

예외적 요소와 셀간 이동거리를 최소화할 수 있는 셀 형성과 셀 배치결정 모형 An Integrated Model of Cell Formation and Cell Layout for Minimizing Exceptional Elements and Intercell Moving Distance

윤창원, 정병희

崇實大學校 産業工學科(서울시 동작구 상도 5동 1-1)

ABSTRACT

In general, cellular manufacturing system can be constructed by the following two steps. The first step forms machine cells and part families, and the second step determines cell layout based on the result of first step. Cell layout has to be considered when cell is formed because the result of cell formation affects it. This paper presents a cell formation algorithm and proposes an integrated mathematical model for cell formation and cell layout. The cell formation algorithm minimizes the number of exceptional element in cellular manufacturing system. New concept for similarity and incapability is introduced, based on machine-operation incidence matrix and part-operation incidence matrix. One is similarity between the machines, the other is similarity between preliminary machine cells and machines. The incapability identifies relations between machine cells and parts. In this procedure, only parts without an exceptional element are assigned to machine cell. Bottleneck parts are considered with cell layout design in an integrated mathematical model. The integrated mathematical model determines cell layout and assigns bottleneck parts to minimize the number of exceptional element and intercell moving distance, based on linearized 0-1 integer programming.

The proposed algorithm is illustrated by using numerical examples.

1. 서론

셀화 제조시스템에서, 셀 형성결과는 기계셀의 배치에 많은 영향을 미치므로 셀 형성시 이를 충분히 고려하여야 한다. 지금까지 대부분의 연구들은 셀 형성과 기계셀 배치를 독립적으로 결정함으로써 이와 같은 상황을 반영하는 데 미흡하였다. 본 연구에서는 먼저 예외적 요소의 최소화를 위해 공정 중심의 유사도 계수와 Hungarian Method를 사용하는 셀 형성 알고리즘을 개발한다. 기계셀의 배치를 결정할 때는 이에 영향을 미치는 부품만을 고려하여 부품군과 기계셀의 배치를 동시에 결정할 수 있는 비선형 정수계획모형의 수립후, 모형의 특성을 이용하여 계산 효율을 높일 수 있는 선형화된 혼합 정수계획모형을 개발한다.

2. 셀 형성 모형과 셀 배치 결정모형

2.1 가정

본 연구는 다음과 같은 가정 하에 진행되었다.

- (1) 기술적 제약에 의한 공정할당은 사전결정
- (2) 각 부품은 한개 이상의 공정 수행을 필요
- (3) 각 기계는 복수공정의 수행가능
- (4) 모든 공정을 수행가능한 기계는 없음
- (5) 기계셀은 한대 이상의 기계로 구성

2.2 유사도 계수의 개발과 셀의 형성

기계셀은 수행 가능한 공정의 수가 최대가 되도록 형성한다. 부품군의 형성은 기계셀의 부품에 대한 비처리능력지수가 최소가 되도록 부품을 기계셀에 할당한다.

2.2.1 유사도 계수

기계-부품 빈도 행렬 대신에 예외적 요소의 발생가능성을 최소화하는데 적합한 공정 중심의 기계간 유사도를 산출하기 위하여 기계-공정 빈도 행렬을 사용한다. 기계간 유사도 계수는 개별 기계간 과 예비셀과 기계간 유사도를 파악하는 두 가지로 분류된다. 식 (1)로 표현되는 기계간 유사도는 두 기계가 동일 기계셀에 배치될 때 수행 가능한 공정수를 의미하며, 이를 최대로 하면 예외적 요소의 발생 가능성이 최소화된다.

$$S_{kk'} = \sum_{j=1}^n \delta(a_{kj}, a_{k'j}), \quad k=1, 2, \dots, l-1, \quad (1)$$

$$k' = k+1, k+2, \dots, l$$

한대 이상의 기계가 포함되어 있는 예비셀은 배치되어 있는 기계들 전체가 수행할 수 있는 공정과 특정 기계가 수행가능한 공정들을 파악하여 유사도를 산출한다. 예비셀과 기계간 유사도는 기계가 할당되었을 때 추가로 수행할 수 있는 공정 수를 나타내는 것으로 식 (2)와 같다.

