

▣ 연구논문

작업장 특성을 고려한 가공경로선정 문제의
유전알고리즘 접근

-Machining Route Selection with the Shop Flow
Information Using Genetic Algorithm-

이 규 용*
Lee, Kyu Yong
문 치 응**
Moon, Chi Ung
김 재 균***
Kim, Jae Gyun

Abstract

Machining route selection to produce parts should be based on shop flow information because of input data at scheduling tasks and is one of the main problem in process planning. This paper addresses the problem of machining route selection in multi-stage process with machine group included a similar function. The model proposed is formulated as 0-1 integer programming considering the relation of parts and machine table size, available time of each machine for planning period, and delivery date. The objective of the model is to minimize the sum of processing, transportation, and setup time for all parts. Genetic algorithm approach is developed to solve this model. The efficiency of the approach is examined in comparison with the method of branch and bound technique for the same problem. Also, this paper is to solve large problem scale and provide it if the multiple machining routes are existed an optimal solution.

1. 서론

부품 생산을 위해 요구되는 자원 및 부품정보를 활용하여 필요한 장비, 작업순서, 가공조건 등을 생성하는 과정이 공정계획(process planning)이다[11]. 이러한 공정계획은 설계와 제조를 연결하는 매개체 역할을 할뿐만 아니라 일정계획과 밀접한 관련성을 갖는다. 공정계획 단계에서 결정해야할 문제는 도면의 분석, 설계도면에 근거한 공정선택, 가공순서 결정, 치공구 결정, 절삭조건, 가공시간 분석, 가공장비선정 등이 있다. 이들 중에서 가공장비선정을 제외하면 기술적인 측면으로 생산이 시작되기 전에 결정되지만 장비선정은 생산현장(shop flow)의 환경에 많은 영향을 받기 때문에 작업장 특성을 반영한 장비선정이 이루어져야하고, 이를 바탕으로 한 가공경로선정이 이루어져야 한다.

가공경로 선정 문제에 있어 대체장비(alternate machine)가 다수 존재할 경우 부품 하나에

* 울산과학기술대학교 공업경영과
** 한양대학교(안산) 산업공학과
*** 울산대학교 수송시스템공학부

대한 다수의 가공경로가 존재한다. Hankins et al.[8]은 기계공장의 생산성 향상을 위해 대체장비 경로의 이점을 제시하였고, 데이터베이스(database)를 이용하여 대체장비선정 문제를 해결하였다. Rajamani와 Adil[12]은 공정의 유연성 증가를 위해 부품의 대체경로 수를 최대화하는 수리모델을 제안하였다. 이 수리모델은 경로 사이의 상대적 우선 순위를 고려하여 경로를 선택하였다. Song[10]은 대체장비의 가용시간을 확장하기 위한 방안으로 가공장비에 대한 가공속도를 조절함으로써 대체장비로 선정하는 모델을 개발하였다. Tunali[13]는 동적 경로선정의 중요성을 강조하였으며, 기계고장을 고려한 휴리스틱 모델에 의한 대체경로를 생성하였다. Egbelu[3]는 multi-stage 제조시스템에서 자재이동의 최적화를 위한 경로선정 문제를 다루었으며, 자재이동 장비인 차량설비(mobile equipment)와 컨베이어와 같은 stationary equipment 사이에 효율을 비교분석 하였다. Atmani와 Lashkari[2]는 기계와 공구를 조합시킨 후 작업을 할당하는 문제를 수리모델로 표현하고, 최적화 방법으로 해를 구하였다. Moon et al.[1]은 전체 부품에 대한 가공시간과 기계간 이동시간의 합을 최소화하는 모델을 0-1 정수계획법으로 정식화하고, 이 문제를 해결하기 위한 유전알고리즘을 개발하였다.

가공경로선정 문제의 대부분은 공정계획에 사용되는 장비들이 항상 사용 가능한 것으로 전제하고 있으나 부품의 크기가 서로 다르기 때문에 실제 가공 가능한 경우와 그렇지 않는 경우가 발생한다. 뿐만 아니라 공정계획에서 생성된 가공경로는 작업장 정보를 고려한 최적 작업경로가 되어야 한다. 예를 들면 대부분의 생산은 계획기간을 설정하고, 이 계획기간 동안 계획된 생산량을 생산하게 되는데, 이때 고객의 요구인 납기와 계획기간 동안 장비 가용시간의 제약 하에 가공경로(machining route)가 선정되어야 한다.

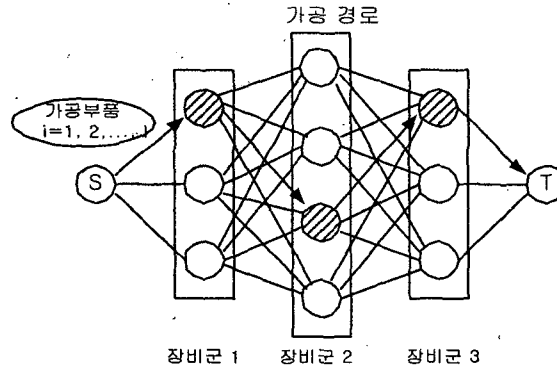
따라서 본 논문에서는 계획기간(planning period) 동안 가공될 전체 부품에 대한 가공시간, 자재이동시간, 작업준비시간의 합을 최소화하는 목적 하에 개개의 부품에 대한 납기, 각 장비의 가용시간, 부품의 크기와 장비의 작업대 크기(table size)를 고려하여 최적 가공경로선정 모델을 제안한다. 이것은 기존 연구와 달리 부품의 납기와 가공물과 작업대 크기의 관계를 고려한 것으로 일정계획에서 개개의 부품에 대한 다수의 가공경로를 평가하는 것을 배제하고, rescheduling을 최소화할 수 있다. 수리모델은 0-1 정수계획법으로 정식화하고, 유전알고리즘을 이용하여 최적해를 구하는 방법을 제시하겠다. 제시된 유전알고리즘은 수치 예를 통해 최적화 방법(branch and bound method)에 의한 결과와 비교함으로써 그 최적성을 검증하고, 복수의 가공경로가 생산시스템 내에 존재한다면 이를 사용자에게 제공함으로써 일정계획의 유연성을 제공할 수 있다. 또한 문제 규모(problem scale)가 커질 경우 우수한 탐색 효율을 나타냄을 보이도록 하겠다.

