

# 외주를 고려한 가공경로 선정에서의 유전알고리즘 접근

이규용\* · 문치웅\*\* · 김재균\*\*\*

## Machining Route Selection with Subcontracting Using Genetic Algorithm

Kyu-Yong Lee\* · Chi-Ung Moon\*\* · Jae-Gyun Kim\*\*\*

### ■ Abstract ■

This paper addresses a problem of machining route selection in multi-stage process with machine group. The problem is considered the subcontracting and the production in-house such as regular and overtime work. The proposed model is formulated as a 0-1 integer programming constraining the available time of each machine for planning period and total overtimes. The objective of the model is to minimize the sum of processing cost, overtime cost, and subcontracting cost. To solve this model, a genetic algorithm(GA) approach is developed. The effectiveness of the proposed GA approach is evaluated through comparisons with the optimal solution obtained from the branch and bound. In results, the same optimal solution is obtained from two methods at small size problem, and the consistent solution is provided by the GA approach at large size problem. The advantage of the GA approach is the flexibility into decision-making process because of providing multiple machining routes.

## 1. 서론

공정계획(process planning)은 설계명세서에 따라 가공에 필요한 자원 및 기술을 결정하는 것으로 도면의 분석, 설계도면에 근거한 공정선택, 가

공순서 결정, 치공구 결정, 절삭조건, 가공시간 분석, 가공장비선정 등을 위한 준비계획이다[14]. 이러한 기능 중 장비선정 문제는 생산에 직접적인 영향을 미치기 때문에 작업장 정보를 효율적으로 고려하여 가공경로를 선정하여야 한다. 또한 수주

\* 울산과학기술대학교 공업경영과  
\*\* 한양대학교 산업공학과  
\*\*\* 울산대학교 산업공학부

생산(make-to-order)에서는 고객의 주문에 따라 부품의 종류, 생산량, 납기 등이 결정되는데, 이들의 요구를 충족하기 위한 생산능력(capacity)이 필요하다.

계획기간(planning period) 동안 사용 가능한 생산능력은 장기계획과 단기계획으로 나누어 볼 수 있는데, 수주생산에서는 과거의 경험이나 장기계획에 따라 일정한 생산능력을 보유하게 된다. 이는 미래에 대한 고객의 수요가 불확실하고, 기업의 입장에서 고가의 장비를 다량 보유하는 것은 경영상의 어려움을 초래할 수 있기 때문에 최대 생산능력을 보유한다는 것이 매우 어려운 실정이다. 또한 단기계획기간 동안 부족한 생산능력을 보충하는 방안으로는 잔업(overtime), 외주(subcontracting) 등을 고려할 수 있다. 이러한 외주전략은 최근 outsourcing 개념으로 확대되어 많은 기업에서 적극적으로 활용되고 있다.

공정 및 생산계획과 관련하여 외주를 고려한 기존 연구를 살펴보면 Kamien과 Li[5]는 외주형태에 대해 단기간(short-term) 전술적인 외주형태인 make-or-subcontract와 장기간(longer-term)에 걸쳐 공급자와의 계약관계인 make-or-buy로 분류하였다. 그들은 외주와 관련된 생산계획 모델을 제시하고, 동적계획법에 의해 문제를 해결하였다. Kogan과 Khmelnitsky[6]은 대규모 제조시스템의 총괄생산계획을 위한 총생산비용을 최소화하는 모델을 제시하면서 외주비용을 고려하였다. Loerch와 Muckstadt[8]는 일정계획을 위해 수요를 만족시키기 위한 방안으로 외주를 고려한 선형계획 모델을 제시하고, Dantzing-Wolf 알고리즘을 응용하여 해를 구하였다. Lee et al.[7]은 부품선정과 부하문제를 다루면서 생산시스템 내에서 처리할 수 없는 부품에 대해 외주비용을 최소화하는 목적 하에 정수계획 모델을 제시하였다. 또한 경제적 제조설을 설계하는 단계에서 병목부품(bottleneck part)과 병목기계(bottleneck machine)를 처리하기 위해 쉘간 자재이동비용, 외주비용, 기계중복비용의 합을 최소화하는 연구가 있다. 이들의 연구는 병목부품이 주어진 경우

에 대한 모델제시[1], 병목부품과 병목기계를 도출하는 단계와 해결하는 단계로 구분한 접근법[13], 기계중복과 외주를 동시에 다루는 모델제시[9] 등이 있다.

총괄생산계획, 일정계획, 제조설 설계 등에서 생산시스템 내에서 처리할 수 없는 부품에 대해 외주를 고려한 연구는 많이 있지만, 공정계획의 가공경로선정 문제에서 외주를 고려한 연구는 거의 없다. 그 이유는 생산계획의 상위단계에서 생산능력을 계획할 때 이미 외주를 고려하는 경우가 대부분이기 때문이다. 그러나 단기계획기간 동안에 처리해야 할 긴급부하나 과부하 등과 같은 이유 때문에 현재의 생산능력으로 처리할 수 없는 부품은 외주를 고려할 수 있다. 특히 가공경로선정 문제에서 외주를 다루는 것은 일정계획에 유연성을 제공할 수 있으며, 재 일정계획(rescheduling)을 최소화하는 효과가 있다. 이와 같은 이유로 인해 개개의 부품에 대한 가공경로를 선정할 때, 자가생산(production in-house)의 가공경로와 외주를 동시에 결정하는 모델이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 다단계(multi-stage) 공정으로 구성된 작업장에서 단기계획기간 동안 정상작업을 위한 장비가용시간, 초과작업을 위한 총 잔업시간, 외주를 고려하여 생산될 개개의 부품에 대한 최적 가공경로를 결정하는 모델을 제시하고자 한다. 이 모델은 자가생산비용과 외주비용의 합을 최소화하는 목적 하에 0-1 정수계획법으로 정식화하고, 유전알고리즘을 이용하여 해를 구하는 방법을 제시하겠다. 제시된 방법에 의해 얻어진 결과는 최적화 방법(branch and bound)과 비교함으로써 유효성을 검증하고, 규모가 큰 문제에 대해서도 관련된 해를 구함을 보이도록 하겠다.

