

# 기계 그룹 형성 문제의 최적해

최 성 훈

상명대학교 공과대학 산업정보시스템공학전공

## An Optimal Solution of Machine Cell Formation Problem

Seong-Hoon Choi

Dept. of Industrial and Information Systems Engineering, Sangmyung University

In this paper, machine cell formation problem is discussed. To reflect precisely actual manufacturing situations such as routing sequences, production quantities, and machining (or operation) characteristics, a new network presentation for the problem is proposed. It is formulated as a simple 0-1 quadratic programming model with linear constraints. Then, the model is converted into a 0-1 integer programming model using a variable transformation technique. Lastly, some computational results are presented.

**Keywords :** Machine cell formation, 0-1 integer programming, Network

### 1. 서 론

그룹 테크놀로지(group technology)는 제품과 제조 프로세스에 내재되어 있는 유사성을 최대한 활용하고자 하는 제조 철학이다. 기계 그룹 형성 문제 (machine cell formation problem)는 그룹 테크놀로지의 핵심이 되는 문제이다[1].

기계 그룹 형성 문제는 그 중요성으로 인해 다양한 방법에 기초한 많은 연구가 진행되어 왔다[8]. 지금까지 발표된 연구를 두 분야로 대별해보면 유사성 계수 방법, 분류 기반 방법, 본드 에너지 방법 등 행렬 형성에 의한 방법과 p-중앙값 모형, 2차 비선형 모형, 선형 모형 등 수리 모형에 의한 방법으로 구분할 수 있다.

수리 모형에 의한 방법을 적용하면, Boctor[1]가 지적한 바와 같이 기계 그룹의 크기를 제어할 수 있고 문제의 크기가 크지 않을 경우 선형 모형에 대해서 상용 선형계획법 소프트웨어 패키지를 이용하면 쉽게 최적해를 구할 수 있으므로, 본 연구에서는 수리 모형에 의한 방법을 제시하고자 한다.

기계 그룹 형성 문제는 이미 Kumar 등에 의해 가중 이분할 네트워크 (weighted bipartite network)의 분할 문제로 표현되고 문제에 대한 0-1 2차 비선형 계획 모형이 제시되었다[7]. 그러나 실제의 제조 상황은 가중 이분할 네트워크로 정확히 표시될 수 없으며; 목적함수 또한 2차 비선형이라는 한계를 갖는다. Boctor[1, 2]는 0-1 정수 계획 모형과 혼합 선형계획 모형을 제시하였다. 최근, Boctor가 제시한 0-1 정수 계획 모형에 기초하여 Won과 Lee[9]에 의해 작업 순서 (routing sequence)와 생산량을 반영하는 0-1 정수계획 모형이 제시되었다.

본 연구에서는 이러한 연구들을 발전시켜 작업 순서, 생산량, 기계(또는 작업) 특성 등의 실제 제조 상황을 포함하면서도 단순한 0-1 정수계획 모형을 제시한다. 먼저, 2장에서 기계 그룹 사이의 이동량을 정확히 표현하기 위한 새로운 네트워크 표현 방법을 제시한다.

그리고 3장에서 단순화된 네트워크로 표현된 기계 그룹 형성 문제의 0-1 2차 비선형 모형을 제시하고 간단한 변수 변환 방법을 적용하여 2차 비선형 형태의 목적함수를 선형으로 변환하여 0-1 정수계획법을 이용하여 최

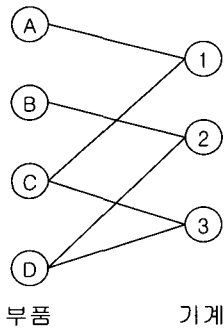
적해를 구할 수 있음을 보인다.

4 장에서는 몇 가지 문제에 대한 계산 결과를 제시한다. 마지막으로 5장에서는 결론으로 향후 연구 방향을 제시한다.

