

유연 제조시스템에서 작업경로선택과 경제적인 설계에 관한 연구

- A Study on Parts Route Selection and Economic Design in Flexible Manufacturing System-

장 석화 *

Chang, Suk-Hwa

Abstract

This paper addresses the parts route selection and economic design in flexible manufacturing system (FMS). Parts are processed through several stage workstations according to operation sequences. The machine of each workstation can do multiple operation functions. And the operation stage of a part can be processed in several workstations, which are non-identical in functional performance. The objective of this paper is to determine the processing routes of parts, number of machine at each workstation, number of vehicle and makespan time. Two models are suggested. One is assumed that the operation stage of parts can be processed at the only one among several available workstations. Other is assumed that the operation stage of parts is allowed to be processed at several workstations. Parts are transported by automated guided vehicles (AGVs). The decision criteria is to minimize the sum of processing cost, travel cost, setup cost and overhead cost. The formulation of models is represented. A solution algorithm is suggested, and a numerical example is shown.

1. 서언

최근에 기업의 생산환경은 크게 변화하고 있다. 고객의 수요는 짧은 주기로 다양하게 변화하고 있다. 또한 기업은 인건비를 절약하고 재고비용을 줄이면서 동시에 동일한 시스템에서 여러 가지 종류의 제품을 생산하는 다품종 소량생산시스템을 취하고 있다. 이는 고객의 요구를 신속하게 충족시키기 위하여 생산량을 소량으로 하여 다수의 제품을 신속하게 생산하여야만 경쟁력을 갖기 때문이다. 그러나 동일한 제조시스템에서 다품종을 수시로 바꾸어 생산하거나 동시에 생산하는 것은 제조상의 여러 어려움을 갖게 한다. 즉, 생산계획, 일정계획, 기계에 작업할 당, 가공순서등 제조상에 어려움을 갖게 된다. 이의 해결방법의 하나로 기업에서는 자동화설비를 도입하여 컴퓨터통제를 이용한 제조시스템을 이용하고 있다.

* 인천대학교 산업공학과

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

자동화의 하나로 유연 제조시스템(Flexible Manufacturing System: FMS)은 생산공정의 전체적인 통제를 컴퓨터를 이용하여 이루어지는 것으로 제조시스템에서 생산량이 중간규모이고, 여러 가지 종류의 제품을 동시에 제조하는데 유용하게 이용될 수 있는 방법으로 인식되고 있다. 작업의 가공단계가 여러 개이고, 각 가공단계의 공정의 가공과정이 여러 곳의 작업장에서 이루어질 수 있는데 이는 작업장에 있는 설비가 다기능 공정을 처리할 수 있는 기계로 구성되어 가공순서와 가공시간에 유연성을 갖게 해주기 때문이다. 또한 작업장사이의 물류흐름을 무인운반기(Automated Guided Vehicle)를 이용함으로써 제조의 유연성을 더욱 증가시켜 주고 있다. 그러나 이러한 시스템의 설계 및 운영은 많은 비용을 발생시킨다. 따라서 이의 경제적인 설계 및 주어진 시스템에서 합리적인 운영은 비용을 감소시킬 수 있는 중요한 문제이다. 따라서 필요한 작업물을 제조하는데 발생하는 비용이 최소화되도록 시스템이 설계되어야 한다.

제조시스템에서 각 작업장의 기계는 갖추고 있는 공구 종류에 따라서 고유한 몇 가지의 공정을 수행하고, 또한 동일한 공정이 여러 작업장의 기계에서 가공될 수 있는 경우에 작업물은 일련의 공정단계에서 공정마다 이용 가능한 작업장이 여러 곳이 존재한다. 이 중에서 실질적으로 가공이 이루어지게 될 기계에 최적으로 할당될 필요가 있다. 제조시스템에서 작업물의 공정단계에 따라 가공이 이루어질 때, 각 공정단계를 처리하는 가공 작업장들의 순서를 가공경로라 한다. 그러면 작업물은 여러 개의 가공경로들이 가능하므로 작업장의 기계의 기능과 성능을 고려하여 가공경로를 최적으로 결정하여야 할 것이다. 왜냐하면, 이러한 다수의 가공경로들은 각각 다른 가공시간과 비용, 그리고 운반시간과 비용을 발생시킨다. 이는 사용될 기계의 가공시간과 운반기의 운반시간의 크기에 영향을 미치므로 가공경로에 따라 시스템의 운영구성과 성과에 영향을 미칠 수 있게 된다.

시스템의 경제적인 설계는 장기적인 면에서 필요로 하는 작업의 단위시간동안의 수요량을 바탕으로 하여 기계의 가공능력을 고려하여 구축된다. 이와 같이 구축된 시스템에서 어떠한 생산기간(예로, shift, 일, 주, 월등)에 필요로 하는 작업물의 종류와 양이 변화하게 되어 단기적인 면에서 운영상의 설계는 중요하게 된다. 각 작업장에는 동일한 종류인 기계가 다수 존재하므로 어느 작업장에서 얼마의 기계를 사용할 것인가를 결정하여야 한다. 왜냐하면 어떠한 생산계획기간에 모든 기계가 사용되는 것이 경제적인 수 없기 때문이다. 이는 각 작업장의 기계의 사용시간에 따라 다른 비용이 발생하여 시스템의 전체 비용에 영향을 미칠 수 있다. 이와 같이 각 생산계획기간에 필요한 작업량을 제조할 때, 작업의 가공경로를 결정하는 문제를 각 작업장에서 사용될 기계의 수와 이에 따른 작업공정의 작업장 할당, 그리고 운반기의 수를 함께 고려하여 결정할 필요가 있다. 그래야만 시스템에서 발생하는 불필요한 시간과 비용을 줄일 수 있고 생산성을 높일 수 있기 때문에 중요한 연구대상이 된다.

작업물의 가공경로와 각 작업장에서 이용하려는 기계의 수, 그리고 운반기의 수는 서로 영향을 미친다. 이들은 모든 작업물을 생산 완료하는데 걸리는 생산소요기간을 반영하여 동시에 결정해야 하는 문제로 중요한 연구대상이 될 수 있다. 그러나 이들을 함께 결정하는 문제는 기존의 문헌에서 발견되지 않고 있다.