2. 문제정의

유사한 기능을 가진 장비들로 장비군(machine group)이 구성되어 있으며, 각 장비군에 포함된 후보장비(candidate machine)들은 같은 공정을 수행할 능력을 갖고 있다. 계획기간 동안 가공될 부품은 각 장비군에 속한 하나의 후보장비를 거쳐 가공된다. 일반적으로 작업장의 작업 공정은 <그림 1>과 같이 나타낼 수 있으며, 이때 각각의 부품은 설계정보에 의해 작업장으로 투입되는 순서와 거쳐야 할 공정(장비군)이 결정되기 때문에 부품에 따라 서로 다른 공정을 가지며, 선택된 공정순서에 의해 가공작업이 진행되어 진다.

이러한 작업환경 하에서 개개의 부품은 각 장비군에 속한 하나 이상의 후보장비에서 가공작업이 가능하기 때문에 부품이 거쳐가는 가공경로는 다수 존재할 수 있다. 이들의 가공경로 집합에서 각 부품에 대한 최적 가공경로를 결정함으로써 일정계획 업무에 보다 실행 가능한 정보를 제공할 수 있다.

따라서 공정계획 단계에서 계획기간 동안 생산될 부품의 가공경로를 선정하기 위한 제약을



<그림 1> 작업장 배치

살펴보면 첫째, 각 장비군에 속한 다수의 후보장비는 부품 가공에 유연성을 제공할 수 있으나 어떤 부품이든 가공 가능한 것은 아니다. 후보장비의 작업대 크기가 일정한 반면에 가공 대상 부품의 크기는 부품에 따라 서로 다를 수 있기 때문에 이들에 대한 가공제약이 된다. 둘째, 개개의 부품은 고객에 의해 납기가 결정되는데, 납기를 준수하는 범위 내에서 공정계획의 가공 경로를 선정한다. 고객이 요구하는 납기를 준수하는 것은 기업의 이미지와 고객 관리측면에서 중요할 뿐만 아니라 경제적으로 중요한 사항이다. 마지막으로 계획기간 동안 장비의 가용시간은 한계가 있다. 즉, 전 단계 계획기간 동안 할당되어진 부품에 대한 작업지연, 장비부수, 긴급 부하 등으로 인한, 현 단계의 계획기간 동안 사용 가능한 장비의 가용시간은 계획기간마다 다를 수 있기 때문에 이들의 범위 내에서 가공경로를 결정한다.

각 장비군에 속한 후보장비들 중에서 하나의 후보장비를 선택함으로써 특정 부품의 가공경로가 선정되는데, 가공경로를 선정할 때, 계획기간 동안 가공될 전체 부품의 소요시간이 최소가 되도록 선정되어야 한다. 생산시스템 내에서 소요되는 시간은 가공시간(process time), 자재 이동시간, 작업준비시간으로 구분하고, 이들의 합을 최소화하는 후보장비를 선정하고자 한다. 가공시간은 설계속성과 장비성능에 따라 다르기 때문에 동일한 가공에 대해 서로 다른 가공시간을 갖는다. 또 선행 장비군에서 다음 장비군까지 자재이동시간과 이동횟수는 가공경로 선정에 중요한 요인이며, 자재이동시간과 이동횟수에 따라 전체 소요시간에 영향을 미친다. 이동횟수는 생산량과 이송장치의 크기와 관계가 있다. 작업준비시간은 대부분 무시하거나 가공시간에 포함하는 경우가 있으나 작업준비시간이 후보장비간에 많은 차이가 있으면 작업준비시간을 고려하는 것이 필요하다.

본 논문의 목적은 계획기간 내에 가공되어야 할 대상부품에 대한 생산수량, 부품의 크기 등의 정보와 각 장비군에 속한 후보장비에 대한 작업장 정보, 즉 후보장비의 작업대 크기, 계획기간 동안 각 장비의 가용시간, 개개의 부품에 대한 납기 등을 고려하여 최적 가공경로 선정을 위한 모델의 제시와 해법의 개발에 있다.

3. 모델정식화

가공경로선정 문제를 정식화하기 위해 사용되는 기호는 다음과 같이 정의한다.

[기호 정리]

- i : 부품 인덱스 $i \in I$
- j : 장비군 인덱스 (가공공정) $j \in J_i$

- k : 장비군 j 에 속한 후보장비 인덱스 $k \in K_j$
- p_{ijk} : 부품 i 가 장비군 j 에 속한 후보장비 k 에서의 가공시간(process time)
- d_{ijk} : 부품 i 가 장비군 j 에 속한 후보장비 k 에서의 작업준비시간(setup time)
- $t_{i((j-1),k)(j,k)}$: 선행 장비군 $(j-1)$ 에 속한 후보장비 k 에서 다음 장비군 j 에 속한 후보장비 k 까지 부품 i 의 이동시간
- av : 이송장치의 적재용량
- v_i : 부품 i 의 생산량
- b_i : 부품 i 의 크기(size)
- ab_{jk} : 장비군 j 에 속한 후보장비 k 의 작업대 크기(table size)
- act_{jk} : 계획기간 동안 장비군 j 에 속한 후보장비 k 의 가용시간
- D_i : 부품 i 의 납기
(현 단계의 계획기간 시작 시점에서 부품 i 에 대한 납기까지 남은 시간)
- $X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{부품 } i \text{가 장비군 } j \text{의 후보장비 } k \text{에서 가공한다.} \\ 0, & \text{그외} \end{cases}$

3.1 가공경로 선정의 제약

고객의 요구나 여러 상황에 의해 부품 i 의 납기가 결정되는데, 이 납기를 준수하는 것이 중요하므로 이는 고객의 요구를 만족시킬 뿐만 아니라 기업의 이윤증대에 기여한다. 특히 계획기간 동안 생산량이 결정되어 있는 상태에서 일정계획을 수립하는 가까운 시점에 납기를 고려한 가공경로의 정보를 일정계획 모듈에 제공하는 것은 원활한 생산흐름을 유지할 수 있다.

