

대체가공경로와 가공순서를 고려한 부품-기계 군집 알고리즘

백준걸^{1*} · 백종관² · 김창욱³

¹인덕대학 산업시스템경영과 / ²고려대학교 정보통신기술공동연구소 / ³연세대학교 컴퓨터·산업공학부

A Part-Machine Grouping Algorithm Considering Alternative Part Routings and Operation Sequences

Jun-Geol Baek¹ · Jong-Kwan Baek² · Chang Ouk Kim³

Department of Industrial System Engineering, Induk Institute of Technology, Seoul, 139-749

Research Institute for Information and Communication Technology, Korea University, Seoul, 136-701

School of Computer Science and Industrial Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749

In this paper, we consider a multi-objective part-machine grouping problem, in which part types have several alternative part routings and each part routing has a machining sequence. This problem is characterized as optimally determining part type sets and its corresponding machine cells such that the sum of inter-cell part movements and the sum of machine workload imbalances are simultaneously minimized. Due to the complexity of the problem, a two-stage heuristic algorithm is proposed, and experiments are shown to verify the effectiveness of the algorithm.

Keywords: part-machine grouping problem, multi-objective function, alternative part routings, operation sequence, inter-cell part movement, machine workload imbalance

1. 서론

오늘날 제조현장에서는 빠르게 변화하는 고객의 요구를 만족시키기 위해서 다양한 종류의 제품을 생산하고 있으며, 이로 인해 제품 생산 공정은 매우 복잡한 형태를 띠게 된다. 셀형 제조(cellular manufacturing)는 복잡한 생산 공정의 흐름을 효율적으로 관리하기 위해 유사한 특성을 갖는 부품(part)들을 군(group)으로 묶고, 이 부품들을 가공하는 기계들을 셀(cell)로 묶음으로써 효율적인 생산이 가능하도록 제안된 방법이다. 따라서 셀형 제조를 효율적으로 수행하기 위해서는 무엇보다도 유사한 특성을 갖는 부품과 기계를 하나의 군으로 생성하는 부품-기계 군집(part-machine grouping) 문제를 효율적으로 해결하는 것이 중요하다(Chu, 1995; Wicks and Reasor, 1999). 부품-기계 군집은 공장에서 기계의 물리적 혹은 논리적 배치를 결정짓는 중요한 요인으로서 전반적인 물류의 흐름을 좌우하며 부품-기계 군집

알고리즘을 통해 얼마나 효율적으로 부품군과 이에 따른 기계군을 형성하느냐에 따라 부품의 이동, 재공품 수, 인건비, 그리고 총 생산시간 등을 줄일 수 있다 (Burbidge, 1997).

현재까지 부품-기계 군집 문제를 해결하기 위해 행렬이론 방법, 수리계획 방법, 그래프 이론 방법, 인공신경망 방법 등 다양한 형태의 방법이 제시되어 왔다(Kusiak *et al.*, 1986; Kusiak, 1990; Lee and Garcia-Diaz, 1996; Selim *et al.*, 1998; Venugopal and Narendran, 1994). 그러나 이러한 연구에서는 각각의 부품이 하나의 가공경로만을 갖는다는 가정을 기반으로 해법을 제시하고 있기 때문에 오늘날의 생산 현장에서와 같이 대부분의 부품이 다수의 대체가공경로를 지니고 있는 경우에 대해서는 적용되기 힘들다는 문제점을 지닌다. 따라서 최근의 연구에서는 대체가공경로를 고려한 부품-기계 군집 알고리즘 개발에 대한 연구가 진행되고 있다(Caux *et al.*, 2000; Hwang and Ree, 1996; Yin and

본 연구는 인덕대학 학술연구비 일부지원에 의하여 수행되었음.

* 연락처자 : 백준걸 교수, 139-749 서울시 노원구 월계동 산 76 인덕대학 산업시스템경영과, Fax : 02-901-6887, e-mail : jgbaek@induk.ac.kr
2002년 12월 접수; 2003년 4월 수정본 접수; 2003년 6월 게재 확정.

Yasuda, 2002). 그러나 대부분의 연구가 부품의 셀 간 이동(inter-cell part movements)을 최소화시키는 단일 목적을 기반으로 제시된 알고리즘으로서 실제 제조현장에서는 부품의 이동을 최소화시키는 것도 중요하지만 각각의 기계에 할당되는 부하를 평준화시키는 것도 생산성을 증대시키는 차원에서 매우 중요한 목적이 된다는 것을 간과하고 있다. 또한 부품-기계 군집 알고리즘을 통해 형성되어지는 부품군과 기계군의 수를 미리 정해진 값으로 제한함으로써 최적의 부품군과 기계군을 형성하기 힘들다는 문제점을 지니고 있다.

Kim et al.(2001)은 이러한 문제점들을 해결하기 위한 방법으로 대체가공경로를 갖는 부품-기계 군집 문제를 위한 일반화된 군집 알고리즘을 통해 부품의 셀 간 이동과 기계 부하의 평준화를 동시에 고려할 수 있는 방법을 제시하였다. 그러나 이 연구에서 제시한 알고리즘은 부품의 가공순서(operation sequence)를 고려하지 않고 단지 부품 가공경로 상에 존재하는 기계정보를 기반으로 제안된 알고리즘으로서 부품 가공순서가 부품의 셀 간 이동에 미치는 영향을 반영하지 못했다는 문제점을 지닌다. 또한 각각의 부품이 특정 기계에서 가공될 때 소요되는 가공시간(processing time)을 고려하지 않은 알고리즘을 제시함으로써 완전한 의미의 기계부하 평준화를 만족시킬 수 없다는 문제점을 지닌다.

