

## 일반화된 확률 페트리 네트의 축소에 관한 연구

홍지민, 이기동, 이범희  
서울대학교 공과대학 제어계측공학과

### A Study on the Reduction of Generalized Stochastic Petri Net

Jee-Min Hong, Ki-Dong Lee, Bum-Hee Lee  
Dept. of Control & Instrumentation Eng., Seoul National Univ.

#### Abstract

A reduction method of GSPN (generalized stochastic Petri net) is proposed. A GSPN is basically a SPN (stochastic Petri net) with transitions that are either timed or immediate. Then the proposed method is defined on the basis of the dynamic behavior and the structure of the net. The reduction preserves the properties such as liveness, boundedness, and allows easy analysis of the GSPN.

#### 1. 서론

생산시스템 분야는 상품제조의 경비절감과 소비자의 다양한 욕구를 만족시키는 다품종 소량생산 체제로의 전환을 위하여 생산설비의 자동화, 고속화, 유연화를 추구하고 있다. 따라서 전 세계적으로 FA(factory automation)를 확산시켜 나가려는 움직임이 활발히 진행되고 있는데, 이것은 최근 급격히 발달한 전자기술로 인하여 더욱 가속화되었으며, 특히 FA기술의 기본개념인 FMS(flexible manufacturing system)에 대한 기술개발은 컴퓨터기술 및 로봇기술, 인공지능기술의 개발과 더불어 더욱 발전하고 있다.

FMS, 컴퓨터망, 통신망, 교통시스템 등과 같이 인간이 만든 동적 시스템을 이산 현상 시스템(discrete event dynamic system)이라 한다. 이산 현상 시스템은 이산사건에 의해 동작되며 상태가 변화한다. 이산 사건들은 시스템의 구성요소에서 발생하는 불연속적인 변화를 나타내는 것으로 그 발생이 이산적이고 비동기적이라는 것이 특징이다. 이와 같은 이산 현상 시스템을 분석하기 위해서는 시스템에 대한 적절한 모델링이 필요하다. 이산 현상 시스템을 모델링하는 방법에는 여러가지가 제안되어 있고 분류도 다양하다. Ho[1]는 시스템 모델링 방법을 시간적, 공간적, 논리적인 성질에 따라 분류하

였다. 그 가운데 논리적(logical) 모델로 분류되고 있는 페트리 네트(Petri Net)는 망이론에 기초를 둔 모델링 방법[2]으로, 시스템을 도식적, 계층적으로 나타내므로 복잡한 시스템을 모델링하고 분석하는데 가장 유용하다. 특히 동기화된 사건, 논리적 선후관계, 구조적 상관관계를 가진 이산 현상 시스템의 모델링 [3-11]에 적합하다. 그러나 사건이나 상태의 집합이 증가함에 따라 네트가 매우 복잡해져 분석하기 어려우므로, 분석을 용이하게 하기 위해서는 가능한 한 네트의 사건이나 상태를 축소(reduction)하는 방법[12]이 필요하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 페트리 네트의 분류와 정의 및 성질에 대하여 설명하고, 모델링된 페트리 네트를 축소하는 방법에 대하여 3장에서 기술한다. 4장에서는 그 방법에 대하여 특성 분석을 행하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

#### 2. 페트리 네트 (Petri Net)

##### 2.1 페트리 네트의 분류

현재까지 이용되고 있는 페트리 네트는 매우 다양하다. 따라서 이를 분류하는 방법도 각자의 관점에 따라 여러가지가 있을수 있으나 일반적으로, 1) 고전적 의미의 페트리 네트(ordinary Petri net), 2) 일반화된 페트리 네트(generalized Petri net), 3) 착색 페트리 네트(colored Petri net), 4) 확장 페트리 네트(extended Petri net), 5) 시간 페트리 네트(timed Petri net), 그리고 6) 확률 페트리 네트(stochastic Petri net) 등으로 나눌 수 있다. 각각의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

고전적 의미의 페트리 네트는 동시 다발적인 이산 현상 시스템의 모델링, 성능평가, 제어 등을 위해서 고안된, 시각적인 그래프를 이용한 모델링 방법이고, 트랜지션의 점화에 따른 토큰의 이동이 한개 이상일 경우를 표현하기 위하여 다중

아크(arc)를 도입한 것이 일반화된 페트리 넷이다. 특별한 언급이 없는 한 페트리 넷이라 하면 일반화된 페트리 넷를 의미한다.

