

Loading and Routing Problems for Schedulability in a Flexible Manufacturing Environment

정 병 희, 송 관 우
 숭실대학교 산업공학과

Abstract

With the advances in concurrent engineering, schedulability has become an important design issue in machine loading and routing procedure. In this paper, four rules to improve schedulability of loading and routing are formulated as a mixed-integer programming model based on machine, routing and tool flexibilities. In this model, these rules are represented as an objective function or constraints. The impact of rules on the quality of schedules for the result of loading and routing is measured with makespan, throughput and average machine utilization.

1. 서론

동시공학의 발전과 함께 제품과 부품의 schedulability는 설계단계에서 매우 중요한 이슈가 되었다. 이는 제품이나 공정의 설계과정에서 고려되어야 할 중요한 요소로써 스케줄링결과에 지대한 영향을 미친다. Kusiak[1]은 schedulability를 향상시키기 위한 다섯가지 설계규칙을 제안하였다. 본 연구는 이들 설계규칙을 유연생산시스템에서 작업할당과 경로선정을 위한 수식모형과 알고리즘을 제시하고있다. Kusiak이 제시한 규칙중 4가지는 유연생산시스템의 장점인 여러 가지 유연성에 기초하여 0-1 혼합정수모형으로 표현될 수 있다. 아래 표 1은 5가지 규칙을 본 연구의 수식모형에서 구현할 수 있는 방법을 보여주고 있다. 이들 방법은 구체적으로 수식모형상에서 목적함수 또는 제약식으로 표현된다.

먼저 유연생산시스템에 대한 공정할당과 경로선정과 관련된 최근의 연구결과를 살펴보면 다음과 같다.

B. K. MODI and K. SHANKER[2]는 연속되는 공정을 동일한 기계에 최대한 할당함으로써 부품이동의 최소화를 달성할 수 있도록 0-1의 2차 수리계획법을 모형화 한 후, Glover와 Woolsey의 방법을 사용하여 선형화 하였다. 하지만 작업부하 균형에 대해서는 효과적으로 고려하지 못하였고, 각 부품은 단일 경로에 의해 처리 되었다.

C. ARBIB, M. LUCERTINI and F. NICOLO[3]는 평균고장시간을 반영한 다항식을 사용하여 작업부하균형을 만족하는 생산 경로와 부품 투입량을 결정할 수 있었다. 그러나 부품 이동의 최소화를 효과적으로 달성하지 못하였다.

Kusiak 모형	본 연구의 방법
부품 처리 경로상의 기계대수를 최소화	부품 이동의 최소화
GT cell 형성	시스템환경상 고려하지 않음
병렬 설계 (동일 기계의 수 최대화와 부품 공정의 병렬처리)	설계 단계시 고려 (모든 부품에 대하여 병렬 처리 가능)
동일기계로 처리 가능한 배치의 수를 최대화 (배치 분할 효과)	기계유연성에 기초하여 다수의 생산경로를 형성하므로써 배치 분할과 공정 분할의 달성
대체 기계의 수를 최대화 (공정 분할 효과)	

[표 1] FMS환경에서 설계규칙의 고려방법

MING LIANG 과 S. P. DUTTA[4]는 전통적인 제조 시스템과 유연생산시스템으로 분할하여 처리하고, 각 시스템 내에서 대체경로를 통한 배치 분할을 가능하게 함으로써 산출물을 향상시킬 수 있었다.

A. GARCIA-DIAZ[5]는 부품 이동의 최소화과 GT cell의 형성으로 20-60%의 조달기간의 감소, 15%의 공간절약, 20-88%의 자재취급비용의 절감효과를 보여주고 있다.

INJAZZ J. CHEN and CHEN-HUA CHUNG[6]는 유연생산시스템의 장점인 유연성을 이용하여 대체경로를 생성하는 0-1 정수계획법으로 모형화 하였다. 그러나 공정 분할을 통한 다수의 생산경로를 고려할 수 없었다. 또한, 작업부하균형을 작업할당 목적으로 고려함으로써 시스템 성능 향상에 매우 중요한 척도임을 보였다.

위에서 살펴본 연구들을 통하여 시스템 성능의 향상은 부분적인 설계규칙의 충족, 부품 이동의 최소화, 작업부하균형의 달성에 기인함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 작업할당과정에서 schedulability를 향상시키기위한 설계규칙과 작업부하균형을 고려할 수 있는 0-1 혼합정수계획모형과 이 모형의 해에 기초한 작업할당 알고리즘, 경로선정 알고리즘을 제시한다. 또한, 수치예제를 통하여 개발된 수식모형과 schedulability를 고려하지 않는 모형을 비교, 평가한다.

