

**기계중복과 셀간 이동수의 최소화가 가능한  
예외적 요소의 제거 방법 : 비용 및 설치대수 제약 고려**  
**A Method of Eliminating Exceptional Elements  
Attaining Minimum Machine Duplications and Intercell Moves  
in Cellular Manufacturing Systems**

**장 익\*, 윤 창 원\*\*, 정 병 희\***  
**\* 숭실대학교 산업공학과, \*\* 쌍용정보통신**

**ABSTRACT**

Several constraints in machine duplication cost, machining capability, cell space capacity, intercell moves and exceptional elements(EEs) are main problems that prevent achieving the goal of ideal Cellular Manufacturing System (CMS) environment. Minimizing intercell part traffics and EEs are the main objective of the cell formation problem as it's a critical point that improving production efficiency. Because the intercell moves could be changed according to the sequence of operation, it should be considered in assigning parts and machines to machine cells.

This paper presents a method that eliminates EEs under the constraints of machine duplication cost and cell space capacity attaining two goals of minimizing machine duplications and minimizing intercell moves simultaneously.

Developing an algorithm that calculates the machine duplications by cell-machine incidence matrix and part-machine incidence matrix, and calculates the exact intercell moves considering the sequence of operation.

Based on the number of machine duplications and exact intercell moves, the goal programming model which satisfying minimum machine duplications and minimum intercell moves is developed. A linear programming model is suggested that could calculate more effectively without damaging optimal solution.

A numerical example is provided to illustrate these methods.

**1. 서론**

**1.1 연구의 목적**

셀제조시스템(Cellular Manufacturing System: CMS)은 부품과 기계를 여러 형태로 그룹화하여 이를 마치 대량생산의 형태로 생산할 수 있는 점으로 인해 주문생산시스템의 생산성을 제고하는 효과적인 방법으로 채용, 운영되고 있다. 그러나 현실적인 제약조건들은 이상적인 CMS의 환경구축에 적지 않은 걸림돌로 작용하고 있다. 즉 부품과 기계들을 기계셀에 할당시킬 때 가능하면 하나의 셀 안에서 부품을 가공할 수 있도록 셀을 형성하게 되는데, 기계 가공능력의 제약 때문에 모든 공정을 수행하지 못하게 되므로 부품을 다른 셀로 이동시키지 않으려면 기계를 구입(중복)

해야 한다. 이런 경우 대부분의 현장에서는 기계를 구입하거나 외주(하청)로 처리하게 되는데 기계구입의 경우는 예산이 제한되어 있으므로 필요한 셀마다 기계를 구입 하는 것은 불가능하며, 외주의 경우에는 적절한 품질을 기대하기 어려울 뿐 아니라 납기 지연의 부담을 감수해야 하는 등 여러 가지 문제 때문에 쉽게 해결하지 못하는 것이 현실이다. 따라서 기계중복을 최대한 억제하는 것은 CMS의 생산성 제고와 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다.

부품을 한 기계셀 내에서 모두 가공하지 못하는 경우 이 공정을 수행할 수 있는 다른 기계셀로 이동시켜야 하는데 이 때 예외적 요소(Exceptional Elements: EEs)라고 칭하는 부품에 대한 셀간 이동이 발생한다. 셀간 이동수가 많아지는 만큼 생산리드타임이 길어지게 되고 이것은 CMS의 생산성을 저하시키는 직접적인 요인으로 작용하기 때문에 그동안 많은 연구자들의 연구대상이 되어왔다.

부품을 기계셀에 할당할 때 각 부품의 가공순서를 고려하게 되면 이 공정 순서에 따라 셀간 이동수는 달라진다. 즉 첫 공정이나 마지막 공정이 없는 셀간 이동이 한 번으로 끝나지만 그렇지 않은 공정, 즉 첫 공정이나 마지막 공정이 아닌 중간 공정의 경우에는 다른 셀로 이동했다가 다시 원래 셀로 돌아와야 하므로 셀간 이동수는 두 번으로 증가하게 된다. 따라서 동일한 예외적 요소를 제거하는데 있어서도 공정 순서를 고려하면 셀간 이동수의 차이가 생기기 때문에 셀간 이동수를 보다 많이 발생시키는 예외적 요소를 완전히 제거하거나 최소화해야만 전체 시스템의 효율을 높일 수 있다.

