

유전 알고리즘에 기초한 제조셀과 셀 배치의 설계†

조규갑 · 이병욱

부산대학교

Design of Manufacturing Cell and Cellular Layout based on Genetic Algorithm

Kyu-Kab Cho · Byung-Uk Lee

This paper presents a concurrent design approach that deals with manufacturing cell formation and cellular layout in Cellular Manufacturing System. Manufacturing cell formation is to group machines into machine cells dedicated to manufacture of part families, and cellular layout problem determines layout of the manufacturing cells within shop and layout of the machines within a cell. In this paper, a concurrent approach for design of machine cell and cellular layout is developed considering manufacturing parameters such as alternative process plans, alternative machines, production volume and processing time of part, and cost per unit time of operation. A mathematical model which minimizes total cost consisting of machine installation cost, machine operating cost, and intercell and intracell movements cost of part is proposed. A hybrid method based on genetic algorithm is proposed to solve the manufacturing cell formation and cellular layout design problem concurrently. The performance of the hybrid method is examined on several problems.

1. 서론

셀 제조시스템(Cellular Manufacturing System, CMS)은 다품종소량 생산환경에서 생산성을 향상시키기 위한 생산방식으로, 그룹 테크놀로지(Group Technology, GT)의 개념을 이용하여 개별 공정 생산의 유연성을 유지하면서 대량생산과 유사한 경제적인 이점을 갖도록 한다. 셀 제조시스템은 각 기계사이의 부품의 운반을 합리화하여 공정중 재고를 줄이고, 부품의 준비 작업 및 가공시간을 단축함으로써 생산비의 절감과 제조생산성을 향상시킨다.

셀 제조시스템의 설계에서 주요 내용은 제조셀 구성(Manufacturing Cell Formation)과 셀 배치(Cellular Layout)의 문제이다. 제조셀 구성은 가공공정이 유사한 부품들로 구성된 부품군에 속한 부품들을 가공하는 데 필요한 기계들의 집합인 제조셀 또는 기계셀(machine cell)을 형성하는 것이고, 셀 배치 문제는 공장 내에서의 제조셀의 배치와 각 제조셀에 속한 기계들의 배

치를 결정하는 것이다.

지금까지 셀 제조시스템의 설계에 대한 대부분의 연구는 제조셀의 구성문제와 셀 배치 문제에 대해 각기 독자적으로 수행되어 왔으며, 특히 대부분의 연구가 제조셀 구성문제를 다루고 있다. 제조셀 구성에 대한 주요 연구를 살펴보면, Kaparthi and Suresh (1992)는 신경망 클러스터링 기법을 제안하였고, Chu (1993)는 경쟁학습(competitive learning) 알고리즘에 기초한 신경망 절차를 개발하였다. Suresh and Kaparthi (1994)는 부품군과 제조셀 형성을 위해 Fuzzy ART 신경망의 수행도를 고찰하였고, Hon and Chi (1994), 그리고 Lee *et al.* (1995)는 제조셀의 수와 제조셀의 크기 제약하에서 예외요소의 수를 최소로 하는 제조셀을 형성하기 위하여 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 적용한 방법을 제안하였다.

Gupta *et al.* (1995)는 일정한 수준의 기계활용도 (machine utilization)를 만족하면서, 셀 간 이동과 셀 내 이동의 가중 합을 최소로 하기 위해 GA를 사용하였으나, 부품의 대안 공정계획과 공정별 대안 기계에 대한 고려는 하지 않았다. Cho and

† 이 연구는 1997-1999년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME97-E-13)에 의하여 연구되었음.

Lee(1998)은 부품의 생산량과 가공시간 및 기계의 생산능력 등을 고려한 제조셀 구성에 GA를 적용한 방법을 제안하였다. 지금까지 셀 배치에 대한 연구는 셀 배치 자체에 관한 연구보다는 공정별 배치와 비교한 것이 대부분이다. Flynn and Jacobs (1987)는 셀 배치를 수행할 때 사용한 부품의 가공경로를 적절한 제조셀 크기를 유지하기 위하여 하나 이상의 셀을 방문하는 것으로 가정하였고, 공정별 배치와 셀 배치와의 비교를 통하여 셀 배치가 평균적으로 짧은 작업준비시간과 낮은 기계활용도를 가진다고 결론지었다. Shafer and Charnes (1993)는 다양한 작업조건하에서 셀 배치가 공정별 배치보다 공정중, 재고수준 및 평균체류시간이 통계적으로 감소됨을 보였다.

제조셀 구성과 셀 배치 문제는 상호연관성이 높으므로, 통합화의 관점에서 동시에 접근하는 방법의 개발이 필요하다. 동시공학적 접근은 독립적이거나 계층적으로 수행되어 온 시스템의 설계단계를 통합함으로써 설계과정을 향상시키는 데 성공적인 것으로 판명되어 왔다 (Allen, 1990). 이 논문은 동시공학적인 접근방법이라기 보다는 동시적인 설계로 볼 수 있으므로, 대안 공정계획과 대안 기계를 고려한 제조셀 구성과 셀 배치를 동시에 설계하기 위한 수리 모델을 제안하고, 이에 대한 해법을 제시한다. 이 경우 셀 간 이동(Intercell movements)과 셀 내 이동(Intracell movements)이 제조셀과 셀 배치의 동시 설계에 중요한 영향을 미치게 된다. 다시 말해서 제조셀의 구성과 셀 배치를 동시에 설계할 때, 부품의 셀 간 이동비용을 셀 내 이동비용 보다 많이 부과함으로써, 제조셀을 블록화 하여 같은 제조셀에 속한 기계들이 서로 인접해서 배치되도록 하였다. 동시 설계를 위한 수리 모델은 부품의 생산량 및 가공공정 시간, 제조셀의 크기 및 같은 셀에 존재하는 기계대수의 제약 등과 같은 제조 매개변수를 고려하여 0-1 정수 계획법으로 정식화된다. 제안한 수리 모델로부터 각 부품에 대한 공정계획, 부품군 및 제조셀, 그리고 각 기계의 공간적인 배치를 동시에 결정한다.

제조셀 구성문제와 셀 배치 문제를 0-1 정수 계획법으로 모델링 했을 때 각각 NP-complete 문제로 알려져 있으므로 (Vakharia and Wemmerlöw, 1990), 이 논문에서 제안한 수리 모델에 대한 실행가능해를 구하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 큰 규모의 문제에 대한 해법으로 알려져 있는 GA를 기반으로 하여 Tabu 탐색을 혼용한 하이브리드 방법을 제안하였고, 제안한 방법의 수행도를 평가하기 위하여 GA 및 Tabu 탐색에 의한 결과와 비교 분석하였다.

