을 증가시킬 것이다. 그러므로 운반차의 평균 운반시간의 증가는 운반차의 운행 중에 대기시간이 증가하기 때문에 발생하는 것으로 생각될 수 있을 것이다.

임의로 만든 수치적 예제를 이용하여 운반차의 수에 따른 작업물의 평균 운반시간을 분석한다. 제조시스템이 그림 1에서와 같이 load station(0), unload station(5), 그리고 4개의 작업장(1-4)으로 구성되어 있다. 그림에서 거리단위는 m이고, P/D는 동일한 위치에 있는 pickup 및 delivery 위치, P는 pickup 위치, D는 delivery 위치, R은 주차(parking)구역이다. 그리고 운반차는 화살표 방향으로 이동한다. 이 시스템에서 공정이 이루어질 작업의 종류는 4개이고, 운반차가 1대일 경우를 기준으로 하여 작업의 가공경로와 가공시간, 그리고 생산량은 표 1에서와 같다. 자료에서 각 작업장의 가공시간에 대하여는 가공시간이 최대인 작업장을 기준으로 하여 다른 작업장에서의 가공시간은 90%를 넘도록 정하였고, 모든 작업물을 실고, 운반하고 내리는데 걸리는 총운반시간은 작업장의 최대 가공시간을 기준으로 하여 74%로 하였다. 작업의 시스템의 load station(0)에 도착하는 도착간격시간은 10분이다. 작업물을 운반차에 실거나 운반차에서 내리는데 걸리는 시간은 0.5분이다. 운반차의 속도는 평균 45m/분이다. 운반차가 여러 대일 경우에 운반차의 성능은 동일한 것으로 가정한다. 시스템에 작업물의 투입순서는 생산하려는 작업량에 비하여 아직 생산하지 않은 작업량의 비율이 높은 작업종류를 먼저 투입하는 방법을 따른다.

운반차의 수가 1보다 많은 경우에도 제조시스템은 그림 3과 동일하다. 그러나 운반차의 수가  $N$  ( $N > 1$ )일 때 작업물의 가공시간은 표 1에 있는 가공시간을 운반차의 수,  $N$ 으로 나누고, 생산량은 표 1에 있는 생산량에 운반차의 수,  $N$ 으로 곱한 값으로 한다. 그리고 시스템에 작업물의 도착간격시간은 10분을 운반차의 수,  $N$ 으로 나눈 값으로 한다.

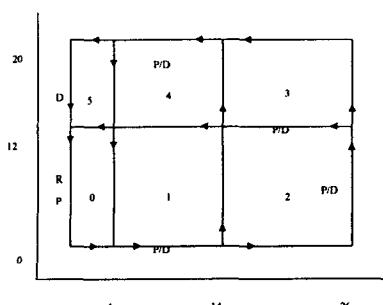


그림 3 제조시스템의 배치

표 1 작업의 가공경로, 가공시간 및 생산량

작업종류	가공경로	가공시간	생산량
1	0 - 1 - 4 - 2 - 3 - 5	0 - 15 - 11 - 12 - 14 - 0	50
2	0 - 3 - 4 - 2 - 1 - 5	0 - 9 - 10 - 8 - 12 - 0	70
3	0 - 2 - 3 - 4 - 5	0 - 10 - 14 - 8 - 0	100
4	0 - 4 - 1 - 2 - 5	0 - 13 - 17 - 9 - 0	60

가공경로에서 0은 load station을 나타내고, 5는 unload station을 나타낸다.

load station과 unload station에서 가공행위는 발생하지 않아 가공시간은 0이다.

표 2 평균 운반시간과 생산소요시간

운반차의 수	평균 운반시간(초)	생산소요시간(초)
1	104.11	206,535
2	107.73	206,280
3	111.31	206,180
4	116.89	206,152
5	121.20	206,452

운반차의 수에 맞추어 자료를 변화시키면서 시뮬레이션을 실시한다. AutoMod 8.2를 이용하여 시뮬레이션을 실시하여 운반차의 수에 따른 작업물의 평균 운반시간과 생산소요시간을 구하면, 표 2에서와 같이 나타내진다. 표 2에 나타난 것과 같이 운반차의 수가 증가함에 따라 작업의 평균 운반시간이 증가함을 알 수 있다. 운반차의 수가 증가할지라도 물리적인 운반차의 평균 이동거리는 같도록 자료를 만들었기 때문에, 운반시간에 차이가 발생한 것은 운반차의 수의 증가로 인하여 운반차의 운송중의 자연시간으로 인하여 발생한 것임을 알 수 있다. 또한 전체적인 생산소요시간은 운반차의 수에 관계없이 거의 동일하게 나타나 있다. 평균 운반시간이 증가하면 운반차의 이용률이 증가하게 되고, 이는 작업장 기계들의 가공시간에 비하여 운반차의 운반시간이 생산소요시간을 증가시킬 수 있는 병목현상을 발생시키는 역할을 할 수 있다. 그러나 여기서는 운반차의 이용률을 아주 높지 않게 정하였기 때문에 생산소요시간은 거의 동일하게 나타났다.

문제와 실험 조건에 따라 정도의 차이는 있을지라도 운반차의 수의 증가에 따라 제조시스템에서 작업물의 평균 운반시간은 증가할 것이다. 제조시스템을 여러 개의 작은 규모의 네트워크로 나누어 각 네트워크에 적은 수의 운반차를 두면 평균 각 네트워크는 운반시간을 크게 증가시키지 않으면서 통제를 편리하게 할 수 있을 것이다.

#### 4. 혼합 직렬형태 모형 형성

여러 개의 작업장들로 이루어진 제조시스템에서 반송시스템으로 여러 개의 작은 규모의 중첩되지 않는 네트워크 구조로 하기 위하여 작업장들을 분할하고, 각 분할된 작업장그룹들을 각각 네트워크로 연결하여 각 네트워크에 1대 또는 2대의 경우와 같이 적은 수의 운반차를 배정하는 혼합 직렬구조를 만든다. 이렇게 함으로서 혼합 직렬형태 구조 시스템이 하나의 네트워크 구조에 비하여 분할된 각 네트워크에 운반차의 수가 적어 통제문제의 어려움을 줄일 수 있고, 직렬구조에 비하여 네트워크사이의 전달점의 수를 줄여 작업물을 이동시키는데 있어 운반거리

및 운반횟수를 줄임으로서 작업물의 평균 운반시간을 단축시킬 수 있을 것이다. 하나의 네트워크 시스템으로 만들 수 있는 제조시스템을 여러 개의 작은 규모의 네트워크로 나누는데 있어서 각 네트워크에 최대 몇 대의 운반차가 포함되도록 네트워크를 분할하는 것이 적절할지는 쉽게 결정될 수 없을 것이다. 그러나 본 논문에서는 분할된 네트워크에서 각 네트워크에 최대 2대 이내의 운반차가 배정되도록 네트워크 규모를 정한다.

#### 4.1 운반차 대수 결정

혼합 직렬형태 구조에서 필요한 운반차의 수를 결정한다. 먼저 주어진 제조시스템에서 모든 작업장의 연결이 하나의 네트워크 구조로 연결되는 경우로 하여 단위시간에 필요로 하는 생산률을 달성하기 위하여 필요한 최소 운반차 수를 실질 운반시간을 반영하여 결정한다. 운반은 운반 중에 발생하는 지체는 무시하고 두 위치사이를 가장 짧게 연결하는 경로를 따라 이루어 진다. 수송문제(Maxwell and Muckstadt[13])에 의한 방법으로, 운반차가 작업물을 실은 상태에서의 이동시간,  $t^L$ , 그리고 운반차가 빈 상태에서의 이동시간,  $t^E$ 은 쉽게 계산된다. 따라서 필요한 최소 운반차의 수,  $R_n$ 은 다음과 같이 결정된다.

$$R_n = \left[ \frac{t^L + t^E}{\beta T_0} \right]^+ \quad (1)$$

여기서,  $[x]^+$  :  $x$ 보다 크거나 같은 수에서 가장 작은 정수

$T_0$  : 생산계획기간의 단위시간

$\beta$  : 운반차의 이용률

따라서 혼합 직렬형태 구조에서 필요한 운반차의 수,  $R$ 은  $R \geq R_n$  관계를 만족해야 한다.