2. 연구배경

유연 제조시스템에서 작업물이 공정의 가공경로를 선택하는 문제에 대한 연구는 작업에 대한 각 가공 공정이 여러 기계에서 가능한 경우에 작업을 기계에 할당하는 것을 공구를 기계에 할당하는 것과 함께 연구되어 왔다 (Stecke [22], Berrada and Stecke [3]). Kusiak [13]은 할당 문제를 총 가공비용을 최소화하는 것을 목적으로 하여 0-1 정수계획 문제로서 모형화 하였다.

Leung and Tanchoco [16] 은 장비교체문제의 연구에 부품할당 모형을 연구하였다. 그들은 공구수명이나 공구 magazine의 능력은 반영하지 않고 물류흐름문제를 고려하였다. Sarin 과 Chen [21] 은 작업할당과 공구할당을 동시에 결정하는 문제를 연구하였다. Leung et al. [15] 은 물류흐름을 고려하여 부품을 기계에 할당하는 내용과 공구를 기계에 할당하는 내용을 함께 포함한 문제를 연구하였다. Modi and Shanker [18, 19]는 FMS 에서 부품이동을 최소화하는 것과 부하균형을 유지하는 것에 대한 모형을 나타내고, 해를 구하는 접근법을 제시하였다.

유연제조시스템의 설계에 관한 연구로는 설비배치(facility layout), 경로의 방향, 일정계획, 운반기 요구량, 통제 등이 있다 (Cesarone and Eman [2], Egbelu [4], Egbelu and Tanchoco [5,6], Gaskin et al [9], Goetz and Egbelu [10], Kaspi and Tanchoco [11], Mahadevan and Narendran [14], Maxwell and Muckstadt [17]). 이 외에 Egbelu [7, 8]은 운반기가 이송단위로 작업물을 이동시키는 경우에 이송량에 따라 시스템에서 발생하는 비용이 최소가 되도록 각 작업장의 기계의 수와 운반기의 크기와 수를 동시에 결정하는 문제를 연구하였다. 그러나 그는 시설배치와 작업물의 경로가 확정된 모형에서 설계문제를 다루었다.

실질적으로 어떠한 생산계획기간에 생산을 필요로 하는 작업물 종류와 양은 변한다. 그리고 제조시스템에서 작업물을 가공할 때 작업물들마다 가능한 가공경로는 다수가 존재할 수 있다. 그리고 시스템을 구성하고 있는 설비의 수는 다수이다. 그러므로 제조시스템의 성과(비용 혹은 생산소요시간)에 영향을 미치는 이러한 요인들을 생산소요시간과 함께 결정하는 것은 중요하다. 이와 같은 결정문제를 시스템을 경제적으로 설계하는 측면으로 연구될 필요가 있으나, 이것에 대한 연구는 아직까지 이루어지지 않았다.

3. 연구내용

생산계획기간은 임의로 나눈 기간단위(예를들면, shift, 일, 주, 월, 분기, 년 등)를 나타내는 것이고, 생산소요기간은 주어진 모든 작업물을 생산하는데 소요되는 시간을 나타낸다. 유연 제조시스템에서 어떠한 생산계획기간에 작업물들의 일련의 공정단계에 대한 각 공정이 이루어질 기계의 순서인 가공경로를 결정하는 것을 가공에 이용되는 각 작업장의 기계의 수, 운반에 이용되는 운반기의 수와 생산소요시간을 함께 고려하여 결정하는 설계문제를 다룬다. 제조시스템에서 동시에 가공 혹은 조립될 작업물의 종류가 다수이다. 작업물의 어떠한 공정에 대해 가공이 가능한 작업장들이 여러 곳에 존재하므로 작업물들의 가공경로는 여러 가지가 존재한다. 그러나 동일한 공정에 대하여도 가공이 가능한 기계가 여러 작업장에 존재할지라도 작업장마다 작업물들의 가공시간과 비용이 다르다. 또한 가공시간과 작업장의 사용비용이 다르므로 작업물들이 어느 가공경로를 선택하느냐에 따라서 시스템의 성과에 영향을 미치게 된다. 작업장에 따라 기계는 기능과 성능이 다르고, 각 작업장에는 다수의 기계가 존재하므로 가공경로의 선택은 각 작업장이 필요한 기계의 수에 영향을 서로 주고 받는다. 또한 작업이 가공경로의 선택에 따라 작업장사이의 운송거리가 변화하고 이에 따라 운반기의 수에 영향을 미칠 수 있다.

예를 들어, 4 곳의 작업장에서 가공이 이루어지는 제조시스템을 생각하자. 이 시스템에서 주어진 생산계획동안 여러 종류의 작업들이 동시에 가공되는 경우에 하나의 작업종류의 가공행태를 설명하면, 이 작업물은 3단계의 가공과정을 거치는데 가공단계 1이 가능한 작업장은 1, 2 가 있고, 각각의 가공시간은 10, 12를 나타내는 것으로 단계별로 가공이 가능한 작업장과 그 작업장에서의 가공시간이 아래 표 1 과 같은 경우에 각 가공단계를 어느 작업장에서 가공되느냐에 따라 총 가공시간 및 비용이 달라질 수 있다. 그리고 작업물의 운반시간 및 비용도 달라질 수 있다. 또한 여러 종류의 작업물에 대하여 가공작업장과 가공시간이 다르게 똑같이 적용되므로 전체적으로 작업물의 각 공정단계가 어느 작업장의 기계에서 가공되느냐에 따라 생산

소요기간이 다르고, 작업장의 기계마다 비용이 다르므로 작업물의 가공단계에 대한 작업장을 합리적으로 결정한다.

표 1. 작업의 가공작업장과 가공시간

가공단계	가공작업장	가공시간
1	(1, 2)	(10, 12)
2	(1, 3, 4)	(7, 9, 6)
3	(2, 3)	(11,15)

어떠한 생산계획기간에서 작업물들을 생산할 때 여러 가지 정책이 가능할 것이다. 생산계획기간을 충분히 사용하는 경우에는 사용되는 기계의 수를 최소로 줄일 수 있을 것이고, 반면 생산계획기간을 최소화하는 경우에는 사용되는 기계의 수가 최대로 증가할 것이다. 그러나 이러한 정책들이 경제적인 면에서 항상 최적인 것은 아니다. 그러므로 주어진 생산계획기간내에서 적절한 규모의 설비를 사용하여 적절한 생산소요기간에 작업물을 경제적으로 생산하는 문제를 나타낸다.