2. 제조셀 및 셀 배치의 동시 설계문제의 수리 모델

제조셀의 구성과 셀 배치가 결정되지 않은 상황에서 동시 설계를 할 경우, 대안 공정계획이나 대안 기계가 어떻게 선택되는가에 따라 다양한 제조셀 구성과 셀 배치가 가능하게 된다. 따라서 이 논문에서는 제조셀의 구성과 셀 배치를 동시에 설

계할 때, 부품의 셀 간 이동비용을 셀 내 이동비용보다 많이 부과함으로써 제조셀을 블록화 하여 같은 제조셀에 속한 기계들이 서로 인접해서 배치되도록 하였다. 제조셀과 셀 배치의 동시 설계 문제에 대한 수리 모델에서 다음의 가정을 도입하였다.

- (i) 부품의 연간생산량과 기계의 설치비용이 알려져 있다.
- (ii) 부품의 공정별 가공시간과 단위시간당 가공비용이 알려져 있다.
- (iii) 부품의 가공 공정계획이 하나 이상 존재할 수 있다(대안 공정계획).
- (iv) 공정을 처리할 수 있는 기계 종류가 하나 이상 존재할 수 있다(대안 기계).
- (v) 제조셀(또는 기계셀) 내에 존재할 수 있는 기계대수의 상한과 하한이 주어진다.
- (vi) 셀 배치 형식은 둘 이상의 행에 대해 기계들이 직선적으로 배열되는 다행(multi-row) 배치형식을 따른다.
- (vii) 모든 기계는 동일한 면적에 할당된다.
- (viii) 제조셀의 수가 미리 결정되어 있다.

제조셀 및 셀 배치의 동시 설계를 위한 수리 모델의 정식화에 사용된 기호는 다음과 같다.

<기호 설명>

- m : 제조셀을 구성하는 기계들의 총 수 ($i=1, \dots, m; s=1, \dots, m$)
- b : 제조셀에서 가공되는 부품들의 총 수 ($j=1, \dots, b$)
- D_j : 부품 j 의 생산량
- R_j : 부품 j 의 대안 공정계획 수 ($r=1, \dots, R_j$)
- k : 공정 번호 ($k=1, \dots, n$)
- U_M : 제조셀 크기(하나의 제조셀에 포함된 기계대수)의 상한
- L_M : 제조셀 크기의 하한
- C : 제조셀의 수 ($l=1, \dots, C$)
- V_{jrk} : 부품 j 가 공정계획 r 을 사용할 때 k 공정을 기계 i 에서 가공하는데 소요되는 단위시간당 비용
- d_{ab} : 위치 a 와 b 사이의 이동거리
- H_{ab} : 위치 a 와 b 사이의 단위거리당 운반 비용
- I_i : 기계 i 를 설치하는데 소요되는 비용
- T_{jrk} : 부품 j 가 공정계획 r 을 사용할 때, 공정 k 를 기계 i 에서 처리하는 시간
- w_1 : 셀 내 이동에 대한 가중치
- w_2 : 셀 간 이동에 대한 가중치 ($w_1 + w_2 = 1$)
- A_{ik} : $\begin{cases} 1, & \text{기계 } i \text{가 } k \text{ 공정을 처리할 수 있을 경우} \\ 0, & \text{그 외의 경우} \end{cases}$
- Y_{jl} : $\begin{cases} 1, & \text{부품 } j \text{가 제조셀 } l \text{에서 가공 가능한 부품군 } l \text{에 속하는 경우} \\ 0, & \text{그 외의 경우} \end{cases}$
- X_{il} : $\begin{cases} 1, & \text{기계 } i \text{가 제조셀 } l \text{에 속하는 경우} \\ 0, & \text{그 외의 경우} \end{cases}$

$$Z_{ijk} : \begin{cases} 1, \text{ 부품 } j \text{의 } k \text{ 공정을 기계 } i \text{에서 가공할 경우} \\ 0, \text{ 그 외의 경우} \end{cases}$$

$$P_{jr} : \begin{cases} 1, \text{ 부품 } j \text{가 공정계획 } r \text{을 사용하는 경우} \\ 0, \text{ 그 외의 경우} \end{cases}$$

$$B_{jrk} : \begin{cases} 1, \text{ 부품 } j \text{가 공정계획 } r \text{을 사용할 때 공정} \\ \quad k \text{가 필요한 경우} \\ 0, \text{ 그 외의 경우} \end{cases}$$

$$M_{ai} : \begin{cases} 1, \text{ 위치 } a \text{에 기계 } i \text{가 설치될 경우} \\ 0, \text{ 그 외의 경우} \end{cases}$$

$$G_{abir} : \begin{cases} 1, \text{ 부품 } j \text{가 공정계획 } r \text{을 사용할 때,} \\ \quad \text{위치 } a \text{에 있는 기계에서 가공이 끝난 경우에} \\ \quad \text{위치 } b \text{에 있는 기계에서 가공될 경우} \\ 0, \text{ 그 외의 경우} \end{cases}$$

$$\sum_i M_{ai} \leq 1, \quad \forall a \tag{6}$$

$$\sum_j X_{ij} = 1, \quad \forall i \tag{7}$$

$$\sum_i X_{ii} \leq U_M, \quad \forall i \tag{8}$$

$$\sum_i X_{ii} \geq L_M, \quad \forall i \tag{9}$$

$$\sum_j Y_{ji} = 1, \quad \forall j \tag{10}$$

$$\sum_r \sum_i Z_{ijk} P_{jr} = \sum_r B_{jrk} P_{jr}, \quad \forall i, k \tag{11}$$

$$\sum_r \sum_i A_{ik} Z_{ijk} P_{jr} = \sum_r B_{jrk} P_{jr}, \quad \forall i, k \tag{12}$$

$$M_{ai}, X_{ij}, Y_{ji}, Z_{ijk}, P_{jr}, G_{abir} = 0 \\ \text{or } 1, \quad \forall a, i, j, r, k, b \tag{13}$$

수리 모델은 ① 기계 설치 비용, ② 부품의 가공을 위한 기계 운영 비용 및 ③ 부품의 셀 간 이동비용과 셀 내 이동비용의 합으로 구성된 총비용을 최소화 하는 것을 목적으로 한다. 기계 설치 비용(CI)은 다음의 식(1)과 같이 제조셀을 구성하는 모든 기계들의 설치비용을 합한 것이다.

$$C_I = \sum_a \sum_i I_i M_{ai} \tag{1}$$

기계운영 비용(CP)은 부품별 대안 공정계획의 선택과 공정별 대안 기계의 선택에 따라 달라지므로 제조셀의 구성에 영향을 미치며, 식(2)와 같이 표현된다.

$$C_P = \sum_j \sum_r \sum_k \sum_i T_{jrk} D_j V_{jrk} Z_{ijk} P_{jr} \tag{2}$$

식(3)은 부품의 셀 간 이동비용과 셀 내 이동비용으로 이루어진 비용(CM)을 나타내며, 제조셀의 구성과 기계들의 공간적인 배치에 영향을 받으므로 제조셀 구성과 셀 배치에 동시에 영향을 미친다.

$$C_M = \sum_j \sum_r \sum_a \sum_b \sum_i \sum_s [w_1 X_{ij} X_{si} + w_2 (1 - X_{ij} X_{si})] \\ Y_{ji} M_{ai} M_{bs} D_{ab} H_{ab} P_{jr} G_{abir} \tag{3}$$

가중치 w_1, w_2 는 각각 위치 a 와 b 에 대해 부품의 셀 내 이동과 셀 간 이동의 단위 거리당 운반비용에 차등을 두기 위한 것으로, 일반적으로 $w_1 < w_2$ 의 관계가 있다(Logendran, 1990). 예를 들면, 셀 내 이동을 유발하는 경우는 $w_1 = 0.3$ 을, 셀 간 이동을 유발하는 경우는 $w_2 = 0.7$ 로 값을 부여할 수 있으며, 실제로 셀 간 이동이 물류 흐름을 상당히 악화시키는 경우 $w_1 = 0.0, w_2 = 1.0$ 으로 둘 수도 있다.

