

다단계 작업장에서의 가공경로 선정과 투입량 결정[†]

이규용* · 서준용* · 문치웅**

* 울산과학기술대 산업시스템경영과
** 한양대학교 정보경영공학과, RIET

Machining Route Selection and Determination of Input Quantity on Multi-Stage Flexible Flow Systems

Kuy-Yong Lee* · Jun-Yong Seo* · Chiung Moon**

* Department of Industrial System Engineering, Ulsan College
** Department of Information & Industrial Engineering, RIET, Hanyang University

This paper addresses a problem of machining route selection and determination of input quantity in a multi-stage flexible flow system with non-identical parallel machines. The problem considers a subcontracting, machining restraint, and machine yield. We develop a nonlinear programming with the objective of minimizing the sum of in-house processing cost and subcontracting cost. To solve this model, we introduce a single-processor parallel genetic algorithm (SPGA) to improve a weak point for the declined robustness of simple genetic algorithm (SGA). The efficiency of the SPGA is examined in comparison with the SGA for the same problem. In result of examination the SPGA is to provide the excellent solution than the solution of the SGA.

Keywords : machining route selection, non-identical parallel machines, genetic algorithm

1. 서 론

설계와 제조를 연결하는 공정계획(process planning)은 시간에 독립적인 분석단계(analyse phase)와 시간에 종속되는 선택단계(selection phase)로 구분할 수 있으며[10], 선택단계에서는 계획기간(planning period) 동안 사용 가능한 장비를 선택함으로써 부품의 가공경로를 선정한다. 가공경로는 일정계획에 중요한 입력정보로 사용되며, 생산에 직접적인 영향을 미치기 때문에 생산현장의 여러 요인들을 효율적으로 고려하여 선정하여야 한다.

다단계 작업장에서의 가공경로선정은 주어진 계획기간 동안 전체 부품에 대한 가공비용의 합을 최소화할 수 있도록 짧은 가공시간을 갖는 장비를 선택한다. 하지

만 각 가공단계에 포함된 개개의 장비가 서로 다른 수율(yield)을 갖는다면, 수율에 따라 각 가공단계에 투입되는 투입량(input quantity)에 차이가 있으므로 가공시간과 수율이 독립적으로 고려되어야 한다. 또한 계획기간 동안 각 장비의 가용시간이 부족할 경우 대안으로는 잔업과 외주(subcontracting)를 고려할 수 있으며, 장비의 작업대 크기와 부품크기의 관계인 가공제약(machining restraint)을 고려한 경로선정이 이루어져야 한다. 이러한 요인들을 고려한 가공경로선정은 일정계획의 유연성과 실행 가능한 가공경로를 제공할 수 있다.

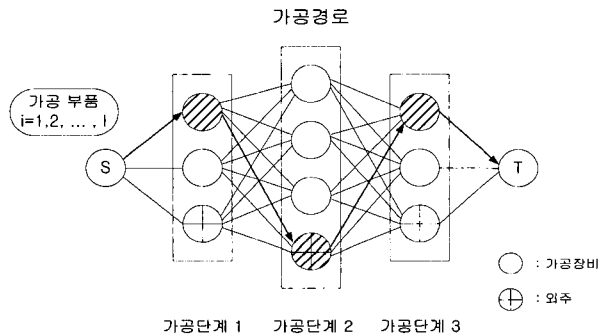
본 연구와 관련하여 수행된 기존연구를 살펴보면, Lee[12], Pentico[15], Sepehri et al.[16] 등은 단일장비를 갖는 다단계 작업장을 대상으로 재가공, 폐기, 확률적 수율 등을

[†] 본 연구는 2002년도 울산과학기술대 학술연구비에 의하여 수행되었음.

고려한 lot size 결정 문제를 다루었다. Kamien과 Li[8], Kogan과 Khmelnsky[9], Hua와 Banerjee[7] 등은 총괄생산 계획 분야에서 외주를 고려하였으며, Loerch 와 Muckstadt[13], Lee et al.[11] 등은 공정계획과 일정계획 분야에서 외주를 다루었다. 또한 대체경로를 생성하기 위해 예측할 수 없는 장비고장을 고려한 시뮬레이션 모델을 개발한 Tunali[18]의 연구와 가공시간을 확장하기 위한 방안으로 가공장비에 대한 가공속도를 조절함으로써 대체장비를 선정하는 수리모델을 개발한 Song[17]의 연구 등이 있다. 수율, 외주, 대체장비 등의 요인을 개별적으로 고려한 모델 개발은 이루어지고 있지만 이러한 요인들을 동시에 고려한 통합적인 모델은 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 이종병렬장비(non-identical parallel machines)를 갖는 다단계 작업장 환경에서 장비의 수율과 가공시간, 잔업, 외주, 가공제약을 고려한 가공경로 선정과 투입량을 결정하는 수리모델을 제시하고자 한다. 이 모델은 가공비용의 합을 최소화하는 목적 하에 비선형계획법으로 정식화하고, 단일프로세스 병렬유전알고리즘(single-process parallel genetic algorithm : SPGA)에 의해 해를 구하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 문제정의