실제문제에서 설비들의 이용률은 시스템의 가정과 운영규칙에 따라 다르게 발생할 수 있다. 기계와 운반기의 평균이용률은 작업물이 이동하는 중에 대기로 인한 지체와 이동단위와 가공경로에 따른 작업의 일시적인 불균형, 일정시간 후에 첫 번째 작업물이 들어오게 되는 작업장의 존재 등의 실질적인 시스템의 운영으로 인한 요인으로 정확히 알기는 어렵다. 작업의 대기로 인한 지체, 생산순서와 투입간격을 해석적으로 구하는 것은 실질적으로 어렵기 때문이다. 기계와 운반기의 이용률은 평균적으로 가정하고 모형에 반영한다.

비용요소를 반영하여 작업물의 가공경로, 작업장의 기계와 운반기의 수, 그리고 생산소요기간을 함께 결정하는 문제를 경제적인 면에서 다루기 위하여 모형화한다. 문제를 나타내기 위하여 다음과 같은 가정과 부호를 나타낸다.

3.1 가정

- (1) 생산계획기간에 생산하려고 하는 작업물의 종류와량은 정확히 알려져 있다.
- (2) 작업물의 가공순서에 따라 가능한 작업장의 집합과 각 작업장에서의 가공시간은 알려져 있다.
- (3) 동일 작업장에는 기능과 성능이 같은 기계들이 여러 대 존재한다.
- (4) 작업물은 운반기에 의해 최단거리로 운송된다.
- (5) 작업장의 기계와 운반기는 고장이 발생하지 않는다.
- (6) 작업장의 기계와 운반기의 평균이용률은 주어진다.

3.2 부호

N = 작업물 종류의 수

i = 작업물 종류를 나타내는 첨자

M_i = 작업물 종류 i 의 공정의 수

j = 공정순서를 나타내는 첨자

K = 실질 가공이 이루어지는 작업장의 수

k, r = 작업장을 나타내는 첨자. $k, r = 0$ 은 load station을 나타내고, $K+1$ 은 unload station을 나타낸다.

D_{ijk} = 작업 종류 i 의 j 번째 공정이 작업장 k 의 기계에서 이루어질 경우에 가공시간

t_{kr} = 작업물이 어떠한 공정을 작업장 r 에서 한 후 다음 공정을 작업장 k 에서 할 경우 이동시간

c_k = 작업장 k 기계의 단위시간당 가공비용

S_k = 작업장 k 의 기계의 생산착수비용

S_h = 운반기의 착수비용

c_h = 운반기의 단위시간당 가동비용

Ω = 생산소요기간동안 시스템의 단위시간당 간접비용

Q_i = 작업물 i 의 생산량

m_k = 작업장 k 의 이용 가능한 기계의 수

Z_k = 작업장 k 의 필요한 기계수로 결정변수이다.

v_h = 이용 가능한 운반기의 수

W_h = 필요한 운반기 수로 결정변수이다.

α_k = 작업장 k 의 기계의 시간에 대한 평균이용률

β = 운반기의 단위당 시간에 대한 평균이용률

T = 생산소요기간을 나타낸다.

T_u = 생산계획기간

$X_{ikr} = 1$, 작업 종류 i 이 $j-1$ 번째 공정을 작업장 r 에서 한 후에 j 번째 공정을 작업장 k 에서 할 경우
 0, 그렇지 않을 경우

Y_{ikr} = 작업 종류 i 이 $j-1$ 번째 공정을 작업장 r 에서 한 후에 j 번째 공정을 작업장 k 에서 한 작업량

3.3 모형

본 논문에서는 두 가지의 모형으로 나누어 나타내고자 한다. 첫째 모형은 작업 종류별로 여러 개의 가능한 가공경로들 중에서 하나의 가공경로만을 허용하는 것이다. 이는 각 공정단계에 하나의 작업장만이 사용되는 경우이다. 즉, 작업들이 완성되기까지 일련의 여러 가지의 공정단계들에 대해 각 공정이 가능한 여러 곳의 작업장 중에서 하나의 작업장만을 이용하는 것이다. 예를 들면, 표 1에 나타난 것과 같은 공정단계를 가진 경우라면, 같은 종류의 작업물 모두는 공정단계 1은 작업장 1, 2 중에서 모두 하나의 작업장만의 기계를 이용하는 것이다. 둘째 모형은 모든 작업에 대해 여러개의 가공경로를 허용하는 것이다. 어떠한 공정에 대하여도 이용가능한 여러 곳의 작업장을 허용하는 경우이다. 예를 들면, 표 1에서 동일 종류의 작업물이라도 공정단계 1은 작업에 따라 어느 것은 작업장 1을 이용하고, 다른 것은 작업장 2를 이용할 수 있다. 첫 번째 경우는 부분 3.3.1에서 다루고, 두 번째 경우는 3.3.2에서 다룬다.

목적함수는 비용을 최소화하는 기준을 적용한다. 비용요소로 어떠한 기준으로 정할 것인가는 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 시스템에 존재하는 기계들을 모두 사용하는 것이 아니고 상황에 따라 일부의 기계만을 사용할 수 있는 것으로 이들 일부의 기계가 사용될 때 생산착수비용이 기계별로 발생한 비용요소를 고려한다. 실질적으로 사용되는 기계에 대하여는 생산소요기간내에서 준비시간의 발생으로 착수비용이 발생한다. 그러나 사용중 작업물의 가공상의 교

체, 공구의 교체 등에 대하여는 착수시간을 무시한다. 또한 기계의 가공시간에 대한 비용요소를 고려한다. 이 요소는 기계의 작업물에 대한 실질 가공시간과 실질 작업물의 운반시간만을 고려한 비용을 반영할 수도 있을 것이고, 기계의 실질 가공시간에 관계없이 생산소요기간동안 평균적인 단위시간비용을 고려할 수 있다. 여기서는 실질작업시간에 대하여 발생하는 비용을 고려한다. 또한 생산소요기간동안 발생하는 간접비용 요소를 고려하였다. 이들 비용요소는 다음과 같이 나타내진다.

(가) 생산착수비용 : 생산소요기간동안 사용하는 기계에 대해 초기에 발생하는 비용요소를 고려한다. 이 비용은 생산소요기간의 길이와 관계없이 사용되는 기계에 대해 생산소요기간 초기에 발생하는 비용으로 사용되는 기계의 수에 비례한다. 다음의 식(1) 과 같이 나타내진다. 앞의 항은 작업장의 기계에서 발생하는 착수비용이고, 뒤의 항은 운반기에서 발생하는 착수비용이다.

$$\sum_k S_k Z_k + S_h W_h \tag{1}$$

(나) 가공비용 : 생산소요기간동안 작업장에서의 가공시간에 발생하는 비용으로 기계의 단위시간동안 비용을 고려하여 실질 가공시간동안 발생한 비용이다. 작업물 공정의 작업장에서의 허용범위에 따라 나누어 나타내진다.