2. Schedulability를 고려한 수식모형

2.1 작업 할당모형

이 연구에서 고려하고 있는 유연생산시스템

환경은 J. LIU(1996)[10]가 분류한 유연생산시스템의 4가지 종류 중 MMFMS(Multi Machine FMS)로

다음과 같이 묘사할 수 있다. 시스템은 다수의 기계들로 구성되고, 각 기계들은 운반 시스템에 의해 연결되며, 입출력 장치가 있다. 각 기계에는 처리대기 중인 부품에 대한 지역 버퍼가 있다.

2.1.1 가정 및 기호

이 연구는 다음과 같은 가정 하에 진행되었다.

- 같은 종류의 모든 부품들은 같은 공정 순서를 갖는다.
- 하나의 공정은 다수의 기계에 의하여 수행될 수 있다.
- 하나의 기계는 다수의 공정을 수행 한다.
- 기계들은 서로 다른 기술적인 능력을 가지고 있으며 시스템 내에 기술적인 능력이 서로 같은 기계가 여러개 존재할 수 있다.
- 하나의 공정은 여러개의 공구에 의해 수행될 수 있다. 이와 유사하게 하나의 공구는 여러개의 공정을 수행할 수 있다.

이 연구에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

- 첨자 및 모수

- i : 부품, $i = 1, 2, \dots, n$
- j : 공정, $j = 1, 2, \dots, u$
- m : 기계, $m = 1, 2, \dots, k$
- t : 공구의 인덱스
- n_i : 부품 i 의 생산량
- N : 부품의 집합
- O_i : 부품 i 의 공정들의 집합
- M : 기계의 집합
- T : 공구의 집합
- $\phi(i, j)$: 부품 i 의 공정 j 에 대한 인덱스
- $M^{\phi(i, j)}$: 부품 i 의 공정 j 를 처리할 수 있는 기계들의 집합
- $T_m^{\phi(i, j)}$: 부품 i 의 공정 j 를 처리할 수 있는 공구들의 집합
- Q_t : 공구 t 를 사용하는 공정들의 집합
- O_i^- : O_i 에서 마지막 공정을 제외한 집합
- M_{ij}^2 : 부품 i 의 j 번째 공정과 $j+1$ 번째 공정을 모두 처리할 수 있는 기계들의 집합
- t_{ijm} : 부품 i 의 공정 j 를 기계 m 에서 처리시 필요한 시간
- b_m : 기계 m 의 공구 장착함 용량
- c_t : 공구 t 의 중복수
- h_t : 공구 t 가 공구 장착함에서 차지하는 슬롯 수
- ξ : 균형화된 작업부하량
- Z : 임의의 큰 수

- 결정변수

x_{ijm}^t : 공정 j 가 기계 m 에서 공구 t 를 사용하여 처리되는 작업부하비율

x_{ijm} : 공정 j 가 기계 m 에서 처리되는 작업부하비율

$Y_{i(j+1)m}$: 공정 j 와 공정 $j+1$ 을 기계 m 에서 처리할 경우 연속으로 함께 처리 가능한 작업부하비율

$W_{mt} = \begin{cases} 1, & \text{공구 } t \text{가 기계 } m \text{에 장착되는 경우,} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우.} \end{cases}$

2.1.2 수식모형

작업할당 모형은 0-1 혼합정수계획법으로 모형화 된다. 이 단계에서는 schedulability를 향상시키기 위한 네가지 규칙을 목적함수와 제약식으로 표현한다. 이 단계는 어떤 작업에 대하여 어느 기계에서 얼마만큼 수행할 것인가를 결정한다. 결정변수는 작업별 기계별 할당비율로서 실수형 변수를 사용한다. 이 모형의 특징은 실수형 결정변수의 사용으로 schedulability를 고려할 수 있으며, 동시에 시스템 성능에 많은 영향을 미치는 작업부하균형을 고려한다는 것이다. 작업부하균형은 모든 기계에 똑같은 작업량을 할당함으로써 달성할 수 있고, 공정분할과 배치분할 효과 역시 실수형 결정변수를 사용함으로써 가능하다. 유연성에 기초한 schedulability를 반영하지 못한 모형과 비교할 때 0-1변수의 수를 감소시킴으로써 그만큼 복잡도를 감소시킬 수 있다. schedulability를 고려함과 동시에 작업부하 균형을 이루기 위한 목적함수와 여러 가지 제약식들을 다음과 같다.