본 연구의 목적은 위에 제시한 문제점, 즉 기계중복비용과 기계 가공능력의 제약, 셀 내에 설치할 수 있는 기계대수의 제약 및 공정순서를 고려하여 이러한 제약들을 만족시키면서 셀간 이동수의 최소화가 가능한 예외적 요소 제거방법을 제시하는 데 있다.

**2. 모형의 개발**

**2.1 기호의 정의**

본 연구에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

$D_{i'c}$  : 부품  $i, i'$ 이 셀  $c$ 에 할당되었을 때 예외적 요소를 제거하기 위해 중복되는 기계대수

$T_{i'c}$  : 부품  $i, i'$ 이 셀  $c$ 에 할당되었을 때 발생하는 셀간 이동수

$MD_i$  : 부품  $i$ 에 의해 발생하는 예외적 요소를 최소의 기계중복으로 제거할 수 있는  $ii'$ 의 조합의 집합

$S$  :  $MD_i$ 의 합집합  
( $S = \{MD_1 \cup MD_2 \dots \cup MD_m\}$ )

$CMD_c$  : 집합  $S$ 에서  $c$ 인 집합

$MinMD_i$  : 부품  $i$ 에 대한 부품 조합에서 기계중복수의 최소값

$C_{ii'}$  : 부품  $i$ 와  $i'$ 이 최소의 예외적 요소 수를 유지하면서 동시에 할당될 수 있는 기계셀들의 집합

$DC_{ic}$  : 기계셀  $c$ 의 부품  $i$ 에 대한 비처리능력

$ES$  : 예외적 요소를 발생시키는 부품의 집합 ( $i = 1, 2, \dots, es$ )

$m_{ii'c}$  : 부품  $i$ 와  $i'$ 이 기계셀  $c$ 에 할당될 때 필요한 기계의 수

$mc_c$  : 기계셀  $c$ 의 기계할당 가능량

$TC_{ii'c}$  : 부품  $i$ 와  $i'$ 이 기계셀  $c$ 에 할당될 때 필요한 기계구입비용

$TC_k$  :  $k$ 단계에서 투입 가능한 총 예산

$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{부품 } i \text{가 공정 } j \text{를 필요로 하는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$

$a_{icj} = \begin{cases} 1, & \text{부품 } i \text{가 셀 } c \text{에 할당 되었을 때} \\ & j \text{공정이 수행될 수 없는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$

$\alpha(a_{icj}, a_{i'cj}) = \begin{cases} 1, & a_{icj}=1, a_{i'cj}=1 \text{ 인 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$

$n_{cj} = \begin{cases} 1, & \text{기계셀 } c \text{가 공정 } j \text{를 수행할 수 있는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$

$\alpha(n_{cj}, a_{ij}) = \begin{cases} 1, & n_{cj} < a_{ij} \text{ 인 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$

$X_{ii'c} = \begin{cases} 1, & \text{부품 } i \text{와 } i' \text{이 셀 } c \text{에 할당되는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$

## 2.2 수식모형 및 알고리즘의 개발

본 연구에서의 예외적 요소의 제거 방법은 기계중복을 가능한한 최소로 하면서 제거되는 셀간 이동수가 최대가 되도록 하는 것이다.

### 2.2.1 비처리 능력과 기계중복대수

앞 절에서 언급한 바와 같이 예외적 요소의 제거를 위한 대부분의 연구에서는, 결정된 셀 형성 결과를 그대로 사용하여 해를 구하고 있다. 일반적으로 셀 형성 방법들은 예외적 요소의 최소화만을 고려하여 해를 도출한다. 이 때 같은 예외적 요소 수를 가지는 여러 개의 대체해가 발생할 수 있다. 따라서 여러 대체해 중 예외적 요소를 제거하는 방법을 적용할 때에는 기계중복을 최소화할 수 있는 셀 형성 결과를 이용하여 예외적 요소를 제거하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 이를 위하여 부품에 대한 기계셀의 비처리능력을 파악한 후, 이를 바탕으로 기계중복대수를 구한다.

