

⊗ 연구 논문

무인 반송시스템을 이용하는 유연 제조시스템에서
작업경로와 경제적 설계

-Parts Processing Route and Economic Design in Flexible
Manufacturing Systems employing AGVs for Transport-

장 석화 *

Chang, Suk Hwa

Abstract

This paper addresses the processing route of parts and economic design in flexible manufacturing systems (FMSs) employing AGVs for Transport. Parts are processed through several workstations according to operation sequences. The machine of each workstation can do multiple operation functions. 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 route of parts, number of machines at each workstation, number of vehicles. The model is assumed that the operation stage of parts can be processed at the only one among several available workstations. Parts are transported by automated guided vehicle system(AGVS). The decision criteria is to minimize the sum of processing cost, travel cost, operating cost. A model formulation is represented. A solution algorithm is suggested by using mathematical programming and simulation technique, and a numerical example is shown.

1. 서론

최근에 고객의 제품에 대한 수요는 짧은 주기로 다양하고 신속하게 변화하고 있다. 이에 따라서 기업은 인건비를 절약하고 재고비용을 줄이면서 동시에 동일한 시스템에서 여러 가지 종류의 제품을 생산하는 다품종 소량 생산시스템을 취하고 있다. 이는 고객의 요구를 신속하게 충족시키기 위하여 생산량을 소량으로 하여 다수의 제품을 신속하게 생산하여야만 경쟁력을 갖기 때문이다. 그러나 동일한 제조시스템에서 다품종을 동시에 생산하거나 짧은 생산계획기간을 주기로 수시로 바꾸어 생산하는 것은 제조상의 여러 어려움을 갖게 한다. 즉, 생산계획, 일정계획, 기계에 작업할당, 가공순서 등의 문제가 제조시에 발생한다. 이의 해결 방법의 하나로 기업에서는 자동화 설비를 도입하여 컴퓨터통제를 이용한 제조시스템을 이용하고 있다.

자동화의 하나로 유연 제조시스템(Flexible Manufacturing System: FMS)은 생산공정의 전체적인 통제를 컴퓨터를 이용하여 이루어지는 것으로 제조시스템에서 생산량이 중간규모이고,

* 인천대학교 산업공학과

† 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

여러 가지 종류의 제품을 동시에 제조하는데 유용하게 이용될 수 있는 방법으로 인식되고 있다. 작업의 가공단계가 여러 개이고, 각 가공 단계의 공정과정이 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 무인 반송시스템(Automated Guided Vehicle system)을 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 최소화 되도록 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 단위시간 동안의 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 경제적이 될 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.

여기서는, 제조시스템의 설비를 작업장의 기계와 운반기로 나타내고, 설비의 이용률은 기계의 고장, 수리, 충전 등의 시간을 제외한 설비가 이용할 수 있는 총 시간에 대한 실질 가공시간, 운반기가 작업물을 싣고, 이동하고, 내리는데 걸리는 총 시간의 비율을 기계와 운반기의 이용률로 한다. 따라서 작업물이 일시적으로 없음으로 인하여 기계가 쉬거나 또는 작업물의 운반기에 대한 요청이 없어서 쉬는 시간은 이용가능 시간에는 포함되나, 이용율을 낮추는 요인이 된다.

실제의 제조시스템에서 설비(작업장의 기계, 운반기)의 이용률은 항상 1 보다 적게 된다. 설비의 이용률을 바탕으로 하여 제조시스템에서 작업물의 이동경로와 필요한 설비의 수를 결정하는 경우에는 설비의 이용률을 알고 있어야 한다. 이는 오랜동안 시스템의 운영 자료의 평균치를 이용할 수도 있고, 희망 이용률을 가정하고 사용할 수 있을 것이다. 그러나 새로운 시스템을 구축하거나 필요한 운영 설비의 수를 결정하는 경우에 설비의 이용률을 모르는 경우가 있다.

설비의 이용률을 모를 때 작업물의 가공경로와 설비의 수를 결정하고자 하는 경우에 설비의 이용률을 변화시키면서 수리계획법을 이용하여 작업물의 가공경로와 설비의 수를 결정하고, 이

결과에 대해 시뮬레이션을 수행하여 해의 적절함을 평가하여 해를 선택하는 방법을 연구한다. 주어진 요소에서 설비의 이용률을 알려고 하는 경우에 실질 시스템을 수행하기 전에 시뮬레이션 방법이 좋은 대안이 될 수 있다.

