

페트리네트를 이용한 유연생산시스템의 성능평가에 관한 연구

김 기 범*, 이 교 일**

A Study on the Performance Evaluation of Flexible Manufacturing Systems by Using Petri Nets

Kim Gi Bom*, Lee Kyo Il**

ABSTRACT

A FMS is a typical discrete event system exhibiting concurrency, asynchronicity and non-determinism. To represent a FMS with those characteristics, Colored and Timed Petri Nets is defined and the modeling procedure is provided in this paper. To analyze and evaluate the performance of a FMS, a simulation software is developed and applied to SNU FMS/CIM Center. This software enables to detect the bottleneck machine and decide the optimal direction in case of the expansion of a FMS.

1. 서 론

생산원가의 절감, 단순작업의 기피 및 품질의 제고를 위하여 생산자동화가 도입된 이래, 소비자의 요구가 다양화 되고 판매경쟁이 심화됨으로 제품의 경쟁력을 확보하기 위하여 유사한 품종을 별도의 설비조정없이 생산할 수 있는 유연생산시스템이 널리 실용화되고 있다.

개별(Job Shop)생산시스템은 다양한 품종의 부품을 생산할 수 있어 유연성이 뛰어나나 생산성이 낮은 반면에, 대량생산시스템은 전용기계로서 유연성이 크게 떨어진다. 일반적으로 금속가공품의 70%정도는 단위생산수량(Lot)의 크기가 50개 미만인 것으로 보고되었으므로^[9] 개별생산시스템과 대량생산시스템과는 다른 유연생산시스템이 필요하게 되었다.

유연생산시스템은 “부가가치를 창출하는 생산공정을, 분야별로 적절한 물류운반장치와 제어시스템으로 연결하여 자동화 생산공정군으로 만들고, 2개 이상의 자동화 생산공정군을 생산지원 설비군(자동창고, 무인운반시스템, 소재세

팅라인, 치공구관리공급실, 자동검사설비, 자동세척설비 등)과 중앙제어 시스템으로 유기적인 결합을 시켜서, 별도의 라인 셀업(Setup)을 위한 휴지시간없이 다양한 제품을 자동으로 제조하는 시스템”으로 정의 된다.^[10]

이와 같은 유연생산시스템은 이산현상시스템(Discrete Event System)의 대표적인 예로서, 비동기성(Asynchronicity), 순차적인 연관관계(Sequential Relation), 동시성(Concurrency), 상호배제(Mutual Exclusion), 비확정성(Non Determinism)등의 특징을 나타내며, 모델링하기 위하여 대기행렬망(Queueing Network), 정수계획법(Integer Programming), 페트리네트(Petri Nets)등 여러 기법들이 개발되었다.

페트리네트는 시뮬레이션 모델을 이용한 기법으로서, 이산현상 시스템의 구현까지 일관되게 적용할 수 있으며, 다음과 같은 장점을 갖고 있다.^[11]

1. 이산현상시스템의 특성을 모델링하기에 용이하다.
2. 시각적으로 확인 가능하다.

* 서울대 제어계측신기술연구소

** 서울대 기계설계학과

3. 시스템 고착(Deadlock)등 시스템 특성을 파악하기에 용이하다.
4. 페트리네트 모델로부터 시스템 제어모듈을 개발하기에 용이하다.
5. 페트리네트 모델로부터 시스템의 성능을 평가하기에 용이하다.

본 연구에서는 유연생산시스템을 모델링하기 위하여 Colored and Timed 페트리네트를 정의하고, 유연생산시스템의 모듈화를 통하여 체계적으로 전체 시스템 모델을 구하는 기법을 제시한다. 또한 정의된 페트리네트를 이용한 시뮬레이션 소프트웨어를 개발하여 유연생산시스템의 성능을 평가한다.