총비용(TC)은 식(4)와 같이 식(1), (2), 그리고 (3)의 합으로 구성되며, 동시 설계문제를 위한 수리 모델은 다음과 같이 0-1 정수 계획법으로 정식화된다.

<제조셀 및 셀 배치의 동시 설계문제의 정식화>

$$\text{Min } TC = C_I + C_P + C_M \tag{4}$$

subject to

$$\sum_a M_{ai} = 1, \quad \forall i \tag{5}$$

식(5)와 (6)은 한 대의 기계는 하나의 위치에만 할당됨을 의미하고, 식(7)은 각 기계가 단지 하나의 제조셀에만 속함을 보여준다. 특히 식(6)은 기계가 놓이게 될 위치의 수는 제조셀을 구성하는 전체 기계의 수보다는 많거나 같아야 한다는 것을 의미한다. 예를 들어 전체 기계대수가 4대일 경우, 3행으로 이루어진 배치형식에서 열의 수가 적어도 4열 이상이 되어야 3행 × 4열 = 12개의 위치가 존재하게 되어 식(6)을 만족하게 된다. 식(8)과 (9)는 제조셀 내에 존재하는 기계대수의 상한과 하한을 의미하고, 식(10)은 각 부품은 단지 하나의 부품군에만 속함을 보여준다. 식(11)과 (12)는 각 부품에 대하여 하나의 공정은 오직 한 대의 기계에서만 가공되어야 함을 보장하며, 식(13)은 모든 변수가 '0' 또는 '1'의 값을 갖는 변수임을 나타낸다.

3. 동시 설계를 위한 하이브리드 방법의 개발

이 논문에서 제안한 수리 모델은 대상문제의 규모가 큰 경우에 많은 시간이 소요되더라도 만족할 만한 좋은 해를 얻을 수 없기 때문에, GA를 기반으로 하여 Tabu 탐색을 혼용한 하이브리드 방법을 이용하여 제조셀 구성과 셀 배치를 동시에 설계하였다. 하이브리드 방법은 크게 GA 모듈과 Tabu 탐색 모듈로 구성되며, 수행절차는 <그림 1>과 같다.

먼저 GA 모듈을 적용하여 제조셀을 구성하면서 동시에 셀 배치를 설계한 후 이를 평가한다. GA 모듈을 수행하면서 주어진 세대수 동안에도 해가 만족할 만큼 개선되지 않으면, Tabu 탐색 모듈을 수행한다. 이때 GA 모듈의 현재 세대에서 가장 좋은 해를 Tabu 탐색의 후보해로 설정하여 다수의 이웃해를 생성함으로써, GA를 수행하여 얻은 해를 개선시킨다. 이처럼 개선된 해가 그 세대에서 GA의 새로운 최적해가 된다. 이와 같은 과정을 종료조건을 만족할 때까지 반복함으로써 GA와 Tabu 탐색을 각각 독립적으로 수행하는 것보다 효율적이고 다양한 탐색이 가능해진다. 즉 GA의 세대별 최적해에 대하여 Tabu 탐색을 이용하여 주변의 이웃해를 평가함으로써 개선의 여지가 있을 경우, 이를 GA의 해당 세대에서의 새로운 최적해로 대체

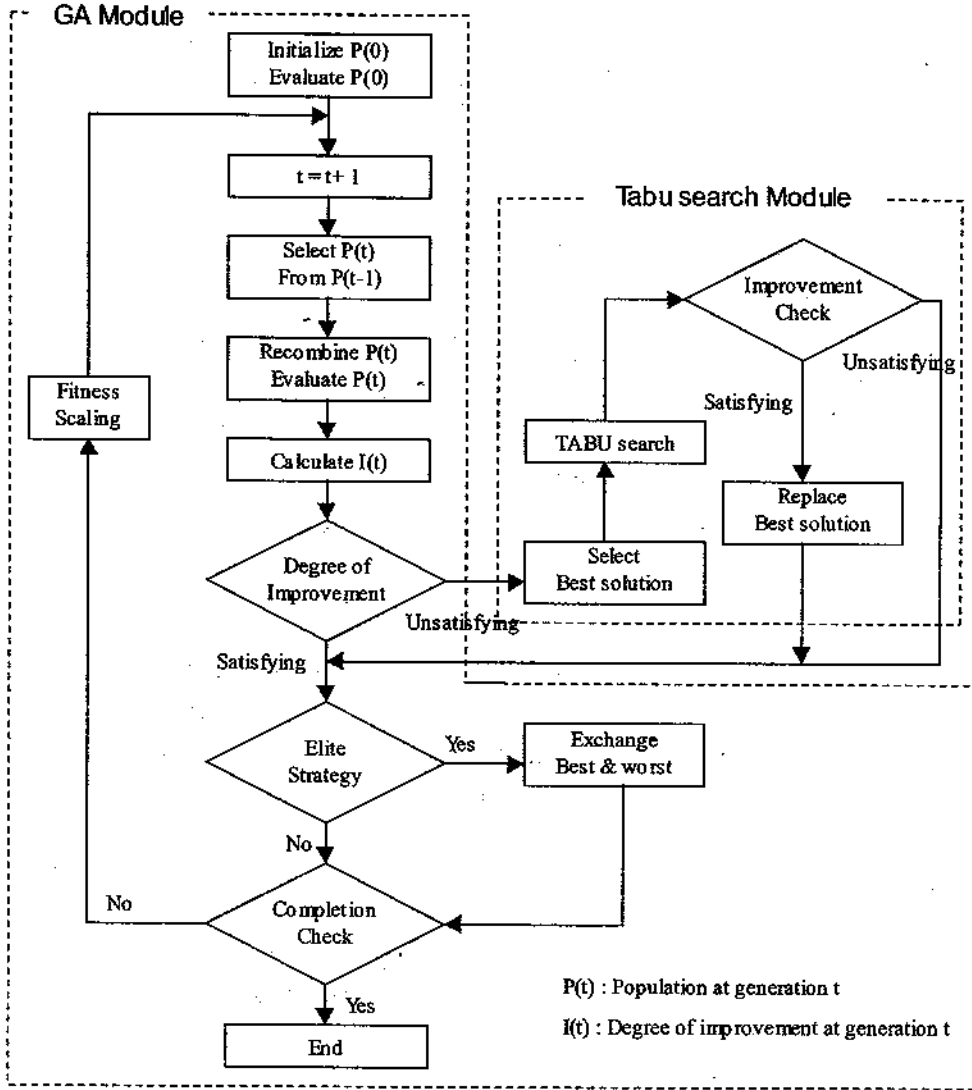


그림 1. 하이브리드 방법의 수행절차.