이와 같이 작업물의 가공경로와 제조시스템을 구성하는 적절한 설비의 수를 결정하는 문제를 수리계획법과 모의실험을 결합하여 해결한 연구는 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 [23], Berrada and Stecke [4]). Kusiak [14]은 할당 문제를 총 가공비용을 최소화하는 것을 목적으로 하여 0-1 정수계획 문제로써 모형화 하였다. Leung and Tanchoco [17]은 장비교체문제의 연구에 부품할당 모형을 연구하였다. 그들은 공구수명이나 공구 magazine의 능력은 반영하지 않고 물류흐름문제를 고려하였다. Sarin 과 Chen [22]은 작업할당과 공구할당을 동시에 결정하는 문제를 연구하였다. Leung et al. [16]은 물류흐름을 고려하여 부품을 기계에 할당하는 내용과 공구를 기계에 할당하는 내용을 함께 포함한 문제를 연구하였다. Modi and Shanker [19, 20]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 [3], Egbelu [5], Egbelu and Tanchoco [6, 7], Gaskin et al [10], Goetz and Egbelu [12], Kaspi and Tanchoco [12], Mahadevan and Narendran [15], Maxwell and Muckstadt [18]). 이 외에 Egbelu [8, 9]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. 장 [1]은 유연제조시스템에서 작업물의 이동경로의 결정과 작업장의 기계와 운반기의 수를 결정하는 문제를 생산소요 시간을 가변적으로 하여 동시에 구할 수 있는 연구를 하였다. 이 연구에서는 정수계획 수리모형으로 문제를 모형화하여 해를 구하고 있다.

실질적으로 어떠한 생산계획기간에 생산을 필요로 하는 작업물 종류와 양은 변한다. 그리고 제조시스템에서 작업물을 가공할 때 기계가 다공정을 할 수 있는 경우에 작업물들은 가능한 가공경로는 다수가 존재할 수 있다. 그리고 시스템을 구성하고 있는 설비는 작업장마다 동일한 기계가 다수이다. 설비의 이용률을 정확히 주어지지 않은 상황에서 작업물의 공정에 대한 가공 작업장의 결정과 작업장 기계와 운반기의 수를 동시에 결정하기 위하여는 수리적모형 외에 시뮬레이션을 이용하여 결정하는 문제를 연구할 필요가 있다.

3. 모형화

생산계획기간은 임의로 나눈 시간단위(예를들면, shift, 일, 주, 월, 분기, 년 등)를 나타내는 것이고, 생산소요기간은 주어진 모든 작업물을 생산하는데 소요되는 시간을 나타낸다. 유연 제조시스템에서 주어진 생산계획기간에 작업물들의 일련의 공정단계에 대한 각 공정이 이루어질 기계의 순서인 가공경로를 결정하는 것을 가공에 이용되는 각 작업장의 기계의 수, 운반에 이용되는 운반기의 수를 함께 고려하여 결정하는 설계문제를 다룬다. 제조시스템에서 동시에 가공 혹은 조립될 작업물의 종류가 다수이다. 작업물의 어떠한 공정에 대해 가공이 가능한 작업

장들이 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 수와 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 생산계획기간에 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, 12분을 나타내는 것으로 단계별로 가공이 가능한 작업장과 그 작업장에서의 가공시간이 아래 표 1과 같은 경우에 각 가공단계를 어느 작업장에서 가공되느냐에 따라 총 가공시간 및 비용이 달라질 수 있다. 그리고 작업물의 운반시간 및 비용도 달라질 수 있다. 이와 같이 여러 종류의 작업물에 대하여 가공 작업장과 가공시간이 다르게 똑같이 적용되므로 전체적으로 작업물의 각 공정단계가 어느 작업장의 기계에서 가공되느냐에 따라 생산소요기간이 다르고, 작업장의 기계마다 비용이 다르므로 작업물의 가공단계에 대한 작업장을 합리적으로 결정한다.

표 1. 작업의 가공 작업장과 공정시간

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

실제문제에서 설비들의 이용률은 시스템에 대한 가정과 운영규칙에 따라 다르게 발생할 수 있다. 기계와 운반기의 평균이용률은 작업물이 이동하는 중에 대기로 인한 지체와 이동단위와 가공경로에 따른 작업의 작업장에 일시적인 불균형, 작업물의 투입간격 및 투입순서 등 실질적인 시스템의 운영으로 인한 요인으로 정확히 알기는 어렵다. 이 경우에 시뮬레이션을 활용하여 생산계획기간 동안에 가상적인 제조시스템을 운영함으로써 설비의 이용률과 생산소요시간을 알 수 있을 것이다.

여기서는 설비의 이용률을 매개변수로 나타내어, 비용요소를 반영하여 작업물의 가공경로, 작업장 기계와 운반기의 수를 함께 결정하는 문제를 경제적인 면에서 다루기 위하여 모형화한다. 문제를 나타내기 위하여 다음과 같은 가정과 부호를 나타낸다.

3.1 가정

- (가) 생산계획기간은 알려져 있다.
- (나) 생산계획기간에 생산하려고 하는 작업물의 종류와 생산량은 정확히 알려져 있다.
- (다) 작업물의 가공순서에 따라 가능한 작업장의 집합과 각 작업장에서의 가공시간은 알려져 있다.
- (라) 동일 작업장에는 기능과 성능이 같은 기계들이 여러 대 존재한다.
- (마) 작업물은 운반기에 의해 최단거리로 운송된다.
- (바) 작업장의 설비들은 고장이 발생하지 않는다.