따라서 주어진 납기 내에 부품 i 의 작업이 완료될 수 있는 장비를 선정하기 위해 식(1)과 같은 식이 필요하다.

$$\sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} v_i p_{ijk} X_{ijk} + \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} t_{i((j-1),k)(j,k)} X_{i(j-1)k} X_{ijk} + \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} d_{ijk} X_{ijk} \leq D_i \quad \forall i \in I \text{ -----(1)}$$

또 가공경로선정에 대한 기존 연구는 후보장비가 항상 사용 가능하다는 전제하에 공정계획을 수립하였다. 그러나 후보장비의 작업대 크기가 일정한 반면에 가공물의 크기는 부품의 특성에 따라 서로 다를 수 있다. 이러한 경우 가공시간, 자재이동시간, 작업준비시간의 합이 최소인 후보장비가 부품 i 에 대한 가공경로로 선정될지라도 가공물과 후보장비의 작업대 관계에서 후보장비의 작업대가 가공물의 크기 보다 적다면 그 후보장비는 가공장비로 선정할 수 없다. 가공물과 후보장비간의 가공제약은 식(2)와 같다.

$$\sum_{k \in K_j} ab_{jk} X_{ijk} \geq b_i, \quad \forall i \in I, j \in J_i \text{ -----(2)}$$

각 장비군에 속한 개개의 후보장비는 계획기간 동안 사용 가능한 가용시간이 상이할 수 있다. 그 이유는 전 단계 계획기간 동안 할당되어진 부품에 대한 작업지연, 장비보수, 긴급부하 등으로 인한 현 단계에서 후보장비의 가용시간에 차이가 있다. 후보장비에서 부품이 소요하는 시간은 가공시간과 작업준비시간의 합으로 나타내고, 작업준비시간은 lot 단위로 주어진다. 각 부품의 생산량은 하나의 lot로 정의하고, 1회 작업준비에 의해 하나의 후보장비에서 하나의 작업공정을 완료한다. 따라서 이들에 대한 식은 (3)과 같다.

$$\sum_{i \in I} (v_i d_{ijk} + d_{ijk}) X_{ijk} \leq act_{jk}, \quad \forall j \in J_i, k \in K_j \text{ -----(3)}$$

3.2 목적함수

목적함수는 계획기간 동안 가공 대상부품에 대한 가공시간, 장비간의 자재이동시간, 작업준비시간의 합을 최소화하도록 설정한다. 전체 가공시간의 합은 식(4)와 같다.

$$F_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} v_i d_{ijk} X_{ijk} \text{ -----(4)}$$

장비군 (j-1)에서 부품 i가 가공 완료되면 다음 장비군 j로 이동이 이루어진다. 자재이동경로는 선행 장비군 (j-1)에 속한 후보장비 k에서 다음 장비군 j에 속한 후보장비 k로 이동하는 경우이다. 경로선택의 기호는 $S_{i((j-1),k)(j,k)}$ 로 표시하고, 이동경로가 선택되면 1, 그렇지 않으면 0의 값을 가진다. 이동시간은 선행 장비군 (j-1)의 후보장비 k에서 다음 장비군 j의 후보장비 k까지 소요시간이다. 또한 이동시간은 이송장치의 적재능력이 생산량 보다 적을 경우 장비간의 이동횟수가 증가되는데, 부품 i에 대한 자재이동횟수는 식(5)에 의해 계산된다.

$$nm_{i((j-1),k)(j,k)} = S_{i((j-1),k)(j,k)} \times \lceil \frac{v_i}{av} \rceil \text{ -----(5)}$$

여기서 $nm_{i((j-1),k)(j,k)}$ 는 부품 i의 가공을 위한 자재이동횟수를 나타내며, $\lceil \frac{v_i}{av} \rceil$ 의 값은 이 값 보다 크거나 같은 최소 정수값을 갖는다. 그러므로 부품 이동시간은 1회 이동시간 ($to_{i((j-1),k)(j,k)}$)에 이동횟수의 곱으로 표현한다.

$$t_{i((j-1),k)(j,k)} = to_{i((j-1),k)(j,k)} \times nm_{i((j-1),k)(j,k)} \text{ -----(6)}$$

전체 가공 부품에 대한 자재이동시간의 합을 구하면 식(7)과 같다.

$$F_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} t_{i((j-1),k)(j,k)} X_{i(j-1)k} X_{ijk} \text{ -----(7)}$$

식(7)은 2차 함수이므로 0-1 정수계획법으로 정식화할 때 목적함수에 그대로 사용할 수 없다. 따라서 식(7)에 대한 선형화가 필요하며 선형화방안은 다음과 같다[6, 9].

선형화 절차는 먼저 이차함수인 $X_{i(j-1)k} X_{ijk}$ 항을 $Y_{i((j-1),k)(j,k)}$ 로 치환하고, 제약조건에 $X_{i(j-1)k} + X_{ijk} - 2Y_{i((j-1),k)(j,k)} \geq 0$ 와 $X_{i(j-1)k} + X_{ijk} - Y_{i((j-1),k)(j,k)} \leq 1$ 를 추가함으로써 자재이동에 대한 목적함수 F_2 는 식(8)과 같이 수정된다.

$$F_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} t_{i((j-1),k)(j,k)} Y_{i((j-1),k)(j,k)} \text{ -----(8)}$$

작업준비시간은 후보장비의 특성에 따라 서로 다른 준비시간을 갖는다. 계획기간 동안 부품 i에 대한 생산량을 하나의 lot로 처리하고, 그 lot에 대한 작업준비는 1회로할 경우 전체 부품에 대한 작업준비시간의 합은 다음과 같다.

$$F_3 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} d_{ijk} X_{ijk} \text{ -----(9)}$$

부품 전체에 대한 가공시간, 자재이동시간, 작업준비시간의 합을 최소화하는 목적함수는 다음과 같다.

