

유전 알고리즘에 의한 유연 공정계획 모델

문치웅* · 김장형*

Flexible Process Planning Model by Genetic Algorithm

Chi-Ung Moon* and Jang-Hyung Kim*

ABSTRACT

Process planning is the task of generating a plan for transforming raw material to finished part according to CAD informations and manufacturing practice. The task of process planning includes the determination of the sequence of a part, machines, and tools. In this paper, we proposed a flexible process planning model for the process sequence and machines selection on process planning problems. Process sequencing should consider a set of constraints imposed by the design information and manufacturing practice. Determination of an optimal machining process sequencing for complex parts results in the need to consider a large solution space. This paper presents an improved method for process sequences and machines selection that permits the efficient application of genetic algorithms. To apply the genetic algorithm to the process sequencing and machines selection problem, the representation, selection, and genetic operators are studied, and then modified genetic algorithm for optimal machining process sequencing and machine tools selection is proposed.

Key words : Genetic Algorithm, Process planning, Process sequence, Machine selection

1. 서론

생산 시스템에서의 공정계획(process planning)은 부품가공을 위한 공작기계와 고정구의 선정, 공정선정, 공정순서결정(sequencing), 그리고 작업순서결정등의 문제해결을 위한 복잡하고 동적인 계획활동이다^(1,4). 다양한 부품조합(product mix)의 최적생산은 공정 유연성(process

flexibility)의 최대화를 통해 운용상의 효율을 높일 수 있다. 이러한 공정 유연성의 최대화를 위해서는 하나의 부품에 일정한 기계와 가공순서를 고정시키는 정적이고 선형적인(static and linear) 방법으로는 다양한 부품 조합의 생산에 비적합하다. 자동화되고 유연한 생산 방식을 갖는 제조 시스템의 운용 유연성을 위해서는 부품 가공 방법도 유연하게 설계되어야 하겠다. 하나의 부품(part) 또는 부품군(part family)의 가공을 위한 공정계획은 여러개 있을 수 있으며, 이

* 제주대학교 정보공학과
Dep. of Information Eng., Cheju Nat'l Univ.

대안적인 공정들중 하나의 공정계획을 선정해야 한다. 이렇게 선정된 공정계획은 생산셀 설계(manufacturing cell design), 셀배치 계획(cell layout planning) 그리고 일정계획(scheduling) 등의 문제 해결을 보다 단순화 한다. 생산셀의 설계와 배치에서 공정계획 문제는 셀간이동량의 발생과 직접적인 연관성을 가지며, 가공시간과 비용에 중대한 영향을 미치는 요인으로 작용한다⁶⁾. 본 논문은 다양한 부품조합, 생산량, 기계 그리고 공정시간에 대해 여러 공정들중 전체 부품에 대한 공정 유사성이 큰 공정계획을 선정하므로써 공구나 고정구의 중복투입과 장.탈착의 최소화, 공정중 재고의 감소, 그리고 셀간이동의 최소화를 위한 방법의 제시에 있다.

개별 부품에 대한 최적 공정계획이 전체부품에 대한 최적화를 보장하는 것은 아니다. 왜냐하면, 가공 기계의 이용에 있어서 특수한 몇대의 기계에만 편중된다면 작업부하량(work load) 불균등 문제의 발생과 병목현상의 발생으로 전체 가공시간이 더 많이 걸릴 수 있다. 그러므로 부품조합의 최적가공을 위해서는 대안적인 기계, 공정시간, 기계의 능력 그리고 생산량등을 고려해 각 부품에 대해서는 최적이 아닐지라도 전체 부품의 작업량이 각 기계에 균등한 부하량을 갖게 하고 발생비용의 최소화를 위한 공정계획이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 문제의 해결 접근을 위해 유전 알고리즘(genetic algorithm:GA)에 기초한 모델을 제시한다. GA는 Holland³⁾에 의해 연구되기 시작하여 여러 분야에서 활발히 연구되어 왔으며, 복잡한 탐색 공간안에서 전체 최적화(global optimization)를 위한 탐색방법으로 매우 효과적이고 유연하게 적용되고 있다¹⁰⁾. 생산 시스템 분야에서도 최근 일정계획(scheduling)⁵⁾, GT¹⁰⁾, 그리고 공정계획¹¹⁾문제등에 응용되고 있다. GA는 생태계의 자연선택(natural selection)과 적자생존(survival of the fittest)의 원리에 근거를 두고 있으며, 새로운 집단(new population)을 형성할 때에 이전 집단(old population)에서 높은 목적함수값을 가지는 개체(string)가 하나 또는 그 이상의 후손