다단계 작업장은 각 단계를 단일장비(single machine), 또는 병렬장비(parallel machines)로 구성되며, 병렬장비를 갖는 다단계 작업장은 동종병렬장비를 갖는 다단계 작업장과 이종병렬장비(non-identical parallel machines)를 갖는 다단계 작업장으로 나눌 수 있다. 이종병렬장비를 갖는 다단계 작업장은 각 가공단계에 포함된 유사한 성능을 지닌 하나 이상의 대체장비들로 구성되어 있으며, 작업장 모형은 <그림 1>과 같이 나타낼 수 있다. 이종병렬장비를 갖는 다단계 작업장 구조는 실제 제조환경에서 많이 찾아볼 수 있으나 모형화의 어려움 때문에 문제 해결에 많은 노력이 필요하다.



<그림 1> 이종병렬장비를 갖는 다단계 작업장 모형

이러한 작업장 환경에서 계획기간 동안 생산될 부품과 생산량이 결정되어 있는 경우 가공경로선정 문제는 다음과 같은 제약요인을 고려하여야 한다.

- (1) 각 가공단계를 구성하는 장비의 수율을 들 수 있다. 각 가공단계를 구성하는 대체장비의 수율은 장비의 노후화 정도에 따라 효율성과 정밀도가 떨어지는 경우에 발생하는 상황이며, 개개의 대체장비가 서로 다른 수율을 가질 경우 장비의 수율을 고려한 가공경로선정이 이루어져야 한다.
- (2) 각 가공단계에 포함된 대체장비의 성능을 들 수 있다. 대체장비는 서로 다른 성능을 가지기 때문에 동일한 부품을 가공하더라도 소요되는 가공시간이 서로 다를 수 있다. 또한 현재의 생산능력인 자가생산으로 계획기간 동안 요구되는 생산량을 충족시킬 수 없다면 잔업이나 외주를 고려할 수 있어야 한다.
- (3) 대체장비의 작업대 크기는 일정한 반면 가공 대상 부품의 크기는 부품에 따라 서로 다를 수 있기 때문에 이들의 관계인 가공제약을 고려한 가공경로 선정이 필요하다.

가공경로선정 문제는 이러한 요인들을 함께 고려함으로써 실행 가능한 가공경로를 선정할 수 있으며, 일정계획에 유연성을 제공할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 계획기간 동안 생산될 부품에 대해 대체장비의 가공시간과 잔업시간, 외주, 장비의 수율, 가공계약 등을 고려하여 전체 가공비용을 최소화하는 최적 가공경로와 고객의 요구량을 만족할 수 있도록 각 가공단계의 투입량을 동시에 결정하고자 한다.

3. 모델정식화

본 장에서는 개개의 부품에 대한 가공경로선정과 각 가공단계에 투입되는 투입량을 결정하기 위해 자가생산에 소요되는 장비의 가공시간, 가공계약, 장비의 수율, 외주를 고려한 수리모델을 정식화한다. 모델의 정식화를 위한 기본정보는 다음과 같다.

- (1) 잔업과 외주는 공정단위로 이루어진다.
- (2) 계획기간 동안 잔업시간은 알려져 있다.
- (3) 장비의 수율과 부품의 생산량은 알려져 있다.
- (4) 각 가공단계에서 발생한 불량품은 폐기한다.

또한 수리모델을 정식화하기 위해 사용될 기호는 다음과 같다.

[기호정리]

- i : 부품 인덱스 $i \in I$
 - j : 가공단계 인덱스 (가공공정) $j \in J_i$
 - k : 가공단계 j 에 속한 대체장비 인덱스 $k \in K_j$
 - J_i : 부품 i 가 거쳐가는 가공단계 수
 - K_j : 가공단계 j 에 속한 대체장비 수
 - p_{ijk} : 부품 i 가 가공단계 j 에 속한 대체장비 k 에서의 가공시간
 - v_i : 부품 i 의 생산 요구량
 - b_i : 부품 i 의 크기(size)
 - ab_{jk} : 가공단계 j 에 속한 대체장비 k 의 작업대 크기(table size)
 - act_{jk} : 계획기간 동안 가공단계 j 에 속한 대체장비 k 의 가용시간
 - xc_{ij} : 부품 i 에 대한 가공단계 j 의 작업을 정상 작업으로 처리할 때, 시간당 정상비용
 - oc_{ij} : 부품 i 에 대한 가공단계 j 의 작업을 잔업으로 처리할 때, 시간당 잔업비용
 - s_{ij} : 부품 i 에 대한 가공단계 j 의 작업을 외주 처리할 때, 소요시간
 - yc_{ij} : 부품 i 에 대한 가공단계 j 의 작업을 외주 처리할 때, 시간당 외주비용
 - r_{jk} : 가공단계 j 에 속한 대체장비 k 의 수율 (output/input)
 - L : 임의의 큰 수 (an arbitrary large positive number)
 - Q_{ij} : 가공단계 j 에 투입되는 부품 i 의 투입량
 - OT : 계획기간 동안 총 잔업(overtime) 가능시간
- $$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{부품 } i \text{가 가공단계 } j \text{의 대체장비 } k \text{에서 정상작업에 의해 처리된다.} \\ 0, & \text{그외} \end{cases}$$
- $$O_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{부품 } i \text{가 가공단계 } j \text{의 대체장비 } k \text{를 이용하여 잔업이 이루어진다.} \\ 0, & \text{그외} \end{cases}$$
- $$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{부품 } i \text{의 가공단계 } j \text{ 작업이 외주에 의해 처리된다.} \\ 0, & \text{그외} \end{cases}$$

