

## 수요가 불확실한 환경에서 대체공정계획을 고려한 셀형제조시스템 설계

### Design of Cellular Manufacturing System with Alternative Process Plans under Uncertain Demand

고창성\* · 이상현\*\* · 이양우\*\*\*

Chang Seong Ko\* · Sang Hun Lee\*\* · Yang Woo Lee\*\*\*

#### Abstract

Cellular manufacturing system (CMS) has been recognized as an alternative to improve manufacturing productivity in conventional batch-type manufacturing systems through reducing set-up times, work-in-process inventories and throughput times by means of group technology. Most of the studies on the design of CMS assumed that each part has a unique process plan, and that its demand is known as a deterministic value despite of the probabilistic nature of the real world problems.

This study suggests an approach for designing CMS, considering both alternative process plans and uncertain demand. A mathematical model is presented to show how to minimize the expected amortized and operating costs satisfying these two relaxations. Four heuristic algorithms are developed based on tabu search which is well suited for getting an optimal or near-optimal solution. Example problems are carried out to illustrate the heuristic algorithms and each of them is compared with the deterministic counterpart.

#### 1. 서론

셀형 제조시스템은 그동안 전통적인 배치형 제조시스템에서 Group Technology 기법을 통해 작업준비시간(Set-up Time) 단축, 재공품 재고(Work-in-process Inventory)의 축소 및 작업소요시간(Throughput Time)을 단축시킬 수 있게 함으로써 생산성을 향상시키는 제조시스템의 형태로 부각되어 국내외에서 많은 연구가 수행되었다.

즉, 셀형 제조시스템은 부품과 기계간의 유사성(Similarity)을 분석하여 복잡하고 큰 규모로 인해 통제 및 조정이 매우 힘든 제조시스템을 최소의 물류비용을 갖는 개별 Sub-제조시스템(Manufacturing Cell)로 분리함으로써 전술한 장점을 얻게 하는 제조시스템이다.

이 분야의 연구형태를 분류하면 크게 3가지 단계의 분야로 구분 정리할 수 있다.

첫 분야는 가공부품의 필요 공정계획을 고려하여 셀형

\* 경성대학교 산업공학과

\*\* (주)천일모터프레이트

\*\*\* 부산대학교 산업공학과

제조시스템에 투입될 소요 기계의 형태 및 댓수를 결정하는 것이며, 두번째 분야는 기 결정된 기계를 가공부품의 특성을 고려하여 어떻게 각 기계 및 부품을 각 Manufacturing Cell에 할당할 것인가 (Cell Formation Problem)하는 연구 분야이다. 마지막으로는 Cell Formation이 끝난 이후 불가피 발생하는 애로기계 (Bottleneck Machines) 또는 애로부품 (Bottleneck Parts)를 어떻게 처리할 것인가 즉 애로기계의 추가 구입 또는 애로부품의 하청 등을 취급하는 연구이다 (Logendran 1992). 그간의 셀형 제조시스템의 연구형태를 조사하면 기 수행 연구의 약 80%가 두번째 분야인 Cell Formation에 관한 연구였다. 그러나, 최근의 연구를 분석하면 나머지 2 분야에 대해서 특히 첫 분야에 관해 활발한 연구가 수행되고 있다. 셀형 제조시스템을 최초 설계시부터 가공부품의 공정계획을 면밀히 분석하여 최적의 기계 형태 및 소요 댓수를 산정함으로써 이후 발생할 수 있는 불필요한 재투자 및 재배치 등의 문제를 처음부터 방지할 수 있도록 하자는 목표 하에 많은 연구가 수행되고 있다. 본 연구 역시 첫 분야의 연구로서 가공부품이 대체공정계획 (Alternative Process Plans)을 갖는 상황에서 가공부품에 대해 발생할 수요가 확실적인 값을 갖는 경우에 각 부품에 적절한 공정계획을 결정하며 아울러 소요 기계 형태 및 댓수를 결정하는 연구이다.

이 분야의 초기 연구에서는 각 부품이 유일공정계획 즉 각 부품에 대한 가공작업은 한 기계에서만 수행된다는 것을 가정했으나, 실제적인 생산환경에서는 각 부품이 복수의 공정계획 즉 각 부품은 여러 대안 기계들 중에서 가공작업이 가능하다. 따라서, 최근에는 대체공정계획을 고려한 연구가 이 분야의 핫 이슈로 부각되어 많은 연구가 수행되고 있다 (Kusiak 1987, Choobineh 1988, Rajamani 외 2인 1990, Logendran 외 2인 1994). 특히, Rajamani 외 2인의 연구에서는 기어가공에 대한 예시를 통해 이에 대해 중요성을 잘 설명을 하고 있으며, 또한 예산 제약과 기계 용량을 주요 제약조건으로 모형을 제시했다. 이에 반해 Logendran 외 2인은 각 가공부품에 대해 계획기간 동안 안정된 부품 수요를 갖는다면 별도의 예산제약을 부가하지 않는다는 가정하에 보다 현실적 접근방법을 제시했다.

그리고, 거의 대부분의 셀형 제조시스템에 대한 연구

에서는 기본적으로 가공부품의 수요에 대해 확정적 (Deterministic)인 값을 가정하고 있다. 그러나, 실제 산업체에서는 부품 수요에 대한 정보는 불확실한 값을 가지고 있기 때문에 이를 고려한 연구가 절실히 요구되고 있다. Cell Formation 분야에 확률적 수요를 고려한 연구로는 Seifoddini(1990)가 거의 유일하다.

따라서, 본 연구에서는 보다 실제적인 생산환경을 반영시키기 위해 가공부품이 복수의 대체공정계획을 가질 수 있고, 또한 부품 수요가 이산적 확률분포를 따를 때 각 부품의 필요공정계획과 소요 기계 형태 및 댓수를 결정하고자 한다. 이를 위해 수리적 정식화 (Mathematical Formulation)을 구축하고 최적해 (Optimal) 또는 근사최적해 (Near-Optimal Solution)를 찾기 위해 Tabu Search에 기초한 탐색적 기법을 이용하고자 한다.