착색 페트리 넷은 시스템을 간결하고 효율적으로 표현하기 위하여 플레이스와 트랜지션에 관련된 칼라(color)의 집합을 도입한 것으로, 트랜지션 점화의 칼라와 입력 플레이스 토큰의 칼라 사이에는 함수적인 관계가 성립[13-14]한다. 확장된 페트리 넷은 넷의 표현력을 향상시키기 위하여 부가적인 플레이스, 트랜지션, 토큰, 아크 등을 도입한 것으로 시스템의 다양성을 표현하기에 적합[15]하다.

시간 페트리 넷[16]은 트랜지션이 활성화(enabled) 상태가 된 이후 점화(firing)하는데 소요되는 지연시간을 나타낼 수 있는 것으로 지연시간은 확정적(deterministic)일 수도 있고 확률적일 수도 있으나 일반적으로 확정적인 것만을 의미한다. 이에 반해 확률 페트리 넷은 지연시간이 지수분포를 가지는 확률적인 값을 가지는 것으로, 점화 지연시간이 걸리지 않는 트랜지션을 포함한 경우를 일반화된 확률 페트리 넷 (generalized stochastic Petri net : GSPN) [9, 17-18]라 하고, 임의의 확률분포를 가지는 점화시간까지 고려하는 경우를 확장 확률 페트리 넷 (extended stochastic Petri net : ESPN) [19]라고 한다.

## 2.2 페트리 넷의 정의 및 성질

페트리 넷 PN은 5개의 구성요소로 이루어진 방향성 그래프이다.

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

여기서

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  : 플레이스의 집합

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  : 트랜지션의 집합

$I :: P \times T \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$  : 입력함수

$O :: P \times T \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$  : 출력함수

$M : P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$  : 표시(marking)

페트리 넷를 그림으로 표현하면 두종류의 노드(node)와 방향성 아크(arc)로 구성된다. 두 종류의 노드는 원과 막대로, 조건(condition)을 나타내는 플레이스는 원으로, 사건(event)을 나타내는 트랜지션은 막대로 표현된다. 방향성 아크는 트랜지션과 플레이스의 관계를 나타내는데, 입력함수는 트랜지션의 입력 플레이스를, 출력함수는 트랜지션의 출력 플레이스를 각각 정의한다. 플레이스 내의 검은 점(token)은 플레이스가 조건을 만족함을 나타내며 페트리 넷에서 토큰의 표시는 시스템의 상태를 나타낸다.  $M$ 은 표시함수이며 토큰의 배치를 나타내는  $n \times 1$  벡터로서  $M(p_i)$ 는 플레이스  $p_i$  내에 있는 토큰의 갯수이다.

임의의 트랜지션  $t_j$ 의 모든 입력 플레이스에 입력함수에 서 정의된 갯수 이상의 토큰이 있을 때 그 트랜지션은 활성화되어 있다고 하며, 활성화되어진 트랜지션은 점화(firing)된다. 그 후에는 트랜지션  $t_j$ 의 모든 입력 플레이스에서는 연결된 아크 수만큼의 토큰이 감소되며 출력 플레이스에서는 아크 수만큼의 토큰이 증가된다. 이를 수식으로 표현하면 다음의 식과 같다.

$$M'(p_i) = M(p_i) + O(p_i, t_j) - I(p_i, t_j) \quad \forall p_i \in P \quad (2)$$

여기에서  $M'(p_i)$ 은 트랜지션  $t_j$ 의 점화 후 생기는 새로운 표시함수로, 이때  $M'$ 은  $M$ 으로부터 도달가능(reachable)하다고 한다. 따라서 주어진  $M_0$ 로부터 도달가능한 모든  $M'$ 들의 집합(reachability set)을  $R[M_0]$ 로 표시한다.

플레이스  $p_i$ 의 표시가 다음의 식(3)을 만족하면 플레이스  $p_i$ 는  $k$ -바운드되어( $k$ -bounded) 있다고 한다.

$$M(p_i) \leq k \quad \forall M \in R[M_0] \quad (3)$$

또한 활성화가 가능한 트랜지션이 하나도 존재하지 않는 표시  $M(\in R[M_0])$ 이 존재할 경우, 이 때의 페트리 넷는 교착상태(deadlock)가 되었다고 한다. 이러한 교착상태가 발생하지 않는 페트리 넷를 라이브(live)하다고 한다.