가공경로선정과 각 가공단계의 투입량 결정을 위한 수리모델의 목적함수는 계획기간 동안 생산될 모든 부품에 대한 자가생산비용과 외주비용의 합을 최소화하는 것이며, 가공제약, 생산량, 수율, 가용시간 등을 고려한다. 이 모델은 외주를 고려함으로써 항상 실행 가능해를 제공하는 특징이 있으며, 다음과 같이 비선형계획법으로

표현된다.

[수리모델]

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

s.t.

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

$$Q_{ij} (\sum_{k \in K_j} r_{jk} (X_{ijk} + O_{ijk}) + Y_{ij}) \geq Q_{i(j+1)} \quad \forall i \in I, j \in J_i - 1 \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$Q_{ij} (\sum_{k \in K_j} r_{jk} (X_{ijk} + O_{ijk}) + Y_{ij}) \geq v_i \quad \forall i \in I, j = J_i \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\sum_{i \in I} p_{ijk} Q_{ij} X_{ijk} \leq act_{jk} \quad \forall j \in J_i, k \in K_j \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_j} p_{ijk} Q_{ij} O_{ijk} \leq OT \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\sum_{k \in K_j} ab_{jk} (X_{ijk} + O_{ijk}) + LY_{ij} \geq b_i \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$Q_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$X_{ijk}, O_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J_i, k \in K_j \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad \dots \dots \dots (9)$$

위의 수리모델에서 식(1)은 부품 i 를 가공하기 위해 가공단계 j 에서 정상작업, 잔업, 외주 중에서 하나를 선택하는 조건이다. 식(2)는 개개의 부품 i 에 대한 가공단계 j 에 투입되는 투입량이 가공단계 $j+1$ 의 요구량 보다 크거나 같아야하는 조건이며, 식(3)은 마지막 가공단계의 투입량이 부품 i 의 생산량 v_i 를 만족해야 하는 조건이다. 이때, Q_{ij} 는 마지막 가공단계에서 역순으로 계산되어진다. 식(4)는 정상작업이 각 가공단계에 포함된 대체장비의 가용시간 범위 내에서 이루어져야 하는 제약이며, 식(5)는 잔업에 소요되는 시간이 총 잔업시간을 초과할 수 없다는 조건이다. 식(6)은 가공제약 조건으로써 각 가공단계에 속한 대체장비의 작업대 크기가 가공물의 크기 보다 모두 작으면 그 공정은 외주 처리되는 조건이다. 식(7)은 각 가공단계에 투입되는 부품 i 의 투입량으로써 정수형 변수이며, 식(8)과 (9)는 0, 1의 값을 갖는 변수이다.

4. 단일프로세스 병렬유전알고리즘

단순유전알고리즘(simple genetic algorithm : SGA)은 Holland에 의해 연구되기 시작하였으며, 복잡한 목적함수와 다양한 제약조건을 갖는 조합최적화(combinational optimization) 문제를 해결하는데 적합한 기법으로 알려져 있다[5]. 또한 가공경로선정 문제에서 유전알고리즘은 마지막 세대의 적응도 값(fitness value)에 대응되는 다양한 염색체(chromosome)가 모집단에 존재할 수 있으며, 이들 염색체는 서로 다른 가공경로로써 사용자에게 복수가공경로를 제공한다.

본 논문에서는 단일 CPU 상에서 구동되는 단일프로세스 병렬유전알고리즘(single-process parallel genetic algorithm : SPGA)을 이용하여 가공경로선정과 투입량 결정 문제를 해결하도록 한다.

4.1 SPGA의 구조

SGA를 문제에 적용할 때 고려되어야 하는 중요한 2가지 요소는 모집단의 다양성과 계산시간의 부담이라고 할 수 있다. 이러한 문제는 여러 대의 컴퓨터로 구성된 병렬프로세스를 사용하여 계산시간을 분산시키는 병렬유전알고리즘(parallel genetic algorithm)이 사용되고 있다[6]. 그러나 현실적으로 병렬프로세스를 구성하는 것이 어렵기 때문에 병렬유전알고리즘을 응용하여 컴퓨터 한 대에서 유전알고리즘이 수행되도록 설계된 것이 SPGA이다. SPGA는 큰 모집단(population)을 몇 개의 부분모집단(subpopulation)으로 나누어, 각 부분모집단에 대해 일정한 세대 혹은 임의의 세대 동안 SGA를 수행한 정보를 각 부분모집단간에 주고받는 절차에 의해 수행되는 구조로 이루어져 있다. SPGA의 절차는 다음과 같다.

