

A Cellular Formation Problem Algorithm Based on Frequency of Used Machine for Cellular Manufacturing System

Sang-Un Lee *

Abstract

There has been unknown polynomial time algorithm for cellular formation problem (CFP) that is one of the NP-hard problem. Therefore metaheuristic method has been applied this problem to obtain approximated solution. This paper shows the existence of polynomial-time heuristic algorithm in CFP. The proposed algorithm performs coarse-grained and fine-grained cell formation process. In coarse-grained cell formation process, the cell can be formed in accordance with machine frequently used that is the number of other products use same machine with special product. As a result, the machine can be assigned to most used cell. In fine-grained process, the product and machine are moved into other cell that has a improved grouping efficiency. For 35 experimental data, this heuristic algorithm performs better grouping efficiency for 12 data than best known of meta-heuristic methods.

▶ Keywords : Cellular manufacturing system, Cellular formation problem, Frequency, Grouping efficiency, Optimization

• First Author: Sang-Un Lee, Corresponding Author: Sang-Un Lee

*Sang-Un Lee (sulee@gwnu.ac.kr), Dept. of Multimedia Engineering, Gangneung-Wonju National University

• Received: 2015. 10. 06, Revised: 2015. 10. 26, Accepted: 2015. 11. 03.

I. Introduction

셀 생산방식 (cellular manufacturing system, CMS)은 생산 분야의 혁신을 위해 낭비 없는 최적 생산시스템을 구축할 목적으로 작업장을 설계하는 모델로 셀 형성 문제 (cell formation problem, CFP)라고도 한다. 이는 군 기술 (group technology, GT) 원리에 기반하여 부품 (또는 제품)간 유사성에 따라 유사한 부품들을 동일 부품군 (families)으로 그룹화하고 해당 부품군을 생산하기 위한 기계들을 그룹화한 제조 셀들을 형성하여 생산하는 방식이다. 기능적 생산에서 유사한 기계들은 가까이 위치시킨다. 이 방식의 주요 장점은 자재 흐름이 상당히 향상되며, 자재 이동거리와 더불어 제조 기간 (lead time)을 상당히 감소시킬 수 있다. 따라서 이러한 낭비를 최소화하도록 셀 단위의 군을 형성하여 자원의 최대 효율성을 달성하는 것이 목표이다[1-4].

셀 생산방식의 문제는 부품이 기계를 사용하는지 여부를 “0”과 “1”로 단순히 정의한 기본형 CFP (일반적으로 CFP라 한다.), 특정 부품이 기계를 사용하는 순서를 명시한 SCFP (sequence CFP), 특정 부품이 특정 기계에서 작업에 소요되는 시간을 명시하여 모든 셀의 작업 종료시간을 유사하게 결정하는 CCFP (Capacitated CFP)로 분류할 수 있다[1,2,5,6]. 본 논문에서는 기본형 셀 생산방식 문제에 초점을 맞춘다.

셀 생산방식 문제를 풀기위해 많은 연구가 진행되었다. 대표적인 방법으로는 군집분석 (cluster analysis), 그래프 분할법 (graph partitioning approaches)과 메타휴리스틱 방법 (metaheuristic approaches)이 있다[1]. 셀 형성 문제 (CFP)는 NP-난제 (NP-Hard)인 조합 최적화 문제로, 휴리스틱의 다항시간 알고리즘이 존재하지 않고 있어 부득이 메타휴리스틱 방법을 적용하고 있다[2-4]. 대표적인 메타 휴리스틱 방법으로는 유전자 알고리즘 (genetic algorithm, GA), 진화 알고리즘 (evolutionary algorithm, EA), 군집최적화 (particle swarm optimization, PSO), GRASP (greedy randomized adaptive search procedure) 등을 적용하고 있음에도 불구하고 아직까지 다양한 모든 문제들에 대해 최적 해를 구하는 알고리즘이 존재하지 않고 있다.

본 논문에서는 기본형 CFP에 대해 메타 휴리스틱 방법들보다 좋은 군 효율성 (group efficiency)을 나타내는 다항시간의 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 2장에서는 CFP의 군 효율성을 평가하는 척도와 메타 휴리스틱 방법들의 연구 결과를 고찰해 본다. 3장에서는 다항시간의 휴리스틱 방법을 제안한다. 4장에서는 2장에서 제시한 다양한 실험 데이터에 대해 제안된 알고리즘을 적용하고 기존의 연구 결과와 비교하여 제안된 알고리즘의 적합성을 평가해 본다.

II. Problem Description

CFP는 $m \times n$ ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$)의 부품 (부품, P_i)과 기계 M_j 행렬에 대해 a_{ij} 는 식 (1)로 주어진다.

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{부품 } i \text{가 기계 } j \text{로 작업이 수행되는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases} \quad (1)$$

셀 형성문제의 성능은 Kumar와 Chandrasekharan[7]에 제안한 식 (2)의 군 효율성 (grouping efficiency)으로 평가한다.

$$\text{Grouping efficiency } (\mu) = \frac{N_1 - N_1^{Out}}{N_1 + N_0^{In}} \times 100(\%) \quad (2)$$

where N_1 : 행렬에 존재하는 “1”의 총 개수

N_1^{Out} : 대각선 블록 (diagonal block)인 셀 외부에 존재하는 “1”의 총 개수

N_0^{In} : 대각선 블록 (diagonal block)인 셀 내부에 존재하는 “0”의 총 개수

표 1에는 35개의 다양한 실험 데이터들에 대해 메타 휴리스틱 알고리즘들의 군 효율성을 요약하여 제시하였다.[1,2] 현재까지는 다양한 메타휴리스틱 방법들 중 GRASP가 최적의 방법임을 알 수 있다.