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \text{ -----(10)}$$

3.3 수리 모델

작업장 상황을 고려한 가공경로선정 문제의 목적은 납기, 계획기간 동안에 장비들의 가용시간, 부품과 장비간의 가공제약을 만족하는 범위 내에서 부품 전체에 대한 가공시간, 자재이동시간, 작업준비시간의 합을 최소화하는 가공경로를 선정하는 것이다. 이것은 다음과 같이 0-1 정수계획법으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Min } F = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} v_i p_{ijk} X_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} t_{i(j-1),k(j,k)} Y_{i(j-1),k(j,k)} \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} d_{ijk} X_{ijk} \end{aligned}$$

St.

$$\sum_{k \in K_j} X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in I, j \in J_i \text{ -----(11)}$$

$$X_{i(j-1)k} + X_{ijk} - 2Y_{i(j-1),k(j,k)} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J_i, k \in K_j \text{ -----(12)}$$

$$X_{i(j-1)k} + X_{ijk} - Y_{i(j-1),k(j,k)} \leq 1 \quad \forall i \in I, j \in J_i, k \in K_j \text{ -----(13)}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} v_i p_{ijk} X_{ijk} + \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} t_{i(j-1),k(j,k)} Y_{i(j-1),k(j,k)} \\ & + \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} d_{ijk} X_{ijk} \leq D_i \quad \forall i \in I \text{ -----(14)} \end{aligned}$$

$$\sum_{k \in K_j} ab_{jk} X_{ijk} \geq b_i \quad \forall i \in I, j \in J_i \text{ -----(15)}$$

$$\sum_{i \in I} (v_i p_{ijk} + d_{ijk}) X_{ijk} \leq act_{jk} \quad \forall j \in J_i, k \in K_j \text{ -----(16)}$$

$$X_{ijk} \in \{ 0, 1 \} \quad \forall i \in I, j \in J_i, k \in K_j \text{ -----(17)}$$

$$Y_{i(j-1),k(j,k)} \in \{ 0, 1 \} \quad \forall i \in I, j \in J_i, k \in K_j \text{ -----(18)}$$

위의 제약식을 간략하게 설명하면 식(11)은 부품 i 를 가공하기 위해 장비군 j 에 속한 후보장비 k 중에서 오직 하나의 장비가 선택되는 조건이다. 식(17)과 (18)은 0, 1의 값을 갖는 정수형 변수이다.

4. 유전알고리즘 접근

유전알고리즘은 인공지능의 한 기법으로 생물의 진화과정, 즉 자연선택과 적자생존에 근거를 두고 있으며, 1973년 Holland에 의해 소개된 이래로 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히 문제 규모(problem scale)가 커지거나 해결 불가능(NP-hard) 문제에 대한 차선택 탐색에 유전알고리즘이 많이 이용되고 있다[7].

본 논문에서는 가공경로 선정 문제에 대한 유전알고리즘을 응용하고자 한다. 유전알고리즘의 접근 이유는 대부분의 가공경로선정 문제에 있어 계획기간 동안 생산될 대상 부품이 많은 경우 최적화 방법으로 문제 해결에 어려움이 있다. 뿐만 아니라 최적해 방법은 하나의 가공경로를 제공하는 반면에 유전알고리즘은 모집단에 의해 해를 탐색하므로 복수의 가공경로를 제공

할 수 있다. 만약 전체 부품을 가공 완료하는 시간이 어떤 최소값을 가질 때, 복수의 가공경로가 생산시스템 내에 존재한다면 유전알고리즘에 의해 이들의 가공경로를 탐색할 수 있다. 이렇게 함으로써 일정계획에 유연성을 제공하는 이점이 있다.

4.1 해의 표현과 초기화

유전알고리즘에서 후보해의 집합인 모집단(population)은 염색체(chromosome)로 구성되어 있으며, 이들의 염색체는 인자(gene)들로 구성되어 있다. 해의 표현은 실제 문제의 발생 가능한 해를 염색체의 구성 요소인 인자로 표현하는 것이다. 따라서 염색체 구조는 해결하고자하는 문제의 특성에 따라 표현되어야 한다.

본 논문에서는 계획기간 동안 가공되어야할 각 부품과 생산량이 결정되어 있고, 이들의 부품이 모두 완료되는 시간이 최소화 되도록 각 부품에 대한 가공경로를 결정하는 문제이다. 개개의 부품에 대한 가공경로는 각각의 장비군에 속한 후보장비들 중에서 하나의 후보장비를 경유하게 되는데, 장비군에 속한 후보장비의 수는 제한되어 있다. 또한 각 부품에 따라 경유하는 장비군이 결정되어 있다. 이때 염색체의 구조는 부품, 장비군의 위치, 장비군에 속한 후보장비에 대한 정보를 담고 있다. 모집단의 s 번째 염색체를 C_s 라고 할 때, 난수에 의해 생성된 염색체의 구조는 다음과 같이 표현된다.

$$C_s = \{ \text{부품 1} \quad \text{부품 2} \quad \dots \quad \text{부품 } I \\ (4, 2, 3, \dots), (6, 1, 5, 3), \dots, (2, 3, 1) \}$$

염색체 C_s 에서 각각의 인자는 부품에 대해 선택된 후보장비를 나타내고, 부품별로 그룹화하였다. 각 부품에 대응되는 인자 그룹의 길이는 그 부품이 경유하는 장비군의 수와 동일하다. 예를 들어 부품 1은 3개의 장비군을 경유하게 되는데, 이때 각 장비군에 속한 후보장비들로부터 4, 2, 3번 장비가 가공장비로 선택된 것이다.