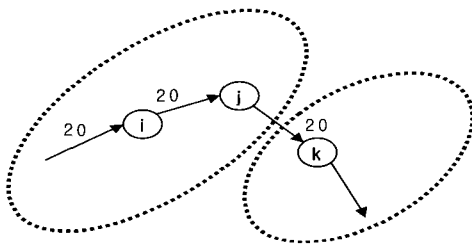
## 2. 기계 그룹 형성 문제의 네트워크 표현

### 2.1 이분할 네트워크 표현과 그 한계

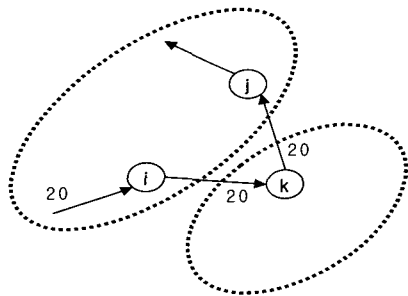
이분할 네트워크는 교점들이 상호 배반적인 두 개의 집합으로 나누어지고 각 집합 내의 교점들 사이에는 호가 없는 형태이다[3]. 이분할 네트워크는 기계와 부품 사이의 관계를 표현하기 위해 널리 사용되어 왔다 [3, 7, 6]. <그림 1>은 기계-부품 관계를 표현하는 이분할 네트워크의 예이다.



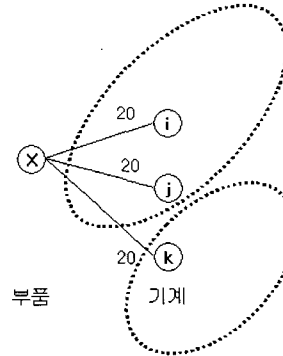
<그림 1> 이분할 네트워크 예



(a) 기계 그룹 사이의 이동량 = 20



(b) 기계 그룹 사이의 이동량 = 40



(c) 기계 그룹 사이의 이동량 = 20

<그림 2> 기계 그룹간 이동량의 표현

그러나 이분할 네트워크는 작업 순서 정보를 표현할 수 없기 때문에 위의 <그림 2>에서 보는 바와 같이 그룹간 이동량(inter-cellular moves)을 실제보다 더 적게 표현하는 경향이 있다. 부품 X의 생산량은 20 단위이고 기계 i, j, k를 사용하여 생산되고 기계 i와 j가 동일한 그룹에 속해 있고, 기계 k는 다른 그룹에 속해있다고 가정하자. 이때 작업이 이루어지는 순서가 i, j, k인 경우 (<그림 2>의 (a))와 순서가 i, k, j 경우(<그림 2>의 (b)) 그룹간 이동량이 상이하다. 이분할 네트워크를 이용하면, 두 가지 경우 모두 <그림 2>의 (c)와 같이 표현되어 그룹간 이동량이 동일하게 기술됨을 알 수 있다.

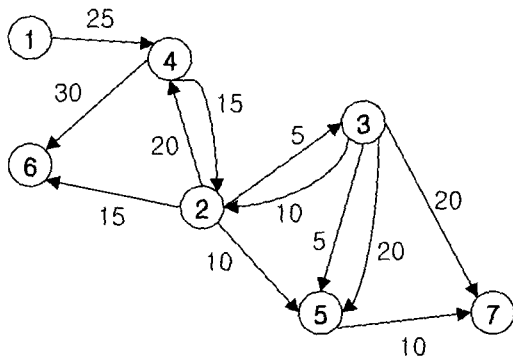
### 2.2 새로운 네트워크 표현

여러 가지 부품이 다수의 기계를 통하여 생산되는 상황은 다제품 공정도(multi-product process chart)로 적절히 표현될 수 있다. <표 1>은 다제품 공정도의 간단한 예이다. <표 1>의 기계와 부품사이의 흐름은 <그림 3>과 같이 방향이 있는 네트워크로 표현될 수 있다.