(offspring)을 만드는 데에 더 높은 확률을 가진다는 것이 그 기본적인 원리이다. 또한 탐색공간에서 동시에 여러개의 가능해들을 탐색해 나가며 환경에 적합한 해들을 계속적으로 선택하므로써 전체 최적점(global optimal point)을 찾아 나간다²⁾. 본 논문에서의 공정계획 문제는 부품의 생산량, 각 기계에서의 가공시간, 기계 가용능력, 그리고 이동시간등을 고려해 전체 부품 조합을 효율적으로 가공하기 위한 기계와 가공 공정 선정, 공정순서결정, 기계부하량 결정등의 공정계획 문제 해결을 위한 모델의 제시에 있다. 공정계획과 관련한 연구로 Kusiak과 Finke⁷⁾는 Hamming distance를 이용해 비용과 투입 장비의 최소화를 통한 공정선정모델을 제안하였다. 또한, Kumar⁷⁾와 Zhang¹²⁾는 전체 공정시간(total processing time)과 전체 작업공정수(number of total processing step)의 최소화를 위한 모델을 제안 하였다. 그러나 위의 두 연구에서는 공정순서(operation sequence)의 문제는 고려되지 않았다. Seo⁹⁾는 기계선정과 공정순서 결정을 위한 Tabu Search에 의한 모델을 제안 하였다. 그러나 seo의 모델은 수리계획 모델에 기초해 문제를 해결하므로 복잡한 외판원 문제(TSP)를 풀어야 하므로 모델이 복잡하고 탐색 효율도 떨어지는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하며 보다 쉽게 적용가능하고 탐색효율이 뛰어난 GA 모델을 제안한다.

II. 공정계획 문제 기술

자동화된 시스템의 공정계획은 CAD로 부터 입력되는 설계정보와 생산현장에서 동적으로 변하는 생산정보를 적시에 반영해 부품조합을 효율적으로 가공할 수 있는 유연 공정계획(flexible process planning)이 필요하다⁴⁾. 본 논문에서는 생산 시스템의 공정 유연성을 높이기 위한 방안으로 부품조합과 생산량의 다양한 변화에 대응하여 기계와 가공공정을 선정하고 공정순서와 부품 투입 순서 결정을 위한 모델을 제시한다. 공정 유연성이란 여러 공정들을 수용하며 하나

의 제조공정으로 부터 다른 제조공정으로 변환하는 능력으로 정의된다⁽⁸⁾. 각 부품의 가공을 위한 공정 집합, 각 공정을 임의의 기계에서 가공할 때의 공정시간, 기계간 운송시간, 생산량, 그리고 기계 가용능력은 주어진 것으로 가정한다. 이러한 요인의 고려를 통해 총 공정시간을 최소로 하는 공정계획을 결정하는데 목적이 있다. 여기서 총 공정시간이란 부품의 공정가공을 위해 공정 j, l간 이동시간의 합과 각 부품의 생산량 * 공정시간의 합에 대한 총합(total sum)으로 구해진다. Fig. 1에 본 논문의 공정계획 문제를 기술하였다.

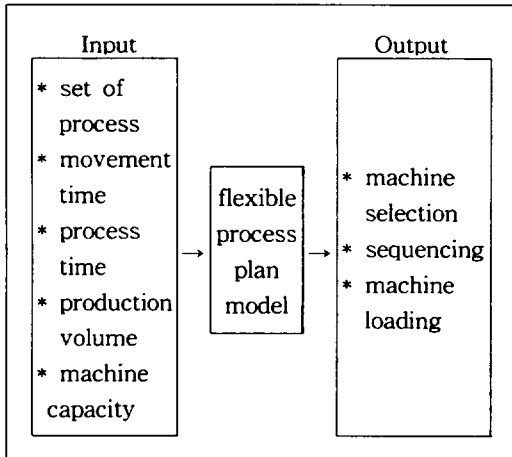


Fig. 1 Flexible process plan problem

하나의 부품은 몇 개의 공정작업을 가진다. 이러한 공정작업을 위해 적절한 형태의 기계가 할당되어진다. 이때 임의의 공정작업을 위해 필요한 기계들에 대한 공정시간은 서로 다를 것이다. 또, 한 공정에서 다른 공정으로 이동이 발생할 때 이에 따른 이동시간이 발생한다. 그러므로 전체 부품에 대한 총시간(T)은 공정시간과 이동시간의 합으로 나타내진다. 이를 다음의 기호를 이용해 수식으로 나타내면, 식 (1)과 같다.