Tabu Search는 탐색과정 중 부분최적 (Local Optimum)에 빠질 가능성이 있는 Combinatorial Optimization 문제에서 최적해 또는 근사최적해를 찾는 Higher-level Heuristic으로서 그동안 여러 분야의 연구활동에서 성공적 결과를 보여준 탐색기법이다 (Glover 1990). 특히, 셀형 제조시스템의 연구분야에서는 Logendran 외 2인(1994)이 본 연구 분야에서 이 기법을 활용하였으며, Logendran과 Ramakrishina(1995)는 Cell Formation 연구 분야에서 그리고 Logendran과 Ko(1996)는 AGV를 결합시킨 셀형 제조시스템의 설계 연구에 Tabu Search에 기초한 탐색적 기법이 사용되었다.

## 2. 수학적 모형

본 연구에서는 가공부품이 복수의 대체공정계획을 가질 수 있고 또한 불확실한 부품 수요 정보를 가질 때 부품가공에 필요한 기계투자비용과 가공비용을 최소로 하는 부품의 공정계획을 결정하고 소요 기계 형태 및 댓수를 수학적 모형을 통해 결정하고자 한다.

이를 위해 본 연구는 다음과 같은 가정하에 수행된다.

- (1) 각 부품의 수요에 대해 이산적 확률분포를 알고 있다.
- (2) 각 기계의 가용 능력을 알고 있다.
- (3) 각 공정계획에 대해서 특정 기계에서 가공되는 부품의 가공시간 및 비용을 알고 있다.

수학적 모형 개발을 위해 활용될 기호 및 변수를 정의하면 다음과 같다.

- $i = 1, 2, \dots, m$  기계
- $j = 1, 2, \dots, n$  부품
- $p = 1, 2, \dots, p_j$  부품  $j$ 의 가능한 공정계획
- $k = 1, 2, \dots, K(j,p)$  조합  $(j,p)$  즉 부품  $j$ 가 공정계획  $p$ 를 선택했을 때의 해당 공정
- $X_i$  = 기계  $i$ 의 댓수

$$Z_j = \begin{cases} 1 & \text{부품 } j \text{가 공정계획 } p \text{를 선택하여 가공되면} \\ 0 & \text{그 외의 경우} \end{cases}$$

$$Y_{ik}(j,p) = \begin{cases} 1 & \text{조합 } (j,p) \text{에서 공정 } k \text{가 기계 } i \text{에서 행해지면} \\ 0 & \text{그 외의 경우} \end{cases}$$

- $ac_i$  = 기계  $i$ 의 대당 기계투자비용의 연간등가
- $d_j$  = 부품  $j$ 의 연간 수요를 나타내는 확률변수
- $D_j$  = 부품  $j$ 의 발생 가능한 연간 수요 즉  $d_j$  표본공간
- $at_i$  = 기계  $i$ 의 가용능력 (단위 : 시간)
- $oc_{ik}(j,p)$  = 조합  $(j,p)$ 에서 공정  $k$ 를 기계  $i$ 에서 처리할 때의 가공비용
- $pt_{ik}(j,p)$  = 조합  $(j,p)$ 에서 공정  $k$ 를 기계  $i$ 에서 처리할 때의 가공시간
- $noc_{ik}(j,p)$  =  $oc_{ik}(j,p)$ 에 대응되는 별칭 가공비용
- $nac_i(j,p)$  =  $ac_i$ 에 대응되는 별칭 기계비용

$$a_k = \begin{cases} 1 & \text{공정 } k \text{가 기계 } i \text{에서 행해지면} \\ 0 & \text{그 외의 경우} \end{cases}$$

$$b_k(j,p) = \begin{cases} 1 & \text{조합 } (j,p) \text{에서 공정 } k \text{가 수행되면} \\ 0 & \text{그 외의 경우} \end{cases}$$

$$W_i = \begin{cases} 1 & \text{if } B_i > 0 \\ 0 & \text{if } B_i \leq 0 \end{cases}$$

- $B_i$  = 기계의 가용능력을 초과한 경우의 기계  $i$ 의 추가 공정시간
- $L$  = 각 부품에 대한 발생 가능한 수요 집합
- $L_i = B(i) > 0$ 을 발생시키는 수요 집합
- $L_j = L - L_i$

전술된 정의에서  $X_i, Z_j, Y_{ik}(j,p)$ 는 결정변수이며,  $a_k, b_k(j,p)$ 는 모형 정식화에서 계수값을 나타낸다. 이상의 정의

된 기호와 변수를 활용하여 총기대비용을 최소화시키는 수학적 모형은 다음과 같다.

Minimize

$$Z = \sum_i^{1^m} ac_i X_i + \sum_{\substack{j,p,i,k \\ \text{over } L2}} E[d_j Y_{ik}(j,p) oc_{ik}(j,p)] + \sum_{\substack{j,p,i,k \\ \text{over } L1}} E[D_j Y_{ik}(j,p) oc_{ik}(j,p) + (d_j - D_j) Y_{ik}(j,p) noc_{ik}(j,p)] + \sum_{\substack{i=1 \\ \text{over } L1}} E[nac_i W_i \lceil B_i / at_i \rceil] \quad (1)$$

$$\text{where } B_i = \sum_{\substack{j,p,k \\ \text{on } i \text{ in } L}} d_j Y_{ik}(j,p) pt_{ik}(j,p) - at_i X_i \quad (2)$$

subject to

$$\sum_p Z_{jp} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

$$\sum_i a_{ik} Y_{ik}(j,p) = b_k(j,p) Z_{jp} \quad k = 1, 2, \dots, K(j,p), \\ j = 1, \dots, n. \\ p = 1, \dots, p_j \quad (4)$$

$$\sum_{j,p,k} D_j Y_{ik}(j,p) pt_{ik}(j,k) \leq at_i X_i \quad i = 1, \dots, n. \quad (5)$$