## 2. 문제 정의

유사한 기능의 장비들로 구성된 다단계 공정의 작업장에서 계획기간 동안의 부품 생산을 위하여 각 공정에서는 그 공정작업을 위한 몇 대의 후보

장비(candidate machine)가 있으며, 이 기간 동안 생산될 부품은 이들의 공정에 포함된 하나의 후보 장비를 거쳐 가공된다. 또한 부품과 생산량, 부품의 생산순서가 결정되어 있고, 개개의 부품에 대한 생산량은 하나의 lot 단위로 처리된다. 각 가공단계에 포함된 후보장비의 성능이 서로 다르기 때문에 동일한 부품을 가공할 때, 개개의 후보장비는 서로 다른 가공시간을 갖는다.

이러한 작업환경에서 계획기간 동안 생산될 부품에 대한 가공경로선정 문제의 제약요인으로 생산능력을 들 수 있다. 현재의 생산능력인 각 후보장비의 가용시간은 긴급부하 및 장비보수 등으로 인해 서로 다를 수 있으며, 고객의 주문량이 과다하거나 긴급주문일 경우, 현재 보유하고 있는 생산능력으로 고객의 요구를 충족시킬 수 없다면 근원적인 해결방법은 생산설비를 확장하는 것이다. 그러나 신 설비의 구매와 유지에 대한 고정비 부담이 기업의 경영성과에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 특히 단기계획기간 동안에 설비 확장은 현실적으로 어렵다. 이때 대안으로 잔업과 외주를 고려할 수 있다.

잔업은 정상작업이 종료된 이후에 일정시간 작업을 연장하는 것으로 장비의 가용시간에 포함할 수 있으나 비용측면에서 정상작업과 다르기 때문에 잔업에 대한 비용은 정상작업과 분리하여 처리되어야 한다. 또한 많은 기업들이 부족한 생산능력을 외부에서 조달하는 방안으로 최근 외주를 적극적으로 이용하고 있다. 또 다른 보조 생산능력으로는 납기지연을 고려할 수 있으나, 납기지연에 따른 고객의 불만이나 경제적 손실을 보상하는 방안은 기업 이미지와 경제적 측면에서 바람직하지 않으므로 납기지연은 고려하지 않았다.

본 논문에서는 계획기간 동안 생산될 개개의 부품에 대한 가공경로를 선정할 때, 후보장비의 가용시간, 총 잔업시간, 외주를 고려하여 자가생산에 대한 최적 가공경로와 외주에 대한 정보를 동시에 제공하는 수리모델을 제시하고, 이를 해결하는 방안을 제시하겠다. 이를 통해 일정계획의 간소화와

재 일정계획의 최소화 효과를 얻을 수 있다.

### 3. 모델정식화

계획기간 동안 생산될 부품에 대한 작업은 정상작업과 잔업에 의한 자가생산과 외주생산으로 이루어지며, 자가생산 능력을 초과하거나 자가생산 비용이 외주비용보다 큰 부품은 공정단위로 외주 생산으로 처리한다. 가공공정은 선삭, 밀링, 드릴링, 연삭 등 기능적으로 구성되며, 공정별 외주처리가 가능한 것으로 가정한다.

가공경로선정 문제에 있어 현재 생산시스템에서 생산할 수 없는 부품을 포함하는 전체 부품에 대해 자가생산에 대한 최적 가공경로와 외주정보를 동시에 제공하는 수리모델을 제시하고자 한다.

모델의 제시를 위한 기본적으로 필요한 정보는 다음과 같다.

- (1) 잔업과 외주는 공정단위로 이루어진다.
- (2) 계획기간 동안 잔업시간은 알려져 있다.

또한 가공경로선정 문제를 정식화하기 위해 사용되는 기호는 다음과 같이 정의한다.

#### [기호정리]

- $i$  : 부품 인덱스  $i \in I$
- $j$  : 가공단계(stage) 인덱스(가공공정)  $j \in J_i$
- $k$  : 가공단계  $j$ 에 속한 후보장비 인덱스  $k \in K_j$
- $v_i$  : 부품  $i$ 의 생산량(lot)
- $P_{ijk}$  : 부품  $i$ 가 가공단계  $j$ 에 속한 후보장비  $k$ 에서의 가공시간(process time)
- $S_{ij}$  : 부품  $i$ 에 대한 가공단계  $j$ 의 작업을 외주 처리할 때, 소요시간
- $xc_{ij}$  : 부품  $i$ 에 대한 가공단계  $j$ 의 작업을 정상작업으로 처리할 때, 시간당 정상비용
- $oc_{ij}$  : 부품  $i$ 에 대한 가공단계  $j$ 의 작업을 잔업으로 처리할 때, 시간당 잔업비용
- $yc_{ij}$  : 부품  $i$ 에 대한 가공단계  $j$ 의 작업을 외주 처