부품 가공순서를 고려한 부품-기계 군집 알고리즘으로는 Ramabhatta and Nagi(1998)와 Wu(1998)의 연구를 들 수 있다. Ramabhatta and Nagi(1998)는 대체가공경로와 가공순서를 고려한 부품-기계 군집 문제를 풀기 위해 MILP(Mixed Integer Linear Programming)를 이용한 해법을 제시함으로써 기존의 수학적 방법에 비해 빠른 시간에 해법을 제시할 수 있도록 하였다. 그러나 이 연구에서는 기계군의 수가 미리 고정되어 있다는 가정을 지니고 있으므로 실제 문제를 풀기에는 제약점이 따르고 목적함수에서 기계부하의 평준화를 고려하지 못했다는 문제점을 지닌다. 또한 Wu(1998)는 부품 가공순서를 고려한 가공경로가 주어지고 기계 유형별로 동일한 복수 개의 기계가 존재하여 이들이 서로 다른 기계군에 할당될 수 있다는 가정하에 부품의 셀 간 이동을 최소화시킬 수 있는 부품-기계 군집 알고리즘을 제시하였다. 그러나 이 연구에서는 부품별 대체가공경로가 허용되지 않고 목적함수에서 기계부하의 평준화를 고려하지 못했다는 문제점을 지닌다.

따라서 본 연구에서는 대체가공경로와 가공순서를 갖는 부품정보를 알고 있을 때 효율적인 부품군과 기계군을 형성하는 문제를 해결하기 위한 알고리즘을 제시하고자 한다. 본 연구에서 제시하는 알고리즘은 부품별 대체가공경로와 가공순서를 고려하여 부품의 셀 간 이동을 최소화시키고 동시에 기계의 부하를 평준화시키는 효율적인 해를 제공하는 목적을 지닌다. 이를 위해 본 연구에서 제시하는

부품-기계 군집 알고리즘은 우선 부품 가공경로의 유사성을 분석하여 대표 부품 가공경로를 선정한 후 이를 기반으로 부품군을 형성하고, 나머지 부품의 가공경로에 대해서는 목적함수를 최소화시킬 수 있도록 부품군에 할당하는 순차적인 방법을 제시한다.

2. 부품-기계 군집 문제

2.1 가정

본 연구에서는 대체가공경로와 가공순서를 갖는 부품정보를 알고 있을 때 효율적으로 부품군과 기계군을 형성하기 위한 알고리즘을 제시하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 각 부품의 가공경로 정보가 <표 1>과 같이 주어진다고 가정한다.

<표 1>에서 각각의 부품 가공경로에 표시된 숫자는 해당 부품이 특정 기계에서 가공되는 순서를 나타낸 것이며, 이때 '0'으로 표시된 부분은 해당 부품 가공경로가 거치지 않는 기계를 의미한다. 그리고 괄호 안의 숫자는 해당 부품이 특정 기계에서 가공될 때 소요되는 가공시간을 나타낸다. 예를 들어, 부품 1의 가공경로 2는 기계 1과 기계 2에서 순차적으로 가공되며, 이 때 소요되는 가공시간은 각각 3과 2가 된다. 또한 본 연구에서는 각 부품에 대한 연간 소요량이 미리 주어져 있으며, 각각의 부품은 최종적으로 선택된 하나의 가공경로에 의해 가공되어진다고 가정한다. 그리고 각각의 기계는 해당 기계별 능력 한계(capacity limit)를 지니고 있으며 부품-기계 군집 문제는 이러한 기계의 능력 한계를 벗어나지 않는 범위에서 해답을 제시할 수 있어야 한다.

표 1. 부품 가공경로

부품 (연간 소요량)	가공 경로	기계 (가공시간)			
		1	2	3	4
1 (100)	1	1 (2)	3 (3)	2 (1)	0 (0)
	2	1 (3)	2 (2)	0 (0)	0 (0)
2 (80)	3	2 (3)	1 (1)	0 (0)	0 (0)
	4	0 (0)	0 (0)	1 (2)	2 (4)
3 (50)	5	0 (0)	2 (1)	3 (2)	1 (4)
	6	1 (3)	2 (2)	3 (1)	0 (0)
4 (120)	7	0 (0)	0 (0)	1 (2)	2 (2)
	8	0 (0)	3 (1)	1 (2)	2 (1)
기계 능력 한계		450	450	450	450

2.2 기호 정의

- R : 부품 가공경로 집합
- r : 부품 가공경로 번호 ($r=1, 2, \dots, |R|$)
- P : 부품 집합
- p : 부품 번호 ($p=1, 2, \dots, |P|$)
- M : 기계 집합
- m : 기계 번호 ($m=1, 2, \dots, |M|$)
- F : 부품군 집합
- f : 부품군 번호 ($f=1, 2, \dots, |F|$)
- r_f : 부품군 f 의 대표 부품 가공경로 번호
- R_f : 부품군 f 에 속한 부품들의 가공경로 집합
($r_f \in R_f$)
- R_p : 부품 p 의 대체가공경로 집합
($\bigcup_{p \in P} R_p = R$)
- d_r : 부품 가공경로 r 에 대한 연간 소요량
($d_r = d_{r'}$ if $r, r' \in R_p$ for some p)
- $(s_{r1}, \dots, s_{r|M|})$: 부품 가공경로 r 의 경로정보
- s_{rm} : 부품 가공경로 r 에서 기계 m 의 가공순서
- $I_{rm} = \begin{cases} 1 & \text{if } s_{rm} \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
- $\Psi(r) = \sum_{m \in M} I_{rm}$: 부품 가공경로 r 이 거치는 기계의 수
- t_{rm} : 부품 가공경로 r 에서 기계 m 의 가공시간
- CL_m : 기계 m 의 능력 한계