[SPGA 절차]

- 단계 1 : 실행 가능한 초기 모집단을 생성한다.
- 단계 2 : 초기 모집단을 n개의 부분모집단으로 나눈다.
- 단계 3 : 종료조건을 만족하면 유전알고리즘 수행을 종료한다.
- 단계 4 : 각각의 부분모집단에 대해 SGA의 유전연산자인 교차변이와 돌연변이를 수행하여 자식 염색체를 생성한다.
- 단계 5 : 부분모집단에서 생성된 자식염색체를 평가절차에 따라 평가하고 선택전략을 통해 새로운 부분모집단을 생성한다.
- 단계 6 : 이주조건을 만족하면 단계 7을 수행하고, 그렇지 않으면 단계 4로 돌아간다.
- 단계 7 : 부분모집단간에 정보를 주고받는 이주전략

을 수행한다.

단계 8 : 단계 3으로 돌아가서 종료조건을 체크한다.

4.2 해의 표현과 초기화

유전알고리즘을 수행하기 위해 먼저 접하게 되는 문제는 염색체를 구성하는 해의 표현이다. 해의 표현은 해결하고자하는 문제에 의존적이며, 이진수, 정수, 실수, 기호, 난수 키(random key) 등이 사용되고 있다[2, 3]. 본 논문에서는 전체 부품의 가공비용의 합이 최소가 되도록 개개의 부품에 대한 가공경로를 선정하는 문제이다. 개개의 부품에 대한 가공경로는 각각의 가공단계에 속한 장비들 중에서 하나의 장비를 경유하게 되며, 외주도 하나의 장비로 처리된다. 모집단의 s번째 염색체를 C_s 라할 때, 염색체 구조는 다음과 같다.

$$C_s = \{ \text{부품 1} \quad \text{부품 2} \quad \dots \quad \text{부품 } I \}$$

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

예를 들어 부품 1은 3개의 가공단계를 경유하게 되는데, 이때 각 가공단계에 속한 대체장비들로부터 2, 3, 5번 대체장비가 가공장비로 선택된 것을 의미하며, 이때 5번 대체장비가 특정 가공단계에서 마지막 대체장비라면 외주를 의미한다. 이렇게 생성된 하나의 염색체는 수리모델에서 제시된 제약조건을 만족하는 실행 가능한 해(feasible solution)가 되어야 한다. 실행가능한 해를 얻기 위한 방안으로는 벌금함수법(penalty function method), 수정알고리즘(repair algorithm), 변수제약법(variable restriction method) 등을 사용할 수 있으나[5], 본 문제에서는 수정알고리즘에 기초한 수정절차를 수행함으로써 실행 가능한 모집단을 구성하겠다. 이 과정은 교차변이와 돌연변이에서도 사용된다.

[Reparing Procedure]

- 단계 1 : 특정 가공단계에 속한 대체장비 k의 가용시간에 대한 제약을 검색한다. 이 경우는 특정 가공단계에 속한 대체장비 k에 여러개의 부품이 할당된 경우인데, 대체장비 k에 할당된 부품 중에서 임의의 부품 하나를 선택하고 이 부품에 대해 그 가공단계에 속한 다른 장비를 선택하도록 함으로써 대체장비 k의 가용시간 범위를 초과하지 않도록 인자를 수정한다.
- 단계 2 : 다음은 잔업을 위한 대체장비 선택에 대한 제약을 검색한다. 이때 총 잔업시간을 초과할 경우, 잔업에 참여하는 장비 중에서 임

의로 하나를 선택하여 외주 인자로 수정함으로써 산업에 참여하는 장비들의 가공시간 합이 총 산업시간을 초과하지 않도록 한다.

단계 3 : 가공물과 대체장비간의 가공제약을 위배하는 인자를 검색하고, 이 제약을 위반하는 인자는 임의 생성된 인자와 교체한다.

단계 4 : 모든 제약조건을 만족하는 염색체가 되면 염색체 수정절차를 종료한다.

4.3 적응도 평가와 선택

적응도 평가는 생존에 대한 적응척도로서 평가함수가 사용된다. 평가함수에 의해 모집단을 구성하는 염색체를 평가하고, 이렇게 평가된 평가함수 값에 의해 다음 세대에 생존할 염색체를 선별하게 된다. 평가함수는 제시된 수리모델의 목적함수를 사용한다. 본 논문에서 다루는 문제의 목적함수는 각 대체장비의 수율에 따라 각 가공 단계에 투입되는 투입량이 변하게 됨으로 다음과 같은 평가절차에 따라 각 염색체에 대한 적응도 평가를 수행한다.

[Evaluation Procedure]

단계 1 : 적응도 평가에 참여하는 하나의 염색체를 선택한다.