(i) 작업의 각 공정에 대해 하나의 작업장에서만 가공을 허용하는 경우

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_r C_k D_{ijk} Q_i X_{ijkr} \tag{2}$$

(ii) 작업의 각 공정에 대해 여러 작업장에서 가공을 허용하는 경우

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_r C_k D_{ijk} Y_{ijkr} \tag{3}$$

(다) 운반비용 : 작업물이 운반기에 의해 작업장사이를 이동될 때 발생하는 비용이다. 작업물 공정의 작업장에서의 허용범위에 따라 나누어 나타내진다.

(i) 작업의 각 공정에 대해 하나의 작업장에서만 가공을 허용하는 경우

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_r C_h t_{kr} Q_i X_{ijkr} \tag{4}$$

(ii) 작업의 각 공정에 대해 여러 작업장에서 가공을 허용하는 경우

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_r C_h t_{kr} Y_{ijkr} \tag{5}$$

(다) 간접비용 : 시스템을 운영하는 동안 간접적으로 발생한 비용을 나타낸다. 단위시간에 대한 간접비용을 고려하여 생산소요기간동안 발생한 비용을 나타낸다.

$$\Omega T \tag{6}$$

(라) 제약식 : 제약식에 대한 것은 작업물의 공정이 어느 작업장에서 가공될 것인가와 작업장과 운반기의 제한과 변수의 허용범위를 나타내는 것이다. 이는 모형들에서 나타내고 설명된다.

3.3.1 작업의 각 공정에 대해 하나의 작업장에서만 가공을 허용하는 경우

이는 어떠한 작업의 임의의 공정에 대해 가능한 여러 곳의 작업장들 중에서 작업물종류마다 동일한 하나의 작업장만을 사용하는 경우로 동일한 종류의 작업물은 모두 동일한 작업경로만을 사용한다. 주어진 작업물을 생산하기 위하여 작업물의 공정단계가 처리되는 작업장을 결정하는 것을 설비들 수와 생산소요기간과 함께 결정한다. 목적함수는 작업장의 기계들과 운반기들의 착수비용, 가공비용, 운반비용, 간접비용 등이 있다. 가공비용과 운반비용은 함께 표현될 수 있다. 모형은 다음의 P1과 같이 나타내진다.

$$P1: \text{ minimize } Z1 = \sum_k S_k Z_k + S_h W_h + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_r (c_k p_{ijk} Q_i + c_h t_{kr} Q_i) X_{ijk} + \Omega T \quad (7)$$

subject to

$$\sum_k \sum_r X_{ikr} = 1, \quad \forall i \quad (8)$$

$$\sum_r X_{ijk} = \sum_p X_{i,j+1,pk}, \quad \forall i, j, k \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_r p_{ijk} Q_i X_{ijk} \leq \alpha_k Z_k T, \quad \forall k \quad (10)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_r t_{rk} Q_i X_{ijk} \leq \beta W_h T \quad (11)$$

$$Z_k \leq m_k, \quad \forall k \quad (12)$$

$$W_h \leq v_h \quad (13)$$

$$T \leq T_u \quad (14)$$

$$Z_k \geq 0 \text{ and integer, } \forall k \quad (15)$$

$$W_h \geq 0 \text{ and integer} \quad (16)$$

$$X_{ijk} = 0, 1, \quad \forall i, j, k, r \quad (17)$$

모형에서 제약식 (8)은 작업물의 첫 번째 작업공정에 대한 작업장을 하나만을 이용함을 나타내고, 제약식 (9)은 어떠한 작업의 공정을 처리하는 작업장에 대해 들어오고 나가는 작업물 량이 같음을 나타낸다. 여기서 연속된 두 공정이 같은 작업장에서 이루어질 경우에도 전 공정을 마친 후에 다음 공정을 위하여 같은 작업장이지만 나간 것으로 간주한다. 제약식 (10)은 작업장의 실질 이용시간과 이용가능시간과의 관계를 나타내고, 제약식 (11)은 운반기의 실질 이용시간과 가능한 이용시간과의 관계를 나타낸다. 나머지 제약식들은 변수의 허용범위를 나타낸다.

3.3.2 작업의 각 공정에 대해 여러 작업장에서 가공을 허용하는 경우

이는 작업물의 각 공정단계가 처리되는 작업장이 여러 곳이 가능한 것으로 동일 종류의 작업물이라도 작업에 따라 다른 작업장을 이용할 수 있다. 모형에서 반영하고자 하는 의사결정요소와 비용요소는 모형 P1에서와 동일하다. 모형은 다음의 P2와 같이 나타내진다.

$$P2 : \text{ minimize } Z2 = \sum_k S_k Z_k + S_h W_h + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_r (c_k p_{ijk} + c_h t_{kr}) Y_{ijk} + \Omega T \quad (18)$$

subject to

$$\sum_k \sum_r Y_{ikr} = Q_i, \quad \forall i \quad (19)$$

$$\sum_r Y_{ijk} = \sum_p Y_{i,j+1,pk}, \quad \forall i, j, k \quad (20)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_r p_{ijk} Y_{ijk} \leq \alpha_k Z_k T, \quad \forall k \quad (21)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_r t_{rk} Y_{ijk} \leq \beta w_h T \quad (22)$$

$$Z_k \leq m_k, \quad \forall k \quad (23)$$

$$W_h \leq v_h \quad (24)$$

$$T \leq T_u \quad (25)$$

$$Z_k \geq 0 \text{ and integer, } \forall k \quad (26)$$

$$W_h \geq 0 \text{ and integer} \quad (27)$$

$$Y_{ijk} \geq 0 \text{ and integer, } \forall i, j, k, r \quad (28)$$

모형에서 제약식 (19)은 작업물의 첫 번째 공정에 대하여 공정이 이루어지는 작업장의 작업물의 양은 생산하려고 하는 양과 같음을 나타내고, 제약식 (20)은 공정 j 에 대하여 작업장 k 에서 이루어진 작업량은 다음 공정을 위하여 나간 작업량과 일치함을 나타내는 것으로 각 작업장에 대하여 어떠한 공정이 가공되기 위하여 이 작업장으로 들어온 작업물은 다음공정을 위하여 모두 나가야 함을 의미한다. 여기서 연속된 두 공정이 같은 작업장에서 이루어질 경우에도 전 공정을 마친 후에 다음 공정을 위하여 같은 작업장이지만 나간 것으로 간주한다. 제약식 (21)은 작업장의 능력에 대한 제한을 나타내고, 제약식 (22)은 운반기의 가용시간에 대한 제한을 나타낸다. 나머지 제약식은 변수의 허용범위를 나타낸다.

