▩ 연구논문

유연생산시스템의 최적구성 결정†

A Determination on Optimal Configuration of Flexible Manufacturing System

장 진 익*
Chang, Jin Ick
김 원 중**
Kim, Won Joong

Abstract

A design issue for a flexible manufacturing system is to find the number of each resource type which assures a given production ratio with a minimal cost. The FMS is modeled as a closed queueing network with a local buffer of limited capacity. An efficient method to determine this optimal configuration is presented.

The proposed method consists of three steps : 1) determine a lower configuration, 2) derive a heuristic solution, 3) find the optimal solution. The derived heuristic solutions are close to the optimal solution.

1. 서 론

FMS는 제품종류와 수량의 변화에 신속히 대응할 수 있는 유연성, 작업준비시간 단축과 공정대기의 감소로 인한 효율성을 특징으로 하며 다품종 소량생산을 하는 금속가공산업에 널리 이용되고 있다.

경제적 타당성평가에 의하여 FMS 도입이 결정되면 많은 자본투자가 요구되므로 비용을 고려한 효과적인 설계문제와 설치된 고가의 FMS를 최대한으로 이용하기 위한 운영문제가 해결되어야 한다. 설계절차는 부품의 종류·제조방법·요구수량·배치(batch)크기를 결정하는 계획단계, 적합한 FMS 유형 선정·FMS 구성요소를 결정하는 세부설계단계, 통제시스템과 생산시스템의 구현단계가 있다. FMS의 효율적인 운영문제는 생산계획과 일정계획으로 나눌 수 있다.

본 연구는 FMS의 도입 타당성검토 이후부터 운영문제에 이르는 전 과정 중 세부설계단계에서 발생하는 문제인 일정수준 이상의 생산능력을 보장하면서 최소의 구성비용을 가지는 FMS 구성요소를 결정하는 수학적 모델을 개발하는데 있다.

---

* 충청대학 산업정보학과 부교수
** 아주대학교 산업정보시스템공학과 교수

† 이 연구는 2001년도 충청대학 학술연구비 지원을 받아 이루어졌음

FMS의 설계단계에서의 도입목적에 가장 부합한 FMS의 형태결정과 운영단계에서 제시된 생산계획과 일정계획 근거 하에 설비의 효율성을 제고시키기 위해서 필수 불가결한 사항은 FMS의 성능평가이다. 본 연구에서는 폐쇄형 대기행렬네트워크로 모형화한 후 해석적인 방법에 의한 성능평가를 이용한다.

폐쇄형 대기행렬네트워크로 모형화된 FMS의 성능평가 시 기존의 연구들은 각 작업장에 무한 크기의 로컬버퍼를 가정하고 있다. 그렇지만 현실적으로 대부분의 FMS는 제한된 크기의 로컬버퍼를 가진다. 이 경우 버퍼 크기의 제한으로 버퍼에 작업물이 꽉 차있을 경우엔 도착 작업물은 투입이 블로킹되므로 작업물의 투입율과 산출율이 서로 달라진다.

본 연구에서는 일정 수준 이상의 생산능력을 보장하며 전체시스템의 구성비용을 최소화시킬 수 있는 최적 FMS구성을 선택하는 문제로서 제한된 크기의 로컬버퍼를 가질 경우 작업물의 투입이 블로킹되므로 작업물의 투입율과 산출율이 서로 달라지는 경우의 모형을 다룬다. 성능평가방법은 Yao-Buzacott의 알고리즘[1,9,10]을 적용한다.

2. 연구대상 FMS의 최적구성 결정

Yao-Buzacott의 성능평가방법을 이용하여 연구대상 FMS모형에서 최소의 시스템 구성비용으로서 일정수준 이상의 생산능력을 제공하는 FMS의 구성요소를 결정하기로 한다.