$$CS_{c,k} = \sum_{j=1}^n \beta(n_{cj}, a_{kj}), \quad c=1, 2, \dots, C, \quad k \in V_c \quad (2)$$

2.2.2 기계셀의 형성

한 셀이 수행 가능한 공정 수에 기초한 기계간 유사도를 최대화하기 위해 Hungarian Method를 다음과 같이 적용한다. 먼저, 예비셀의 형성을 위해 각 기계간 유사도의 합을 최대로 하는 기계쌍을 Hungarian Method에 의해 구한 후, 정해진 셀 수 C를 기준으로 예비셀을 형성한다. 이 단계는 기계를 할당해야할 셀이 형성되기 전이므로 l대 기계를 l대의 장소(기계)에 할당하는 것과 같은 l개의 기계쌍이 만들어진다. 수행할 수 있는 공정이 많은 순서로 C개의 기계쌍을 선택한다. 다음은, 이미 형성된 예비셀과 남아있는 기계간 유사도를 최대로 하는 완전한 기계셀을 순차적으로 형성한다. 이 때는 예비셀이 형성되어 있으므로 l-2C대의 기계를 C개의 예비셀에 할당한다.

2.2.3 부품군의 형성

부품군을 형성하기 위해 부품-공정 빈도 행렬과 기계셀-공정 빈도 행렬을 사용하여 부품과 기계셀간 비처리능력지수를 산출한다. 비처리능력지수는 기계셀이 할당대상이 되는 부품이 필요로 하는 공정을 몇 개나 수행할 수 없는가를 나타내는 것으로 식 (3)에 의해 산출한다.

$$DC_{ic} = \sum_{j=1}^n a(n_{cj}, a_{ij}), \quad i=1,2,\dots,m, \quad (3)$$

부품군의 형성시 부품과 기계셀간의 비처리능력지수가 최소가 되도록 부품을 기계셀에 할당하므로 기계셀이 수행 가능한 공정 수를 최대화하여 예외적 요소의 발생가능성을 최소화한다. 만약 부품 i 가 모든 기계셀에 대하여 $DC_{ic} > 0$ 이면, 부품 i 는 어떤 기계셀에서도 완전히 가공될 수 없으므로 예외적 요소를 발생시킨다. 예외적 요소의 존재 유무는 식 (4)로부터 확인할 수 있다.

$$DC_{ic} > 0, \quad \forall c \text{ 인 부품 } i \text{ 가 존재} \quad (4)$$

2.3 셀 형성 알고리즘

먼저, Hungarian Method를 이용하여 기계셀과 부품군을 형성한다. 예외적 요소를 발생시키는 부품들은 기계셀 배치와 동시에 기계셀에 할당할 수 있도록 제외한다.

알고리즘

단계 1 : 기계-공정 빈도 행렬로부터 기계간 유사도 행렬을 작성한다.

단계 2 : 기계간 유사도 행렬에 Hungarian Method를 적용하여 기계쌍을 구한 후 기계간 유사도가 최대가 되는 C개의 기계쌍을 예비셀로 정한다.

단계 3 : 예비셀과 할당되지 않은 기계간의 유사도를 산출하여 예비셀-기계 유사도 행렬을 작성한다.

단계 4 : 단계 3에서 작성된 유사도 행렬을 이용하여 예비셀에 기계를 할당한다. 더이상 할당할 기계가 없으면 단계 5로 가고 그렇지 않으면 단계 3으로 간다.

단계 5 : 기계셀의 부품에 대한 비처리능력지수를 산출하여 부품-기계셀 비처리능력 행렬을 작성한다. 각 부품에 대하여 식 (4)에 의해서 예외적 요소의 발생 유무를 파악한다. 예외적 요소를 발생시키는 부품은 비처리능력 행렬에서 제외시킨다.