2.1.2.1 목적함수의 구성 및 선형화

본 연구에서는 schedulability를 향상시키기 위한 설계규칙 중 거쳐야 할 기계대수의 최소화를 작업할당 목적으로 사용한다. 이는 부품이동회수의 최소화와 동일하며, 같은 기계에서 연속처리 가능한 작업부하 비율을 최대화함으로써 달성할 수 있다. 부품이동의 최소화를 목적으로 하는 기존연구와 제시한 모형을 비교하면 다음과 같다.

	기존의 모형 (B. K. MODI, [2])	schedulability를 고려한 부품이동 최소화 방법
방법	연속된 공정을 동일 기계에 함께 할당하는 것을 최대화	연속된 공정을 동일 기계에서 함께 처리 가능한 작업비율의 최대화
구성	0-1 결정변수로 이루어진 2차식	실수형 결정변수로 이루어진 비선형식
선형화	Glover와 Woolsey(1974)의 방법 사용	새로운 변수(연속처리비율)의 도입과 두 개의 제약식 추가

[표 2] 목적함수의 선형화

기존의 연구에서는 0-1변수로 이루어진 2차식을 Glover와 Woolsey(1974)의 방법을 사용하여 선형화 하였다. 하지만 본 연구에서의 결정변수는 schedulability를 고려하기 위한 실수형 변수로서 다음과 같은 방법을 통하여 선형화 하였다.

두 개의 연속된 공정이 동일한 기계에서 처리 가능하다면 각각의 처리 양을 최대화함으로써 부품의 이동을 최소화 할 수 있다. 이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{MAX } f_{ijm} \cdot f_{(j+1)m}$$

윗 식은 새로운 변수(연속처리비율)의 도입과 두

개의 제약식을 추가함으로써 선형화 시킬 수 있다.

$$f_{ijm} \cdot f_{i(j+1)m} \rightarrow Y_{ij(j+1)m}$$

$$f_{ijm} \geq Y_{ij(j+1)m}, \quad f_{i(j+1)m} \geq Y_{ij(j+1)m}$$

2.1.2.3 수식모형

작업할당문제는 다음과 같이 모형화 된다.

$$\max \quad \sum_i \sum_j \sum_m n_i Y_{ij(j+1)m} \quad (1)$$

$$s. t. \quad \sum_{m \in M} x_{ijm} = 1, \quad i \in N, j \in O_i \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_t t_{ijm} (n_i \cdot x_{ijm}) = \xi$$

$$m \in M \quad (3)$$

$$x_{ijm} \geq Y_{ij(j+1)m}$$

$$i \in N, j \in Q, m \in M_{ij}^2 \quad (4)$$

$$x_{i(j+1)m} \geq Y_{ij(j+1)m}$$

$$i \in N, j \in Q, m \in M_{ij}^2 \quad (5)$$

$$x_{ijm} = \sum_t x_{ijm}^t$$

$$i \in N, j \in O_i, m \in M^{\phi(i,i)} \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ijm}^t \leq ZW_{mt}$$

$$m \in M^{\phi(i,i)}, t \in T_m^{\phi(i,i)} \quad (7)$$

$$\sum_{t \in T} h_t \cdot W_{mt} \leq b_m, \quad m \in M \quad (8)$$

$$\sum_{m \in M} W_{mt} \leq c_t, \quad t \in T \quad (9)$$

$$x_{ijm}^t \geq 0$$

$$i \in N, j \in Q, m \in M, t \in T_m^{\phi(i,i)} \quad (10)$$

$$Y_{ij(j+1)m} \geq 0$$

$$i \in N, j \in Q, m \in M_{ij}^2 \quad (11)$$

$$W_{mt} \in \{0, 1\}, \quad m \in M, t \in T \quad (12)$$

목적함수(1)은 연속된 공정을 동일 기계에서 처리할 수 있는 작업부하비율을 최대화하는 것이며, 제약식(2), (3)은 작업부하 균형을 위한 식이고, 제약식(4), (5)는 연속 처리 가능한 작업부하비율은 각 공정이 이 기계에서 처리 가능한 작업부하비율보다 클 수 없다는 것이다. 제약식(6)은 어떤 공구를 사용하던 기계에 할당된 작업부하비율과 같아야 함을 의미하고, 제약식(7)은 어떤 공정이 기계에서 처리되기 위해선 이 공정을 처리할 수 있는 공구가 장착되어 있어야 함을 나타낸다. 제약식(8), (9)는 각각 공구 장착함의 제약과 공구 중복수의 제약을 나타낸다. 제약식(10), (11)은 비음조건을 제약식(12)는 정수조건을 나타낸다.