하게 된다. 하이브리드 방법을 GA 모듈과 Tabu 탐색 모듈로 나누어 다음에 설명한다.

3.1 하이브리드 방법의 GA 수행 모듈

3.1.1 후보해의 표현체계

하이브리드 방법을 적용함에 있어 대상문제에 대한 후보해의 표현체계를 정립하는 것이 중요한 역할을 하는데, 일반적으로 하나의 후보해는 하나의 스트링(string) 형태로 표현한다. 스트링은 여러 개의 요소(element)로 구성되며, 이들 요소는 후보해를 표현하기 위해 필요한 정보를 갖는다. 이 논문에서는 하나의 설계안에 대응하는 후보해를 표현하기 위해서 다음과 같은 세 가지 스트링 형태로 구성되는 표현체계를 제안하였다.

(i) 스트링 형태 1: T1 = (G₁, ..., G_j, ..., G_p)

스트링 T1의 요소값 G_j는 부품 j가 속한 부품군 번호와 부품 j가 사용하는 공정계획 번호를 동시에 나타낸다. 이때 요소값 G_j는 '제조셀의 수 × 각 부품의 공정계

획 수 (= C × R_j)'를 초과할 수 없으며, 스트링 T1의 길이는 부품의 수 p와 같다. 즉 G_j는 [1, C × R_j] 사이의 범위에 존재하는 정수 값을 취하며, 다음의 식을 사용하여 정보를 계산한다.

• 부품 j가 속한 부품군의 번호:

$$l \leftarrow [(G_j - 1) \bmod C] + 1 \quad (14)$$

• 부품 j가 사용하는 공정계획 번호:

$$r \leftarrow \lfloor (G_j - 1) / C \rfloor + 1 \quad (15)$$

여기서 $\lfloor x \rfloor$ 는 x보다 작거나 같은 정수를 나타낸다.

예를 들어, 제조셀 수(C)가 2개이고 부품의 수(p)가 5개인 경우, 스트링 T1 = (G₁, G₂, G₃, G₄, G₅) = (1, 2, 3, 2, 1)을 고려하자. G₁=1에서 식 (14)로부터 l=1이므로 부품 1이 부품군 1에 속하고, 식 (15)로부터 r=1이므로 부품 1이 첫번째 공정계획에 따라 가공됨을 의미한다. 마찬가지로 G₂=2에서 l=2이므로 부품 2가 부품군 2에 속하고, r=1이므로 부품 2가 첫번째 공정계획에 따라 가공됨을 의미한다.

(ii) 스트링 형태 2: $T2=(F_1, \dots, F_i, \dots, F_m)$
 스트링 T2의 요소값 F_i 는 기계 i 가 놓이게 될 위치를 나타내며, 순열형태(Permutation Type)로 표현한다. 스트링 T2의 길이는 각 위치에 놓일 수 있는 기계대수 m 과 같다. 예를 들어, 스트링 $T2=(F_1, F_2, F_3, F_4) = (a, b, c, d)$ 는 기계 1은 위치 a , 기계 2는 위치 b , 기계 3은 위치 c , 그리고 기계 4는 위치 d 에 존재함을 의미한다.

(iii) 스트링 형태 3 : $T3=(E_1, \dots, E_i, \dots, E_m)$
 스트링 T3의 요소값 E_i 는 기계 i 가 속한 제조셀을 나타내며, 스트링 T3의 길이는 기계대수 m 과 같다. 예를 들어, 스트링 $T3=(E_1, E_2, E_3, E_4) = (A, B, A, B)$ 은 제조셀 A는 기계 1과 기계 3, 그리고 제조셀 B는 기계 2와 기계 4로 구성됨을 의미한다.

대상문제에 대한 후보해가 서로 다른 세 가지 표현 형태를 갖기 때문에, GA의 수행시 하나의 스트링에 대하여 일괄적으로 동일한 교차 연산 및 돌연변이 연산을 수행하는 것은 불가능하다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 이 논문에서는 모든 정보를 하나의 스트링으로 표현하지 않고, 관련 있는 정보를 가진 다수의 스트링이 모여 하나의 후보해를 구성하는 multiple chromosome을 사용하였다.

3.1.2 교차 연산자의 개발

이 논문에서는 서로 다른 형태의 표현체계를 가진 정보로 이루어진 후보해에 대하여, 같은 표현체계를 갖는 요소끼리만 동일한 교차 연산을 적용함으로써, 교차 연산 후에도 항상 실행 가능한 해가 생성되도록 하였다. 스트링 형태 T1과 T3의 경우는 1점 교차 연산자(One-point Crossover)나 2점 교차연산자(Two-point Crossover)를 이용한다. 반면에 스트링 형태 T2의 경우 순열형태(Permutation Type)로 표현되기 때문에 교차 연산자 PMX, CX, OX 등을 이용할 경우에만 교차 연산을 적용한 후에도 스트링의 정보가 유지된다.

예를 들어 5개의 부품과 4대의 기계가 <표 1>과 같이 2개의 제조셀을 구성하는 셀 제조시스템을 고려하자.

<표 1>의 설계안에 대응하는 후보해는 <그림 2>와 같이 표현된다.

<그림 3> (1)에서 스트링 $S1=(T1-T2-T3) = (1-2-3-2-1$

표 1. 설계안의 예

셀	기계 (위치)	부품 (공정계획)
C1	M1 (2) M2 (3)	P1 (1)
		P3 (2)
		P5 (1)
C2	M3 (1) M4 (4)	P2 (1)
		P4 (1)

형태 T1					형태 T2				형태 T3			
1	2	3	2	1	2	3	1	4	1	1	2	2
P1	P2	P3	P4	P5	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4

그림 2. 세 가지형태로 표현되는 후보해의 예.

	교차점 1				교차점 2			
S1	(1 2 3 2 1)	(2 3	1 4)	(1 1	2 2)			
S2	(2 1 3 1 2)	(1 3	2 4)	(2 1	1 2)			

(1) 2점 교차 연산 적용 전

S1'	(1 2 3 2 1)	(2* 3	2* 4)	(2 1	2 2)
S2'	(2 1 3 1 2)	(1* 3	1* 4)	(1 1	1 2)

(2) 2점 교차 연산 적용 후

그림 3. 표현형태에 관계없이 교차 연산을 수행한 경우.

~~(1-2-3-2-1)~~을 임의의 다른 스트링 $S2=(T1-T2-T3) = (2-1-3-1-2-1-3-2-1-2-1-1-2)$ 와 교차점(crossover point)이 두 개인 2점 교차 연산을 적용하면, 아래의 <그림 3>의 (2)와 같이 스트링 S1'의 형태 T2에서 2*가 중복되고, 스트링 S2'의 형태 T2에서 1*이 중복되므로 실행 불가능한 해가 생성된다. 즉 S1'에서 형태 T2 = (2 3 2 4)가 되어 기계 M1과 기계 M3이 모두 위치 2에 놓이게 된다는 의미이므로, 하나의 위치에는 한 대의 기계만이 존재해야 한다는 식 (5)와 (6)에 위배된다.

