

## 확장된 Petri-net을 이용한 FMS의 모델링 및 스케줄링

안인석, 서기성, 우광방  
연세대학교 전기공학과

### Modeling and Scheduling for FMS using Extended Petri Nets

Ihn Seok Ahn, Ki Sung Seo, Kwang Bang Woo

Department of Electrical Engineering  
Yonsei University

#### ABSTRACT

This paper deals with modeling and scheduling for flexible manufacturing systems(FMS). In modeling extended Petri nets are used to describe various and complex properties. To resolve multiple conflict without predefined properties, such as part selection, machine selection, rule-based scheduling method is introduced. This structure have a capability of on-line scheduling with systematic modeling description.

#### 1. 서론

최근들어 공장 자동화에 대한 관심이 집중되면서 로봇, NC 머신, 자동 저장/추출 장치등으로 구성된 FMS(Flexible Manufacturing System)를 효율적으로 스케줄링하여 다양한 제품을 짧은 시간안에 생산하는 문제에 대해 많은 연구가 진행중이다.

스케줄링을 위해서는 먼저 시스템에 대한 모델링이 필요하며, 수학적인 모델링 방법과 queuing network, Markov chain, state automata 그리고 Petri-net 등을 이용한 방법 등이 존재한다[1]. 기술 방법과 기술 내용, 수행해야 할 계산량 등을 고려할 때, 이미 그 장점이 널리 알려진 Petri-net이 생산 시스템의 모델링에 널리 쓰이고 있다 [2-6].

최근에는 순수한 Petri-net에 여러가지 성질과 기능을 추가시킨 확장된 Petri-net을 이용한 모델링과 시뮬레이션이 연구되고 있다.

FMS는 매우 복잡하고 이론적으로 분석하기가 어려우며, 시스템 상태의 계속적인 변화와 예측하지 못했던 상황의 발생등으로 인해 동적인 스케줄링이 필요하다.

Petri net은 concurrent하고 asynchronous한 대상 시스템의 체계적인 기술, 계층적 모델화, conflict의 표현, 그래픽적인 시각화 등 모델링 및 시뮬레이션 도구로서 적합한 기능을 갖고 있으나, 아직까지는 시스템의 다양한 이벤트 및 상태를 다 표현하지는 못하고 있으며 특히, 우선 순위가 정해지지 않은 conflict가 발생할 경우, 이를 결정하는 일

반적인 방법이 없다. 즉 여러가지 상황 변화에 따른 온-라인 스케줄링이 필요한 FMS에서는 이를 빠른 시간안에 결정할 수 있는 기법이 필요하다.[7]

본 연구에서는 기존의 연구된 여러가지 Petri-net의 내용을 일부 수정 보완한 확장된 Petri-net으로 FMS 생산라인을 모델링하고 부품의 선택 및 기계에의 할당에 대한 스케줄링을 수행하는 규칙 베이스 시스템을 구성한다. 이로서 Petri-net과 규칙 베이스의 결합을 통해 체계적인 모델링의 장점을 갖추면서 온-라인 스케줄링이 가능하게 된다.

다음의 2절에서는 FMS 모델의 기술에 적합한 확장된 페트리 네트에 대해 설명하고, 3절에서 대상이 되는 생산 시스템을 소개하고 이를 모델링 한다. 그리고 4절에서 규칙 베이스를 이용한 스케줄링 방법에 대해 설명한다.

#### 2. FMS 모델링을 위한 확장된 페트리 네트

페트리 네트는 시스템의 정보와 제어의 흐름을 모델링하기 위한 그래프 모델로서, 시스템내의 사건(event)의 동시성(concurrency)과 시간의 선행관계(precedence) 및 동기성을 갖는 것을 모델링 하는데 적합한 성질을 가지고 있어 복잡한 FMS를 모델링하는데 사용된다.

##### 2-1. 페트리 네트의 정의 및 성질

페트리 네트 C는 네개의 구성요소로 이루어진 방향성 그래프이다[6].

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

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 :  $P \rightarrow T$  입력함수 (input function)

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

페트리 네트를 그림으로 나타낼 때는 방향성 아크(arc)와 두 종류의 마디 즉, 플레이스는 원으로, 트랜지션은 막

대로 나타낸다. 방향성 아크는 트랜지션과 플레이스의 관계를 나타내며, 플레이스는 조건(condition), 트랜지션은 사건(event)을 나타낸다.

플레이스 내의 검은 점(token)은 플레이스가 조건을 만족함을 나타내며, 페트리 넷에서 토큰의 표시(marking)는 시스템의 상태(state)를 나타낸다.

