

☒ 응용논문

## 품질경영시대의 유연성을 갖는 생산시스템의 성능분석 및 평가

이승현 · 유왕진  
건국대학교 산업공학과

### Performance Analysis and Evaluation for Flexibility of Manufacturing Systems in QM era

Seung-Hyun Lee · Wang-Jin Yoo  
Dept. of Industrial engineering at Konkuk university

#### Abstract

In the automated manufacturing systems, the problem regarding how to make production activities flexible is even more important and critical than that regarding how to product large quantities, and the more flexible, if possible, the manufacturing system is, the more competitiveness and profitable factors it gets.

This research, therefore, concentrated on establishing the flexibility and evaluating performance on the manufacturing system, operational flexibility is considered because of enabling the manufacturing system to get both the improvement of production rate and the adaptive ability of environment changes.

For it, we used the analytical tool, GSPNs, which is a kind of timed Petri-Nets. GSPNs is competent enough to consider practical situations just like operation priorities, machine failure, randomness, concurrency and so on.

Through the GSPNs analysis, it is confirmed that in the manufacturing system with operational flexibility is compatible with the traditional performances such as production rate or mean waiting time.

## 1. 서론

급격히 변하는 생산환경 속에서 가격(Price), 품질(Quality), 속도(Speed)와 더불어 유연성(Flexibility)은 현대 생산시스템의 경쟁력을 결정하는 요인이 되고 있다. 하지만 다른 요인과는 달리 생산시스템에 유연성을 구축하고 평가하는 작업은 경영전략 차원에서 반드시 고려되어야 함에도 불구하고 유연성의 다양한 개념과 일관성 있는 이론의 부족으로 인해 그 동안 많은 관심을 받지 못하였다.

따라서 본 연구는 그간의 비현실적인 연구를 개선하여 유연성이 생산시스템의 성능에 미치는 영향, 특히 가공의 유연성이 자원이용률, 생산률, 평균대기시간과 같은 기존의 성능평가기준에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 생산시스템에서의 유연성의 의미

현대생산의 외부환경은 급속하게 변하고 있으며 이러한 변화는 소비자 기호의 다양화, 경쟁환경의 강화, 국가와 사회의 다양한 규제 그리고 혁신적인 기술의 개발들로 인하여 더욱 가속되고 있다. 또한 최근의 세계화의 추세로 인해 세계는 급속하게 단일한 경제질서로 통합되고 있다. 이러한 외부환경의 변화로 인해, 지속적인 신제품개발과 함께 다양한 품종의 제품 및 서비스를 대량으로 생산하는 것이 생산시스템의 생존요건이 되었다.

생산시스템에서 '유연성'은 '생산환경의 내·외적 다양한 변화에 대응하는 능력'으로 정의할 수 있다. 따라서 유연성을 갖춘 생산시스템은 다양한 고객의 변화에 대해 적절히 대처할 수 있으며 이러한 능력은 자동화된 기계 및 설비, 고도로 숙련된 노동력의 보유 그리고 생산시스템의 초기설계 및 상세 설계단계에서 시스템 성능에 대한 철저한 분석 및 평가와 실시간 생산통제활동을 통해 이루어 질 수 있다.

생산시스템에 대한 '유연성'의 개념 및 평가방법에 대해서는 많은 연구결과가 제시되고 있다. 그러나 유연성이 갖는 고유한 특성을 정확하게 정의하고 정량화하기가 어렵기 때문에 연구자들마다 각기 주관적으로 유연성을 정의하고 정량화 하였다. 따라서 정의된 유연성의 내용이 연구자들마다 상이하고 때로는 중복되기도 하며, 이러한 점이 유연성에 대한 보다 상세한 연구를 어렵게 하고 있다.

본 연구에서는 Sethi, Brown, Gerwin, Stecke, Dubios 등의 유연성 분류방식을 따라 생산시스템에 유연성이 미치는 영향을 파악하였다. 생산시스템의 유연성의 정의에 있어서 Behrbohn(1985), Zelenovic(1982), Garrett(1986) 등은 생산시스템의 내적 변동요인의 파악에 관심을 두었으며 Sethi는 이들의 관점을 수용하여 생산시스템의 유연성을 기초적 유연성(Basic Flexibilities), 시스템적 유연성(System Flexibilities), 총체적 유연성(Aggregate Flexibilities)으로 분류하고 기초적 유연성은 기계의 유연성, 자

재운반의 유연성, 가공의 유연성으로, 시스템적 유연성은 공정의 유연성, 가공절차의 유연성, 제품의 유연성, 생산량의 유연성, 확장의 유연성으로, 총체적 유연성으로는 생산프로그램의 유연성, 생산의 유연성, 시장의 유연성으로 다시 세분화하였다.