2. Colored and Timed 페트리네트

페트리네트는 1962년 Carl A. Petri가 개발한 기법으로서, 이산현상시스템을 단순화하여 표현할 수 있었다. 그후 이산현상시스템을 해석 및 검증하기 위하여 시간의 개념을 도입한 Timed 페트리네트가 개발되었으며,^[4] 많은 요소와 다양한 정보를 처리하기 위하여 Colored 페트리네트가 개발되었다.^{[6][8]} 그러나 다양한 제품을 생산하는 유연생산시스템의 성능을 평가하기 위하여는 Timed 페트리네트와 Colored 페트리네트의 결합이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 이러한 Timed 페트리네트와 Colored 페트리네트를 통합하여 Colored and Timed 페트리네트(CTPN)라 부르며, 정의하면 다음과 같다.

Def. 1 CTPN Z는 6개의 요소로 이루어져 있다.

$$Z ; (P, T, I, O, C, t)$$

$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}$: 플레이스

$T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_m\}$: 트랜지션

$$P \cup T \neq \emptyset, P \cap T = \emptyset$$

$I : (P \times T)$: 입력함수(input function)

$O : (P \times T)$: 출력함수(output function)

$C : \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_k\}$: 색(color)

$t : \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$: 시간(time)

플레이스는 사건 또는 설비상태를 의미하며, 트랜지션은 사건의 발생을 의미하여 플레이스와 트랜지션으로 시스템

의 상태흐름을 표시할 수 있다. 입력함수는 트랜지션을 중심으로 토큰이 입력되는 플레이스, 출력함수는 토큰이 출력되는 플레이스를 뜻한다. 토큰을 구별하기 위하여 각 토큰이 가질 수 있는 색의 집합을 C로 표시하였으며, 각 트랜지션에서의 사건진행을 t로 나타내었다.

Def.2

$$IP(T_i) = \{P_i \in P ; I(P_i, T_i) \neq 0\} \quad \forall T_i \in T$$

$$OP(T_i) = \{P_i \in P ; O(P_i, T_i) \neq 0\} \quad \forall T_i \in T$$

$IP(T_i)$ 는 트랜지션 T_i 의 입력 플레이스의 군(Set)이며 $OP(T_i)$ 는 트랜지션 T_i 의 출력 플레이스의 군이다.

Def.3

CTPN Z의 marking을 M이라 할 때, M은 음이 아닌 정수의 집합이다.

marking M은 페트리네트의 상태를 나타내는 m-벡터이며, m은 플레이스의 총수이다. 그러므로 marking M의 요소는 플레이스에 위치한 토큰의 수를 뜻하므로 음이 아닌 정수이다.

Def.4

CTPN Z의 시간함수 $t(T_i)$ 는 트랜지션 T_i 에서 사건이 완료되기 위하여 남은 시간을 의미하며, 다음과 같이 표현된다.

$$t = \text{현재시간}$$

$$t_0 = \{\min t_i ; m(IP(T_i)) \neq 0 \text{ at } t_i\}$$

$$t(t_i) = PT_{ij} - (t - t_0)$$

Def.5

트랜지션 T_j 는 다음과 같은 조건을 만족하면 enable하다.

$$m(P_i) \geq I(P_i, T_i) \quad \forall P_i \in IP(T_i)$$

$$C(m(P_i)) = C(T_i) \quad \forall P_i \in IP(T_i) \text{ and } t(T_i) = 0$$

CTPN Z가 safe하면, 트랜지션 T_j 는 다음과 같은 조건을 만족하여야 enable하다.

$$I(P_i, T_j) = 1 \quad \forall P_i \in IP(T_i)$$

$$C(m(P_i)) = C(T_j) \quad \forall P_i \in IP(T_i)$$

$$O(P_i, T_j) = 0 \quad \forall P_i \in IP(T_i)$$

$$t(T_j) = 0$$

3. 유연생산시스템 시뮬레이션

페트리네트의 단점은 시스템 모델이 복잡하다는 점이다. 모델링하고자 하는 시스템 내부의 모든 상태와 사건을 파악하여 페트리네트 모델을 구성하여야 하므로 모델링에 소요되는 시간과 노력이 많이 필요하다. 이러한 페트리네트의 단점을 해소하는 방안으로 전체시스템을 서브모듈로 구분하고, 서브모듈간의 관계를 구성하는 방법을 제안한다. 그러므로 본 연구에서는 시스템모델을 체계적으로 구할 수 있도록 유연생산시스템을 모듈화하여 모듈별 모델을 구성한 후, 모듈들을 결합하여 전체 시스템을 구성하도록 하였다. 시스템 정보를 입력하면, 이러한 기법을 이용하여 전체 시스템에 대한 모델을 자동적으로 구할 수 있다.