2.3 수리적 모델

본 연구의 대상이 되는 대체가공경로와 가공순서를 고려한 부품-기계 군집 문제는 다음과 같은 수리적 모델을 통해 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min } J &= \alpha \sum_{r \in R} \sum_{f \in F} \frac{d(r, r_f)}{d_{\max}} x_{rf} + \beta \left\{ \begin{array}{l} \sum_{m_1 \in M} \sum_{\substack{\forall r \in R, \forall f \in F, \\ \text{and } s_{rm_1} \neq 0}} x_{rf} = 1, \\ \sum_{m_2 \in M} \sum_{\substack{\forall r \in R, \forall f \in F, \\ s_{rm_2} = 0, \\ \text{and } m_2 > m_1}} x_{rf} = 1, \end{array} \right\} \frac{\Delta L(m_1; m_2)}{\Delta L_{\max}} \quad (1) \\ \text{s.t. } \sum_{r \in R_p} \sum_{f \in F} x_{rf} &= 1, \quad \forall p = 1, 2, \dots, |P| \\ \sum_{f \in F} x_{rf} &\leq |P| \quad (2) \\ \sum_{f \in F} \sum_{\{r \in R | x_{rf} = 1, s_{rm} \neq 0\}} d_r \cdot t_{rm} &\leq CL_m \quad (3) \\ \alpha + \beta &= 1, \quad \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \\ x_{rf} &= \begin{cases} 1 & \text{if part routing } r \text{ is assigned} \\ & \text{to part routing family } f \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned}$$

$$\forall r \in R, \forall f \in F$$

식 (1)은 부품의 셀 간 이동과 기계 간 부하의 차이를 최소화하기 위해 사용된 목적함수로서 목적함수의 첫 번째 식은 대표 부품 가공경로(r_f)와 해당 대표 부품 가공경로로 구성된 부품군에 할당되는 부품 가공경로(r)와의 차이를 최소화함으로써 유사성이 높은 부품들을 하나의 군으로 형성하여 부품의 셀 간 이동을 최소화하기 위해 사용되었고, 목적함수의 두 번째 식은 기계 간 부하의 차이를 최소화하기 위해 사용되었다.

식 (1)에서 $d(r, r_f)$ 는 두 경로 r 과 r_f 사이의 거리를 의미하는 값으로서 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$d(r, r_f) = 1 - \frac{\Phi_{r, r_f}}{\Phi_r + \Phi_{r_f} - \Phi_{r, r_f}} \quad (4)$$

식 (4)에서 Φ_r 과 Φ_{r_f} 는 부품 가공경로 r 과 r_f 의 원소 개수를 나타내며 $\Phi_r = \Phi_{r_f} = |M|$ 이 된다. Φ_{r, r_f} 는 부품 가공경로 r 과 r_f 의 공통 원소의 개수를 나타내는 값으로써 식 (5)와 같이 계산될 수 있고, 부품 가공경로 r 과 r_f 의 유사성이 높은 경우 이 값은 커지게 된다

$$\Phi_{r, r_f} = \sum_{m=1}^{|M|} \phi(s_{rm}, s_{r_fm}) \quad (5)$$

$$\text{단, } \phi(s_{rm}, s_{r_fm}) = \begin{cases} 1 & \text{if } s_{rm} = s_{r_fm} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

예를 들어 <표 1>에서 가공경로 2와 6은 {1, 2, 0, 0}과 {1, 2, 3, 0}으로 표현되어지므로 이들 두 가공경로에 대한 거리인 $d(2, 6)$ 은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$d(2, 6) = 1 - \frac{3}{4+4-3} = \frac{2}{5}$$

또한 식 (1)에서 $\Delta L(m_1; m_2)$ 는 기계 m_1 과 m_2 의 부하 차이를 의미하는 값으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta L(m_1; m_2) = |L_{m_1} - L_{m_2}| \quad (6)$$

식 (6)에서 L_m 은 기계 m 에 할당되는 부하를 나타내는 값으로서 다음과 같이 정의된다.

$$L_m = \sum_{f \in F} \sum_{\{r \in R | x_{rf} = 1, s_{rm} \neq 0\}} d_r \cdot t_{rm}$$

식 (1)에서 d_{\max} 는 $d(r, r_f)$ 의 최대값을 의미하고 ΔL_{\max} 는 $\Delta L(m_1; m_2)$ 의 최대값을 의미하는 값으로서 목적함수의 값을 정규화 시키기 위해 사용된 값이다.

$$d_{\max} = \max_{\{\forall r \in R, \forall f \in F\}} d(r, r_f)$$

$$\Delta L_{max} = \max_{\{m_1 \in M, m_2 \in M\}} \Delta L(m_1; m_2)$$

또한 α 와 β 는 목적함수로 사용된 두 요소에 대한 가중치를 나타내는 값으로서 α 와 β 를 어떻게 설정하느냐에 따라 부품의 셀 간 이동과 기계 간 부하의 차이에 대한 가중치를 조정할 수 있다. 본 연구에서는 부품의 셀 간 이동과 기계 간 부하의 차이를 동시에 고려하는 문제를 해결하기 위해 $\alpha = \beta = 0.5$ 의 값을 사용하고자 한다.