이와 같은 분류방법에서 기초적 유연성에 대해 살펴보면 기계의 유연성은 기계 및 설비가 추가적인 비용의 투입이 없이 다양한 작업을 수행할 수 있는 능력을 의미하며, 자재운반의 유연성은 자재운반 시스템이 다양한 부품을 기계 및 설비에 효과적으로 운반 및 Loading/Unloading 할 수 있는 능력을 의미한다. 가공의 유연성은 부품의 특성과 관련된 유연성으로 부품이 대체 경로를 통해 가공될 수 있을 때 가공의 유연성을 가진다고 할 수 있다.

일반적으로 기계의 유연성과 자재운반의 유연성은 생산시스템의 초기설계단계에 결정되며 주로 자원의 hardware적인 특징에 의해 결정되기 때문에 이들 유연성은 시스템이 구축되면 고유하게 보유되는 유연성이라고 할 수 있다. 반면에 부품의 설계단계에서 고려되고 보다 상위의 유연성 구축에 매우 중요한 역할을 하는 가공의 유연성은 다양한 통제방법과 관리에 영향을 받는 것으로 파악되고 있다. 그러므로 가공의 유연성을 자원이 가지고 있는 고유한 특성만으로 파악하는 것은 생산시스템의 유연성 구축에 많은 오류를 범할 수 있다(Lim, 1987).

다양하게 정의된 생산시스템의 '유연성'을 성능평가요소로서 파악하려는 연구 역시 여러 연구자들에 의해 진행되어 왔다(Son, Y.K & Park, C.S). 그러나 대부분의 연구 결과는 이론적인 성과를 가질 뿐 현실적으로 사용하기에는 많은 한계를 가지고 있다. 이는 생산시스템의 '유연성'을 성능으로 파악하기 위한 기준과 대상이 명확하지 않았기 때문인 것으로 이해할 수 있다.

본 연구에서는 비현실적인 유연성의 정량화 작업을 지양하고 유연성의 구축이 다른 성능요소 즉 시스템 자원의 이용률, 부품의 평균대기시간, 부품에 대한 시스템의 생산률에 미치는 영향을 파악하였으며 이러한 분석을 위하여 Petri-Nets의 한 방법인 'Generalized Stochastic Petri Nets'(이하 GSPNs)를 사용하였다. Petri-Nets는 분석적 기법의 일종으로서 비동시적 사건이 발생하는 시스템의 모델링 및 타당성분석에 주로 사용되었으며 사건발생에 대해 시간을 고려하는 Timed Petri-Nets의 사용으로 인해 시뮬레이션과 마찬가지로 상세한 수준의 시스템 분석 및 평가에 사용되고 있다. GSPNs는 Petri-Nets 중에서 특히 많이 사용되는 기법으로 생산시스템에서 발생하는 사건의 시간은 지수분포를 따른다고 가정한다. GSPNs에 대한 내용을 살펴보면 다음과 같다.

## 2.2 GSPNs 이론

Petri-Nets는 상태(State, Condition)와 사건(Event)을 중심으로 다양한 시스템을 Networks로 표현하는 분석적 기법중의 하나이다. Petri-Nets는 기본적으로 {Place, Transition, Token}으로 구성되어 있다. Place는 시스템을 구성하고 있는 개체들의 상태를 나타내며, Transition은 사건을 표현한다. 그리고 Token은 사건에 따라 시스템의 상태가 어떻게 변화하는가를 나타내 주는 역할을 한다.

Petri-Nets는 위 요소가 갖는 기능을 확대해 가면서 분석영역을 넓혀왔으며 현재는 GSPNs과 Colored Petri-Nets(이하 CPNs)가 주로 사용되고 있다. GSPNs는 각 node (Place, Transition)을 연결하는 arc의 기능을 확대하고 Transition의 점화(fire)규칙에 시간을 고려할 수 있도록 하여, Petri-Nets를 통한 시스템의 모델링과 성능분석을 보다 현실에 가깝게 접근시킨 기법이다. 이에 대해 보다 자세히 살펴보면 다음과 같다.

가정 1) GSPNs는  $(P, T, IN, OUT, M, INH, F, S)$ 로 구성되어 있다.