유연생산시스템은 여러가지 가공경로를 가진 다양한 부품을 가공할 수 있도록 여러 셀로 이루어져 있다. 전체 유연생산시스템을 모델링하기 위하여는 먼저 각셀을 모델링한 후, 여러 셀 모델을 결합하여 시스템 모델을 구성한다.

한 셀의 기계수가 S_m 일 경우에 페트리네트를 이용하여 구성한 셀 모델을 <그림1>과 같다. 상위의 플레이스는 셀의 버퍼를 나타내며, 한 기계는 머신 플레이스와 상태 플레이스로 나타내어, 기계의 가동상태를 나타낸다.

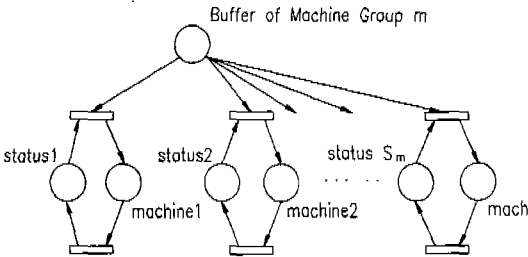


Fig. 1 Schematic Diagram of Machine Group m

한 기계설비군의 기계댓수가 S_m 이라면

$$\text{플레이스 수 ; } N_p = 2S_m + 1$$

$$\text{트랜지션 수 ; } N_t = 2S_m$$

이상과 같이 모든 기계설비군이 모델링되면, 각 부품의 가공순서에 따라 각각의 기계설비군을 연결하여 전체 유연생산시스템을 구성하게 된다. 그런데 부품의 종류에 따라 가공순서가 다르게 되므로, 즉 토큰의 색에 따라 Colored and Timed 페트리네트 모델에서의 흐름이 바뀌게 되므로,

토큰 뿐만아니라 플레이스를 연결하는 트랜지션 또한 색을 갖게 된다. 그러나 설계대상이 되는 유연생산시스템은 기계설비군들을 공유하고 있으므로 플레이스들은 토큰의 색과는 무관하게 된다. 이제 각 부품의 공정순서에 따라 트랜지션을 이용하여 전체 시스템을 구성한다. 예를 들어 가공공정(Production Route)이 <표1>과 같은 시스템을 Colored and Timed 페트리네트로 구성하면 <그림2> 및 <그림3>과 같다. <표1>에서 부품1은 1공정으로 기계설비군 1에서 가공되며, 2공정으로 기계설비군 2에서 가공되므로, 이러한 관계를 <그림2>에서 나타내었다.

부품종류 : 2종

기계설비군 수 : 3군

기계설비군 1의 기계댓수 : 2대

기계설비군 2의 기계댓수 : 3대

기계설비군 3의 기계댓수 : 3대

부품종류	1공정		2공정	
	기계설비군	표준시간	기계설비군	표준시간
1	1	10	2	20
2	2	30	3	20

Table 1 Production route and standard time of the example

시간에 따라 시스템이 어떻게 운용되는가를 예측하기 위하여 유연생산시스템을 시뮬레이션한다. 유연생산시스템 시뮬레이션을 통하여 병목기계설비군을 파악할 수 있으며, 셀별 부하상태 및 부품대기시간 등을 알 수 있다.

시뮬레이션 모델은 확률변수(Random Variable)를 포함하는가에 따라

- 확정적 시뮬레이션 모델(Deterministic simulation Model)

- 확률적 시뮬레이션 모델(Stochastic Simulation Model)

로 분류된다.