모형 P1에서 제약식들 중에서 (10)와 (11)의 우항과 모형 P2에서 제약식들 중에서 (21)와 (22)의 우항은 나타난 바와 같이 비선형이다. 따라서 이 모형들은 비선형문제로 해는 작업장의 기계들의 수와 운반기의 수를 변화시키면서 생산소요시간을 구하여 비용을 구하는 방법으로 풀 수 있다. 다음 부분에서 이들에 대한 해법이 설명된다.

4. 해법

앞부분 3에서 제시된 모형들(P1, P2)을 푸는데 있어서 효율적인 해법을 개발할 필요가 있다. 만일 생산소요시간 T 를 하나로 주어진다면, 모형들에 대한 해는 정수계획 프로그램으로 한번에 구해질 수 있다. 그러나, 생산소요시간 T 를 최대 허용치 이내에서 결정해야하는 변수로 하는 경우에는 모형들 P1과 P2에서 제약식에 있는 $Z_k T$ 와 $W_h T$ 이 비선형으로 표현된다. 따라서 이에 대한 해를 구하기 위하여 비선형 문제일 경우는 설비(작업장의 기계와 운반기)들의 수를 기준으로 하거나, 또는 생산소요시간을 기준으로 하여 문제를 여러 개로 나누고, 나누어진 문제들에 대하여 해를 구해 최적의 것을 찾는 방법을 따른다.

모형들에서 최대 이용 가능한 설비(작업장들의 기계와 운반기)의 수 범위내에서 설비들 수를 변화시키면서 문제를 여러 개로 나누는 것을 분기라 하자. 그러면, 주어진 문제에서 설비들 수를 정해 문제를 여러 개로 분기하여 나누고, 나누어진 분기문제에 대하여 정수계획프로그램을 이용하여 해를 구하여 비용을 비교하여 가장 적은 비용을 나타내는 분기문제를 최적해를 갖는 것으로 할 수 있다. 작업장의 기계와 운반기의 수를 주고, 작업물의 가공경로, 생산소요시간, 비용들을 구할 수 있다. 계속하여 각 설비의 수를 변화시키면서 부분문제를 만들어 해를 구해 비교할 수 있다. 그러나 설비들 수를 기준으로 분기하므로, 이용가능한 설비들의 수가 $(m_1, m_2, \dots, m_K, v_h)$ 일 경우에 작업장 k 에서 이용하는 기계들의 수가 $(0, 1, 2, \dots, m_k)$ 로 최대 $m_k + 1$ 가지이므로, 모든 설비들을 고려할 때 최대 가능한 분기의 수는 최대 $(m_1 + 1) * (m_2 + 1) * \dots * (m_K + 1) * (v_h + 1)$ 가 될 것이다. 이는 작업장의 수, 작업장의 기계와 운반기의 수가 증가하면 가능한 분기 수는 기하급수적으로 증가한다.

비록 분기수는 많을지라도 분기를 차례로 계속하여 분기된 문제에 대하여 해를 구하면 최적해를 구할 수 있다. 그러나 여기서는 계산 수를 줄일 수 있는 방법을 이용하여 해를 구한다. 먼저, 문제를 생산소요시간에 따라 나누어 최적해가 존재하게 되는 생산소요시간의 범위를 축소하여 설비의 허용범위를 줄일 필요가 있다. 이와 같이 줄인 설비의 수를 기준으로 분기하는 기법을 이용한다. 모형에서 생산착수비용과 간접비용의 두 비용요소는 상충관계를 갖는다. 생산소요시간을 일정한 간격으로 변화시키면서 최적해가 존재하는 생산소요시간의 폭을 줄인다. 생산소요시간, $T = T_u$ 에서 시작하여 임의로 정한 일정한 간격으로 나누어 T 를 변화시키면서 문제를 풀어 비용을 구한 후에, 최저비용을 갖는 T 를 중심으로 T 보다 일정하게 적은 생산소요시간을 하한으로, T 보다 일정하게 큰 생산소요시간을 갖는 값을 상한으로 하여 생산소요시간의 범위를 축소한 허용범위를 만든다. 최적해가

존재 가능한 설비의 허용범위가 축소될 때까지 이 절차를 시행한다. 이 양측 허용 값에서 나타나는 설비의 수를 허용범위로 하여 이 허용범위 내에서 설비 수를 변화시키면서 최적해를 찾는다.

어떠한 분기 단계에서 사용되는 설비(작업장의 기계와 운반기)의 수가 $Z_1, Z_2, \dots, Z_K, W_h$ 일 때의 사건을 $E(Z_1, Z_2, \dots, Z_K, W_h)$ 로 나타낸다. 설비의 허용 가능한 범위 내에서 모든 가능한 조합을 만들어 분기하여 비용을 구해 가장 적은 비용을 갖는 분기를 찾는다.

$C(Z_1, Z_2, \dots, Z_K, W_h)$ 가 작업장의 기계와 운반기의 수가 $E(Z_1, Z_2, \dots, Z_K, W_h)$ 일 때 최소비용이라 하자. 그리고, $C(T)$ 를 생산소요기간을 T 로 하였을 때의 최소비용을 나타낸다. 해를 구하는 단계에서 실현가능하고, 다음 분기의 대상이 될 수 있는 사건들의 집합을 L 로 나타낸다.

해를 구하는 단계는 다음과 같이 나타내진다.

단계 1: 사건목록, $L = \phi$ 하여 비운다.

단계 2: 생산계획기간, T_u 을 임의로 정한 수인 10으로 나눈다. 즉, $\theta = T_u/10$ 로 하여 생산소요기간, $T_k = T_u - k\theta$ ($k=0,1,2,\dots,10$)으로 한다.

단계 3: 생산소요기간, $T = T_k$, $k=0,1,\dots,10$ 로 놓고 각 문제들을 푼다.