- $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$
- $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$
- $IN(P_i, t_j) = N$  ( $t_j$ 에서  $P_i$ 로 연결되는 arc)
- $OUT(P_i, t_j) = N$  ( $P_i$ 에서  $t_j$ 로 연결되는 arc)
- $M: P \rightarrow N$
- $INH: (P \times T) \rightarrow \{0, 1\}$
- $F: (R[M_0] \times T_E) \rightarrow R$  ( $R$ 은  $t \in T_E$ 의 점화와 관련된 확률밀도함수)
- $S = \{(s_i, t) \mid s_i = \text{random switches}, \sum_{i=1}^k s_i = 1, t \in T_I\}$

여기에서  $P \cap T = \phi$ ,  $P \cup T \neq \phi$ ,  $n, m, N$ 은 양수

가정 2) GSPNs에서 전이( $T$ )는 시간을 고려하는  $T_E$ 와 시간을 고려하지 않는  $T_I$ 로 나뉘며  $T_E$ 는 지수분포를 따른다.

$$T = \{T_E, T_I\}$$

가정 3)  $M: P \rightarrow N$ 은 Place에 양수  $N$ 의 token을 할당하는 것을 의미하며,  $M_0$ 은 token 할당의 '초기상태'를 나타낸다.

$$M_0 = (M_0(P_i), i: 1, 2, \dots, n)$$

초기상태  $M_0$ 은  $t_j$ 에 의해 새로운 상태인  $M_1$ 로 전이되며 이와 같은 전이를 계속 하여 초기상태  $M_0$ 로 되돌아오게 되면 도달가능성(Reachability)을 갖는다고 한다.

$M_0$ 에서 도달 가능한 모든  $M'$ 를 집합으로 표시하면 다음과 같다.

$$R[M_0] = \{M_0, M_1, M_2, \dots, M_i\}$$

가정 4) GSPNs에서 하나의  $t_j$ 에 대해 두 개 이상의 Place가 동시에 점화조건을 만족하게 되면, INH함수를 사용하여 특정 사건에 대해 우선 순위를 부여할 수 있다. INH 함수는  $(P \times T) \rightarrow \{0, 1\}$ 로 나타내며, INH함수가 존재할 경우  $t_j$ 는 다음의 두 조건을 만족할 경우에 점화가 가능하게 된다.

$$(i) M(P_i) \geq IN(P_i, t_j), \forall P_i \in IP(t_j),$$

$$(ii) M(P_i) = 0 \quad \forall P_i, \text{ 여기서 } INH(P_i, t_j) = 1$$

그리고 만일 동시 발생된  $t_j$ 가 모두  $T_I$ 일 경우에는 확률함수  $(S(t_j) = s_j(\sum_{k=1}^i s_k = 1))$ 를 할당시킬 수 있다. 이러한 과정을 확률적 전환(random switches)라고 한다.

가정 5) GSPNs에서 어떤 사건이 동시발생(Concurrency)하게 될 때에는 다음의 정리에 따라 해당하는  $t_j$ 를 점화시킨다.

(i) 동시 발생하는  $t_j$ 가 모두  $T_E$ 인 경우: 다음의 계산에 따라  $t_j$ 의 점화확률을 할당.

$$P_r(t_j) = \frac{F(M_i; t_j)}{\sum_{t_k \in T_i} F(M_i, t_k)}$$

(ii) 동시 발생하는  $t_j$ 가 모두  $T_I$ 인 경우: 해당하는  $t_j$ 를 모두 동시에 점화.

(iii) 동시 발생하는  $t_j$ 가  $T_E$ 와  $T_I$ 인 경우:

$t_i (\in T_I)$ 를 우선 동시에 점화시키고, 는 할당된 점화확률에 따라 점화.  $t_j$ 의 점화에 의해  $R[M_j]$ 가 계산되면, 시간을 고려하는 도달가능한  $M_k = \{M_1, M_2, \dots, M_s\}$ 의 안정상태확률  $\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_s\}$ 를 계산할 수 있다. 이 안정상태 확률을 통해 분석대상 시스템의 성능은 다음과 같은 절차를 통해 구해진다.