기계셀의 부품에 대한 비처리능력은 기계셀이 부품가공에 필요한 공정을 수행하지 못하는 정도를 나타내는 것으로 식 (1)에 의해 산출한다.

$$DC_{ic} = \sum_{j=1}^n \alpha(n_{cj}, a_{ij})$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \quad c = 1, 2, \dots, C \quad (1)$$

기계중복대수는 예외적 요소를 발생시키는 부품에 대해서만 산출하는 것이다. 이것은 두 부품을 한 기계셀에 할당하였을 때 각 기계셀에서 각 부품에 대해 처리할 수 없는 공정을 파악하여, 이들 공정에 의해 중복되는 기계의 대수를 나타내는 것이다.

이 때 두 부품이 할당되는 기계셀은 예외적 요소의 수를 최소로 유지함과 동시에, 두 부품을 할당할 수 있는 기계셀에 대해서만 기계중복대수를 구한다. 이와 함께 두 부품을 할당할 수 있는 기계셀은 부품과 기계셀 간의 비처리능력 행렬로부터 파악한다.

부품간의 기계중복대수는 식 (2)에 의해서 산출한다.

$$D_{ii'} = (DC_{ic} + DC_{i'c}) - S_{ii'c}, i, i' \in ES \quad (2)$$

여기서  $S_{ii'c}$ 는 다음식에 의해 구한다.

$$S_{ii'c} = \sum_{j=1}^n \alpha(a_{icj}, a_{i'cj})$$

### 2.2.2 셀간 이동수

부품이 하나의 기계셀에 할당되어 예외적 요소가 발생할 때, 이로 인한 셀간 이동수는 예외적 요소를 발생시키는 공정의 순서에 따라 달라진다. 예를 들어 어떤 부품가공에 수행되어야 할 공정은 공정 1, 2, 4, 5이고 공정순서는 4→5→1→2라고 하자. 이것을 표로 나타내면 다음과 같다.

	1	2	3	4	5
필요공정	*	*		*	*
가공순서	3	4		1	2

이 경우 공정 2 또는 4, 즉 첫 공정이나 마지막 공정이 예외적 요소를 발생시키는 경우, 이로 인한 셀간 이동수는 각각 1이 된다. 반면에 공정 1 또는 5, 즉 중간 단계에 있는 공정이 예외적 요소를 발생시키는 경우 이로 인한 셀간 이동수는 각각 2가 된다.

이것은 같은 예외적 요소 일지라도 공정의 순서를 고려하게 되면, 실제로 시스템에 미치는 영향은 달라지게 된다는 것을 의미한다.

따라서 예외적 요소를 제거할 때에는 이것을 고려하는 것이 바람직하다. 왜냐하면 여러가지 제약에 의해 발생된 예외적 요소를 모두 제거할 수 없는 경우에는, 시스템에 영향을 크게 미치는 것을 파악하여 이것부터 제거하는 것이 시스템의 효율을 높일 수 있기 때문이다.

### 2.2.3 수식모형

CMS에서 예외적 요소를 모두 제거하는 데에는 공간이나 예산 상의 제약 등 많은 어려움이 있다. 이러한 경우에는 기계중복대수의 최소화만을 고려하여 예외적 요소를 제거하는 것은 바람직하지 않다.

본 연구에서는 CMS 운영에 있어서 시스템의 효율에 가장 큰 영향을 미치는 셀간 이동수와 시스템 설계에 많은 영향을 미치는 기계중복대수를 동시에 고려하는 수식 모형을 제시한다.

예외적 요소를 제거함에 있어 기계중복수의 최소화, 제거해야 할 셀간 이동수의 최대화를 동시에 달성하기 위한 목표계획 모형을 수립하면 [수식모형 I]과 같다.