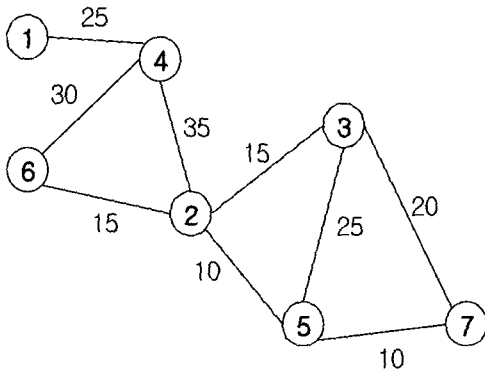
<표 1> 다제품 공정도의 예

제품 \ 기계	1	2	3	4	5	6
1		①			①	
2			②	②		②
3				③		③
4		④	④		④	
5	⑤				⑤	
6			⑥		⑥	⑥
7				⑦		
생산량	20	15	20	10	10	5

그런데 기계 그룹 형성 문제의 목적은 기계 그룹들 사이의 이동량을 최소화하는 기계 그룹들을 결정하는 것이므로 흐름의 방향은 연구의 관심사가 아님을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 목적을 위해서 <그림 3>은 <그림 4>와 같이 방향이 없는 네트워크로 단순화될 수 있다. 그리고 기계 그룹 형성 문제는 <그림 4>와 같이 표현된 무방향 네트워크의 분할 문제로 단순화됨을 알 수 있다.



<그림 3> 다제품 공정도의 네트워크 표현



<그림 4> 단순화된 무방향 네트워크 표현

이제 연구 대상 무방향 네트워크를  $G=(V, E)$ 라 하자.  $V$ 는 네트워크  $G$ 에 있는 교점(vertex)의 집합을  $E$ 는 네트워크  $G$ 에 있는 호(edge)의 집합을 나타낸다. 그러면 상호배반적인 기계 그룹 형성이 본 연구의 목적이므로, 연구 대상 문제는  $\bigcup_{k=1}^C V_k = V$  (단,  $C$ 는 기계 그룹의 수)이고,  $i \neq j$ 인  $i$ 와  $j$ 에 대하여  $V_i \cap V_j = \emptyset$ 를 만족하는  $V_k(k=1,2,\dots,C)$ 를 구하는 것이다.

### 3. 수리 모형

먼저 무방향 네트워크의 분할로 표현되는 기계 그룹 형성 문제에 대한 수리 모델을 개발하기 위해 필요한 용어와 의사결정 변수를 정의하기로 한다.

- $M$  기계 총수, 즉 집합  $V$ 의 원소 개수
- $N$  생산 대상 부품 종류의 총수
- $C$  기계 그룹의 총수
- $p_q$  부품  $q$ 의 생산량
- $f_{ij}^q$  부품  $q$ 의 작업 순서에서 기계  $i$ 와  $j$ 가 순서에 관계없이 연달아서 나타나는 회수
- $a_{ij}$  기계  $i$ 와  $j$  사이의 이동량
- $L$  각 기계 그룹에 속하는 기계 대수의 하한치
- $U$  각 기계 그룹에 속하는 기계 대수의 상한치 (단,  $L \leq U$ )
- $S$  비친화(아래에서 설명하기로 함.) 기계 집합의 수
- $T$  친화(아래에서 설명하기로 함.) 기계 집합의 수
- $VX_s$   $s$ 번째 비친화 기계 집합에 속하는 기계(들)의 번호를 원소로 하는 집합 ( $s = 1, 2, \dots, S$ )
- $VO_t$   $t$ 번째 친화 기계 집합에 속하는 기계(들)의 번호를 원소로 하는 집합 ( $t = 1, 2, \dots, T$ )
- $M_t$  집합  $VO_t$ 의 원소의 개수 ( $t = 1, 2, \dots, T$ )

의사결정 변수

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{if } i \in V_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{if } i \in V_k \text{ and } j \in V_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$z_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{if } VO_t \subset V_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

기계  $i$ 와  $j$  사이의 이동량  $a_{ij}$ 는 <그림 3>과 <그림 4>에서 알 수 있는 바와 같이 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$a_{ij} = \sum_{q=1}^N f_{ij}^q \cdot p_q \quad \dots \dots \dots (1)$$

그리고 호  $(i,j)$ 를 구성하는 기계  $i$ 와  $j$ 가 모두 기계 그룹  $k$ , 즉 교점 부분 집합  $V_k$ 에 속하는 필요충분 조건은  $x_{ik} \cdot x_{jk} = 1$