단계 2 : 선택된 염색체에 대해 가공단계 j 에 투입되는 부품 i 의 투입량 (Q_{ij})은 마지막 단계에서 역순으로 계산한다. 즉, 마지막 단계 투입량은 마지막 단계에서 선택된 장비의 수율로 나누어 계산하고, 이때 계산된 값이 소수점을 포함할 경우 올림으로 처리한다. 같은 방법으로 첫 번째 단계까지 역순으로 투입량을 계산한다.

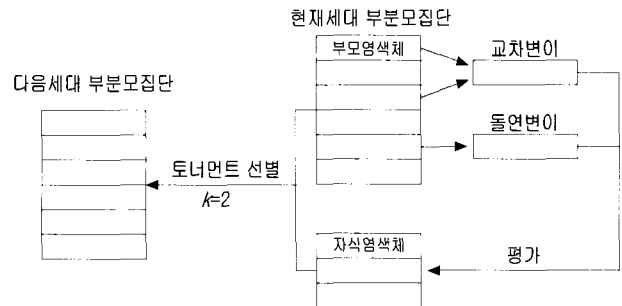
단계 3 : 수리모델의 목적함수에 의해 평가함수 값을 계산한다.

단계 4 : 평가에 참여하는 모든 염색체가 평가되면 이 절차를 종료한다.

선택전략은 각 염색체의 평가함수 값을 기준으로 다음 세대에 생존할 염색체를 결정하는 방법이다. SPGA에 사용되는 부분모집단의 크기는 큰 모집단을 부분모집단 수로 나누어 구성하기 때문에 적은 염색체 개수로 선택 단계를 수행하게 된다. 이러한 경우 중복해서 선택되는 염색체 수가 많아지기 때문에 조기 수렴할 가능성이 증가하게 된다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 교차변이와 돌연변이에 의해 생성된 자식염색체와 현재의

부분모집단에 있는 염색체 수를 합쳐서 토너먼트 선택 전략을 사용한다. 토너먼트 선택에서는 k 개의 염색체로 구성된 개개의 그룹에서 적응도가 가장 좋은 염색체 1개를 선택하며, $k=2$ 를 사용한다. 이들의 관계는 <그림 2>와 같이 나타낼 수 있다[4].

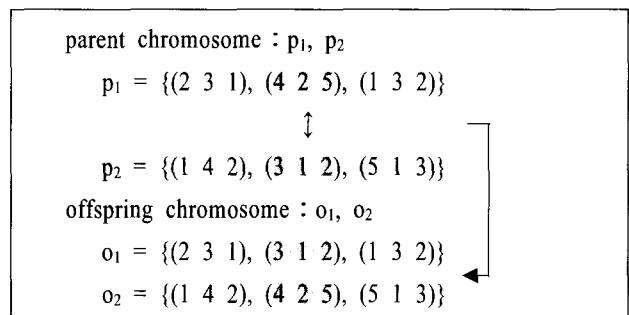


<그림 2> SPGA를 위한 선택과정

4.4 유전연산자

유전연산자는 유전알고리즘의 성능에 많은 영향을 미치는 것으로 교차변이(crossover)와 돌연변이(mutation)가 있다. 교차변이는 부모의 좋은 형질이 가능한 파괴되지 않고 자식에게 상속될 수 있어야 한다. 이것은 보다 좋은 해를 탐색하기 위한 방법이고, 적용 문제에 따라 많은 교차변이 방법이 개발되어 있다[5]. 또한 돌연변이는 염색체에 미세한 변화를 줌으로써 지역적 최적점에서 연속적인 해의 탐색을 배제하고, 탐색공간의 다양성을 제공하는 방법이다[14].

교차변이는 염색체 구조와 밀접한 관계가 있으며, 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 3>은 3개의 부품에 대한 교차변이를 나타낸 것이다.



<그림 3> 그룹교차에 의한 교차변이의 예

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, 전체 인자개수]의 범위를 갖는 정수를 돌연변이 시킬 인자개수만큼 랜덤하게 생성한다. 생성된 번호의 위치에 해당되는 인자는 새롭게 생성된 인자와 교체한다. <그림 3>에서 p_1 이 돌연변이를 위해 선택된 염색체라고 할 때, 랜덤하게 선택된 인자의 위치가 두 번째 인자그룹의 첫 번째 인자가 4라고 하자. 새롭게 생성된 인자가 1이라면, 새로운 자식염색체는 다음과 같이 얻어진다.

$$p_1 = \{(2 \ 3 \ 1), (4 \ 2 \ 5), (1 \ 3 \ 2)\}$$

$$\downarrow$$

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

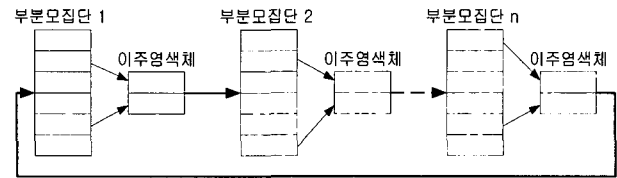
4.5 이주전략

이주(migration)는 각각의 부분모집단에 대해 SGa를 수행하다가 이주주기(migration interval)를 만족하면 이웃하는 부분모집단 간에 유용한 정보(염색체)를 주고받는 과정(process)을 의미한다. 이웃하는 부분모집단의 연결형태는 완전연결 구조, 원형연결구조, 2차원배열구조 등이 있다[1]. 이주연산은 유용한 염색체를 보내고 받기 위해 이주시킬 염색체의 선택(selection), 부분모집단으로 이주된 염색체와 기존 염색체와의 대체방법 등에 대한 정의가 필요하다. 또한 이주주기, 이주율(migration rate) 혹은 이주개체 수, 부분모집단의 수와 부분모집단의 크기 등의 이주파라미터(migration parameter)를 결정해야 한다