#### 4.2 네트워크 수 결정

혼합 직렬형태에서 사용되는 총 운반차의 수는 모든 작업장이 하나의 네트워크로 연결된 제조시스템에서 필요한 최소 운반차 수와 동일하게 하거나 많게 한다. 그리고 혼합 직렬형태 구조에서 각 네트워크에 필요한 운반차 수는 최대 2대가 되도록 한다. 따라서 분할 네트워크에서 각 네트워크에 운반차 수를 최대 2까지 할당함으로서 네트워크의 수는 운반차의 수를 2로 나누었을 때의 값과 같거나 큰 다음 정수로 한다. 예를 들어 운반차의 수가 5대이면 분할 네트워크에서 네트워크의 수는 3개로 한다. 5대의 운반차를 3개의 네트워크에 할당하면 각 네트워크에 할당되는 운반차의 수는 2, 2, 1 대가 된다. 작업물의 이동시간을 기준으로 분할 네트워크에서 각 네트워크의 총 운반시간의 크기는 운반차 수가 2 : 2 : 1의 비율이 되도록 한다.

#### 4.3 모형 형성

제조시스템을 여러 개의 중첩되지 않는 작은 규모의 네트워크 구조로 분할하여 구축하기 위하여 작업장을 기준으로 분할하는 방법을 생각한다. 분할하고자 하는 네트워크의 수와 네트워크에서 필요한 운반차 수를 고려하여 분할한다. 분할하는 방법은 네트워크에서 사용하려는 운반차의 수에 따라 이용 가능한 운반차의 수 이내에서 실현 가능한 네트워크의 집합을 만든다.

이 실현 가능한 네트워크들에서 네트워크 선택 기준들의 하나로는 모든 네트워크에서 운반차당 총 운반시간의 최대값을 최소화시킬 수 있는 방법을 적용한다. 그리고 네트워크 선택의 또 다른 기준으로는 다음 공정을 다른 네트워크에 있는 작업장에서 이루어지는 경우와 같이 작업물의 네트워크 사이의 이동거리를 가장 짧게 하는 방법을 적용한다.

## (1) 가정

- ① 제조시스템에서 작업장에 대한 배치는 주어져 있다.
- ② 작업물의 이동은 작업장사이에서 최단거리로 이동된다.
- ③ 인접하고 있는 네트워크사이의 전달점은 임의의 위치에 한 개가 주어진다.
- ④ 분할된 네트워크에서 각 운반차는 주어진 분할 네트워크 내에서 이동한다.
- ⑤ 생산하고자 하는 작업물의 종류, 공정순서 및 단위기간에 생산량은 주어져 있다.
- ⑥ 동일 네트워크에서 운반차는 모든 pickup 및 delivery 점에 도달 가능하다.
- ⑦ 작업물이 다른 네트워크의 작업장으로 이동할 경우 중간에 경유하게 되는 이동경로는 경유하는 네트워크 수를 가장 적게 하는 방법으로 네트워크를 경유하여 이동한다.

## (2) 모형 형성 방법

## (가) 네트워크 집합

제조시스템의 작업장을 여러 개의 중복되지 않는 작은 크기의 네트워크로 나누어 설계할 때 각 작업장을 어느 네트워크에 포함시킬 것인가를 결정한다. 인접하고 있는 몇 개의 작업장을 하나의 네트워크로 구축할 경우, 소수의 운반차가 이 네트워크에서 이용될 수 있는 가능한 집합을 만든다.

혼합 직렬형태에서, 어떠한 네트워크에서 운반차의 총 운반시간은 네트워크 내에 있는 작업장사이의 작업물 운반시간과 이 네트워크에 있는 작업장과 다른 네트워크에 있는 작업장사이에 작업물이 이동될 때 이 네트워크에서 발생하는 운반시간으로 나누어진다. 하나의 네트워크에서 처리되는 작업량이 많아질수록 운반시간은 증가할 것이다. 그러므로 많은 운반시간을 필요로 하는 작업장을 하나의 네트워크에 포함시키면 운반차의 운반능력에 비하여 실질 운반시간이 많아져 운반차로 인한 병목현상이 나타날 것이다. 따라서 1대 또는 2대의 운반차로 가능한 적절한 운반시간을 정해 이 운반시간보다 적게 발생하는 실질 운반시간을 실현가능한 것으로 한다.

네트워크 구조에 비하여 직렬 구조, 혼합 직렬형태 구조에서 더 많은 수의 운반차를 필요로 할 수 있다. 이는 총 이동거리, pickup 및 delivery 횟수의 증가로 인하여 운반시간이 길어지기 때문이다. 그러나 동일한 수의 운반차를 사용할 경우에는 네트워크 구조에 비하여 직렬구조 및 혼합 직렬구조에서 운반차의 운반시간이 증가하게 된다. 따라서 혼합 직렬형태 구조일 경우에 1대의 운반차로 실현가능한 운반시간은 좀더 길어질 수 있다. 예를 들어, 네트워크 구조에서 운반차의 이용률을 반영하여 1대의 운반차로 실현가능한 운반시간이 45분이면, 혼합 직렬형태 구조일 때의 실현가능한 운반시간은 45분이 넘는 시간(예 50분, 55분 등)도 운반차의 수에 따라 실현가능한 운반시간으로 설정될 수 있다. 이용할 수 있는 운반차의 수를 고려하여 1대의 운반차로 적절한 실현가능한 시간을 정해  $T_0$ 로 나타낸다.

운반차의 운반시간능력을 고려하여 하나의 네트워크로 만들 수 있는 실현가능한 작업장 집합을 만든다. 각 네트워크에 필요한 운반차의 수는 1대 또는 2대이므로, 실현가능한 네트워크의 집합은 운반차의 수에 따라서 2가지 형태가 될 수 있다.

동일 네트워크 내에 있는 작업장사이의 최단거리는 쉽게 구할 수 있지만, 다른 네트워크에 있는 작업장사이의 이동거리는 전달점을 이용하기 때문에 전달점의 위치가 정하여지지 않은 상황에서 쉽게 결정될 수 없다. 다른 네트워크에 있는 작업장사이의 이동거리는 두 네트워크사이의 전달점과 네트워크의 선의 이동방향이 정확히 나타내져야만 최단거리를 알 수 있다. 따라서 여기서는 다른 네트워크에 있는 작업장사이의 작업물 흐름의 최단거리는 다른 대안으로 제

시된다. 혼합 직렬형태 구조에서 다른 네트워크에 있는 두 작업장사이의 거리는 단일 네트워크 구조일 때의 두 작업장 사이의 이동거리를 이용하여 구한다. 이 이동거리의 1/2를 작업장이 속한 네트워크에서 발생한 이동거리로 반영한다. 이 이동거리는 정확한 거리는 될 수 없으나, 평균적으로 근사한 값이 될 수 있어 작업장을 나누는 기준으로 한다.

$O_1$ 은 1대의 운반차로 실현가능한 네트워크의 집합들을 나타내고,  $O_2$ 는 2대의 운반차로 실현가능한 네트워크의 집합들을 나타낸다.  $\Omega(i_1, i_2, \dots, i_n)$ 는 작업장  $i_1$ 부터 시작하여  $n$ 개의 작업장  $i_1, i_2, \dots, i_n$ 이 인접하여 하나의 네트워크를 이루는 것으로 집합,  $O_1$  또는  $O_2$ 에 속하는 경우를 말한다.  $E(i_1, i_2, \dots, i_n)$ 는  $\Omega(i_1, i_2, \dots, i_n)$ 를 구성하는 작업장들과 인접하고 있는 구성요소가 하나의 작업장으로 된 작업장 집합을 나타낸다. 이와 같이, 인접하고 있는 작업장 중에서 작업장번호,  $j$ 가  $\Omega(i_1, i_2, \dots, i_n)$ 과 결합하여 하나의 네트워크를 이루게 된다면,  $i_{n+1} = j$ 로 놓고,  $\Omega(i_1, i_2, \dots, i_n, i_{n+1})$ 는 새로운 네트워크가 된다.