이므로  $C$ 개의 부분 네트워크에 속하는 이동량의 총합, 즉, 기계 그룹 내의 이동량 (intra-cellular moves)은 아래와 같다.

$$\sum_{k=1}^C \sum_{(i,j) \in E} a_{ij} \cdot x_{ik} \cdot x_{jk} \dots\dots\dots (2)$$

본 연구의 목적은 무방향 네트워크를 기계 그룹 (교점 부분 집합) 사이의 이동량을 최소화 하는  $C$ 개의 부분 네트워크로 분할하는 것이고, 이동량의 총합이  $\sum_{(i,j) \in E} a_{ij}$  이므로, 기계 그룹 사이 이동량의 총합을 최소화 하는 목적함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Min \sum_{(i,j) \in E} a_{ij} - \sum_{k=1}^C \sum_{(i,j) \in E} a_{ij} \cdot x_{ik} \cdot x_{jk} \dots\dots\dots (3)$$

그런데, 목적함수의 첫 번째 항은 상수이므로, 목적함수는 다음과 같이 단순화될 수 있다.

$$Max \sum_{k=1}^C \sum_{(i,j) \in E} a_{ij} \cdot x_{ik} \cdot x_{jk} \dots\dots\dots (4)$$

이제, 수리 모델에 포함될 제약식에 대해 알아보기로 한다. 먼저, 각 기계(교점)는 하나의 부분 네트워크에만 포함되어야 하므로 아래의 제약식이 필요하다 하겠다.

$$\sum_{k=1}^C x_{ik} = 1, i = 1, 2, \dots, M \dots\dots\dots (5)$$

또한, 각 부분 네트워크에 속하는 기계 수에 불균형이 큰 것은 관리상 바람직하지 못하므로, 기계의 수에 대한 하한치와 상한치를 주는 것이 합리적이다.

$$L \leq \sum_{i=1}^M x_{ik} \leq U, k = 1, 2, \dots, C \dots\dots\dots (6)$$

지금부터는 기계 그룹 형성과 관련하여 현실적인 제약을 고려해보기로 하자. 작업 또는 기계 특성으로 인해 동일한 기계 그룹에 속해서는 안 되는 기계들이 존재할 수 있다. 또한, 그 반대로 기계들 사이에 이동량은 많지 않아도 작업 특성상 동일한 그룹에 포함시켜야 하는 경우도 존재할 수 있다. 전자의 기계들을 모아 놓은 집합

을 비친화 기계 집합으로 부르고 후자는 친화 기계 집합이라고 부르기로 한다. 먼저, 비친화 기계 집합을 표현하는 제약식을 알아보기로 한다. 비친화 기계 집합  $VX_s$ 에 속해 있는 기계들은 동일한 기계 그룹에 포함되어서는 안 되므로, 아래와 같은 제약식을 이용하여 모형화 될 수 있다.

$$\sum_{i \in VX_s} x_{ik} = 1, k = 1, 2, \dots, C, \dots\dots\dots (7)$$

$$s = 1, 2, \dots, S$$

이제, 친화 기계 집합에 대한 제약식을 유도하기로 하자.  $VO_t$ 에 속하는 모든 기계들은 하나의 특정  $V_k$ 에 속해야 한다는 제약을 이용하면, 아래와 같은 제약식들을 유도할 수 있다.

$$\sum_{i \in VO_t} x_{ik} = M_t \cdot z_{tk}, t = 1, 2, \dots, T, \dots\dots\dots (8)$$

$$k = 1, 2, \dots, C$$

$$\sum_{k=1}^C z_{tk} = 1, t = 1, 2, \dots, T \dots\dots\dots (9)$$

위의 목적함수와 제약식 (5)에서 (9)까지를 이용하면, 기계 그룹 형성 문제는 아래의 [P1]과 같은 최적화 모형으로 표현될 수 있다.