[수식모형 I]

$$MIN \quad Z_1 = \sum_{i=1}^{es} \sum_{i'=1}^{es} \sum_{c \in C_{ii'}} D_{ii'c} X_{ii'c} \quad (1)$$

$$MAX \quad Z_2 = \sum_{i=1}^{es} \sum_{i'=1}^{es} \sum_{c \in C_{ii'}} T_{ii'c} X_{ii'c} \quad (2)$$

$$s.t. \quad \sum_{c \in C_{ii'}} X_{ii'c} \leq 1, \quad i, i' = 1, 2, \dots, es \quad (3)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{i=i'+1}^{es} X_{ii'c} \leq 1, \quad i=1 \quad (4)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{i=i'+1}^{es} X_{ii'c} + \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^{i'-1} X_{i'ic} \leq 1, \quad i \geq 2 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{es-1} \sum_{i'=i+1}^{es} m_{ii'} \cdot X_{ii'c} \leq mc_c, \quad c=1, 2, \dots, C \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{es-1} \sum_{i'=i+1}^{es} \sum_{c=1}^C TC_{ii'c} \cdot X_{ii'c} \leq TC \quad (7)$$

$$X_{ii'c} = 0 \text{ or } 1, \quad \forall i, i', c \quad (8)$$

이 때 목적  $Z_1$ 의 최적해는 산출된 비처리능력과 기계중복대수에 의해 파악 가능하기 때문에 이를 제약식으로 변환시켜 단일 목적의 정수계획모형을 수립할 수 있다. 왜냐하면 비처리능력 행렬로부터 예외적 요소를 발생시키는 부품을 파악할 수 있고 이를 바탕으로 각 부품쌍별, 기계셀별 기계중복대수를 알아낼 수 있으며, 이에 따라 최소의 기계중복대수를 보장하는 해의 집합을 알 수 있기 때문이다.

제 1 목적의 최적을 보장하는 부품별 할당 가능집합을 산출하는 방법은 다음과 같다.

[최소의 기계중복대수를 보장하는 부품별 할당 가능집합 산출방법]

단계 1 : 모든 부품(예외적 요소를 발생시키는)에 대하여 최소의 예외적 요소수를 유지하면서 할당 가능한 셀별 부품조합, 즉  $IMD_i (i=1, 2, \dots, es)$ 을 모두 산출한다.

단계 2 : 각 부품의 모든 조합에 대하여 기계중복수를 산출한다.

단계 3 :  $IMD_i$ 에서  $MinMD_i (i=1, 2, \dots, es)$ 를 산출한다.

단계 4 :  $IMD_i$ 에서 기계중복수가  $MinMD_i$ 와 같은 조합만을 선택하여  $MD_i$ 를 산출한다. 이 때  $MinMD_i = MinMD_i (i \neq i)$ 인 조합만을 선택한다.

이를 바탕으로 [수식모형 I]을 제거되는 셀간 이동수의 최대화를 목적으로 하는 단일목적 정수계획모형으로 변형하면 [수식모형 II]와 같다.

[수식모형 II]

$$MAX \quad Z_2 = \sum_{i=1}^{es} \sum_{i' \in MD_i} T_{ii'c} X_{ii'c} \quad (2)$$

$$s.t. \quad \sum_{i' \in MD_i} X_{ii'c} \leq 1, \quad i=1, 2, \dots, es \quad (11)$$

$$\sum_{c \in C_{MD_i}} m_{ii'} \cdot X_{ii'c} \leq mc_c, \quad c=1, 2, \dots, C \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{es} \sum_{i' \in MD_i} TC_{ii'c} \cdot X_{ii'c} \leq TC \quad (13)$$

$$X_{ii'c} = 0 \text{ or } 1, \quad \forall i, i', c \quad (14)$$

2.3 알고리즘

수식모형에 의해 산출되는 해는 모형의 특성상 두 가지 고려사항이 있다. 첫째, 본 모형에서는 셀에 할당되는 부품을 한 쌍으로 하였기 때문에 짝수 개의 부품에 대해서만 수식모형으로부터 최적해를 얻을 수 있다. 둘째, 한 셀에 두 개 이상의 부품이 할당되면 먼저 할당되는 부품에 의해 중복되는 기계에 의해서 셀이 수행할 수 있는 공정이 변화되는 상황을 고려할 수 없다는 것이다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 셀의 변화되는 상황을 고려하여 수식모형을 단계적으로 적용하는 방법을 제시하며, 부품의 수가 홀수인 경우 마지막에 남는 하나의 부품을 이에 대응하는 셀의 상황을 고려하여 할당하는 알고리즘을 제시한다.