일반적으로, 주어진 최적화 문제에 대해 가능한 모든 경우수를 나열하여 해를 찾는 방법 이외에는 해결 방법이 없다고 판단되는 경우 부득이하게 근사 해를 구하기 위해 메타휴리스틱 방법을 적용하고 있다. 그러나 메타 휴리스틱 방법은 랜덤한 초기치 설정으로 수많은 시행횟수 중 우연에 의해 전역 최적 점 (global minima)을 얻은 단 한 번의 결과로 알고리즘의 성능을 제시하고 있다.

이는 표 1의 결과에서 보여주고 있다. 이 최적의 결과는 불행하게도 재현이 안 될 가능성이 높아 평균값으로 결과를 평가하는 것이 보다 타당하다.

III. The Proposed Algorithm

본 장에서는 기존의 메타휴리스틱 방법들 보다 좋은 군 효율성 성능을 얻을 수 있는 휴리스틱 알고리즘이 존재하여 CFP가 NP-난제가 아닌 P (다항시간 알고리즘) 문제임을 보인다. 제안된 휴리스틱 알고리즘은 개략적 (coarse-grained)과 상세 (fine-grained)의 2단계로 셀을 형성하는 기법을 적용하였다.

먼저, 개략적 셀 형성 단계에서는 특정 부품과 동일한 기계를 사용하는 다른 부품의 빈도수에 대한 행렬을 구하여 부품별 셀을 형성하고, 특정 기계는 가장 많이 사용하는 셀에 배정하는 기법을 적용하였다. 이 단계에서는 정확하게 셀을 구성하지 못하는 경우도 발생할 수 있다. 따라서 상세 셀 형성 단계에서는 부품과 기계를 다른 셀로 이동시켜 군 효율성을 극대화시키는 기법을 제안하였다. 제안된 기계 사용빈도 기반 알고리즘은 다음과 같이 수행된다.

Table 1. Grouping Efficiency of Metaheuristic Algorithms

문제	Source	Size	Best Known	μ (%)											
				ZODIAC	GRAFICS	MST	GATSP	GP	GA	EA	HGA	SCF-BMCF	GRASP		
1	King & Nakornchai(1982)	5x7	73.68	73.68	73.68	-	-	-	-	-	-	73.68	73.68	73.68	73.68
2	Waghodekar & Sahu(1984)	5x7	62.50	56.52	60.87	-	-	-	62.50	62.50	62.50	62.50	62.50	62.50	62.50
3	Seifoddini(1989)	5x18	79.59	77.36	-	-	77.36	-	77.36	79.59	79.59	79.59	79.59	79.59	79.59
4	Kusiak(1992)	6x8	76.92	76.92	-	-	76.92	-	76.92	76.92	76.92	76.92	76.92	76.92	76.92
5	Kusiak & Chow(1987)	7x11	53.13	39.13	53.13	-	46.88	-	53.13	53.13	53.13	53.13	53.13	53.13	53.13
6	Boctor(1991)	7x11	70.37	70.37	-	-	70.37	-	70.37	70.37	70.37	70.37	70.37	70.37	70.37
7	Seifoddini & Wolfe(1986)	8x12	68.29	68.29	68.29	-	-	-	-	68.29	68.29	68.29	68.29	68.29	68.29
8	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	8x20	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25
9	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	8x20	58.72	58.33	58.13	58.72	58.33	58.72	55.91	58.72	58.72	58.72	58.72	58.72	58.72
10	Mosier & Taube(1985)	10x10	70.59	70.59	70.59	70.59	70.59	-	70.59	70.59	70.59	70.59	70.59	70.59	70.59
11	Chan & Milner(1982)	10x15	92.00	92.00	92.00	92.00	92.00	-	92.00	92.00	92.00	92.00	92.00	92.00	92.00
12	Askin & Subramanian(1987)	14x23	69.86	64.36	64.36	64.36	-	-	66.67	69.86	69.86	69.86	69.86	69.86	69.86
13	Stanfel(1985)	14x24	69.33	65.55	65.55	-	67.44	-	63.48	69.33	69.33	69.33	69.33	69.33	69.33
14	McCormick et al.(1972)	16x24	51.96	32.09	45.52	48.70	-	-	-	51.96	51.96	51.96	51.96	51.96	51.96
15	Srinivasan et al.(1990)	16x30	67.83	67.83	67.83	67.83	-	-	-	67.83	67.83	67.83	67.83	67.83	67.83
16	King(1980)	16x43	56.52	53.76	54.39	54.44	53.89	-	-	54.86	54.86	54.60	56.52	56.52	56.52
17	Carrie(1973)	18x24	54.46	41.84	48.91	44.20	-	-	-	54.46	54.46	54.46	54.46	54.46	54.46
18	Mosier & Taube(1985)	20x20	42.96	21.63	38.26	-	37.12	-	34.16	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96	42.96
19	Kumar et al.(1986)	20x23	49.65	38.66	49.36	43.01	46.62	49.00	39.02	49.65	49.65	49.65	49.65	49.65	49.65
20	Carrie(1973)	20x35	76.14	75.14	75.14	75.14	75.28	-	66.30	76.14	76.14	76.14	76.14	76.14	76.14
21	Boe & Cheng(1991)	20x35	58.15	51.13	-	-	55.14	-	44.44	58.07	58.06	58.15	58.15	58.15	58.15
22	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	24x40	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
23	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	24x40	85.11	85.11	85.11	85.11	85.11	85.11	85.11	85.11	85.11	85.11	85.11	85.11	85.11
24	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	24x40	73.51	73.51	73.51	73.51	73.51	73.03	73.51	73.03	73.51	73.51	73.51	73.51	73.51
25	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	24x40	51.97	20.42	43.27	51.81	49.37	-	37.62	51.97	51.97	51.97	51.97	51.97	51.97
26	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	24x40	47.37	18.23	44.51	44.72	44.67	-	34.76	47.06	47.06	47.33	47.37	47.37	47.37
27	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	24x40	44.87	17.61	41.67	44.17	42.50	-	34.06	44.87	44.87	44.87	44.87	44.87	44.87
28	McCormick et al.(1972)	27x27	54.27	52.14	41.37	51.00	-	-	-	54.27	54.27	54.27	54.27	54.27	54.27
29	Carrie(1973)	28x46	46.06	33.01	32.86	40.00	-	-	-	44.62	44.62	45.31	46.06	46.06	46.06
30	Kumar & Vannelli(1987)	30x41	59.52	33.46	55.43	55.29	53.80	-	40.96	58.48	-	59.52	59.52	59.52	59.52
31	Stanfel(1985)	30x50	59.66	46.06	56.32	58.70	56.61	-	48.28	59.66	-	59.66	59.66	59.66	59.66
32	Stanfel(1985)	30x50	50.51	21.11	47.96	46.30	45.93	-	37.55	50.51	50.51	50.51	50.51	50.51	50.51
33	King & Nakornchai(1982)	36x90	45.93	32.73	39.41	40.05	-	-	-	42.64	42.64	44.59	45.93	45.93	45.93
34	McCormick et al.(1972)	37x53	59.85	52.21	52.21	-	-	-	-	56.42	56.42	59.04	59.85	59.85	59.85
35	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	40x100	84.03	83.66	83.92	83.92	84.03	84.03	83.90	84.03	84.03	84.03	84.03	84.03	84.03