다음은 모집단의 크기(population size)만큼 초기모집단을 랜덤하게 생성하는데, 실제 문제의 제약조건 때문에 비가능해의 염색체가 모집단에 포함될 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방안으로는 벌금함수법(penalty function method), 수정알고리즘(repair algorithm), 변수제약법(variable restriction method) 등을 사용할 수 있다. 가공경로선정 문제의 초기모집단은 다음과 같은 염색체 수정방법에 의하여 구성하겠다.

[Repairing procedure]

- 단계 1 : 가공물과 후보장비간의 가공제약을 위반하는 인자를 검색하고, 이 제약을 위반하는 인자는 임의 생성된 인자와 교체한다.
- 단계 2 : 특정 장비군에 속한 후보장비 k 에 할당된 부품들의 가공시간 합이 후보장비 k 의 가용시간을 초과하는지 검색한다. 가용시간을 초과하면, 후보장비 k 에 할당된 부품 중에서 임의로 하나를 선택하고, 이 부품에 대응되는 인자를 임의 생성된 인자와 교체한다. 후보장비 k 의 가용시간 제약이 만족될 때까지 이 과정을 반복한다.
- 단계 3 : 부품 i 에 대한 납기제약을 검색한다. 부품 i 를 가공하는 후보장비에 대응되는 하나의 인자를 임의로 선택하고, 선택된 인자와 임의 생성된 인자를 교체하여 납기제약을 만족하도록 한다.
- 단계 4 : 모든 제약조건을 만족하는 염색체가 되면 염색체 수정 절차를 종료한다.

4.2 적응도 평가와 선택

유전알고리즘에서 적응도는 염색체의 생존 능력을 나타내는 것으로서 어떤 평가기준에 의해

모집단의 염색체들을 평가하게 된다. 본 문제에 대한 평가함수(fitness function)는 수리모델의 목적함수를 이용한다. s 번째 염색체에 대한 평가함수는 수리모델의 목적함수를 이용하여 식 (19)와 같이 나타낸다.

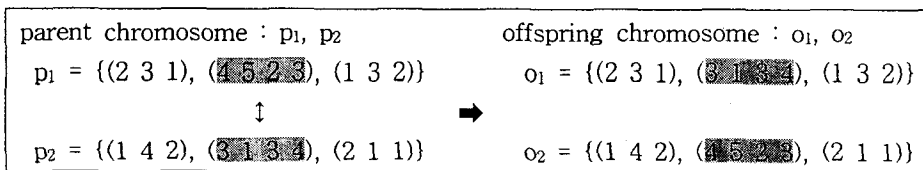
$$eval_fun(C_s) = F(C_s), \quad s = 1, 2, \dots, pop_size \text{ -----(19)}$$

선택 전략은 자손 세대의 모집단을 형성하기 위해 부모 세대의 모집단으로부터 생존할 염색체를 선택하는 과정이다. 선택전략에는 확률적 선택(stochastic selection), 확정적 선택(deterministic selection), 혼합적 선택(mixed selection) 등이 있다[5]. 확률적 선택의 대표적인 방법인 룰렛휠(roulette wheel)은 본 문제에 적합하지 않았다. 그 이유는 각 염색체의 평가함수 값의 차이가 적은 경우, 생존확률이 유사하기 때문에 해의 개선에 어려움이 있다. 따라서 선택 전략은 선택된 염색체 r 개중에서 적응도가 가장 좋은 염색체를 선택하는 토너먼트선택(tournament selection)을 사용하겠다. 토너먼트선택 절차는 모집단의 염색체들을 임의 순서로 나열하고, 나열된 염색체에 대해 r 개의 염색체로 구성된 개개의 그룹을 만든다. 다음은 각 그룹에 포함된 r 개의 염색체 중에서 적응도가 가장 좋은 염색체 1개를 선택하여 다음 세대에 상속한다. 이 과정은 모집단의 크기만큼 반복되고, 본 논문에서는 $r=2$ 를 사용한다.

4.3 유전 연산자

유전 연산자는 교차변이와 돌연변이로 나누어지는데, 교차변이는 부모의 좋은 형질이 가능한 파괴되지 않고 자손에게 상속될 수 있어야 한다. 이것은 보다 좋은 해를 탐색하기 위한 방법이고, 적용 문제에 따라 많은 교차방법이 개발되어 있다. 또한 돌연변이는 염색체에 미세한 변화를 줌으로써 지역적 최적점에서 연속적인 해의 탐색을 배제하는 방법이다.

염색체를 구성하는 인자는 부품에 따라 그룹으로 구성되어 있기 때문에 교차변이는 두 개의 부모 염색체에 대해 임의의 부품을 선택하고, 그 부품에 해당하는 그룹을 교차시킴으로써 자식 염색체를 생성하겠다. <그림 2>는 3개의 부품에 대한 교차변이를 나타낸 것으로 난수를 발생시켜 부품 2가 선택되었다면, p_1 과 p_2 에서 부품 2에 해당하는 인자 그룹을 교차시킴으로써 o_1 과 o_2 를 얻는다. 자손 염색체에 대한 제약 위반을 검색하고, 수정하는 과정이 수행된다.



<그림 2> 그룹교차에 의한 교차변이의 예

돌연변이 방법으로는 invert mutation, insert mutation, heuristic mutation, swap mutation, bit mutation 등이 있다[5]. swap 돌연변이는 선택된 염색체에서 임의의 두 점을 선택하고 이를 서로 교환함으로써 새로운 염색체를 생성하는 방법이다. 그리고 bit 돌연변이는 염색체로부터 임의의 한 점을 선택하고 새롭게 생성한 인자를 선택된 인자와 교체함으로써 새로운 염색체를 생성하는 방법이다[4, 14].