FMS 모형에서 자재운반시스템과 작업장 i를 구성하는 기계 한대당 구입비용이 $CS_i(i=1,2,\cdots,M)$ 작업장 i에서의 로컬버퍼 한대당 구입비용이 $CB_i(i=1,2,\cdots,M)$, 시스템내 작업물 한 개당 유지비용이 C_N 이라 할 때 최소의 비용으로 시스템의 단위당 생산량인 출력률이 일정수준 이상이 되게 하는 최적화문제는 다음과 같다.

$$Min \quad Z(\bar{x}) = \sum CS_i \cdot S_i + \sum CB_i \cdot B_i + C_N \cdot N$$

$$S.T. \quad X(\bar{x}) \geq X_p$$

$\bar{s} = (S_0, S_1, \cdots, S_M)$: 각 작업장의 기계댓수를 나타내는 벡타

$\bar{b} = (B_0, B_1, \cdots, B_M)$: 각 작업장의 로컬버퍼를 나타내는 벡타

$\bar{x} = (\bar{s}, \bar{b}, N)$: 정수값을 가지는 결정변수들의 벡타

Z = 전체시스템의 구성비용

$X(\bar{x})$ = 주어진 시스템구성의 출력률

X_p = 요구되는 일정수준의 시스템출력률

최적시스템 구성문제는 제약식이 비선형인 비선형계획 문제로서 결정변수들이 정수값을 갖고 제약식의 출력함수는 반복에 의하여 구해지므로 결정변수들의 함수형태로 쉽게 나타나지 않는다.

이와 같은 최적화문제를 효율적으로 해결하기 위하여

1. 최저구성(Lower Configuration)의 결정
2. 발견적해(Heuristic Solution)의 결정
3. 최적해(Optimal Solution)의 결정

의 3단계로 이루어진 해법절차를 갖는다.

개발된 최적구성결정 절차는 시스템내의 가용한 팔레트수인 N값들에 대하여 1단계에서는 폐쇄형 대기행렬네트워크의 Asymptotic Bound Analysis[4]를 이용하여 결정변수들의 최저한계들로 이루어진 최저구성을 갖는다.

2단계에서는 1단계에서 구한 최저구성을 초기가능해로 하여 요구되는 일정수준 이상의 생산능력 X_p를 최소의 비용으로 하는 발견적 해를 Gradient를 이용하여 구한다. 주어진 시스템 구성 $\bar{x}=(\bar{s},\bar{b},N)$에서 임의의 작업장을 선택하여 기계대수 또는 로컬버퍼를 한 단위 증가시키면 시스템 출력률 $X(\bar{x})$는 증가하게 된다. 그러므로 발견적 해에서는 비용증분당 시스템 출력률 증분이 가장 큰 결정변수를 한 단위씩 증가시키는 과정을 반복하여 발견적해를 결정하게 된다.

3단계에서는 2단계에서 구한 발견적해를 현 최적해로 놓고 시작하여 각 결정변수들을 1단계에서 구한 최저구성에서 체계적으로 증가시키는 Implicit Enumeration Algorithm을 수행하면서 현 최적해를 개선해 나간다. 이 과정에서 시스템 구성비용이 현 최적해보다 작은 경우만 성능평가를 수행하여 최적해 여부를 판단하고 구성비용이 현 최적해 보다 큰 시스템구성들에 대해서는 목적함수를 형성하는 비용함수가 단조증가함수이므로 고려대상에서 제외한다.

2.1 최저구성(Lower Configuration)의 결정

최저구성 $\bar{x}$는 결정변수들의 최저한계(Lower Bound)들로 이루어진다. 즉 최저구성 $\bar{x}$는 임의의 시스템 구성 $\bar{x}'$중에서 어느 한 요소라도 최저구성 $\bar{x}$ 요소보다 작을 경우 즉 $x_i' < x_i$ 이면 $X(\bar{x}') < X_p$가 되는 시스템이다.