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
- U_k = 작업장 k 의 기계에 대해 한대당 생산계획기간 동안 발생하는 운영 및 간접비용
- H_h = 운반기 한 대당 생산계획기간 동안 발생하는 운영 및 간접비용
- 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 = 생산계획기간으로 이용가능한 최대 생산시간으로 주어진 상수값이다.
- T_s = 주어진 작업물을 모두 생산하는데 걸리는 생산소요기간을 나타낸다.
- $X_{ikr} = 1$, 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

3.3 모형

본 논문에서는 나타내는 모형은 작업 종류별로 각 공정에 따라 여러 개의 가능한 가공 작업장들 중에서 하나의 작업장만을 허용하는 것이다. 이는 각 공정단계에 하나의 작업장만이 사용되는 경우이다. 즉, 작업들이 완성되기까지 일련의 여러 가지의 공정 단계들에 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.

그리고 어떠한 작업의 여러 단계의 공정들 중에서 2개 이상의 공정이 연속이던지 또는 불연속이던지 동일한 작업장에서 가공될 수 없다. 즉, 작업은 공정마다 각각 다른 작업장의 기계를 이용하여야 한다.

목적함수는 비용을 최소화하는 기준을 적용한다. 주어진 생산계획기간, T 동안 발생하는

비용요소를 목적함수로 한다. 작업이 작업장의 기계에서 단위시간당 비용을 고려하여 가공시간에 비례하여 발생하는 실질 가공비용을 반영한다. 또한 생산계획기간, T 동안 작업장들의 기계당 기계에 발생하는 운영 및 간접비용요소를 반영하고, 이는필요한 기계의 수에 비례하여 발생한다. 마찬가지로 운반기에 대하여도 작업장의 기계와 같이 실질 운반시간에 비례하여 발생하는 비용요소와 생산계획기간에 운반기의 단위당 발생하는 운영 및 간접비용으로 운반기의 수에 비례하여 발생한다. 이들 비용요소는 다음과 같이 나타내진다.

(가) 설비의 운영 및 간접비용 : 생산계획기간, T 동안 사용하는 작업장의 기계와 운반기에 대해 발생하는 운영 및 간접 비용요소를 고려한다. 따라서 이 비용은 생산계획기간 동안에 기계마다 발생하는 착수비용으로 생각될 수 있다. 이 비용은 기계의 실질 작업의 가공시간에 관계없이 생산계획기간, T 동안 기계마다 발생하는 일정한 비용이고, 사용하는 기계의 수에 비례한다. 다음의 식(1) 과 같이 나타내진다. 앞의 항은 작업장의 기계에서 발생하는 비용이고, 뒤의 항은 운반기에서 발생하는 비용이다.

$$\sum_k U_k Z_k + H_h W_h \tag{1}$$

(나) 가공비용 : 생산소요기간동안 작업장에서의 가공시간에 발생하는 비용으로 기계의 단위시간 비용을 고려하여 실질 가공시간 동안에 발생하는 비용이다.

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_r c_k \delta_{ijk} Q_i X_{ijkr} \tag{2}$$

(다) 운반비용 : 작업물이 운반기에 의해 작업장 사이를 이동될 때 발생하는 비용이다. 단위거리당 운반비용에 총 운반시간과 총 운반량을 곱하여 나타내진다.

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_r c_h t_{kr} Q_i X_{ijkr} \tag{3}$$

(라) 제약식 : 제약식은 다음과 같은 요인이 존재한다.

먼저, 작업물의 각 공정에 대하여 가능한 여러 곳의 작업장 중에서 한 곳에서 공정이 이루어진다. 그리고, 각 작업장은 동일한 종류의 작업물에 대하여 최대 한 개의 공정만을 처리한다. 작업장의 실질 가공시간은 이용가능한 기간 이내이어야 한다. 운반기의 실질 운반시간도 이용가능시간 이내이어야 한다. 또한, 작업장 기계와 운반기의 수에 대한 제한으로 변수의 허용범위를 나타내는 것으로 표현된다. 이들은 모형 P1에 나타나 있다.

목적함수는 작업장의 기계들과 운반기들인 설비의 운영 및 가공비용, 작업장의 기계들의 가공 비용, 운반기의 운반 비용의 합으로 표현되고, 의사결정 변수는 작업물의 각 공정을 처리하는 작업장, 작업장의 기계와 운반기의 수를 결정하는 것으로 다음의 모형 P1에서와 같이 나타내진다. 가공비용과 운반비용은 함께 표현될 수 있다.

$$P1: \text{minimize } Z1 = \sum_k U_k Z_k + H_h W_h + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_r (c_k \delta_{ijk} Q_i + c_h t_{kr} Q_i) X_{ijkr} \tag{4}$$

subject to

$$\sum_k \sum_r X_{ikr} = 1, \quad \forall i \tag{5}$$

$$\sum_r X_{ijkr} = \sum_p X_{i,j+1,pk}, \quad \forall i, j, k \tag{6}$$

$$\sum_i \sum_j \sum_r \delta_{ijk} Q_i X_{ijkr} \leq a_k Z_k T, \quad \forall k \tag{7}$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_r t_{rk} Q_i X_{ijkr} \leq \beta W_h T \tag{8}$$