구축된 모형에서 목적함수는 각 부품의 수요 발생이 이산적 확률분포를 할 때 총기대비용을 최소화하는 것으로, 여기서 총기대비용은 부품가공을 위해 투자되는 기대 기계투자비용과 부품가공에 소요되는 기대 가공비용의 합으로 구성된다. 식 (1)에서 첫째 항과 둘째 항은 초기 기계투자비용과 현재의 가용능력으로 부품의 가공작업을 처리할 수 있는 경우의 기대 가공비용을 설명하며, 반면에 셋째 항은 부품의 수요가 과다하게 발생하여 원래 계획 이상으로 가공시간을 필요로 할때의 기대 가공비용이다. 식 (2)로 표현된 추가 공정시간이 현재의 기계의 잔존 가용능력을 초과하여 새로이 기계 구입을 요구할 의 기대 기계투자비용이 마지막 항에 나타나 있다. 제약조건으로 식 (3)은 모형의 결과에서 도출될 부품의 공정계획은 하나만 선택되어야 하며, 다음으로 식 (4)는 각 부품과 복수의 대체공정계획의 관계를 반영하고, 마지막으로 식 (5)는 기계의 가용능력을 고려해야 한다는 것이다.

가공부품에 확정적 수요를 도입한 Logendran 외 2인

(1994)의 연구에서도 그들의 개발 모형이 Strongly NP-hard에 속하는 것이 증명되어 분지한계법(Branch and Bound Method) 등의 방법을 통해 문제를 해결할 가능성을 배제시켰으며, Rajamani 외 2인(1990)도 비록 간단한 문제의 경우에는 수리적으로 해를 도출하는 것이 가능하나 문제 크기가 조금만 커져도 해 도출에 많은 어려움이 있기 때문에 현실적인 문제를 해결하기 위해서는 문제의 특성을 고려한 탐색적 알고리즘의 필요성을 역설했다. 따라서, 본 연구에서는 셀형제조시스템 설계 분야 연구에서 성공적 결과를 보여 준 Tabu Search에 기초한 4가지 탐색적 알고리즘을 개발한다.

### 3. Tabu Search에 기초한 탐색적 알고리즘

여기에서는 전 장에서 구축된 수리적 모형에서 최적 또는 근사최적해를 도출하기 위해 4가지 탐색적 알고리즘을 개발한다. 본 연구에서 개발된 알고리즘에 대해 개괄적으로 설명하면 그림 1의 순서도에 나와 있듯이 첫째로 각 부품에 대한 가능 수요조합들 중에서 임의로 한 조합을 선정하고 이 조합에 대해 셀형제조시스템 구축에 필요한 공정계획을 선정하여 기계 형태, 기계 댓수 및 사용 공정과 활용될 기계를 결정한다. 이 과정에서 활용될 주논리는 Logendran 외 2인(1994)의 연구에서 개발된 알고리즘에 기초하였다. 다음으로 모든 수요조합에 대해 시스템에서의 가용능력과 비교하여 추가 가공비용 및 추가 기계투자비용을 계산한다. 그리고 각 수요조합이 발생될 확률을 고려하여 전 장에서의 목적함수값을 계산한 후, 각 부품에 대한 발생 가능 수요에 대해 Tabu Search를 이용하여 하나씩 변경시켜 최적 또는 근사최적해를 찾는 것이다. 4가지 개발 알고리즘에 대해 구체적 설명을 위해 우선 ALG1-MET1이라 정의한 첫 번째 알고리즘에 대해 자세히 서술한 후, 나머지 3가지 알고리즘 ALG1-MET2, ALG2-MET1 및 ALG2-MET2를 ALG1-MET1과 비교를 통하여 설명할 것이다.

#### 주 모듈

- Step 1. 각 부품의 예측 수요에 대해 내림차순으로 정렬한다.  
Step 2. 각 부품에 대해 가장 큰 값을 갖는 수요를 대

상으로 수요조합을 형성하고 이를 초기해로 선정한다.

- Step 3. 선정된 수요조합에 대해 셀형제조시스템의 설계에 필요한 기계 형태, 기계 댓수, 각 부품에 대응되는 공정계획, 사용 공정 및 활용 기계를 결정하기 위해 부 모듈을 수행한다.  
Step 4. 확정된 현 기계의 잔존 능력을 계산한 다음 모든 발생 가능한 수요조합의 경우를 추출하여 각 조합에 대해 추가 가공시간과 추가 기계구입댓수를 산정한다. 그리고, 각 조합에 대한 발생확률 및 비용 항목을 고려하여 목적함수값을 계산한다.  
Step 5. 부 모듈에서 활용된 Tabu Search와 유사한 방법으로 각 부품에 대한 예상 수요를 하나씩 변동시켜 가며 최적 또는 근사최적해를 도출한다.

#### 부 모듈

- Step 1. 각 부품에 대한 공정계획별 가공비용을 올림차순으로 정렬한다.  
Step 2. 각 부품에 대해 최소 가공비용을 갖는 공정계획을 초기해로 선정한다.  
Step 3. 대상 부품의 가공비용을 합산하고 이 경우에 제약조건 (5)를 만족하는 기계 형태 및 댓수를 결정하고 소요 기계투자비용을 산출한 후 이 둘을 합하여 총비용을 계산한다.  
Step 4. 초기해를 CL (Candidate List)에 등록한다. 이때 CL은 장차 변동될 부품별 공정계획군을 형성한다. 그리고 이 때의 총비용을 AL(Aspiration Level)로 둔다. AL은 현재까지의 최소비용을 의미한다.  
Step 5. 각 부품에 대한 공정계획을 하나씩 변동시킨 후 각 공정계획군에 대응되는 총비용을 Step 2에서와 같은 방법으로 계산한 후 최소의 비용을 갖는 공정계획군을 찾는다. 이때 찾은 공정계획군이 AL보다 작으면 '\*'를 할당하고 CL에 등록하며 AL을 이 비용으로 개정한다. 만일 최소비용을 갖는 공정계획군이 복수 존재하면 첫 번째 하나만 선택한다. (주 모듈에서는 모두 선택된다.) 그리고, 이 때의 공정계획군의 변동된

부품위치에 ‘\_’를 표시하여 Tabu로 등록한다. Tabu는 다음의 탐색과정에서 이 경우를 고려하지 말라는 의미가 된다.