일반화된 확률 페트리 넷 GSPN은 식(1)에 트랜지션 레이트(transition rate)를 추가하여 다음과 같이 정의된다.

$$GSPN = \{P, T, I, O, M, \Lambda\} \quad (4)$$

여기서

$\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$  : 트랜지션 레이트

## 3. 일반화된 확률 페트리 넷의 축소

### 3.1 정의

주어진 GSPN의 일부분을 서브넷(subnet)이라고 한다. 하나의 서브넷이 주어지면 그 서브넷 내의 노드들 가운데 외부에서 그 서브넷으로 들어오는 아크와 관계있는 노드를 입력 노드(input node : IN)로 정의하고, 반대로 서브넷에서 외부로 나가는 아크와 관계있는 노드를 출력노드(output node : ON)로 정의한다. 또한 입력 노드, 출력 노드가 아닌 서브넷 내의 나머지 노드들을 중간 노드(between node : BN)로 정의한다.

하나의 노드에서 다른 노드로의 경로(path)를 다음과 같이 정의한다.

$$n_i \Rightarrow n_o = \{(n_1, n_1), (n_1, n_2), (n_2, n_3), \dots, (n_k, n_o)\} \quad (6)$$

즉, 시작하는 노드에서 중간에 통과하는 노드들의 순서쌍들로 이루어진 집합을 경로로 정의한다.

주어진 GSPN을 축소하기 위해서는 트랜지션의 동적 특성을 고려하여야 하므로, 식 (4)에서 정의한 GSPN의 트랜지션율을 다음과 같이 두 부분으로 나누어 정의한다.

$$T = T_i \cup T_o \quad (5)$$

$T_i$  : 순간적인 트랜지션

$T_o$  : 트랜지션 레이트가 지수분포인 트랜지션

### 3.2 일반화된 확률 페트리 넷의 축소 방법

일반화된 확률 페트리 넷이 주어지면 이것을 축소한 페트리 넷은 GSPN'는 다음의 식 (7)과 같이 정의한다.

$$GSPN' = \{P', T', I', O', M', \Lambda'\} \quad (7)$$

#### (1) 순차적인 서브네트의 축소

다음의 조건들을 만족하는 서브네트를 순차적인 서브네트로 정의한다. 즉, 트랜지션-플레이스-트랜지션으로 연결되어 순차적으로 동작되는 서브네트이다.

$$a) IN \cup ON = \{t_i, t_o\}, BN = \{p_i\}, M(p_i) = 0$$

$$b) t_i \Rightarrow t_o = \{(t_i, p_i)(p_i, t_o)\}$$

$$c) \exists k \in N^+, O(p_i, t_i) = k \cdot I(p_i, t_o)$$

$$\text{단 } t_i \in T_i \quad (8)$$

$$\text{또는 } \exists k' \in N^+, I(p_i, t_o) = k' \cdot O(p_i, t_i)$$

$$\text{단 } t_o \in T_o \quad (9)$$

여기서  $N^+$ 는 양의 정수의 집합이다.

$$d) \text{만일 } t_i \text{를 포함하는 회로가 존재하며 } t_o \in T_o \text{ 일 때 } k = k' = 1$$

$$e) \forall p \neq p_i, O(p, t_i) = 0 \quad k' > 1$$

$$f) \text{만일 } t_i, t_o \in T_o \text{ 이면}$$

$$\forall p \neq p_i, I(p_i, t_o) \geq 1, O(p_i, t_i) \geq 1$$

일 때는  $t_i$ 의 출력 플레이스 =  $t_o$ 의 입력 플레이스

따라서 위의 서브네트를 축소시키면 하나의 새로운 트랜지션으로 표현할 수 있으며, 이를 식으로 표현하면 다음과 같이 축소된 페트리 넷을 얻을 수 있다.

$$a) P' = P - \{p_i\}$$

$$b) T' = T - \{t_i, t_o\} + \{t^*\}$$

$$c) t = t^* \text{ 이면}$$

$$I'(p, t) = k' \cdot I(p, t_i) + I(p, t_o) \quad (10)$$

$$d) t = t^* \text{ 이면}$$

$$O'(p, t) = k \cdot O(p, t_o) + O(p, t_i) \quad (11)$$

$$e) \Lambda' = \Lambda - \{\lambda_i, \lambda_o\} + \{\lambda^*\}$$

$$\text{여기서 } \lambda^* = \lambda_i + \lambda_o \quad (12)$$

다음의 그림 1에서는 순차적인 서브네트의 몇가지 경우에 대하여 축소한 결과를 보여준다.