집합  $O_1$ 과  $O_2$ 에 있는 네트워크 요소들을 각각 차례로 나열하고, 이들에 일련번호,  $u=1, 2, \dots, v=1, 2, \dots$ 를 붙인다. 이 번호에 해당하는 네트워크가 최종 해에서 선택되는지의 여부를 나타내기 위하여 변수,  $X_u$ ,  $Y_v$ 를 할당한다. 그리고 변수  $X_u$ 에 해당하는 네트워크를 구성하는 작업장 집합을  $P_u$ 로 나타낸다. 마찬가지로 변수  $Y_v$ 에 해당하는 네트워크를 구성하는 작업장 집합을  $Q_v$ 로 나타낸다.

어떠한 네트워크  $P_u$ 에 대하여, 이 네트워크에서 발생하는 운반시간은 네트워크내의 작업장 사이에서 발생하는 운반시간과 이 네트워크와 다른 네트워크에 있는 작업장과의 사이에서 발생하는 운반시간의 1/2을 합한 값으로 나타낸다. 즉, 이러한 운반시간,  $T_u$ 는 다음의 식 (2)와 같이 나타내진다.

$$T_u = \sum_{i \in P_u, j \in P_u} f_{ij}(d_{ij}/V + 2\theta) + \sum_{i \in P_u, j \in P_u} f_{ij}(d_{ij}/(2V) + 2\theta) + \sum_{i \in P_u, j \in P_u} f_{ij}(d_{ij}/(2V) + 2\theta) \quad (2)$$

첫 번째 항은 같은 네트워크에 있는 작업장사이에서 이동할 때의 운반시간을 나타내고, 두 번째 항은 네트워크  $P_u$ 에 있는 작업장에서 다른 네트워크로 이동하는 작업물의 네트워크  $P_u$ 에서의 운반시간을 나타내고, 세 번째 항은 다른 네트워크에 있는 작업장에서 네트워크  $P_u$ 에 있는 작업장으로 이동하는 작업물의 네트워크  $P_u$ 에서의 운반시간을 나타낸다. 그리고 식(2)에서  $i, j$ 는 작업장을 나타내는 첨자이고,  $d_{ij}$ 는 작업장  $i$ 의 pickup 점에서 작업장  $j$ 의 delivery 점까지의 거리이고,  $f_{ij}$ 는 작업장  $i$ 의 pickup 점에서 작업장  $j$ 의 delivery 점으로 단위기간에 작업물의 흐름량이고,  $V$ 는 운반차의 평균 이동속도이고, 그리고  $\theta$ 는 운반차에 작업물을 pickup 및 delivery 하는 시간을 나타낸다.

다음과 같은 절차로 실현가능한 네트워크 집합을 만든다.

#### 실현가능한 네트워크 집합 생성 절차

단계 1 : 작업장을 순서대로 일련번호,  $1, 2, \dots, M$ 을 부여한다. 그리고  $i=1, , \Psi=\phi$ 로 놓고, 단위기간과 운반차의 이용률을 고려하여 1대의 운반차로 실현가능한 시간,  $T_0$ 의 값을 정한다.

단계 2 :  $n=1, i_1=i$ 로 놓고,  $\Psi=\{\Omega(i_1)\}$ 로 놓는다.

단계 3 :  $\Psi$ 에 있는 네트워크 집합 중에서 작업장  $i_1$ 로 시작하고 네트워크를 구성하는 작업장

의 수가  $n$ 개인 모든 네트워크를 집합  $\Psi$ 에서  $\Theta$ 로 옮긴다. 그러나 이러한 네트워크가 없으면 단계 7로 간다.

**단계 4 :**  $\Theta$ 에 있는 모든 네트워크에 대하여 차례로 식 (2)을 이용하여 작업물의 운반시간,  $T_i$ 를 구한다. 이 운반시간,  $T_i$ 를 운반차가 1대일 경우의 이용가능한 시간,  $T_0$ 와 두 대일 경우의 이용가능한 시간,  $2T_0$ 와 비교한다. 만일  $T_i \leq T_0$  이면 이 네트워크를  $O_1$ 에 넣고,  $T_0 < T_i \leq 2T_0$ 이면 이 네트워크를  $O_2$ 에 넣고,  $T_i > 2T_0$ 이면 이 네트워크를 어디에도 넣지 않고 집합  $\Theta$ 에서 삭제한다. 집합  $\Theta$ 에 요소가 있으면 단계 5로 가고, 없으면 단계 6으로 간다.

**단계 5 :**  $\Theta$ 에 있는 어떠한 네트워크  $\Omega(i_1, i_2, \dots, i_n)$ 에 대하여 네트워크  $\Omega(i_1, i_1, \dots, i_n)$ 을 구성하는 작업장들과 인접하고 있는 작업장 집합,  $E(i_1, i_2, \dots, i_n)$ 을 구한다.  $E(i_1, i_2, \dots, i_n)$ 에 있는 모든 작업장에 대하여 차례로 하나의 작업장을  $\Omega(i_1, i_2, \dots, i_n)$ 과 결합하여 새로운 네트워크를 만든다. 즉 작업장이  $i_{n+1} = j$ 로 하여 새로운 네트워크,  $\Omega(i_1, i_2, \dots, i_{n+1})$ 를 만든다. 만들어진 모든 네트워크에 대하여, 각 네트워크가  $O_1$  및  $O_2$ 에 있는 것과 일치하지 않는 경우이면 네트워크를  $\Psi$ 에 넣고, 동일한 것이 있으면  $\Psi$ 에 넣지 않는다. 그리고 네트워크  $\Omega(i_1, i_2, \dots, i_n)$ 을  $\Theta$ 에서 삭제한다.  $\Theta$ 에 있는 나머지 모든 네트워크 집합에 대하여도 단계 5의 절차를 동일하게 수행한다.

**단계 6 :**  $n = n + 1$ 로 놓고, 단계 3으로 간다.

**단계 7 :**  $i = i + 1$ 로 놓고,  $i > M$  이면 멈추고, 그렇지 않으면, 단계 2로 간다.

#### 작업장 부분 결합 방법

앞에서 설명된 실현가능한 네트워크 집합 생성절차를 적용하는데 있어서, 운반차가 1대 또는 2대로 실현가능한 네트워크를 구성하는 작업장을 나누는데 있어서 가능하면 고려할 수 있는 경우의 수를 줄일 필요가 있다. 작업장사이에 물류흐름을 고려하여 인접하고 있는 작업장들 중에서 일부는 동일한 네트워크에 두는 것이 적절한 경우를 결정할 필요가 있다. 즉, 작업장사이의 흐름량을 고려하여 네트워크사이의 흐름량을 줄이기 위하여 인접하고 있는 작업장들 중에서 흐름량이 많이 발생한 두 작업장들을 동일한 네트워크에 두는 것이 적절한 경우를 결정한다.

작업장사이의 흐름량을 나타내는 표를 작성한다. 이 표는 단일 네트워크 구조에서 작업물을 어떠한 작업장에서 pickup하여 다른 작업장에서 delivery하기 위하여 운반차가 최단거리로 이동할 때 경유하게 되는 모든 작업장을 pickup 작업장부터 시작하여 인접하고 있는 두 작업장들에 대하여 연속적으로 차례로 흐름량을 구한다. 예를 들어, 단위기간당 흐름량이 2인 작업물이 작업장 1에서 3으로 최단거리로 이동할 때 경유하는 작업장이 1-2-3이면, 작업장 1에서 2로, 작업장 2에서 3으로 흐름량이 각각 2가 된다.