- Step 6. 탐색과정 중 얻어진 최소 비용의 공정계획군이 AL보다 큰 값을 갖는 경우 새로이 AL을 이 값으로 교체하고 아울러 직전의 공정계획군은 ‘\*\*’를 부여하여 부분최적해로서 IL(Index List)에 등록한다.
- Step 7. 지정된 횟수만큼 탐색한 후 IL에 등록된 부분최적해 중 최소값을 갖는 공정계획군을 찾는다.

(Component)는 고정시킨 후 한 요소만을 변화시켜 가며 각 요소에서의 최소의 비용을 갖는 조합을 찾아나가는 과정을 Tabu Search를 활용한 것이며, 여기서 MET1과 MET2의 경우는 ALG1과 동일 과정을 채택한 것이다.

따라서, 본 연구에서는 전장에서 제시한 수학적 모형의 해를 도출하기 위해 4가지 탐색적 알고리즘을 제시하며, 다음 장에서는 4가지 알고리즘 중 특히 ALG1-MET1을 예제를 통해 자세히 설명하며, 또한 벌칙비용 값의 변화와 수요 분포가 여러 형태의 확률질량함수 (Probability Mass Function)을 갖는 실험 문제를 통해 4가지 알고리즘을 평가하고, 아울러 확정적 수요의 경우와도 비교한다.

#### 4. 예제 수행

전장에서 개발한 탐색적 알고리즘의 수행 및 기존의 확정적 수요 하의 셀형 제조시스템의 설계에 관한 연구와 비교하기 위해 Rajamani 의 2인 (1990)과 Logendran 의 2인 (1994)의 연구에서 도입한 동일 문제를 대상으로 예제를 수행한다.

표 1은 가공 부품에 대한 공정계획 및 대응되는 가공 공정에 대한 자료를 보여 준다. 예를 들면 부품 4는 2개의 공정계획을 가질 수 있으며, 그 첫번째 공정계획은 공정 1, 2, 3 모두를, 두 번째 공정계획은 공정 1, 2 만을 요구하고 있다. 그리고 표 2에서는 표 1에서 정의된 공정을 처리할 수 있는 기계와 주요 사양으로 기계능력과 기계비용을 나타내고 있다. 예를 들어 가공공정 1은 기계 1 또는 기계 3에서 처리될 수 있다. 따라서 부품 4에서 첫번째 공정계획은 8가지 조합의 기계로 할당될 수 있다. 표 3에서는 표 1과 표 2에서의 자료를 기초로 부품에 대한 공정계획을 수행할 때 필요 공정을 어느 기계에서 수

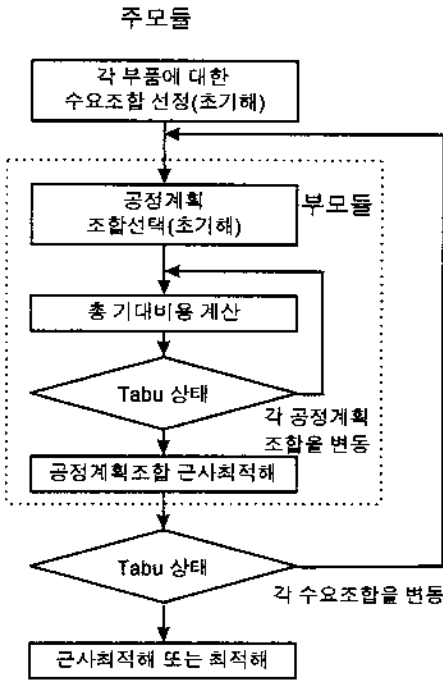


그림 1. 알고리즘 순서도

전술한 ALG1-MET1 외의 3가지 알고리즘에 대해 살펴보면, 우선 ALG1-MET2는 ALG1-MET1의 주 모듈과 부 모듈 Step 5 탐색과정 중 목적함수 값이 동일한 값을 갖는 모든 조합을 CL에 등록시켜 수행하는 알고리즘이다. 즉, MET1과 MET2의 차이는 동일 목적함수 값을 갖는 경우에서의 처리과정 차이로 구분된다. 아울러, ALG2는 ALG1과는 달리 탐색과정을 조합의 다른 요소

표 1. 각 부품에 대응되는 공정계획 및 공정

	부 품								
	j=1		j=2		j=3		j=4		
공정	p=1	p=2	p=1	p=2	p=1	p=2	p=3	p=1	p=2
k=1	1		1		1		1	1	1
k=2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
k=3		1	1	1		1	1	1	

표 2. 공정 k에 대응되는 기계 i 및 기계사양  
(기계투자비용, 기계능력)

	i=1	i=2	i=3
k=1	1		1
k=2		1	1
k=3	1	1	
기계능력	100	100	100
기계투자비용	100	250	300

표 3. 각 부품의 공정계획, 공정, 기계에 대응되는 가공시간 및 가공비용

		$pt_k(i,p), oc_k(j,p)$								
		j=1		j=2		j=3		j=4		
		p=1	p=2	p=1	p=2	p=1	p=2	p=3	p=1	p=2
k=1	i=1	5,3		3,4		2,2		8,1	1,2	9,7
k=1	i=2	7,2		4,3		2,2		9,2	2,1	8,9
k=2	i=2	3,5	9,8	7,8	3,3	3,3	1,2	5,9	2,3	9,8
k=2	i=3	4,3	7,9	7,7	2,3	4,4	2,4	3,10	2,4	10,9
k=3	i=1		8,8	10,9	6,5		11,7	7,4	3,5	
k=3	i=2		7,7	8,9	6,6		8,8	9,5	2,6	

표 4. 각 부품 수요에 대한 확률질량함수

j=1		j=2		j=3		j=4	
수요	확률	수요	확률	수요	확률	수요	확률
14	0.1	12	0.2	14	0.1	12	0.2
12	0.3	10	0.4	12	0.3	10	0.4
10	0.4	8	0.2	10	0.4	8	0.2
8	0.2	6	0.2	8	0.2	6	0.2

행하는 가에 따른 가공시간과 비용을 나타내고 있다. 우리는 이 자료를 근거로 총가공비용을 계산할 수 있다. 마지막으로 표 4에서는 각 부품 수요에 대한 확률질량함수의 표본공간과 발생 확률을 보여 준다. 그리고, 추가 가공 및 구입에 따른 벌칙비용 (Penalty Cost)은 1.5배를 부과하는 것으로 가정한다.