$$\sum \sum X_{ijkr} \leq 1, \quad \forall k \tag{9}$$

$$Z_k \leq m_k, \quad \forall k \tag{10}$$

$$W_k \leq v_k \tag{11}$$

$$Z_k \geq 0 \text{ and integer, } \forall k \tag{12}$$

$$W_k \geq 0 \text{ and integer} \tag{13}$$

$$X_{ijk} = 0, 1, \quad \forall i, j, k, r \tag{14}$$

모형에서 제약식 (5)은 작업물의 첫 번째 작업공정에 대한 작업장을 하나만을 이용함을 나타내고, 제약식 (6)은 어떠한 작업의 공정을 처리하는 작업장에 대해 들어오고 나가는 작업물의 가공경로의 수가 같음을 나타낸다. 제약식 (7)은 작업장의 실질 이용시간과 이용 가능시간과의 관계를 나타내고, 제약식 (8)은 운반기의 실질 이용시간과 가능한 이용 가능시간과의 관계를 나타낸다. 제약식 (9)은 작업물의 각 공정들은 서로 다른 작업장을 이용해야 하는 것으로, 작업장은 동일한 작업물에 대하여 많아야 하나의 공정만을 처리할 수 있음을 나타낸다. 나머지 제약식들은 변수의 허용범위를 나타낸다.

모형 P1은 선형정수계획 모형이다. 따라서 작업장들의 기계와 운반기의 이용률, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K, \beta$ 을 주어진다면, 정수계획 프로그램으로 해를 구할 수 있을 것이다. 다음 부분에서는 이용률을 알 수 없는 경우에 모형 P1를 이용하여 작업의 가공경로와 작업장의 기계와 운반기의 수를 구하고, 이 결과를 이용하여 실질 모의실험을 실행하여 해를 선택하는 해법을 설명할 것이다.

4. 해법

앞 부분 3에서 제시된 모형에서 생산계획기간, T 는 상수로 주어지는 것으로 변수가 아니므로 정수계획 프로그램으로 해를 구할 수 있다. 또한 수리적모형을 활용하기 위하여는 기계의 이용률, α_k 와 운반기의 이용률, β 는 이미 알고 있는 것으로 가정하여 주어진 값을 이용한다. 설비의 이용률은 오랜동안의 제조시스템의 운영결과를 분석하여 평균치를 이용하여 활용할 수 있을 것이다.

그러나 본 연구에서는 작업장 기계의 이용률, α_k ($k=1, 2, \dots, K$)와 운반기의 이용률, β 를 정확히 모르는 경우에 해를 구하는 방법을 제시하도록 한다. 설비의 실질 이용률을 정확히 알 수 없으므로 이용률을 변화시키면서 수리적 모형과 모의실험을 이용하여 해를 구하는 방법을 제시한다.

실질적으로 어떠한 하나의 제조시스템에서 설비의 이용률은 실질 시스템을 직접 실행하여 자료를 얻기 전에는 모의실험에 의존하여 분석할 수 밖에 없다. 시뮬레이션을 이용하여 작업의 각 공정에 대한 가공 작업장, 작업장의 기계와 운반기의 수에 대하여 가능한 모든 변화 범위내에서 이들 요소를 변화시키면서 실험하게 되면 매우 많은 실험을 실시해야 할 것이다. 이는 작업물의 가공경로에 대한 방법이 무수히 많기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 설비의 이용률을 변화시키면서 어떠한 주어진 설비의 이용률에 대하여 작업의 가공경로와 설비의 필요한 수의 결정은 수리계획 프로그램으로 해를 구하고, 이 결과를 바탕으로 모의실험을 실시하여 생산소요기간을 구하여 생산계획 기간과 비교하여 해를 분석하여 가장 바람직한 해를 구하는 절차를 제시하고자 한다.

설비의 이용률에 따라 작업의 각 공정의 가공 작업장과 설비의 수의 결정에 영향을 미칠 수 있다. 이용률이 높으면 필요한 설비의 수를 증가시키고, 이용률이 낮으면 필요한 설비의 수를 감소시키게 된다. 설비의 이용률은 설비가 나타낼 수 있는 최대 이용률을 주고 문제를 풀어나간다. 생산소요기간이 생산계획시간 이내에 되도록 설비의 이용률을 줄여가면서 최소비용을 나타내는 문제에 대한 해를 찾는 방법을 이용한다.

설비의 이용률, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K, \beta$ 를 변화시키면서 수리적 모형을 구하는데는 너무나 많은 문제를 풀게 된다. 따라서 이용률의 값이 갖게 되는 범위를 제한한다.

아래와 같이 모든 작업장의 기계의 이용률을 동일하게 하고, 운반기의 이용률은 별도로 하여 수리적

모형을 푼다.

$$\alpha_k = \alpha, \quad k=1,2,\dots,K \quad (15)$$

작업장 기계의 이용률을 α 로 하고, 운반기의 이용률을 β 일 때 수리적모형을 이용하여 구한 작업장 기계와 운반기의 수, $E(Z_1, Z_2, \dots, Z_K, W_k)$ 와 작업물의 가공경로를 구한다. 수리적 모형을 이용하여 구한 해는 생산계획기간, T 이내에서 만족되도록 구한 해이다. 그러나 실질 시뮬레이션을 실행하여 얻은 생산소요시간, T_s 는 항상 T 보다 적은 것이 아니다. 이는 가정한 이용률과 실질 이용률이 차이가 발생하기 때문이다. 그러므로 T 와 비교하여 $T_s > T$ 이면, 이 때의 이용률에 대한 해는 실현불가능한 해가 되고, $T_s \leq T$ 이면, 이 해는 실현가능한 해가 된다. 이용률을 변화시키면서 해를 구할 때 처음으로 $T_s \leq T$ 를 만족하는 경우가 가장 바람직한 해로 선택한다. 이는 설비의 수를 가능하면 적게 사용하는 것이 비용을 적게 발생하기 때문이다.