식 (2)는 부품군의 수가 부품 수($|P|$)보다 작아야 한다는 것을 나타낸 식으로서 부품군의 수가 미리 정해져 있지 않다는 것을 나타내기도 한다. 식 (3)은 각각의 기계에 할당되는 부하가 해당 기계의 능력한계(CL_m)를 넘어서는 안 된다는 제약을 나타낸 식이다.

위에서 기술한 수리적 모델에서 결정변수(decision variable) x_{rf} 는 부품 가공경로 r 이 부품군 f 에 속하면 1, 그렇지 않으면 0의 값을 갖고, 결정변수 집합은 다음과 같은 행렬로 표현될 수 있다.

$$X = [\{x_{11}, \dots, x_{1|F|}\}^T, \dots, \{x_{|R|1}, \dots, x_{|R||F|}\}^T]$$

3. 부품-기계 군집 알고리즘

3.1 알고리즘 개요

본 연구에서 제시하는 부품-기계 군집 알고리즘은 순차적인 휴리스틱 알고리즘으로서 단계 1에서는 부품 가공경로의 유사성을 고려하여 대표 부품 가공경로를 결정하고, 단계 2에서는 나머지 부품에 대한 가공경로를 목적함수를 고려하여 부품군에 할당하는 절차를 거친다.

3.2 대표 부품가공경로 결정 알고리즘 (단계 1)

대표 부품 가공경로 결정 알고리즘에서는 부품 가공경로의 유사성을 고려하여 부품군의 수($|F|$)와 각 부품군에 대한 대표 부품 가공경로를 결정한다. 이를 위해 본 연구에서는 다음과 같은 각각의 부품 가공경로별 퍼텐셜(potential) 함수를 정의한다.

$$N_r = |\eta_\theta(r)|, \quad \forall r \in R$$

단, $\eta_\theta(r) = \{r' | d(r, r') \leq \theta, r' \neq r\}$ 로 정의되며 이는 부품 가공경로 r 과의 거리가 θ 보다 작은 부품 가공경로들의 집합을 의미한다. 따라서 부품 가공경로 r 과 $r' \in \eta_\theta(r)$ 사이의 퍼텐셜 변화(difference)는 $\nabla(r, r') = N_{r'} - N_r$ 로 정의될 수 있고, $\nabla(r)_{max} = \max_{\{r' \in \eta_\theta(r)\}} \nabla(r, r')$ 는 부품 가공경로 r 과 $r' \in \eta_\theta(r)$ 에 대한 퍼텐셜 변화의 최대

값을 의미한다. 따라서 만약 $N_r = 0$ 인 경우, $\nabla(r)_{max} = 0$ 이 되고 이 때의 부품 가공경로 r 은 특이점(outlier)이 된다. 또한 $N_r \neq 0$ 이고 $\nabla(r)_{max} \leq 0$ 인 경우, 이 때의 부품 가공경로 r 은 모드(mode)가 되고 하나의 부품군을 대표하는 가공경로의 후보가 될 수 있다.

이와 같은 알고리즘은 θ 값에 따라 부품군의 수가 달라질 수 있으며, θ 값을 매우 적게 지정($\theta \approx 0$)하면 부품군의 수는 부품 수와 같아지고 θ 값을 매우 크게 지정($\theta \approx 1$)하면 오직 한 개의 부품군만 형성된다. 따라서 사용자는 θ 값을 적절히 조절해 가면서 최적의 부품군을 형성해야 하는데, 본 연구에서는 이를 위해 θ 값을 0에서부터 시작하여 0.05씩 증가시키면서 최적의 부품군을 형성할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 제안하는 대표 부품 가공경로 결정 알고리즘은 다음과 같다.

Step 1.1 $F = \emptyset, f = 0$

Step 1.2 IF (there exist $p \in P$ such that

$$\eta_\theta(r) = \emptyset \quad \forall r \in R_p)$$

THEN $f = f + 1, F \leftarrow F \cup \{f\}$,

$$r_{min} = \underset{r \in R_p}{\operatorname{argmin}} \Psi(r),$$

$$R_f = \{r_{min}\}, R \leftarrow R - \{r_{min}\},$$

$$R \leftarrow R - \{r' | r_{min} \in R_p \text{ and } r' \in R_p\},$$

and go to Step 1.4

Step 1.3 IF (there exist r such that $\eta_\theta(r) \neq \emptyset$

and $\nabla(r)_{max} \leq 0$)

THEN $f = f + 1, F \leftarrow F \cup \{f\}$,

$$r_{min} = \underset{r \in R}{\operatorname{argmin}} \nabla(r)_{max},$$

$$R_f = \{r_{min}\}, R \leftarrow R - \{r_{min}\},$$

$$R \leftarrow R - \{r' | r' \in \eta_\theta(r_{min})\},$$

$$R \leftarrow R - \{r' | r_{min} \in R_p \text{ and } r' \in R_p\}$$

Step 1.4 IF ($R = \emptyset$) THEN stop

ELSE go to Step 1.2

위의 알고리즘에서 Step 1.2는 임의의 부품 p 의 모든 부품 가공경로($\forall r \in R_p$)에 대해 거리상 θ 경계 내에 인접한 다른 부품 가공경로가 존재하지 않는 경우, 이는 곧 부품 p 가 어떠한 다른 부품군에도 속하지 않는 특이점(outlier)이라는 것을 의미한다. 따라서 부품 p 는 홀로 독립적인 부품군을 형성하고 이 때의 대표 부품 가공경로는 가능한 가공경로($r \in R_p$) 중에서 가장 적은 기계를 거치는 가공경로가 선택되어 진다. 또한 Step 1.3은 퍼텐셜 변