이상의 자료를 기초로 전 장에서 개발한 4가지 탐색적

알고리즘 중 ALG1-MET1은 다음과 같이 수행된다.

주 모듈

이 예제의 초기해로서 수요조합 (1,1,1,1)을 선택하는데 여기서 (1,1,1,1)의 의미는 표 1에 나와있는 각 부품 수요 표본공간에서 각각 첫째값인 14, 12, 14, 12를 갖는 수요 조합을 지칭한다. 만일 (3,2,3,2)의 수요조합을 갖는다면 이는 부품 1, 2, 3 과 4의 예측수요를 10, 10, 10, 10을 갖는 수요조합을 지칭한다. 일단 (1,1,1,1)이 선택되면 이 수요를 기준으로 부 모듈에서 최소 비용을 갖는 공정계획을 찾아낸다. 본 연구에서는 주모듈과 부모듈에서 지정한 부분최적해의 개수까지 수행한 후 그때까지의 최선의 해를 최적해 또는 근사최적해로 할당한다.

초기해 (1,1,1,1)에 대해서는 부 모듈을 수행하여 구한 해를 첫 번째 부분최적해로 IL에 등록한다. 또한 이 조합을 기준으로하여 근처의 다른 조합을 탐색하기 위하여 CL에 삽입한다. 다음 단계는 Tabu Search에 따라 근처의 수요조합을 탐색한다. 먼저 (1,1,1,1)에서 근처의 (2,1,1,1)의 조합을 대상으로 한다. 여기서, D<sub>1</sub>에 해당하는 요소 (2)에 ‘.’ 로써 현재 Tabu 임을 표시해 준다. 따라서, 가능한 근처의 수요조합은 (2,1,1,1), (1,2,1,1), (1,1,2,1), (1,1,1,2)의 4가지 새로운 조합을 형성한다. 이 상태에서의 총기대비용은 각각 1025.0436, 1024.7492, 1033.702, 1024.7528이 되며, 초기해인 (1,1,1,1)의 1041.4와 비교하면 수요 조합 (1,2,1,1)이 최소 총기대비용을 갖게 되어 다음 단계의 기준이 될 수 있어서 새로이 CL에 삽입한다. 이 값은 추후 부분최적해가 될 가능성이 있으므로 각각 하나의 ‘\*’를 할당한다. 이때 (1,2,1,1)의 비용 1024.7492 이 다음 단계의 값보다 작으면 부분최적해가 될 수 있다. 이럴 경우에는 이미 하나의 ‘\*’를 할당받았으므로 각각 ‘\*\*’를 할당하고 IL에 등록되며, 아울러 AL은 1024.7492로 변경된다.

(1,2,1,1)을 기준으로 다음 단계는 4가지 조합 (2,2,1,1), (1,3,1,1), (1,2,2,1), (1,2,1,2)을 새로이 형성한다. 각 조합에 대해 계산된 총기대비용은 1024.7976, 1024.8376, 1024.784, 1024.8644가 되며, 이 중에서 최소 총기대비용 1024.784가 이전 단계 (1,2,1,1)보다 총비용이 커므로 (1,2,1,1)을 부분최적해로 IL에 등록시킨다. 이상의 과정을 일정 개수의 부분최적해를 얻을 때까지 수행한다.

부 모듈

주 모듈의 수행과정 중 초기해가 (1,1,1,1)로 선택되었을 때, 최소 비용을 갖는 부품의 공정계획조합을 표 1 ~ 표 4의 자료를 기초로 각 부품에서 가능한 공정계획조합을 생성하고, 가공비용에 대해 표 5와 같이 올림차순으로 정렬한다. 따라서, 실제 가능한 공정계획조합은 8X12X16X12 = 18432개의 조합을 생성할 수 있으며, 모든 조합이 고려대상이 된다. 공정계획 조합 [1,1,1,1]을 초기해로하여 주 모듈과 같은 방법으로 탐색한다.

주 모듈과 부 모듈에서 각각 부분최적해의 개수를 5개로 지정한 후, 이때까지의 수행과정 및 최종 결과가 표 6

과 표 7에 각각 나와 있다. ALG1-MET1에서 선택된 해는 주 모듈 수행횟수 8번 즉 3번째 부분최적해에서 선택된 수요조합 (2,2,4,1)로서 부품 수요를 각각 12, 10, 8, 12에 맞추며 공정계획조합은 [4,1,5,2]을 취하며, 이때의 총기대비용은 943.0352, 소요시간은 14분 2초가 걸렸다. 만일 수요조합을 발생 확률이 가장 큰 [3,2,3,2] 즉 4가지 부품의 수요가 각각 10, 10, 10, 10에 맞추어 기계를 구입한 경우에는 총기대비용이 1018.6528이 되어, ALG1-MET1에서 제시한 해보다 약 8%의 비용 증가가 발생함을 알 수 있다.