시뮬레이션을 실행하기 위하여 설비의 이용률과 변화폭, 그리고 load station에서 작업물의 투입순서와 투입간격, 그리고 시뮬레이션의 실행횟수를 설명한다.

(가) 설비의 이용률과 변화폭

작업장의 기계의 가공시간은 주어진 시간에서 이용률이 최대 1.0 이 될 수 있으나, 운반기는 작업물의 요청 위치로 빈 상태로 이동하는 시간이 포함되고, 빈 상태 운반시간이 전체시간 중에서 차지하는 비율이 적지 않으므로 이용률이 1.0 보다 훨씬 적게 나타난다. 따라서 여기서는 운반기의 최대 이용률을 0.8 로 한다. 시뮬레이션을 수행하는데 있어 설비의 이용률의 변화의 폭은 0.01(1%)로 하여 수행한다.

수리계획을 통하여 얻게 되는 해에서 설비의 수는 운영 및 간접비용 요소로 인하여 가능하면 적게 이용되므로 설비의 이용률은 높게 나타난다. 따라서 이용률을 지나치게 낮게 가정하는 경우는 바람직하지 않다. 여기서는 기계의 이용률의 하한값을 0.7로 한다. 그러나 이용률이 0.7이 되기 전에 실현가능하고 비용이 적게 발생하는 해가 있으면 멈춘다.

(나) 첫 번째 작업장으로의 작업물의 투입순서 결정

여러 종류의 작업물이 각각의 가공경로를 따라 공정이 이루어지므로 작업물의 투입순서는 생산소요시간에 영향을 미친다. 여기서는 작업물이 투입시점에서 load station에서 작업장으로 투입되는 순서를 결정한다. 다음을 정의한다.

R_i = 투입시점인 현재까지 작업물 i 의 투입된 양

$$\theta_i = \frac{Q_i - R_i}{Q_i} \quad (16)$$

그러면 작업물의 투입되는 순서는 다음의 식을 만족하는 작업물 종류, i^* 를 선택하여 투입한다.

$$\theta_{i^*} = \max[\theta_i | i=1,2,\dots,M] \quad (17)$$

(다) 첫 번째 작업장으로의 작업물의 투입간격 결정

작업물의 투입간격은 일정한 간격으로 모든 작업물이 이론적으로 생산계획기간 이내에 모두 완료될 수 있도록 충분히 짧게 정한다. 작업물 사이의 투입간격은 다음의 방법으로 결정한다. 예를 들어, 총 작업물의 양이 $\sum_{i=1}^N Q_i$ 이고, 가공공정이 가장 긴 작업물의 load station에서 unload station 까지의 가공시간과 이동시간의 합인 흐름시간을 F 라 하면, 작업물의 투입간격은 다음을 만족하는 범위내에서 결정한다.

$$\frac{T-F}{\sum_{i=1}^N Q_i} \leq 0.9 \quad (18)$$

(라) 모의실험 횟수 결정

가공시간은 확정적인 자료를 사용하고, 작업물의 투입간격은 일정한 간격으로 확정적이다. 또한 모든 작업물이 이론적으로 생산계획기간 이내에 모두 완료될 수 있도록 충분히 짧게 정하므로 작업물의 부족으로 기계가 쉬게 되는 상황을 최소화 한다. 그리고 작업물의 투입순서는 알려져 있으므로 확률적인 요인이 없다. 따라서 모의실험의 결과는 실험 횟수에 관계없이 거의 일정하다고 볼 수 있다. 여기서는 1회의 모의실험을 실시한다. 확률적인 요인이 포함되면 실험 횟수를 증가시켜야 한다.

앞의 절차를 이용하여 해를 구하는 단계를 다음과 같이 나타낸다.

단계 1: 설비의 초기 이용률, $\alpha^0=1$, $\beta^0=0.8$, $\gamma=1$, 현재까지의 최소비용, $C_{\min}=\infty$ 로 놓는다.

단계 2: 이용률, $\alpha=\alpha^0$, $\beta=\beta^0$ 로 놓고, 수리적모형 P1을 정수계획 프로그램으로 해를 구하여, 작업물의 가공경로와 각 작업장 기계의 수와 운반기의 수를 구한다. 이를 기록하여 둔다.

단계 3: 수리계획으로 구한 결과를 시뮬레이션을 실행하여 실질 생산소요시간, T_s 를 구하여 생산계획시간, T 와 비교한다. 다음의 절차를 따른다.

(1) $T_s > T$ 이면, 이 문제는 실현가능하지 않으며, 기록하고 단계 4로 간다.