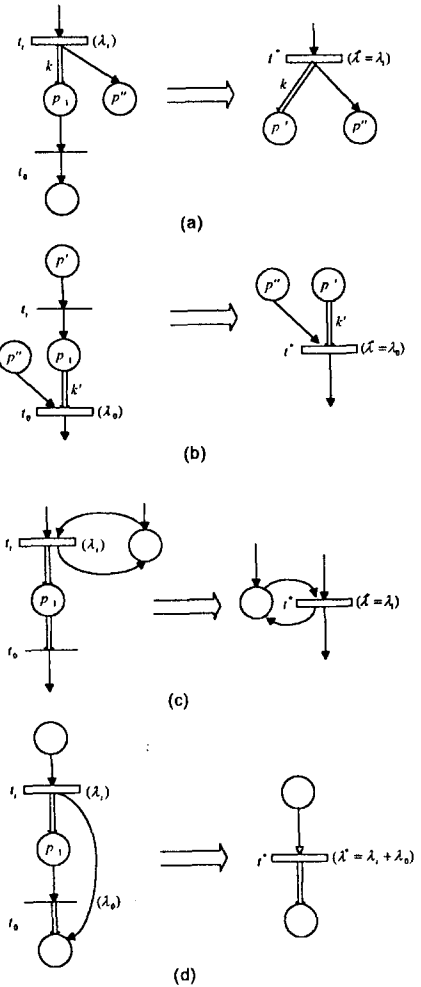


그림 1 순차적인 서브네트의 축소

Fig. 1 Reduction of sequential subnet

#### (2) 병렬적인 서브네트의 축소

다음의 조건들을 만족하는 서브네트를 병렬적인 서브네트로 정의한다. 즉, 트랜지션이 평행하게 연결되어 병렬적으로 동작되는 서브네트이다.

$$a) \{p_{i1}, \dots, p_{ia}, \dots, p_{ix}\} \subseteq IN \quad x \in N_n$$

$$\{p_{o1}, \dots, p_{ob}, \dots, p_{oy}\} \subseteq ON \quad y \in N_n$$

$$BN = \{t_1, t_2, \dots, t_l, \dots, t_q\} \quad q \in N_m$$

$$n(BN \cap T_o) = t_o \leq 2$$

$$b) I(p_{ia}, t_i) > 0 \quad j \in N_q, a \in N_x$$

$$O(p_{ob}, t_i) > 0 \quad j \in N_q, b \in N_y$$

$$c) \forall p_{1a}, p_{0b} \exists k_a, k_b' \in \mathbb{N}^+$$

$$I(p_{1a}, t_i) = k_a \quad (13)$$

$$O(p_{0b}, t_i) = k_b' \quad (14)$$

따라서 위의 서브네트도 하나의 새로운 트랜지션으로 축소할 수 있으며, 다음과 같이 축소된 페트리 네트를 얻는다.

$$a) P' = P$$

$$b) T' = T - \{t_1, \dots, t_q\} + \{t^*\}$$

$$c) t = t^*, p = p_{1a} \text{ 이면, } I'(p, t) = k_a \quad (15)$$

$$d) t = t^*, p = p_{0b} \text{ 이면, } O'(t, p) = k_b' \quad (16)$$

$$e) \Lambda' = \Lambda - \{\lambda_1, \dots, \lambda_q\} + \{\lambda^*\}$$

여기서

$$\lambda^* = \lambda_1 + \dots + \lambda_q \quad t_e \leq 1$$

$$= \lambda_1 + \lambda_2 - \{\lambda_1 \cdot \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2)\}, \quad t_e = 2$$

$$(17)$$

다음의 그림 2에서는 병렬적인 서브네트의 몇가지 경우에 대하여 축소한 결과를 보여준다.