2.2 경로선정 및 작업할당모형의 개선

2.2.1 경로생성문제

작업할당모형의 결과는 한 공정이 다수의 기계에 분할하여 처리되므로 임의의 경로를 선택하게 된다면 작업할당모형의 최적해를 보장하기 어렵다. 따라서 최소비용문제의 단순화된 형태와 작업할당 결과를 이용하여 경로를 생성한다. 이때의 목적함수는 부품이동의 최소화로서 이는 작업할당 문제의 목적함수 값과 일치하게 된다. 제약식은 기계에 투입부하량과 산출량은 기계에 할당된 작업부하량과

같다는 것으로 구성된다. 결국 경로생성문제를 통하여 작업할당문제의 최적해를 보장하게 된다.

2.2.2 경로선정문제 알고리즘

경로생성문제 결과에서 임의의 경로를 통한 어떠한 경로를 선택하더라도 부품이동 회수엔 변함이 없다. 경로선정문제의 결과는 각 부품별 한 개 이상의 가공경로를 통하여 처리됨을 알 수 있고, 이는 schedulability를 고려하기 위한 공정분할과 배치분할 효과라 할 수 있다. 경로선정문제의 알고리즘과 기호는 다음과 같다.

기호

j : 공정(처리단계)의 인덱스 $j = 1, \dots, u$

m : 기계의 인덱스 $m = 1, \dots, |M|$

R_k : 생산 경로 k (기계 순서)

p_{jm} : 공정 j 가 기계 m 에서 처리되는 생산량

e_k : 생산 경로 k 에 투입되는 부품 생산량

$X_{ijm^{j-1}m^j}$: 기계간 흐름량(기계 m^{j-1} 와 m^j 사이의)
(단, m^0 는 시작 노드이다.)

알고리즘

Step 1. 초기화.

m^j : 공정 j 가 처리 가능한 기계;

$R_k = \emptyset$; $j = 1$.

Step 2. 기계 선택.

$m^* = \arg \min_m \{m^j : X_{ijm^{j-1}m^j} > 0\}$.

기계 m^* 를 생산 경로 R_k 에 추가

Step 3. 생산량 할당.

만일 $j < u$, $j = j + 1$ 로 하고 step 2로.

그렇지 않은 경우, 모든 j 와 $m \in R_k$ 에 대

하여; 최소인 $p_{jm} (= e_k)$ 제거,

그리고 $p_{jm} = p_{jm} - e_k$ 갱신.

생산량 e_k 를 경로 R_k 에 할당

만일 $p_{jm} = 0, \forall j, m$, 알고리즘 종료

그렇지 않으면, $k = k + 1$, step 1로.

2.2.2 작업할당모형의 개선

앞절에서는 작업할당, 경로생성, 경로선정까지의 3단계를 통하여 문제를 해결하였으나 작업할당과 경로생성을 동시에 고려함으로써 경로할당, 경로선정, 2단계만을 통하여 문제를 해결할 수 있다. 이는 경로별로 작업을 할당함으로써 가능하다.

2.2.2.1 경로할당

기호 및 결정변수

j : 처리단계(공정) (부품 i 의 공정 $j \rightarrow$ 부품 i 의 처리단계 j)