리할 때, 시간당 외주비용

$OT$  : 계획기간 동안 총 잔업(overtime) 가능시간

$amt_{jk}$  : 계획기간 동안 가공단계  $j$ 에 속한 후보장비  $k$ 의 가용시간

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{부품 } i \text{가 가공단계 } j \text{의 후보장비} \\ & k \text{에서 가공된다.} \\ 0, & \text{그외} \end{cases}$$

$$O_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{부품 } i \text{가 가공단계 } j \text{의 후보장비 } k \text{를} \\ & \text{이용하여 잔업이 이루어진다.} \\ 0, & \text{그외} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{부품 } i \text{의 가공단계 } j \text{작업이외주에} \\ & \text{의해 처리된다.} \\ 0, & \text{그외} \end{cases}$$

자가생산과 외주를 고려한 가공경로선정 문제의 목적은 계획기간 동안 장비가용시간, 총 잔업시간 등에 대한 제약을 만족하는 자가생산비용과 외주비용을 최소화하는 최적 가공경로 선정에 있다. 목적함수는 자가생산비용과 외주비용의 합을 최소화하도록 설정하고, 수리모델은 다음과 같이 0-1 정수계획법으로 정식화된다.

#### [수리모델]

$$\text{Min } F = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} v_i p_{ijk} xc_{ij} X_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} v_i p_{ijk} oc_{ij} O_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} v_i s_{ij} yc_{ij} Y_{ij}$$

st.

$$\sum_{k \in K_j} (X_{ijk} + O_{ijk}) + Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (1)$$

$$\sum_{i=1} v_i p_{ijk} X_{ijk} \leq amt_{jk} \quad \forall j \in J_i, k \in K_j \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} v_i p_{ijk} O_{ijk} \leq OT \quad (3)$$

$$X_{ijk}, O_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J_i, k \in K_j \quad (4)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (5)$$

위의 제약식을 간략하게 설명하면 식 (1)은 개개의 부품  $i$ 를 가공하기 위해 가공단계  $j$ 에서 정상작업, 잔업, 외주 중에서 오직 하나만 선택되는 조건이다. 식 (2)는 정상작업이 각 가공단계에 포함된

개개의 후보장비의 가용시간 범위 내에서 가공되어야 하는 제약이며, 식 (3)은 잔업에 소요되는 시간이 총 잔업시간을 초과할 수 없다는 조건이다. 식 (4)와 식 (5)는 0, 1의 값을 갖는 정수형 변수이다.

## 4. 유전알고리즘 접근

유전알고리즘은 복잡한 목적함수와 다양한 제약식을 갖는 조합최적화(combinatorial optimization) 문제의 최적해 혹은 차선해를 탐색하는데 탁월한 기능을 가지고 있다[4]. 또한 실제현장 문제를 해결하기 위해 최적화 방법으로는 많은 어려움이 있기 때문에 본 논문에서는 유전알고리즘을 이용하여 최적해 또는 차선해를 제공하고자 한다. 가공경로선정 문제에서 유전알고리즘을 이용하는 또 하나의 이유는 계획기간 동안 생산될 대상 부품의 전체 가공비용이 어떤 최소값을 가질 때, 이 최소값에 대응되는 다양한 가공경로가 존재한다면 이들의 정보를 사용자에게 제공하고자 하는 것이다. 유전알고리즘은 모집단으로부터 해를 탐색하기 때문에 서로 다른 염색체(chromosome)가 동일한 적응도 값(fitness value)을 가질 수 있다. 유전알고리즘의 적용과정은 해의 표현(representation), 초기화(initialization), 평가(evaluation), 교차변이(crossover), 돌연변이(mutation), 선택(selection) 등이 있다[3].

### 4.1 해의 표현과 초기화

유전알고리즘에서 문제의 가능해 집단을 모집단이라고 할 때, 이 모집단을 구성하는 요소들이 염색체이다. 해의 표현은 문제의 특성에 따라 염색체를 구성하는 인자(gene)를 표현하는 방법이며, 유전알고리즘의 다른 절차에 많은 영향을 미치기 때문에 문제의 특성을 잘 반영할 수 있어야 한다.

본 문제의 특성은 다단계 공정을 갖는 작업장에서 개개의 부품은 각 가공단계에 포함된 하나의 후보장비를 경유하여 가공이 완료된다. 또한 각 공

정은 정상작업, 잔업, 외주 중에서 하나를 선택해야 한다. 정상작업은 각각의 후보장비의 가용시간에 제약을 받으며, 잔업은 총 잔업시간에 영향을 받는다.

해의 표현방법으로 이진수 encoding을 많이 사용하고 있으나 실제 문제의 해를 이진수로 표현하는 것이 거의 불가능하기 때문에 real number를 사용하여 해를 표현하고자 한다. 개개의 부품은 가공단계  $J$ 를 거쳐 가공 완료되므로 부품별로 인자를 그룹화 한다. 하나의 그룹은 개개의 부품이 경유하는 가공단계로 구성되고, 각 가공단계는  $K_j$ 개 후보장비로 구성되어 있다. 정상작업과 잔업은 각 가공단계에 포함된 후보장비 중에서 하나를 선택함으로써 가공경로가 선정되고, 그렇지 않으면 외주를 선택하게 된다. 부품별 그룹의 인자 길이(gene length)는 그 부품의 가공단계의 길이와 동일하며, 각 가공단계에서 선택할 수 있는 인자의 범위는 정상작업에 참여하는 후보장비, 잔업에 참여하는 후보장비, 외주를 포함한다. 따라서 염색체 구조는 부품, 가공단계, 각 가공단계에서 선택되는 생산능력 및 장비에 대한 정보를 담고있다. 모집단의  $s$ 번째 염색체를  $C_s$ 라할 때, 염색체 구조는 다음과 같다.