<그림 4> (1)과 같이 스트링 $O1=(T1-T2-T3) = (1-2-3-2-1-1-3-2-1-1-2-2)$ 과 임의의 다른 스트링 $O2=(T1-T2-T3) = (2-1-3-1-2-1-3-2-1-2-1-1-2)$ 를 각각의 형태 T1, T2, T3에 대해 서로 다른 교차 연산을 적용시킬 경우, <그림 4> (2)의 스트링 O1' 및 O2'와 같이 실행 가능한 해가 생성된다.

이 논문에서는 순열형태로 표현되는 스트링 형태 T2의 교차 연산을 위해 PMX, OX, CX 이외에도 새로운 교차연산자 MX (Mixed Crossover)를 개발하여 사용하였다. PMX는 유전자 정보의 절대적인 위치를 중요시하고, OX는 유전자 정보의 상대

	1점 교차				PMX 연산				1점 교차			
O1	1	2	3	2 1	2	3	1	4	1	1	2	2
O2	2	1	3	1 2	1	3	2	4	2	1	1	2

(1) 교차 연산 적용 전

O1'	1	2	3	1 2	1	3	2	4	1	1	1	2
O2'	2	1	3	2 1	2	3	1	4	2	1	2	2

(2) 교차 연산 적용 후

그림 4. 표현형태에 따라 서로 다른 교차연산을 수행.

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

(1) MX 교차 연산 적용 전

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

(2) MX 교차 연산 적용 후

그림 5. MX 교차 연산자의 연산 예.

적 위치를 중요시하는 데 반하여, MX 교차연산자는 유전자 정보의 절대적 위치와 상대적 위치를 동시에 고려하며, <그림 5> (1)과 같은 두 개의 스트링에 대하여 연산을 적용시킨 결과는 <그림 5> (2)와 같다.

[MX 교차연산의 예]

<그림 5> (1)과 같이 두 개의 교차점을 갖는 다음의 두 스트링 S1, S2를 고려하자.

S1: (245 | 389 | 617)

S2: (398 | 654 | 271)

먼저, 두 개의 교차점 사이의 요소는 절대적인 위치를 그대로 유지하도록 단순히 S1의 (389)와 S2의 (654)를 서로 교환함으로써 스트링 S1'과 S2'을 생성한다.

S1': (245 | 654 | 617)

S2': (398 | 389 | 271)

S1'와 S2'의 나머지 요소에 대해서 각각 상대적인 위치를 유지시킴으로써, 최종적으로 스트링 S1''와 S2''를 생성한다.

S1'': (238 | 654 | 917)

S2'': (654 | 389 | 271)

3.1.3 적합도 함수

하이브리드 방법을 수행함에 있어 후보해의 질이 얼마나 좋은가를 결정하기 위하여 적합도 함수(fitness function)를 사용한다. 즉 임의의 후보해가 다음 세대에 계속 살아남을지의 여부를 결정하는 것은 완전히 적합도의 크기에 의존하며, 좋은 목적함수 값을 갖는 후보해에 보다 큰 적합도를 할당함으로써 후보해가 다음 세대에 살아남을 확률을 크게 한다. 이 논문에서 제안한 수리 모델과 같이 목적함수 $g(t)$ 가 최소화 문제인 경우, 최대화 문제인 적합도 함수 $f(t)$ 로 변환하기 위하여 다음의 식(16)과 같은 변환이 필요하다.

$$f(t) = \begin{cases} F^{\max} - g(t), & g(t) < F^{\max} \text{인 경우} \\ 0, & \text{그 외의 경우} \end{cases} \quad (16)$$

단, F^{\max} 는 매우 큰 양의 수

제약식을 갖는 동시 설계문제를 제약식을 갖지 않는 문제로

변환하기 위하여 제약식을 위반하는 정도에 따라 벌점 P 를 목적함수 값에 더하는 벌점법(penalty method)을 도입하였다. 이 논문에서 제안한 수리 모델의 목적함수는 최종적으로 다음의 식(17)과 같이 적합도 함수로 변환된다.

$$f(t) = \begin{cases} F^{\max} - G(t), & G(t) < F^{\max} \text{인 경우} \\ 0, & \text{그 외의 경우} \end{cases} \quad (17)$$

단, $G(t) = g(t) + P$

P 는 벌점(penalty)

3.1.4 대체 전략

대체전략(replacement strategy)이란 이전 세대에 있는 후보해들 중에서 현 세대의 후보해 집단에 있는 후보해 보다 높은 적합도를 갖는 것은 현 세대의 집단에 있는 낮은 적합도를 갖는 후보해와 대체하지는 전략을 말한다. 이 전략을 사용하는 이유는 교차나 돌연변이 연산으로 인하여 가장 좋은 후보해가 GA의 수행도중에 사라지는 일이 없도록 하고자 함에 있다. 이 논문에서는 이전 세대에서 가장 높은 적합도를 갖는 후보해 Z_1 이 현 세대의 집단에서 가장 낮은 적합도를 갖는 후보해 Z_2 보다 높은 적합도를 가질 때, 이전 세대의 후보해 Z_1 을 현 세대의 후보해 Z_2 와 대체하는 "엘리트 전략(elite strategy)"을 사용한다.

3.2 하이브리드 방법의 Tabu 탐색 수행 모델

Tabu 탐색은 보통의 Hill-Climbing 탐색기법에 비해 국소 최적해에 빠질 위험이 적으면서, 유전 알고리즘이나 Simulated annealing과 같은 전역적 탐색기법에 비해 대상문제에 관한 고유한 지식을 활용하기에 유리한 탐색기법이다. Tabu 탐색기법은 초기해 S_0 에서 탐색을 시작하여 이를 후보해(또는 현재해) S 로 설정한 후, S 의 이웃(neighborhood)에 있는 $M(S)$ 에 대해 탐색한다. 일반적으로 $M(S)$ 에 대한 정의 및 크기는 대상문제나 탐색 전략에 따라 달라진다. $M(S)$ 에 대해 가장 좋은 평가 값을 갖는 것이 새롭게 후보해 S 로 설정되며, 이를 기준으로 계속해서 탐색하여 정해진 반복회수에 도달하거나 해의 개선 정도가 일정수준 이하로 떨어질 경우에 탐색을 끝낸다.

3.2.1 이웃해의 생성 및 평가

셀 제조시스템의 설계안을 마련하기 위해 Tabu 탐색을 적용함에 있어 후보해의 표현체계는 GA와 마찬가지로 세 가지 스트링 형태 T1, T2, T3을 사용하며, T2에 대하여 다음과 같은 두 가지 방법으로 이웃해를 생성한다.

