

이산 사건 동적 시스템의 모델링 및 분석을 위한 퍼지 트랜지션 시간 페트리 넷

Fuzzy Transition Timed Petri Net for modeling and analyzing of Discrete Event Dynamic Systems

모영승 · 김진권 · 김정철 · 황형수

Mo young-seung, Kim jung-chul, Kim jin-kwon, and Hwang hyung-soo

원광대학교 제어계측공학과

요 약

시간 페트리 넷은 실시간 값을 갖는 이산사건 시스템을 모델링하고 해석하기 위한 방법중 하나이다. 시간 페트리 넷은 각 트랜지션에 대하여 두 개의 시간 값, 최초 발화 시간 α_i 와 최종 발화 시간 β_i 를 갖는다. 본 논문에서는 최적 발화 시간을 결정하기 위하여 퍼지 이론을 적용한 퍼지 트랜지션 시간 페트리 넷을 제안하였다. 퍼지 트랜지션 시간 페트리 넷의 트랜지션 점화 시간 γ_i 는 고정 최초 발화 시간 α_i 와 고정 최종 발화 시간 β_i 사이에서 어떠한 복잡한 계산 절차나 임의의 조건 없이 입력정보를 이용한 퍼지 이론으로부터 결정된다. 교차로에서 교통 신호제어기는 퍼지 트랜지션 시간 페트리 넷에 의하여 모델링되고 해석되었다. 퍼지 트랜지션 시간 페트리 넷의 중요한 특성은 교통 신호기의 모델링과 시뮬레이션에 의해서 보여진다.

ABSTRACT

Timed Petri Net(TPN) is one of methods to model and analyze Discrete Event Dynamic Systems(DEDS's) with real time values. It has two time values, the earliest firing time α_i and the latest firing time β_i , for the each transition. In this paper, we proposed the Fuzzy Transition Timed Petri Net(FTTPN) with fuzzy theory to determine the optimal transition time γ_i . The transition firing time γ_i of the FTTPN is determined from fuzzy theory between the earliest firing time α_i and the latest firing time β_i through the input information without complex computation procedure and any other condition. The traffic signal controller of an intersection is modeled and analyzed by the FTTPN. The significant properties of the FTTPN are show by simulation and modeling of the traffic controller.

Key Words : Discrete Event Dynamic Systems, Timed Petri Net, Fuzzy Transition Timed Petri Net

1. 서 론

이산 사건 동적 시스템(Discrete Event Dynamic Systems : DEDS's)은 근본적으로 비동기 시스템이며, 사건의 발생에 따라서 전개되는 동적 시스템이다. 교통 신호기, 생산 공정, 통신 시스템 등의 많은 이산 사건 시스템들이 시간과 관련되어 있다. 병렬처리와 동시 발생을 표현하기 용이하기 때문에 페트리 넷은 이산사건 동적 시스템의 모델링에 많이 이용된다.

페트리 넷은 여러 종류가 있으며 각각의 종류마다 고유한 특징을 가지고 있다. 그 중에서 페트리 넷에 시간 변수를 도입한 시간 페트리 넷은 생산주기의 시간을 유도하거나, 병목 워크스테이션을 확인하거나, 시간을 검증하는 것 같

은 작업을 가능하게 하며, 모델링된 이산사건 동적 시스템이 시간에 따라 변할 때 사용한다. 시간 페트리 넷은 시간을 부여하는 페트리 넷의 각 노드에 따라서 결정적 시간 트랜지션 페트리넷(Deterministic Timed Transition Petri Net), 결정적 시간 플레이스 페트리 넷(Deterministic Timed Place Petri Net), 결정적 시간 아크 페트리 넷(Deterministic Timed Arcs Petri Net), 시간 페트리넷으로 나뉘어 지는데, 각각은 트랜지션, 플레이스, 아크에 일정한 시간변수를 적용한 방법들이 있으나 [1], 실시간 DEDS's를 모델링하고 성능을 평가하기 위한 일반적인 방법으로 시간 페트리 넷(Timed Petri Net)이 이용되고 있다 [2, 3]. 시간 페트리 넷은 발화 최소 시간 α_i 와 최대 시간 β_i 를 포함하고 있으며 발화 시간 구간인 α_i 와 β_i 사이의 임의의 시간에 사건이 발화하여 상태가 천이 된다. 본 논문에서는 현재 상태에서 상태천이에 관련된 정보 및 자료 등을 구하고 이 정보를 퍼지 집합의 소속 함수로 정의하고 추론하여 최적의 발화 시간을 제어할 수 있는 퍼지 트랜지션 시간 페트리 넷이라는 새로운 시간 페트리 넷을 제안하였다. 그리고 FTTPN에 대한 응용 예로서, 교차로의 교통 신호제어기를 모델링하였

접수일자 : 2000년 6월 2일

완료일자 : 2001년 1월 15일

이 논문은 2000년도 원광대학교의 교비 지원에 의하여 연구됨

다. 모델링된 교통 신호제어기에서 교통 신호의 상태는 토큰의 변화로 하고, 차량의 흐름은 퍼지 제어기(모델)의 입력으로 하였으며, 대기차량의 수를 퍼지 집합의 소속 함수로 하여, 보다 효과적인 방법으로 교차로의 교통상황을 제어할 수 있도록 하였다.