화의 최대값이 음수인 부품 가공경로 중에서 그 값이 가장 작은 부품 가공경로(r_{min})가 주변에서 가장 밀집된 위치에 존재하는 가공경로(mode)임을 의미하고, 여기서 선택된 부품 가공경로가 해당 부품군의 대표 부품 가공경로로 사용될 수 있음을 나타낸다. 또한 하나의 부품 가공경로가 대표 부품 가공경로로 선정되면 선정된 부품 가공경로(r_{min}), 선정된 부품 가공경로와 거리상 θ 경계 내에 존재하는 인접한 모든 부품 가공경로($\{r' | r' \in \eta_\theta(r_{min})\}$), 그리고 선정된 부품 가공경로가 속한 부품의 다른 모든 대체가공경로($\{r' | r_{min} \in R_p \text{ and } r' \in R_p\}$)가 가공경로 집합(R)에서 제거되는 것을 나타내고 있다. 이 조건은 추후 Step 1.4의 알고리즘 종료 조건의 판단을 위해서 사용된다.

3.3 부품군과 기계군 형성 알고리즘 (단계 2)

단계 1에 의해 대표 부품 가공경로가 결정되면 단계 2에서는 나머지 부품에 대한 가공경로를 목적함수를 고려하여 부품군에 할당하는 절차를 수행한다. 본 연구에서 제안하는 부품군과 기계군 형성 알고리즘은 다음과 같다. 단, 알고리즘에서 $J(X(t))$ 는 단계 t 에서 결정변수 행렬이 $X(t)$ 일 때의 목적함수 값을 나타내고, $\Delta J(x_{rf}; X(t))$ 는 $X(t)$ 에서 $x_{rf}=0$ 을 $x_{rf}=1$ 로 변환했을 때 목적함수 값의 차이를 의미한다.

Step 2.1 $t=0$, $L_m(0)=0$ for all $m \in M$,

$$P(t) \leftarrow P - \{p | r \in R_p \text{ and } r \in R_f \text{ of any } f \in F\}$$

$$X(t) = [0]_{rf}, \quad \forall r \in R \text{ and } \forall f \in F,$$

$$x_{rf} = 1, \quad \forall r_f \text{ of any } f \in F$$

Step 2.2 $(r^*, f^*, p^*) = \underset{p \in P, r \in R_p, f \in F}{\operatorname{argmin}} \Delta J(x_{rf}; X(t))$

Step 2.3 IF ($L_m(t) + d_{r^*} \cdot t_{r^*m} \leq CL_m, \forall m \in M$)

THEN go to Step 2.4

ELSE go to Step 2.2

Step 2.4 $t=t+1$,

$$R_{f^*} \leftarrow R_{f^*} \cup \{r^*\}, \quad P(t) \leftarrow P(t-1) - \{p^*\},$$

$$X(t) = X(t-1) + I_{r^*f^*}$$

$$L_m(t) = L_m(t-1) + d_{r^*} \cdot t_{r^*m}, \quad \forall m \in M$$

IF ($P(t) = \emptyset$) THEN stop

ELSE go to Step 2.2

위의 알고리즘에서 Step 2.1은 3.2절 대표 부품 가공경로 결정 알고리즘에 의해 선정된 대표 부품 가공경로를 갖는 부품들을 부품군 형성 대상에서 제외시키는 절차를 나타낸 것이다. Step 2.2는 부품군에 할당해야 할 나머지 부품

들의 가공경로 중에서 목적함수를 가장 적게 증가시키는 가공경로(r^*)를 선택하는 단계이며, Step 2.3은 Step 2.2에서 선택된 가공경로에 의해 생산되는 부품에 의해 발생하는 각 기계에서의 부하가 해당 기계의 능력한계(CL_m)를 벗어나지 않는지를 검사하는 단계로서 조건을 만족시키는 경우 선택된 가공경로가 Step 2.4를 통해 부품군에 할당되는 것을 나타낸다.

위에서 기술한 알고리즘에 의해 유사한 특성을 갖는 부품들에 대한 부품군 형성 작업이 끝난 후 형성된 부품군에 대해 기계를 할당함으로써 기계군을 형성할 수 있는데 기계군을 형성하는 알고리즘은 최대밀도규칙(maximum density rule) (Won, 2000)에 의해서 각각의 기계에 대한 작업이 가장 많이 수행되는 부품군에 기계를 할당하는 방법을 사용한다. 즉, 형성된 부품군에 속한 부품들의 가공경로에서 0이 아닌 값이 가장 많은 기계를 해당 부품군의 기계군에 할당한다.

3.4 예제 분석

본 연구에서 제시한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 <표 2>에서 제시한 부품-기계 군집 문제에 대해 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘과 본 연구에서 제시한 알고리즘을 이용하여 생성된 군집 결과를 비교하였다. Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘에 의해 생성된 부품-기계 군집 결과는 <표 3>과 같고 본 연구에서 제시한 알고리즘에 의해 생성된 부품-기계 군집 결과는 <표 4>와 같다.

