

# 페트리네트를 이용한 자동생산시스템의 성능해석

안인석, 서기성, 이노성, 최준열, 우광방  
연세대학교 전기공학과

## Performance Analysis of Automated Manufacturing Systems Using Petri-Nets

Ihn Seok Ahn, Ki Sung Seo, Noh Sung Lee, Joon Youl Choi, Kwang Bang Woo  
Department of Electrical Engineering, Yonsei University

### ABSTRACT

This paper constitutes the simulator of the serial production line using Extended Petri Nets. We analyze each operations and effect of machine down, calculating the performance measures for improving the capability of manufacturing system. The performance measures are system efficiency, average utilization of machines, average buffer level, and so on. We intend to present the information of the operation states and various problem occurring in the systems.

### 1. 서론

자동화 시스템의 목표는 머신, 로봇, 자재취급 및 저장설비등의 재원을 사용하여 원재료와 구매품으로부터 일련의 제품을 만드는 것이다. 이러한 목표를 성취하는 과정에서 일련의 복잡한 활동이 발생하게 되며, 원하는 제품을 효율적으로 생산하기 위해 재원을 적절히 배치시키고 동기화하는 것이 필요하게 된다.

이를 위한 방안으로 각 셀의 작업능력을 평가하고 자동 상태를 점검하여, 각 공정의 생산성을 예측함으로써 최적의 작업상태를 도출할 수 있는 시뮬레이터의 개발이 필요하다. 시뮬레이터에서 생산라인의 성능평가 기준으로는 평균 생산율, 평균 기계이용율, 평균 버퍼수준등이 있으며, 이와같은 평가 기준치들을 계산함으로써 이미 설치된 생산 라인을 분석하고 이에 따른 문제점을 검토하여 해결 방안을 제시할 수 있다. 또한 새로운 생산 시스템을 설계할 경우에도 설계된 생산 시스템의 성능평가 지표들을 미리 구할 수 있어 설계에 필요한 사항들에 대한 정보의 수집 및 변경이 용이하다.

본 연구에서는 확장된 Petri net을 생산 시스템의 기본 모델 요소로 사용하여 직렬 생산라인의 시뮬레이터를 구성한다. 시뮬레이션을 통해 각 공정을 분석하고 성능평가 지

표를 계산하여 생산라인의 성능향상을 위한 구조적, 계통적 구성특성을 최적화한다. 그리고 생산라인의 운용시 발생하는 고장의 영향을 분석하여 시스템의 운용상태및 시스템에서 발생하는 제반문제에 대한 정보를 제시하고자 한다.

다음의 2절에서는 생산시스템 모델의 기술에 적합한 확장된 페트리네트에 대해 설명하고, 3절에서는 대상시스템을 소개하고 모델링한다. 그리고 4절에서는 성능분석을 위한 시뮬레이션 및 결과고찰을 한 후, 5절에서 결론을 맺는다.

### 2. 생산시스템 모델링을 위한 확장된 페트리네트

#### 2-1. 페트리 네트의 정의 및 성질

페트리 네트 C는 다음 네개의 구성요소로 이루어진 방향성 그래프이다.

$$C = \{ P, T, I, O \} \quad (1)$$

여기서,

P : 플레이스의 집합  $\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  ( $m > 0$ )

T : 트랜지션의 집합  $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  ( $n > 0$ )

I : P→T 입력함수 (input function)

O : T→P 출력함수 (output function)

페트리네트의 각 플레이스에 토큰을 적당히 배치함으로써 Marked Petri Net을 얻을 수 있으며 다음과 같이 정의한다.

$$G = \{ P, T, I, O, M \} \quad (2)$$

식(2)의 M은 marking 함수라고 하며, 토큰의 배치를 나타내는 벡터로서 다음과 같이 정의한다.

$$M = (m_1, m_2, \dots, m_n)^t$$

여기서, n은 플레이스의 수이고,  $m_i$ 는 플레이스  $p_i$ 내에

있는 토큰의 수  $N$ 이다.

## 2-2. 생산시스템 모델링을 위한 확장된 페트리 넷

앞 절에서의 페트리 넷으로 얻어진 모델은, 모델링될 시스템의 실제적 동작을 완전하게 표현하지 못한다. 본 절에서는 이를 해결하기 위해 다음과 같은 확장을 도입한다.