단계 6 : 단계 5에서 작성된 행렬에 Hungarian Method를 적용하여 각 기계셀에 부품을 할당한 후 할당된 부품을 행렬에서 제거한다. 더이상 할당할 부품이 없으면 단계 7로 가고, 그렇지 않으면 단계 6을 반복한다.

단계 7 : 만약 단계 6에서 예외적 요소를 발생시키는 부품이 존재하지 않으면 알고리즘을 종료, 아니면 예외적 요소가 발생하지 않는 기계셀로 이동시킨다.

2.4 셀 배치 결정 모형

예외적 요소가 존재하면 셀간 흐름이 발생하여 셀의 배치를 결정할 때 영향을 미친다. 예외적 요소를 갖는 부품들의 할당과 기계셀의 배치는 상호 연관성을 갖고 있으므로 이를 동시에 고려할 수 있어야 한다. 예를 들어, 표 1은 기계셀이 형성된 후 각 부품이 기계셀에 할당됐을 때 할당된 기계셀에서 처리할 수 없는 공정 수(예외적 요소의 수)를 나타낸다.

표 1. 비처리능력 행렬

	부품 1	부품 2	부품 3
기계셀 1	1	3	4
기계셀 2	1	2	5
기계셀 3	1	3	4
기계셀 4	1	2	6
기계셀 5	2	2	4

부품 1은 기계셀 1, 2, 3, 4, 5 어느 기계셀에 할당해도 예외적 요소가 존재한다. 이때는 기계셀 배치시 셀간 이동거리를 최소화하는 기계셀에 부품을 할당한다. 셀 배치 결정 모형은 기계셀이 형성된 후 예외적 요소를 갖는 부품들에 대한 부품군의 형성과 기계셀의 배치를 동시에 결정한다. 셀간 이동수와 부품의 셀간 이동거리를 동시에 최소화하는 수식모형은 다음과 같다.

[수식모형 I]

$$\text{MIN} \sum_{c=1}^{C-1} \sum_{c^1=c+1}^C F_{cc^1} \cdot (X_{cc^1}^+ + X_{cc^1}^- + Y_{cc^1}^+ + Y_{cc^1}^-) \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \sum_{c=1}^C X_{icl} = 1, \quad i \in M_e, \quad l=1,2,\dots,L_i \quad (6)$$

$$X_{icl} \leq P_{icl}, \quad i \in M_e, \quad c=1,2,\dots,C, \quad l=1,2,\dots,L_i \quad (7)$$

$$X_{icl} \leq \sum_{c=1}^C X_{ic, l-1}, \quad i \in M_e, \quad c=1,2,\dots,C, \quad l=1,2,\dots,L_i \quad (8)$$

$$F1_{cc^1} = \sum_{i \in M_e} \sum_{l=2}^{L_i} (X_{icl} \cdot X_{ic^1, l-1}), \quad c=1,2,\dots,C, \quad c^1 \neq c \quad (9)$$

$$F2_{cc^1} = \sum_{i \in M_e} \sum_{l=2}^{L_i} (X_{ic^1 l} \cdot X_{ic, l-1}), \quad c=1,2,\dots,C, \quad c^1 \neq c \quad (10)$$

$$F_{cc^1} = F1_{cc^1} + F2_{cc^1}, \quad c=1,2,\dots,C, \quad c^1 \neq c \quad (11)$$

$$X_c - X_{c^1} + M(p_{cc^1} + q_{cc^1}) \geq 1/2(l_c + l_{c^1}), \quad c=1,2,\dots,C-1, \quad c^1 = c+1, c+2, \dots, C \quad (12)$$

$$-X_c + X_{c^1} + M(p_{cc^1} + q_{cc^1}) \geq 1/2(l_c + l_{c^1}), \quad c=1,2,\dots,C-1, \quad c^1 = c+1, c+2, \dots, C \quad (13)$$