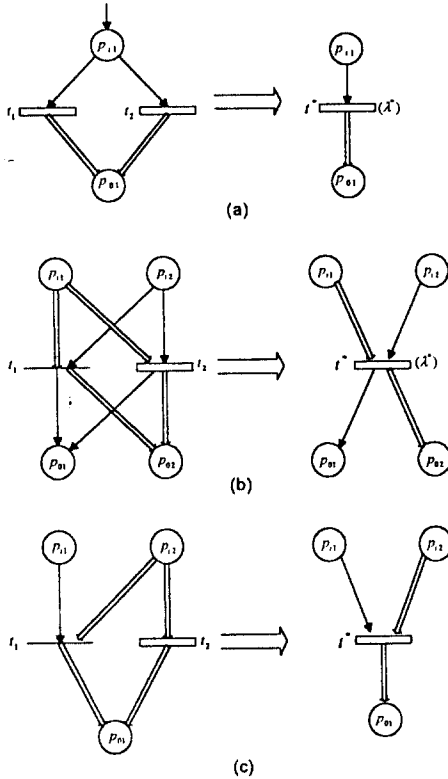


그림 2 병렬적인 서브네트의 축소

Fig. 2 Reduction of parallel subnet

### (3) 공유하는 서브네트의 축소

다음의 조건들을 만족하는 서브네트를 공유하는 서브네트로 정의한다. 즉, 재원의 공유(resource sharing)와 같은 동작을 나타내는 것으로 셀프-루프(self loop)를 갖는 서브네트이다.

$$a) IN \cup ON = \{t_1, \dots, t_n, \dots, t_q\}, \quad q \in \mathbb{N}_m$$

$$BN = \{p_2\}$$

$$b) \forall t_n \in IN, \exists p \in P - \{p_2\}, I(p, t_n) > 0$$

$$c) \forall t_n \in IN,$$

$$O(p_2, t_n) - I(p_2, t_n) = I_n \geq 0 \quad (18)$$

$$d) M(p_2) \geq \sum_{i=1}^q I(p_2, t_i) \quad (19)$$

따라서 다음과 같이 축소된 페트리 네트를 얻는다.

$$a) P' = P - \{p_2\} + \{p^*\}, \quad I_j > 0 \text{ 인 경우}$$

$$= P - \{p_2\}, \quad \text{나머지 경우}$$

$$b) T' = T - \{t_1, \dots, t_q\} + \{t_1^*, \dots, t_q^*\}$$

$$c) p = p^* \text{ 이면, } I'(p, t) = 0, M'(p) = 0$$

$$d) p = p^*, t = t_n \text{ 이면, } O'(p, t) = I_n \quad (20)$$

다음의 그림 3에서는 공유하는 서브네트의 몇가지 경우에 대하여 축소한 결과를 보여준다.

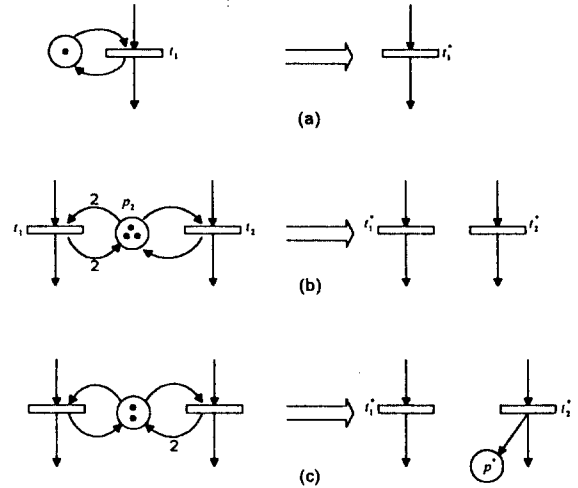


그림 3 공유하는 서브네트의 축소

Fig. 3 Reduction of sharing subnet

### 4. 축소된 페트리 네트의 특성 분석

일반화된 확률 페트리 네트를 앞에서 제시한 3가지 방법으로 축소된 네트가 원래의 네트와 같은 동작을 행하는 네트임을 증명하고자 한다. 이를 위해서는, 2장에서 설명한 페트리

네트의 여러가지 성질 중에서 원래의 네트가 갖고 있던 성질이 축소된 네트에서도 성립함을 보이면 된다.