$$C_s = ((2, 3, 5), (5, 1, 3, 4), \dots, (3, 2, 3))$$

예를 들어 현재 생산시스템의 가공단계 1에 포함된 후보장비가 2대라고 할 때, 가공단계 1에서 부품 1을 처리하기 위한 인자선택의 범위는 [1-5]이다. 즉 1과 2는 정상작업에 참여하는 후보장비, 3과 4는 잔업에 참여하는 후보장비, 나머지 5는 외주를 의미한다. 염색체의 첫 번째 그룹에 속한 인자 2의 의미는 가공단계 1에서 정상작업에 의해 후보장비 2에서 부품 1이 가공됨을 나타낸다. 이러한 해를 해석하는 방법(decoding)은 프로그램으로 처리한다.

유전알고리즘에서 다음 단계는 모집단 크기(population size)만큼 염색체를 생성하는 것이 초기화이다. 초기 모집단을 만드는 방법으로는 발견적 방

법이나 임의생성법이 있을 수 있다. 본 문제를 해결하기 위한 초기 모집단은 랜덤하게 난수를 발생하여 구성하고, 이때 수리모델의 제약을 위배하지 않는 염색체를 선택함으로써 실행 가능한 해의 모집단을 구성하겠다.

## 4.2 적응도 평가

유전알고리즘에서는 세대를 반복하면서 얻어진 염색체에 대해 어떤 평가척도에 의해 적응도를 평가한다. 적응도 평가는 염색체의 생존 여부를 결정하는 기준이 되며, 적응도 평가 값이 어떤 값에 수렴하면 최적해 혹은 차선해라고 부른다. 본 문제에서의 적응도 평가는 수리모델의 목적함수를 이용하고, 목적함수는 계획기간 동안 생산될 전체 부품에 대해 자가생산비용과 외주비용의 합을 최소화하는 것이다. 염색체  $C_s$ 에 대한 적응도 함수(fitness function)는 식 (7)과 같다.

$$fitness\_fun(C_s) = F(C_s), s = 1, 2, \dots, pop\_size \quad (7)$$

개개의 염색체에 대한 적응도 평가는 식 (7)에 의해 평가되지만 수리모델의 제약 때문에 실행 불가능한 염색체가 될 수 있다. 그 이유를 살펴보면 정상 작업에 의한 가공경로는 계획기간 동안 장비의 가용시간을 초과할 수 없으며, 잔업은 총 잔업시간에 제약을 받는다. 이러한 제약조건 때문에 생성된 모든 염색체가 실행 가능한 것은 아니다. 제약조건을 다루는 방법(handling constraints)으로는 rejecting, repairing, modifying genetic operator, penalizing 등이 있다[3,10]. 본 논문에서는 repairing 방법에 기초한 새로운 절차에 의해 실행 가능한 염색체를 생성하겠다. 이 방법은 유전연산자인 교차변이(crossover)와 돌연변이(mutation) 과정에서도 사용되며, 제시된 repairing 절차는 다음과 같다.

### [Repairing Procedure]

단계 1 : 먼저 특정 가공단계에 속한 후보장비  $k$ 의 가용시간에 대한 제약을 검색한다. 이 경

우는 특정 가공단계에 속한 후보장비  $k$ 에 여러 개의 부품이 할당된 경우인데, 후보 장비  $k$ 에 할당된 부품 중에서 임의의 부품 하나를 선택하고 이 부품에 대해 그 가공단계에 속한 다른 장비를 선택하도록 함으로써 후보장비  $k$ 의 가용시간 범위를 초과하지 않도록 인자를 수정한다.

단계 2: 다음은 잔업을 위한 후보장비 선택에 대한 제약을 검색한다. 이때 총 잔업시간을 초과할 경우, 잔업에 참여하는 장비 중에서 임의로 하나를 선택하여 외주 인자로 수정함으로써 잔업에 참여하는 장비들의 가공시간 합이 총 잔업시간을 초과하지 않도록 한다.

단계 3: 모든 제약조건을 만족하는 염색체가 되면 염색체 수정절차를 종료한다.

### 4.3 유전연산자

유전알고리즘에서 해의 개선에 가장 영향을 많이 미치는 유전연산자는 교차변이와 돌연변이라고 할 수 있다. 교차변이는 랜덤하게 선택된 2개의 부모 염색체로부터 우성형질을 조합함으로써 다음 세대를 위한 자손(offspring)을 생성하는 것이다 [12]. 이것은 보다 좋은해를 탐색하기 위한 방법이고, 문제의 특성에 따라 다양한 교차변이 연산자가 개발되어 있다.

교차변이는 염색체의 구조와 밀접한 관계가 있으며, 염색체 구조는 부품별로 그룹화 되어 있다. 그룹 내에 있는 인자 길이는 가공경로의 길이와 일치하고, 개개의 인자위치는 그 부품이 경유하는 공정단계이다. 또한 개개의 인자는 정상작업과 잔업에 참여하는 후보장비를 의미하거나 외주를 의미한다. 따라서 본 문제를 해결하기 위한 교차변이는 다음 절차에 의해 이점교차변이를 변형한 이점그룹교차변이를 사용한다.