페트리 넷  $C = \{P, T, I, O\}$ 와 표시  $M$ 을 합쳐서 Marked Petri Net라고 하며, 다음과 같이 정의한다.

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

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

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

여기서,  $n$ 은 플레이스의 수이고,  $m_i$ 는 플레이스  $p_i$ 내에 있는 토큰의 수  $N$ 이다.

입력의 트랜지션  $t_i$ 의 모든 입력 플레이스에 하나 이상의 토큰이 있을 때, 트랜지션은 인에이블(enable)되어 있다고 하며, 인에이블한 트랜지션은 점화(firing)될 수 있다. 점화 후에는 점화된 트랜지션에 입력 플레이스로 연결된 모든 플레이스에서 연결된 아크 수만큼의 토큰이 감소되며, 출력 플레이스에는 아크 수만큼의 토큰이 증가된다.

## 2-2. 확장된 페트리 넷

페트리 넷은 생산시스템, 논리제어기, 컴퓨터망, 통신 프로토콜, 운영체제의 모델링에 사용되고 있다. 그러나 앞에서의 페트리 넷으로 얻어진 모델은, 모델링될 시스템의 실제적 동작을 완전하게 표현하지 못한다. 즉, 1) 페트리 넷이 실행될 때, 한 가지 종류의 토큰만으로 시스템에 흐르는 일련의 정보(information) 또는 제어(control)를 나타내기 때문에 부품(parts), 자원(resources), 정보, 제어의 존재와 흐름을 동시에 나타내지 못한다. (2) 복수의 입력과 출력을 갖는 트랜지션에 있어서 이를 통하는 토큰 흐름의 정확한 표시가 없기 때문에 모델링되는 시스템의 구조와 동작에 대한 모호함을 나타내게 한다.

본 논문에서는 먼저 새로운 형태의 확장된 페트리넷(Extended Petri Nets:EPN)을 제안하고, 그것을 사용하여 FMS를 모델링 하고자 한다.

앞 절에서 살펴 본 페트리 넷의 제한요인에 기초하여 다음과 같은 확장을 도입한다.

### 1) 플레이스

한가지 종류의 플레이스만으로는 시스템의 가능한 모든 상태를 완전하게 표현하기가 불충분 하므로 다음과 같이 몇 가지 형태의 플레이스를 정의한다.

#### a) 상태 플레이스(status place)

이 플레이스는 본래의 페트리 넷이론의 플레이스와

동일한 것으로서 시스템의 상태를 나타낸다(그림 1(a)), 전형적인 사용 예는 기계사용가능 유무, 공정개시, 혹은 공정완료등이다.

#### b) 소오스 플레이스(source place)

이 플레이스는 시스템내로의 새로운 자원, 정보, 또는 부품이 도입됨을 나타내는데(그림 1(b)), 넷의 보존성(conservative)에 의하면 넷내에의 토큰의 수는 생성되지도 소멸되지도 않는다. 소오스 플레이스와 싱크 플레이스의 개념은 토큰의 보존성질을 유효하게 한다.

#### c) 싱크 플레이스(sink place)

이 플레이스는 토큰의 종료를 나타내며, 싱크에 이른 토큰은 넷에서 사라진다(그림 1(c)). 넷내의 각각의 소오스 플레이스는 대응하는 싱크 플레이스가 있다. 이것은 넷내의 토큰수가 제한없이 증가하지 못하게 한다.

#### d) 서브넷(subnet)

이것은 모델링의 편의를 위해서 쓰이며, 앞에서 언급한 것들의 조합으로 이루어진다(그림 1(d)). 이는 모듈별 설계가 용이하게 하며, 넷의 도달성(reachability)을 증가시킨다. 그림에서 상자의 원은 서브넷을 나타내며, 작은 원은 서브넷에서의 마지막 플레이스를 나타낸다. 이는 서브넷이 동작종일 때 또는 수행이 완료되었을 때 그래픽적으로 나타내는 것이 가능해진다.

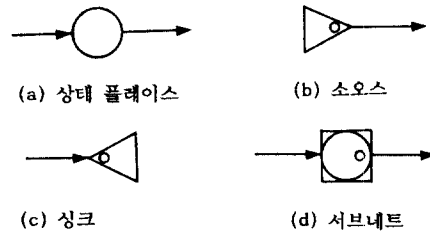


그림 1. 플레이스의 종류

### 2) 토큰과 아크

페트리 넷에서 제어, 정보, 자원, 그리고 부품의 흐름을 동시에 나타내기 위해서 그것들 사이를 분리하여 구별하기 위해서 여러 종류의 토큰과 복수아크의 개념을 도입한다. 그림 2에서와 같이 서로 다른 토큰을 정의하고 각각의 경우를 나타내도록 하는데, 이러한 토큰은 동일한 플레이스 내에 있을 수 있으며, 모델링의 표현능력을 증가시킨다.