- TP : 가공 부품수,
- PN_i : 부품 i의 공정수,
- PN_{ijk} : i번 부품의 j번 공정에 할당된 기계

번호가 k일때의 공정시간,

IT_{ijk} : 부품 i의 공정작업 순위에서 j번 기계에서 l번 기계로의 이동시간,

TIT_{ijk} : 모든 부품의 공정작업을 위해 필요한 기계간 이동시간의 합

$$(\sum_{i=1}^m IT_{ii}),$$

CM_k : 기계 k의 가용시간,

TM_k : 모든 부품에 대해 k번 기계가 사용된 시간

일 때,

$$T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{m_i} PN_{ijk} + TIC_{ij} \quad (1)$$

로 나타낸다. 식 (1)은 본 논문에서 제시되는 모델의 평가함수로서 모델 실행의 전 과정을 평가하는 척도로서 사용될 것이다.

전체부품에 대한 최적 공정계획을 위해서는 가공 기계의 이용에 있어서도 균등한 작업부하가 이루어 지도록 하여야 한다. 특수한 몇대의 기계에만 작업공정이 편중된다면 작업부하량(work load) 불균등 문제의 발생과 병목현상의 발생으로 전체 가공시간이 더 많이 걸릴 수 있다. 이러한 작업부하 불균등 문제의 해결을 위해 $TM_k \leq CM_k$ 라는 조건을 부여한다. 이 조건은 어느 특정 기계에 과부하가 걸리는 것을 막아준다. 부품조합의 최적가공을 위해서는 대안적인 기계, 공정시간, 기계의 능력 그리고 생산량등을 고려해 각 부품에 대해서는 최적이 아닐지라도 전체 부품의 작업량이 각 기계에 균등한 부하량을 갖게 하고 소요시간의 최소화를 위한 공정계획이 필요하다.

III. 유전 알고리즘에 의한 공정계획 모델

공정계획 문제에 유전 알고리즘을 적용하기 위해서는 먼저 문제에 대한 특성을 분석하고, 그에 적합한 표현 방법, 초기화 방법, 평가방법, 연산자 결정 및 유전 파라미터 결정이 이루어져야 한다.

3.1 표현

유전 알고리즘의 string의 표현은 일반적으로 2진 string으로 표현하고 있다. 그러나 공정계획 문제와 같이 순서를 포함하는 경우는 하나의 string에서 반복되는 공정순서가 발생하지 않도록 해야하므로 2진 string 표현은 적합치가 못하다⁽¹⁾. 본 논문에서의 공정계획 문제는 각 부품의 공정가공을 위한 기계선정과 공정순서를 결정하므로 각 부품에 대해 공정 수 만큼의 10진 값을 기억할 string을 할당한다. 이러한 string 각각의 요소 값은 해당 공정을 가공할 대상 기계번호가 들어있게 된다. Fig. 2는 부품 1, 2, 3에 대해, 부품 1은 3개의 공정작업을, 부품2는 5개, 그리고 부품 3은 4개의 공정작업을 갖는 경우의 작업 기계선정과 공정순위 결정을 위한 string의 예를 나타낸 것이다. 여기서, P_{ij} 는 i 번 부품의 j 번 공정을 나타낸다.

	Part 1			Part 2			Part 3					
P_{ij}	4	2	1	3	1	5	1	3	4	2	5	2
공정순위	3	1	2	1	4	2	3	5	2	3	1	4

Fig. 2 String for machines selection and sequencing

3.2 초기화

초기 모집단은 Fig. 2에서 보여지는 것과 같이 각 부품의 P_{ij} 와 공정순위를 임의로 발생시킬 string 가지고 출발한다. 초기 모집단 string들은 가능한 넓게 해공간을 탐색할 수 있도록 생성되어야 한다. 이러한 초기 모집단을 만드는 방법에는 무작위로 발생시키는 방법과 임의의 가능집단을 사용하는 방법이 있는데 본 논문에서는 무작위법을 사용한다.