<표 3>에서 보듯이 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘은 부품 가공순서와 가공시간을 고려하지 않고 부품-기계 군집 문제를 해결하는 방법을 제시하고 있기 때문에 전체 부품의 셀 간 이동은 “(70×2)+(70×2)=280”이 된다. 그러나 <표 4>에서 제시한 바와 같이 본 연구에서 제시한 알고리즘은 부품의 가공순서와 가공시간을 고려하여 부품-기계 군집 문제를 해결하는 방법을 제시하고 있기 때문에 부품의 셀 간 이동은 “(20×1)+(70×1)=90”이 된다. 따라서 본 연구에서 제시한 알고리즘이 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘에 비해 부품의 셀 간 이동을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

여기서 부품의 셀 간 이동을 계산하는 방법은 각각의 부품 가공경로 상에서 해당 부품이 속한 기계군의 외부에서 수행되는 작업이 해당 부품의 처음(first) 또는 마지막(last) 작업이라면 셀 간 이동이 한 번만 발생하지만 중간 작업(intermediate operation)이 기계군의 외부에서 수행되는 경우에는 두 번의 셀 간 이동이 발생한다는 가정하에서 계산된다 (Harhalakis *et al.*, 1990). 따라서 <표 3>에서 가공경로 18에 의해 가공되는 부품 7은 중간 작업인 3번째 작업이 해당 부품이 속한 기계군의 외부에서 수행되므로 70개의 부품에 대해 두 번의 셀 간 이동이 발생하게 되어 부품의

셀 간 이동은 “70×2=140”이 된다. 이에 반해 <표 4>에서 가공경로 14에 의해 가공되는 부품 6은 마지막 작업인 4 번째 작업이 해당 부품이 속한 기계군의 외부에서 수행되므로 20개의 부품에 대해 한 번의 셀 간 이동이 발생하게 되어 부품의 셀 간 이동은 “20×1=20”이 된다.

그러나 기계 간 부하의 차이는 Kim et al. (2001)이 제시한 알고리즘에 의해 생성된 부품-기계 군집 결과가 “480-460

= 20”을 발생시키는 반면, 본 연구에서 제시한 알고리즘에 의해 생성된 부품-기계 군집 결과는 “490-460= 30”을 발생시킴으로써 Kim et al. (2001)이 제시한 알고리즘에 비해 조금 큰 기계 간 부하의 차이를 발생시킴을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 제시한 알고리즘이 기계 간 부하의 차이를 줄이는 목적뿐만 아니라 부품의 셀 간 이동을 줄이기 위해 부품의 가공순서와 가공시간을 고려한 부품-기계

표 2. 부품 가공경로 정보

부품 (연간 소요량)	가공경로	기계 (가공시간)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1 (100)	1	1 (2)	2 (2)	0 (0)	3 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (2)	2 (2)	0 (0)
	3	0 (0)	0 (0)	3 (2)	2 (1)	1 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
2 (50)	4	3 (2)	1 (3)	2 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	5	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (4)	1 (2)	2 (3)	3 (2)
3 (70)	6	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (2)	1 (1)	0 (0)	2 (1)
	7	0 (0)	0 (0)	2 (2)	0 (0)	1 (2)	3 (2)	0 (0)	4 (2)
4 (80)	8	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (3)	2 (4)	3 (3)
	9	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (3)	0 (0)	2 (3)	1 (3)
5 (120)	10	1 (2)	2 (1)	3 (1)	4 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	11	0 (0)	0 (0)	2 (1)	1 (2)	3 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	12	1 (2)	2 (2)	4 (2)	3 (3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
6 (20)	13	1 (1)	2 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	14	1 (2)	2 (2)	3 (2)	0 (0)	4 (3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	15	0 (0)	2 (1)	1 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
7 (70)	16	0 (0)	0 (0)	4 (3)	0 (0)	3 (1)	1 (1)	0 (0)	2 (1)
	17	0 (0)	2 (3)	1 (2)	3 (3)	0 (0)	0 (0)	4 (2)	0 (0)
	18	0 (0)	1 (2)	2 (3)	4 (2)	3 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
기계능력 한계		500	500	500	500	500	500	500	500

표 3. Kim et al. (2001)의 알고리즘에 의한 군집 결과

부품 (연간 소요량)	가공경로	기계 (가공시간)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1 (100)	1	1 (2)	2 (2)	0 (0)	3 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
5 (120)	10	1 (2)	2 (1)	3 (1)	4 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
6 (20)	13	1 (1)	2 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
7 (70)	18	0 (0)	1 (2)	2 (3)	4 (2)	3 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
2 (50)	5	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (4)	1 (2)	2 (3)	3 (2)
3 (70)	7	0 (0)	0 (0)	2 (2)	0 (0)	1 (2)	3 (2)	0 (0)	4 (2)
4 (80)	8	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (3)	2 (4)	3 (3)
기계부하		460	480	470	480	480	480	470	480

표 4. 본 연구의 알고리즘에 의한 군집 결과 ($\alpha=0.5, \beta=0.5$)

부품 (연간 소요량)	가공경로	기계 (가공시간)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1 (100)	1	1 (2)	2 (2)	0 (0)	3 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
5 (120)	12	1 (2)	2 (2)	4 (2)	3 (3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
6 (20)	14	1 (2)	2 (2)	3 (2)	0 (0)	4 (3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
2 (50)	5	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (4)	1 (2)	2 (3)	3 (2)
3 (70)	6	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (2)	1 (1)	0 (0)	2 (1)
4 (80)	8	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (3)	2 (4)	3 (3)
7 (70)	16	0 (0)	0 (0)	4 (3)	0 (0)	3 (1)	1 (1)	0 (0)	2 (1)
기계부하		480	480	490	460	470	480	470	480

군집 문제의 해법을 제시하고 있기 때문에 해석될 수 있다.