### 3) 조건 분기트랜지션

하나의 입력 플레이스와 복수개의 출력 플레이스를 갖는다. 이는 입력신호로부터 얻은 응답신호를 참고하여 자신의 출력 플레이스를 정하고, 정하여진 출력 플레이스에 대하여 점화한다(그림 3).

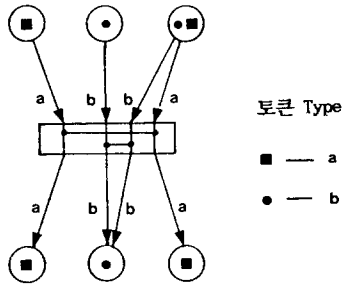


그림 2. 트랜지션, 토큰의 형태

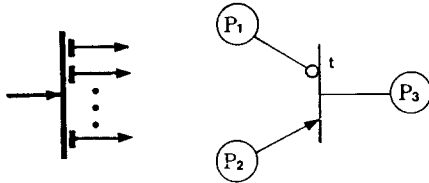


그림 3. 조건분기 트랜지션

그림 4. 금지아크

4) 금지아크

그림 4에서와 같이 플레이스  $p_1$ 로 부터 트랜지션  $t$ 에 이른 아크를 금지아크(inhibitor arc)라고 하는데, 이것은 플레이스  $p_1$ 에 토큰이 있으면 트랜지션  $t$ 가 점화할 수 없다 [8]. 이 경우 토큰의 흐름은 없다.

5) 버퍼(buffer)

그림 5에서와 같이 플레이스  $p_b$ 는 버퍼를 나타내며 세개의 아크를 갖는다. 버퍼의 용량을 나타내기 위해 앞에서 언급한 금지아크를 사용한다.  $k$ 는 버퍼의 용량으로서, 버퍼가  $k$ 개의 토큰을 갖게 되면 강제아크에 연결된 아크는 디세이블(disable)하게 된다.

6) 고장발생

페트리 네트의 실행시 머신  $m_i$ 이 고장이 나게 되면, 그 정보를 갖는 토큰이 플레이스  $p_2$ 로 이동한다. 여기서  $t_1$ 은 MTBF(mean time between failure)이고,  $t_2$ 는 MTTR(mean time to repair)를 나타낸다.

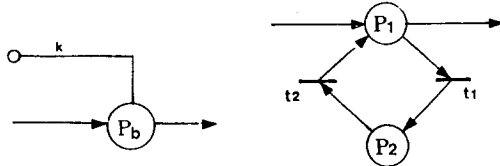


그림 5. 버퍼네트

그림 6. 고장네트

7) Timed Petri Nets (TPN)

본래의 페트리 네트 구조는 시간의 개념을 갖고 있지 않다. 그러나, 스케줄링 문제에 있어서 사건의 발생순서는 중요한 것이며, 시간의 추적(tracking)은 필수적이다. 따라서

본 논문에서는 생산공정을 나타내기 위해 Timed Petri Net(TPN)을 사용한다[10-11]. TPN은 시간 개념이 포함된 확장된 페트리 네트의 일종으로서, 페트리 네트에 시간개념을 부여하는 방법에는 플레이스에 부여하는 방법과 트랜지션에 부여하는 방법이 있다. 여기서는 각 작업에 소요되는 시간을, 작업이나 기계고장등의 사건을 나타내는 각 트랜지션에 부여한다. 마크트 페트리 네트  $G=(P, T, I, O, M)$ 에 대하여 TPN은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$M_t = \{ P_1, T_1, I, O, M, d \}$$

여기서,  $d: T_1 \rightarrow N$ ,  $N$ 은 자연수이며, 트랜지션  $t_1$ 에 부여된 시간을  $d_1$ 으로 표기하면  $d$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$d = \{ d_1, d_2, \dots, d_m \}$$

3. 생산 시스템 모델

3.1 대상 시스템

본 연구에서는 FMS 생산라인의 모델링을 위해 Choi와 Malstrom[8]에 나와 있는 예를 사용하였다.(그림 7) 생산라인의 구성 요소는 다음과 같다.