(2) $T_s \leq T$ 이면, 이 문제는 실현가능하다. 이 경우 해를 기록하고, 이 해의 비용이 현재까지 기록된 최소비용, C_{\min} 보다 적으면 최소비용에 대체하고, 진행을 멈춘다. 이때의 해가 최적해가 된다 이 비용이 최소비용보다 크면, 대체하지 않고, 단계 4로 간다.

단계 4: $\gamma=\gamma-0.01$ 로 놓는다. $\gamma \geq 0.7$ 이면, 이용률을 $\alpha=\alpha^0\gamma$, $\beta=\beta^0\gamma$ 로 하여, 수리계획모형으로 해를 구한다. 여기서 구한 해인 작업물의 이동경로와 각 작업장 기계와 운반기의 수가 단계 3에서 구한 해와 일치하면, 현 단계를 반복한다. 그러나 일치하지 않으면, 단계 3으로 간다. $\gamma < 0.7$ 이면, 그리고 진행을 멈춘다. 이 경우는 γ 를 더욱 낮추면 해가 존재하지만, 바람직한 해로 보기 어렵다.

5. 수치적 예제

그림 1과 같은 6개의 작업장으로 이루어진 제조시스템에서 5개의 작업종류를 제조하는 문제를 생각하자. 그림 1에서 작업장 번호 0은 load station 을 나타내고, 5는 unload station으로 실질적인 가공과정이 발생하지 않는다. 1, 2, 3와 4는 가공과정이 발생하는 작업장을 나타낸다. 그리고, 작업장에서 P/D는 작업물을 싣고 내리는 위치를 나타내는 것으로 같은 위치에 있고, P는 작업물을 싣는 위치를 나타내고, D는 작업물을 내리는 위치를 나타낸다. R 점은 은 P에서 1m 거리이고, 운반기의 주차 위치이다. X와 Y 축에 있는 수치는 거리를 나타낸다.

어떠한 생산기간에 5개의 작업물에 대하여 필요한 생산량은 각각 50, 120, 150, 120, 100 개이다. 각 작업물의 공정이 가능한 작업장에 대한 가공시간이 표 2에 나타나 있다. 표2에서 * 부호는 작업물 i 의 j 번째 공정이 k 의 작업장에서 발생하지 않음을 나타내고, 숫자는 가공시간을 나타낸다. 작업장과 운반기의 이용 가능한 최대 수와 단위시간당 가공비용, 기계당 운영 및 간접비용은 표 3에 나타난 것과 같다.

무인운반기에 작업물을 싣거나 내리는데 걸리는 시간은 작업물에 관계없이 동일하게 각각 0.5분으로 가정한다. 운반기의 속도는 일정하게 40m/분이다. 초기 이용률은 작업장 기계에 대하여는 1.0, 운반기에 대하여는 0.8로 하여 문제를 시작한다. 최대 가능한 생산계획기간, $T=2000$ 분으로 한다.

수리계획 모형에서 정수계획 해는 Hyper Lindo 를 이용하여 해를 구하였다. 모의실험은 AutoMod 8.2 PC 버전을 이용하여 수행하였다. 모의실험은 이용률에 따라 얻어진 표 4의 결

과를 대하여 각각 수행한다. 첫 번째 작업물은 시점 0에서 투입되고, 작업물의 투입순서는 일정한 3분 간격으로 load station에서 투입된다.

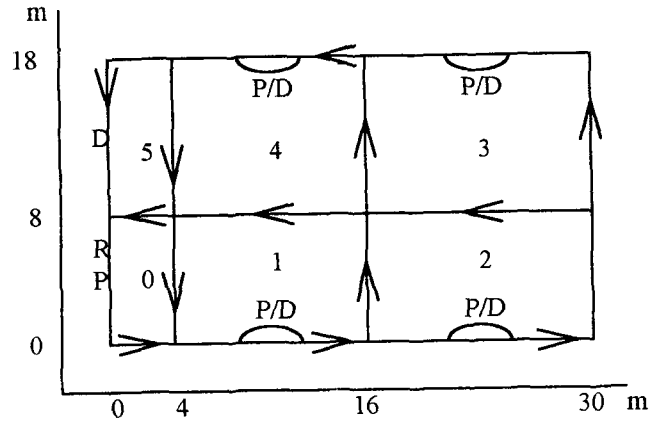


그림 1. 제조시스템의 배치

표 2. 작업의 공정에 대한 작업장에서의 가공시간(분)

작업종류	공정순서	작업장			
		1	2	3	4
1	1	12.0	15.0	*	*
	2	*	11.0	12.5	*
	3	8.0	*	*	9.5
	4	*	8.5	7.5	8.0
2	1	11.5	10.0	*	*
	2	13.0	*	10.0	*
	3	7.5	*	*	5.5
	4	*	8.5	8.0	10.0
3	1	10.5	*	*	13.0
	2	*	8.0	9.5	11.0
	3	*	6.0	5.5	*
4	1	11.0	*	10.5	*
	2	*	*	8.0	7.5
	3	*	6.0	*	7.0
	4	10.0	11.0	*	*
5	1	12.0	*	*	10.0
	2	11.0	*	13.5	*
	3	*	9.0	7.5	8.5
	4	*	7.0	8.5	*