3.3 평가함수

세대가 반복되는 동안 string들은 어떤 기준에 의해 평가되어야 한다. 각 string에 대한 평가는 그 string의 상대적 우열정도를 나타내므로 다음세대의 string생성을 위한 정보를 갖고

있다. 본 논문에서의 평가척도로서의 함수는 앞에서 유도된 식(1)에 의해 string집단의 평가 척도를 구한다.

3.4 유전 연산자

공정계획은 순서결정 문제를 포함하므로 기존의 연산 방법으로는 문제 해결이 비효율적이다. 예를 들어, 부모 string을 P라하고, 자손 string을 O라하면, 임의의 한 부품에 대한 공정순서 string이 다음과 같을 때,

$$P1 = (1 \ 2 \ 3 \ | \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ | \ 8 \ 9)$$

$$P2 = (4 \ 5 \ 2 \ | \ 1 \ 8 \ 7 \ 6 \ | \ 9 \ 3)$$

이에 대한 교차변이(crossover)연산이 세 번째 substring에서 이루어진다면 그 결과는,

$$O1 = (1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 9 \ 3)$$

$$O2 = (4 \ 5 \ 2 \ 1 \ 8 \ 7 \ 6 \ 8 \ 9)$$

과 같이 되어 공정순서 string에서 중복되는 공정이 발생한다. 이와 같이 중복되는 공정순서의 발생을 억제하기 위해 교차변이 연산자는 수정되어야 한다. 순서결정 문제에서는 부모가 지닌 정보를 이용하여 자손을 생성하는 이원연산자(binary operator)와 돌연변이(mutation)연산자 대신 하나의 부모가 지닌 정보만을 이용하여 하나의 자손을 생산하는 일원연산자(unary operator)가 적합하다. 이를 위해 다음과 같은 순서교차변이⁽²⁾ 연산 방법을 응용한다.

- (1) 위의 부모 string P1, P2에서와 같이 교차점(cut point)을 난수를 발생시켜 두 곳을 결정한다.

$$O1 = (* * * \ | \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ | \ * *)$$

$$O2 = (* * * \ | \ 1 \ 8 \ 7 \ 6 \ | \ * *)$$

- (2) 결정된 교차점 사이에 있는 공정순서들만 그대로 복사한다.

$$9-3-4-5-2-1-8-7-6$$

- (3) 임의의 한 부모 string에서 두 번째 교차점 이후의 순서부터 loop를 형성한다.

사이에 존재하는 수치값들과 일치하는 P2의 값들을 제거한 후 P1의 값들을 대치시킨다.

먼저 4, 5, 6, 7을 제거하면, 9-3-2-1-8 이고, 여기에 4, 5, 6, 7을 대치시키면, 9-3-2-1-8-4-5-6-7이 된다.

- (5) (4)의 결과를 두 번째 교차점을 시작으로 재배치한다.

그러므로, O1 = (2 1 8 4 5 6 7 9 3)

- (6) 같은 방법으로 나머지 string에 대해서도 (1) ~ (5)를 반복한다.

O2 = (3 4 5 1 8 7 6 9 2)

공정계획에서 돌연변이(mutation) 연산은 발생된 공정순서에 무작위성을 부여하기 위하여 string의 임의의 한 공정순서 요소를 아주 작은 확률을 적용해 random하게 바꾸어주는 역할을 한다. 그러나 순서문제의 경우 기존의 돌연변이 연산을 사용할 수가 없다. 왜냐하면, 교차변이에서와 같은 중복되는 공정순서 요소가 만들어질 수 있기 때문이다. 그러므로 이원연산자로서의 돌연변이보다는 일원연산자를 이용한 돌연변이 연산 대신할 수 있다. 이를 위해 자료구조(data structure)의 string 연산자중의 하나인 삽입

번째 값이고 삽입위치가 6번째라면, O1 = (1 2 4 5 3 6 7 9)라는 string이 만들어진다.

3.5 생존(selection)

본 논문에서는 이전집단에서 최고의 적합도를 갖는 하나의 string을 의무적으로 다음 세대의 자손집단에서 선택되도록 하고 이전집단의 개체와 다음 세대의 자손집단에서 선택된 string 전부를 정렬(sorting)하여 높은 적합도를 가지는 순으로 세대를 선택하여 새로운 string을 만드는 방법을 사용하였다.