Step 1. 부품별 동일 기계 사용빈도수 행렬을 구한다.

부품에 대해 $i = 1, 2, \dots, n-1$ 까지 i 번째와 동일한 기계를 사용하는 $i+1, i+2, \dots, n$ 부품의 동일 기계 사용빈도수 삼상각행렬을 구한다. $\{i, j\} = \{j, i\}$ 로 하삼각행렬 값을 배정한다.

Step 2. 부품별 셀 형성

동일 기계 사용빈도수 행렬에 대해 최대 빈도수 부품들부터 내림차순으로 동일 빈도수 부품들 간에 셀 그룹을 형성한다. 만약, 동일 빈도수 부품들 간에 그룹이 존재하면 우선 그룹을 형성하고, 차선책으로 상위 빈도수 그룹에 포함된 경우 해당 그룹에 추가하는 방법을 적용한다.

Step 3. 기계별 셀 배정

행 (부품)별 그룹 셀들에 대해 기계 (열)의 “1” (해당 기계 사용)이 가장 많이 포함된 셀에 해당 기계를 할당한다.

Step 4. 최적화

다음의 (1) ~ (3)을 반복 수행하여 최적화 시킨다.

- (1) 행 (부품)과 열 (기계)에 대해 보다 많은 “1”이 존재하는 셀로 배정을 조정한다.
- (2) 행과 열에 대해 “1”의 개수보다 “0”의 개수가 보다 많으면 이들을 별도의 셀로 분리시킨다.
- (3) 셀의 부품수가 많이 존재하고, 셀 내의 “0”의 개

수가 많으면 “1”의 개수가 유사한 기계별로 셀을 분할한다.

Goncalves와 Resende[1]가 제시한 표 2의 데이터에 대해 제안된 기계 사용빈도 기반 알고리즘을 수행한 결과는 표 3과 같다. 여기서는 편의상 기계 사용여부인 “1”만 표기하였으며, 해당 기계 미사용인 “0”은 표기하지 않았다.

Table 2. 15×12 Cellular Formation Problem

Products	Machines											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1			1								
2		1							1			
3			1			1		1				
4	1			1							1	
5			1			1		1				
6	1			1								1
7			1					1				
8		1							1			
9			1			1		1				
10					1					1		1
11		1							1			
12				1							1	
13	1											1
14					1		1					1
15						1	1			1		1

본 문제에 대해 Goncalves와 Resende[1]는 GA (genetic algorithm)+ LS (local search)를 적용하여 $\mu = 86.67\%$ 를 얻었다. 반면에, 제안된 알고리즘은 단순히 동일 기계 사용빈도에

기반하여 부품들을 그룹으로 셀을 형성하고, 기계를 가장 많이 포함된 셀에 단순히 배정하였음에도 불구하고 Goncalves와 Resende[1]의 결과와 동일한 $\mu = 86.67\%$ 를 얻을 수 있었다.

제안된 알고리즘을 표 1의 실험 데이터들에 적용한 결과 얻은 결론은 $\mu = 60\%$ 를 기준으로 $\mu > 60\%$ 이면 값이 증가할수록 Step 4의 최적화 과정을 수행하지 않고도 쉽게 셀을 형성할 수 있었으며, $\mu \leq 60\%$ 에 대해서는 값이 감소할수록 Step 4의 최적화 과정을 복잡하게 수행하는 특징을 갖고 있다. 예로, 표 3의 경우 $\mu = 86.67\%$ 로 Step 4를 수행하지 않고도 최적 해를 쉽게 얻었음을 알 수 있다.