① 두 요소의 위치 교환(exchange)

이 방법은 후보해에서 임의로 선택된 두 요소의 위치를 서로 교환하는 것이다. 예를 들어, <그림 6>과 같이 네 대의 기계 M1, M2, M3, M4의 위치가 각각 a, b, c, d일 때, 임의로 두 대의 기계 M1과 M3가 선택되었다면, 기계 M1과 M3의 절대적인 위치 a와 c가 서로 바뀌게 되어 이웃해의 기계들의 위치는 각

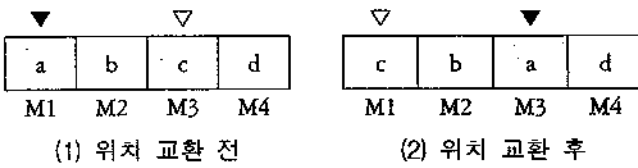


그림 6. 절대적인 위치 교환 (exchange).

각 c, b, a, d 가 된다.

② 한 기계의 임의적 위치 이동(shift)

이것은 한 대의 기계를 선택하여 임의로 위치를 이동시키는 방법이다. 예를 들어, <그림 7>과 같이 후보해에서 네 대의 기계들의 위치가 각각 a, b, c, d 를 따른다고 하자. 이때 기계 M1이 선택되어 임의로 기계 M3과 M4의 위치 사이로 이동한다면, 이웃해의 기계들의 위치는 각각 b, c, a, d 가 된다.

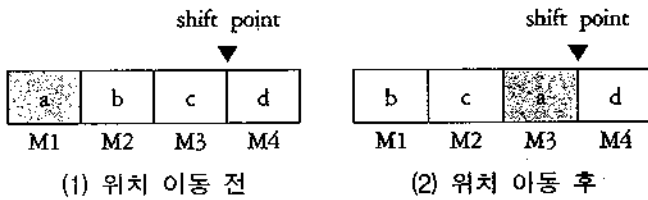


그림 7. 임의적 위치 이동(shift).

3.2.2 탐색의 다각화

동시 설계문제에 Tabu 탐색 모듈을 적용함에 있어 사용하는 다각화 방안은 탐색 도중 후보해가 국지 최적해에 도달했다고 판단될 경우, 탐색의 방향이 바뀔 수 있도록 Tabu 목록의 크기를 크게 하고 열망수준을 강화하는 방법을 사용한다.

4. 적용예제

제조셀 구성과 셀 배치를 동시에 고려한 셀 제조시스템의 설계문제에 사용된 예제의 각 자료 값은 <표 2>와 같은 범위 내에 존재하도록 임의로 생성하였다.

4.1 셀 제조시스템 설계에 대한 수치예제

대안 공정계획과 대안 기계에 대한 입력정보를 가진 예제에 대해 제안된 방법을 적용하여 제조 셀과 셀 배치를 동시에 설계하였다. 예제는 Logendran *et al.*(1994)이 사용한 예제를 기본으로 하여 <표 2>의 값에 따라 임의로 가공시간과 단위시간당 가공비용 등에 대한 정보를 첨가하였다. 기계가 7대이고 부품이 14개이며 공정이 7개인 경우로 동시 설계시에 고려되는 입력정보가 <표 3>에 주어진다. <표 3>의 (2)의 각 요소값은 각각 부품의 공정별 가공시간과 단위시간당 가공비용을 나타낸다.

표 2. 예제에 사용된 각 자료가 가지는 값의 범위

자료	의미	값의 범위 (양의 정수)
m	기계 수	[5, 20]
p	부품 수	[10, 30]
R_i	부품 i 의 대안 공정계획 수	[1, 3]
D_i	부품 i 의 생산량	[10, 100]
T_{irk}	부품 i 가 공정계획 r 을 사용할 때, 공정 k 를 기계 i 에서 처리하는 시간	[1, 9]
L_{ai}	위치 a 에 기계 i 를 설치하는 비용	[200, 700]
H_{ab}	위치 a 와 b 사이의 단위당 운반비용	[1, 3]
V_{irk}	부품 i 가 공정계획 r 을 사용할 때, k 공정을 기계 i 에서 가공하는데 소요되는 단위시간당 비용	[1, 5]

예제에 사용된 기타의 제조매개변수의 값은 다음과 같다.

[제조셀의 매개변수값]

$$C=3; U_M=3; L_M=2; w_1=0.1, w_2=0.9$$

[부품의 생산량]

- P1(10), P2(20), P3(10), P4(20), P5(20), P6(10), P7(20), P8(10), P9(20), P10(20), P11(10), P12(20), P13(10), P14(20)

[기계별 설치비용]

- M1(200), M2(300), M3(200), M4(300), M5(500), M6(300), M7(700)

[GA 매개변수값]

집단크기=100, 최대세대수=500, 교차확률=0.9, 돌연변이 확률=0.01

[Tabu 탐색 매개변수값]

반복회수=1000, tabu 목록 크기=50, 열망수준=2, 다각화를 수행하기 위한 역치=10

동시 설계 방법에 의하여 결정된 제조셀 구성결과와 셀 배치의 결과가 각각 <표 4>와 <그림 8>에서 주어진다. <표 4>에서 기계 M5와 M6이 제조셀 C3을 구성함을 알 수 있다. 기계 M5와 M6은 동일한 제조셀 내에 존재하기 때문에, <그림 8>과 같이 서로 인접하여 설치된다. 기계 M5와 M6의 위치가 서로 바뀔 경우, 셀 내 이동량은 변함이 없지만 셀 간 이동량은 주변의 다른 기계들과 상호 관련성이 있으므로 달라지게 된다. 다시 말해서 기계 M5와 M6의 상대적인 위치는 다른 제조셀과의 셀 간 이동량이 적게되는 방향으로 결정된다.

4.2 하이브리드 방법의 수행도 평가

제안한 하이브리드 방법의 수행도를 평가하기 위하여, GA

표 3. 셀 제조시스템의 설계에 사용한 입력정보

(1) 부품별 대안공정계획

부 품	P1			P2			P3		P4		P5			P6		P7		P8			P9			P10		P11			P12			P13	P14				
	1	2		1	2	3	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	1	2			
O1		1		1					1	1			1			1		1			1			1		1			1					1			1
O2	1			1			1	1		1	1		1	1	1								1		1	1	1		1	1							
O3				1						1		1	1		1	1		1	1	1		1	1			1			1			1		1			
O4		1			1	1			1			1		1		1	1	1	1			1	1			1											
O5				1						1			1		1	1						1			1			1				1	1				
O6	1				1			1		1					1									1	1			1			1						
O7	1					1		1	1	1						1	1	1						1		1		1			1						