#### [Crossover Procedure]

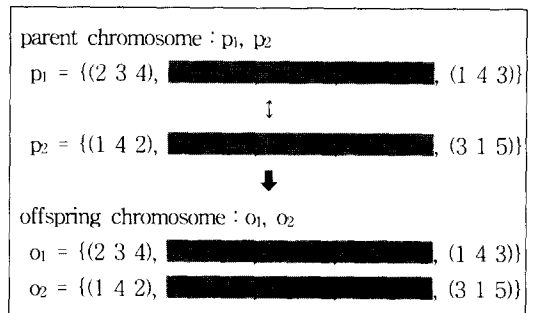
단계 1: 난수 발생에 의해 모집단으로부터 2개

의 염색체를 선택한다.

단계 2: 교차위치 선정을 위해  $[1, l]$ 의 범위를 갖는 2개의 정수형 난수를 발생한다.

단계 3: 2개의 난수는 부품을 나타내며, 선정된 2개의 부품 사이의 인자그룹을 교차한다.

예를 들어 5개의 부품에 대한  $p_1$ 과  $p_2$ 가 다음과 같이 선택되고, 2개의 정수가 2와 4가 선택되었다고 하자. 부품 2와 부품 4 사이의 인자그룹을 서로 교차함으로써 자손 염색체를 생성한다. 교차변이에 대한 결과는 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 이점그룹교차변이의 예

돌연변이는 염색체에 미세한 변화를 줌으로써 지역적 최적점에서 연속적인 해의 탐색을 배제하고, 탐색공간의 다양성을 제공하는 방법이다 [12]. 돌연변이는 inversion mutation, insertion mutation, displacement mutation, heuristic mutation, swap mutation, bit mutation, altering mutation 등 많은 연산자가 개발되었다 [3]. 본 문제를 해결하기 위한 돌연변이는 bit돌연변이 연산을 변형한 것으로 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 돌연변이율을  $P_m$ 이라고 했을 때,  $P_m$ 에 전체 인자개수를 곱하면 돌연변이 시킬 인자개수가 얻어진다.  $[1, \text{전체 인자개수}]$ 의 범위를 갖는 정수를 돌연변이 시킬 인자개수만큼 랜덤하게 생성한다. 생성된 번호의 위치에 해당되는 인자는 새롭게 생성된 인자와 교체한다. <그림 1>에서  $p_1$ 이 돌연변이를 위해 선택된 염색체라고 할 때, 랜덤하게 선택된 인자의

위치가 세 번째 인자그룹의 첫 번째 인자인 1라고 하자. 새롭게 생성된 인자가 5라면, 새로운 자손염색체는 다음과 같이 얻어진다.

$$p_1 = \{(2\ 3\ 4), (4\ 2\ 1\ 3), (\blacksquare\ 3\ 2), (4\ 2\ 1\ 6), (1\ 4\ 3)\}$$



$$o_3 = \{(2\ 3\ 4), (4\ 2\ 1\ 3), (\blacksquare\ 3\ 2), (6\ 1\ 2\ 4), (1\ 4\ 3)\}$$

#### 4.4 선택전략

식 (7)에 의해 계산된 적응도 함수 값에 따라 부모 세대의 모집단에서 다음 세대의 모집단을 생성하기 위해 염색체들이 선택된다. 선택의 역할은 보다 좋은 염색체를 탐색하는 것과 모집단의 다양성을 유지하는데 있으며, 이들의 관계는 수렴속도와 전역적 탐색을 위한 확률 사이의 절충관계이다[2]. 최적해 탐색을 위해 조기 수렴을 배제하고, 해의 탐색공간을 넓게 하는 목적으로 개발된 선택전략으로는 확률적 선택, 확정적 선택, 혼합적 선택이 있다[3, 11]. 확률적 선택의 대표적인 룰렛휠 방법은 각 염색체의 생존 확률이 유사하여 본 문제에 대한 해의 개선이 어렵기 때문에 혼합적 선택 방법인 토너먼트선택(tournament selection)을 선택 전략을 사용한다. 이 방법은 부모세대의 모집단에 속한 염색체를 임의 순서로 나열하고, 나열된 순서에 따라 r개만큼 염색체를 선택하여 그룹을 형성한다. 그룹에 속한 r개 염색체 중에서 가장 좋은 염색체는 자손세대에 상속된다. 이 과정은 모집단 크기만큼 반복되고 r값이 클수록 선택강도가 증가되는데 본 논문에서는 반복실험을 통해 r=3을 얻었다.

#### 5. 수치 예

본 논문에서 제안된 유전알고리즘의 유효성을 보이기 위해 수치예를 통해 실험하였다. 예제 1은 3개의 가공단계를 거쳐 가공되는 5개의 부품에 대해 최적 가공경로를 선정하는 문제이다. 예제 1에

대한 가공정보는 <표 1>과 같다. 개개의 부품에 대한 생산량은 1로 하였고, 정상작업(X), 잔업(O), 외주(S)에 대한 각각의 생산비용은 가공시간에 10, 15, 20을 곱하여 가공비용으로 설정하였다. 또한 총 잔업시간은 50으로 하였다.