돌연변이 연산은 bit 돌연변이 연산은 본 문제에 적합하게 응용한 것으로 예를 들어 설명하면 다음과 같다. p_1 의 염색체가 돌연변이를 위해 선택되고, 임의로 선택된 위치가 부품 1의 두 번째 인자라면, 부품 1을 가공하기 위한 두 번째 장비군의 후보장비 3을 의미한다. 따라서 새롭게 생성된 인자는 후보장비 수를 넘지 않고, 제약조건을 만족하는 범위의 난수 값이 4일 때,

새로운 염색체는 다음과 같다.

$$o_3 = \{(2 \blacksquare 1), (4 \ 5 \ 2 \ 3), (1 \ 3 \ 2)\}$$

5. 수치 예

본 논문에서 제안된 유전알고리즘은 수치실험을 통해, 최적화 방법과 비교함으로써 그 유효성을 보이도록 하겠다. 계획기간 동안 5개의 장비군에서 가공되는 3가지 부품에 대한 개개의 정보는 <표 1>과 <표 2>에 나타내었다. 가공시간은 부품 한 개를 가공할 때 소요되는 시간이며, 작업준비시간은 생산량(lot)단위로 준비작업이 발생하기 때문에 1회 준비시간으로 표시하였다. 자재이동시간은 식(6)에 의해 계산된 값이며, 모든 자재이동경로에 대응되는 이동시간으로 나타내었다.

이 예제에 대한 최적해를 구하기 위해 LINDO 소프트웨어를 사용하였고, 그 때의 가공 완료 시간은 3810이었다. 최적해에 대한 각 부품의 가공경로는 다음과 같고, 괄호 내의 숫자는 장비군을 나타낸다.

- 부품 1의 가공경로 : 3(1) - 3(2) - 5(3) - 2(4) - 4(5)
- 부품 2의 가공경로 : 2(1) - 1(2) - 2(3) - × - 4(5)
- 부품 3의 가공경로 : 4(1) - 3(2) - 5(3) - 2(4) - 2(5)

<표 1> 각 부품에 대한 입력정보

부품	1		2		3		장비 가용시간	작업대 크기	
	장비 번호	가공 시간	준비 시간	가공 시간	준비 시간	가공 시간			준비 시간
1	1	12	30	16	50	33	40	800	1000
	2	11	50	15	60	34	20	700	2000
	3	10	40	17	50	32	30	800	1500
	4	13	40	18	30	31	30	800	2000
2	1	15	30	10	20	26	20	600	2000
	2	12	40	11	40	27	40	600	1200
	3	13	20	12	20	25	30	500	1500
	4	10	50	10	30	26	30	600	1000
	5	14	30	13	20	24	60	900	1500
3	1	24	60	26	50	42	40	1000	1500
	2	26	70	25	40	45	20	1100	2000
	3	23	80	27	20	40	50	1000	1200
	4	24	60	26	30	44	40	1100	1000
	5	25	70	28	40	39	30	1200	1500
	6	27	70	26	40	40	50	1100	1700
4	1	17	40	-	-	15	30	400	1700
	2	18	20	-	-	17	20	500	2000
	3	16	30	-	-	16	30	400	1200
	4	15	50	-	-	14	30	400	1000
5	1	7	30	8	20	10	10	500	1500
	2	9	20	10	10	8	20	300	2000
	3	8	20	9	20	9	30	300	1200
	4	8	10	8	30	10	30	400	1800
생산량	10		20		10				
부품size	1500		1700		1000				
남기	1100		1800		1600				

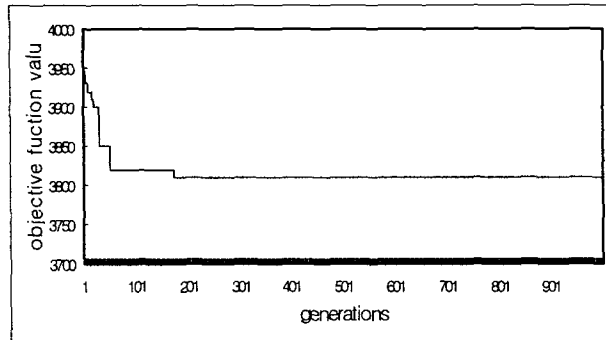
<표 2> 각 부품에 대한 자재이동시간

부품	From (j-1)	후보 장비	To(j)					
			j,1	j,2	j,3	j,4	j,5	j,6
1,3	1	1	20	10	30	10	20	
		2	10	20	20	30	10	
		3	30	10	10	20	30	
		4	20	30	10	10	20	
	2	1	10	30	20	10	10	20
		2	20	10	20	10	30	20
		3	30	10	10	20	10	30
		4	10	20	10	30	10	10
		5	20	30	20	10	10	30
	3	1	10	20	30	20		
		2	30	10	40	20		
		3	10	20	30	20		
		4	20	30	10	20		
		5	30	10	20	10		
		6	20	20	10	30		
	4	1	10	20	30	30		
2		20	10	20	10			
3		30	20	10	20			
4		20	30	10	30			
2	1	1	40	20	30	20	40	
		2	20	40	40	60	20	
		3	60	20	20	40	60	
		4	40	60	20	20	40	
	2	1	20	60	40	20	20	40
		2	40	20	40	20	60	40
		3	60	20	20	40	20	60
		4	20	40	20	60	20	20
		5	40	60	40	20	20	60
	3	1	100	110	120	100		
		2	120	100	130	110		
		3	110	120	100	120		
		4	130	120	130	140		
		5	120	130	110	100		
		6	120	110	100	120		

다음은 유전알고리즘의 절차에 따라 동일한 예제를 적용하였다. 실험에 사용되는 유전파라미터는 모집단의 크기, 교차변이율, 돌연변이율, 실험 종료조건으로 사용되는 세대수 등이 있다. 교차변이율은 교차변이 연산에서 새로운 모집단의 염색체 개수 중 평균적으로 몇 개가 교차에 참여하는가를 나타내고, 돌연변이율은 모집단의 인자(모집단의 염색체 수 × 염색체의 길이) 중 돌연변이를 만큼 돌연변이에 참여함을 의미한다. 또한 유전파라미터 값은 일반적으로 유전알고리즘 수행도에 영향을 미치지만 적용문제에 따라 서로 다르기 때문에 유전파라미터의 최적방법은 알려지지 않았다.