단위기간에 생산하려는 모든 작업물에 대하여 공정순서에 따라 인접하고 있는 작업장사이의 흐름량을 나타내는 표를 만든다. 이 표에서 작업장사이의 흐름량이 많이 발생한 작업장들은 다음 기준을 적용하여 동일한 네트워크에 두어 하나의 작업장처럼 나타낸다.

**결합기준:** 두 작업장사이에 흐름량이 가장 많이 발생시키는 작업장들부터 시작하여 어떠한 작업장,  $i$ 가 인접하고 있는 작업장과의 흐름량 중에서 흐름량을 가장 많이 발생시키는 작업장,  $j$ 가 있을 때, 이 작업장,  $j$ 도 인접하고 있는 작업장과의 흐름량 중에서 흐름량이 작업장,  $i$ 와

가장 많이 발생하면, 작업장  $i$ 와  $j$ 를 동일한 네트워크에 고려한다.

이와 같이, 일부의 작업장을 흐름량을 고려하여 미리 동일한 네트워크에 두는 것으로 고려된 경우에 여기서 발생하는 운반시간을 구한다. 동일한 네트워크에 두려는 후보자로 고려되고 있는 작업장들의 운반시간이 1대의 운반차로 실현가능한 운반시간보다 크게 발생하는 경우가 있다. 이와 같은 경우의 네트워크의 수와 문제에서 1대의 운반차를 두려는 네트워크의 수와 비교한다. 전자의 수가 후자의 수를 넘지 않도록 고려한다. 예를 들어, 1대의 운반차를 사용하려는 네트워크가 1개이면, 흐름량이 많이 발생하는 작업장부터 결합하여 이들의 운반시간을 구하였을 때 운반시간이 1대의 운반차로 실현가능한 운반시간보다 크게 발생하는 수가 1이 되면 결합을 멈춘다.

이와 같이 일부의 작업장을 묶으면, 고려할 수 있는 작업장의 경우의 수가 줄어들어 실현 가능한 네트워크의 수를 나타내는 변수의 수를 줄일 수 있다.

#### (나) 수리적 모형

작업장을 네트워크로 나눌 때 목적함수로 여러 가지 방법이 있을 수 있다. 여기서는 아래와 같은 2가지 방법을 고려하는 문제를 각각 다룬다.

- ① 방법 1: 네트워크에서의 운반차의 운반시간을 균일화하기 위하여 운반시간이 최대로 발생하는 네트워크의 운반시간을 최소화하는 방법
- ② 방법 2: 실현가능한 네트워크 집합들에서 다른 네트워크에 있는 작업장으로 이동하는 작업물의 이동거리를 최소화하는 방법

방법 1을 적용하는 수리적모형은 운반차의 운반능력을 고려하여 만들어진 실현가능한 네트워크 집합에 대하여 운반차에 발생하는 운반시간의 최대 값을 최소화하는 목적함수를 적용하는 것이다. 집합  $O_1$ 과  $O_2$ 에 있는 네트워크에서 운반차당 운반시간의 최대값을  $T$ 라고 했을 때,  $T$ 를 최소화하는 것을 목적함수로 한다. 다음과 같은 수리적모형, P1이 나타내진다.

$$P1 : \text{Minimize} \quad T \quad (3)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{u \in O_1} I_{iu}^1 X_u + \sum_{v \in O_2} I_{iv}^2 Y_v = 1, \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_{u \in O_1} X_u = N_1 \quad (5)$$

$$\sum_{v \in O_2} Y_v = N_2 \quad (6)$$

$$t_u^1 X_u - T \leq 0, \quad u = 1, 2, \dots, \quad (7)$$

$$t_v^2 Y_v - 2T \leq 0, \quad v = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

$$X_u = 0, 1, \quad u = 1, 2, \dots, \quad (9)$$

$$Y_v = 0, 1, \quad v = 1, 2, \dots, \quad (10)$$

여기서,  $X_u = 1$ , 집합  $O_1$ 에 있는 네트워크 중에서 네트워크  $u$ 가 최종 해에 포함되면,  
0, 그렇지 않으면

$Y_v = 1$ , 집합  $O_2$ 에 있는 네트워크 중에서 네트워크  $v$ 가 최종 해에 포함되면,  
0, 그렇지 않으면

$$\begin{aligned}
 I_{iu}^1 &= 1, \text{ 작업장 } i \text{가 집합 } O_1 \text{에 있는 네트워크 중에서 네트워크 } u \text{에 포함되면}, \\
 &\quad 0, \text{ 그렇지 않으면} \\
 I_{iv}^2 &= 1, \text{ 작업장 } i \text{가 집합 } O_2 \text{에 있는 네트워크 중에서 네트워크 } v \text{에 포함되면}, \\
 &\quad 0, \text{ 그렇지 않으면} \\
 t_u^1 &= \text{집합 } O_1 \text{에 있는 네트워크에서 네트워크 } u \text{에서의 운반시간} \\
 t_v^2 &= \text{집합 } O_2 \text{에 있는 네트워크에서 네트워크 } v \text{에서의 운반시간}
 \end{aligned}$$

제약식 (4)은 각 작업장은 정확히 하나의 네트워크에 포함되어야 함을 의미한다. 제약식 (5)은 운반차가 1대인 네트워크의 수는  $N_1$  개임을 의미하고, 제약식 (6)은 운반차가 2대인 네트워크의 수는  $N_2$  개임을 의미한다. 제약식 (7)은 운반차가 1대인 네트워크에서의 운반시간이  $T$ 보다 적어야함을 나타내고, 제약식 (8)은 운반차가 2대인 네트워크에서의 운반시간이  $2T$ 보다 적어야함을 나타낸다. 나머지 제약식 (9)과 (10)는 변수의 범위를 나타내는 것으로 변수의 값이 0, 1이 되어야함을 의미한다.

방법 2를 적용한 수리적모형은 운반차의 운반시간 능력을 고려하여 실현가능한 모든 네트워크에 대하여 타 네트워크에 있는 작업장으로 이동하는 작업물의 이동거리를 최소화하는 것이다. 목적함수는 각 네트워크에서 다른 네트워크로 나가는 작업물의 총이동거리를 최소화 할 수 있도록 한다. 다음과 같은 수리적모형, P2이 나타내진다.

$$\text{P2 : Minimize} \quad \sum_{u \in O_1} \left( \sum_{i \in P_u, j \in P_u} f_{ij} d_{ij} \right) X_u + \sum_{v \in O_2} \left( \sum_{i \in Q_v, j \in Q_v} f_{ij} d_{ij} \right) Y_v \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 \text{subject to} \quad & \sum_{u \in O_1} I_{iu}^1 X_u + \sum_{v \in O_2} I_{iv}^2 Y_v = 1, \quad \forall i \\
 & \sum_{u \in O_1} X_u = N_1 \\
 & \sum_{v \in O_2} Y_v = N_2 \\
 & X_u = 0, 1, \quad u = 1, 2, \dots, \\
 & Y_v = 0, 1, \quad v = 1, 2, \dots,
 \end{aligned}$$

모형 P2에서의 제약식은 모형 P1에서 나타난 제약식에서 네 번째와 다섯 번째 제약식 (7)과 (8)를 제외하고 동일하다.

수리적모형 P1과 P2는 변수의 범위가 0과 1인 정수이고, 변수들의 차수와 관계식은 1차로 표현되어 있다. 따라서 이들은 선형정수계획 모형으로 이들에 대한 해는 선형 정수계획 프로그램을 이용하여 구할 수 있다.