유연생산시스템은 발생하는 사건이 단속적으로 발생하는 대표적인 이산 시뮬레이션 모델이며, 본 연구에서는 부품의 가공시간이 일정한 것으로 가정하여 확정적 시뮬레이션 모델을 구성하여, 유연생산시스템을 해석한다.

본 연구에서는 Colored and Timed 페트리네트 모델을

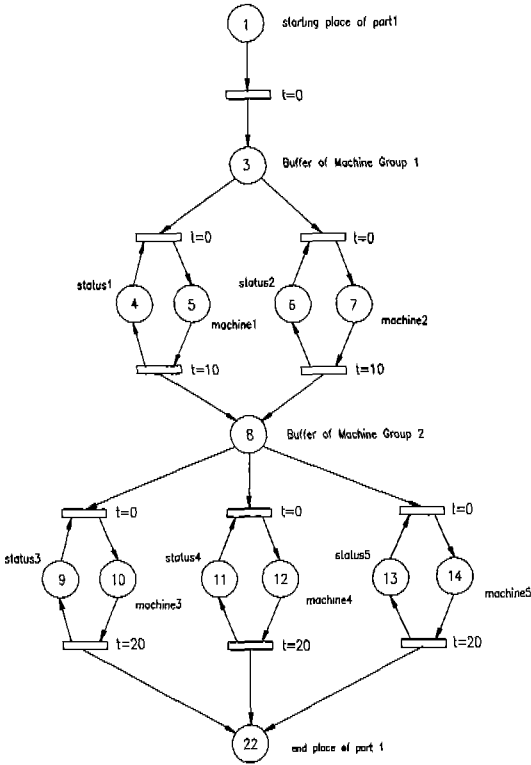


Fig. 2 Production Process of Part1

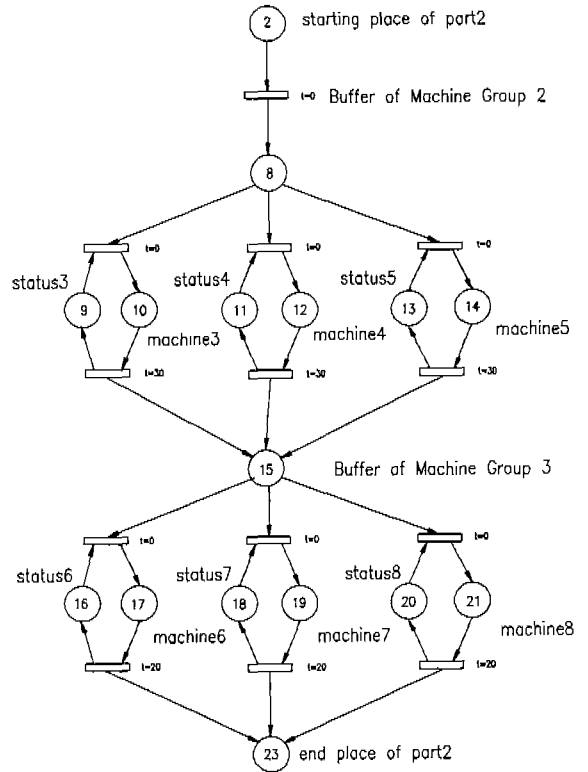


Fig. 3 Production Process of Part2

시뮬레이션할 수 있는 시뮬레이션 소프트웨어를 개발하였다. 입력자료는 유연생산시스템에 대한 Colored and Timed 페트리넷 모델, 생산부품 종류 및 생산량, 설비종류, 설비수, 가공공정, 가공시간이다.

Colored and Timed 페트리넷 시뮬레이션을 수행하는 데에 필요한 입력으로 부품투입순서는 Eskudero 알고리즘^[5]으로 얻을 수 있었다. Eskudero 알고리즘 결과에 따라 부품의 시작 플레이스에 color 토큰을 투입하기 시작하며, 투입된 토큰은 다음의 시뮬레이션 법칙에 따라 Colored and Timed 페트리넷 시뮬레이션이 수행된다. 본 소프트웨어의 흐름도는 <그림4>와 같다.