따라서 본 논문에서는 반복실험을 통해 평균적으로 가장 적당한 유전파라미터 값을 찾고, 그 값을 이용하여 실험을 수행하였다. 이때의 유전파라미터 값들은 모집단의 크기 20, 교차변이율 0.3, 돌연변이율 0.02이며, 반복 세대수는 1000으로 하였다. 실험결과는 대부분 100세대에서 200세대 사이에서 문제의 목적함수 값에 수렴하였고, 수렴 과정은 <그림 3>과 같다. 평가함수 값인 3810에 수렴할 때, 4개의 서로 다른 염색체를 얻을 수 있었다. 최적화 방법에 의한 최적해와 유전알고리즘에 의한 실험 결과는 <표 3>에 나타내었다.

보다 큰 문제에 대한 실험을 위해 자재이동시간, 작업준비시간, 생산량은 모든 부품에 대해 동일하다고 보고, 대상 부품 수를 5, 10, 15, 20으로 증가시켜 실험하였다. 실험은 5개의 장비군에 포함된 23대의 후보장비를 대상으로 <표 4>와 같이 주어진 부품 정보에 대해 최적화 방법과 제안된 유전알고리즘을 병행 실험하였다. 유전알고리즘을 이용한 실험은 첫 번째 예제로부터 얻은 유전파라미터를 그대로 사용하여 실험하였고, 최적화 방법은 부품 수가 적은 경우에 대해서는 해를 구할 수 있지만 문제의 크기가 커지면 해를 구하기 어려운 한계가 있었다. 유전알고리즘에 의한 실험에서 부품 수가 5, 10일 때는 최적화 방법에 의한 목적함수 값과 동일한 평가함수 값을 얻을 수 있었고, 부품 수 15, 20개에 대해서는 평가함수 값을 일관되게 제공하였다. 두 번째 예제에 대한 실험 결과는 <표 5>에 요약되었다.



<그림 3> 해의 수렴 예

<표 3> 최적화 방법과 유전알고리즘의 실험결과

목적 함수	최적화 방법		평가 함수	유전알고리즘	
	가공경로			가공경로	
3810	경로	부품1: 3(1) - 3(2) - 5(3) - 2(4) - 4(5) 부품2: 2(1) - 1(2) - 2(3) - × - 4(5) 부품3: 4(1) - 3(2) - 5(3) - 2(4) - 2(5)	3810	경로 1	부품1 : 3(1) - 3(2) - 5(3) - 2(4) - 4(5) 부품2 : 2(1) - 1(2) - 2(3) - × - 4(5) 부품3 : 4(1) - 3(2) - 5(3) - 3(4) - 2(5)
				경로 2	부품1 : 3(1) - 3(2) - 5(3) - 2(4) - 4(5) 부품2 : 2(1) - 1(2) - 2(3) - × - 4(5) 부품3 : 4(1) - 3(2) - 5(3) - 4(4) - 3(5)
				경로 3	부품1 : 3(1) - 3(2) - 5(3) - 2(4) - 4(5) 부품2 : 2(1) - 1(2) - 2(3) - × - 4(5) 부품3 : 4(1) - 3(2) - 5(3) - 2(4) - 2(5)
				경로 4	부품1 : 3(1) - 3(2) - 5(3) - 2(4) - 4(5) 부품2 : 4(1) - 2(2) - 1(3) - × - 2(5) 부품3 : 4(1) - 3(2) - 5(3) - 4(4) - 1(5)

<표 5> 실험 결과 (예제 2)

부품수	적용 기법	목적함수 값	가공경로의 수
5	최적화 방법	4110	1
	유전알고리즘	4110	8
10	최적화 방법	8210	1
	유전알고리즘	8210	66
15	유전알고리즘	12200	149
20	유전알고리즘	16540	181

이러한 실험 결과를 통해 제안된 유전알고리즘을 살펴보면, 문제 크기가 적은 경우는 최적화 방법에 의해 얻은 최적해와 동일한 평가함수 값에 수렴함을 확인할 수 있었고, 보다 큰 문제에 대해서도 일관된 해를 제공함을 알 수 있었다. 또한 최적화 방법에서는 하나의 가공경로를 제시하는 반면에 유전알고리즘에서는 복수 가공경로를 제시할 수 있었다.

<표 4> 각 부품에 대한 입력정보(예제 2)