- ◆ 특정조건  $C$ 의 확률 :  $P_r(C) = \sum_{j \in S_1} \pi_j$

$$S_1 = \{j \in \{1, 2, \dots, s\}, C \in R[M_0]\}$$

- ◆ Place  $P_i$ 에 정확히  $k$ 개의 token이 있을 확률:  $P_r(P_i, k) = \sum_{j \in S_2} \pi_j$

$$S_2 = \{j \in \{1, 2, \dots, s\}, M_j(P_i) = k\}$$

- ◆ Place  $P_i$ 의 기대 token 수 :  $ET(P_i) = \sum_{k=1}^K k \cdot P_r(P_i, k)$

$K$ 는  $P_i$ 의 최대 token수

- ◆  $t_j (\in T_E)$ 의 처리률 :  $TR(t_j) = \sum_{i \in S_3} \pi_i \cdot F(M_i, t_j) \cdot q_{ij}$

$S_3 = \{j \in \{1, 2, \dots, s\}, t_j \text{는 } M_i \text{에 대해 점화가능한 전이.}\}$

$q_{ij}$ 는 확률적 전환확률

- ◆ Place  $P_i$ 에서의 평균대기시간 :

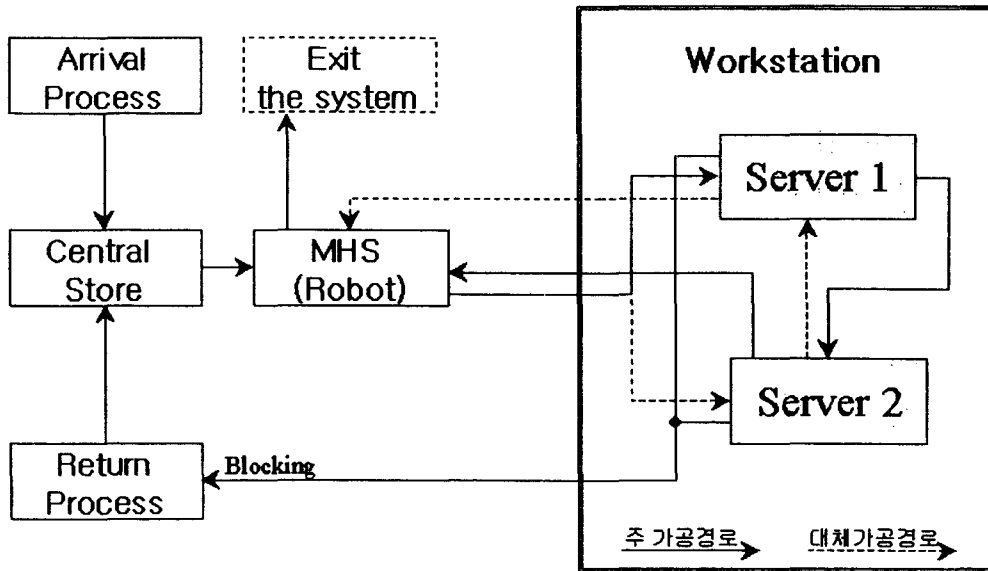
$$W(P_i) = \frac{ET(P_i)}{\sum_{t_j \in IT(P_i)} TR(t_j)} = \frac{ET(P_i)}{\sum_{t_j \in OT(P_i)} TR(t_j)}$$

$$IT(P_i) = \{t_j \in T : OUT(P_i, t_j) \neq 0\} \quad \forall P_i \in P$$

$$OT(P_i) = \{t_j \in T : IN(P_i, t_j) \neq 0\} \quad \forall P_i \in P$$

Ajmore Marsan, Balbo, Conte 등에 의해 제안된 GSPNs 기법은 PetriNets의 적용범위를 넓히는데 많은 기여를 했으며 GTPNs(Generalized Timed PetriNets)와 DSPNs(Deterministic & Stochastic PetriNets) 등의 기법으로 이어지고 있다. GSPNs을 통한 생산시스템의 모델링은 적은 시간과 노력만으로 많은 양의 정보를 얻을 수 있으며 기계가공시간이나 부품의 대기시간 등 지수분포를 따르는 일반적인 생산시스템과 Kanban 시스템과 같은 생산시스템의 분석에 주로 많이 사용되고 있는 Petri-Nets 방법이다. 가공의 유연성을 갖도록 설계된 생산시스템에 대해 GSPNs를 이용한 성능분석 내용을 살펴보면 다음과 같다.