각 작업장 앞에 무한 크기의 로컬버퍼를 갖는 폐쇄형 대기행렬네트워크에서 작업시간이 지수분포를 이룰 때의 평균서비스시간을 m_i라 하면 Asymptotic Bound Analysis에 의하면

$$X(\bar{x}) \le Min \frac{S_i}{V_i \cdot m_i} \qquad i=1,2,\cdots,M$$

$$X(\bar{x}) \le \frac{N}{\sum_{i=0}^{M} V_i \cdot m_i}$$

의 관계식들에 의해 출력률의 상한을 구할 수 있다.

그러나 각 작업장 앞에 제한된 크기의 로컬버퍼가 존재할 경우에는 블로킹현상에 의하여 시스템내 각 작업장에서 수행되어야 할 작업구성인 L_i ($i=1,2,\cdots,M$)와 중앙버퍼 내의 동적 작업구성인 r_{0i}는 같지 않게 된다. 따라서 한번 방문당 평균서비스시간과 평균방문횟수의 곱으로 정의되는 작업장 i의 부하는 r_{0i}에 의하여 구해지는 평균방문횟수 V_i가 아니라 작업장i에서 실제 처리되어야 하는 L_i에 의해 구해져야한다.

각 작업장 앞에 제한된 크기의 로컬버퍼가 존재할 경우의 FMS의 결정변수들(S_i, N)의 최저한계들은

$$S_i \ge X_p \cdot (L_i \cdot m_i) \qquad (i=0,1,\cdots,M)$$

$$N \ge X_p \cdot \left(\sum_{i=0}^{M} L_i \cdot m_i\right)$$

로 구해진다.

S_i^b 와 N^b 를 $X_p \cdot (L_i \cdot m_i)$ 와 $X_p \cdot (\sum_{i=0}^{M} L_i \cdot m_i)$ 보다 큰 정수 중 가장 작은 정수값이라 하고 로컬버퍼의 최저한계로는 용량이 0일 경우, 즉 $B_i^b = S_i^b$라 하면 $\bar{x} = (\bar{x}^b, \bar{b}^b, N^b)$는 최저구성이 된다.
어떤 작업장 i의 기계대수 S_i'이 S_i^b보다 작거나 또는 시스템내의 가용한 팔레트 수 N'이 N^b보다 작은 임의의 시스템구성 $\bar{x}'$은 다른 결정변수들이 어떤 값을 갖더라도 요구되는 시스템 출력률 X_p를 얻지 못한다. 따라서 그런 시스템 구성은 최적해를 결정하는 과정에서 제외시킬 수 있다.

2.2 발견적해(Heuristic Solution)

최적해를 결정하는 과정에서 주어진 시스템구성의 성능평가 횟수를 줄여서 최적화문제를 빠르게 해결하기 위해서는 좋은 초기해가 필요하다. 그와 같은 초기해를 얻기 위하여 본 연구에서는 발견적 알고리즘을 개발하였다.

주어진 시스템구성 $\bar{x}$에서 임의의 작업장을 선택하여 기계댓수 또는 로컬버퍼를 한 단위 증가시키면 시스템출력률 $X(\bar{x})$는 증가하게 된다. 그러므로 발견적해에서는 비용 증분당 시스템출력률 증분이 가장 큰 변수를 한 단위씩 증가시키는 방법에 의하여 일정수준 이상의 생산능력 X_p를 최소의 비용으로 제공하는 발견적해를 구하게 된다.

$\bar{u}^i$를 M+1 차원의 단위 벡터라 할 때 고정된 N에 대해 발견적해를 얻는 절차는 다음과 같다.

Step 0 : 최저구성을 초기해로 한다.

발견적해의 시스템구성비용인 Z^h에 매우 큰 수를 할당하고 Step 2로 간다.

Step 1 : 현 시스템구성비용이 Z^h보다 크면 발견적 알고리즘을 종료한다.