[P1]에서 제약식 (7)은 전술한 바와 같이 작업 또는 기계 특성으로 인한 기계들 사이의 비친화 제약을 표현하는 것이다. 만일 비친화 기계 집합의 기계들 사이에 큰 음수의 이동량을 가지는 가상의 호를 도입하면, 제약식 (7)을 도입하지 않고서도 기계 그룹 형성 문제를 모형화 할 수 있다.

일반성을 잃지 않고, 세 기계  $i, j, k$ 가 비친화 기계들이라고 가정하자. 즉,  $VX_s = \{i, j, k\}$ . 그리고 이 기계들 사이의 이동량을 각각  $-a_{ij}, -a_{ik}, -a_{jk}$  (단, 여기서  $a_{ij} = a_{ik} = a_{jk} \gg 0$ )라고 하면,  $VX_s$ 는 <그림 5>와 같이 표현될 수 있으므로, 명시적으로 제약식 (7)을 도입하지 않아도 비친화 기계 집합 제약을 수리 모형에 포함시킬 수 있다.

[P1]

$$Max \sum_{k=1}^C \sum_{(i,j) \in E} a_{ij} \cdot x_{ik} \cdot x_{jk} \dots\dots\dots (4)$$

s.t.

$$\sum_{k=1}^C x_{ik} = 1, i = 1, 2, \dots, M \dots\dots\dots (5)$$

$$L \leq \sum_{i=1}^M x_{ik} \leq U, k = 1, 2, \dots, C \dots\dots\dots (6)$$

$$\sum_{i \in VX_s} x_{ik} = 1, k = 1, 2, \dots, C \dots\dots\dots (7)$$

$s = 1, 2, \dots, S$

$$\sum_{i \in VO_t} x_{ik} = M_t \cdot z_{tk}, t = 1, 2, \dots, T, \dots\dots\dots (8)$$

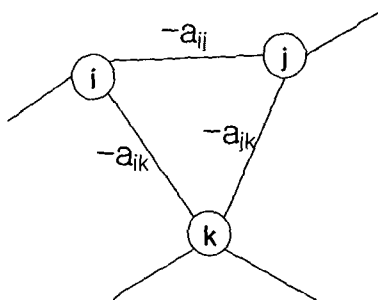
$k = 1, 2, \dots, C$

$$\sum_{k=1}^C z_{tk} = 1, t = 1, 2, \dots, T \dots\dots\dots (9)$$

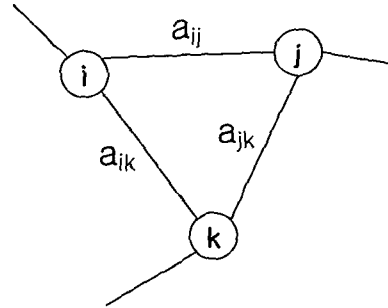
$$x_{ik}, z_{tk} = 0 \text{ or } 1, i = 1, 2, \dots, M, \dots\dots\dots (10)$$

$k = 1, 2, \dots, C,$   
 $t = 1, 2, \dots, T$

비슷한 방법으로 친화 기계 집합의 기계들 사이에 큰 양수의 이동량을 가지는 가상의 호를 도입하면, 제약식 (8)과 (9)를 도입하지 않고서도 기계 그룹 형성 문제를 모형화 할 수 있다. 일반성을 잃지 않고, 세 기계  $i, j$ , 그리고  $k$ 가 친화 기계들이라고 가정하자. 즉,  $VO_t = \{i, j, k\}$ . 그리고 이 기계들 사이의 이동량을 각각  $a_{ij}, a_{ik}, a_{jk}$  (단, 여기서  $a_{ij} = a_{ik} = a_{jk} \gg 0$ )라고 하면,  $VO_t$ 는 <그림 6>과 같이 표현될 수 있으므로, 명시적으로 제약식 (8)과 (9)를 도입하지 않아도 친화 기계 집합 제약을 수리 모형에 포함시킬 수 있다.