$$Y_c - Y_{c^1} + M(1 - p_{cc^1}) + Mq_{cc^1} \geq 1/2(b_c + b_{c^1}), \quad c=1,2,\dots,C-1, \quad c^1 = c+1, c+2, \dots, C \quad (14)$$

$$-Y_c + Y_{c^1} + M(1 - p_{cc^1}) + M(1 - q_{cc^1}) \geq 1/2(b_c + b_{c^1}), \quad c=1,2,\dots,C-1, \quad c^1 = c+1, c+2, \dots, C \quad (15)$$

$$(X_c - X_{c^1}) = X_{cc^1}^+ - X_{cc^1}^-, \quad c=1,2,\dots,C-1, \quad c^1 = c+1, c+2, \dots, C \quad (16)$$

$$(Y_c - Y_{c^1}) = Y_{cc^1}^+ - Y_{cc^1}^-, \quad c=1,2,\dots,C-1, \quad c^1 = c+1, c+2, \dots, C \quad (17)$$

$$X_{cc^1}^+, X_{cc^1}^-, Y_{cc^1}^+, Y_{cc^1}^- \geq 0, \quad c=1,2,\dots,C-1, \quad c^1 = c+1, c+2, \dots, C \quad (18)$$

$$p_{cc^1}, q_{cc^1} = 0, 1 \quad (19)$$

$$X_{icl} = 0, 1 \quad (20)$$

위 모형은 비선형 혼합정수계획모형으로써 목적함수와 제약식에 모두 2차식이 포함되어 있다. 수식모형 I을 그대로 이용하여 최적해를 구하는 것은 계산 효율이 문제가 되므로 Oral과 Kettani[11]의 선형화 과정을 이용하여 최적해를 구한다.

2.4.1 비선형 혼합정수계획모형의 선형화

Oral과 Kettani[11]의 선형화 과정은 목적함수식에 2차식이 포함되어있고, 제약식은 모두 1차식

일 경우에 적용 가능하다. 먼저, 비선형 제약식을 선형화하면 다음과 같다.

[수식모형 II]

$$MIN \sum_{c=1}^{C-1} \sum_{c^1=c+1}^C F_{cc^1} \cdot (X_{cc^1}^+ + X_{cc^1}^- + Y_{cc^1}^+ + Y_{cc^1}^-) \quad (5)$$

$$s.t. \sum_{\alpha \in S_1(i)} X_{\alpha c} = 1 \quad \forall i \in E(i) \quad (21)$$

$$\sum_{c' \in S_2(i)} X_{\alpha c'} = X_{\alpha c} \quad \forall i \in E(i), \alpha \in S_1(i) \quad (22)$$

$$c' \in S_2(i) \quad X_{\beta c' c''} = X_{\beta c c'}, \quad \forall i \in E(i), c' \in S_2(i), \alpha \in S_1(i) \quad (23)$$

$$F_{cc^1} = \sum_{i=1}^m X_{ifcc^1} + \sum_{i=1}^m X_{ifc^1c}, \quad f=2,3 \quad (24)$$

$$c=1,2,\dots,C-1, \quad c^1=c+1,c+2,\dots,C$$

$$X_{\alpha c}, X_{\beta c c'}, X_{\beta c' c''} = 0,1 \quad (25)$$

식(12),(13),(14),(15),(16),(17),(18),(19)

목적함수의 F_{cc^1} 를 0-1 정수형 변수의 선형조합으로 나타내면 다음과 같다[4].

$$F_{cc^1} = 1F_{cc^1} + 2F_{cc^2} + \dots + U \times F_{cc^U}$$

$$F_{cc^1} + F_{cc^2} + \dots + F_{cc^U} \leq 1$$

F_{cc^u} 와 선형조합식을 모형 II에 추가하여 다음과 같은 이차 0-1 정수계획모형이 된다.