Table 3. Frequency Based CFP Algorithm for 15 × 12 CFP

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Max
1		0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
2	0		0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	2
3	0	0		0	3	0	2	0	3	0	0	0	0	0	0	3
4	2	0	0		0	3	0	0	0	0	2	2	0	0	0	3
5	0	0	3	0		0	2	0	3	0	0	0	0	0	0	3
6	2	0	0	3	0		0	0	0	0	2	2	0	0	0	3
7	0	0	2	0	2	0		0	2	0	0	0	0	0	0	2
8	0	2	0	0	0	0	0		0	0	2	0	0	0	0	2
9	0	0	3	0	3	0	2	0		0	0	0	0	0	0	3
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	2	3	3
11	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0		0	0	0	0	2
12	1	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0		1	0	0	2
13	1	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	1		0	0	2
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0		3	3
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3		3

$f=3$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Max
3	0	0		0	3	0	2	0	3	0	0	0	0	0	0	3
4	2	0	0		0	3	0	0	0	0	2	2	0	0	0	3
5	0	0	3	0		0	2	0	3	0	0	0	0	0	0	3
6	2	0	0	3	0		0	0	0	0	2	2	0	0	0	3
9	0	0	3	0	3	0	2	0		0	0	0	0	0	0	3
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	2	3	3
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0		3	3
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3		3

$f_3 = (3, 4, 5, 6, 9, 10, 14, 15)$
 $3 = (5, 9), 5 = (3, 9), 9 = (3, 5) \Rightarrow C_1 = \{3, 5, 9\}$
 $4 = (6), 6 = (4) \Rightarrow C_2 = \{4, 6\}$
 $10 = (15), 14 = (15), 15 = (10, 14) \Rightarrow C_3 = \{10, 14, 15\}$

$f=2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Max
1		0	0	2	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2
2	0		0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	2
7	0	0	2	0	2	0		0	2	0	0	0	0	0	0	2
8	0	2	0	0	0	0	0		0	0	2	0	0	0	0	2
11	0	2	0	0	0	0	0	2	0		0	0	0	0	0	2
12	1	0	0	2	0	2	0	0	0	0		1	0	0	0	2
13	1	0	0	2	0	2	0	0	0	0	1		0	0	0	2

$f_2 = (1, 2, 7, 8, 11, 12, 13)$
 $1 = (4, 6) \Rightarrow 1 \in C_2$
 $2 = (8, 11), 8 = (2, 11), 11 = (2, 8) \Rightarrow C_4 = \{2, 8, 11\}$
 $7 = (3, 5, 9) \Rightarrow 7 \in C_1$
 $12 = (4, 6), 13 = (4, 6) \Rightarrow 12, 13 \in C_2$
 $C_1 = \{3, 5, 7, 9\}, C_2 = \{1, 4, 6, 12, 13\}, C_3 = \{10, 14, 15\}, C_4 = \{2, 8, 11\}$

Parts	Machines											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3			1			1		1				
5			1			1		1				
7			1			1		1				
9			1			1		1				
1	1			1								
4	1			1								1
6	1			1								1
12				1								1
13	1											1
10					1					1		
14					1		1					1
15					1		1			1		1
2		1							1			
8		1							1			
11		1							1			

Parts	Machines											
	3	6	8	1	4	11	5	7	10	12	2	9
3	1	1	1									
5	1	1	1									
7	1	1	1									
9	1	1	1									
1				1	1							
4				1	1	1						
6				1	1	1						
12							1	1				
13				1	1							
10							1		1	1		
14							1	1	1	1		
15							1	1	1	1		
2											1	1
8											1	1
11											1	1

셀	C_1	C_2	C_3	C_4
부품,기계	$P: 3, 5, 7, 9$	$P: 1, 4, 6, 12, 13$	$P: 10, 14, 15$	$P: 2, 8, 11$
배정현황	$M: 3, 6, 8$	$M: 1, 4, 11$	$M: 5, 7, 10, 12$	$M: 2, 9$

표에서 $\mu = 86.67\%$ 를 얻는 과정은 다음과 같다. 먼저, 개략적 셀 형성 단계를 수행하기 위해, 부품별 동일 기계 사용빈도수 행렬에서 최대 빈도수는 $f=3$ 이다. 이로부터, Step 2에서 최대빈도수인 $f=3$ 을 갖는 부품 3,4,5,6, 9,10,14와 15를 하나의 그룹으로 하여 셀을 분할하는데 있어 '3' 부품은 '5'와 '9' 부품과, '5' 부품은 '3'과 '9' 부품과, '9' 부품은 '3'과 '5' 부품과 동일한 기계를 3회 사용한다. 따라서 첫 번째 셀로 $C_1 = \{3, 5, 9\}$ 의 부품들이 묶이게 된다. '4' 부품은 '6' 부품과, '6' 부품은 '4' 부품과 동일한 기계를 3회 공동으로 사용하므로 두 번째 셀로 $C_2 = \{4, 6\}$ 로 묶이게 된다. 나머지 10, 14와 15 부품도 상호간에 동일한 기계를 사용해 세 번째 셀인 $C_3 = \{10, 14, 15\}$ 로 묶인다. 이와 마찬가지로 $f=2$ 인 $\{1, 2, 7, 8, 11, 12, 13\}$ 에 대해 수행하면 '1' 부품은 '4'와 '6' 부품과 2회 동일 기계를 사용하며, '4'와 '6' 부품은 C_1 셀에 존재하므로 '1' 부품을 C_1 셀로 포함시킨다. 이와 같이 하여 '7'은 C_1 , '12'는 C_2 에 포함된다. 그러나 나머지 '2', '8'과 '11'은 '2'는 '8'과 '11'과, '8'은 '2'와 '11'과, '11'은 '2'와 '8'과 동일한 기계를 2회 공동으로 사용하므로 새로운 네 번째 셀인 $C_4 = \{2, 8, 11\}$ 이 생성된다. 따라서 $f=3, 2, 1$ 중에서 $f=3, 2$ 로 15개 부품 모두를 셀들로 분할하였다. 15개 부품들을 셀별로 행에 배치하고, 열에는 기계를 배치하여 각 셀의 4각형을 영역으로 하여 전체 '1'의 개수, 셀 내부의 '0'의 개수, 셀 외부의 '1'의 개수를 계산하여 효율성 $\mu = 86.67\%$ 이 구해졌다. 이 결과는 셀 외부의 '1'의 개수가 없어 더 이상 셀 외부의 '1'의 개수를 줄이고, 셀 내부의 '0'의 개수를 줄이기 위해 부품과 기계를 이동시키는 Step 4의 상세 (fine-grain) 셀 형성 단계는 수행되지 않았음을 알 수 있다.