Step 2 : 현 시스템구성 $\bar{x}$의 출력률 $X(\bar{x})$가 X_p보다 클 경우에는 현 시스템구성이 발견적해를 제공하며 이 때의 구성비용이 Z^h가 되어 Step 4로 가고,

그렇지 않으면 Step 3으로 간다.

Step 3 : 현 시스템 구성 $\bar{x}$에 대하여 각 작업장의 로컬버퍼를 한 단위 증가시켜

$$\Delta i_0 = Max\ \Delta i\ = Max\ \frac{X(\bar{s}, \bar{b} + \bar{u}^i, N) - X(\bar{s}, \bar{b}, N))}{Z(\bar{s}, \bar{b} + \bar{u}^i, N) - Z(\bar{s}, \bar{b}, N))} \qquad (i = 1, 2, \cdots, M)$$

를 구한다. 계산된 Δi_0가 양수이면 작업장 i의 로컬버퍼를 한 단위 증가시켜 시스템 구성비용을 구한 후 Step 1로 간다.

그렇지 않으면 각 작업장의 로컬버퍼를 아무리 증가시켜도 X_p를 못 얻는 경우이므로 기계대수를 증가시키기 위하여 Step 4로 간다.

Step 4 : 현 시스템구성 $\bar{x}$에 대하여 각 작업장의 기계대수를 한 단위씩 증가시켜

$$\Delta i_0 = Max\ \Delta i\ = Max\ \frac{X(\bar{s} + \bar{u}^i, \bar{b}, N) - X(\bar{s}, \bar{b}, N)}{Z(\bar{s} + \bar{u}^i, \bar{b}, N) - Z(\bar{s}, \bar{b}, N)} \qquad (i = 1, 2, \cdots, M)$$

를 구한다. 작업장 i_0의 기계대수를 한 단위 증가시킨 후 모든 작업장의 로컬버퍼를 최저한계 0으로 놓고 Step 1으로 간다. 만일 Δi_0가 0이면 현재의 시스템내의 작업물 수 N에 대하여는 X_p를 얻을 수 있는 시스템이 존재하지 않는 경우이므로 역시 발견적 알고리즘을 종료한다.

2.3 최적해(Optimal Solution)의 결정

최적해를 얻기 위하여 Implicit Enumeration Algorithm을 이용하였다. 이 알고리즘에서는 최저구성 ($\overline{s}^b$, $\overline{b}^b$, $\overline{N}^b$)를 얻었기 때문에 각 결정변수들을 최저구성요소들 보다 큰 경우에만 고려하면 된다. 즉 각 작업장의 기계대수를 최저구성에서부터 체계적으로 증가시켜가면서 주어진 시스템구성에 대한 최적 로컬버퍼수 B_i들을 결정한다. 앞서 구한 발견적해를 현 최적해 (Z^* , $\overline{x}^*$)로 놓고 알고리즘을 증가시킬 때마다 구성비용을 비교하고 그 비용이 현 최적해보다 작을 경우에만 성능평가를 수행하여 구해진 출력률이 X_p를 넘을 경우에는 그 시스템구성이 새로운 최적해가 경신된다. 구성비용이 현 최적해보다 큰 시스템구성 $\overline{x}$에 대하여 $\overline{x}' \geq \overline{x}$인 모든 시스템구성 $\overline{x}'$ 들은 목적함수를 형성하는 비용이 단조증가함수이므로 고려하지 않는다.

최적해를 제공하는 Implicit Enumeration Algorithm에서는 폐쇄형 대기행렬네트워크의 Asymptotic Bound Analysis를 이용하여 구한 최저구성에서부터 결정변수들을 체계적으로 증가시켜 가면서 시스템 구성비용이 앞서 구한 발견적해에 의한 구성비용보다 작은 구성들에 대해서만 고려를 하기 때문에 작업장 수 M과 시스템 내 가용한 팔레트 수 N이 큰 문제들에 대해서도 최적해를 얻는 것이 가능하다.