지금까지 설명된 내용은 주어진 작업장들을 몇 개의 네트워크로 나누고자 할 경우에 각 네트워크에서 사용되는 운반차의 능력과 네트워크에서의 실질 운반시간을 고려하여 동일 네트워크에 포함될 수 있는 실현가능한 작업장들의 집합을 만들고, 집합에 있는 각 요소에 변수를 할당하여 목적함수 기준과 제약식을 만족시킬 수 있는 수리적모형을 만들어 해를 구하는 방법이다.

#### 4.4 전달점의 위치와 네트워크의 선의 이동 방향

##### (1) 전달점(transit point)의 위치

인접하고 있는 네트워크사이에 작업물의 전달에 필요한 전달점을 1개씩 둔다. 이 전달점의 위치는 두 네트워크가 접하는 위치들 중에서 임의의 위치에 둔다.

##### (2) 혼합 직렬형태에서 운반차의 이동방향 결정

분할된 혼합 네트워크 구조에서 전달점은 인접하고 있는 네트워크와의 사이에 임의의 위치에 정한 후에 각 네트워크에 대하여 선의 이동경로의 방향을 결정한다. 선의 이동방향은 단일 방향으로 한다.

각 네트워크에서 선의 이동방향은 모든 네트워크를 함께 고려하여 하나의 수리적모형으로 나타내어 이를 풀어 구할 수 있다. 그러나 각 네트워크는 인접 네트워크와의 사이에 전달점이 결정되면 작업물의 이동경로가 정해졌으므로 작업물이 거치게되는 전달점이 결정되어 네트워크내의 이동과 이 네트워크와 다른 네트워크와의 사이의 이동은 다른 네트워크에 관계없이 각 네트워크에서 발생하는 거리에 의해 결정되므로 네트워크의 선의 이동방향은 네트워크별로 독립적으로 이동거리를 최소화되도록 결정한다. 그러므로 분할된 각 네트워크는 Sinreich 와 Tanchoco[21]이 제시한 방법과 동일한 방법으로 선의 이동방향을 결정한다. 여기서 모든 선의 교차점, pickup 점 및 delivery 점을 마디로 하고, 마디를 연결하는 모든 선에 대하여 각 선에 하나의 변수를 할당하여 수리적모형을 세운 후에 선형 정수계획에 바탕을 둔 해법으로 변수의 방향을 결정한다. 다음과 같이 부호를 정의하고, 수리적모형으로 나타낸다.

$s$  = 네트워크를 나타내는 첨자

$K$  = from-to 차트에서 행, 열의 수

$f_{slm}$  = 네트워크  $s$ 에서 전달점을 포함하여 pickup 마디  $l$ 부터 delivery 마디  $m$ 까지 흐름량

$d_{sij}$  = 네트워크  $s$ 에서 선  $(i-j)$ 의 길이 (마디  $i$ 부터 인접마디  $j$ 까지 거리)

$Y_{slm}$  = 네트워크  $s$ 에서 pickup 마디  $l$ 부터 delivery 마디  $m$ 까지의 경로길이

$X_{sijlm} = 1$ , 네트워크  $s$ 에서 선  $(i-j)$ 이 pickup 마디  $l$ 부터 delivery 마디  $m$ 까지의 경로에 포함되면

0, 그렇지 않으면

$Z_{sij} = 1$ , 네트워크  $s$ 에서 선  $(i-j)$ 이 마디  $i$ 부터 마디  $j$ 로의 방향이 주어지면

0, 그렇지 않으면

분할된 네트워크에서 각 네트워크의 선의 이동방향은 수리적 모형, P3을 이용하여 구할 수 있다. 혼합 직렬형태 구조에는 여러 개의 소규모 네트워크가 있으므로, 모든 네트워크에 대하여 독립적으로 동일한 방법으로 수리적모형을 적용하여 네트워크에서 운반차의 이동방향을 결정한다. 네트워크  $s$  ( $s=1, 2, \dots$ )에 대하여, pickup 점에서 delivery 점으로의 이동거리가 최소화되도록 네트워크에서 선의 이동방향을 결정한다.

$$P3 : \text{Minimize} \quad \sum_{l,m} f_{slm} Y_{slm} \quad (12)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{i,j} X_{sijlm} d_{sij} = Y_{slm}, \quad \forall l, m \quad (13)$$

$$X_{siklm} \leq Z_{sij}, \quad \forall l, m, \quad \forall i, j \quad (14)$$

$$Z_{sij} + Z_{sji} \leq 1, \quad \forall i, j \quad (15)$$

$$\sum_i Z_{sij} \geq 1, \quad \forall j \quad (16)$$

$$\sum_k Z_{sjk} \geq 1, \quad \forall j \quad (17)$$

$$\sum_k X_{siklm} = 1, \quad \forall l, m \quad (18)$$

$$\sum_k X_{skmlm} = 1, \quad \forall l, m \quad (19)$$

$$\sum_i X_{sijlm} = \sum_k X_{siklm}, \quad \forall l, m, \forall j \quad (20)$$

$$X_{sijlm} = 0, 1, \quad \forall l, m, \forall i, j \quad (21)$$

$$Z_{sij} = 0, 1, \quad \forall i, j \quad (22)$$

제약식 (13)은 네트워크에서 pickup 점  $l$ 에서 delivery 점  $m$ 까지의 거리를 나타낸다. 제약식 (14)은 pickup 점  $l$ 에서 delivery 점  $m$ 까지의 연결되는 선들이 선택되면, 이 선들의 방향이 주어져야 함을 의미한다. 제약식 (15)은 선의 방향이 한쪽만이 선택되어야 함을 의미한다. 제약식 (16)은 선이 만나는 마디에 들어오는 방향의 선이 최소 한 개 이상이 되어야 함을 의미하고, 제약식 (17)은 선이 만나는 마디에서 나가는 방향의 선이 최소 한 개 이상이 있어야 함을 의미한다. 제약식 (18)은 pickup 점에서 나가는 방향이 한 개 주어져야 하고, 제약식 (19)는 delivery 점에서 들어오는 방향이 한 개 주어져야 함을 의미한다. 제약식 (20)은 pickup 점  $l$ 에서 delivery 점  $m$ 으로 연결되는 선에서 점  $l, m$ 을 제외한 나머지 마디에 대하여 마디에 들어오는 방향의 수와 마디로부터 나가는 방향의 수가 같아야 함을 의미한다. 나머지 제약식들 (21)과 (22)는 변수의 값이 0, 1이 되어야 함을 나타낸다.

수리적모형 P3을 이용하여 분할된 모든 네트워크에 대하여 각각 독립적으로 선의 이동방향을 결정한다. 수리적모형 P3은 변수의 범위가 0과 1인 선형정수계획으로 표현되어 있다.

## 5. 수치적 예제

수치적 예제를 제시하여 혼합 직렬형태 구조로 나누는 절차를 설명한다. 네트워크 구조의 제조사 스템의 배치에 대한 예제는 그림 4와 같이 11개의 작업장으로 되어있다. 이 배치는 Sinrich and Tanchoco[21]에서 표현된 그림이다. 그림에서 거리 단위는 m이고, x 표시는 pickup 및 delivery 점 위치를 나타내는 것으로 각 작업장의 동일한 위치에 있다. 운반차가 pickup 점에서 작업물을 싣는 데 걸리는 시간과 delivery 점에서 작업물을 내리는데 걸리는 시간은 동일하게 0.25분이고, 운반차의 속도는 평균 45m/분이다. 운반차의 평균 이용률은 75%로 한다.

생산하려는 작업물의 종류, 가공경로 및 단위기간에 생산량은 표 3에 나타난 것과 같다. 단위기간은 1시간으로 한다.