표 3. 설비의 최대가능 수, 가공비용, 운영 및 간접비용

설비	최대수	가공비용/(분)	운영 및 간접비용
작업장 1	5	12	10,000
2	5	12	11,000
3	5	14	8,000
4	5	10	12,000
운반기	5	10	7,000

기계와 운반기의 이용률 (α, β)에 대한 수리계획으로 문제를 풀었을 때의 해는 다음 표 4에
서와 같다. 표 4와 5에서 이용률의 변화폭은 0.02(2%) 간격으로 0.8-1.0 사이일 때 나타냈다.
그리고 표 4의 결과를 시뮬레이션 실험을 하였을 때의 생산소요시간, 그리고 기계와 운반기의
이용률의 범위는 표 5에 나타나 있다. 표 5에서 실질 이용률은 시뮬레이션을 실행한 결과 기
계들의 이용률 중에서 가장 적게 나타난 기계의 이용률 값과 가장 크게 나타난 기계의 이용률
값으로 나머지 기계들은 모두 이들 범위 사이에서 나타나고 있음을 의미한다. 운반기의 이용률
은 하나의 평균값으로 나타냈다.

표 4. 이용률에 대한 작업장 기계와 운반기의 수, 작업의 가공경로, 비용

이용률 (α, β)	설비의 수, $E(Z_1, \dots, Z_4, W_k)$	가공경로	비용
(1.00, 0.800)	$E(3, 2, 2, 3, 3)$	*1:1-3-4-2 2:2-3-1-4 3:1-4-2 4:3-4-2-1 5:1-3-4-2	412,008
(0.98, 0.784)	$E(3, 3, 3, 2, 3)$	1:1-2-4-3 2:2-3-1-4 3:1-2-3 4:3-4-2-1 5:1-3-4-2	394,720
(0.96, 0.764)	$E(3, 3, 3, 2, 3)$	1:1-2-4-3 2:2-3-1-4 3:1-2-3 4:3-4-2-1 5:1-3-4-2	394,720
(0.94, 0.752)	$E(3, 3, 3, 2, 3)$	1:1-2-4-3 2:2-3-1-4 3:1-2-3 4:3-4-2-1 5:1-3-4-2	394,720
(0.92, 0.736)	$E(3, 3, 3, 2, 3)$	1:2-3-1-4 2:2-3-1-4 3:1-2-3 4:3-4-2-1 5:4-3-2-3	399,120
(0.90, 0.720)	$E(3, 3, 3, 2, 3)$	1:2-3-1-4 2:2-3-1-4 3:1-2-3 4:1-3-4-2 5:4-1-2-3	401,760
(0.88, 0.704)	$E(3, 3, 3, 2, 4)$	1:2-3-1-4 2:2-3-1-4 3:1-2-3 4:3-4-2-1 5:1-3-4-2	404,120
(0.86, 0.688)	$E(4, 3, 3, 2, 4)$	1:1-2-4-3 2:1-3-4-2 3:1-2-3 4:3-4-2-1 5:1-3-4-2	410,760
(0.84, 0.672)	$E(4, 3, 3, 2, 4)$	1:1-2-4-3 2:1-3-4-2 3:1-2-3 4:3-4-2-1 5:1-3-4-2	410,760
(0.82, 0.656)	$E(4, 3, 3, 2, 4)$	1:1-2-4-3 2:1-3-4-2 3:1-2-3 4:3-4-2-1 5:1-3-4-2	410,760
(0.80, 0.640)	$E(4, 3, 3, 2, 4)$	1:1-2-4-3 2:1-3-4-2 3:1-2-3 4:3-4-2-1 5:1-3-4-2	410,760

가공경로에서 *1:1-3-4-2 는 작업 종류 1의 가공 공정이 작업장 1, 3, 4, 2의 순
서로 행해짐을 나타낸다.

표 4와 5에 나타난 결과를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- (1) 이용률을 낮춤에 설비의 수가 증가하게 나타나고 있다. 표 4에는 설비의 이용률이 0.94-0.98일 때 설비의 수는 $E(3,3,3,2,3)$ 로 동일하게 나타나고 이때의 비용이 가장 적게 나타나 있다. 그러나 이 경우에 시뮬레이션을 하면 생산소요시간이 2308.20 분으로 생산계획기간, 2000분 보다 크게 나타나 있다. 따라서 이 경우는 바람직한 해가 될 수 없다.
- (2) 설비의 이용률, $(\alpha, \beta)=(0.88, 0.704)$ 일 때 시뮬레이션을 한 생산소요시간이 1795,80분으로 생산계획기간 2000분보다 적으면서 비용이 가장 적게 발생하고 있다. 따라서 본 예제 문제에서는 이 경우가 가장 바람직한 해가 된다. 또한 이 경우가 설비의 실질 이용률도 가장 크게 나타나고 있다. 즉, 가장 바람직한 해는 설비의 수는 $E(3,3,3,2,4)$ 이고, 작업물의 이동경로는 표 4에 나타난 것과 같다.
- (3) 수리적모형으로 해를 구할 때 설비의 이용률을 어느 수준에서 할 것인가를 고려할 수 있다. 이용률을 높게 하면 설비의 수도 감소하고, 비용은 적게 발생하지만 실질 생산소요시간이 생산계획기간보다 크게 되어 실현가능한 대안이 될 수 없다. 그러나 이용률을 너무 낮게 정하면 생산소요시간이 생산계획기간에 비해 낮게 나타나지만, 설비의 수가 증가하고 비용도 증가하게 된다. 여기서는 경우와 같이 이용률이 0.85-0.90 정도가 합리적인 것으로 생각된다.
- (4) 이용률이 (0.86, 0.704) 이하인 경우는 낮은 이용률을 가정하고 해를 구해 다수의 기계가 사용되게 되어 실질 생산소요시간이 적게 나타나고 또한 설비의 이용률이 상대적으로 가정한 이용률보다 높게 나타난다.