[수식모형 III]

$$MIN \sum_{c=1}^{C-1} \sum_{c^1=c+1}^C \left(\sum_{u=1}^U u \times F_{cc^u} \right) \cdot (X_{cc^1}^+ + X_{cc^1}^- + Y_{cc^1}^+ + Y_{cc^1}^-) \quad (26)$$

$$s.t. \sum_{u=1}^U u \times F_{cc^u} = \sum_{i=1}^m X_{ifcc^1} + \sum_{i=1}^m X_{ifc^1c}$$

$$c=1,2,\dots,C-1, f=2,3 \quad (27)$$

$$c^1=c+1,c+2,\dots,C$$

$$F_{cc^1} + F_{cc^2} + \dots + F_{cc^U} \leq 1, \quad (28)$$

$$c=1,2,\dots,C-1, \quad c^1=c+1,c+2,\dots,C$$

식(12),(13),(14),(15),(16),(17),(18),(19),(21),(22), (23),(24),(25)

Oral과 Kettani[11]의 선형화 과정을 적용하면 다음과 같은 0-1 정수계획모형으로 변환된다.

[수식모형 IV]

$$MIN \sum_{c=1}^{C-1} \sum_{c^1=c+1}^C \sum_{u=1}^U (u \times D_{cc^1}^- \times F_{cc^u} + \zeta_{cc^u})$$

$$s.t. \text{식(12),(13),(14),(15),(16),(17),(18),(19), (21),(22),(23),(24),(25),(27),(28)}$$

$$\zeta_{cc^u} \geq (X_{cc^1}^+ + X_{cc^1}^- + Y_{cc^1}^+ + Y_{cc^1}^-) - D_{cc^1}^- \times$$

$$F_{cc^u} - D_{cc^1}^+(1 - F_{cc^u})$$

$$u=1,2,\dots,U, c=1,2,\dots,C-1$$

$$c^1=c+1,c+2,\dots,C$$

2.4.1 부품할당 및 셀 배치 알고리즘

셀 형성 알고리즘에서 파악된 예외적 부품과 기계셀을 바탕으로 셀을 배치하는 알고리즘은 다음과 같다.

알고리즘

단계 1 : 셀 형성과정에서 파악한 예외적 요소를 발생시키는 부품들의 비처리능력행렬을 작성한다.

단계 2 : 작성된 행렬로부터 각 부품에 대한 예외적 요소를 최소로 하면서 할당 가능한 기계셀을 파악한다. (1차 할당가능셀, 2차 할당가능셀, ...)

단계 3 : 각 기계셀의 크기를 결정한다.

단계 4 : 수식모형 IV를 사용하여 최종 셀 형성과 셀 배치를 결정한다.

3. 적용 예

22종류의 부품과 13대의 기계에 대한 부품-공정, 기계-공정 빈도행렬은 각각 표2, 3과 같다.

3.1 셀 형성 알고리즘의 적용

셀 형성 알고리즘의 적용결과는 표 4 와 같다.

3.2 셀 배치 알고리즘의 적용

셀 배치 알고리즘은 기계셀 배치에 영향을 미치는 예외적 부품들인 1, 6, 14, 16, 22의 셀 할당과 기계셀의 배치를 동시에 결정한다. 적용 결과는 그림 1과 같다

표 2. 기계-공정 빈도 행렬

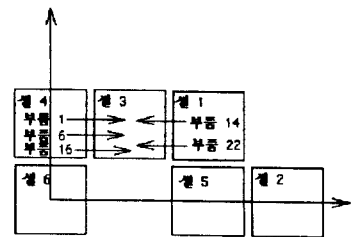
	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12	O13	O14	O15
M1	1	1					1		1			1			1
M2			1		1			1						1	
M3				1			1					1	1		
M4	1	1					1			1				1	
M5			1	1	1			1			1				1
M6	1						1				1			1	
M7			1		1			1							1
M8	1						1	1	1			1			1
M9		1	1	1					1						
M10	1				1	1	1			1		1	1	1	
M11			1						1					1	1
M12			1					1					1		
M13				1			1				1			1	