#### 4.1 바운드디니스(boundedness)

원래 주어진 일반화된 확률 페트리 네트에서 모든 플레이스가  $k$ -바운드되어 있다고 가정하면, 앞에서 제시한 3가지 방법으로 축소된 네트의 모든 플레이스 역시  $k$ -바운드되어 있다. 이것을 증명하기 위해서는 제시한 축소방법이 각 트랜지션이 주고 받는 토큰의 갯수에는 변화를 주지 않음을 보이면 된다.

우선 순차적인 서브네트의 경우에는 식 (8)이 성립하면 트랜지션  $t^*$ 가  $k$ 배의 토큰을 생성하여야 하며, 식(9)가 성립하면  $t^*$ 가  $k'$ 배의 토큰을 요구하여야 한다. 이를 수식으로 표현한 것이 식 (10)과 (11)이다. 그러므로 이 축소 방법은 트랜지션이 주고 받는 토큰의 갯수에는 변화가 없다.

병렬적인 서브네트의 경우에는 식 (13)와 (14)에서 정의된 토큰의 갯수가 식 (15)와 (16)에서와 같이 동일하게 정의된다. 따라서 이 축소 방법 역시 트랜지션이 주고 받는 토큰의 갯수에는 변화가 없다.

다음으로 공유하는 서브네트의 경우, 식 (19)가 의미하는 것처럼 각 트랜지션이 BN의 상태에 영향을 받지 않고 동작한다. 따라서 식(18)이 성립하는 경우만을 식 (20)처럼 정의하였으므로, 이 축소 방법 역시 트랜지션이 주고 받는 토큰의 갯수에는 변화가 없다.

#### 4.2 라이브니스(liveness)

원래의 일반화된 확률 페트리 네트가 라이브하다고 가정하면 앞에서 제시한 3가지 방법으로 축소된 네트 역시 라이브하다. 이것을 증명하기 위해서는 트랜지션의 점화 순서와 트랜지션이 주고 받는 토큰의 갯수가 변화하지 않음을 보이면 된다. 토큰의 갯수가 변화하지 않음은 이미 증명하였으므로 트랜지션의 점화 순서가 변화하지 않음을 보인다.

우선 순차적인 서브네트의 경우에는 연속적으로 발생하는 트랜지션을 하나의 트랜지션으로 대치하였으므로 트랜지션의 점화 순서에는 변화가 없다.

병렬적인 서브네트의 경우에는 같은 입력 플레이스와 같은 출력 플레이스를 갖는 평행하게 나열되어 있는 트랜지션을 하나의 트랜지션으로 표현하였으므로 역시 트랜지션의 점화순서에는 변화가 없다.

다음으로 공유하는 서브네트의 경우, 원래의 트랜지션이 그대로 유지되므로 트랜지션의 점화 순서에는 변화가 없다.

#### 4.3 트랜지션 레이트

원래의 일반화된 확률 페트리 네트에서의 트랜지션 레이트

가 앞에서 제시한 3가지 방법으로 축소된 네트에서는 변화되어야 한다.

우선 순차적인 서브네트의 경우에는 연속적으로 발생하는 두개의 트랜지션을 하나의 트랜지션으로 대치한 것이므로, 트랜지션 레이트는 각 레이트의 합으로 식 (12)와 같이 정의된다.

반면, 병렬적인 서브네트의 경우에는 같은 입력 플레이스와 같은 출력 플레이스를 갖는 평행하게 나열되어 있는 트랜지션을 하나의 트랜지션으로 표현하였으므로 트랜지션 레이트는 식 (17)과 같이 정의[20]된다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 일반화된 확률 페트리 네트를 축소하는 방법을 제안하였다. 일반화된 확률 페트리 네트는 점화하는데 시간이 지연되지 않는 즉시 트랜지션과 지연시간이 지수분포를 갖는 트랜지션으로 구분된다. 따라서 네트의 구조적인 면과 동적인 면을 모두 고려하여 주어진 네트를 축소하는 방법을 제안하였다. 즉 순차적으로 동작되는 네트, 병렬적으로 동작되는 네트, 공유하는 네트로 구조적인 분류를 하여 축소하는 방법을 제안하였으며, 이들 각각의 동적 특성을 고려하여 트랜지션 레이트를 정의하였다. 또한 분석을 통하여 제시된 방법으로 축소된 네트가 원래의 네트와 같은 성질을 가짐을 증명하였다. 따라서 사건이나 상태의 집합이 증가함에 따라 네트가 매우 복잡해져 분석하기 어려운 경우에 제시한 축소방법을 이용하여 분석을 비교적 용이하게 행할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] Y.C.Ho, "Scanning the Issue," Proc. of the IEEE, pp.3-6, Jan, 1989
- [2] J.L.Peterson, *Petri Net Theory and the Modeling of System*, Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall, 1981.
- [3] M.C.Zhou and F.DiCesare, "A Petri Net Design Method for Automated Manufacturing Systems with Shared Resources," IEEE Int'l Conf. on Robotics & Automation, pp.526-531 1990.
- [4] Manjunath Kamath and N.Viswanadham, "Applications of Petri Net Based Models in the Modeling and Analysis of Flexible Manufacturing Systems," IEEE Int'l Conf. on Robotics & Automation, pp.312-317 1986.
- [5] M.A.Marsan, G.Balbo, and G.Conte, "A Class of Generalized Stochastic Petri Nets for Performance Analysis of Multiprocessor Systems," ACM TOCS Vol.2, No.2, pp.93-122, May 1984.