단계 4: 가장 적은 비용을 나타내는 $C(T_{\min}) = \min\{C(T_k) \mid k=0,1,2,\dots,10\}$ 을 만족하는 생산소요기간, T_{\min} 을 구한다. 또한 T_{\min} 을 중심으로 θ 만큼 적은 생산소요기간의 하한범위 $T_{\min}^1 = T_{\min} - \theta$ 와 θ 만큼 큰 생산소요기간의 상한범위 $T_{\min}^2 = T_{\min} + \theta$ 을 구한다.

단계 5: T_{\min} 에서 T_{\min}^2 사이의 시간을 임의로 정한 수인 3으로 나눈다. 즉, $\theta_1 = (T_{\min}^2 - T_{\min})/3$ 로 하여 생산소요기간 $T = T_{\min} + k\theta_1$, $k=1,2$ 을 만든다. 마찬가지로, T_{\min}^1 에서 T_{\min} 사이의 시간을 3등분한다. $(T_{\min} - T_{\min}^1)/3 = (T_{\min}^2 - T_{\min})/3$ 이므로, θ_1 을 이용하여 생산소요기간 $T = T_{\min} - k\theta_1$, $k=1,2$ 을 만든다.

단계 6: 생산소요기간, $T = T_{\min} + k\theta_1$, $k=-2,-1,1,2$ 로 놓고 모형을 풀어 해를 구한다.

단계 7: 가장 적은 비용을 나타내는 $C(T_{\min}) = \min\{C(T_k) \mid k=-3,-2,-1,0,1,2,3\}$ 을 만족하는 생산소요기간, T_{\min} 을 구한다. 또한 T_{\min} 을 중심으로 θ_1 만큼 적은 생산소요기간의 하한범위 $T_{\min}^1 = T_{\min} - \theta_1$ 와 θ_1 만큼 큰 생산소요기간의 상한범위 $T_{\min}^2 = T_{\min} + \theta_1$ 을 구한다.

단계 8: 생산소요기간이 T_{\min} , T_{\min}^1 , T_{\min}^2 로 주고 푼 문제의 해에서 작업장의 기계와 운반기의 수가 동일하면 단계 9로 가고, 작업장 또는 운반기 수의 허용범위가 최대 2이하이면 단계 10으로 가고, 그렇지 않으면 단계 5로 간다.

단계 9: 해에 나타나 있는 설비의 수가 $Z_1, Z_2, \dots, Z_K, W_h$ 인 사건, $E(Z_1, Z_2, \dots, Z_K, W_h)$ 의 문제를 풀어 최적해를 구한다. 그리고 진행을 멈춘다.

단계 10: 생산소요기간이 T_{\min} , T_{\min}^1 , T_{\min}^2 로 하여 각각 구하여진 해에서 설비의 수, $(Z_1^{\min}, Z_2^{\min}, \dots, Z_K^{\min}, W_h^{\min})$, $(Z_1^1, Z_2^1, \dots, Z_K^1, W_h^1)$, $(Z_1^2, Z_2^2, \dots, Z_K^2, W_h^2)$ 를 구하여 설비의 허용범위를 구한다. 즉, 작업장 k 의 기계의 허용범위는 최소 $\min[Z_k^{\min}, Z_k^1, Z_k^2]$ 에서 최대 $\max[Z_k^{\min}, Z_k^1, Z_k^2]$ 로 한다. 그리고, 운반기의 허용범위는 최소 $\min[W_h^{\min}, W_h^1, W_h^2]$ 에서 최대 $\max[W_h^{\min}, W_h^1, W_h^2]$ 로 한다.

단계 11: 작업장 1부터 K 까지, 그리고 운반기에 대하여 허용범위 내에서 수를 변화시키면서 가능한 모든 조합을 만들어 L 에 넣고, L 에 있는 모든 사건에 대하여 해를 구하여 비용, $C(Z_1, Z_2, \dots, Z_K, W_h)$ 구한다. 이 중에서 최소비용을 갖는 설비수의 조합이 최적해 조건이 되고, 이 때의 결과가 최적해가 된다. 진행을 멈춘다.

5. 수치적 예제

그림 1과 같은 6개의 작업장으로 이루어진 제조시스템에서 4개의 작업종류를 제조하는 문제를 생각하자. 그림 1에서 작업장 번호 0은 load station 을 나타내고, 5는 unload station 으로 실질적인 가공과정이 발생하지 않는다. 1, 2, 3 와 4는 가공과정이 발생하는 작업장을 나타낸다. 작업장에서 P/D는 작업물을 싣고 내리는 위치를 나타내는 것으로 같은 위치에 있고, 이들이 위치하고 있는 호의 길이는 6m 이고, 이 호의 두 끝점사이의 직선거리는 4m 이다. 그리고, P는 작업물을 싣는 위치를 나타내고, D는 작업물을 내리는 위치를 나타낸다. X와 Y축에 있는 수치는 거리를 나타내고, 운반기는 화살표방향으로 이동된다.

어떠한 생산기간에 5개의 작업물에 대하여 필요한 생산량은 120, 60, 100, 140, 110 개이다. 각 작업물의 공정이 가능한 작업장에 대한 가공시간이 표 2에 나타나 있다. 작업장과 운반기의 이용 가능한 최대 수와 단위시간당 가공비용, 기계당 착수비용은 표 3에 나타난 바와 같다. 그리고 간접비용은 분당 12이다. 무인운반기에 작업물을 싣거나 내리는데 걸리는 시간은 작업물에 관계없이 동일하게 각각 0.5분으로 가정한다. 작업장 기계의 이용률은 동일하게 0.9 로 하고, 요청이 없어서 운반기가 정지상태로 있거나 빈차로 이동하는 시간을 제외한 운반기가 작업물을 싣고, 작업물을 실은 상태에서 이동하고, 내리는 등 실질적으로 운송이 이루어진 비율은 0.8로 한다. 최대 가능한 생산계획기간은 3000 분으로 한다. 수리계획모형에서 정수계획 해는 Hyper Lindo 를 이용하여 해를 구하였다.

두 가지 모형 중에서 모형 P1 에 대하여 해법을 이용하여 해를 구하는 절차를 설명하면 다음과 같다.

먼저, $T=3000, 2700, 2400, 2100, 1500, 1200, 900$ 일 때의 해를 구한다.