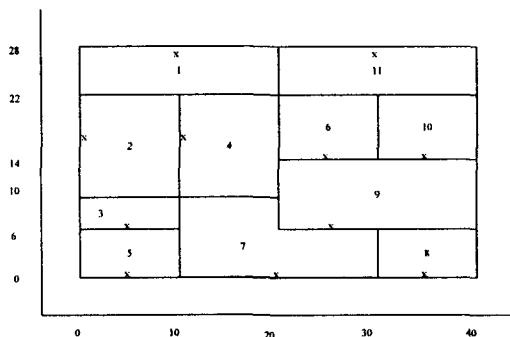


그림 4 제조시스템의 배치

표 3 작업의 가공경로 및 생산량

작업종류	가공경로	생산량(load/hour)
1	1 - 2 - 4 - 10 - 6 - 11	4.0
2	1 - 4 - 3 - 5 - 7	8.0
3	7 - 5 - 9 - 6 - 10 - 11	6.0
4	11 - 6 - 9 - 8 - 7	5.0
5	11 - 1 - 4 - 2 - 5 - 7	5.0

그림에서 작업장사이의 pickup 점(작업장)에서 delivery 점(작업장)까지의 최단거리를 나타내는 행렬은 표 4에서와 같다. 그리고 표 3에 나타난 자료를 이용하여, pickup 점에서 delivery 점으로 작업물의 흐름량을 나타내는 것은 표 5에서와 같다.

표 4 거리 행렬

To From	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	22	37	32	43	29	58	53	37	39	20
2	22	0	15	22	21	35	36	51	35	45	42
3	37	15	0	15	16	28	21	30	28	38	47
4	32	22	15	0	21	25	26	41	25	35	42
5	43	21	16	21	0	34	15	30	34	44	53
6	29	35	28	25	34	0	39	34	18	20	29
7	58	36	21	26	15	39	0	15	21	39	58
8	53	51	30	41	30	34	15	0	16	24	43
9	37	35	28	25	34	18	21	16	0	28	37
10	39	45	38	35	44	20	39	24	28	0	29
11	20	42	47	32	53	29	58	43	37	29	0

표 5 작업장사이의 흐름량 (loads/hour)

To From	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	4	0	13	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	4	5	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
4	0	5	8	0	0	0	0	0	0	4	0
5	0	0	0	0	0	0	13	0	6	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	5	6	4
7	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	6	0	5	0	0	0
10	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	6
11	5	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0

네트워크 구조일 경우에 loaded travel distance는 2772m이고, minimum empty travel distance는 696m이다. 따라서 필요한 최소 운반차의 수는 다음과 같이 구해진다.

$$\text{운반차의 수} = [ ((2772 + 696)/45 + 2*0.25 *127)/(60*075) ]^+ = [3.12]^+ = 4$$

따라서 네트워크 구조일 경우에 운반차의 수는 최소 4대 이상이어야 한다. 혼합 직렬구조와 직렬구조일 경우는 네트워크 구조일 경우와 같은 시스템 성과를 내려면 이동거리 및 운반횟수의 증가로 인하여 상황에 따라서는 4대보다 많은 운반차를 필요로 할 수 있다. 운반차의 수는 4대 이상이어야 하므로, 여기서는 5대의 운반차를 사용하는 것으로 하여 작업장을 분할하고자 한다.

표 3에 나타난 자료를 바탕으로 하여 모든 작업장이 결합되지 않고 따로 나누어져 있을 경우에 작업물이 pickup 점에서 delivery 점으로 이동될 때 경유하게 되는 모든 작업장들에 대하여 인접하고 있는 작업장사이의 작업물의 흐름량을 구하면 다음의 표 6에 나타난 것과 같다. 즉, 작업물이 pickup 점에서 delivery 점으로 이동될 때 통과하게 되는 작업장들을 pickup 작업장부터 시작하여 인접하는 두 작업장사이의 흐름량을 연속하여 delivery 작업장까지 나타낸다.

표 6 인접하는 작업장사이의 흐름량

작업장 작업장	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	4	0	13	0	0	0	0	0	0	5
2	0	5	9	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	8	13	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	11	14	9					
7	0	5	6	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

표 6에서 흐름량이 가장 많이 발생하는 작업장 5와 7을 동일한 네트워크에 둔다. 또한 상대적으로 흐름량이 많은 작업장 1과 4, 6과 10은 각각 동일한 네트워크에 둔다. 그러면 네트워크

를 만들기 위하여 고려해야 할 작업장의 요소는 다음과 같다.

(1, 4), 2, 3, (5, 7), (6, 10), 8, 9, 11

초기에 고려해야 할 작업장의 수 11개에서 8개로 줄어들어 실현가능한 변수의 수도 줄어든다.

분할 네트워크를 구성하는 가능한 집합들은 다음의 표 7에서와 같이 나타내진다.

표 7에서 오른쪽 열은 각 네트워크에서의 운반시간을 나타낸다. 예를 들어, 작업장 1과 4가 하나의 네트워크를 이루는 경우에 이 네트워크에서 발생한 운반차의 운반시간은 37.4778분을 의미한다. 표 7에서 각 열에 대한 내용은 표 다음에서 설명되고 있다.

표 7 네트워크 집합 및 운반시간

네트워크	이동 거리1	이동 거리2	이동 거리3	이동 거리4	흐름량1	흐름량2	운반 시간(분)
(1,4)	1438	416	834	418	43	21	37.4778
(1,4,2)	1799	702	997	295	48	17	43.9889
(1,4,11)	1973	516	1079	563	58	26	50.9222
(1,4,6,10)	2731	796	1494	698	83	32	71.8444
(1,4,2,3)	2202	897	1205	308	61	17	54.9667
(1,4,2,11)	2334	802	1242	440	63	22	57.4333
(1,4,2,3,11)	2737	997	1450	453	76	22	68.4111
(1,4,2,6,10)	3092	1082	1657	575	88	28	78.3556
(1,4,6,10,11)	3266	1331	1739	408	83	22	77.7889
(2)	361	0	163	163	18	9	13.0111
(2,3)	764	75	371	296	39	17	27.9889
(2,3,5,7)	1923	658	872	214	75	10	58.8667
(2,3,5,7,8)	2078	733	947	214	80	10	63.0889
(2,3,5,7,9)	2327	784	1060	276	91	15	71.3556
(3)	403	0	208	208	26	13	17.4778
(3,5,7)	1562	583	709	126	62	6	48.3556
(3,5,7,8)	1717	658	784	126	67	6	52.5778
(3,5,7,9)	1966	709	897	188	78	11	60.8444
(3,5,7,8,9)	2121	864	972	108	78	6	62.5667
(5,7)	1159	375	501	126	49	6	37.3778
(5,7,8)	1314	450	576	126	54	6	41.6000
(5,7,9)	1563	501	689	188	65	11	49.8667
(5,7,8,9)	1718	656	764	108	65	6	51.5889
(5,7,8,9,6,10)	3011	1134	1424	290	98	10	82.4556
(6,10)	1293	280	660	380	44	15	36.3667
(6,10,9)	1697	478	848	370	55	15	46.3556
(6,10,11)	1828	715	905	190	49	10	44.8111
(6,10,9,11)	2232	913	1093	180	60	10	54.8000
(6,10,9,8)	1852	558	923	365	60	15	50.5778
(6,10,8,9,11)	2387	993	1168	175	65	10	59.0222
(8)	155	0	75	75	10	5	6.7222
(8,9)	559	80	263	183	27	11	19.7111
(9)	404	0	188	188	22	11	15.4889
(11)	535	0	245	245	20	10	15.9444

표 7에서 각 열의 내용에 대한 설명은 다음과 같다.