### 2.3 가공의 유연성을 갖는 생산시스템의 모델링 사례연구



< 그림 1 > 대체가공경로를 갖는 생산시스템의 Block diagram  
(Server1이 priority를 갖는 경우)

위 <그림 1>은 자재운반시스템으로 사용되는 한 대의 Robot과 2대의 자동화된 기계로 이루어진 생산시스템에 대한 Block diagram이다. 이 시스템에서 부품은 Robot의 Loading작업에 의해 Workstation내의 Server1에 의해서 가공되고 가공을 마친 부품은 Robot을 통해 Server1로부터 Server2로 전달된다. 그리고 Server2의 작업을 마친 부품은 다시 Robot에 의해 다음의 생산단계로 진행하고 새로운 부품이 현 system으로 투입된다. 정상적인 경우에 작업순서는 Input → Robot → Server1 → Server 2 → Robot → Output이 된다.

이 생산시스템에 가공의 유연성이 구축되면 Robot이 workstation에 새로운 부품을 투입할 경우 Server1이 다른 부품을 작업중이라면 부품은 대체 가공경로를 따라 Server2로 Loading할 수가 있다. 따라서 이 경우에는 기존의 작업순서를 따르는 부품과 함께 Robot → Server2 → Server1 → Robot의 작업순서를 따르는 부품이 workstation내에 동시에 존재하게 된다.

이와 같이 생산시스템에 가공의 유연성이 구축되면 작업상황에 따라 작업순서를 적절하게 변경할 수 있다. 이를 위해서는 부품설계단계에서 부품의 특성에 따른 coding 작업과 분류작업이 선행되어야 하며 Server1과 Server2 사이에는 추가적으로 발생하는 재고를 허용할 수 있도록 Buffer를 두어야 한다.

< 표 1 > GSPNs 모델링 조건

<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Robot의 작업시간분포 및 서비스를 : 지수분포 (<math>\mu = 5</math> parts/hour)</li> <li>◆ Server1, 2의 작업시간 분포 : 지수분포</li> <li>◆ 부품의 가공경로             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 주 가공경로 : Robot <math>\rightarrow</math> Server1 (<math>\mu = 2</math> parts/hour) <math>\rightarrow</math> Server2 (<math>\mu = 1.5</math> parts/hour) <math>\rightarrow</math> Robot</li> <li>- 대체가공경로 : Robot <math>\rightarrow</math> Server1 (<math>\mu = 1</math> parts/hour) <math>\rightarrow</math> Server2 (<math>\mu = 1</math> parts/hour) <math>\rightarrow</math> Robot</li> </ul> </li> </ul>
---