- 1) 자동 저장/추출 시스템 (Automatic Storage/Retrieval System)
- 2) 8 개의 저장 영역(Storage Area)
- 3) 6 개의 기계 센터(Machine Center)
- 4) 로봇 및 2 대의 수직 선반으로 구성된 선반셀(Turning Cell)
- 5) 부품 운반을 위한 컨베이어

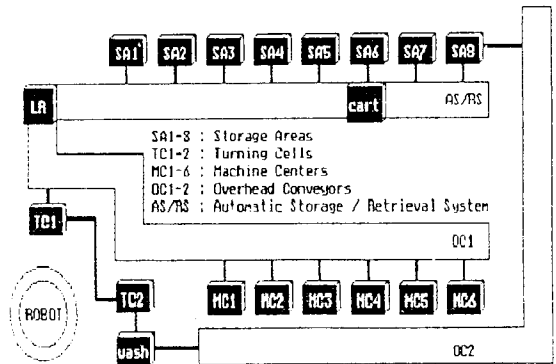


그림 7. FMS 생산 라인

자동 저장/추출 시스템(AS/RS)은 부품을 저장하고 추출하는 기능을 담당하며 양방향 운송차(AS/RS CART)를 포함한 다.

부품은 모두 7 가지로, 이 중 부품 1, 3, 5, 7 은 생산 라인에서 6 개의 기계 센터중 한 곳에서만 가공하면 완성품이 되고 부품 2, 4, 6 은 선반에서의 사전가공이 필요한 부품들이다. 선반에서의 사전 가공이 끝난 부품들은 저장영역 8에 저장된다.

운송차와 기계 센터 및 선반셀은 작업 수행 도중 고장이 날 수 있으며, 고장 시간과 수리 시간은 지수적으로 분포되어 있다고 가정한다. 스케줄링은 운송차가 원점에 있을때 가공할 부품과 작업이 수행되는 기계를 선택하며 부품의 현재 생산 진행 상황 및 기계등의 상태를 고려하여 동적으로 행해진다.

### 3.2 페트리 넷 모델링

본 절에서는 앞의 FMS 시스템을 몇개의 부시스템으로 나누어 제시된 EPN로 모델링한다. 그림 8은 운송차(cart)에 대한 것이고, 그림 9는 머신 센터(machine center), 그리고 그림 10은 터닝 셀(turning cell)을 나타낸 것이다. 그림 11에 이들을 모두 합성한 전체 시스템에 대한, EPN이 표현되어 있다.