- 이동거리1: 단위기간에 해당 네트워크에 있는 작업장에서 다른 모든 작업장(동일 네트워크 및 다른 네트워크에 있는 작업장)으로 나간 작업물의 이동거리를 다른 모든 작업장에서 해당 네트워크의 작업장으로 들어온 작업물의 이동거리를 합한 거리를 나타낸다. 따라서 해당 네트워크에서의 이동거리는 이동거리1을 2로 나눈 값으로 한다.
- 이동거리2: 단위기간에 해당 네트워크 내에 있는 작업장사이에서 발생한 작업물의 총 이동거리를 나타낸다.
- 이동거리3: 단위기간에 해당 네트워크에 있는 작업장에서 나온 작업물의 총 이동거리를 나타낸다. 목적지는 해당 네트워크를 포함하여 모든 네트워크에 있는 작업장들에 해당한다.
- 이동거리4: 단위기간에 해당 네트워크에 있는 작업장에서 타 네트워크에 있는 작업장으로 이동한 작업물의 총 이동거리를 나타낸다.
- 흐름량1: 단위기간에 해당 네트워크에 있는 작업장들 사이에서 이동한 작업량에 해당 작업장에서 나간 작업량과 해당 작업장으로 들어간 작업량을 합한 흐름량을 나타낸다.
- 흐름량2: 단위기간에 해당 네트워크에 있는 작업장들 사이에서 이동한 작업물의 흐름량을 나타낸다.
- 운반시간: 단위기간에 필요한 작업물의 공정을 위하여 네트워크에 있는 모든 작업장을 경유하는 작업물들의 네트워크에서의 운반시간을 나타내는 것으로 다음과 같이 구해진다.

$$\text{운반시간} = (\text{이동거리1}/2)/45 + 2*0.25*\text{흐름량1}$$


---

1시간동안에 운반차의 실질적인 이용률을 75%로 하여, 표 7에서 나온 결과에서 운반시간이 45분 이내인 네트워크는 집합  $O_1$ 에 넣고, 운반시간이 90분 이내인 네트워크는 집합  $O_2$ 에 넣는다. 운반시간이 90분이 넘는 네트워크는 고려하지 않는다. 각 집합에 있는 네트워크 요소들을 차례로 순서를 정하고, 변수,  $X_u$ 와  $Y_v$ 를 각각 할당한다. 네트워크에서 운반차의 이용률을 균일화하는 기준을 목적함수로 하기 위하여 운반차의 평균 운반시간의 최대값을 최소화하는 수리적모형 P1을 이용하여 해를 구한다. Lindo 프로그램을 이용하여 풀면, 다음의 표 8에서와 같은 해가 구하여진다. 그리고 표 8에서와 같이 혼합 직렬형태 구조로 나눌 때 네트워크에서 작업물의 이동거리를 최소화하는 선의 최적 이동방향은 그림 6에서와 같다. 이 해도 마찬가지로 선형정수계획 모형으로 Lindo 프로그램을 이용하여 구해진다.

또한 목적함수로 다른 네트워크로 이동하는 작업물의 이동거리(이동거리4)를 최소화하는 기준을 적용하는 경우에 수리적모형, P2에 대하여도 Lindo 프로그램을 이용하면, 쉽게 해를 구할 수 있다.

표 8 혼합 직렬형태 해

네트워크	운반차의 수	운반시간(분)
(1, 2, 4, 11)	2	57.3667
(3, 5, 7, 8, 9)	2	62.5667
(6, 10)	1	36.3667

동일한 방법을 적용하여 각 네트워크에 한 대의 운반차만을 허용하여 5개의 네트워크로 분할할 수 있다. 표 6에 나타난 자료에서 인접하고 있는 작업장사이의 흐름량이 양수인 작업장을 동일 네트워크로 하는 경우와 여기에 1개의 작업장을 추가적으로 결합하여 동일 네트워크로 하여 표 7에서 나타낸 방법과 동일하게 적용하여 네트워크에서의 운반시간을 구한다.

앞부분에서 설명된 작업장 부분결합을 적용한 경우는 사전에 결합된 작업장들이 이루는 네트워크에서의 운반시간이 1대의 운반차로는 실현가능하지 않지만 2대의 운반차로는 실현가능한 경우를 포함할 수 있다. 사전에 미리 일부의 작업장을 동일한 네트워크에 두는 것으로 고정시키면 운반시간이 길어지고 실현가능하지 않을 수 있다. 그러므로 운반차의 수가 1대만 이용되는 네트워크만을 만드는 경우는 작업장 부분결합에서와 같이 흐름량이 많이 발생한 일부의 작업장을 미리 결합하는 방법을 적용하지 않는다. 대신에 흐름량이 양을 나타내고 있는 인접한 작업장들을 중심으로 하여 네트워크를 구성하는 방법을 적용한다.

즉, 흐름량이 양을 발생시키는 작업장들로 된 네트워크와 여기에 추가적으로 인접하고 있는 일부의 작업장을 결합하여 만들어지는 모든 네트워크에 대하여 1대의 운반차로 실현가능한 모든 네트워크의 경우를 고려한다. 본 논문에는 나타내지 않았지만 표 7에서 표현된 방법과 동일하게 나타내어 운반시간을 구하여 적용한다.

나누어진 모든 네트워크에 대하여 운반시간을 구하고, 수리적모형, P1을 적용하면 표 9에서와 같은 해를 얻을 수 있다.

표 9 5개 직렬구조 해

네트워크	운반시간(분)
(1, 11)	31.1556
(2, 4)	34.7778
(3, 5)	36.4556
(6, 10)	36.3667
(7, 8, 9)	38.6111

## 6. 시뮬레이션을 이용한 비교

단위기간에 주어진 작업물을 생산하는데 있어서 네트워크 구조, 혼합 직렬형태 구조 및 5개 직렬구조에 대한 3가지 대안의 시스템 성과를 비교한다.

다음과 같은 3가지의 경우에 대하여 작업물의 이동거리를 최소화하는 선의 이동방향을 구하고, 운반차의 주차위치를 정하고, 동일한 수의 운반차를 이용하는 것으로 가정하고 시뮬레이션을 실시하여 생산량을 비교하고자 한다.

대안 1(단일 네트워크 구조): 주차구역은 작업장 1의 왼쪽 위에 추가로 선을 설치하고, 그 선 위에 둔다.

대안 2(혼합 직렬형태 구조): 주차위치는 나누어진 각 네트워크에서 작업장 1, 6, 7의 P/D 위치에 둔다.

대안 3(5개 직렬 구조): 주차위치는 가장 최근에 작업물을 내린 위치에 둔다.

선의 최적 이동방향을 선형 정수계획 프로그램인 Lindo를 이용하여 구한다. 단일 네트워크 구조, 혼합 직렬형태 구조 및 5개 직렬 구조에서 선의 최적 이동방향은 그림 5, 6 및 7에 각각 나타나 있다.

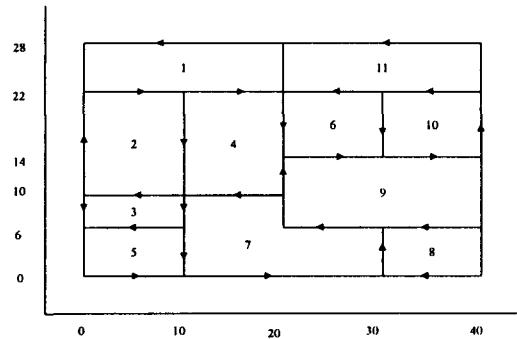


그림 5 네트워크 구조에서 선의 최적 이동방향

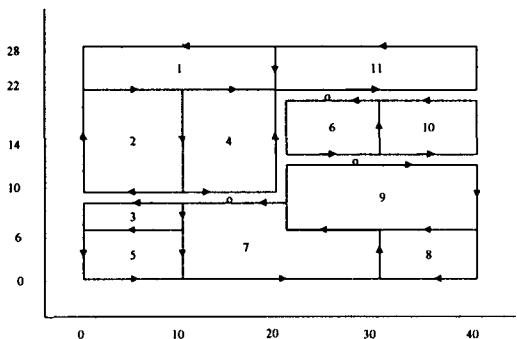


그림 6 혼합 직렬형태 구조에서 선의 최적 이동방향

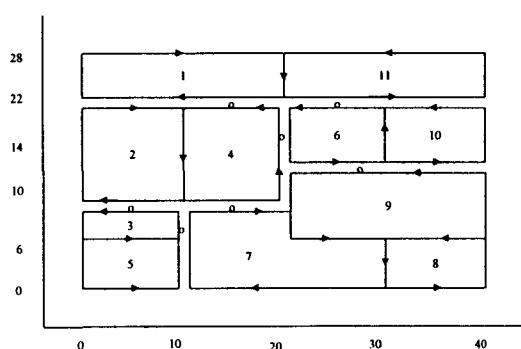


그림 7 5개 직렬 구조에서 선의 최적 이동방향

3개 대안들 사이에 시스템의 성과를 비교하기 위하여 앞 장에서 제시된 수치적 예제의 설명에 추가적으로 다음과 같은 내용을 첨가한다.