### 1) 플레이스

한가지 종류의 플레이스만으로는 시스템의 가능한 모든 상태를 완전하게 표현하기가 불충분하므로 그림 1과 같이 몇가지 형태의 플레이스를 정의한다.

### 2) 토큰과 아크

페트리 넷에서 제어, 정보, 자원, 그리고 부품의 흐름을 동시에 나타내기 위해서, 여러 종류의 토큰과 복수아크의 개념을 도입한다(그림 2).

### 3) 금지아크

그림 3과 같이 나타내며, 이것은 플레이스  $p_i$ 에 토큰이 있으면 트랜지션  $t_j$ 가 점화할 수 없다. 이 경우 토큰의 흐름은 없다.

### 4) 버퍼(buffer)

그림 4에서와 같이, 플레이스  $P_b$ 는 버퍼이며,  $k$ 는 버퍼의 용량을 나타낸다.

### 5) 고장발생

시스템 내의 머신고장을 나타낸다. 여기서  $t_1$ 은 MTBF(mean time between failure)이고,  $t_2$ 는 MTR(mean time to repair)를 나타낸다.(그림 5)

### 6) 시간개념

본래의 페트리 넷 구조는 시간의 개념을 갖고 있지 않다. 그러나, 생산시스템의 모델링에서는 시간의 추적(tracking)이 필수적이다. 여기서는 각 작업에 소요되는 시간을 각 트랜지션에 부여한다.

## 2.3 페트리넷 모델링 방법

**1단계** : 각 제품의 생산에 요구되는 활동(activity)과 자원(resource)을 확인한다.

**2단계** : 공정계획에서 주어진 선행관계에 따라서 활동을 요구한다.

**3단계** : 요구된 각 활동에 대해

- 그 활동의 상태를 나타내는 플레이스를 만들고 명칭을 붙인다.
- 위의 플레이스로의 출력아크를 갖는 트랜지션을 만든다.

- 위의 플레이스로부터의 입력아크를 갖는 트랜지션을 만든다.

**4단계** : 요구된 각 활동에 대하여,

- 단일 활동을 시작하는데 이용되는 각 자원들에 대해서 그러한 플레이스가 만들어 있지 않다면, 그러한 플레이스를 만들고, 명칭을 붙인다.
- 활동에 대한 시작트랜지션으로의 입력이 되는 아크를 갖는 모든 자원 사용가능 플레이스를 연결시킨다.
- 활동완료로 다시 사용가능하게 되는 재원으로 출력아크를 종료 트랜지션으로 부터 연결한다.

**5단계** : 시스템의 초기 마킹을 규정한다.

## 3. 생산 시스템 모델

### 3.1 대상 시스템

본 연구에서는 생산시스템의 모델링 및 시뮬레이션을 위해 그림 6과 같은 시스템을 사용한다. 이 시스템은 직렬 조립라인으로서 18대의 로봇과 컨베이어로서 구성되어 있다.

각 로봇트는 조립물이 도착하면 작업을 하고, 마지막 로봇트가 작업을 마치면 완성품이 된다. 그리고 로봇트 사이에는 3개의 버퍼가 있으며, 각 로봇트의 공정은 표 1과 같다.

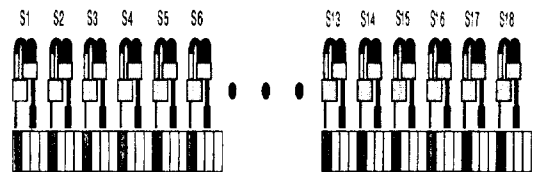


그림 6. 대상 시스템

표 1. 각 로봇트의 공정내용

ST	공정명	작업시간	버퍼	ST	공정명	작업시간	버퍼
1	NPUT	14.55	3	10	WASU	16.62	3
2	OIGC	14.30	3	11	ARGR	16.12	3
3	SUPO	14.33	3	12	CASL	17.46	3
4	OISP	16.80	3	13	GERU	13.68	3
5	DDSC	14.40	3	14	JILO	14.79	3
6	RESP	14.61	3	15	SOLU	16.17	3
7	RENP	15.89	3	16	POGR	15.97	3
8	RENY	14.51	3	17	JITE	15.53	3
9	SPHO	15.40	3	18	PERO	18.46	3

### 3.2 EPN을 사용한 생산시스템 모델링

로봇트는 작업상태, 고장상태, 수리상태, 대기상태를

갖는다. 로봇트 1대의 동작을 확장된 페트리네트로 모델링 하면 그림 7과 같다.