표 5. 이용률에 대한 생산소요시간, 실질 이용률

이용률 (α, β)	$E(Z_1, \dots, Z_4, W_h)$	생산소요시간 T_s (분)	실질 이용률 범위 (기계, 운반기)
(1.00, 0.800)	$E(3, 2, 2, 3, 3)$	2441.37	*(0.68 - 0.90, 0.77)
(0.98, 0.784)	$E(3, 3, 3, 2, 3)$	2308.20	(0.63 - 0.79, 0.77)
(0.96, 0.764)	$E(3, 3, 3, 2, 3)$	2308.20	(0.63 - 0.79, 0.77)
(0.94, 0.752)	$E(3, 3, 3, 2, 3)$	2308.20	(0.63 - 0.79, 0.77)
(0.92, 0.736)	$E(3, 3, 3, 2, 3)$	2278.50	(0.69 - 0.77, 0.75)
(0.90, 0.720)	$E(3, 3, 3, 2, 3)$	2178.80	(0.69 - 0.82, 0.75)
(0.88, 0.704)*	$E(3, 3, 3, 2, 4)$	1795.80	(0.84 - 0.98, 0.75)
(0.86, 0.688)	$E(4, 3, 3, 2, 4)$	1641.73	(0.62 - 0.91, 0.76)
(0.84, 0.672)	$E(4, 3, 3, 2, 4)$	1641.73	(0.62 - 0.91, 0.76)
(0.82, 0.656)	$E(4, 3, 3, 2, 4)$	1641.73	(0.62 - 0.91, 0.76)
(0.80, 0.640)	$E(4, 3, 3, 2, 4)$	1641.73	(0.62 - 0.91, 0.76)

* (68 - 90, 77) : 설비의 이용률이 (1.0, 0.8)일 때 시뮬레이션 결과 10개의 기계들 중에서 이용률이 최소인 기계의 것은 0.68 이고, 이용률이 최대인 기계의 것은 0.90이고, 운반기의 이용률은 0.77 임을 나타낸다.

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 사용할 것인가는 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. 모형은 작업의 가공경로와 경제적 설계면을 고려하여 시스템을 나타낸 것으로 여러 가지 변수 요인들을 동시에 반영하였다. 수리적모형으로 설비의 수와 작업의 이동경로인 해를 구하고, 시뮬레이션을 수행하여 실질 생산소요시간과 작업장의 기계와 운반기의 평균이용률을 구하여 비교하였다. 본 결과는 제조시스템을 설계 또는 운용할 때 효과적으로 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 장 석화, 유연 제조시스템에서 작업경로 선택과 경제적 설계에 관한 연구, 공업경영학회지, 제 20권 44집, 249-263, 1997
- [2] Apple, J. M., 1972, *Material Handling Systems Design*, Wiley, New York
- [3] Cesarone, J. and Eman, K. F., 1989, "Mobile robot routing with dynamic programming," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.8, 2357-266
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Egbelu, P.J., 1993, "Economic design of unit load-based FMSs employing AGVs for transport," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 31, 2753-2775
- [10] 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
- [11] 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
- [12] Kaspi, M. and Tanchoco, J.M.A., 1990, "Optimal flow path design for unidirectional AGV systems," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.28, 1023-1030

- [13] Kusiak, A., 1990, *Intelligent Manufacturing Systems*, Prentice-Hall, Inc, New Jersey
- [14] Kusiak, A., 1985, "Loading models in flexible manufacturing systems," *Flexible Manufacturing A. Raouf and S.I.Ahmad (eds)(New York: Elsevier)*
- [15] 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
- [16] 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
- [17] Leung, L. C. and Tanchoco, J.M.A., 1987, "Multiple machine replacement within an integrated framework," *The Engineering Economist*, Vol.32, 89-114
- [18] Maxwell, W.L. and Muckstadt, J.A., 1982, "Design of automatic guided vehicle systems," *IIE Transactions*, Vol.14, 114-124
- [19] 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
- [20] 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
- [21] Pegden, C. D., Shannon, R. E. and Sadowski, R. P., 1995, *Introduction to Simulation Using SIMAN*, McGraw-Hill, Inc.
- [22] 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
- [23] Stecke, K. E., 1983, "Formulation and solution of nonlinear integer production planning for flexible manufacturing systems," *Management Science*, Vol. 29, 273-288
- [24] Tanchoco, J.M.A., 1994, *Material Flow Systems in Manufacturing*, Chapman & Hill, London