Rule 1 : Transition T_i is enable iff $C(token(I_i(T_i))) = C(T_i)$ and $t(T_i) = 0$ and $token(O_j(T_i)) = 0$, i, j are integer.

Rule 2 : If transition T_i is fired, and

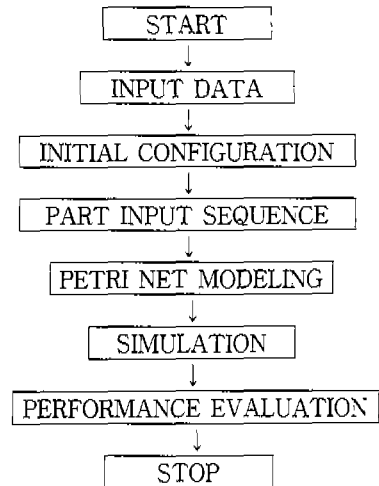


Fig. 4 Flow Chart of PETRI NET Simulation S/W

- 1) if $O_i(T_i)$ is machine Place,
 $token(O_i(T_i))=token(I(T_i))$
 $C(token(O_i(T_i)))=C(token(I(T_i)))$
 $token(I(T_i))=0$
 $t(T_i)=pt_{ij}$

- 2) if $O_i(T_i)$ is status place,
 $token(O_i(T_i))=token(I(T_i))$
 $C(token(O_i(T_i)))=0$
 $token(I(T_i))=0$
 $t(T_i)=pt_{ij}$

시간이 지남에 따라 enable한 트랜지션은 fire되며, fire되면 트랜지션 T의 입력함수에 있던 토큰이 출력함수로 이동하게 된다. 그런데 트랜지션 T_i의 출력함수(output function) 플레이스가 기계 플레이스라면, 트랜지션 T_i의 입력함수(input function) 플레이스에 있는 토큰이 그대로 이동하게 된다. 그러나 트랜지션 T_i의 출력함수(output function) 플레이스가 기계상태 플레이스라면, 토큰이 이동을 하되 토큰의 색은 없이, 기계의 상태만을 나타내게 된다.

Rule 3 : T를 한 유닛(Unit) 증가시키면, 모든 트랜지션 시간 t(T_i)를 한 유닛 감소시킨다.

enable한 트랜지션을 fire하면서 시간에 따라 전체 시스템을 시뮬레이션한다. 그러므로 기준시간을 증가시키면서, 이에 따라 모든 트랜지션 시간 t(T_i)를 줄여나간다. 즉 트랜지션 시간을 줄이는 것은 기계설비에서 부품가공을 한 단위시간동안 수행한 것을 의미한다. 또한 트랜지션 시간이 영이 되면 부품가공이 완료된 것을 의미한다.

Rule 4 : 트랜지션 T_i가 fire되고, 출력함수 O_j(T_i)가 기계설비군의 버퍼이면,

$$pr(token(I(T_i)))=pr(token(I(T_i)))+1$$

시뮬레이션을 수행하는 동안, 각각의 부품이 어떠한 상태에서 어떤 기계에서 가공되고 있는 지를 추적하기 위하여 pr이라는 함수를 이용하여 부품의 가공상태를 표시한다.

Rule 5 : 가공완료시간(Complete time)

$$t=(\min t \mid token(end_place) \geq total_product \text{ at } t)$$

본 소프트웨어에서는 우선순위 결정방법으로 선입선출법, 최소슬랙법 및 최단가공시간법을 이용할 수 있으며, 사용자가 특수한 우선순위 결정방법을 이용하여 시뮬레이션하고자 한다면 버퍼스테이션의 부품배열법칙을 변경시킴으로써 손쉽게 우선순위 결정방법을 변경할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

- 가공완료시간
- 싸이클시간(Cycle time, 공장내 부품 체류시간)
- 기계 대기시간
- 공장내 반제품수(WIP, Work-in-process)
- 평균 대기시간