IV. 적용예

본 논문에서 제시된 모델의 실행과정을 Seo⁽⁹⁾의 데이터를 이용해 보이도록 하겠다. 세 개의 부품 P₁, P₂, P₃에 대한 공정, 기계, 기계가용능력, 부품의 생산량 그리고 공정시간(PC_{ijk}) 정보가 Table 1에 주어져 있고, Table 2에 기계간 이동시간을 나타내었다. 부품 1은 3개, 부품 2는 5개, 부품 3은 4개의 작업공정을 갖으며, 생산량은 각각 40, 70, 60이다. 그리고 각각의 공정에 대해 5 개의 대안적인 기계가 있다. 각 기계의 가용능력(CM_k)은 일정하게 800으로 정하고 실

Table 1 processing information

	P ₁			P ₂					P ₃				CM _k
	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₂₁	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₂₅	P ₃₁	P ₃₂	P ₃₃	P ₃₄	
1	7	7	10	100	3	8	12	4	100	10	6	15	800
2	4	3	6	9	5	7	5	3	14	9	5	100	800
3	12	9	5	4	6	12	100	9	5	100	9	7	800
4	5	6	2	10	100	8	6	6	2	10	4	8	800
5	4	100	8	12	6	6	10	14	8	7	12	6	800
V _i	40			70					60				

(insert) 연산자를 응용하고자 한다. 삽입연산이란 string의 임의의 한 위치에 인자를 삽입해 또다른 string을 만들어 내는 연산이다. 삽입이 발생할 확률을 아주 작게 부여하고 이를 돌연변이 연산자처럼 사용하겠다. 만약, 부모 string P1 = (1 2 3 4 5 6 7 9)일 때, 삽입요소가 세

Table 2 Movement time

	1	2	3	4	5
1	31	7	27	26	17
2	19	19	15	19	10
3	5	17	37	36	27
4	8	20	4	39	30
5	18	18	14	5	28

행 하겠다.

이러한 데이터를 이용해 돌연변이율을 0.02, 교차변이율을 0.6, 발생 모집단의 크기를 40, 발생횟수를 1000으로 하고 본 논문에서 제시된 알고리즘을 실행한다. Fig. 3에서 보여지듯이 세대수가 증가할수록 평가함수값은 점점 줄어들음을 알 수 있다. 최적해의 결과와 Seo⁽⁹⁾의 연구 결과를 Table 3에 같이 나타내었다. Table 3의 GA 알고리즘에 의한 해의 발생에서 기계1의 부하량은 780, 기계 2는 490, 기계 3은 630, 기계 4는 480, 그리고 기계 5는 630으로 모두 가용능력 800보다 작다는 조건을 만족한다. Table 3의 결과에서 알 수 있듯이 GA모델에 의한 총소요시간은 3310인데 반해 Seo의 결과의 소요시간은 3702로, 본 논문의 모델이 좋은 결과를 발생함을 알 수 있다.

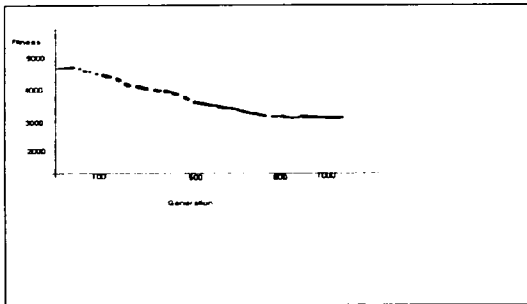


Fig. 3 Value of fitness function

기계가 선택될 수 있도록 모델을 수정하면 Kusiak⁽⁷⁾, Zhang⁽¹²⁾의 연구에서 정의된 공정선택(process selection) 문제가 된다. 이들의 연구결과와 GA 모델에 의한 결과를 Zhang⁽¹²⁾의 연구의 예제를 통해 비교하면 Table 4와 같이 정리되며, 이 결과에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제시된 GA 모델은 기존 연구와 같은 결과를 발생시키고 있다. 그러나 기존의 방법들이 어느 하나의 문제에 대해서만 해를 구하도록 설계된 데 반해 GA 모델은 일부분을 수정하면 쉽게 유사한 다른 문제에 적용할 수 있고 보다 나은 해를 구할 수 있는 특징이 있다.