표 3. 부품-공정 빈도 행렬

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12	O13	O14	O15
P1	1					1							1		1
P2		1				1				1				1	
P3							1					1			
P4	1							1						1	
P5		1	1			1				1		1			
P6				1						1		1			1
P7								1					1		
P8	1		1				1			1					1
P9		1				1		1							1
P10			1						1			1			1
P11	1	1		1									1		
P12									1	1		1			1
P13														1	
P14	1	1	1			1									
P15			1				1					1			1
P16		1		1						1	1		1		
P17				1											1
P18							1	1				1			1
P19	1	1											1		1
P20				1									1		1
P21	1								1						
P22		1		1						1		1	1	1	

표 4. 기계셀 및 부품군 형성표

	소속기계	대응하는 부품군
기계셀 1	1,2	부품 9, 2, 19, 13
기계셀 2	4,5	부품 5, 4, 17
기계셀 3	6,12	부품 21, 3
기계셀 4	8,9	부품 11, 7, 18, 20
기계셀 5	3,7,13	부품 15, 10
기계셀 6	10,11	부품 12, 8



[그림 1] 최적 기계셀 배치 결과(1)

3.3 결과의 분석

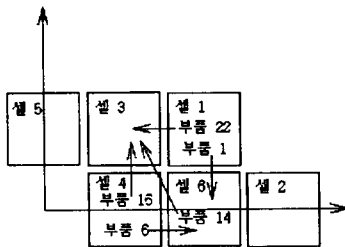
본 연구에서 제시한 알고리즘과 Kusiak[15] 모형을 비교하기 위해, Kusiak 모형에서는 기계셀간 흐름이 결정되어 있는 상황에서 셀 배치를 결정한

다. 본 연구의 예제에 Kusiak 모형을 적용하기 위해서는 예외적 요소를 발생시키는 부품들도 기계셀에 전부 할당하여 기계셀간 흐름량을 구한다. 예외적 요소의 수를 최소로 하는 부품의 할당 결과와 기계셀간 흐름량은 다음과 같다.

	1차할당 기계셀	2차할당 기계셀
부품 1	1	6
부품 8	4	6
부품 14	6	3
부품 16	4	3
부품 22	1	3

기계셀 1--->기계셀 6 흐름량 : 1
 기계셀 4--->기계셀 6 흐름량 : 1
 기계셀 6--->기계셀 3 흐름량 : 1
 기계셀 4--->기계셀 3 흐름량 : 1
 기계셀 1--->기계셀 3 흐름량 : 1

이를 바탕으로 기계셀의 배치를 kusiak 모형으로 구하면 그림 2와 같고 이 때의 목적함수값은 60이다.



[그림 2] kusiak 모형에 의한 셀 형성(1)

그림 2는 셀 배치를 고려하지 않고 예외적 요소를 최소화한 셀 형성을 바탕으로 한 것이기 때문에 셀 배치와 부품 할당을 동시에 고려한 결과인 그림 1보다 독립적인 셀 수가 적다. 그림 1에서는 기계셀 1, 3, 4에서만 셀간 이동이 발생하여 기계셀 2, 5, 6은 완전히 독립적으로 운영할 수 있지만, 그림 2에서는 기계셀 2와 5만 가능하다. 총 이동거리는 60으로 본 연구에서 제시한 방법의 50보다 10만큼 증가하였다.