(2) 각 공정의 대안 기계에서의 가공시간 및 비용

부 품	P1			P2			P3		P4		P5			P6		P7	
	1	2		1	2	3	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2
O1	M1		3(2)	1(5)					4(2)	4(4)				1(3)			
	M2		2(1)	2(4)					3(4)	2(5)				2(1)			
O2	M3	3(4)*		1(5)			1(2)	3(4)		3(1)		4(3)		3(2)	1(1)		
	M4	2(5)		2(5)			2(3)	2(4)		4(2)		2(5)		2(4)	1(2)		
O3	M5			4(3)						4(4)		5(2)				3(2)	
	M6			3(4)						2(4)		2(5)				3(3)	
O4	M1		5(2)		3(2)	4(1)			3(3)		5(2)				3(2)		
	M3		2(1)		1(5)	5(4)			2(3)		3(4)				2(4)		
O5	M3			2(4)						3(4)		5(4)			2(1)		
	M6			4(1)						2(4)		4(2)			1(4)		
O6	M5	2(3)		3(3)			5(3)		4(1)			5(2)					
	M7	3(3)		1(3)			3(4)		2(3)			2(4)					
O7	M2	4(1)			3(1)			1(5)		4(3)		4(2)					3(3)
	M4	2(2)			2(3)			3(5)		2(3)		4(3)					4(4)

부 품	P8			P9			P10		P11			P12			P13	P14	
	1	2		1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	3	1	1	2
O1	M1	1(4)		5(2)				3(2)		4(2)			3(4)			1(4)	
	M2	2(3)		3(2)				2(5)		2(3)			2(2)			3(2)	
O2	M3					4(3)			3(4)	5(3)		4(1)	1(3)				
	M4					2(2)			2(4)	4(4)		1(5)	2(4)				
O3	M5		1(4)		2(3)		5(1)		5(2)			4(3)			4(3)		3(4)
	M6		3(2)		4(1)		4(2)		3(2)			3(4)			2(4)		3(2)
O4	M1		2(1)	4(3)	2(1)			3(4)	2(2)			4(2)					
	M3		3(3)	3(5)	4(3)			2(4)	5(2)			3(4)					
O5	M3	3(4)				1(3)				3(3)			3(2)			2(3)	5(2)
	M6	2(5)				2(4)				2(4)			4(2)			5(3)	3(3)
O6	M5	3(1)			3(1)		4(2)			3(2)				3(4)			
	M7	2(3)			2(2)		2(5)			1(3)				2(4)			
O7	M2		4(3)	2(1)			4(5)			1(2)			5(2)				
	M4		2(4)	3(2)			3(5)			2(3)			4(3)				

* 부품 P1의 첫 번째 공정계획에서 공정 O2의 가공시간과 단위시간당 가공비용은 각각 '3'과 '4'임을 나타낸다.

표 4. 동시 설계 방법을 사용한 제조 셀 구성결과

셀	제조셀	부품군	
		부품(공정계획)	공정 (기계)
C1	M2	P1(2)	O1-O4 (M1-M3)
	M3	P8(1)	O1-O5-O6 (M2-M3-M5)
		P14(1)	O1-O5 (M2-M3)
C2	M1	P4(1)	O2 (M4)
	M4	P7(1)	O2-O4 (M4-M1)
C3	M5	P2(1)	O1-O5 (M1-M6)
		P3(2)	O2-O6 (M4-M5)
		P5(2)	O3-O5 (M5-M3)
		P6(1)	O3-O6 (M6-M5)
		P9(2)	O3-M4 (M6-M1)
	M6	P10(1)	O3 (M6)
		P11(1)	O3-O4 (M5-M3)
		P12(1)	O3-O4 (M6-M1)
		P13(1)	O3 (M5)

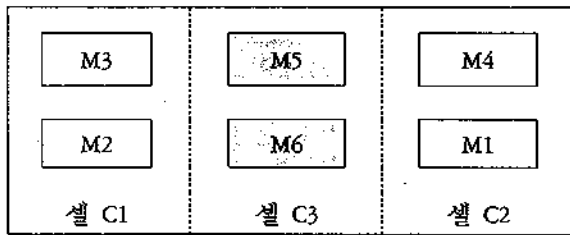


그림 8. 동시 설계 방법을 사용한 셀 배치 설계결과.

에 기초한 방법 및 Tabu 탐색에 기초한 방법과의 비교를 시도 하였다. 세 가지 기법을 10가지 실험(<표 5>와 <표 6> 참조)에 대하여 동시 설계에 적용한 결과를 <그림 9>와 <그림 10>에서 보인다. <표 5>의 실험조건 1은 임의로 생성된 다섯 개의 예제에 대하여 GA의 수행시 집단크기를 200으로 하고, 최대세대수를 각각 2300, 3000, 2300, 3100, 1900으로 하였다. <표 6>의 실험조건 2는 실험조건 1에 비하여 집단크기를 100으로 줄이고, 최대세대수를 각각 4600, 6000, 4600, 6200, 3800으로 늘렸다. 실험결과로부터 하이브리드 방법이 집단크기 및 최대세대수의 값에 관계없이 GA와 Tabu 탐색에 비하여 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

표 5. 실험조건 1 (Population Size=200, Iterations=10,000)

No.	m	p	C	행×열	[L _M , U _M]	Neighbor	MaxGen
A1	9	28	3	3×3	[2, 4]	46	2300
A2	10	40	3	2×5	[2, 4]	60	3000
A3	12	22	3	3×4	[3, 5]	46	2300
A4	11	40	3	3×4	[3, 5]	62	3100
A5	11	16	3	3×4	[3, 5]	38	1900

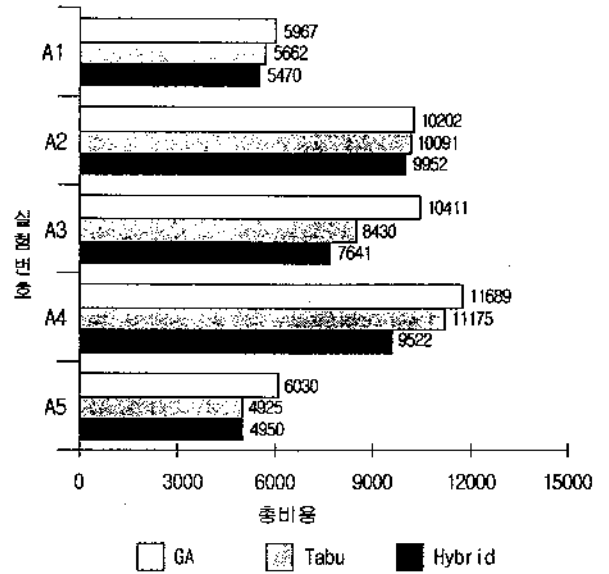


그림 9. 실험조건 1에서의 수행도 비교.