본 소프트웨어를 이용하면, 시스템운용에 있어 최적의 작업일정을 결정하는 Priority Rule을 테스트할 수 있으며, 또한 시스템 확장방안을 제시함으로써 최상의 성능을 발휘하는 시스템 구성을 구할 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

Colored and Timed 페트리네트를 이용한 유연생산시스템의 모델링기법 및 시뮬레이션 소프트웨어를 서울대학교 FMS/CIM센터에 적용하였다. 시뮬레이션중 우선순위 결정방법(Priority Rule)으로는 선입선출법, 최소슬랙(Minimum Slack) 및 최단가공시간(Shortest Processing Time)의 3가지 방법에 대하여 수행하였다.

서울대학교 FMS/CIM센터는 8개의 기계설비군으로 이루어져 있으며, 기계설비구성은 <그림5>와 같다. 소형, 중형 및 대형모터의 12가지의 부품을 생산할 수 있으며, 각 부품의 생산공정 및 가공표준시간은 <표2>와 같다. 시뮬레이션 결과로서는 3가지 우선순위 결정방법에 대하여 대중소 모터 10개씩을 가공완료하는 시간을 구하여 <그림6>에 나타내었다.

<그림6>에서 0은 셀업스테이션, 1은 무인운반차, 2는 검사장치, 3은 자동창고 4는 조립장치, 5는 선반, 6은 머시닝센터, 7은 셀다운스테이션을 나타낸다.

우선순위 결정방법중에서 최소슬랙법을 이용하였을 경우, 가공완료시간이 가장 짧았으며, 머시닝센터가 병목기계설비군으로 판명되었다. 각 기계설비군의 기계수를 한 단위 증가하였을 경우, 전체 가공완료시간에 미치는 영향을 <그림7>에 나타내었다. <그림7>에서와 같이 기계설비군 6, 즉 머시닝센터를 확장하는 것이 가공완료시간을 35.4% 향상시킨 80100초에 모든 가공을 완료하였다. 그러므로 시스템을 보완할 경우, 머시닝센터를 도입하는 것이 시스템 성능향상에 가장 효과적이라는 사실을 알 수 있었다.

생산공정

가공 순서	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
부품 종류	0	0	1	2	1	3	1	8	1	7	1	2	1	7									
1	0	1	2	1	3	1	8	1	7	1	2	1	7										
2	0	1	2	1	3	1	6	1	7	1	2	1	7										
3	0	1	2	1	3	1	6	1	7	7	0	1	2	1	3	1	5	1	7	1	2	1	7
4	0	1	2	1	3	1	6	1	7	7	0	1	2	1	3	1	5	1	7	1	2	1	7
5	0	1	2	1	3	1	6	1	7	7	0	1	2	1	3	1	5	1	7	1	2	1	7
6	0	1	2	1	3	1	5	1	7	7	0	1	2	1	3	1	6	1	7	1	2	1	7
7	0	1	2	1	3	1	5	1	7	7	0	1	2	1	3	1	6	1	7	1	2	1	7
8	0	1	2	1	3	1	6	1	7	7	0	1	2	1	3	1	6	1	7	1	2	1	7
9	0	1	2	1	3	1	4	1	2	1	7												
10	0	1	2	1	3	1	4	1	2	1	7												
11	0	1	2	1	3	1	4	1	2	1	7												