또한, 동일한 입력자료로서 나머지 3가지 알고리즘을 수행한 결과, 먼저 ALG1-MET2에서는 수요조합, 공정계

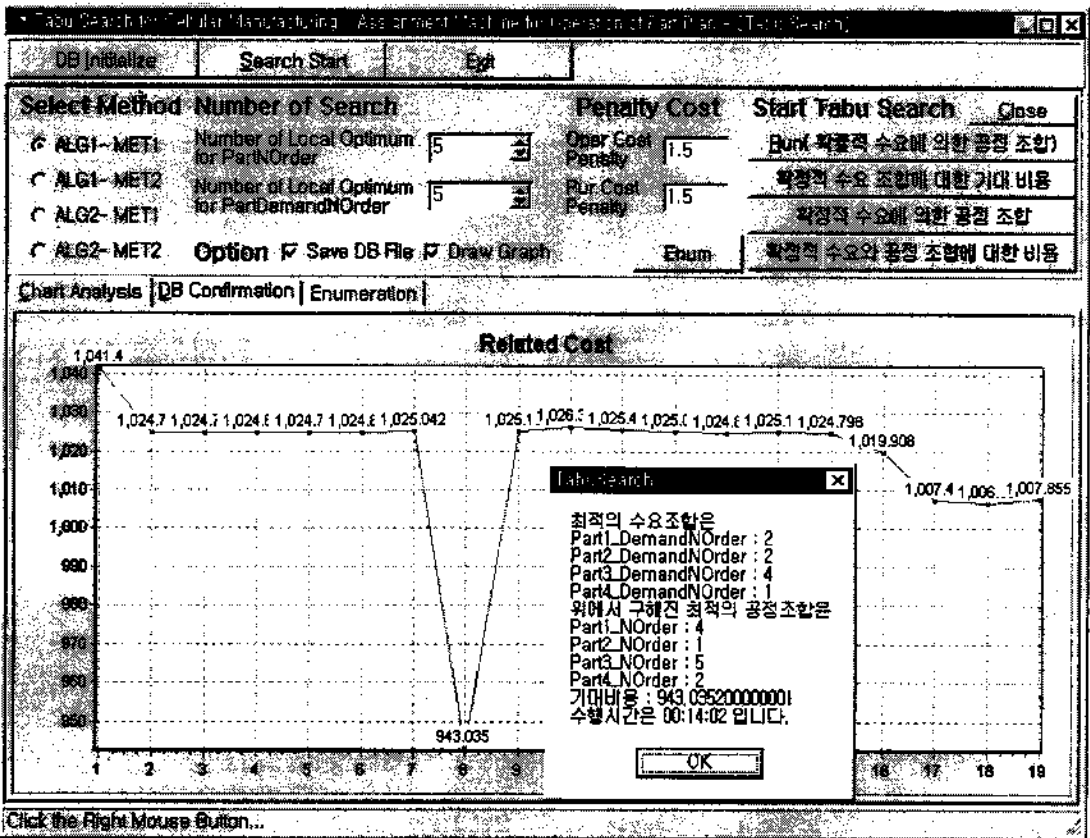


그림 2. 4가지 알고리즘 구현 프로그램

표 5. 각 부품에 대한 공정계획

No.	부품	공정계획	공정1	시간1	비용1	공정2	시간2	비용2	공정3	시간3	비용3	단위비용
1	1	1	3	7	2	3	4	3	0	0	0	5
2	1	1	1	5	3	3	4	3	0	0	0	6
3	1	1	3	7	2	2	3	5	0	0	0	7
4	1	1	1	5	3	2	3	5	0	0	0	8
5	1	2	0	0	0	2	9	8	2	7	7	15
6	1	2	0	0	0	2	9	8	1	8	8	16
7	1	2	0	0	0	3	7	9	2	7	7	16
8	1	2	0	0	0	3	7	9	1	8	8	17
1	2	2	0	0	0	2	3	2	1	6	5	8
2	2	2	0	0	0	3	2	3	1	6	5	8
3	2	2	0	0	0	2	3	3	2	6	6	9
4	2	2	0	0	0	3	2	3	2	6	6	9
5	2	1	3	4	3	3	7	7	2	8	9	19
6	2	1	3	4	3	3	7	7	1	10	9	19
7	2	1	1	3	4	3	7	7	2	8	9	20
8	2	1	1	3	4	3	7	7	1	10	9	20
9	2	1	3	4	3	2	7	8	2	8	9	20
10	2	1	3	4	3	2	7	8	1	10	9	20
11	2	1	1	3	4	2	7	8	1	10	9	21
12	2	1	1	3	4	2	7	8	2	8	9	21
1	3	1	1	2	2	2	3	3	0	0	0	5
2	3	1	3	2	2	2	3	3	0	0	0	5
3	3	1	1	2	2	3	4	4	0	0	0	6
4	3	1	3	2	2	3	4	4	0	0	0	6
5	3	2	0	0	0	2	1	2	1	11	7	9
6	3	2	0	0	0	2	1	2	2	8	8	10
7	3	2	0	0	0	3	2	4	1	11	7	11
8	3	2	0	0	0	3	2	4	2	8	8	12
9	3	3	1	8	1	2	5	9	1	7	4	14
10	3	3	3	9	2	2	5	9	1	7	4	15
11	3	3	1	8	1	3	3	10	1	7	4	15
12	3	3	1	8	1	2	5	9	2	9	5	15
13	3	3	3	9	2	3	3	10	1	7	4	16
14	3	3	1	8	1	3	3	10	2	9	5	16
15	3	3	3	9	2	2	5	9	2	9	5	16
16	3	3	3	9	2	3	3	10	2	9	5	17
1	4	1	3	2	1	2	2	3	1	3	5	9
2	4	1	3	2	1	2	2	3	2	2	6	10
3	4	1	3	2	1	3	2	4	1	3	5	10
4	4	1	1	1	2	2	2	3	1	3	5	10
5	4	1	3	2	1	3	2	4	2	2	6	11
6	4	1	1	1	2	2	2	3	2	2	6	11
7	4	1	1	1	2	3	2	4	1	3	5	11
8	4	1	1	1	2	3	2	4	2	2	6	12
9	4	2	1	9	7	2	9	8	0	0	0	15
10	4	2	1	9	7	3	10	9	0	0	0	16
11	4	2	3	8	9	2	9	8	0	0	0	17
12	4	2	3	8	9	3	10	9	0	0	0	18