그러나 앞서 구한 발견적 해와 Implicit Enumeration Algorithm에 의한 최적해는 시도했던 실험의 모든 경우에 일치하였으므로 작업장의 수 M과 시스템내의 가용한 팔레트 수 N이 커서 최적해를 구하는데 많은 시간이 소요되는 문제에 대해서는 빠른 시간에 구할 수 있는 발견적해를 최적해로 이용하여 최적구성결정에 소요되는 시간을 단축할 수 있다.

3. FMS의 최적구성 적용예제

본 장에서는 여러 가지 경우에 예제로서 본 연구에서 개발된 최적구성결정 알고리즘을 이용하여 최적구성을 결정한다.

[표 1]은 자재운반시스템과 3개의 작업장으로 구성되어 있는 FMS의 예제 입력자료이다. [표 2]는 [표 1]을 입력자료로 하였을 경우의 최적구성결정 알고리즘의 해이다.

[표 1] 예제 FMS의 입력자료

	자재운반시스템	작업장 1	작업장 2	작업장 3
평균 가공시간	2.5	5.0	2.0	3.33
작업장 i에서 처리되는 부품의 비율 L_i	1	1/3	1/3	1/3
기계 1대당 구입비용 CS_i	200	135	60	50
로컬버퍼 1개당 구입비용 CB_i	10	10	10	10

· 재공품 유지비용 C_N =10 · 요구되는 시스템출력률 X_p =3.0

[표 2] 최적구성결정 알고리즘의 해

파레트수		자재운반 시스템	작업장 1	작업장 2	작업장 3	구성비용	주어진 구성의 출력률
최저구성	서버수	4	1	2	1		
	로컬버퍼수	0	0	0	0		
8	서버수	4 / 4	2 / 2	3 / 3	3 / 3	1510	3.01254
	로컬버퍼수	8 / 8	1 / 1	1 / 1	1 / 1		
9	서버수	4 / 4	1 / 1	3 / 3	2 / 2	1385	3.00187
	로컬버퍼수	9 / 9	3 / 3	2 / 2	3 / 3		
10	서버수	4 / 4	1 / 1	3 / 3	2 / 2	1365	3.01701
	로컬버퍼수	10/10	3 / 3	1 / 1	1 / 1		
11	서버수	4 / 4	1 / 1	2 / 2	2 / 2	1345	3.01296
	로컬버퍼수	11/11	3 / 3	3 / 3	2 / 2		
12	서버수	4 / 4	1 / 1	2 / 2	2 / 2	1345	3.00327
	로컬버퍼수	12/12	3 / 3	3 / 3	1 / 1		
13	서버수	4 / 4	1 / 1	2 / 2	2 / 2	1355	3.01225
	로컬버퍼수	13/13	3 / 3	3 / 3	2 / 2		

*· 최적해 / 발견적해

[표 2]에 의하면 최적해와 발견적해가 일치함을 알 수 있다. 그리고 요구되는 일정수준의 시스템 출력률을 최소구성비용으로 제공하는 시스템구성은 파레트 수 N=11 ,N=12 두 가지인데 N=11인 경우의 출력률이 N=12인 경우의 출력률보다 높으므로 N=11인 경우의 구성이 최적구성이 된다.

[표 3]은 같은 예제에서 작업장들의 로컬버퍼 한 개당 구입비용이 동일하게 50인 경우의 최적구성결정 알고리즘의 해이다.

[표 3] 최적구성결정 알고리즘의 해

파레트수		자재운반 시스템	작업장 1	작업장 2	작업장 3	구성비용	주어진 구성의 출력률
최저구성	서버수	4	1	2	1		
	로컬버퍼수	0	0	0	0		
7	요구되는 일정수준의 시스템출력률 X_p =3.0을 얻을 수 없음						
8	서버수	4 / 4	2 / 2	4 / 4	3 / 3	1590	3.01726
	로컬버퍼수	8 / 8	1 / 1	0 / 0	0 / 0		
9	서버수	4 / 4	2 / 2	3 / 3	3 / 3	1540	3.00738
	로컬버퍼수	9 / 9	0 / 0	1 / 1	0 / 0		
10	서버수	4 / 4	2 / 2	3 / 3	2 / 2	1550	3.00337
	로컬버퍼수	10/10	0 / 0	1 / 1	1 / 1		
11	서버수	4 / 4	2 / 2	3 / 3	2 / 2	1560	3.01031
	로컬버퍼수	11/11	0 / 0	1 / 1	1 / 1		