본 논문에서는 부분모집단간의 연결을 위해 <그림 4>와 같은 원형연결구조를 사용하며, 이주시킬 염색체의 선택은 평균적응도 보다 높은 염색체 중에서 임의로 선택한다. 선택된 염색체는 이웃하는 부분모집단으로 이주시키고, 이주시킨 염색체 수만큼 이웃하는 부분모집단으로부터 염색체를 받아들인다. 이웃하는 부분모집단으로부터 받은 염색체를 기존의 염색체와 대체시키는 방법은 기존의 염색체 중에서 적응도가 가장 낮은 염색체와 1:1로 대체하는 방법을 사용하고자 한다. 이와 같은 전략은 우수한 정보를 이웃하는 부분모집단에 제공할 수 있으며, 풀(pool)을 사용하지 않는 이점이 있다.

또한 SPGA의 성능은 이주파라미터(migration parameters)에 의해 많은 영향을 받는다. 그 예로 이주주기가 너무 길면 각각의 부분모집단의 어떤 값에 수렴한 후 염색체 이주가 이루어지는 경우가 발생할 수 있고, 이주율이 높은 경우 부분모집단의 독립적인 진화를 방해하

는 결과를 초래할 수도 있다. 따라서 실험을 통해 이주주기와 이주율을 결정하겠다.



<그림 4> SPGA의 원형연결구조

5. 실험 및 분석

실험순서는 먼저 작은 규모의 문제에 대해 최적화 방법으로 목적함수 값을 구하고, 이 목적함수 값을 이용하여 유전파라미터인 모집단 크기, 교차변이율, 돌연변이율과 이주파라미터인 이주주기, 부분모집단의 수와 크기를 반복실험을 통해 설정하고자 한다. 다음은 규모가 큰 문제에 대해 최적화방법, SGa, SPGA에서 얻어진 해를 비교함으로써 본 논문에서 제안된 SPGA의 유효성을 보이도록 하겠다.

<표 1> 각 부품종류에 대한 가공정보(예제 1)

부품 종류	1		2		3		4		5		장비 수율	장비 가용 시간	작업 대 크기	
	단 계	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	13	15	17	19	16	17	0.98	600	1500
	2	14		19		12		18		13		0.92	700	1700
	3	17		17		14		16		14		0.95	500	1600
	4	16		16		15		19		15		0.91	800	1800
2	1	17	18	17	20	20	24	20	24	18	22	0.90	400	1700
	2	14		16		16		23		20		0.93	500	1400
	3	16		20		20		19		20		0.96	300	1500
	4	18		18		17		20		21		0.94	400	1600
	5	15		19		18		22		19		0.92	700	1800
3	1	11	12	10	13	14	14	11	13	12	14	0.89	500	1600
	2	12		13		11		13		10		0.90	200	1700
	3	10		12		13		12		14		0.92	400	1800
	4	12		11		12		10		11		0.88	300	1500
생산량	10		15		20		15		20					
부품 size	1500		1600		1700		1400		1700					

예제 1은 3개의 가공단계를 거쳐 가공되는 5가지 종류의 부품을 가공하기 위해 요구되는 가공경로, 각 가공 단계에 투입되는 투입량, 외주정보 등을 동시에 결정해야 하는 작은 규모의 문제이다. <표 1>은 이 문제를 해결하기 위한 개개의 부품에 대한 가공정보를 보여준다.

예제 1에서는 문제의 단순화를 위해 잔업을 고려하지 않았으며, 개개의 부품을 가공하기 위해 정상작업비용과 외주비용은 가공시간에 1, 2를 곱하여 각각의 가공비용으로 선정하였다. 목적함수 값은 LINGO 소프트웨어를 사용하여 4945를 얻었다. 개개의 부품에 대한 가공경로와 각 가공단계에 투입될 투입량은 <표 2>와 같다.

<표 2> LINGO에 의한 실험결과(예제 1)

부품종류	가공경로	각 가공단계의 투입량
1	1X(1)-5X(2)-3X(3)	13(1)-12(2)-11(3)
2	4X(1)-1X(2)-1X(3)	21(1)-19(2)-17(3)
3	2X(1)-S(2)-3X(3)	24(1)-22(2)-22(3)
4	3X(1)-4X(2)-1X(3)	20(1)-19(2)-17(3)
5	2X(1)-5X(2)-S(3)	24(1)-22(2)-20(3)

부품종류 1의 가공경로 중 5X(2)는 정상작업(X)에 의해 가공단계 2에 속한 대체장비 5에서 가공되는 것을 의미하고, 이때 투입량은 12이다.