<표 1> 각 부품의 가공정보(예제 1)

부 품	1		2		3		4		5		장비 가용 시간
	가공 단계	후보 장비	가공 시간	외주 시간	가공 시간	외주 시간	가공 시간	외주 시간	가공 시간	외주 시간	
1	1	15		10		20		17		15	10
	2	16	17	12	14	21	21	18	19	14	17
	3	14		13		19		16		16	30
	4	17		14		18		19		17	10
2	1	18		12		25		20		29	40
	2	16	19	10	15	27	28	23	24	30	50
	3	19		13		26		24		26	30
	4	17		14		24		20		28	20
	5	15		15		28		22		26	50
3	1	11		12		15		10		12	10
	2	10	13	10	13	14	15	12	13	13	10
	3	12		13		16		11		10	20
	4	13		11		13		13		12	10

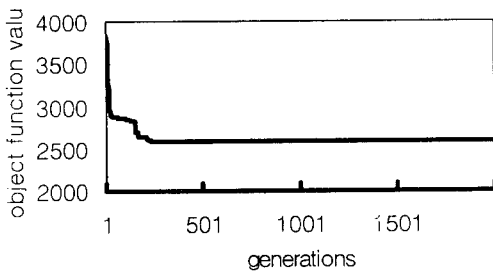
실험은 동일한 문제에 대해 최적화 방법에 의한 얻은 최적해와 유전알고리즘의 절차에 의해 실험한 결과를 비교함으로써 제안된 유전알고리즘의 유효성을 확인하고자 한다. 예제 1에 대한 목적함수 값은 먼저 LINDO 소프트웨어를 사용하여 2590을 얻었다. 다음은 유전알고리즘의 절차에 의해 실험하였다. 실험에 사용되는 유전파라미터(genetic parameters)는 모집단의 크기, 교차변이율, 돌연변이율, 실험 종료조건으로 사용되는 세대수 등이 있다. 유전파라미터의 값은 실험 수행도에 많은 영향을 미치지만 적용문제에 따라 유전파라미터 값이 서로 다르기 때문에 반복실험을 통해 적절한 이들의 값을 찾고자 한다. 유전파라미터 값에 대한 실험을 위해 다음과 같은 파라미터 값을 실험조건으로 설정하였다.

- 모집단의 크기 : 20, 30, 40, 50, 60, 70
- 교차변이율 : 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
- 돌연변이율 : 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05

각각의 실험조건에 대해 LINDO 소프트웨어에서 얻은 최적해(2590)에 도달되는 최초 세대수와 소요시간을 20회씩 실험하였다. 예제 1을 대상으로 실험한 결과를 정리하면 <표 2>와 같다. 반복 실험을 통해 얻은 유전파라미터는 모집단 크기 30, 교차변이율 0.3, 돌연변이율 0.04, 세대수 2000으로 설정하였고, 해의 수렴과정은 <그림 2>와 같다. 이때 서로 다른 4개의 염색체를 얻었다.

<표 2> 유전파라미터에 대한 실험결과

모집단수	교차변이율	돌연변이율	평균세대수	평균소요시간(초)
20	0.2	0.03	405	1.912
30	0.3	0.04	264	1.722
40	0.3	0.03	230	2.081
50	0.3	0.03	172	2.613
60	0.4	0.03	158	2.411
70	0.3	0.04	153	4.020



<그림 2> 해의 수렴과정

최적화 방법과 유전알고리즘의 실험결과를 살펴 보면 최적화 방법의 목적함수 값과 유전알고리즘의 평가함수 값이 동일함을 알 수 있었고, 서로 다른 4개의 가공경로와 외주비용을 제공하였다. 최적화 방법과 유전알고리즘의 실험결과는 <표 3>과 같고, 괄호 안의 숫자는 가공단계를 나타낸다.

또한 40(1)은 첫 번째 가공단계에 포함된 후보장비 4에서 잔업에 의해 가공되는 경우를 의미한다.

<표 3> 최적화 방법과 유전알고리즘에 의한 실험결과(예제 1)

적용 방법	최적해	가공경로 및 외주	외주 비용
최적화 방법	2590	경로 부품1 : 3X(1) - 5X(2) - 2X(3) 부품2 : 1X(1) - 2X(2) - 02(3) 부품3 : 40(1) - 1X(2) - S(3) 부품4 : 3X(1) - 4X(2) - 1X(3) 부품5 : 20(1) - 3X(2) - 3X(3)	300
		경로 1 부품1 : 3X(1) - 5X(2) - 20(3) 부품2 : 1X(1) - 2X(2) - 2X(3) 부품3 : 40(1) - 1X(2) - S(3) 부품4 : 3X(1) - 4X(2) - 1X(3) 부품5 : 20(1) - 3X(2) - 3X(3)	
유전 알고리즘	2590	경로 2 부품1 : 3X(1) - 5X(2) - 2X(3) 부품2 : 1X(1) - 2X(2) - 20(3) 부품3 : 40(1) - 1X(2) - S(3) 부품4 : 3X(1) - 4X(2) - 1X(3) 부품5 : 20(1) - 3X(2) - 3X(3)	300
		경로 3 부품1 : 3X(1) - 5X(2) - 20(3) 부품2 : 1X(1) - 2X(2) - 2X(3) 부품3 : 40(1) - 1X(2) - S(3) 부품4 : 3X(1) - 4X(2) - 1X(3) 부품5 : 20(1) - 5X(2) - 3X(3)	
		경로 4 부품1 : 3X(1) - 5X(2) - 2X(3) 부품2 : 1X(1) - 2X(2) - 20(3) 부품3 : 40(1) - 1X(2) - S(3) 부품4 : 3X(1) - 4X(2) - 1X(3) 부품5 : 20(1) - 5X(2) - 3X(3)	

다음은 제안된 유전알고리즘과 최적화 방법을 비교하기 위해 예제 1 보다 큰 문제(예제 2)를 적용하였다. 예제 2는 5개 가공단계에 포함된 24대의 후보장비로 구성된 작업장을 대상으로 하였고, 예제 2에 대한 부품정보는 <표 4>에 나타내었다. 각 후보장비의 가용시간은 계획기간 동안 일정한 것으로 보고, 부품 수를 5, 7, 10, 12, 15, 17, 20, 22, 25로 점차 늘려가면서 9개의 문제를 구성하였고, 최적화 방법과 유전알고리즘을 각각 적용하였다. 개개의 부품에 대한 생산량, 정상작업, 잔업, 외주에 대한 생산비용은 예제 1과 같고, 총 잔업시간은 부품 수에 따라 30, 30, 30, 50, 70, 100, 150, 200,