IV. Applications and Evaluation

본 장에서는 CFP의 벤치마킹 데이터로 널리 알려진 표 1의 35개 실험 데이터를 실험 대상으로 결정하였다. 이들 데이터는 Goncalves와 Resende[1], Diaz et al.[2]와 Sudhakarapandian[8]에서 인용되었다. 표 1의 35개 실험 데이터에 대해 제안된 기계사용 빈도 기반 알고리즘을 적용하여 군 효율성을 평가하고, EA와 GRASP 방법과 비교하였다. 제안된 알고리즘을 실험 데이터에 적용하여 셀을 형성한 결과는 표 4에, 기존 알고리즘과의 군 효율성을 비교한 결과는 표 5에 제시하였다.

Table 4. The Status of Cell Allocation for Proposed Algorithm

문제	Size	셀 배정 현황							
		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	
1	5x7	P: 1,37 M: 2,35	P: 2,45,6 M: 1,4						
2	5x7	P: 2,3,4,5,6 M: 2,3,4,5	P: 1,7 M: 1						
3	5x18	P: 1,2,3,5,6,8,11,12,13,14,16,17 M: 1,4	P: 4,7,9,10,15,18 M: 2,3,5						
4	6x8	P: 1,3,5,6,8 M: 2,3,5	P: 2,4,7 M: 1,4,6						
5	7x11	P: 2,3,6,7 M: 1,4,7	P: 1,5 M: 2,5	P: 10,11 M: 3	P: 4,8,9 M: 6				
6	7x11	P: 1,2,6,9 M: 1,2	P: 3,7,11 M: 3,4,5	P: 4,5,8,10 M: 6,7					
7	8x12	P: 6,7,8,9,10 M: 3,4,5,6	P: 1,2,3,4,5 M: 1,2	P: 11,12 M: 7,8					
8	8x20	P: 3,4,6,7,18,20 M: 2,4,7,8	P: 1,5,10,12,15 M: 5,6	P: 2,8,9,11,13,14,16,17,19 M: 1,3					
9	8x20	P: 5,6,11,12,13,16,17,19,20 M: 3,5,7	P: 1,2,3,4,7,8,9,10,14,15,18 M: 1,2,4,6,8						
10	10x10	P: 2,3,4,8 M: 2,7,9,10	P: 1,7,10 M: 1,4,5,6	P: 5,6,9 M: 3,8					
11	10x15	P: 1,4,6,9,14 M: 3,4,6,9	P: 2,7,10,11,12 M: 1,7,10	P: 3,5,8,13,15 M: 2,5,8					
12	14x23	P: 11,13,23 M: 10,14	P: 1,6,10,12,14,15,16 M: 6,8,9	P: 2,3,17,19,20,22 M: 4,5,7	P: 4,5,21 M: 2,3,11	P: 7,8,9,18 M: 1,12,13			
13	14x24	P: 5,9,11,13,15 M: 9,14	P: 1,2,17,19,20,23 M: 4,5,7	P: 3,4,21,24 M: 2,3,10,11	P: 6,7,8,18 M: 1,12,13	P: 10,12,14,16,22 M: 6,8			
14	16x24	P: 2,9,11,14,17,20,24 M: 10,11,12,16	P: 7,8 M: 9,13	P: 1,3,10,22,23 M: 1,2,8	P: 4,5,6,12 M: 14,15	P: 13,15,18,21 M: 5,6	P: 16,19 M: 3,4,7		
15	16x30	P: 2,4,7,9,12,18,22,30 M: 1,4,7,8,11,12	P: 6,8,11,14,15,17,21,24,26 M: 5,10,14,16	P: 5,19,23,25,27,28,29 M: 3,6,9,15	P: 1,3,10,13,16,20 M: 2,13				
16	16x43	P: 2,4,10,18,28,32,37,38,40,42 M: 2,9,16	P: 5,8,9,14,15,19,21,23,29,33,41,43 M: 4,5,8,15	P: 1,12,13,25,26,31,39 M: 7,10	P: 3,11,20,22,24,27,30 M: 11,12	P: 6,7,17,34,35,36 M: 3,6,14	P: 16 M: 1,13		
17	18x24	P: 2,5,6,8,9,12,15,17 M: 3,4,5,6,7	P: 10,23 M: 1,2	P: 1,3,20,24 M: 8,9	P: 7,13,14,18,21 M: 11,12,14,15	P: 4 M: 16,17	P: 11,16 M: 18	P: 19,22 M: 10,13	
18	20x20	P: 2,11,12,17,18 M: 12,13	P: 13,15,19 M: 5,10,11,14	P: 6,9,10,14 M: 1,4,6,8,9,19	P: 3,4,5,8,16 M: 2,3,15,16,17,20	P: 1,7,20 M: 7,18			
19	20x23	P: 1,2,4,10,11,15 M: 1,3,5,6,12,13,18	P: 3,12,16,22 M: 4,8,14,19,20	P: 6,7,8,9,17 M: 7,10	P: 18,19,21,23 M: 9,15,17	P: 5,13,14,20 M: 2,11,16			
20	20x35	P: 1,3,5,15,17,20,23,25,29 M: 1,3,7,8,17	P: 2,7,10,12,13,18,24,27,31 M: 2,4,14,18	P: 4,6,9,11,21,28,30,32 M: 11,12,15,16,19	P: 8,14,16,19,22,26,34 M: 5,6,9,10,20	P: 33,35 M: 13			
21	20x35	P: 2,7,10,12,13,18,24,27,31 M: 2,4,13,14,18	P: 1,3,5,15,17,20,23,25,29,35 M: 1,3,7,8,17	P: 4,6,9,11,21,28,30 M: 11,12,15,16,19	P: 16,33,34 M: 5	P: 8,14,19,22,36 M: 6,9,10,20			
22	24x40	P: 4,5,18,26,27,30 M: 6,8,12,15,18	P: 1,9,16,17,33 M: 1,13,21,22	P: 3,25,32 M: 7,14,23,24	P: 10,13,14,22,35,36 M: 2,5,11,19	P: 6,7,20,29,40 M: 9,10,17	P: 2,11,12,15,23,24,31,34 M: 3,20	P: 8,19,21,28,37,38,39 M: 4,16	