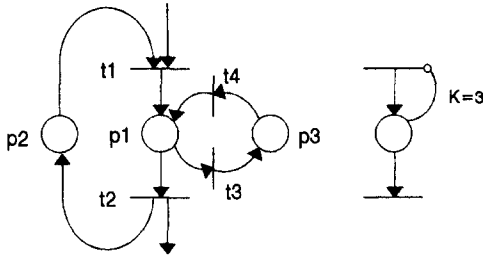


그림 7. 로봇트 1대의 EPN

그림 7에서 P<sub>1</sub>는 로봇트가 작업중, P<sub>2</sub>는 로봇트가 대기중, P<sub>3</sub>는 로봇트의 고장상태를 모델링한 것이다. t<sub>1</sub>은 로봇트 작업시작, t<sub>2</sub>는 작업종료를, t<sub>3</sub>는 로봇트의 MTBF, t<sub>4</sub>는 MTTR을 나타낸다. 작업시간은 t<sub>2</sub>에 부여하여, P<sub>1</sub>에 토큰이 있는 상태에서 t<sub>2</sub>에 부여된 시간을 지나야 비로소 t<sub>2</sub>는 점화할 수 있다. 그림 6의 시스템은 그림 7을 직렬로 연결하여 모델링하며 그림 8과 같다.

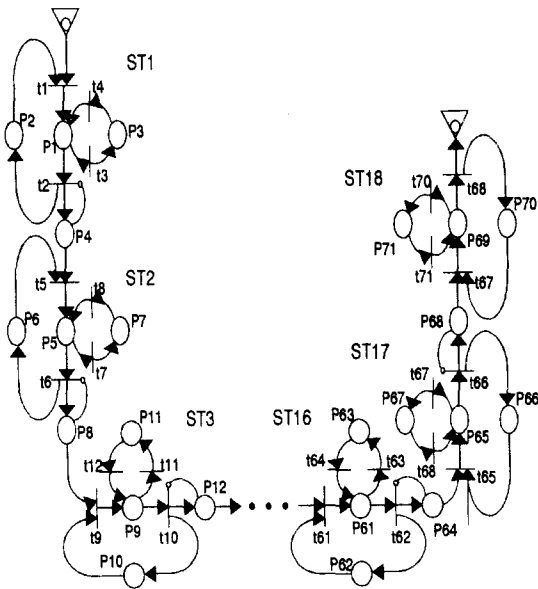


그림 8. 대상시스템의 EPN

#### 4. 생산시스템의 시뮬레이션 및 성능분석

##### 4.1 성능분석을 위한 시뮬레이션

직렬생산라인에서의 기계의 고장은 시스템 전체에 심각한 영향을 주며, 평가지표는 기계고장에 의해 많은 영향을 받는다. 본 장에서는 기계의 고장을 고려하였을 경우와 고

장을 고려하지 않았을 때의 시스템의 상태를 비교하여 성능 평가를 행한다. 기계의 고장주기와 수리시간은 실시스템에 근거하여 산출하였으며, 시뮬레이션은 하루를 단위로 하여 5회 반복수행하였다. 평가지표로는 생산효율, 각 기계의 가동율, 평균버퍼수준, 입력버퍼의 변화에 따른 총생산량과 기계가동율의 변화, 팔릿수의 변화에 따른 총생산량의 변화 등이며, 표 2-표 5, 그림 9-그림 11에 나타나 있다.