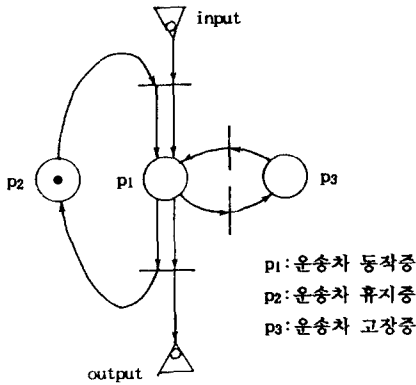


그림 8. 운송차의 EPN

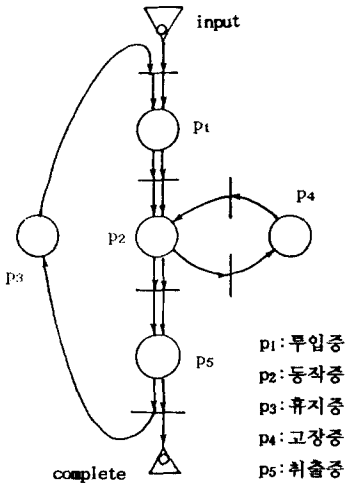


그림 9. 머신스테이션의 EPN

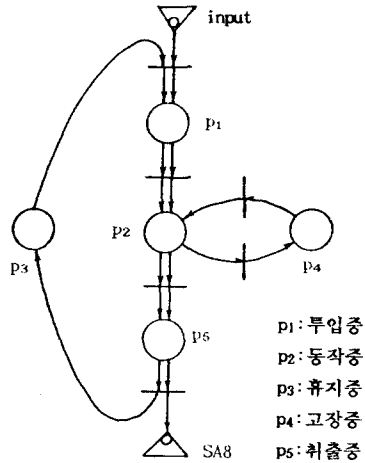


그림 10. T/C의 EPN

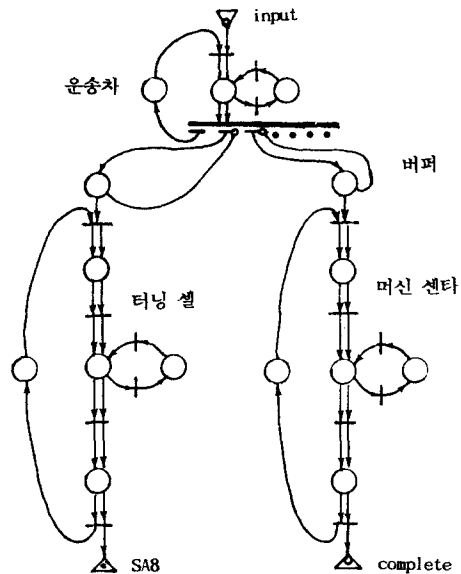


그림 11. 전체 시스템의 합성 EPN

### 4. 규칙 베이스를 이용한 스케줄링

앞절에서와 같이 복잡한 FMS 생산라인을 페트리 넷으로 모델링 할 경우 동시에 인에이블 한 복수개의 트랜지션이 존재하므로, 이를 해결하기 위한 방법이 필요하다. 트랜지션에 우선순위와 하중(weight)를 주어서 conflict를 해결하는 방법도[] 제시되고 있으나 이는 시스템의 변화 상황에 즉시 대처하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 비교적 최적에 가까운 대안을 제시해 주고, 온라인 스케줄링이 가능하도록 트랜지션의 conflict를 규칙베이스를 통해 해결하고자 한다.

대상 FMS 생산 라인 은 부품의 선정과 기계에의 할당 과

정에서 conflict가 발생하므로 규칙 베이스를 부품 선정 규칙과 기계센터 선정 규칙으로 나누어 구성하고 현재의 시스템 상태에 따라 routing을 결정한다. 규칙 베이스는 다음과 같이 구성된다.

#### 1) 부품 선정 규칙

부품선정 규칙은 다음과 같은 6가지를 사용한다.

- RANDOM 규칙 : 부품을 임의로 선정
- FSFS(First storage area, First Serviced) 규칙 : 가장 가까운 저장영역 선택
- DDATE(Due Date) 규칙 : 완료 예정 시간이 가장 짧은 가공품을 선정
- S/PT 규칙 : 가공품의 여유 시간과 남은 가공 시간과의 비율이 가장 작은 것을 선정

#### 2) 기계센터 선정 규칙

- RANDOM 규칙 : 임의의 기계센터를 선정
- FMFS(First Machine, First Serviced) 규칙 : 가장 가까운 기계센터 선정
- NINQ 규칙 : 기계센터의 버퍼에서 대기하는 부품 수가 가장 적은 것을 선택
- WINQ 규칙 : 버퍼에 대기하는 부품의 총 수행 시간이 가장 짧은 기계센터를 선정

각종 규칙 들은 IF THEN 형태를 취하며 규칙 베이스 시스템은 위의 부품 선정 규칙과 기계센터 선정 규칙을 포함하여 부품의 현재 생산 상황, 기계의 고장 및 버퍼 상태를 참조하여 각종 규칙들을 선택하는 메타 규칙으로 이루어진다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 고장과 부품 및 가공 경로 선택이 가능한 FMS 생산라인의 모델링과 스케줄링을 위한 복합적인 구조를 제안한다. FMS 모델링에는 이벤트가 동시적이고 비동기적으로 발생하는 시스템의 체계적인 기술에 적합한 페트리 네트를 사용하였다. 단순한 페트리 네트는 복잡한 FMS 생산라인의 기술에 부적합하므로 여러가지 기능을 추가시킨 확장된 페트리 네트를 도입하였다. 그리고 우선 순위가 정해지지 않은 conflict에 대한 문제를 해결하기 위해 규칙 베이스를 구성하였으며, 이를 중심으로 부품 및 가공 경로에 대한 스케줄링이 이루어진다. 이러한 구조는 체계적인 모델링의 장점을 살리면서 상황 변화에 즉시 대처할 수 있는 스케줄링의 기능을 갖추고 있다.

앞으로는 제안된 모델에 대한 다양한 성능 평가를 통한 효율적인 규칙 베이스의 구축과 규칙 베이스의 페트리 네트 표현을 강화하여 페트리 네트에 기초한 FMS 스케줄러를 구현하는 것이 요구된다.

#### 6. 참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] J.L.Peterson,"Petri Nets and The Model of Systems", Prentice Hall, 1981
- [7] 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.
- [8] 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
- [9] 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.
- [10] H.Martins Shih,T.Sekiguchi,"A Timed Petri Nets and Beam Based On-LineFMS 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