- [6] N.Viswanadham, Y.Narahari, and Timothy L. Johnson, "Deadlock Prevention and Deadlock Avoidance in Flexible Manufacturing Systems Using Petri Net Models," IEEE Int'l Conf. on Robotics & Automation, pp.713-723 1990.
- [7] T.Murata, "Petri Nets : Properties, Analysis and Applications," Proceedings of IEEE, Vol.77, No.4, Apr. 1989.
- [8] P.Freedman, "Time, Petri Nets, and Robotics," IEEE Trans. on Robotics & Automation, Vol.7, No.4, pp.417-433, Aug. 1991.
- [9] R.Y.Al-Jaar and A.A.Desrochers, "Performance Evaluation of Automated Manufacturing Systems Using Generalized Stochastic Petri Nets," IEEE Trans. on Robotics & Automation, Vol.6, No.6, pp.621-639, Dec. 1990.
- [10] T.Agerwala, "Putting petri nets to work," IEEE Computer, pp.85-94, Dec. 1979.
- [11] F.Dicesare and A.A.Desrochers, "Modeling, Control, and Performance Analysis of Automated Manufacturing Systems Using Petri Nets," ASRI Workshop Seoul, Korea, Oct. 1991.
- [12] H.Lee-Kwang, J.Favrel and P.Baptiste, "Generalized Petri Net Reduction Method" IEEE Trans. on Systems Mans & Cybernetics, Vol.17, No.2, pp.297-303, Mar. 1987.
- [13] N. Viswanadham and Y. Narahari, "Coloured Petri Net Models for Automated Manufacturing Systems," IEEE Int'l Conf. on Robotics & Automation, pp.1985-1990 1987.
- [14] V.P.Ko chikar and T.T.Narendra, "Modelling Automated Manufacturing Systems Using a Modification of Coloured Petri Nets," Int'l J. of Robotics & CIM, Vol.9, No.3, pp.181-189 1992.
- [15] K.P.Valavanis, "On the Hierarchical Modeling Analysis and Simulation of Flexible Manufacturing Systems with Extended Petri Nets," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.20, No.1, pp.94-110, Jan. 1990.
- [16] H.M.Shih and T.Sekiguchi, "A Timed Petri Net and Beam Search Based on-line FMS Scheduling System," IEEE Int'l Conf. on Robotics & Automation, pp.2548-2553 1991.
- [17] J.F.Watson III and A.A.Desrochers, "Applying Generalized Stochastic Petri Nets to Manufacturing Systems," IEEE Int'l Conf. on Robotics & Automation, pp.366-371 1991.
- [18] G.Balbo, G.Chiola, G.Franceschinis, and G.Molinari Roet, "Generalized Stochastic Petri Nets for the Performance Evaluation of FMS," IEEE Int'l Conf. on Robotics & Automation 1987, pp.1013-1018 1987.
- [19] J.B.Dugan, K.S.Trivedi, R.M.Geist, and V.F.Nicola, "Extended Stochastic Petri Nets: Applications and Analysis," in Proc. PERFORMANCE 84, Paris, France, Dec. 1984.
- [20] K.D.Lee, B.H.Lee, and M.S.Ko, "An Approach to Interconnection, Modeling, and Simulation for a Multi-Robot Workcell," Int'l Symposium on Industrial Electronics Xian, China, May 1992.