$X_{ijm^{j-1}m^j}$: 부품 i 의 처리단계 $j-1$ 의 기계와 처리단계 j 의 기계로의 경로에 작업할당 비율

수식모형

$$\min \sum_i \sum_j \sum_{m^j} \sum_{m^{j-1}} n_i X_{ijm^{j-1}m^j}, \quad m^{j-1} \neq m^j \quad (1')$$

subject to

$$\sum_{m^j} \sum_{m^{j-1}} X_{ijm^{j-1}m^j} = 1, \quad i \in N, A_j (j \in O_i) \quad (2')$$

$$\sum_i \sum_j \sum_m t_{ijm} (n_i \cdot X_{ijm^{i-1}m'}) = \zeta, \quad m \in M \quad (3')$$

$$\sum_{m=1}^i X_{ijm^{i-1}m'} - \sum_{m=1}^i X_{i(j+1)m^{i-1}m'+1} = 0$$

$$i \in N, j \in O_i, m \in M^{\phi(i,j)} \quad (4')$$

$$X_{ijm^{i-1}m'} = \sum_{p=1}^{i-1} \sum_{p'} X_{ijm^{i-1}m'}^{p-1p'}$$

$$i \in N, j \in O_i, m \in M^{\phi(i,j)} \quad (5')$$

$$\sum_i \sum_j \sum_m \sum_{p'} X_{ijm^{i-1}m'}^{p-1p'} \leq Z W_{m'p'}$$

$$m \in M^{\phi(i,j)}, t \in T_m^{\phi(i,j)} \quad (6')$$

$$\sum_{t \in T} h_t \cdot W_{mt} \leq b_m, \quad m \in M \quad (7)$$

$$\sum_{m \in M} W_{mt} \leq c_t, \quad t \in T \quad (8)$$

$$X_{ijm^{i-1}m'}^{p-1p'} \geq 0$$

$$i \in N, j \in Q, m \in M, t \in T_m^{\phi(i,j)} \quad (9)$$

$$W_{mt} \in \{0, 1\}, \quad m \in M, t \in T \quad (10)$$

목적함수(1')은 부품이동이 발생하는 경로에 할당되는 작업부하비용을 최소화 하는 것이고, 제약식(2')은 모든 공정은 완전히 처리되어야 함을 나타낸다. 제약식(3')은 작업부하 균형을 나타내고, 제약식(4)는 기계에 투입되는 작업부하비용과 처리되어 나가는 작업부하비용은 같다는 것이다. 제약식(5')는 어떠한 공구를 사용하든 경로에 할당된 작업부하비용과 같다는 것이고, 제약식(6'), (7), (8)은 앞절에서의 작업할당문제에서의 제약식과 동일하다. 경로선정문제 또한 위의 내용과 동일하다.

2.3 배치생산을 위한 스케줄링

유연생산시스템은 균형화 되고 자동화된 대량 생산의 효율성과 작은 규모의 개별 생산방식이 갖는 유연성의 두 가지 장점을 동시에 활용하기 위한 것(Groover and Zimmers 1984)이다. 본 연구에서는 이러한 장점을 이용함과 동시에 고려하고 있는 시스템 환경에 가장 적합한 스케줄링 알고리즘을 개발하였다. 생산은 배치단위이지만 이동은 날개로 이루어지는 유연생산시스템에 적용가능한 스케줄링 알고리즘을 개발하였다. 이는 본 연구에서 제시한 수식모형의 타당성 검증을 위한 하나의 평가도구로 의미가 있다고 하겠다. 유연생산시스템에서는 공구의 교체에 따른 셀업시간은 무시할 정도로 작고, 부품의 교체에 따른 셀업이 전체 셀업 시간에서 많은 비율을 차지한다는 점에 착안하여 이 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘은 한 기계에 어떤 부품이 시작될 경우 이 부품이 속한 배치의 모든 부품의 처리가 완료되기 전에 다른 부품의 간섭을 허용하지 않는 것으로 가정한다.

3. 모형의 분석 및 비교평가

3.1 평가방법 및 평가척도의 선정

본 연구에서 제시한 모형에 대하여 처리시간의 최소화, 부품이동의 최소화, 작업부하균형에 대하여 기존의 schedulability를 고려하지 못한 작업할당 모형과 비교하였다. 본 연구에서는 평가 도구로서 새로이 개발한 스케줄링 알고리즘과 선입선출법을 사용하였고, 총 수행시간, 산출물, 평균기계가동률

의 평가척도를 사용하여 비교하였다.

3.2 문제의 형성

제시한 모형의 타당성 및 수행도를 평가하기 위하여 임의로 생성한 16문제의 수치예제를 통하여 검증하였다. 부품, 기계, 공정의 수는 1~9의 난수를 발생하여 결정하였다. 각 공정의 처리시간은 1~25의 난수를 발생시켜 결정하였고 기계별 편차는 ±2로 하였다.