작업물들의 작업장에서 가공시간은 4~8(분) 사이의 값으로 정하였다. 그리고 각 작업장의 가공시간은 작업장에 도착하는 작업물의 평균 도착간격시간과 평균 가공시간을 비교하여 평균 가공시간이 평균 도착간격시간의 80~90%의 사이의 값이 되도록 하였고, 이에 맞추어 각 작업장의 기계의 수를 정하였다. 도착간격시간, 가공시간 등은 확정적인 자료이다. 대안 2와 대안 3에서 작업장의 배치에서 운반차의 이동선의 위치는 대안 1의 이동선의 위치를 기준으로 하여 분할되는 위치에서 양쪽으로 0.5m씩 들어가서 1m 간격을 띄우고 나누어졌다. 따라서 부분적으로 각 작업장의 구역은 나누어지는 경계선을 기준으로 상황에 따라 0.5m 다른 위치로 변경되어 있다.

표 10에 나타난 자료는 기계에서의 가공시간과 운반차의 운반중 지연시간을 고려하지 않았을 경우에, 작업물의 1회 운반당 평균 이동거리 및 이동시간(pickup 시간, delivery 시간 및 운반시간), 작업물의 평균 이동거리(첫 번째 공정에서 마지막 번째 공정까지의 이동거리) 및 이동시간(가공시간은 제외하고 첫 번째 공정에서 마지막 번째 공정까지 발생한 총 이동시간)을 나타낸 것이다. 이 자료는 그림 8, 9와 10에 나타난 것과 같이 운반차가 최적 이동 방향을 따라 이동할 때 발생하는 것으로 계산을 통하여 쉽게 구해진다.

3가지 대안에 대하여 주어진 시간동안 완료된 작업량을 비교하기 위하여 500시간동안 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션에서 운반차의 주차점(dwell point)의 위치, 운반차의 일정 계획 등의 요인에 의해 시스템의 성과에 차이가 발생한다. 여기서는 각 경우에 500시간동안 AutoMod 8.2 버전을 이용하여 시뮬레이션을 실시하여 운반차의 일정계획 중에서 가장 좋은 결과를 비교한다.

500시간동안에 시스템에 투입된 작업물의 수는 약 14,000개이다. 표 10에서 완료된 작업의 수는 네트워크 구조, 혼합 직렬형태 구조, 5개 직렬 구조의 순서로 많게 나타났다. 대안 3에서 완료된 작업의 수가 적은 것은 운반거리와 운반횟수의 증가로 인하여 평균 운반시간이 증가하기 때문에 운반차에 부하가 증가하여 작업물의 이동에 지연이 많이 발생하기 때문이다. 그러므로 직렬 구조일지라고 좀 더 많은 수의 운반차가 있고 운반차의 수에 해당하는 만큼 작업장을 균형 되게 분할하면 작업의 이동거리 및 이동시간은 증가하지만 완료된 작업량도 함께 증가될 것이다.

표 10 이동거리, 이동시간 및 완료작업량

대안	이동거리 (m)/운반	이동거리 (m)	이동시간 (분)/운반	이동시간 (분)	완료작업량	실험기간 (시간)
1	31.81	145.71	1.21	5.51	13961	500
2	26.03	162.43	1.08	6.65	13948	500
3	22.53	173.04	1.00	7.63	10924	500

표 10에서 분할된 네트워크의 수가 증가할수록 1회 운반당 평균 이동거리와 운반당 평균 이동시간은 감소하지만, 총 운반거리 및 운반횟수가 증가하기 때문에 작업물의 평균 이동거리와 평균 이동시간은 증가함을 알 수 있다. 따라서 네트워크 구조가 총 이동시간이 가장 적게 발생되고, 5개로 나눈 직렬 구조가 가장 이동시간이 가장 크게 나타났다.

## 7. 결 론

본 연구는 제조시스템을 혼합 직렬형태 구조로 설계하는 방법에 관한 것이다. 주어진 네트워크 구조의 제조시스템을 혼합 직렬형태 구조로 구축할 때 나누는 내용이다. 네트워크 구조일 때에 필요한 최소 운반차의 수를 고려하여 혼합 직렬형태 구조에서 필요한 운반차의 수를 구한다. 운반차의 수를 고려하여 1대의 운반차를 필요로 하는 네트워크와 2대의 운반차를 필요로 하는 네트워크의 수를 구한다. 인접하고 있는 일부의 작업장들을 동일한 네트워크에 두었을 경우에 이 네트워크에서 발생하는 운반시간이 1대 또는 2대의 운반차의 운반시간능력에 비하여 적게 발생하는지를 조사하여 실현가능한 네트워크 집합을 만든다. 실현가능한 네트워크 집합들 중에서 목적함수를 가장 잘 만족시키는 요소를 구하여 제조시스템을 혼합 직렬형태 구조로 나누는 방법을 제시하였다.

혼합 직렬형태 구조를 만들고, 각 네트워크에서 선의 이동방향을 구하는 방법을 설명하였다. 수치적 예제를 제시하여 분할 방법을 설명하였고, 네트워크 구조, 혼합 직렬형태 구조, 직렬 구조에 대하여 1회 운반당 평균 이동거리 및 평균 이동시간, 작업물이 첫 번째 공정에서부터 마지막 공정이 완료되기까지 평균 이동거리 및 평균 이동시간을 비교하였고, 그리고 이들에 대하여 임의로 주어진 동일한 시간동안에 시뮬레이션을 실시하여 완료된 생산량을 비교하였다.

## 참고문헌

- [1] Bismark, 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 Srinivasan, M. M, 1989, "Tandem configurations for AGV systems offer simplicity and flexibility," *Industrial Engineering*, Vol.21, 23-27
- [3] Bozer, Y. A., and Srinivasan, 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 routeing 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
- [21] Sinriech, D. and Tanchoco, J. M. A., 1991, "Intersection graph method for AGV flow path design," *Int. J. Prod Res.*, Vo. 29. 9, 1725-1732
- [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 ststems," *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] Tomkin, 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] Sule, D. R., 1994, *Manufacturing Facilities*, PWS Publishing Company, Boston
- [22] Bozer, Y.A. and Srinivasan, M.M., 1992, "Tandem AGV systems: A partitioning algorithm and performance comparison with conventional AGV systems, *European J. of Operational Res.* Vol.63, 173-191
- [23] Rajotia, S., Shanker, K. and Batra, J.L., 1998, "Determination of optimal AGV fleet size for FMS," *Int. J. of Prod. Res.*, Vol.36, No.5, 1177-1198
- [24] Egbelu. P.J., 1993, "Economic design of unit load-based FMSs employing AGVs for transport," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 31, 2753-2775
- [25] Kaspi, M. and Tanchoco, J.M.A., 1990, "Optimal flow path design for unidirectional AGV systems," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.28, 1023-1030
- [26] Kusiak, A., 1990, *Intelligent Manufacturing Systems*, Prentice-Hall, Inc, New Jersey
- [27] Leung, L. C., Maheshwari, S. K. and Miller, W. A., 1993, "Concurrent part assignment and tool allocation in FMS with material handling considerations," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 31, 117-138
- [28] Shen, Yu-chen and Kobza, J.E. 1988, "A dispatching-rule-based algorithm for automated for guided vehicle systems design," *Production Planning and Control*, Vol.9, No.1 47-59