표 2. 생산효율

	총생산량	T/T	생산효율
고장 비고려 경우	1,560	18.46	0.054개/s
고장 고려의 경우	1,338	21.53	0.046개/s

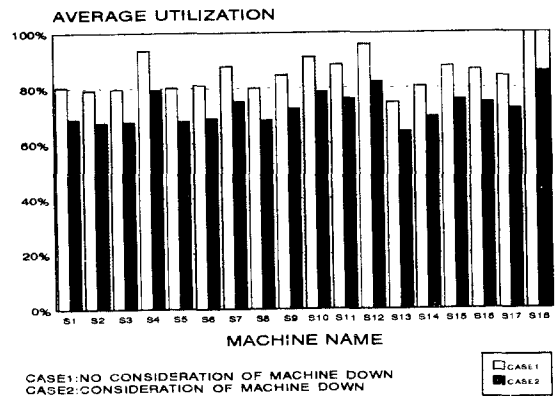


그림 9. 각 기계의 가동율

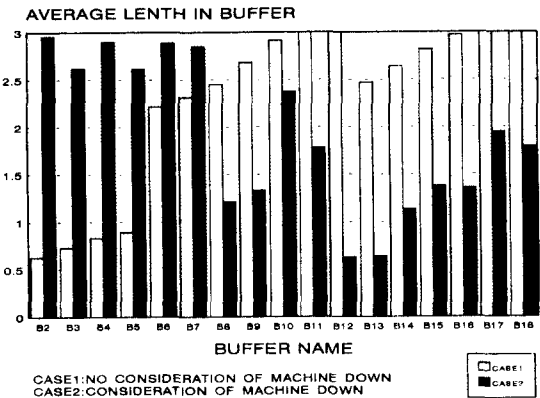


그림 10. 평균버퍼수준

표 3. 입력버퍼수에 따른 총생산량의 변화

버퍼수	2	3	4	5
총생산량	1289	1338	1337	1338

표 4. 입력버퍼수에 따른 각 기계의 가동율

버퍼수	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
2	0.6739	0.6427	0.6438	0.7548	0.6477	0.6574	0.7155	0.6518	0.6904
3	0.6863	0.6746	0.6770	0.7938	0.6804	0.6898	0.7507	0.6830	0.7254
4	0.6779	0.6693	0.6742	0.7946	0.6846	0.6980	0.7599	0.6916	0.7303
5	0.6765	0.6648	0.6677	0.7879	0.6785	0.6879	0.7487	0.6821	0.7201

버퍼수	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
2	0.7451	0.7215	0.7814	0.6134	0.6632	0.7250	0.7158	0.6947	0.8260
3	0.7854	0.7601	0.8224	0.6422	0.6948	0.7574	0.7458	0.7229	0.8576
4	0.7841	0.7588	0.8222	0.6428	0.6947	0.7580	0.7456	0.7228	0.8571
5	0.7780	0.7542	0.8170	0.6398	0.6928	0.7560	0.7459	0.7226	0.8679

PALLET NUMBERS vs. TOTAL PRODUCTS

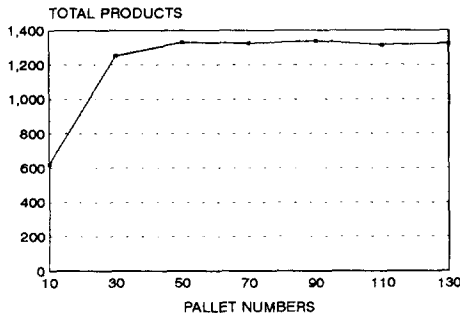


그림 11. 팰릿수에 따른 총생산량의 변화

4.2 결과 고찰

1) 생산효율

생산효율은 주어진 시간에 생산된 출력을 말한다. 이것은 시스템이 기대치를 만족할 수 있는가를 결정하는 중요한 성능분석치이다. 표 2에서 나타난 바와 같이 고장으로 인하여 14.2%의 효율저하가 발생한 것을 알 수 있다. 이 결과와 그림 8의 기계가동율을 살펴보면, 효율은 마지막 기계의 가동율과 직접적으로 비례함을 알 수 있으며 팰릿수와 입력버퍼 크기도 영향이 있다. 또한 효율을 저하시키는 원인은 고장 이외에 blocking, idle 시간등이 있다.

2) 각 기계의 가동율과 평균버퍼 수준

각 기계의 가동율은 총가동시간중 실제 작업을 하는데 소요된 시간의 비로서 구해지며, 그림 9에 고장을 고려한

경우와 고려하지 않은 경우를 비교하여 나타내었다. 그림 9와 표 1을 살펴보면, ST.4, 12, 18의 가동율이 주변보다 높은 것을 알 수 있다. 이는 작업시간이 주변보다 길기 때문이다.

그리고 각 로봇의 입력버퍼를 3개로 했을 경우의 평균버퍼수준은 그림 10과 같다. 그림 10에서 고장을 고려하지 않은 경우는 작업시간과, 고장을 고려한 경우는 MTBF, MTR과 관계가 깊음을 알 수 있다.