결론적으로 위에서 제시한 예제를 통해 본 연구에서 제시한 부품-기계 군집 알고리즘이 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘에 비해 기계 간 부하의 차이는 근소한 차이로 높은 값을 유지하지만, 부품의 셀 간 이동을 효과적으로 단축시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

100개의 문제를 생성한 후, 이들 문제에 대해 본 연구에서 제시한 알고리즘을 5가지 정책에 따라 가중치 α 와 β 의 값을 조정하여 부품-기계 군집 결과를 생성하고 이를 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘에 의해 생성된 부품-기계 군집 결과와의 셀 간 이동과 기계 간 부하의 차이를 비교하였다. 본 실험은 Pentium IV PC에서 C++를 이용하여 구현한 프로그램을 통해 실험을 실시하였으며, 그 결과는 <그림 1>과 <그림 2>와 같다.

4. 실험 결과

본 연구에서 제시한 알고리즘의 성능을 좀더 구체적으로 평가하기 위해 6가지 유형의 대단위 문제에 대한 실험을 통해 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘과의 비교 평가를 수행하였다. 본 실험에서 분석하고자 하는 6가지 유형의 문제는 각각 문제 1(20, 50, 20), 문제 2(30, 75, 30), 문제 3(40, 100, 40), 문제 4(60, 150, 60), 문제 5(80, 200, 80), 문제 6(100, 250, 100)이다. 단, 여기서 괄호 안의 숫자는 (부품 수, 가공경로 수, 기계 수)를 의미한다. 또한 본 실험에서는 목적함수로 사용된 부품의 셀 간 이동과 기계 간 부하의 차이에 대한 가중치를 나타내는 값인 α 와 β 를 변화시켜가면서 가중치 α 와 β 의 값이 부품-기계 군집 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 본 실험에서 사용한 가중치 α 와 β 의 값은 다음과 같은 5가지 유형을 지닌다.

- 정책 1 : $\alpha=1, \beta=0$
- 정책 2 : $\alpha=0.75, \beta=0.25$
- 정책 3 : $\alpha=0.5, \beta=0.5$
- 정책 4 : $\alpha=0.25, \beta=0.75$
- 정책 5 : $\alpha=0, \beta=1$

따라서 본 실험에서는 위에서 기술한 6가지 유형의 대단위 문제에 대해 난수(random number) 발생을 이용하여

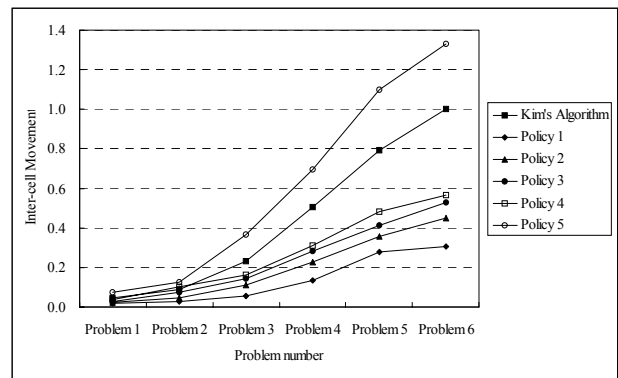


그림 1. 대단위 문제의 셀 간 이동 비교

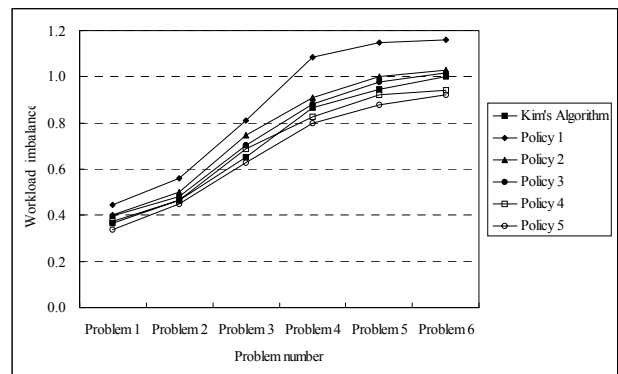


그림 2. 대단위 문제의 기계 간 부하 차이 비교

<그림 1>과 <그림 2>는 본 연구에서 제시한 알고리즘을 이용하여 5가지 정책에 의해 가중치 α 와 β 의 값을 조정 한 후 실험한 결과와 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘에 의해 실험한 결과를 기반으로 부품의 셀 간 이동과 기계 간 부하의 차이를 비교한 그림이다 <그림 1>과 <그림 2>에서 나타낸 부품의 셀 간 이동과 기계 간 부하의 차이 값은 상대적인 척도를 이용하여 나타낸 값으로서 각각 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘에 의해 문제 6을 풀었을 때 계산되어진 부품의 셀 간 이동과 기계 간 부하의 차이 값을 1로 정의하고, 나머지 값들은 이에 대한 상대적인 값으로 표시한 것이다.

<그림 1>에서 보듯이 본 연구에서 제시한 알고리즘은 α 값이 증가할수록(β 값이 감소할수록) 부품의 셀 간 이동이 줄어드는 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 또한 정책 5($\alpha=0, \beta=1$)를 제외한 모든 정책에 대해 본 연구에서 제시한 알고리즘이 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘에 비해 부품의 셀 간 이동을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 제시한 알고리즘이 부품의 가공순서를 고려하여 부품-기계 군집을 수행하기 때문에 부품의 셀 간 이동을 줄일 수 있다는 것을 의미한다.