유전알고리즘에서 사용되는 유전파라미터의 값은 실험 수행도에 많은 영향을 미치지만 적용문제에 따라 유전파라미터 값이 서로 다르기 때문에 반복실험을 통해 적합한 이들의 값을 찾고자 한다. 유전파라미터 값에 대한 실험조건은 다음과 같이 설정하였다.

- 모집단의 크기 : 20, 30, 40, 50
- 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 LINGO 소프트웨어에 의해 얻은 최적해(4945)에 도달되는 소요시간을 20회씩 실험하였다. 이 실험에서 얻은 유전파라미터는 모집단 크기 30, 교차변이율 0.3, 돌연변이율 0.04로 설정하였고, 실험 결과를 정리하면 <표 3>과 같다.

<표 3> 유전파라미터에 대한 실험결과

모집단수	교차변이율	돌연변이율	소요시간(초) (평균)
20	0.3	0.03	21
30	0.2	0.05	20
30	0.3	0.04	19
40	0.2	0.04	23
40	0.3	0.03	21
50	0.1	0.04	26

다음은 SGA의 강건성(robustness)을 개선하기 위해 제안된 SPGA에 대한 이주파라미터의 값을 결정하고자 한다. 이주파라미터에 대한 실험은 모집단의 크기, 부분모집단의 크기, 이주주기, 이주율을 조합조건으로 하여 LINGO 소프트웨어에서 얻은 최적해(4945)에 도달되는 소요시간을 각 조합조건 마다 10회 반복 측정하였다. 각각의 실험조건은 다음과 같으며, 부분모집단 크기 15는 모집단 크기 30, 45, 60과 조합되고, 부분모집단 크기 20은 모집단 크기 40, 60과 조합되도록 하였다.

- 모집단 크기 : 30, 40, 45, 50, 60
- 부분모집단 크기 : 10, 15, 20
- 이주주기 : 4, 6, 8, 10, 12
- 이주율 : 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45

이 실험에서 이주파라미터는 모집단의 크기 30, 부분모집단의 수 3, 이주주기 4, 이주율 0.35로 설정하였고, 실험결과는 <표 4>에 정리하였다.

<표 4> 이주파라미터에 대한 실험결과

모집단의 크기	부분모집단의 크기	이주주기	이주율	소요시간(초) (평균)
30	10	4	0.35	24
30	15	4	0.35	38
40	10	4	0.35	29
40	20	4	0.25	45
45	15	4	0.40	33
50	10	4	0.30	39
60	10	4	0.25	35
60	15	4	0.35	38
60	20	4	0.40	36

다음 실험은 제안된 SPGA, SGA, 최적화방법을 비교하기 위해 예제 1 보다 큰 문제(예제 2)를 적용하였다. 예제 2는 5개 가공단계에 포함된 24대의 대체장비로 구성된 작업장을 대상으로 25가지 종류의 부품을 가공한다. 예제 2에 대한 가공정보는 <표 5>에 나타내었으며, 정상작업비용과 외주비용은 가공시간에 1과 2를 곱하여 각각의 가공비용으로 하였다.

최적화 방법에서는 부품종류 수가 3, 5, 7일 때 최적해를 얻을 수 있었으나, 그 이상의 부품종류 일 때는 컴퓨터 메모리 때문에 최적해를 얻을 수 없었다. 그러나 LINGO 소프트웨어는 Best IP라는 근사해를 제공하기 때문에 SGA와 SPGA에서 제공되는 평가함수 값과 비교할 수 있었다.

유전알고리즘에 의한 실험은 부품종류 수를 3, 5, 7, 10, 12, 15, 17, 20, 22, 25로 하여 총 문제 10개를 구성하였으며, 각 문제에 대해 20회씩, 매회 5000세대 실험하였다. SGA에 의해 얻은 평가함수 값은 평균하였고, SPGA에 의해 얻은 평가함수 값은 일관된 수렴 값이다. 실험결과는 <표 6>과 <표 7>에 정리하였다.

<표 6> 최적화 방법과 유전알고리즘에 의한 실험결과

부 품 종류 수	최적화 방법	SGA	SPGA	
	목적함수 값	평가함수 값	평가함수 값	외주비용
3	5046	5046	5046	0
5	9069	9069	9069	0
7	12145	12145	12145	0

<표 7> LINGO에 의한 근사해와 유전알고리즘에 의한 실험결과

부 품 종류 수	LINGO에 의한 근사해	SGA	SPGA	
		평가함수 값	평가함수 값	외주비용
10	19094	17586	17543	260
12	22412	21432	21390	530
15	27256	26460	26267	530
17	30990	29315	29073	1310
20	38174	35348	34580	1310
22	41035	39242	29123	1310
25	45727	45559	45531	1310

실험결과에 따르면 최적화 방법 보다 SGA, SPGA가 보다 우수한 해를 제공하였다. 그리고 제안된 SPGA는 SGA 보다 더 좋은 해를 일관되게 제공하였다. 이것은 SPGA의 강건성이 SGA에 비해 우수함을 의미한다.