[알고리즘]

단계 1 : 기계셀-기계 빈도행렬과 부품-기계 빈도행렬에 의해 각 셀의 부품에 대한 비처리능력 행렬을 식 (1)에 의해 작성한다.

단계 2 : 비처리능력 행렬로부터 예외적 요소를 발생시키는 부품을 파악하여 예외적 요소수를 최소로 유지하면서 각 부품을 할당 가능한 셀과 그 셀에서 처리할 수 없는 공정을 파악한다.

단계 3 : 셀별 부품간 기계중복대수와 셀간 이동수를 산출한다.

단계 4 : [최소 기계중복대수를 보장하는 부품별 할당 가능집합 산출방법]을 적용한다.

단계 5 : [수식모형 2]을 적용하여 최적해를 산출한다.

단계 6 : 산출된 해로부터 각 셀에 대해 한 개의 부품쌍만을 할당한다. 만약 할당 가능한 부품쌍이 한 개 이상이면 중복해야 할 기계수가 적은 것을 선택한다. 할당해야 할 부품이 1 개 이하이면 단계 8로 간다.

단계 7 : 할당된 부품에 의해 필요로 하는 기계를 추가시키고, 추가된 기계를 바탕으로 기계셀-기계 빈도행렬을 수정하여 비처리능력 행렬을 재작성한 후 단계 2로 간다.

단계 8 : 할당해야 할 부품이 없으면 알고리즘을 종료한다. 그렇지 않으면 할당된 부품에 의해 필요로 하는 기계를 추가시키고, 추가된 기계를 바탕으로 기계셀-기계 빈도행렬을 수정하여 비처리능력 행렬을 재작성한 후, 비처리능력이 최소가 되는 셀에 부품을 할당하고 알고리즘을 종료한다.

3. 수치 예제

2장에서 개발한 알고리즘을 적용하기 위하여 다음과 같은 예제를 제시하였다. 즉 23가지 부품을 5개의 기계셀에서 가공하는 상황에 대해 기계셀-기계 빈도행렬을 표 1에 제시하였다. 또 부품-기계 빈도행렬은 표 2에 나타내었고, 표 3은 각 기계를 투입(중복)하는데 소요되는 비용을 나타내었으며, 이 예제에서 기계 구입에 소요가능한 예산은 1,200만원이다.

알고리즘을 적용하는 과정은 다음과 같다.

표 1. 기계셀-기계 빈도행렬(1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	가용 공간
셀1	1	1		1		1		1		1		1		1		3
셀2	1	1		1		1	1	1		1	1			1		3
셀3	1		1	1		1		1	1			1	1			3
셀4	1	1	1		1	1	1	1		1	1			1	1	3
셀5	1		1		1	1		1	1	1		1		1		3

표 2. 부품-기계 빈도행렬(각 숫자는 공정순서를 나타냄)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P1		3	2		7		5		1		4				6
P2	5	4		1		2				3		7		6	
P3			1	6			3	5	2		8		4		7
P4	3		2			5				1	6		4		
P5				1		5	2		4	7		3		6	
P6		7			2		4	5			6	3			1
P7	2	3	8			7		4		5			1		6
P8				6	4		3	1		2		7			5
P9		6		5		2		3		1		4			
P10					2		4	1	5		3	6			
P11				1			6		5	4			2	3	
P12	2					3		1			7	6		4	5
P13	4			6					5		3			2	1
P14		6					5			1	3		2		4
P15					1		3	4			6	5			2
P16	6		5				2		4		1				3
P17		5		1					3	6				2	4
P18	5				7	1			6				2	3	4
P19			6	4		7				5	3		1		2
P20		6					4		1		5		3	2	7
P21			5	2	7	8		4	1	3		6			
P22	2	1		7		6		4		5					3
P23	6	7			8	5		4			2		3		1