23	24x40	P: 4,5,18,26,27,30 M: 6,8,12,15,18	P: 1,9,16,17,33 M: 1,13,21,22	P: 10,13,14,22,35,36 M: 2,5,11,19	P: 3,25,32 M: 7,14,23,24	P: 6,7,20,29,40 M: 9,10,17	P: 2,11,12,15,23,24,31,34 M: 3,20	P: 8,19,21,28,37,38,39 M: 4,16	
24	24x40	P: 4,5,18,26,27,30 M: 6,8,12,15,18	P: 10,13,14,22,35,36 M: 2,5,11,19	P: 1,9,16,17,33 M: 1,13,21,22	P: 2,11,12,15,23,24,31,34 M: 3,20	P: 8,19,21,28,37,38,39 M: 4,16	P: 3,25,32 M: 7,14,23,24	P: 6,7,20,29,40 M: 9,10,17	
28	27x27	P: 9,10,11,12 M: 9,10,11,12	P: 1,2,3,4,5,7,8,13,14,16,19,22 M: 1,2,3,4,5,7,8,13,14,16,19,22	P: 6,17,20,21,23,24,26,27 M: 6,17,20,21,23,24,26,27	P: 15,18,25 M: 15,18,25				
문제		25 24x40	26 24x40	27 24x40	29 28x46	30 30x41	31 30x50	32 30x50	33 36x90
C_1		P: 4,5,18,27,37 M: 12,15,19	P: 2,12,15,23,34 M: 3,20	P: 2,25,32 M: 7,20,24	P: 1,2,3,4,5,6,7,12,15,16 M: 1,8,9,10,15	P: 10,11,33,41 M: 1,2,11	P: 1,7,18 M: 1,4,11	P: 1,4,16,33,42,45 M: 3,8,25	P: 8,15,21,22,40,51,56,62,63,64,68 73,76,77,79,88,90 M: 11,17,19,21,24
C_2		P: 1,9,16,17,33 M: 1,13,21,22	P: 3,32 M: 23,24	P: 6,12,35 M: 5,9,13	P: 8,9,10,36,37 M: 19,20	P: 12,23,31,32,39,40 M: 3,12,21,22,23	P: 9,12 M: 7,13	P: 2,3,11 M: 5,13	P: 16,23,50 M: 1
C_3		P: 2,12,15,23,34 M: 3,20	P: 4,5,18,27 M: 12,18	P: 10,15,22,23,34 M: 3,11	P: 11,32,33 M: 21,22	P: 1,3,13,21,22,30 M: 9,19,20,29,30	P: 4,6,8,10,11 M: 3,10	P: 28,30,37,50 M: 7,17,19	P: 10,11,12,28,36,39,41,49,61 M: 7,25,27
C_4		P: 10,13,14,22,35,36 M: 2,5,11,19	P: 8,21,28,37 M: 4,16	P: 4,18,27 M: 12,18	P: 13,26,27,29 M: 6,7	P: 16,27,34,36 M: 5,7,17,18,26	P: 2,3,17 M: 2,5,0	P: 13,15,34 M: 22,24,27	P: 1,2,3,5,6,7,13,19,25,27,29,31,33 37,42,43,46,54,58,60,69,70,72, 84 M: 26,28
C_5		P: 3,25,32 M: 7,14,23,24	P: 9,33 M: 21	P: 1,5,16,26,30,38 M: 6,8,15,22	P: 14,17,18,19,20,21,22,23,25,28,30,31 M: 3,4,5,18	P: 8,9,14,29 M: 8,28	P: 5,13,14,15,16 M: 6,8,12	P: 19,20,38,44,46,48 M: 2,14	P: 24,44,50,65,67,71,83,87,89 M: 3,14,16
C_6		P: 8,11,19,21,28,38 M: 4,16	P: 10,22,35 M: 5,11	P: 8,11,21,28 M: 4,14	P: 24,39,40,41,42,43 M: 11,12,13,14	P: 2,20 M: 10	P: 23,24,25,47 M: 15,17	P: 20,24,25,47 M: 10,12,29	P: 17,35,55,78 M: 20
C_7		P: 24,26,30 M: 6,8,10	P: 11,25 M: 14	P: 3,9,19,33 M: 1,21	P: 44,45 M: 14,16,17	P: 3,8 M: 13,24	P: 29,31,33,38 M: 19,21,23	P: 31,35,39 M: 18,20,23,26,30	P: 9,30,81,85 M: 22,30
C_8		P: 7,20,29,31 M: 17	P: 1,16 M: 13,15,23	P: 13,14,36,40 M: 2,19,23	P: 34,35,36 M: 2,5	P: 4,5,18 M: 14,25	P: 39,42,44,46,48 M: 24,30	P: 5,6,7,12,26,27,29 M: 18,20	P: 4,23,38,48,52,74 M: 4
C_9		P: 6,39,40 M: 9	P: 7,17,19,31 M: 1,17	P: 7,17,29,31 M: 17	P: 38 M: 2,23,26,27,28	P: 7,15,24,25,28,35 M: 4	P: 4,3,47 M: 26,28	P: 10,14,18,40 M: 15,28	P: 80,82 M: 5,13
C_{10}			P: 26,30,38 M: 6,8	P: 20,24 M: 10		P: 6,26 M: 6,16	P: 19,21,22,23,26,27 M: 14,16	P: 17,22,32,43 M: 4	P: 14,32,47,53,57,66 M: 29
C_{11}			P: 13,14,36,40 M: 2,7,19	P: 37,39 M: 16		P: 17,37 M: 15	P: 28,30,32,34,35,36,37 M: 18,20,22	P: 8,9,21,36,41,49 M: 1,9,11	P: 18 M: 2,6,9,10,23
C_{12}			P: 20,24 M: 10			P: 19 M: 27	P: 40,41,45,49,50 M: 25,27,29		P: 20,45,75 M: 8
C_{13}			P: 6,29,39 M: 9						P: 86 M: 12,15
C_{14}									P: 26 M: 18