<그림 2>는 본 연구에서 제시한 알고리즘을 이용하여 부품-기계 군집을 수행하는 경우 α 값이 감소할수록(β 값이 증가할수록) 기계간 부하의 차이가 줄어들음을 나타내고 있다. 이는 β 값이 증가할수록 목적함수에서 기계 간 부하의 차이가 차지하는 가중치가 높아지기 때문이다 또한 본 연구에서 제시한 알고리즘과 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘에 의해 계산된 기계 간 부하의 차이는 근소한 차이를 보이고 있음을 알 수 있으며, 정책 4($\alpha=0.25, \beta=0.75$)와 정책 5($\alpha=0, \beta=1$)의 경우는 본 연구에서 제시한 알고리즘이 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘에 비해 기계 간 부하의 차이를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 제시한 알고리즘을 이용하여 부품-기계 군집을 수행하는 경우, 사용자는 부품의 셀 간 이동과 기계 간 부하의 차이 중에서 중요도가 더 높다고 생각되는 항목의 값을 줄이기 위해서 가중치 α 와 β 의 값을 적절히 조정함으로써 원하는 결과를 도출할 수 있다. 예를 들어 사용자가 부품의 셀 간 이동과 기계 간 부하의 차이에 대한 중요도를 동일하게 생각하는 경우 α 와 β 의 값을 각각 0.5로 지정할 수 있으며, 이때 본 연구에서 제시한 알고리즘을 이용하는 경우 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘에 비해 비록 기계 간 부하의 차이는 근소한 차이로 높은 값을 나타내지만 모든 유형의 문제에 대해 부품의 셀 간 이동을 효과적으로 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 정책 4($\alpha=0.25, \beta=0.75$)에 의해 본 연구에서 제시한 알고리즘을 수행하는 경우 Kim *et al.* (2001)이 제시한 알고리즘에 비해 부품의 셀 간 이동과 기계 간 부하의 차이를 동시에 줄일 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 대체가공경로와 가공순서를 갖는 부품 정보를 알고 있을 때 최적의 부품군과 기계군을 형성하는 문제를 해결하기 위한 알고리즘을 제시했다. 본 연구에서 제시한 알고리즘은 부품별 대체가공경로와 가공순서를 고려하여 부품의 셀 간 이동을 줄이고 동시에 기계 간 부하의 차이를 줄일 수 있는 효율적인 해를 제공하는 목적을 지닌다. 이를 위해 본 연구에서 제시하는 부품-기계 군집 알고리즘은 우선 부품 가공경로의 유사성을 고려하여 부품군을 형성하고, 나머지 부품의 가공경로에 대해서는 목적함수를 최소화시킬 수 있도록 부품군에 할당하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 알고리즘은 부품의 대체가공경로와 가공순서를 고려하는 부품-기계 군집 문제에 대해 기존의 다른 알고리즘에 비해 효율적으로 부품군과 기계군을 형성할 수 있음을 실험을 통해 입증하였다. 추후 연구로는 하나의 부품이 복수의 가공경로를 통해 생산될 수 있는 경우, 이를 위한 효율적인 부품-기계 군집 알고리즘을 개발할 필요가 있다.

참고문헌

- Burbidge, J. L. (1997), *Production Flow Analysis for Planning Group Technology*, Clarendon Press.
- Caux, C., Bruniaux, R., and Pierreval, H. (2000), Cell formation with alternative process plan and machine capacity constraints: A new combined approach, *International Journal of Production Economics*, **64**(1-3), 279-284.
- Chu, C. H. (1995), Recent advances in mathematical programming for cell formation, *Planning, Design, and Analysis of Cellular Manufacturing Systems*, Edited by Kamrani, A. K., Parsaei, H. R., and Liles, D. H., Elsevier, 1-45.
- Harhalakis, G., Nagi, R., and Proth, J. M. (1990), An Efficient Heuristic in Manufacturing Cell Formation for Group Technology Applications, *International Journal of Production Research*, **28**(1), 185-198.
- Hwang, H. and Ree, P. (1996), Routes selection for the cell formation problem with alternative part process plans, *Computers and Industrial Engineering*, **30**(3), 423-431.
- Kim, C-O, Park, Y., and Jun, J. (2001), Generalized Clustering Algorithm for Part-Machine Grouping with Alternative Process Plans, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **27**(3), 281-288.
- Kusiak, A., Vannelli, A., and Kumar, K. R. (1986), Clustering analysis: models and algorithms, *Control and Cybernetics*, **15**(2), 139-154.
- Kusiak, A. (1990), *Intelligent Manufacturing Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Lee, H. and Garcia-Diaz, A. (1996), Network flow procedures for the analysis of cellular manufacturing systems, *IIE Transactions*, **28**(4), 333-345.

- Ramabhata, V. and Nagi, R. (1998), An integrated formulation of manufacturing cell formation with capacity planning and multiple routings, *Annals of Operations Research*, **77**, 79-95.
- Selim, H. M., Askin, R. G., and Vakharia, A. J. (1998), Cell formation in group technology: review, evaluation and directions for future research, *Computers and Industrial Engineering*, **34**(1), 3-20.
- Venugopal, V. and Narendran, T. T. (1994), Machine-cell formation through neural network models, *International Journal of Production Research*, **32**(9), 2105-2115.
- Wicks, E. M. and Reasor, R. J. (1999), Designing cellular manufacturing systems with dynamic part populations, *IIE Transactions*, **31**(1), 11-20.
- Won, Y. (2000), New p-median approach to cell formation with alternative process plans, *International Journal of Production Research*, **38**(1), 229-240.
- Wu, N. (1998), A concurrent approach to cell formation and assignment of identical machine in group technology, *International Journal of Production Research*, **36**(8) 2099-2114.
- Yin, Y. and Yasuda, K. (2002), Manufacturing cell's design in consideration of various production factors, *International Journal of Production Research*, **40**(4) 885-906.