3) 입력버퍼의 변화에 따른 기계가동율의 변화

각 로봇에 설치되어 있는 입력버퍼 수의 영향을 조사하기 위해 버퍼수를 2개부터 5개까지 조정하면서 총생산량과 각 기계의 가동율의 변화를 표 3, 표 4에 나타내었다. 이 결과에서 각 기계의 입력버퍼수는 시스템 효율이 가장 높은 3개일 경우가 적당함을 알 수 있다.

4) 팰릿수의 변화에 따른 총생산량의 변화

그림 6의 시스템에 최적의 팰릿수를 구하기 위해 팰릿수의 변화에 따른 총생산량의 변화를 측정한 결과 90개일 경우가 적당함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 확장된 페트리네트를 이용하여 직렬생산라인의 성능해석을 위한 시뮬레이터를 구성하였다. 시뮬레이션을 통해 시스템의 각 공정을 분석하고 성능평가지표를 계산하였다. 그리고 생산라인의 운용시 발생하는 고장의 영향을 분석하여 시스템에서 발생하는 제반문제에 대한 정보를 제시할 수 있게 되었다.

앞으로는 기계고장 관련정보, 작업공정정보등이 보다 정확히 반영되고, 시스템의 동적특성을 더욱 상세하고 정확히 모델링하는 문제를 보완한다면 보다 현실적인 시뮬레이션이 될 것이다.

6. 참고문헌

[1] I. Hatono, K. Yamagata, H. Mamura, "Modeling and On-Line Scheduling of Flexible Manufacturing Systems Using Stochastic Petri Nets", IEEE Trans. Software Eng., Vol.17, No.2, pp.126-132 1991.

[2] R. H. Choi and E. M. Malstrom, "Evaluation of traditional work scheduling rules in a flexible manufacturing system with a physical simulator," Journal of manufacturing systems, Vol.7 No.1, pp.33-45, 1987

[3] J.L.Peterson, "Petri Nets and The Model of Systems

, Prentice Hall, 1981

- [4] R.Y.Al-Jaar, A.A.Desrochers, "Performance Evaluation of Automated Manufacturing Systems Using Generalized Stochastic Petri Nets", IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.6, No.6, pp.621 - 639, 1990.
- [5] K.P.Valavanis, "On the Hierarchical Modeling Analysis and Simulation of Flexible Manufacturing Systems with Extended Petri Nets", IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No.1, pp.94-110, 1990.
- [6] C.L.Beck, B.H.Krogh, "Models for simulation and discrete control of manufacturing systems", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp.305-310, 1986
- [7] B.H.Krogh, R.S.Sreenivas, "Essentially Decision-Free Petri Nets for real-time resource allocation", Proc. IEEE Int'l Conf. pp.1005-1011, 1987
- [8] J.C.Gentina, D.Corbeel, "Colored adaptive structured petri nets : A tool for the automatic synthesis of hierarchical control of FMS's", Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, pp.1166-1173, 1987
- [9] J.Martinez, P.Muro, and M.Silva, "Modeling, Validation, and Software Implementation of Production Systems Using higher level Petri Nets", Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, pp.1180-1185, 1987
- [10] H.Martins Shih, T.Sekiguchi, "A Timed Petri Nets and Beam Based On-Line FMS Scheduling System with Routing Flexibility", Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, pp.2548-2553, 1991.
- [11] B.Berthomieu, M.Diaz, "Modeling and Verification of Time Dependent Systems Using Time Petri Nets", IEEE Trans. Software Eng., Vol.17, No.3, pp.259-273, 1991

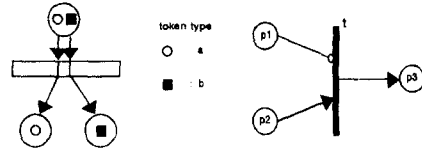


그림 2. 토큰과 복수아크      그림 3. 금지아크

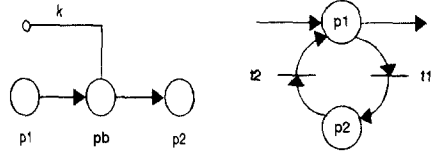


그림 4. 버퍼(buffer)      그림 5. 고장 넷

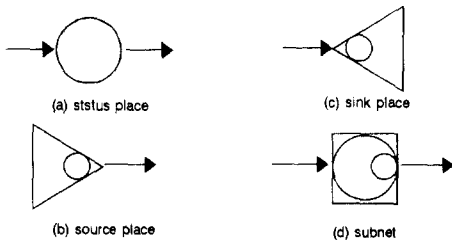


그림 1. 플레이스의 종류