<그림 5>  $VX_s$ 의 네트워크 표현



<그림 6>  $VO_t$ 의 네트워크 표현

이제 [P1]의 2차 목적함수를 선형화하자. 아래의 간단한 부등식을 도입하면, 2차 목적함수는 선형으로 변경할 수 있다.

$$2x_{ik} \cdot x_{jk} \leq x_{ik} + x_{jk} \dots\dots\dots (11)$$

위 부등식은 다음의 관찰에 의해 증명될 수 있다.  $x_{ik} \cdot x_{jk} = 1$ 의 필요충분 조건은  $x_{ik} = 1$ 과  $x_{jk} = 1$ 이다. 이제,  $y_{ijk} = x_{ik} \cdot x_{jk}$ 라고 하자. 만일  $x_{ik} = x_{jk} = 1$ 이면,  $a_{ij} > 0$ 이므로 목적함수를 최대화 하기 위해서는 반드시  $y_{ijk} = 1$  이어야 한다. 따라서  $2x_{ik} \cdot x_{jk} \leq x_{ik} + x_{jk}$ 를 제약식으로 도입하면, [P1]의 목적함수의 2차 항  $x_{ik} \cdot x_{jk}$ 는  $y_{ijk}$ 로 대체되고 [P1]은 아래의 [P2]로 변경될 수 있다.

[P2]

$$Max \sum_{k=1}^C \sum_{(i,j) \in E} a_{ij} \cdot y_{ijk} \dots\dots\dots (12)$$

s.t.

$$\sum_{k=1}^C x_{ik} = 1, i = 1, 2, \dots, M \dots\dots\dots (5)$$

$$L \leq \sum_{i=1}^M x_{ik} \leq U, k = 1, 2, \dots, C \dots\dots\dots (6)$$

$$2x_{ik} \cdot x_{jk} \leq x_{ik} + x_{jk}, k = 1, 2, \dots, C, \dots\dots\dots (13)$$

for all  $(i, j) \in E$

$$x_{ik} = 0 \text{ or } 1, i = 1, 2, \dots, M, \dots\dots\dots (14)$$

$k = 1, 2, \dots, C$

$$y_{ijk} = 0 \text{ or } 1, k = 1, 2, \dots, C, \dots \dots \dots (15)$$

for all  $(i, j) \in E$

[P2]는 [P1]과 동등하므로 [P2]를 풀면, [P1]에 대한 최적해를 구할 수 있다. [P2]는 0-1 정수계획 문제이므로 분지한계법이나 동적 계획법으로 풀 수 있다.

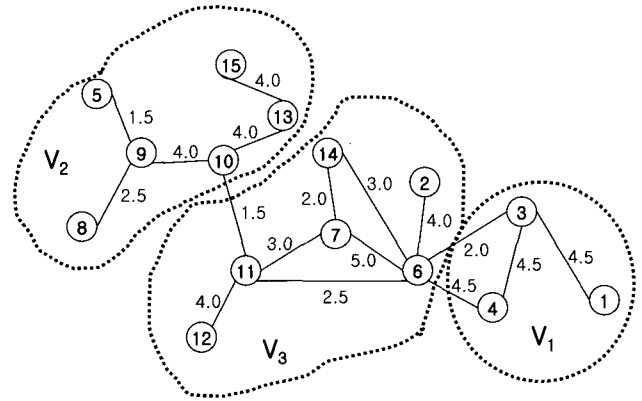
### 4. 계산 결과

본 연구에서는 [P2]의 0-1 정수계획 문제를 풀기 위해 미국 LINDO 사의 LINGO 소프트웨어 패키지를 적용하였다. LINGO는 0-1 정수계획 문제를 풀기 위해 분지한계법에 기초한 해법을 적용하고 있다.

(예제 1) 아래 <그림 7>의 15 대 기계로 구성되는 문제를 고려하기로 한다. 각 기계 그룹의 기계 수에 대한 하한치와 상한치가 각각 3과 6이고, 기계 그룹 수가 3이다. 즉,  $(L,U,C) = (3,6,3)$ 이다.

예제 1의 문제에 대해 최적해를 구하면, 48.5 단위로 이때의 기계 그룹 사이의 이동량은 8.0 단위이고, 각 기계 그룹 (부분 네트워크)이 <그림 8>에 표시되어 있다. 2 GHz 속도의 팬티엄 IV PC를 이용할 경우, 약 2초 정도의 실행 시간이 소요된다.