부품	장비 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	장비 사용시간				작업대 크기
																						부품 수				
																						5	10	15	20	
1	1	150	100	200	170	180	140	150	190	250	150	130	140	170	160	230	190	140	230	170	150	600	1200	1800	2400	1000
	2	160	120	210	180	160	120	160	210	260	140	120	130	200	170	200	170	120	240	160	140	500	1000	1600	2400	2000
	3	140	130	190	160	190	130	150	210	240	150	130	160	210	150	190	160	130	220	140	130	600	1100	1700	2300	1500
	4	170	140	180	170	170	170	170	200	230	130	110	150	180	140	220	180	120	200	150	160	500	1100	1800	2300	2000
2	1	180	120	250	150	190	170	200	140	200	180	170	160	190	220	140	220	250	160	130	190	600	1200	1900	2500	2000
	2	160	100	270	140	200	180	190	130	190	190	180	170	180	210	130	230	240	140	140	140	700	1100	1800	2500	1200
	3	150	130	280	130	210	190	160	120	180	180	160	190	200	230	150	210	260	170	150	210	700	1200	1700	2500	1500
	4	150	140	290	140	190	160	190	140	200	160	170	200	210	240	160	240	270	160	120	190	600	1300	1800	2600	1000
	5	170	100	270	160	220	180	170	120	170	180	160	160	170	200	150	250	240	150	140	210	700	1200	1700	2500	1500
3	1	200	300	120	250	300	210	270	200	300	220	200	240	250	180	210	300	190	310	250	300	800	1700	2500	3400	1500
	2	210	310	140	240	310	220	260	210	310	240	210	270	260	190	230	310	200	280	260	310	900	1600	2400	3500	2000
	3	220	290	150	250	290	240	250	220	290	230	190	250	240	170	240	290	210	290	270	290	1000	1500	2500	3500	1200
	4	240	280	120	260	300	230	280	210	280	210	180	260	250	160	210	280	190	300	250	320	900	1700	2300	3500	1000
	5	210	300	150	230	320	210	260	230	300	240	190	270	230	170	220	300	220	300	280	300	800	1600	2500	3500	1500
	6	220	320	160	220	300	220	250	200	320	220	200	260	270	180	250	270	200	310	240	290	1000	1700	2400	3500	1700
4	1	160	170	120	140	200	170	150	160	180	150	160	140	170	130	150	170	190	170	150	170	600	1000	1700	2300	1700
	2	170	180	100	160	210	140	120	140	190	140	150	150	140	140	140	160	160	180	140	180	500	1100	1800	2200	2000
	3	150	190	110	170	220	150	130	150	200	130	170	130	150	120	170	180	180	170	160	180	600	1200	1700	2300	1200
	4	140	180	130	150	190	160	140	130	210	160	160	140	160	140	160	150	170	160	170	160	600	1200	1500	2300	1000
5	1	110	100	150	100	110	110	120	120	150	110	100	120	100	120	110	110	120	120	100	110	500	700	1200	1600	1500
	2	100	120	160	110	100	120	130	110	140	100	110	130	110	130	100	100	130	100	120	100	500	800	1000	1600	2000
	3	120	110	170	100	100	120	130	110	100	140	120	100	110	130	110	120	110	100	110	130	400	800	1200	1600	1200
	4	130	100	140	120	130	110	100	130	160	100	120	120	120	100	110	130	110	110	130	110	500	900	1100	1700	1800
부품크기	1000	1500	2000	1700	1800	1900	1500	1200	1500	1400	1700	2000	1600	1200	1500	1500	1800	1800	2000	1700	1800					
남기	1000	1000	1100	1000	1200	1000	1000	1000	1000	1200	1000	1000	1300	1000	1000	1000	1100	1000	1100	1000	1000					

6. 결론

본 논문에서는 계획기간 동안 생산될 전체 부품에 대한 가공시간, 자재이동시간, 작업준비시간의 합을 최소화하는 목적 하에 개개의 부품에 대한 납기, 각 장비의 가용시간, 부품의 크기와 장비의 작업대 크기를 고려하여 최적 가공경로를 결정하는 수리모델이 제시되었다.

또한 제시된 수리모델에 대한 해결 접근법을 위해 유전알고리즘에 의한 해법이 개발되었다. 예제를 통해 최적화 방법에 의해 얻은 최적해와 유전알고리즘에 의해 얻은 최적해를 비교한 결과는 동일함을 알 수 있었고, 큰 문제를 적용했을 때도 유전알고리즘에 의한 해의 탐색 결과가 일관되게 제공되었다. 또한 이 해법은 동일한 최적해를 갖는 여러 개의 가공경로를 제공하였다.

제시된 해법은 가공경로를 선정하는 시점에서 작업장 특성을 고려한 것으로 재 일정계획의 최소화와 생산성 향상에 기여할 수 있으리라 기대된다. 뿐만 아니라 공정계획자와 일정계획자에게 여러 개의 최적 가공경로를 제공하는 특징을 갖고 있으므로 일정계획의 유연성 제공과 생산현장의 상황변화에 능동적 대응이 가능하다.

참고문헌

- [1] 문치용, 김형수, 이상준, "CAPP에서 공정계획 선정을 위한 유전알고리즘 접근," [한국전문가시스템학회지], 4(1), pp.1-10, 1998.
- [2] Atmani A. and Lashkari R. S., "A Model of Machine-Tool Selection and Operation Allocation in FMS," *International Journal of Production Research*, 36(5), pp.1339-1349, 1998.
- [3] Egbelu P., "Route Selection and Flow Control in a Multi-Stage Manufacturing System with Heterogeneous Machine within Stages," *International Journal of Production Research*, 28(11), pp.2137-2155, 1990.
- [4] Funda S. S. and Gunduz U., "Parallel Machine Scheduling with Earliness and Tardiness Penalties," *Computers & Operations Research*, 26, pp.773-787, 1999.
- [5] Gen M. and Chen R., *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, 1996.
- [6] Glover F. and Woolsey E., "Converting the 0-1 Polynomial Programming Problem to a 0-1 Linear Program," *Operations Research*, 22(1), pp.180-182, 1974.
- [7] Goldberg D. E., *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [8] Hankins S. L., Wysk R. A. and Fox K. R., "Using a CATS Database for Alternative Machine Loading," *Journal of Manufacturing Systems*, 3(1), pp.115-120, 1984.
- [9] Modi B. K. and Shanker K., "Models and Solution Approaches for Movement Minimization and load Balancing in FMS with Machine, Tool and Process Plan Flexibilities," *International Journal of Production Research*, 33(7), pp.1791-1816, 1994.
- [10] Song S. and Choi J., "Optimization Analysis of Flexible Cellular Manufacturing: Route Selection and Determining the optimal Production Conditions for Ordered Products," *European Journal of Operation Research*, 69, pp.399-412, 1993.
- [11] Srihari K. and Greene T. J., "Alternate Routing in CAPP Implementation in a

- FMS," *Computers & Industrial Engineering*, 15(1-4), pp.41-50, 1988.
- [12] Rajamani D. and Adil G. K., "Machine Loading in Flexible Manufacturing Systems Considering Routing Flexibility," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 11(5), pp.372-380, 1996.
- [13] Tunali S., "Evaluation of Alternate Routing Policies in Scheduling a Job-Shop Type FMS," *Computers & Industrial Engineering*, 32(2), pp.234-250, 1997.
- [14] Zhou G. and Gen M., "Approach to Degree-Constrained Minimum Spanning Tree Problem Using Genetic Algorithm," *Engineering Design and Automation*, 3(2), pp.157-165, 1997.