< 표 2 > GSPNs Modelling의 각 요소에 대한 설명

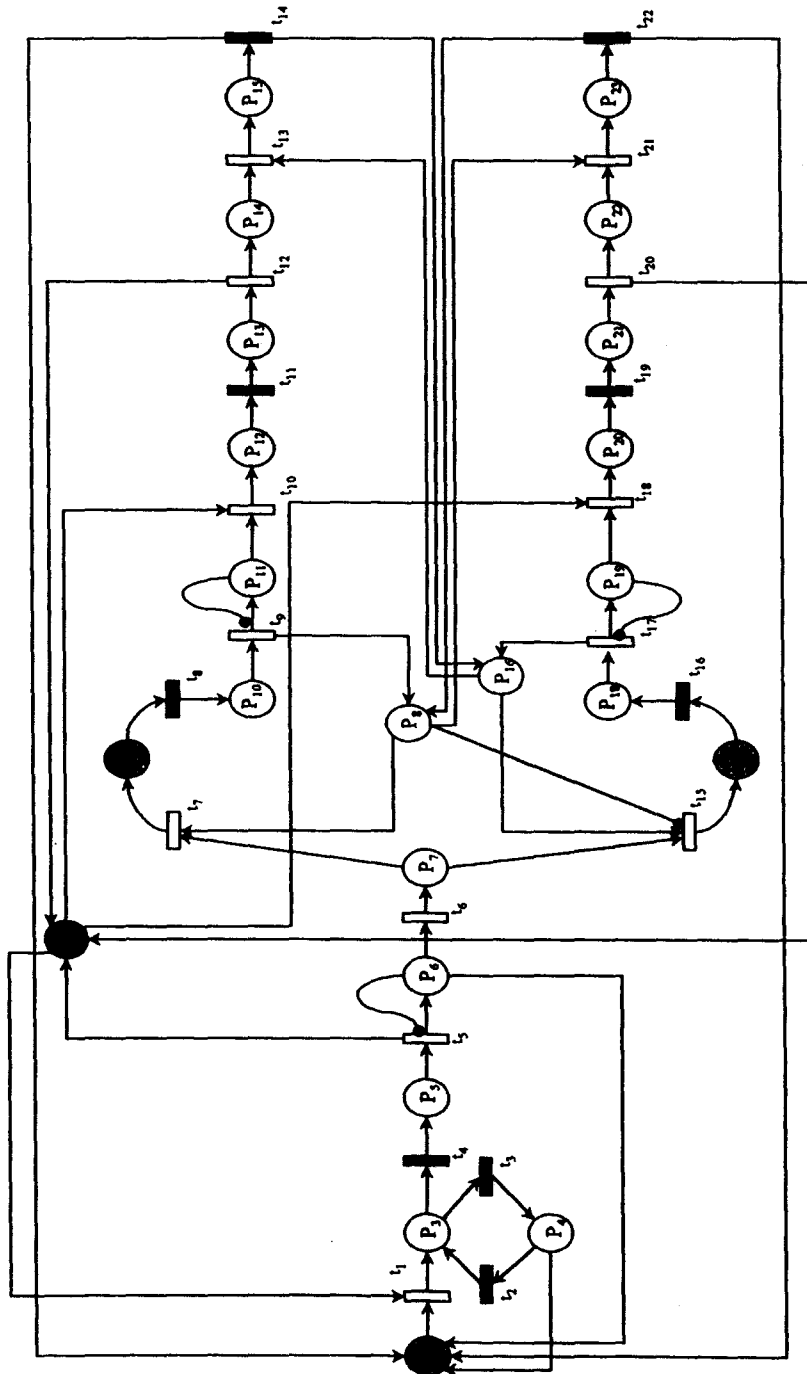
<p><b>Places</b></p> <p><math>P_2</math> : Robot  <math>P_8</math> : Server 1  <math>P_{16}</math> : Server 2  <math>P_4</math> : Blocking  <math>P_3, P_{12}, P_{20}</math> : Robot에 의해 처리되는 부품  <math>P_6, P_{11}, P_{19}</math> : 작업대기중인 부품</p> <p><b>Random Switch</b></p> <p><math>s_1 = (P_2, t_1), s_2 = (P_2, t_{10}), s_3 = (P_2, t_{18})</math></p> <p><b>Initial Marking</b></p> <p><math>M_0 = (P_1, P_2, P_9, P_{17})</math></p>	<p><b>Transition(<math>t_e</math>)</b></p> <p><math>t_4, t_{11}, t_{19}</math> : Robot에 의한 작업  <math>t_8, t_{22}</math> : Server1에 의한 작업  <math>t_{16}, t_{14}</math> : Server2에 의한 작업</p> <p><b>Transition(<math>t_i</math>)</b></p> <p><math>t_1, t_{10}, t_{18}</math> : Robot에 의한 작업시작  <math>t_7, t_{21}</math> : Server1에 의한 작업시작  <math>t_{13}, t_{15}</math> : Server2에 의한 작업시작</p>
---	---

<그림 1>의 생산시스템을 GSPNs를 이용하여 모델링 하면 <그림 2>와 같으며 모델링의 조건과 각 요소에 대한 설명은 <표 1>, <표 2>와 같다. <표 1>에서와 같이 작업순서의 변경으로 작업시간이 변하며, 주 작업경로를 통한 작업시간보다 대체작업 경로의 작업시간이 더 소요되는 것으로 가정하였다.

### 2.4 결과분석

가공의 유연성을 갖는 생산시스템에 대한 성능분석은 생산률, 평균 Leadtime, 평균 대기시간 및 자원의 이용률에 대하여 실시하였으며 결과는 아래의 <표 3>과 같다. 아래의 표에서  $s_1$ 은 Robot의 작업이 동시에 발생했을 때, 부품 Loading을 선택할 확률을 의미한다. 생산률은  $s_1 = 0.6$ 일 때 가장 큰 것으로 나타났다.