* 최적해 / 발견적해

각 작업장에서 기계대수와 로컬버퍼의 수들의 조합으로 형성되는 수많은 시스템구성들 때문에 full enumeration 에 의한 최적구성결정이 불가능한 경우를 고려해보자.

[표 4]는 자재운반시스템(작업장 0)과 7개의 작업장으로 구성된 FMS의 경우의 예제 입력자료이다. [표 5]는 [표 4]를 입력자료로 하였을 경우 최적구성결정 알고리즘의 해이다.

[표 4] 예제 FMS의 입력자료

	자재운반 시스템	작업장 1	작업장 2	작업장 3	작업장 4	작업장 5	작업장 6	작업장 7
평균서비스율	3.889	2.0	5.0	10.0	2.5	0.5	2.0	3.333
작업장 I에서 처리되는 부품비율 L_i	1	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7
기계 1대 당 구입비용 CS_i	200	150	135	100	90	80	60	50
로컬버퍼 1개 당 구입비용 CB_i	10	10	10	10	10	10	10	10

· 재공품당 유지비용 $C_N = 10$ · 요구되는 시스템출력률 $X_p = 3.0$

[표 5] 최적구성결정 알고리즘의 해

파레트수		자재운반 시스템	작업장 1	작업장 2	작업장 3	작업장 4	작업장 5	작업장 6	작업장 7	구성 비용	주어진 구성의 출력률
최저구성	서버수	6	2	1	1	2	6	2	1		
	로컬버퍼수	0	0	0	0	0	0	0	0		
27											
28	서버수	6 / 6	2 / 2	1 / 1	1 / 1	2 / 2	6 / 6	2 / 2	2 / 2	3115	3.0004
	로컬버퍼수	28/28	3 / 3	3 / 3	3 / 3	3 / 3	4 / 4	4 / 4	2 / 2		
29	서버수	6 / 6	2 / 2	1 / 1	1 / 1	2 / 2	6 / 6	2 / 2	2 / 2	3115	3.0065
	로컬버퍼수	29/29	3 / 3	4 / 4	2 / 2	3 / 3	4 / 4	3 / 3	2 / 2		
30	서버수	6 / 6	2 / 2	1 / 1	1 / 1	2 / 2	6 / 6	2 / 2	2 / 2	3125	3.0128
	로컬버퍼수	30/30	3 / 3	4 / 4	2 / 2	3 / 3	4 / 4	3 / 3	2 / 2		
31	서버수	6 / 6	2 / 2	1 / 1	1 / 1	2 / 2	6 / 6	2 / 2	2 / 2	3125	3.0061
	로컬버퍼수	31/31	3 / 3	3 / 3	2 / 2	3 / 3	4 / 4	3 / 3	2 / 2		
32	서버수	6 / 6	2 / 2	1 / 1	1 / 1	2 / 2	6 / 6	2 / 2	2 / 2	3135	3.0076
	로컬버퍼수	32/32	3 / 3	3 / 3	2 / 2	3 / 3	4 / 4	3 / 3	2 / 2		

* 최적해 / 발견적 해

본 장의 모든 적용예제에서 Gradient를 이용하여 구한 모든 발견적해는 최적해와 일치한다.