Table 4 Compare GA model with conventional research

researcher	process plan selection
Kusiak	3, 4, 6
Zhang	3, 4, 6
GA model	3, 4, 6

V. 결 론

동적이고 복잡한 공정계획 문제의 효율적인 해결을 위한 접근방법으로 GA에 기초한 공정계획 모델을 제시하였다. 생산시스템의 공정계획은 부품가공을 위한 공작기계와 고정구의 선정, 공정선택, 공정순서결정, 그리고 작업순서 결정

Table 3 Compare GA model with Seo

GA		machine selection	operation sequencing	process time	movement time	total time	
	P1	2, 2, 4	$P_{11} - P_{12} - P_{13}$	398	38		3310
P2	3, 1, 5, 4, 2	$P_{24} - P_{23} - P_{21} - P_{22} - P_{25}$	1566	26			
P3	4, 5, 1, 3	$P_{31} - P_{32} - P_{33} - P_{34}$	1346	26			
Seo		machine selection	operation sequencing	process time + movement time		total time	
	part1	2, 5, 4	$P_{12} - P_{11} - P_{13}$	420			3702
	part2	1, 2, 3, 1, 2	$P_{23} - P_{24} - P_{21} - P_{22} - P_{25}$	1848			
part3	4, 5, 4, 3	$P_{31} - P_{32} - P_{33} - P_{34}$	1343				

또, 본 논문의 모델에서 순서결정 부분을 제외하고 각 부품에 대한 공정작업을 위해 여러

등의 문제를 포함하며, 다양한 부품조합의 최적 생산은 공정 유연성의 최대화를 통해 운용상의

효율을 높일 수 있다. 본 논문에서 제시된 모델은 기존의 정적이고 선형적인 방법으로 해결이 어려웠던 공정 유연성을 최대화하고 동적이고 복잡한 환경에 쉽게 적용가능하도록 GA에 기초해 설계되었다. GA모델은 부품의 생산량, 각 기계에서의 가공시간, 기계 가용능력, 그리고 이동시간등을 고려해 전체 부품조합을 효율적으로 가공하기 위한 기계와 가공공정 선정, 공정순서 결정등의 문제를 해결한다. 전체적인 모델의 개발을 위해 기존의 GA를 선택 및 순서문제에 적합하도록 새롭게 수정 하였다. 예제를 통해 제시된 모델의 우수성을 보였다.

그러나 본 논문에서는 각 부품에 대한 가공기계와 공정순위는 결정되었지만 부품의 투입 순서와 기계-부품군 형성 문제에 대한 고려는 없었다. 앞으로 이러한 문제들과의 결합을 통한 통합적인 모델의 설계에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Awadh, B., Sepehri, N., and Hawaleshka, O., "A Computer-Aided Process Planning Model Based on Genetic Algorithm", *Computer and OR*, Vol. 22, No. 8, PP. 841-856, 1995.
2. Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
3. Holland, J. H., Holyoak, K. J., Nisbett, R. E. & Thagard, P. R., *Genetic Algorithm and Simulated Annealing*, L. Davis Press, 1987.
4. Hutchinson, G, K. and Pflughoeft, K. A., "Flexible Process Plans : there value in flexible automation systems", *IJPR*, Vol. 32, No. 3, PP. 707-719, 1994.
5. Jagabandhu Sridhar and Chandrasekharan Rajendran, "A Genetic Algorithm for Family and Job Scheduling in a Flowline-based Manufacturing cell", *Proceeding of 16th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, PP. 337-340, 1994.
6. Kumar Bhaskaran, "Process Plan Selection", *IJPR*, Vol. 28, No. 8, PP 1527-1539, 1990.
7. Kusiak, A. and Finke, G., "Selection of Process in Automated Manufacturing Systems", *IEEE journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, PP. 397-402, 1988.
8. Nagen Nagarur, "Some Performance Measure of FMS", *IJPR*, Vol. 30, No. 4, PP. 799-809, 1992.
9. Seo, Y. H., "Model Development for Machining Process Sequencing and Machine Tool Selection", *Journal of the KIIE*, Vol. 21, No. 3, pp. 329-343, 1995.
10. Yash P. G., Mahesh, C. G. and Anup, K. "Minimizing Total Intercell and Intracell Moves in Cellular Manufacturing : A GA approach", *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 8, No. 2, PP. 92-101, 1995.
11. Zbigniew Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, PP 212-237, 1992.
12. Zhang, H.C, and Huang, S.H. "A Fuzzy Approach to Process Plan Selection", *IJPR*, Vol. 32, No. 6, PP. 1265-1279, 1994.