5. 결론

셀 형성의 결과는 셀 배치에 많은 영향을 미치기 때문에 셀 형성과 셀 배치를 동시에 고려하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 이를 위해 예외적 요소의 최소화에 적합한 기계간 유사도를 파악하는 유사도 계수와 기계셀과 부품간의 관계를 파악하기 위한 비처리능력 지수를 제시하였다. 셀 형성 과정에서는 순차적으로 할당모형을 이용함으로써 문제 크기에 따른 계산 효율상의 제약을 해결할 수 있었으며, 알고리즘의 각 단계별로 기계셀과 부품군의 동적 변화를 반영시킬 수 있었다. 부품할당과 기계셀의 배치를 동시에 결정하기 위한 비선형 정수계획 모형과 선형화 과정을 통해 계산 효율상의 문제를 해결할 수 있었다. 적용예를 통하여 제시한 알고리즘과 수식모형이 예외적 요소의 최소화와 기계셀간 이동거리의 최소화를 달성할 수 있음을 알 수 있었다. P-median 모형, SRINIVASAN의 알고리즘과 본 연구의 알고리즘에 의한 셀 형성결과를 비교한 결과 본 연구에서 제시한 알고리즘이 예외적 요소의 최소화보다 효율적임을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] Afentakis, P., Millen, R. A., and Solomon, M. M., "Dynamic Layout Strategies for Flexible

Manufacturing Systems", INT.J.PROD.RES., 1990, VOL. 28, No.2, pp.311-323.

- [2] Andrew Kusiak, "The Generalized Group Technology Concept", INT.J.PROD.RES., 1987, VOL. 25, NO. 4, 561-569.
- [3] Andrew Kusiak and M. CHO, "Similarity Coefficients Algorithm for Solving the Group Technology Problem", INT.J.PROD.RES., 1992, VOL. 30, NO. 11, 2633-2646.
- [4] FRED GLOVER, "Improved Linear Integer Programming Formulation of Nonlinear Integer Programming", MANAGEMENT SCIENCE Vol. 22, No. 4. December, 1975, 455-460
- [5] G. SRINIVASAN, T. T. NARENDRAN & B. MAHADEVAN, "An Assignment Model for the Part-Families Problem in Group Technology", INT.J.PROD.RES., 1990, VOL. 28, NO. 1, 145-152.
- [6] Heragu, S. S., and Kusiak, A., "Machine Layout Problem in Flexible Manufacturing Systems", Operations Research, 1988, Vol. 36, No.2, 258-268.
- [7] Heragu, S. S., and Kusiak, A., "Efficient Models for the Facility Layout Problem", European Journal of Operational Research, 1991, Vol. 53, No.1 1-13.
- [8] Kouvelis, P., and Chiang, W., "A Simulated Annealing Procedure for Single Row Layout Problems in Flexible Manufacturing Systems", INT.J.PROD.RES., 1992, Vol.30, No.4., 717-732.
- [9] N. E. DAHEL and S. B. SMITH, "Designing Flexibility into Cellular Manufacturing System", INT.J.PROD.RES., 1993, VOL. 31, NO. 4, 933-945.
- [10] O. GEOFFREY OKOGBBA, MING-TE CHEN, CHAWENG CHANGCHIT and RICHARD L. SHELL, "Manufacturing System Cell Formation and Evaluation Using a New Intercell Flow Reduction Heuristic", INT.J.PROD.RES., 1992, VOL. 30, NO.5, 1101-1118.
- [11] Oral, M. and Kettani, O., "A Linearization Procedure for Quadratic and Cubic Mixed-Integer Problems", Operations Research, Vol.40, No.1(1992), S109-116.
- [12] TARUN GUPTA, "Design of Manufacturing Cells for Flexible Environment Considering Alternative Routing", INT.J.PROD.RES., 1993, VOL. 31, NO. 6, 1259-1273.
- [13] TARUN GUPTA and HAMID SELFODDINI, "Production Data Based Similarity Coefficient for Machine-Component Grouping Decisions in the Design of a Cellular Manufacturing System", INT.J.PROD.RES., 1990, VOL. 28, NO. 7, 1247-1269.
- [14] TAJINDER VOHRA, DERSAN CHEN, "A Network Approach to Cell Formation in Cellular Manufacturing", INT.J.PROD.RES., 1990, VOL. 28, 2075-2084.
- [15] Andrew Kusiak, "INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEMS", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 07632.