4. 결 론

본 연구에서는 각 작업장 앞에 제한된 크기의 로컬버퍼가 존재하는 현실적인 FMS 모형에서 최소의 시스템 구성비용을 투자하여 일정수준 이상의 생산능력을 제공하는 FMS의 구성요소 즉 각 작업장에서의 최적 기계대수, 로컬버퍼의 크기 및 시스템내의 가용 파레트수를 결정하는 해법절차를 개발하였다.

개발된 해법절차는 Asymptotic Bound Analysis에 의하여 구한 최저구성을 초기해로

놓고 요구되는 일정수준 이상의 생산능력을 최소의 비용으로 제공하는 발견적해를 비용 증분당 출력률 증분이 가장 큰 결정변수를 한 단위씩 증가시키는 방법으로 구하였다. 최적해는 발견적해를 현 최적해로 놓고 각 결정변수들을 최저구성에서부터 체계적으로 증가시켜가면서 시스템 구성비용이 현 최적해보다 작은 구성들에 대해서만 최적구성 여부를 조사하는 Implicit Enumeration Algorithm에 의하여 구하였다.

개발된 해법절차는 각 작업장의 기계대수와 로컬버퍼의 크기의 조합으로 형성되는 수많은 시스템구성으로 full enumeration에 의한 최적구성의 탐색이 불가능한 문제들도 가능하게 되었다. 또한 gradient를 분석하여 구해진 발견적해는 시도했던 실험들에서 최적해와 일치한다. 따라서 작업장의 수와 시스템내의 가용한 팔레트 수가 커서 최적해를 제공하는 Implicit Enumeration Algorithm에 시간이 소요되는 문제에 대해서는 빠른 시간에 구할 수 있는 발견적해를 이용하여 최적구성결정에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다.

향후 연구과제로는 이러한 해석적인 방법은 시스템의 유연성이나 자재운반시스템의 동적경로를 정확하게 고려하지 못할뿐더러 시스템의 안정상태를 가정하고 있는 단점을 보완하기 위하여 시뮬레이션이 수반되어야 하며, 또한 경제성평가에 대한 연구도 보완된다면 본 연구의 해가 시뮬레이션의 초기해로 사용될 수 있어 FMS의 비용을 고려한 설계문제 해결에 유용하다.

참 고 문 헌

[1] Buzacott, J. A., and Yao, D. D.; "On Queueing Network Models of Flexible Manufacturing Sysyems", Queueing System, 1: pp. 5-27, 1986.

[2] Buzen, J. P.; "Computational Algorithms for Closed Queueing Network with Exponential Servers", Communication of ACM, 16(9) : pp. 527-531, 1973.

[3] Dallery, Y., and Frein, Y. ; "An Efficient Method to Determine the Optimal Configuration of Flexible Manufacturing System", Proc. 2nd. ORSA/TIMS, K. E. Stecke R. Suri(ed.), 1986.

[4] Jahorjan, J., Sevcik, D. L. and Galler E. B.,; "Balanced Job Bound Analysis of Queueing Networks", Comm. of ACM, 25(2) : pp. 134-141, 1982.

[5] Ranky, P. G.; Computer Integrated Manufacturing, Prentice-Hall, Inc.,N. J., 1986.

[6] Stecke, K. E., and Raman, N.; "FMS planning decisions, operating flexibilities and system performance", IEEE Transactions on engineering management, 42(1): pp. 82-90.

[7] Solberg, G. G.; "Mathematical Model of Computerized Manufacturing Systems", Proc. 4th Int. Con. on Production Research, Tokyo.

[8] Viswanadham, N., and Narahari, Y.; "Performance Modeling of Automated Manufacturing Systems", Prentice-Hall, 1992.

[9] Yao, D. D., and Buzacott, J. A.; "Modelling a Class of State Dependent Routing in Flexible Manufacturing Systems", Annals of Operations Research, 3(1-4): pp. 153-167, 1985.

[10] Yao, D. D., and Buzacott, J. A.; "Models of Flexible Manufacturing Systems with Limited Local Buffers"., Inter. J. of Production Research, 24(1) : pp. 107-118, 1986.