<그림 2> 가공의 유연성을 갖는 생산시스템의 GSPNs 모델링

&lt; 표 3 &gt; 성능평가항목 및 분석내용

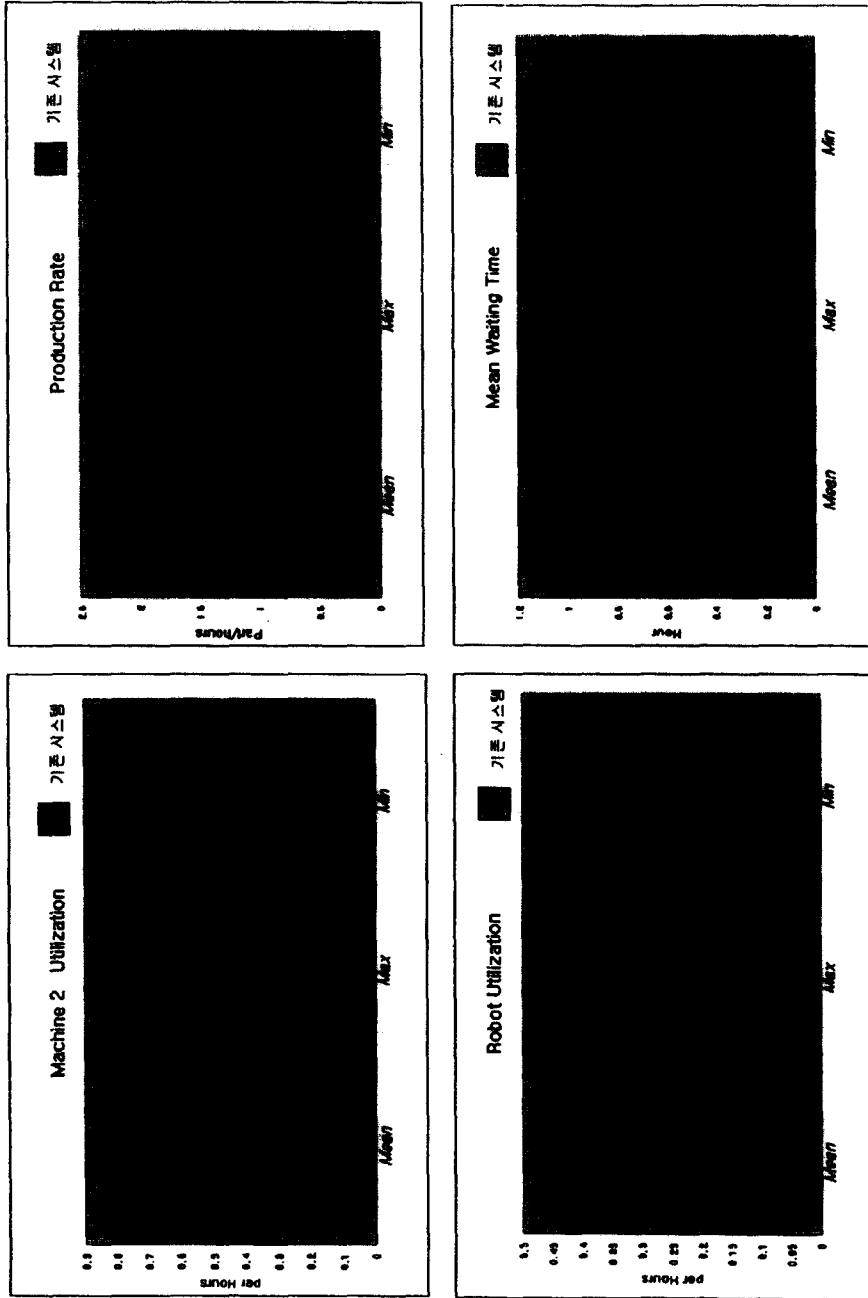
S <sub>i</sub>	Production	Mean Lead	Mean Waiting	Utilization(%)		
	Rate(parts/h)	Time (h)	Time (h)	Server 1	Server 2	Robot
.10	.7671	2.607	.1701	.2366	.4981	.1088
.20	1.3347	1.5213	.1881	.2079	.5092	.1548
.30	1.7137	1.1670	.1978	.1981	.5220	.1813
.40	1.9939	1.0030	.2028	.1813	.5378	.1949
.50	2.1649	.9238	.2042	.1659	.5583	.1986
.60	2.2217	.9002	.2019	.1505	.5856	.1930
.70	2.1426	.9335	.1947	.1341	.6231	.1774
.80	1.8786	1.0646	.1807	.1151	.6765	.1486
.90	1.3253	1.5091	.1544	.0911	.7568	.0992

<그림 3>에서는 대체 가공절차를 갖지 않는 기존 생산시스템과의 비교를 나타낸 것이다. 그림을 통해서도 알 수 있듯이 가공의 유연성을 확보한 생산시스템은 기존의 시스템에 비해 자원의 이용률, 생산률, 평균대기시간에서 보다 우수한 성능을 나타내고 있다. 결론적으로 가공의 유연성을 구축한 생산시스템은 기존의 시스템에 비해 Server2의 이용률은 70.8%, 생산률은 29.5%가 향상된 것으로 나타났다. Robot의 이용률은 기존의 시스템에 비해 36%수준에 있으며 이로 인해 부품의 평균대기시간은 가공의 유연성을 갖는 시스템이 훨씬 낮은 것으로 파악되었다.