$C(3000)=339,975, C(2700)=338,085, C(2400)=337,445, C(2100)=335,303, C(1800)=335,185, C(1500)=335,315, C(1200)= 344,585, C(900)= infeasible$

위의 결과를 바탕으로 $T_{min}=1800$ 을 기준으로 $T_{min}^1=1500, T_{min}^2=2100$ 으로 놓는다. $\theta_1=300/3=100$ 으로 하여 $T=2100, 2000, 1900, 1800, 1700, 1600, 1500$ 로 놓고 문제를 푼다. 그러면, 각 생산소요기간에서의 최소비용은 다음과 같이 나타내진다.

$C(2100)=335,303, C(2000)=334,103, C(1900)=336,385, C(1800)=335,185, C(1700)=333,985, C(1600)=336,475, C(1500)=335,315.$

여기서 최소비용은 $T=1700$ 에서 발생한다. 따라서 생산소요기간의 범위는 1700 을 중심으로 1600부터 1800 까지이다. 생산소요기간, $T=1700$ 를 기준으로 1800,1700과 1600 에 대한 해를 구하면, 각 생산소요기간에 대하여 최소비용을 발생시키는 사건은 $E(3,3,2,2,3), E(3,3,2,2,3)$ 과 $E(4,4,1,2,3)$ 이다. 각 설비의 가능한 허용범위는 작업장 1은 3,4, 작업장 2는 3,4, 작업장 3은 1,2, 작업장 4는 3, 운반기의 수는 3 이 된다. 따라서 작업장 1,2,3의 허용범위 내에서 수를 변화시키면서 문제를 분기하여 사건을 만들면, 사건목록, $L=\{E(4,4,2,2,3), E(4,4,1,2,3), (4,3,2,2,3), (4,3,1,2,3), E(3,4,2,2,3), E(3,4,1,2,3), (3,3,2,2,3), (3,3,1,2,3)\}$ 가 된다. 이 사건목록에 있는 문제들에 대한 해를 구하면, 최소비용을 갖는 결합은 사건 $E(3,3,2,2,3)$ 가 되고 이때의 비용은 333,718 이고, 그리고 생산소요기간은 1678 분이다. 여기서 구한 해는 설비의 수를 기준으로 분기된 모든 문제들에 대하여 구한 해와 일치하여 최적해임을 알 수 있다. 모형 P2 에 대하여도 똑같은 절차로 구해진다.

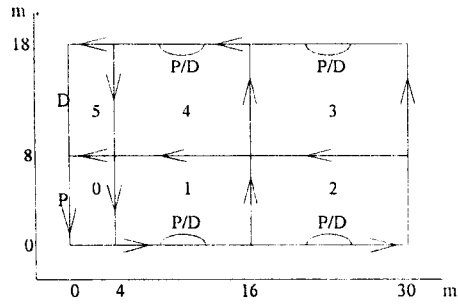


그림 1. 제조시스템의 배치

표 2. 작업의 공정에 대한 작업장에서의 가공시간

작업	공정순서	작업장			
		1	2	3	4
1	1	10	*	13**	*
	2	*	11	13	*
	3	7	8	*	9
	4	7	*	6	8
2	1	*	6.5	8	*
	2	9.5	*	9	*
	3	*	11	9	8.5
	4	6	*	*	7.5
3	1	7	5	*	6
	2	*	7	8.5	*
	3	*	*	11	8
4	1	*	*	12	10.5
	2	9	12.5	*	*
	3	7.5	6	9	*
5	1	9	*	*	11
	2	8	6	*	*
	3	*	10	8	*
	4	*	8	6	7.5

* : 작업물 i 의 j 번째 공정이 k 의 작업장에서 불가능하다.
 ** : 가공시간을 나타낸다.

표 3. 작업장과 운반기의 최대가능 기계 수, 단위시간당 사용비용 및 착수비용

	기계수	단위시간당 사용비용	착수비용	
작업장	1	4	15	2000
	2	4	18	2300
	3	4	17	1800
	4	4	15	2100
운반기	4	12	1500	

예제에 대해 모형 P1과 P2에 대하여 해법을 적용하여 각 작업장에서 필요한 최적 기계의 수와 생산소요기간은 표 4에 나타난 것과 같고, 모형 P1에 대해 작업물이 이용하는 가공공정별 작업장은 표 5에 나타나 있고, 모형 P2에 대하여는 표 6에 나타냈다. 예를 들면, 표 5에서 작업종류 1은 모두 첫 번째 단계의 공정을 작업장 1에서 하고, 계속하여 다음 단계의 공정들은 각각 작업장 2, 2, 3에서 이루어짐을 알 수 있다. 나머지 다른 종류의 작업에 대해서도 표에 나타난 순서대로 가공됨을 의미한다. 표 6에서는 작업종류 1은 첫 번째와 두 번째 단계의 공정은 120 개 모두 작업장 1과 2에서 가공되고, 세 번째 단계의 공정은 106개는 작업장 2에서 14개는 작업장 4에서 가공되고, 네 번째 단계의 공정은 106개는 작업장 3에서 14개는 작업장 4에서 계속하여 가공되는 것으로 나타냈다. 나머지 종류의 작업에 대하여도 각 단계의 공정이 가공되는 작업장이 나타나 있다.

표 4. 최적 작업장 기계 및 운반기의 수, 생산소요기간 및 비용

작업장	모형 P1	모형 P2
기계 수	3	4
	3	3
	2	2
	2	2
운반기수	3	3
생산소요기간	1678	1483
비용	333,718	332,502

표 5. 모형 P1에서 작업물의 공정단계의 가공 작업장

작업물	공정단계			
	1	2	3	4
1	1	2	2	3
2	2	3	4	4
3		2	2	4
4		4	1	1
5	1	2	3	3

표 6. 모형 P2에서 작업물의 공정단계의 가공 작업장에서의 작업량

작업물	공정단계			
	1	2	3	4
1	1=120*	2=120	2=106 4=14	3=106 4=14
2	2=60	1=30	4=60 3=30	4=60
3		2=100	2=100	4=100
4		4=140	1=140	1=140
5	1=110	1=69	3=110 2=41	3=110

* : =의 좌항은 작업장을 나타내고, =의 우항은 작업량을 나타낸다.