앞에서 혼합정수계획법으로 모형화된 할당문제는 Extended Lindo5.3을 이용하여 최적해를 구하였다. Schedulability를 고려한 모형은 3~40초, schedulability를 고려하지 못한 모형은 5~36시간 이상의 수행시간을 필요로 하였다.

3.3 평가결과

아래의 표는 schedulability를 고려하지 못한 모형에 대한 상대적인 향상정도(%)를 나타낸 표이다.

평가척도 비교모형	총 수행시간	산출물	평균기계가 동률
TPM	18.94	27.06	38.72
PMM	26.34	38.90	41.26
WB	14.86	20.38	21.78

[표 3] Schedulability를 고려하였을 경우 향상 정도(배치생산 날개이동 적용)

평가척도 비교모형	총 수행시간	산출물	평균기계가 동률
TPM	15.61	19.76	29.24
PMM	24.53	33.73	37.34
WB	12.98	16.31	19.18

[표 3] Schedulability를 고려하였을 경우 향상 정도(선입선출법 적용)

평가척도 비교모형	총 수행시간	산출물	평균기계가 동률
TPM	17.28	23.41	33.98
PMM	25.44	36.32	39.3
WB	13.92	18.35	20.48

[표 5] Schedulability를 고려하였을 경우 두가 스케줄링 방법에 대한 평균적인 향상 정도

※ TPM : Total Processing time Minimization
PMM : Part Movement Minimization
WB : Workload Balancing

위 결과로부터 schedulability를 고려하는 것이 유연생산시스템의 성능에 있어 schedulability를 고려하지 못한 경우보다 우수함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 제품, 부품의 설계단계시 중요 시되고 있는 schedulability를 유연생산시스템의 작업할당과 경로선정단계에서 고려함으로써 보다 효율적으로 유연생산시스템을 운영하기 위한 방법을 제시하였다.

여러 실험 결과를 통하여 schedulability의 고려와 작업부하균형의 달성은 기존의 schedulability를 고려하지 못한 여러 작업할당모형과 비교하여 매우 우수함을 보이고 있다.

Schedulability의 고려는 기존의 할당목적 또는 기타 연구목적들을 모두 포함하고 있으므로 앞으로 유연생산시스템의 설계·운영에 있어 매우 중요하게 이용될 수 있을 것이다.

References

- [1] A. KUSIAK and WEIHUA HE, "Design of components for schedulability", 1992
- [2] B. K. MODI and K. SHANKER, "Model and solution approaches for part movement minimization and load balancing in FMS with machine, tool and process plan flexibilities" INT. J. PROD. RES., 1994, VOL. 33, NO. 7, 1791-1816
- [3] C. ARBIB, "Workload balance and Part-Transfer Minimization in Flexible Manufacturing Systems" INT. J. FMS., 1990, NO. 3, 5-25
- [4] A. GARCIA-DIAZ, "Network flow procedures for the analysis of cellular manufacturing systems" IIE Transactions, 1996, VOL. 28, 333-345
- [5] M. LIANG and S. P. DUTTA, "Combined part selection, load sharing and machine loading problem in hybrid manufacturing systems" INT. J. PROD. RES., 1992, VOL. 30, NO. 10, 2335-2349
- [6] I. CHEN and CHEN-HUA. C., "Effects of loading and routing decisions on performance of flexible manufacturing systems" INT. J. PROD. RES., 1991, VOL. 29, NO. 11, 2209-2225
- [7] YUNG-JUNG CHEN and R. G. ASKIN, "A multiobjective evaluation of flexible manufacturing system loading heuristics" INT. J. PROD. RES., 1990, VOL. 28, NO. 5, 895-911
- [8] Y-D. KIM, "A study on surrogate objectives for loading a certain type of flexible manufacturing systems" INT. J. PROD. RES., 1993, VOL. 31, NO. 2, 381-392
- [9] S. K. MUKHOPADHYAY, SANJAY MIDHA and V. MURLI KRISHNA, "A heuristic procedure for loading problem in flexible manufacturing systems" INT. J. PROD. RES., 1992, VOL. 30, NO. 9, 2213-2228
- [10] J. LIU and B. L. MacCARTHY, "The classification of FMS scheduling problems" INT. J. PROD. RES., 1996, VOL. 34, NO. 3, 647-656
- [11] H. TEMPELMEIER and H. KUHN, "Flexilbe Manufacturing Systems", John Wiley & Sons (1993)
- [12] W. W. LUGGEN, "Flexible Manufacturing Cells and Systems" Prentice Hall (1991)