〈표 4〉 각 부품의 가공정보(예제 2)

부품		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13	
가공 단계	후보 장비	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주
1	1	15	17	18	19	12	15	13	15	14	17	14	15	16	19	15	17	14	15	13	15	15	17	15	17	17	17
	2	14		19		13		12		15		15		18		13		12		15		15		14		16	
	3	17		17		14		15		17		13		17		17		13		12		12		14		16	
	4	16		16		15		14		16		12		19		14		15		14		12		17		14	
2	1	24		18		22		19		28		22		22		18		22		24		23		21		21	
	2	22		20		21		21		25		20		26		22		20		22		25		22		24	
	3	23	26	21	22	19	22	22	22	24	28	24	24	23	26	19	22	23	24	20	24	22	26	20	24	22	24
	4	26		22		18		18		26		23		24		20		24		23		26		23		20	
3	1	28		27		31		28		28		26		33		28		22		23		25		24		29	
	2	33		26		29		27		30		29		30		24		26		24		24		25		26	
	3	32	33	25	27	28	23	26	29	26	31	31	31	31	33	25	29	27	27	26	27	22	27	26	29	31	31
	4	30		23		32		25		29		27		32		26		23		25		23		28		30	
	5	29		22		30		29		31		30		29		29		24		22		26		29		28	
	6	31		24		33		24		27		28		28		27		25		27		27		27		27	
4	1	17		17		20		14		20		17		18		20		17		17		21		16		16	
	2	14		16		16		16		18		15		16		18		19		15		18		15		17	
	3	16	18	20	20	19	20	18	18	21	22	14	18	19	20	22	22	16	20	16	18	20	22	14	18	18	18
	4	18		18		17		15		22		18		20		19		20		18		22		18		15	
	5	15		19		18		17		19		16		17		21		18		14		19		17		14	
5	1	11		10		10		13		8		13		12		10		7		13		7		11		12	
	2	12	13	13	13	12	13	11	13	10	11	10	13	13	13	6	9	6	9	10	13	9	9	8	11	10	13
	3	10		12		13		12		9		11		10		11		8		11		6		9		13	
	4	13		11		11		10		11		12		11		12		9		12		8		10		11	
부품		14		15		16		17		18		19		20		21		22		23		24		25		가용 시간	
가공 단계	후보 장비	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주	가 공	외 주
1	1	17	17	16	17	15	17	18	19	12	15	13	15	14	17	15	17	16	19	16	17	14	15	15	15	30	
	2	15		15		14		19		13		12		15		15		18		16		12		13		50	
	3	16		14		17		17		14		15		17		13		17		17		13		12		30	
	4	14		17		16		16		15		14		16		12		19		14		15		14		50	
2	1	28		28		24		18		22		19		28		22		22		18		22		24		40	
	2	25		27		22		20		21		21		25		20		26		22		20		22		30	
	3	26	28	26	28	23	26	21	22	22	22	24	28	24	28	24	23	26	26	19	22	23	24	24	24	80	
	4	27		25		26		22		18		18		26		23		24		20		24		23		40	
	5	24		24		25		19		20		20		27		21		25		21		21		21		70	
3	1	27		27		28		27		31		28		28		26		33		28		22		23		80	
	2	31		26		33		26		29		27		30		29		30		24		26		24		70	
	3	26	31	28	29	32	33	25	27	28	23	26	29	26	31	31	31	31	33	25	29	27	27	26	27	80	
	4	28		29		30		23		32		25		29		27		32		26		23		25		70	
	5	30		25		29		22		30		29		31		30		29		29		24		22		60	
	6	29		24		31		24		33		24		27		28		28		27		25		27		60	
4	1	19		18		17		17		20		14		20		17		18		20		17		17		30	
	2	21		16		14		16		16		16		18		15		16		18		19		15		50	
	3	18	22	17	18	16	18	20	20	19	20	18	18	21	22	14	18	19	20	22	22	16	20	16	18	40	
	4	20		14		18		18		17		15		22		18		20		19		20		18		50	
	5	22		15		15		19		18		17		19		16		17		21		18		14		40	
5	1	10		13		11		10		10		13		8		13		12		10		7		13		30	
	2	8		11		12		13		12		11		10		10		13		13		6		10		20	
	3	11	11	10	13	10	13	12	13	13	13	12	13	9	11	11	13	10	13	11	13	8	9	11	13	30	
	4	9		12		13		11		11		10		11		12		11		12		9		12		20	

250으로 하였다.

최적화방법에서는 부품 수가 5, 7, 10, 12일 때 최적해를 구할 수 있었으나 그 이상의 부품 수일 때는 컴퓨터 메모리 제약 때문에 최적해를 얻을 수 없었다. 그러나 LINDO 소프트웨어는 컴퓨터 메모리를 초과할 때까지 얻은 근사해를 제공하기 때문에 제안된 유전알고리즘에서 제공하는 해와 비교할 수 있었다. 유전알고리즘에 의한 실험에 사용된 실험 세대수는 문제 크기에 따라 세대수를 점차 증가시켜가며 실험하였고, 모집단의 크기, 교차변이율은 예제 1과 동일하게 하였다. 또한 해의 개선을 돕기 위해 비균일 돌연변이를 사용하였다. 즉 해가 개선되지 않고 1000세대가 증가하면 돌연변이율을 0.02부터 0.04까지 0.001씩 증가시켜 해의 개선을 유도하였다.