Table 2-1 Production Route of SNU FMS/CIM CENTER

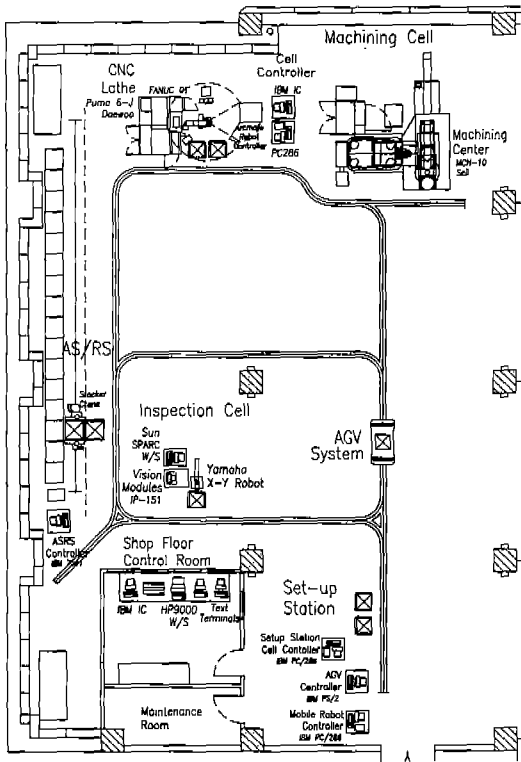


Fig. 5 The Layout of SNU FMS/CIM Center

표준시간 (초)

가공 순서	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
부품 종류	0	50	130	60	190	300	140	1200	190	190	130	70	130	20									
1	50	130	60	190	300	140	1200	190	160	130	70	130	20										
2	50	130	60	190	300	140	1820	190	190	130	70	130	20										
3	280	130	60	190	300	140	3000	190	150	10	250	130	70	190	300	110	540	170	20	130	70	130	10
4	250	130	60	190	300	140	3500	190	150	10	250	130	60	190	300	110	720	170	20	130	70	130	10
5	280	130	60	190	300	140	2400	190	150	10	250	130	70	190	300	110	450	170	20	130	70	130	10
6	250	130	60	190	300	110	540	165	20	10	250	130	70	190	300	140	1200	190	160	130	70	130	10
7	280	130	60	190	300	110	720	165	20	10	250	130	70	190	300	140	1200	190	160	130	70	130	10
8	250	130	60	190	300	110	450	165	20	10	250	130	70	190	300	140	1200	190	160	130	70	130	10
9	30	130	150	190	300	250	650	120	180	130	10												
10	30	130	150	190	300	250	550	120	200	130	10												
11	30	130	160	190	300	250	550	120	210	130	10												

Table 2-2 Standard time of SNU FMS/CIM CENTER

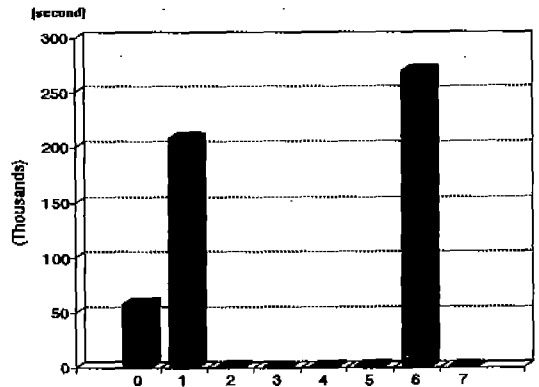


Fig. 6-1 Workload of each machine group (First Come First Serve) completion time : 144480 seconds

5. 결 론

유연생산시스템을 모델링하기 위하여 Colored and Timed 페트리네트를 정의하였으며, 유연생산시스템의 모듈화를 통하여 체계적으로 전체 시스템 모델을 구하는 기법을 제시하였다. 또한 시스템 성능평가를 위하여 Colored and Timed 페트리네트 시뮬레이션 소프트웨어를 개발하였으며, 서울대학교 FMS/CIM센터에 적용하여 병목기계 설비군을 검색하였으며, 병목현상을 해소하였을 경우에 예상되는 성능향상효과를 제시하였다.