표 6. ALG1-MET1의 수행 과정

No.	수요조합	공정계획조합	총기대비용
1	(1,1,1,1)	[2,2,1,5]	1,041.4 *
2	(1,2,1,1)	[2,1,1,1]	1,024.7492 **
3	(1,2,2,1)	[2,1,1,1]	1,024.784
4	(1,2,3,1)	[2,1,1,1]	1,024.8976
5	(1,1,3,1)	[2,1,1,1]	1,024.7572 **
6	(1,1,4,1)	[2,1,1,1]	1,024.816
7	(2,1,4,1)	[2,1,1,1]	1,025.0416
8	(2,2,4,1)	[4,1,5,2]	943.0352 **
9	(1,2,4,1)	[2,1,1,1]	1,025.1844
10	(1,3,4,1)	[2,1,1,1]	1,026.3408
11	(1,3,3,1)	[2,1,1,1]	1,025.4928 *
12	(1,3,2,1)	[2,1,1,1]	1,025.0416 *
13	(1,3,1,1)	[2,1,1,1]	1,024.8376 **
14	(2,3,1,1)	[2,1,1,1]	1,025.1068
15	(2,2,1,1)	[2,1,1,1]	1,024.7976 *
16	(3,2,1,1)	[4,3,1,2]	1,019.908 *
17	(4,2,1,1)	[4,1,1,2]	1,007.4896 *
18	(4,1,1,1)	[4,1,1,2]	1,006.59 **
19	(4,1,1,2)	[4,1,1,2]	1,007.8548 *

\* : CL, \*\* : IL

획조합, 소요시간 및 총기대비용은 (4,2,2,1), [4,1,5,2], 6분 34초 및 942.5896, 다음으로 ALG2-MET1에서는 (3,3,1,1), [4,1,5,2], 1시간 29분 43초 및 941.178, 마지막으로 ALG2-MET2는 ALG2-MET2와 동일 결과를 보였으나 소요시간은 이보다 단축된 1시간 4분 38초가 소비되었다. 4가지 알고리즘의 성능은 ALG2-MET1과 ALG2-MET2가 가장 좋으나 실제 총기대비용의 감소치는 매우 작음을 알 수 있고 또한 소요시간이 너무 많이 걸린다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 개발한 4가지 알고리즘은 Boland사의 Dephi 3.0으로 구현하여 PC 펜티엄 166MHz에서 수행되었다. 그림 2는 상기 예제에 대해 ALG1-MET1을 선택하여 수행한 예를 보여 주고 있다.

다음으로 확률 모형의 특성을 알아보기 위해 설계 변수를 변경시킨 문제에 대해 개발 알고리즘의 성능을 실험하였다. 기타 부품, 공정 및 기계의 수의 변화에 따른 특성은 Logendran 외 2인 (1994)의 연구에서 실험이 되어 본 연구에서는 이들에 관한 실험은 수행하지 않았다.

첫 번째로는 벌칙비용을 1.5배에서 2배로 증가시켰을 때의 문제에 대해 수행하였으며, 그 결과가 표 8에 나와 있다. 이 경우 개발 알고리즘이 확정수요 (3,2,3,2)보다 총기대비용을 약 10% 낮추는 해를 찾을 수 있었다.

표 8. 벌칙비용을 2배로 했을 때의 알고리즘 수행 결과

알고리즘	수요조합	공정계획조합	총기대비용	소요시간 (시간:분:초)
ALG1-MET1	(2,2,4,1)	[4,1,5,2]	960.4904	0:10:50
ALG1-MET2	(4,2,2,1)	[4,1,5,2]	959.5992	0:06:28
ALG2-MET1	(3,3,1,1)	[4,1,5,2]	956.7760	1:29:43
ALG2-MET2	(3,3,1,1)	[4,1,5,2]	956.7760	1:04:38
확정수요	(3,2,3,2)	[4,3,1,5]	1,054.2056	

표 7. ALG1-MET1의 탐색 결과

기계	가공시간	기계능력	기계대수	기계투자비용
기계 1	256	100	3	300
기계 2	98	100	1	250
기계 3		100	0	

부품	계획	공정1	시간1/비용1	공정2	시간2/비용2	공정3	시간3/비용3	단위 비용
P1	4	1	5/3	2	3/5			8
P2	1			2	3/3	1	6/5	8
P3	5			2	1/2	1	11/7	9
P4	2	1	1/2	2	2/3	1	3/5	10

다음으로는 부품 수요의 특성에 따른 변화를 알아보기 위해 실험하였다. 먼저 표 9와 같이 부품 수요 값들 간에 차이가 큰 경우 (Case 1)과 작은 경우 (Case 2)의 문제, 그리고 표 10과 같이 발생 확률 값이 차이가 큰 경우 (Case 3)와 작은 경우 (Case 4)의 문제에 대해 수행하였다. 표 11은 이상의 4가지 경우의 실험 결과를 보여 주

표 9. 부품 수요 값들 간에 차이가 있는 경우의 확률질량함수 자료

<Case 1>

j=1		j=2		j=3		j=4	
수요	확률	수요	확률	수요	확률	수요	확률
12	0.1	11	0.2	12	0.1	11	0.2
11	0.3	10	0.4	11	0.3	10	0.4
10	0.4	9	0.2	10	0.4	9	0.2
9	0.2	8	0.2	9	0.2	8	0.2

표 10. 발생 확률 값들 간에 차이가 있는 경우의 확률질량함수 자료

<Case 3>

j=1		j=2		j=3		j=4	
수요	확률	수요	확률	수요	확률	수요	확률
14	0.1	12	0.2	14	0.15	12	0.1
12	0.15	10	0.4	12	0.2	10	0.8
10	0.7	8	0.2	10	0.5	8	0.08
8	0.05	6	0.2	8	0.15	6	0.02

<Case 2>

j=1		j=2		j=3		j=4	
수요	확률	수요	확률	수요	확률	수요	확률
20	0.1	15	0.2	20	0.1	15	0.2
15	0.3	10	0.4	15	0.3	10	0.4
10	0.4	5	0.2	10	0.4	5	0.2
5	0.2	0	0.2	5	0.2	0	0.2

<Case 4>

j=1		j=2		j=3		j=4	
수요	확률	수요	확률	수요	확률	수요	확률
14	0.24	12	0.25	14	0.2	12	0.25
12	0.26	10	0.26	12	0.27	10	0.28
10	0.3	8	0.24	10	0.28	8	0.24
8	0.2	6	0.25	8	0.25	6	0.23

표 11. 부품 수요 특성에 따른 알고리즘 수행 결과  
(주 모듈 및 부 모듈에서의 부분최적해 개수는 5개로 지정)