표 3. 기계구입비용

단위 : 십만원

기계	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
비용	10	15	20	17	9	11	12	18	16	15	13	14	23	19	12

표 4. 총 부품 할당결과

	수행할 수 있는 공정		부품과 필요로 하는 공정
기계 셀1	1,2,4,6,8,10,12,14 DM : -	부품 군1	부품 2, 9, 22, 5, 8 1,2,4,6,8,10,12,14
기계 셀2	2,3,5,7,8,9,11,12,15 DM : -	부품 군2	부품 1, 6, 10, 3, 20 2,3,5,7,8,9,11,12,15
기계 셀3	2,4,5,7,9,10,13,14 DM : -	부품 군3	부품 11, 17 2,4,5,7,9,10,13,14
기계 셀4	1,3,4,6,8,9,11,12,14,15 DM : 5,10,13	부품 군4	부품 12, 13, 15, 18, 21 1,3,4,5,6,8,9,10,11,12,13,14,15
기계 셀5	1,3,6,7,9,10,11,13,15 DM : 2,4,14	부품 군5	부품 4, 14, 16, 19, 20, 7, 23 1,2,3,4,6,7,9,10,11,13,14,15

4. 결론

본 연구에서는 CMS를 효율적으로 운영하기 위한 방법으로 예외적 요소를 파악하여 이를 최대한 줄이는 동시에, 공정순서에 따라 다르게 발생하는 셀간 이동수를 최소화하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 셀 내에 설치할 수 있는 기계대수의 제약과 기계구입에 투입가능한 예산의 제약을 만족하는 최소 기계중복대수 및 셀간 이동수를 구하는 알고리즘을 개발하였다. 특히 본 연구에서는 셀형성 과정에서 발생하는 여러 대체해를 함께 고려하여, 이 가운데 가장 좋은 해를 구하는 알고리즘을 개발했는데, 이것은 부품가공을 위한 공정순서를 고려하므로써 발생하는 셀간 이동수와 예외적 요소 간의 상관 관계를 파악하여, 동일한 예외적 요소를 지니는 부품이라 하더라도 공정순서에 따라 셀간 이동수가 달라지는 점에 주목하여 시스템의 효율에 보다 많은 영향을 미치는 예외적 요소를 우선적으로 제거하는 수식모형과 발견적 알고리즘을 개발하였다.

본 연구에서 제시한 수식모형과 알고리즘을 수치 예제에 적용한 결과, 제거해야 할 전체 셀간 이동수는 21이며 이를 위해 투입할 수 있는 총 기계구입비용은 1,200만원인 문제 상황에서, 980만원의 기계구입비용을 투입하여 모두 15개의 셀간 이동을 제거할 수 있었다. 이것은 비록 셀간 이동수를 모두 제거하지 못하는 상황이라 하더라도, 제한된 예산과 셀 내 설치가능한 기계대수 제약을 만족하면서 셀간 이동수를 가능한 한 많이 제거하는 방법으로서, CMS 운영자로 하여금 보다 현실적인 의사결정을 하는데 효과가 있다는 것을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

[1] N. E. Dahel And S. B. Smith, "Designing Flexibility into Cellular Manufacturing System", International Journal of Production Research, 1993, Vol. 31, No. 4, 933-945.  
 [2] Gary M. Kern And Jerry C. Wei, "The Cost of Eliminating Exceptional Elements in Group Technology Cell Formation", International Journal of Production Research, 1991, Vol. 29, No. 8, 1535-1547.  
 [3] Seifoddini H., Wolfe, "Application of the Similarity Coefficient Method in Group Technology", IIE Transactions, 1986, September, 271-277  
 [4] Seifoddini H., "Duplication Process in Machine Cells Formation in Group Technology", IIE Transactions, 1989, Vol. 21, NO. 4, 382-388  
 [5] Scott M. Shafer, Gary M. Kern And Jerry C. Wei, "A Mathematical Programming Approach for Dealing with Exceptional Elements in Cellular Manufacturing", International Journal of Production Research, 1992, Vol. 30, No. 5, 1029-1036.