참 고 문 헌

1. Tadao Murata, "Petri Nets : Properties, Analysis and Applications", *Proc. of the IEEE*, Vol 77, No 4, pp541-579, 1989
2. Peterson, J.L., "Petri Net Theory and The Modeling of Systems", Prentice. Inc., Englewood Cliffs, NJ
3. Alla H., P. Ladet, J. Martinez and M. Silva, "Modeling and Validation of Complex Systems by Colored Petri Nets : Application to a Flexible Manufacturing System", In *Advanced in Petri Nets*, G. Rozenberg, H. Genrich and G. Roucairel(ed.), Springer-Verlag, pp15-31, 1984
4. Herve P. Hillion and Jean Marie Proth, "Performance Evaluation of Job Shop Systems Using Timed Event Graphs", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol 34, No 1, Jan, 1989
5. L. F. Escudero, "An Inexact Algorithm for Part Input Sequencing and Scheduling with Side Constraints in FMS", *The International Journal of flexible Manufacturing Systems*, pp 143-174
6. Era Kasturia, frank Dicesare, Alan Descrochers, "Real Time Control of Multilevel Manufacturing Systems Using Colored Petri Nets", *Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1988
7. Andrew Kusiak, "Modeling and Design of Flexible Manufacturing Systems", Elsevier, 1986

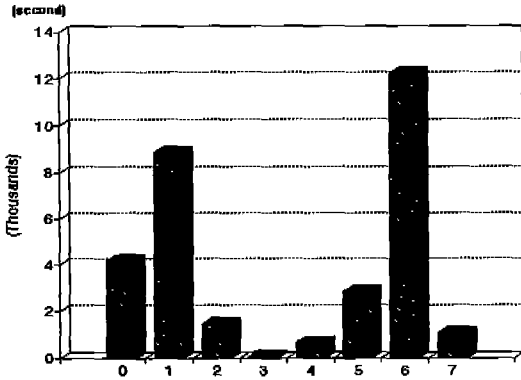


Fig. 6-2 Workload of each machine group (Minimum Slack Rule)
completion time : 124060 seconds

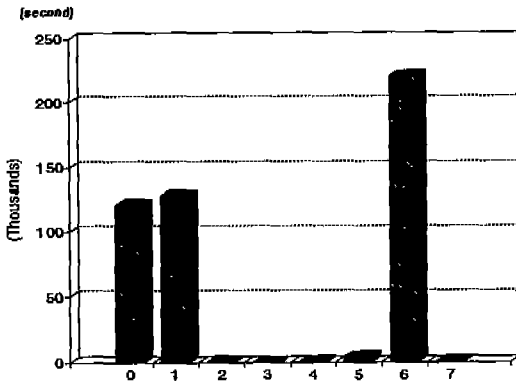


Fig. 6-3 Workload of each machine group (Shortest Processing Time)
completion time : 127010 seconds

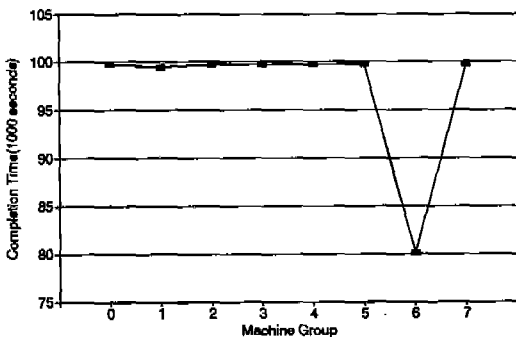


Fig. 7 The Changes of Completion Time in Each Case

8. Martinez J., H.Alla and M. Silva, "Petri Nets for The Specifications of FMS, In Modeling and Design of Flexible Manufacturing Systems", A. Kusiak(ed), pp 389-406, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1986
9. Hoda a.Elmaraghy and T.Ravi, "Modern Tools for The Design", Modeling and Evaluation of flexible Manufacturing Systems, Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, Vol 9, No 4/5, pp335-340, 1992
10. William W. Luggen, "Flexible Manufacturing Cells and Systems", Prentice Hall. 1991
11. 고명삼 외, "CIMS(컴퓨터 통합 생산시스템) 개발에 관한 연구", 서울대학교 자동화시스템 공동연구소, 1992
12. Sifakis, J., "Use of Petri Nets for Performance Evaluation in Manufacturing". Modelling and Evaluation Computer Systems. Amsterdam, North-Holland, pp 75-93, 1977