### 3. 결론

본 연구는 가공의 유연성이 구축된 생산시스템의 성능분석 및 기존 생산시스템과의 비교를 통한 평가를 목적으로 하였으며 결론적으로 생산률, 평균대기시간, 자원의 이용률에서 유연성이 구축된 생산시스템이 보다 우수한 것을 GSPNs의 생산시스템 모델링 및 성능분석을 통해 파악하였다. 유연성과 관련된 기존의 연구에서는 유연성에 대한 비현실적인 정량화작업에 많은 노력을 기울인데 반해 본 연구는 유연성을 생산시스템의 내재적 요소로 파악하고 이 요소가 다른 결과적 성능에 미치는 영향을 살펴 보았다는 점에서 의의가 있다.

그러나 GSPNs를 통해 모델링한 시스템의 작업내용이 단순하고, FMSs와 같이 실제 다양한 부품을 다양한 경로로 가공하는, 보다 복잡한 생산시스템 안에서의 유연성의 효과를 분석하지 못했다는 점이 본 연구의 한계라고 할 수 있다. 따라서 이 후의 연구과제는 보다 현실적인 작업내용을 갖는 생산시스템에서 유연성의 효과를 찾는 작업이 될 것이다.



<그림 3> 기존 생산시스템의 성능과 가공의 유연성을 구축한 시스템과의 성능비교

## 참고문헌

- [ 1 ] Askin, Ronal. A.(1993); "Modeling and Analysis of Manufacturing Systems," *John Wiley & Sons*.
- [ 2 ] Attieh, A., Brady, M. C.(1995), Knottenbelt, W. J., & Kritzing, P. S. *Functional and Temporal Analysis of Concurrent Systems*, Technical report, LASS-CNRS.
- [ 3 ] Bonvik, A. M. & Couch, C.(1996), *A Comparison of Production-Line Control Mechanism*, International Journal of Production Research, pp. 59-212.
- [ 4 ] Burman, M.(1998), *How We Helped Hewlett Packard Make Millions*, MIT press.
- [ 5 ] Chryssolouris, G.(1992), *A Decision-Making Approach to the Operation of Flexible Manufacturing Systems*, The FMS magazine, pp. 309-330.
- [ 6 ] Desrochers, Alan A. and Al-Jaar, Robert Y.(1995), "Applications of Petri-Nets in Manufacturing Systems," *IEEE Press*, pp. 55-170.
- [ 7 ] Girswin, S. B.(1994), "Manufacturing Systems Engineering," *Prentice Hall*.
- [ 8 ] Lim, S. H.(1987), *Flexible Manufacturing Systems and Manufacturing Facility in the United Kingdom*, International Journal of Operations and Production Management, Vol. 7, NO, 6, pp. 44-54.
- [ 9 ] Marco Antoniotti(1993), *Conceptual and Pragmatic Tools for Design and Control of Manufacturing Systems*, Now York Univ.
- [ 10 ] Nandkeolyar, U. & Christy, D. P.(1992), *Evaluating the Design of Flexible Manufacturing Systems*, The FMS magazine. pp. 267-292.
- [ 11 ] Narahari, Y. & Viswanaham, N.(1985), *A Petri-Nets Approach to the Modeling and Analysis of Flexible Manufacturing Systems*, Annal of Operation Research 3, pp. 449-472.
- [ 12 ] Narahari, Y. & Viswanaham, N.(1992), "Performance Modeling of Automated Manufacturing Systems," *Prentice Hall*, pp. 473-580.
- [ 13 ] Peterson, James. L.(1981), "*Petri-Net theory and the Modeling of Systems*," Prentice-Hall. pp. 31-113.
- [ 14 ] Sethi, A. K. & Sethi, S. P.(1990), *Flexibility: A Survey*, FMS magazine 2, pp. 289-328.
- [ 15 ] Son, Y. K. and Park, C. S(1987), Economic Measure of Productivity, Quality and Flexibility in Advanced Manufacturing Systems, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 6, No. 3, pp. 193-207.