6 결 론

본 논문에서는 이중병렬장비를 갖는 다단계 작업장을 대상으로 계획기간 동안 생산될 부품에 대해 계획기간 동안 개개 장비의 가용시간과 잔업시간, 가공제약, 외주, 장비의 수율을 고려한 가공경로선정과 투입량 결정 문제를 다루었다. 가공경로선정과 투입량 결정문제에서 다양한 요인을 고려한 것은 이중병렬장비를 갖는 다단계 작업장의 일반적인 상황을 반영한 것으로 본 논문의 특징이라고 할 수 있으며, 유전알고리즘의 강건성을 개선하기 위해 SPGA를 제안하였다.

이 문제는 비선형계획법을 이용하여 정식화하였으며, 문제의 해를 구하기 위해 최적화 방법, SGA, SPGA를 적용하였다. 문제 규모가 작은 경우에는 최적화 방법, SGA, SPGA 모두 우수한 해를 제공하였으나, 문제 규모가 커짐에 따라 제안된 SPGA가 최적화 방법과 SGA 보다 더 우수한 해를 제공하였다. 이것은 SPGA가 SGA에 비해 강건성이 개선되었음을 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서 제시된 모델과 해법은 최적 혹은 차선의 가공경로와 외주선정 및 가공경로에 따라 각 가공단계에 투입되는 투입량을 동시에 결정한다. 이와 같은 정보는 생산현장의 합리적인 통제수단뿐만 아니라 지원 부서에서도 필요한 정보로 활용된다.

참고문헌

- [1] 김여근, 윤복식, 이상복, [메타휴리스틱], 영지문화사, 1997.
- [2] Bean J. C., "Genetic Algorithms and Random Keys for Sequencing and Optimization," *ORSA Journal on Computing*, 16(2), pp.154~160, 1994.
- [3] Cheng R., Gen M. and Tsujimura Y., "A Tutorial Survey of Job-Shop Scheduling Problems Using Genetic Algorithms- I Representation," *Computers and Industrial Engineering*, 30(4), pp.983~997, 1996.
- [4] Cheng R., Gen M. and Tozawa T., "Minmax Earliness / Tardiness Scheduling in Identical Parallel Machine System Using Genetic Algorithms," *Computers and Industrial Engineering*, 29(1-4), pp.513~517, 1995.
- [5] Gen M. and Cheng R., *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, 1996.
- [6] Hämmäläinen T., Klapuri H., Saarinen J., Ojala P. and Kaski K., "Accelerating Genetic Algorithm Computation in Tree Shaped Parallel Computer," *Journal of Systems Architecture*, 42(1), pp.19~36, 1996.
- [7] Hua Z. and Banerjee P., "A Model for Line Capacity Design for PWB Assembly Systems," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 16, pp. 241~257, 2000.
- [8] Kamien M. I. and Li L., "Subcontracting, Coordination, Flexibility, and Production Smoothing in Aggregate Planning," *Management Science*, 36(1), pp.1352~1363, 1990.
- [9] Kogan K. and Khmelnitsky E., "An Optimal Control Method for Aggregate Production Planning in Large-Scale Manufacturing Systems with Capacity Expansion and Deterioration," *Computers and Industrial Engineering*

- ing, 28(4), pp.851~859, 1995.
- [10] Larsen N. E., "Method for Integration of Process Planning and Production Planning," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 6(1), pp.152~162, 1993.
- [11] Lee D. H., Lim S. K., Lee G. C., Jun H. B. and Kim Y. D., "Multi-period part selection and loading problems in flexible manufacturing systems," *Computers and Industrial Engineering*, 33(3-4), pp.541~544, 1997.
- [12] Lee H. L., "Input Control for Serial Production Lines Consisting of Processing and Assembly Operations with Random Yields," *Operations research*, 44(3), pp.464~468, 1996.
- [13] Loerch A. G. and Muckstadt J. A., "An Approach to Production Planning and Scheduling in Cyclically Scheduled Manufacturing Systems," *International Journal of Production Research*, 32(4), pp.851~871, 1994.
- [14] Michalewicz Z. and Janikow C. Z., "Handling Constraints in Genetic Algorithms," Proceeding of the 4th International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, pp.151~157, 1991.
- [15] Pentico D. W., "Multistage Production System with Random Yield : Heuristics and Optimality," *International Journal of Production Research*, 32(1), pp.2455~2462, 1994.
- [16] Sepehri M., Silver E. A. and New C., "A Heuristic for Multiple Lot Sizing for an Order under Variable Yield," *IIE Transactions*, 18, pp.63~69, 1986.
- [17] 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 Operations Research*, 69, pp.399~412, 1993.
- [18] Tunali Semra, "Evaluation of Alternate Routing Policies in Scheduling a Job-shop Type FMS," *Computers and Industrial Engineering*, 32(2), pp.243~250, 1997.