표 6. 실험조건 2 (Population Size=100, Iterations=10,000)

No.	m	p	C	행×열	[L _M , U _M]	Neighbor	MaxGen
B1	9	28	3	3×3	[2, 4]	46	4600
B2	10	40	3	2×5	[2, 4]	60	6000
B3	12	22	3	3×4	[3, 5]	46	4600
B4	11	40	3	3×4	[3, 5]	62	6200
B5	11	16	3	3×4	[3, 5]	38	3800

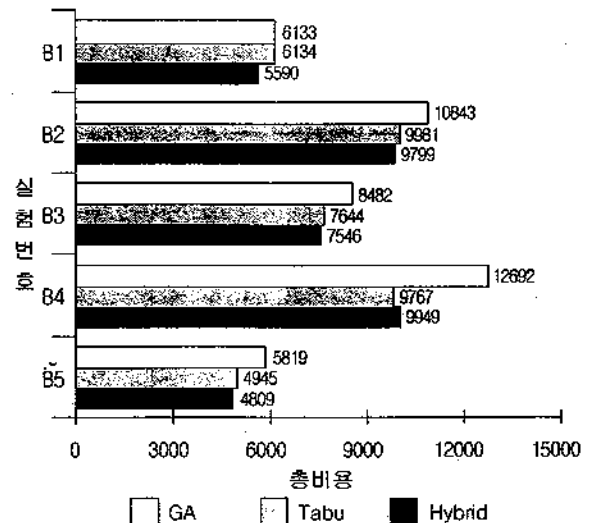


그림 10. 실험조건 2에서의 수행도 비교.

5. 결론

이 논문은 셀 제조시스템에서 제조셀 구성문제와 셀 배치 설계문제를 연구의 대상으로 하였다. 이 논문의 목적은 제조셀

구성과 셀 배치를 동시에 수행하기 위한 수리 모델을 개발하고 그 해법을 제시하는 것으로, 각 부품별 공정계획의 선정, 부품군과 제조셀의 형성, 공장내의 제조셀의 배치 및 각 제조셀 내에 존재하는 기계들의 배치에 대하여 논의하였다. 수리 모델은 계획기간 동안의 기계설치비용, 부품의 가공을 위한 기계운영 비용, 그리고 부품의 셀 간 및 셀 내 이동비용 등으로 구성된 총비용을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 개발된 수리 모델에 대한 해법으로 GA를 기반으로 하여 Tabu 탐색을 혼용한 하이브리드 방법을 제안하였다. 하이브리드 방법이 GA나 Tabu 탐색에 기초한 방법 보다 우수한 성능을 가짐을 실험을 통하여 비교·분석하였다.

이 논문에서는 대상문제에 대한 후보해가 서로 다른 세 가지 표현 형태를 갖기 때문에, GA의 수행시 하나의 스트링에 대하여 일괄적으로 동일한 교차 연산 및 돌연변이 연산을 수행하는 것은 불가능하다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 모든 정보를 하나의 스트링으로 표현하지 않고, 관련 있는 정보를 가진 다수의 스트링이 모여 하나의 후보해를 구성하는 multiple chromosome을 사용하였다. 그리고 순열형태로 표현되는 스트링 형태의 교차연산을 위해 PMX, OX 이외에도 새로운 교차연산자 MX(Mixed Crossover)를 개발하여 사용하였다. PMX는 유전자 정보의 절대적인 위치를 중요시하고, OX는 유전자 정보의 상대적 위치를 중요시하는 데 비하여, MX 교차연산자는 유전자 정보의 절대적 위치와 상대적 위치를 동시에 고려한다.

이 논문은 제조셀 구성과 공간적인 셀 배치를 동시에 고려하여 셀 제조시스템을 설계하기 때문에, 이들 두 가지 문제를 독립적으로 접근하는 전통적인 연구방법과는 차별화 된다. 다시 말해서 제조셀 구성과 공간적인 셀 배치를 동시에 고려함으로써, 제조셀 구성과 셀 배치와의 통합을 시도하였다. 셀 제조시스템의 합리적인 설계를 위하여 부품의 생산량, 부품별 대안공정계획, 공정별 대안기계, 부품별 공정처리시간, 부품의 각 공정별 단위시간당 가공비용 등과 같은 자료를 고려하였으며, 구성될 제조셀의 수, 제조셀의 크기 및 하나의 제조셀에 포함된 기계의 대수 등에 관한 제약을 고려함으로써, 현장의 상황변화에 유연하게 대처할 수 있는 최적의 제조셀 구성 및 셀 배치가 가능하도록 하였다.

참고문헌

Allen, C. W. (1990), *Simultaneous Engineering: Integrating Manufacturing and Design*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI.
 Cho, K. K., Lee, B. U. and Jeong, Y. D. (1998), Genetic Algorithm-based Approach for Design of Manufacturing Cell, Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Industrial Engineering Theories, Applications and Practice, December 28-31, Hong Kong.
 Chu, C. H. (1993), Manufacturing Cell Formation by Competitive Learning, *International Journal of Production Research*, 31(4), 829-843.
 Flynn, B. B. and Jacobs, F. R. (1987), Applications and Implementation: An Experimental Comparison of Cellular (Group Technology) Layout with Process Layout, *Decision Sciences*, 18(4), 562-581.
 Gupta, Y. P., Gupta, M. C., Kumar, A. and Sundram, C. (1995), Minimizing Total Intercell and Intracell Moves in Cellular Manufacturing: A Genetic Algorithm Approach, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 8(2), 92-101.
 Hon, K. K. B. and Chi, H. (1994), A New Approach of Group Technology Part Families Optimization, *Annals of the CIRP*, 43(1), 425-428.
 Kaparthi, S. and Suresh, N. C. (1992), Machine-Component Cell Formation in Group Technology: a Neural Network Approach, *International Journal of Production Research*, 30(6), 1353-1367.
 Lee, B. U., Cho, K. K. and Yang, T. (1995), Machine-Part Cell Formation using Genetic Algorithm, Proceedings of the 18th International Conference on Computers and Industrial Engineering, 259-263.
 Logendran, R. (1990), A Workload based Model for Minimizing Total Intercell and Intracell Moves in Cellular Manufacturing, *International Journal of Production Research*, 28(5), 913-925.
 Logendran, R., Ramarkrishna, P. and Sriskandarajah, C. (1994), Tabu search-based Heuristics for Cellular Manufacturing Systems in the Presence of Alternative Process Plans, *International Journal of Production Research*, 32(2), 273-297.
 Shafer, S. M. and Charnes, J. M. (1993), Cellular versus Functional Layouts under a Variety of Shop Operating Conditions, *Decision Sciences*, 24(3), 665-681.
 Suresh, N. C. and Kaparthi, S. (1994), Performance of Fuzzy ART Neural Network for Group Technology Cell Formation, *International Journal of Production Research*, 32(7), 1693-1713.
 Vakharia, A. J. and Wemmerlöw, U. (1990), Designing a Cellular Manufacturing System: A Material Flow Approach based on Operation Sequence, *IIE Transactions*, 22, 84-97.



조규갑
 부산대학교 기계공학과 학사
 부산대학교 대학원 기계공학과 석사
 미국 Alabama 대학교 대학원 산업공학과 석사
 미국 Pennsylvania 주립대학교 대학원 산업공학과 박사
 현재: 부산대학교 산업공학과 교수
 관심분야: 생산시스템 공학, 전문가 시스템의 응용, CAPP, CIM 등



이명욱
 부산대학교 공과대학 산업공학과 학사
 부산대학교 대학원 산업공학과 석사
 부산대학교 대학원 산업공학과 박사
 현재: 제일제당 CJ GLS 영업전략팀 과장
 관심분야: 생산시스템 공학, Logistics & SCM, 지식경영, Cellular Manufacturing Systems, Genetic Algorithm 응용 등