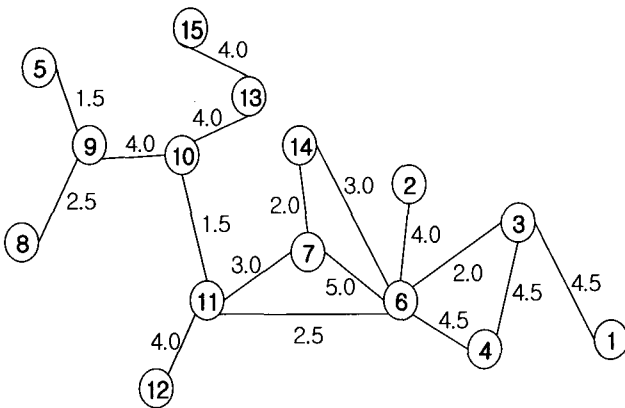
좀 더 많은 문제에 대한 계산 결과를 알아보기 위해 Groover[10]의 저서에 소개되어 있는 기계 23 대, 부품 20 개의 기계-부품 행렬 (<그림 9>)에 기초하여 15 개의 문제를 준비하였다. 그런데 <그림 9>에는 작업 순서와 생산량 정보가 없다. 본 연구에서는 각 부품의 생산량은 모두 1 단위로 가정 하였으며, 작업 순서는 무작위로 발생시켜서 이용하였다.



<그림 8> 최적해

		부품																				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
기계	1	x		x	x	x	x		x				x	x	x	x				x	x	
	2			x			x				x	x		x								
	3	x			x				x					x						x	x	x
	4					x								x								
	5		x							x	x							x				x
	6											x								x		
	7		x						x		x	x	x							x	x	
	8								x			x										
	9								x			x										
	10	x				x	x				x			x	x						x	
	11	x		x		x								x								
	12				x					x						x	x					x
	13			x							x											
	14			x															x			
	15	x	x	x		x	x		x					x	x	x				x	x	x
	16								x		x					x						x
	17				x						x											
	18			x							x			x	x		x	x	x			
	19									x							x	x				
	20													x	x			x				
	21	x			x					x							x					
	22	x		x	x		x		x	x	x					x	x					x
	23	x			x						x						x					

<그림 9> 기계-부품 행렬



<그림 7> 15 대 기계 그룹 형성 문제

$(L,U,C) = (8,15,2)$ 로 정했을 때, 15 개 문제 각각 대한 최적해와 실행 소요 시간에 대한 결과가 <표 2>에 제시되어 있다. 참고로 기계 그룹 2는 전체 23 대의 기계들 중에서 기계 그룹 1의 기계들을 제외한 기계들로 구성된다. 기계 그룹간 이동량은 총 이동량 93 단위에서 [P2] 문제의 목적함수 값을 뺀 값이다. 최적해를 구하기 위해 5초 ~ 35초 정도의 시간이 소요되었다.

Kumar[7]가 지적한 바와 같이 [P2] 문제는 완전 NP 문제이다 즉, 교점(기계)의 수와 호의 수가 증가함에 따라 0-1 의사결정 변수의 개수가 급격하게 증가하게 되고 최적해를 구하기 위한 시간도 급격히 증가하게 된다. 그러나 규모가 크지 않은 문제는 본 연구에서 제시한 [P2] 모형으로 적절한 시간 이내에 최적해를 구할 수 있을 것으로 사료된다. 참고로, King[5]과 Gupta[4]의 논문에

제시되어 있는 43개의 부품과 16대의 기계 문제의 경우 [P2]로 모형화 하면 280개의 0-1 의사결정 변수가 필요하며, 이때 최적해를 구하기 위해 약 77초의 시간이 소요된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 기계 그룹 형성 문제에서 기계 그룹 사이의 이동량을 쉽고 정확히 나타낼 수 있는 새로운 네트워크 표현 방법을 제시하였다. 그리고 작업 순서, 생산량, 기계들 사이의 친화 여부 등의 실제 제조 제약 상황을 포함하면서도 단순한 0-1 정수계획 모형을 제시하였으며 상용 선형계획법 패키지를 이용하여 최적해를 구할 수 있음을 계산 결과를 통하여 제시하였다.