문제	34		35	
	37x53		40x100	
C_1	P: 26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,46,49,50,53 M: 1,3,4,7,9,10,22,24,27,28,30,32		P: 63,66,68,69,82,84,85,89,90,92,94,95,96,97,98,99,100 M: 5,8,22,23,37,39	
C_2	P: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,41,42,43,44,47,48,51 M: 8,11,13,14,15,17,18,19,20,21,23,26,31,33,35		P: 36,38,42,51,52,64,65,70,72,74,75,76,80,81,86,87 M: 6,12,26,38,40	
C_3	P: 52 M: 2,5,6,12,16,25,29,34,36,37		P: 39,45,67,71,73,91 M: 15,18,33,34,36	
C_4			P: 35,47,53,77,78,79,83,88,93 M: 2,10,16,21,31	
C_5			P: 10,18,29,33,34,37,41,44,49,50,54,55 M: 1,3,7,32	
C_6			P: 56,57,58,59,61,62 M: 19,25,28,30	
C_7			P: 8,11,13,14,20,22,23,32 M: 4,9,20,24	
C_8			P: 9,12,17,19,26,30,31,40,43,46 M: 24,27,29	
C_9			P: 6,15,16,24,27,60 M: 14,17,35	
C_{10}			P: 1,2,3,4,5,7,21,25,28,48 M: 11,13	

Table 5. Comparison of Grouping Efficiency

문제	Source	Size	Best Known	메타 휴리스틱 알고리즘						빈도수 기반 알고리즘				
				EA[1]			GRASP[2]			Cell 개수	N_i	N_o^{IN}	N_i^{OUT}	μ
				최소값	평균값	최대값	최소값	평균값	최대값					
1	King & Nakornchai(1982)	5x7	73.68	73.68	73.68	73.68	73.68	73.68	73.68	2	16	3	2	73.68
2	Waghodekar & Sahu(1984)	5x7	62.50	62.50	62.50	62.50	62.50	62.50	62.50	2	20	5	3	68.00
3	Seifoddini(1989)	5x18	79.59	79.59	79.59	79.59	79.59	79.59	79.59	2	46	3	7	79.59
4	Kusiak(1992)	6x8	76.92	76.92	76.92	76.92	76.92	76.92	76.92	2	22	4	2	76.92
5	Kusiak & Chow(1987)	7x11	53.13	53.13	53.13	53.13	53.13	53.13	53.13	4	23	5	7	57.14
6	Boctor(1991)	7x11	70.37	70.37	70.37	70.37	70.37	70.37	70.37	3	21	6	2	70.37
7	Seifoddini & Wolfe(1986)	8x12	68.29	68.29	68.29	68.29	68.29	68.29	68.29	3	35	6	7	68.29
8	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	8x20	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	3	61	0	9	85.25
9	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	8x20	58.72	58.72	58.72	58.72	58.72	58.72	58.72	2	91	18	27	58.72
10	Mosier & Taube(1985)	10x10	70.59	70.59	70.59	70.59	70.59	70.59	70.59	3	24	10	0	70.59
11	Chan & Milner(1982)	10x15	92.00	92.00	92.00	92.00	92.00	92.00	92.00	3	46	4	0	92.00
12	Askin & Subramanian(1987)	14x23	69.86	69.86	69.86	69.86	69.86	69.86	69.86	5	58	15	7	69.86
13	Stanfel(1985)	14x24	69.33	69.33	69.33	69.33	69.33	69.33	69.33	5	61	14	9	69.33
14	McCormick et al.(1972)	16x24	51.96	51.96	51.96	51.96	51.40	51.90	51.96	6	86	16	33	51.96
15	Srinivasan et al.(1990)	16x30	67.83	67.83	67.83	67.83	67.83	67.83	67.83	4	116	27	19	67.83
16	King(1980)	16x43	56.52	54.86	54.86	54.86	55.83	55.97	56.52	6	126	35	35	56.52
17	Carrie(1973)	18x24	54.46	54.46	54.46	54.46	54.46	54.46	54.46	7	88	19	27	57.01
18	Mosier & Taube(1985)	20x20	42.96	42.86	42.94	42.96	42.57	42.82	42.96	5	111	24	53	42.96
19	Kumar et al.(1986)	20x23	49.65	49.65	49.65	49.65	49.65	49.65	49.65	5	113	29	42	50.00
20	Carrie(1973)	20x35	76.14	76.14	76.14	76.14	76.14	76.14	76.14	5	135	30	7	77.58
21	Boe & Cheng(1991)	20x35	58.15	57.84	57.84	57.84	58.15	58.15	58.15	5	148	44	34	59.38
22	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	24x40	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	7	131	0	0	100.00
23	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	24x40	85.11	85.11	85.11	85.11	85.11	85.11	85.11	7	130	11	10	85.11
24	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	24x40	73.51	73.51	73.51	73.51	73.51	73.51	73.51	7	131	20	20	73.51
25	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	24x40	51.97	51.85	51.88	51.97	51.88	51.90	51.97	9	131	26	48	52.87
26	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	24x40	47.37	45.78	46.69	47.06	47.37	47.13	47.29	13	131	10	64	47.52
27	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	24x40	44.87	44.51	44.75	44.87	44.87	44.87	44.87	11	131	24	61	45.16
28	McCormick et al.(1972)	27x27	54.27	54.27	54.27	54.27	52.16	53.51	54.27	4	219	74	60	54.27
29	Carrie(1973)	28x46	46.06	44.10	44.37	44.62	45.27	45.53	46.06	9	211	43	94	46.06
30	Kumar & Vannelli(1987)	30x41	59.52	57.30	58.11	58.48	58.06	59.00	59.52	12	128	28	33	60.90
31	Stanfel(1985)	30x50	59.66	58.82	59.21	59.66	59.66	59.66	59.66	12	154	22	49	59.66
32	Stanfel(1985)	30x50	50.51	50.25	50.48	50.51	50.51	50.51	50.51	11	167	31	67	50.51
33	King & Nakornchai(1982)	36x90	45.93	41.48	42.12	42.64	44.27	45.09	45.93	14	301	60	132	46.81
34	McCormick et al.(1972)	37x53	59.85	56.42	56.42	56.42	59.85	59.85	59.85	3	976	90	334	60.23
35	Chandrasekharan & Rajagopalan(1989)	40x100	84.03	84.03	84.03	84.03	84.03	84.03	84.03	10	420	37	36	84.03