수요구조	알고리즘	수요조합	공정계획조합	총기대비용	소요시간(시간:분:초)
Case 1	ALG1-MET1	(2,2,4,1)	[4,1,5,2]	900.7426	0:08:56
	ALG1-MET2	(1,1,1,1)	[2,1,1,1]	1,026.5	0:10:03
	(	(2,3,4,1)	[4,1,5,2]	902.1388	0:26:23
	ALG2-MET1	(1,2,1,1)	[4,1,5,2]	899.4616	1:53:02
	ALG2-MET2	(1,2,1,1)	[4,1,5,2]	899.4616	1:05:42
	확정수요	(3,2,3,2)	[4,3,1,5]	962.4014	
Case 2	ALG1-MET1	(3,3,4,1)	[4,1,1,2]	1,013.096	0:12:46
	ALG1-MET2	(3,3,4,1)	[4,1,1,2]	1,013.096	0:06:40
	ALG2-MET1	(3,1,1,1)	[4,1,1,5]	1,009.56	2:28:08
	ALG2-MET2	(3,1,1,1)	[4,1,1,5]	1,009.56	1:08:56
	확정수요	(3,2,3,2)	[4,3,1,5]	1,090.657	
	Case 3	ALG1-MET1	(4,1,1,1)	[4,1,1,2]	1,014.5281
(		(3,2,2,1)	[4,1,5,2]	952.5003	0:32:24
ALG1-MET2		(4,2,2,1)	[4,1,5,2]	953.9848	0:07:29
ALG2-MET1		(3,3,1,1)	[4,1,5,2]	952.4156	1:28:54
ALG2-MET2		(3,3,1,1)	[4,1,5,2]	952.4156	1:04:16
확정수요		(3,2,3,2)	[4,3,1,5]	1,048.7919	
Case 4	ALG1-MET1	(2,2,4,1)	[4,1,5,2]	975.5887	0:08:39
	ALG1-MET2	(4,1,3,2)	[4,1,5,2]	979.2433	0:08:29
	ALG2-MET1	(3,3,1,1)	[4,1,5,2]	973.0876	1:27:08
	ALG2-MET2	(3,3,1,1)	[4,1,5,2]	973.0876	1:02:42
	확정수요	(3,1,1,1)	[4,3,1,5]	1,044.6699	

주: 괄호안의 결과치는 주 모듈 및 부 모듈에서의 부분최적해 개수는 10개로 지정

고 있다. 이미 이전 문제들에서 언급되었듯이 ALG1은 ALG2에 비해 수요 특성에 상관없이 월등히 적은 시간 내에 비슷한 결과를 도출하였으며 Case 1과 3에서는 ALG1이 부분최적해 개수를 5개로 한 경우 좋은 해를 도출하지 못했으나 10개로 올려 수행한 후에는 비교적 만족한 값을 구하였다. MET1과 MET2의 경우는 어느 것이 낫다고 뚜렷이 결론을 내기는 힘들었다. 만일 대형 문제를 해결하기 위해서는 ALG2의 경우는 좋은 해를 도출하는데 너무 많은 시간이 소요되어, 한정된 시간내에 해를 도출하기 위해서는 부분최적해의 개수를 줄여야 하기 때문에 이 경우 ALG1보다 나은 해를 확보할 가능성은 매우 낮아서, 이때는 ALG1-MET1 또는 ALG1-MET2가 보다 실제적인 해법으로 활용되어야 할 것이다.

## 5. 결론

지금까지 부품 수요가 이산적 확률분포를 가지며 또한 가공부품이 복수의 공정계획을 가질 때 수리적 모형을 구축하고, Tabu Search에 기초한 4가지 탐색적 알고리즘을 개발하여 총기대비용이 최소가 되도록 하는 최적 또는 근사최적의 각 부품 공정계획, 소요 기계 형태 및 댓수를 결정하였다. 그리고, 다양한 예제를 통해 본 알고리즘의 평가와 확정 수요와의 비교를 통해 확률 모형의 필요성을 파악하였다.

특히, 본 연구는 셀형제조시스템의 설계 연구 분야에 가공부품 수요에 대해 확률분포 정보를 가질 때 시도되는 첫 연구로서 의미가 있다. 비록 본 연구를 소요 기계 형태 및 댓수를 결정하는 분야에만 적용을 하였지만, Cell Formation 분야의 연구에도 확장을 고려할 수 있고, 또한 부품 수요가 연속적 확률분포를 따를 때의 경우도 좋은 연구과제가 될 것이다. 아울러, 보다 빠르고 최적해에 근접할 수 있는 알고리즘을 개발하는 것도 연구대상이 될 것이다.

## 참고문헌

- [1] Choobineh, F., "A framework for the design of cellular manufacturing systems," *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 7, pp. 1161-1172, 1988.
- [2] Glover, F., "Tabu search : Tutorial," *Interfaces*, Vol. 20, No. 4, pp. 74-94, 1990.
- [3] Kusiak, A., "The generalized group technology concept," *International Journal of Production Research*, Vol. 25, No. 4, pp. 561-569, 1987.
- [4] Logendran, R., "A model for duplicating bottleneck machines in the presence of budgetary limitations in cellular manufacturing," *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 3, pp. 683-694, 1992.
- [5] Logendran, R., and Ko, C. S., "Manufacturing cell formation in the presence of flexible cell locations and material transporters," *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 33, Nos. 3-4, pp. 337-440, 1997.
- [6] Logendran, R., and Ramakrishna, P., "Manufacturing cell formation in the presence of lot splitting and multiple units of the same machine," *International Journal of Production Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 675-693, 1995.
- [7] Logendran, R., Ramakrishna, P., and Srikandarajah, C., "Tabu search-based heuristics for cellular manufacturing systems in the presence of alternative process plans," *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 2, pp. 273-297, 1994.
- [8] Rajamani, D., Singh, N., and Aneja, Y. P., "Integrated design of cellular manufacturing systems in the presence of alternative process plans," *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 8, pp. 1541-1554, 1990.
- [9] Seifoddini, H., "A probabilistic model for machine cell formation," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 9, No. 1, pp. 69-75, 1990.