100 대 이상의 기계를 갖는 규모가 큰 기계 그룹 형성 문제의 경우에는 현실적인 시간 내에 최적해를 구하기 어렵다. 따라서 대규모 문제를 적절한 시간 내에 해결할 수 있는 발견적 기법에 기초한 해법을 고안하는 것이 추후의 연구 과제라 할 수 있다.

<표 2> 무작위 발생 15 문제의 계산 결과

문제 번호	목적 함수 값	기계 그룹간 이동량	기계 그룹 1
1	78	15	5, 14, 7, 13, 9, 6, 8, 17
2	74	19	21, 23, 5, 14, 4, 8, 9, 13
3	75	18	4, 8, 9, 13, 14, 6, 17, 20
4	77	16	1, 15, 22, 12, 5, 7, 10, 3, 2, 16, 18, 19, 21, 11, 23
5	77	16	1, 15, 3, 10, 18, 19, 22, 16, 12, 11, 20, 2, 21, 5, 23
6	77	16	1, 15, 2, 22, 10, 11, 3, 18, 21, 17, 23, 4, 12, 19, 20
7	80	13	1, 10, 11, 15, 3, 22, 5, 12, 16, 18, 21, 23, 2, 19, 20
8	78	15	1, 22, 18, 21, 3, 10, 2, 11, 15, 16, 12, 5, 17, 19, 23
9	79	14	1, 15, 18, 22, 23, 3, 2, 11, 10, 12, 16, 21, 19, 4, 17
10	74	19	1, 10, 11, 15, 22, 23, 3, 5, 2, 12, 16, 18, 19, 21, 17
11	74	19	1, 11, 12, 15, 10, 22, 16, 3, 4, 2, 18, 19, 21, 23, 17
12	76	17	1, 3, 15, 10, 16, 22, 11, 2, 4, 12, 18, 23, 14, 17, 20

### 참고 문헌

- [1] Bector, F., "A Linear Formulation of the Machine-Part Cell Formation Problem", *International Journal of Production Research*, Vol. 29, pp. 343-356, 1991.
- [2] Bector, F., "The Minimum Cost, Machine-Part Cell Formation Problem", *International Journal of Production Research*, Vol. 34, pp. 1045-1063, 1996.
- [3] Chandrasekharan, M. and Rajagopalan, R., "An Ideal Seed Non-Hierarchical Clustering Algorithm for Cellular Manufacturing", *international Journal of Production Research*, Vol. 24, pp. 451-464, 1986.
- [4] Gupta, T. and Seifoddini, H., "Production Data Based Similarity Coefficient for Machine-Part grouping Decisions in the Design of a Cellular Manufacturing System", *International Journal of Production Research*, Vol. 28, pp. 1247-1269, 1990.
- [5] King, J., "Machine-Component Grouping in Production Flow Analysis: an Approach Using a Rank Order Clustering Algorithm", *international Journal of Production Research*, Vol. 18, pp. 213-232, 1980.
- [6] King, J. and Narkornchai, V., "Machine-Component Group Formation in Group Technology", *international Journal of Production Research*, Vol. 20, pp. 117-133, 1982.
- [7] Kumar, K., Kusiak, A., and Vannelli, A., "Grouping of Parts and Components in Flexible Manufacturing Systems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 24, pp. 387-397, 1986.
- [8] Selim, H., Askin, R., and Vakharia, A., "Cell Formation in Group Technology: Review, Evaluation and directions for Future Research", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 34, pp. 3-20, 1998.
- [9] Won, Y. and Lee, K., "Group Technology Cell Formation Considering Operation Sequences and Production Volumes", *International Journal of Production Research*, Vol. 39, pp. 2755-2768, 2001.
- [10] Groover, M., *Automation, Production Systems and Computer Aided Manufacturing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1980.
- [11] Ham, I., Hitomi, K. and Yoshida, T., *Group Technology*, Kluwer-Nijhoff Publishing, 1985.