표에서 12개 데이터인 문제 2, 5, 17, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 30, 33과 34에 대해서는 제안된 알고리즘이 기존에 알려진 최적 해를 보다 향상시킨 결과를 얻었으며, 나머지 23개 데이터에 대해서는 기존의 메타휴리스틱 방법들과 동일한 결과를 얻었다. 표에서 해당 효율성이 가장 좋은 최적의 값을 쉽게 이해할 수 있게 하기 위해 효율성 값에 면색을 칠하였다. 여기서, 기존에 알려진 최적 해 (best known)는 지금까지 이 실험 데이터들에 대해 얻은 군 효율성을 중 최고의 효율성을 갖는 값을 표시하였음을 의미한다. 만약, 이 값보다 높은 효율성을 갖는 새로운 알고리즘이 제안된다면 이 문제에 대해서

는 가장 좋은 알고리즘이라고 할 수 있다.

본 결과는 CFP는 NP-난제로 메타휴리스틱 방법을 적용해야 한다는 고정관념을 타파하고, 휴리스틱 알고리즘이 존재함을 보였다는데 의미가 있다.

V. Conclusions

본 논문은 NP-완전 문제로 분류된 CFP에 대해 휴리스틱

알고리즘으로도 군 효율성을 향상시킬 수 있는 알고리즘이 존재함을 보였다.

제안된 휴리스틱 알고리즘은 부품별 기계 사용빈도수에 기반하여 셀을 형성하고, 가장 많은 기계 사용 셀에 해당 기계를 배정하는 개략적인 셀 형성 과정을 수행하고, 군 효율성을 향상시킬 수 있는 상세 셀 형성과정인 최적화 과정을 수행하였다.

35개 실험 데이터에 제안된 알고리즘을 적용한 결과, 기존의 메타휴리스틱인 EA와 GRASP에 비해 12개 데이터에 대해서는 최적 해를 향상시키는 결과를 얻었다.

제안된 알고리즘은 CFP에 대해 $O(n^2)$ 의 다항시간으로 해를 구하는 알고리즘이 존재함을 보였으며, 본 알고리즘으로 구한 해가 최적 해인지와 보다 많은 실험 데이터에 적용하여 일반화된 알고리즘으로 적용할 수 있는지를 추후 검증할 예정이다.

REFERENCES

- [1] J. F. Gonçalves and M. G. C. Resende, "An Evolutionary Algorithm for Manufacturing Cell Formation," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 47, Issue. 2-3, pp. 247-273, Nov. 2004.
- [2] J. A. Diaz, D. Luna, and R. Luna, "A GRASP Heuristic for the Manufacturing Cell Formation Problem," *Trabajos de Investigación Operativa*, Vol. 20, Issue. 3, pp. 679-706, Oct. 2012.
- [3] H. Nouri, S. H. Tang, B. T. H. Tuah, M. K. A. Ariffin, and R. Samin, "Metaheuristic Techniques on Cell Formation in Cellular Manufacturing System," *Journal of Automation and Control Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 49-54, Jan. 2013.
- [4] M. Murugan and V. Selladurai, "Formation of Machine Cells/ Part Families in Cellular Manufacturing Systems Using an ART-Modified Single Linkage Clustering Approach - A Comparative Study," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 199-212, Jun. 2011.
- [5] M. Mutingi and G. C. Onwubolu, "Manufacturing System, Chapter 10. Integrated Cellular Manufacturing System Design and Layout Using Group Genetic Algorithms," pp. 205-222, Interopen.com, May. 2012.
- [6] G. Eğilmez, G. A. Süer, and O. Özgüner, "Capacitated Cellular Manufacturing System Design: A Genetic Algorithm Approach," *Production and Operations Management Society (POMS)*, pp. 1-23, Apr. 2012.
- [7] K. R. Kumar and M. P. Chandrasekharan, "Grouping Efficiency: A Quantitative Criterion for Goodness of Block Diagonal Forms of Binary Matrices in Group Technology," *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 2, pp. 233-243, 1990.
- [8] R. Sudhakarapandian, "Application of Soft Computing Techniques for Cell Formation Considering Operational Time and Sequence," A Thesis of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India, Aug. 2007.

Authors



Sang Un Lee received the B. Sc. degree in avionics from the Korea Aerospace University in 1997. He received the M. Sc. and Ph. D. degrees in Computer Science from Gyeongsang National University, Korea, in 1997 and 2001, respectively.

He is currently Professor with the Department of Multimedia Science, Gangneung-Wonju National University, Korea. He is interested in software quality assurance and reliability modeling, software engineering, software project management, neural networks, and algorithm.