여기서 제시된 해법을 이용하는 경우에 문제의 분기된 수는 모든 가능성을 조사하여 최적해를 구하는 방법의 수보다 훨씬 적게 나타난다. 그러나 시간에 대한 비용함수가 완전한 아래로 볼록한 것이 아니므로 여기서의 해법이 항상 최적해를 보장하는 것이 아니다. 따라서 제시된 해법의 결과와 최적해의 일치 여부를 확인할 필요가 있다. 이를 실험하기 위하여 각 모형에 대하여 10가지의 예제를 임의로 만들어 실험하였다. 구체적인 예제의 수치상황은 여기에 나타내지 않았지만, 본 예제에서와 동일한 작업장에서 작업물 종류가 4 또는 5개로 하여 본 예제와 유사하나 작업물의 가공작업장과 가공시간을 다르게 하여 임의로 10개의 예제들을 만들어 각 문제에 대하여 본 논문에서 제시된 해법을 통하여 얻은 결과와 최적해 사이의 비용 일치 여부를 비교하였다. 모든 문제에서 여기서의 해법을 이용하여 얻은 해와 최적해가 일치함을 알 수 있었다. 해가 불 일치하는 비율이 어느 정도인지는 더 많은 예제를 들면 알 수 있겠지만, 본 논문에서 제시된 해법은 거의 모든 최적해를 구할 수 있는 방법임을 알 수 있다.

6. 결론

유연 제조시스템에서 여러 가지 종류의 작업이 동시에 가공될 때, 작업물들의 각 공정에 대하여 가공하려는 작업장을 선택하는 문제와 필요한 작업장의 기계와 운반기의 수를 결정하는 문제를 함께 다루었다. 실질적으로 생산계획기간마다 생산하고자 하는 작업물의 종류와 양은 변한다. 가능한 생산계획기간에서 주어진 작업물의 종류와 양에 따라서 이를 어느 정도의 기계를 사용하여 얼마의 시간동안 생산할 것인가는 경제적인 측면에서 중요하다. 또한 작업물의 가공경로가 결정되지 않은 상황에서 동시에 가공경로를 결정해야 하므로 함께 결정할 수 있을 것이다. 작업의 어떠한 공정에 대하여 가능한 작업장이 여러 곳에 존재하지만, 가공시간이 작업장마다 다르므로 전체적인 시스템 성과가 최적이 되도록 이를 결정하였다. 작업물 종류에 따라 공정이 하나의 작업장만에서 가공되는 경우와 여러 작업장에서 가공되는 경우의 두 가지로 나누어 모형을 제시하였다. 모형은 작업의 가공경로와 경제적 설계면을 고려하여 시스템을 나타낸 것으로 여러 가지 변수요인들을 동시에 반영하였다. 모형에 대한 해를 구하는 방법과

수치적 예를 제시하여 문제를 설명하였다. 최적해가 존재하는 범위를 생산소요기간을 이용하여 축소한 후에 기계와 운반기의 수를 변화시키면서 해를 구하는 방법을 제시하였다. 여기서의 방법이 기계와 운반기수를 변화시키면서 모든 가능한 경우에 조사하여 최적해를 구하는 방법보다 분기 수를 감소시킬 수 있는 방법으로 해를 구하는데 있어서 효율적이며 최적해를 구해 낼 수 있다. 따라서 본 결과는 제조시스템을 설계 또는 운용할 때 효과적으로 이용될 수 있다.

7. 참고문헌

- [1] Apple, J. M., 1972, *Material Handling Systems Design*, Wiley, New York
- [2] Cesarone, J. and Eman, K. F., 1989, "Mobile robot routing with dynamic programming," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.8, 2357-266
- [3] Berrada, M. and Stecke, K. E., 1986, "A branch and bound approach for flexible for machine balancing in flexible manufacturing systems," *Management Science*, Vol. 32, 1316-1334
- [4] Egbelu, P. J., 1987, "The use of nonsimulation approaches in estimating vehicle requirements in automated guided vehicle based transport system," *Material Flow*, Vol. 4, 17-32
- [5] Egbelu, P. J. and Tanchoco, J. M. A., 1984, "Characterization of automated guided vehicle dispatching rules in facilities with existing layout," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.22, 359-374
- [6] Egbelu, P. J. and Tanchoco, J. M. A., 1986, "Potentials for bi-directional guide-path for automatic guided vehicle based systems," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 24, 1075-1097
- [7] Egbelu, P. J., 1993, "Concurrent specification of unit load sizes and automated guided fleet size in manufacturing system," *Int. J. Prod. Economics*, Vol. 29, 49-64
- [8] Egbelu, P.J., 1993, "Economic design of unit load-based FMSs employing AGVs for transport," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 31, 2753-2775
- [9] Gaskin, R. J. and Tanchoco, J.M.A., 1987, "Flow path design for automated guided vehicle systems," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.25, 667-676
- [10] Goetz, W.G. and Egbelu, P.J., 1990, "Guide path design and location of load pickup/dropoff points for automated guided vehicle system," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.28, 927-941
- [11] Kaspi, M. and Tanchoco, J.M.A., 1990, "Optimal flow path design for unidirectional AGV systems," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.28, 1023-1030
- [12] Kusiak, A., 1990, *Intelligent Manufacturing Systems*, Prentice-Hall, Inc, New Jersey
- [13] Kusiak, A., 1985, "Loading models in flexible manufacturing systems," Flexible Manufacturing A. Raouf and S.I.Ahmad (eds)(New York: Elsevier)
- [14] 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.*, Vol.28, 1611-1622
- [15] 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

- [16] Leung, L. C. and Tanchoco, J.M.A., 1987, "Multiple machine replacement within an integrated framework," *The Engineering Economist*, Vol.32, 89-114
- [17] Maxwell, W.L. and Muckstadt, J.A., 1982, "Design of automatic guided vehicle systems," *IIE Transactions*, Vol.14, 114-124
- [18] Modi, B. K. and Shanker, K., 1995, "A formulation and solution methodology for part movement minimization and workload balancing at loading decisions in FMS," *Int. J. Prod. Economics*, Vol. 34, 73-82
- [19] Modi, B. K. and Shanker, K., 1995, "Models and solution approaches for part movement minimization and load balancing in FMS with machine, tool and process plan flexibilities," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 33, 1791-1816
- [20] Pegden, C. D., Shannon, R. E. and Sadowski, R. P., 1995, *Introduction to Simulation Using SIMAN*, McGraw-Hill, Inc.
- [21] Sarin, S. C. and Chen, C. C., 1987, "The planning loading and tool allocation problem in a flexible manufacturing system," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 25, 1081-1094
- [22] Stecke, K. E., 1983, "Formulation and solution of nonlinear integer production planning for flexible manufacturing systems," *Management Science*, Vol. 29, 273-288
- [23] Tanchoco, J.M.A., 1994, *Material Flow Systems in Manufacturing*, Chapman & Hill, London