부품 수가 같은 문제에 대해 반복실험을 통해 동일한 평가함수 값에 수렴하는지를 확인하였고, 복수가공경로 수, 외주비용을 체크하였다. 최적화 방법과 유전알고리즘에 의한 실험결과를 <표 5>와 <표 6>에 비교하였다.

최적화 방법과 제안된 유전알고리즘의 실험결과를 비교하면 문제 규모가 작은 경우는 목적함수 값과 평가함수 값이 동일함을 확인 할 수 있었고, 문제 규모가 큰 경우에 제안된 유전알고리즘은 LINDO 소프트웨어에서 제공하는 근사해 보다 더 좋은 평가함수 값을 일관되게 제공하였다. 또한 동일한 평가함수 값을 갖는 복수 가공경로와 외주비용을 제공하였다.

<표 5> 최적화 방법과 유전알고리즘에 의한 실험결과(예제 2)

부품 수	최적화 방법	유전알고리즘		
	목적함수 값	평가함수 값	복수가공경로 수(평균)	외주 비용
5	4230	4230	3	0.00
7	6000	6000	10	0.00
10	8450	8450	14	0.00
12	10660	10660	19	480

<표 6> LINDO에 의한 근사해와 유전알고리즘에 의한 실험결과

부품 수	LINDO S/W에 의한 근사해	유전알고리즘		
		평가함수 값	복수가공경로 수(평균)	외주 비용
15	15550	15170	38	3620
17	19765	19190	45	7320
20	25090	24690	62	11880
22	28800	28420	79	14800
25	34670	33730	96	19360

## 6. 결 론

본 논문에서는 전체 부품의 가공완료 비용을 최소화하는 목적 하에 정상작업을 위한 장비가용시간, 초과작업을 위한 총 잔업시간, 외주를 고려하여 최적 가공경로를 선정하는 수리모델과 해법을 제시하였다. 제시된 모델은 현재 생산시스템에서 생산할 수 없는 병목부품을 포함한 전체 부품을 대상으로 자가생산 공정과 외주처리 공정을 식별하는 기능을 포함하고 있어 자가생산과 외주정보를 동시에 제공하는 특징이 있다.

제시된 유전알고리즘의 실험결과는 문제규모가 작은 경우, 최적화 방법에 의해 얻은 최적해와 같은 해를 얻었으며, 문제 규모가 큰 경우에도 LINDO 소프트웨어에서 제공하는 근사해 보다 더 좋은 평가함수 값을 일관되게 제공하였다. 또한 유전알고리즘의 특성을 이용하여 동일한 수렴값을 갖는 여러 개의 염색체로부터 복수 가공경로를 제공할 수 있었다.

본 논문에서 제안된 모델과 해법은 자가생산에 대한 가공경로와 외주정보를 공정계획자와 일정계획자에게 제공함으로써 작업장 환경변화에 신속한 대응이 가능할 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Amirahmadi F. and F. Choobineh, "Identi-

- fying the Composition of Cellular Manufacturing System," *International Journal of Production Research*, Vol.34, No.9(1996), pp.2471-2488.
- [2] Back T. and F. Hoffmeister, "Extended Selection Mechanisms in Genetic Algorithms," *Proceeding of the 4th International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann* (1991), pp.92-99.
- [3] Gen M. and R. Chen, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, 1996.
- [4] Goldberg D.E., *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [5] Kamien M.I. and L. Li, "Subcontracting, Coordination, Flexibility, and Production Smoothing in Aggregate Planning," *Management Science*, Vol.36, No.11(1990), pp.1352-1363.
- [6] Kogan K. and E. Khmelnsky, "An optimal control method for aggregate production planning in large-scale manufacturing systems with capacity expansion and deterioration," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 28, No.4(1995), pp.851-859.
- [7] Lee D.H., S.K. Lim, G.C. Lee, H.B. Jun and Y.D. Kim, "Multi-period part selection and loading problems in flexible manufacturing systems," *Computers & Industrial Engineering*, Vol.33, No.3-4(1997), pp.541-544.
- [8] Loerch A.G. and J.A. Muckstadt, "An Approach to Production Planning and Scheduling in Cyclically Scheduled Manufacturing Systems," *International Journal of Production Research*, Vol.32, No.4(1994), pp.851-871.
- [9] Logendran R. and P. Ramakrishna, "A Methodology for Simultaneously Dealing with Machine Duplication and Part Subcontracting in Cellular Manufacturing Systems," *Computers and Operation Research*, Vol.24, No. 2(1997), pp.97-116.
- [10] Michalewicz Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 3th ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1996.
- [11] Michalewicz Z. and C.Z. Janikow, "Handling Constraints in Genetic Algorithms," *Proceeding of the 4th International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann(1991), pp.151-157.
- [12] Pal S.K. and P.P. Wang, *Genetic Algorithms for Pattern Recognition*, CRP Press, Inc., pp.1-23, 1996.
- [13] Shafer S.M., G.M. Kern and J.C. Wei, "A Mathematical Programming Approach for Dealing with Exceptional Elements in Cellular Manufacturing," *International Journal of Production Research*, Vol.30, No.5(1992), pp. 1029-1036.
- [14] Sundaram R.M., "Process Planning and Scheduling-A Method of Integration for Productivity Improvement," *Computers and Industrial Engineering*, Vol.15, No.1-4(1988), pp. 296-301.