2. 페트리 넷 및 시간 페트리 넷

2.1 페트리 넷

페트리 넷은 플레이스, 트랜지션, 아크의 세 개의 요소로 구성된 도식적인 표현이며, 사건의 발생에 따른 상태의 변화를 표현한다. 페트리 넷은 다음 5개의 구성요소로 정의된다.

$$PN = \langle P, T, I(\cdot), O(\cdot), M_0 \rangle$$

$P = \{ p_1, p_2, \dots, p_m \}$ 는 유한 플레이스의 집합.

$T = \{ t_1, t_2, \dots, t_m \}$ 는 유한한 트랜지션의 집합.

$I: (P \times T) \rightarrow N$, 플레이스로부터 트랜지션으로의 입력함수.

$O: (P \times T) \rightarrow N$, 트랜지션으로부터 플레이스로의 출력함수.

$M_0: P \rightarrow N$, 는 초기 마킹.

여기서, 트랜지션(T)은 사건(Event) 또는 공정의 시작과 끝을 표현하며 막대(Bar) 혹은 직사각형으로 표기한다. 플레이스(P)는 조건, 자원의 사용 가능성 또는 공정상태를 표현하며 원(Circle)으로 표기한다. 입, 출력(I, O)함수는 상태가 변화하는 방향을 표시하며, 호선으로 표시한다. 마킹(M)은 플레이스에 토큰을 할당하는 것으로, 시스템의 상태를 표현하며, M_0 는 초기 마킹이다. N은 음이 아닌 정수이다. 넷에서의 활성화규칙과 발화규칙은 다음과 같이 정의된다 [2, 3, 4, 5].

- (1) 활성화규칙: 만일 트랜지션 t의 각 입력 플레이스 p가 p에서 t로 직접 연결된 호선의 가중치와 적어도 같은 수의 토큰을 포함하고 있을 때 페트리 넷의 임의의 플레이스 p에 대하여, 트랜지션 t는 활성화 된다. 즉 페트리 넷의 임의의 플레이스 p에 대하여 $M(p) \geq I(t, p)$ 이면 트랜지션 t는 활성화 된다.
- (2) 발화규칙: 활성화된 트랜지션 t의 발화는 t에서 p로 직접 연결된 호선의 가중치와 같은 수의 토큰을 입력 플레이스 p로부터 이동시킨다. 이는 또한 트랜지션 t에서 출력 플레이스 p로 연결된 호선의 가중치와 같은 수의 토큰을 출력 플레이스 p로 이동시킨다. 임의의 플레이스 p에 대하여 토큰의 다음 상태 $M'(p)$ 는 $M'(p) = M(p) - I(t, p) + O(t, p)$ 이다.

페트리 넷으로 모델링된 DEDS's를 해석하기 위한 방법에는 도달성 트리 방법, 행렬 방정식 접근법, 축소 혹은 분해 기술, 그리고 시뮬레이션 등이 있다 [2, 3, 4]. 이들 방법을 통하여 복잡하게 모델링된 페트리 넷의 상태 변화와 동작의 흐름을 해석하는 것이 가능하나 각각의 방법마다 단점이 있으며, 현재까지 넷을 완벽하게 해석 할 수 있는 방법이 나와 있지 않기 때문에 이에 대한 연구가 진행되고 있다 [1].

2.2 시간페트리 넷의 구조

DEDS's의 시간적 성능평가에 대한 필요성 때문에 넷의 각 노드에 시간 값을 할당할 몇몇 확장된 페트리 넷이 제

안되었으며, 이를 시간 페트리 넷이라 한다 [1, 2, 3]. 시간 페트리 넷은 DEDS's를 설계, 모델링, 성능 해석을 하는데 있어 기본 페트리넷과 동일하며, 트랜지션, 플레이스, 트랜지션과 플레이스를 연결하는 호선 가운데 하나 이상의 요소에 시간 값을 할당하는 노드의 종류에 따라 결정적 시간 트랜지션 페트리넷(Deterministic Timed Transition Petri Net), 결정적 시간 플레이스 페트리 넷(Deterministic Timed Place Petri Net), 결정적 시간 아크 페트리 넷(Deterministic Timed Arcs Petri Net), 시간페트리 넷 등으로 구분된다. 시간 페트리 넷은 다음 6개의 요소로 정의된다.

$TPN = \langle P, T, I(\cdot), O(\cdot), M_0, SI \rangle$ 은 시간페트리 넷.

$P = \{ p_1, p_2, \dots, p_m \}$ 는 유한 플레이스의 집합.

$T = \{ t_1, t_2, \dots, t_m \}$ 는 유한한 트랜지션의 집합.

$I: (P \times T) \rightarrow N$, 플레이스로부터 트랜지션으로의 입력함수.

$O: (P \times T) \rightarrow N$, 트랜지션으로부터 플레이스로의 출력함수.

$M_0: P \rightarrow N$, 는 초기 마킹.

$SI: T \rightarrow Q^* \times (Q^* \cup \infty)$ 는 고정 간격(Static Interval) 매핑, 여기서 Q^* 는 양의 유리수.

임의의 트랜지션 t_i 에 대하여 $SI(t_i) = (\alpha_i, \beta_i)$ 라 정의되며, $0 \leq \alpha_i \leq \infty, 0 < \beta_i \leq \infty$, 만약 $\beta_i = \infty$ 이면 $\alpha_i \leq \beta_i$ 이고, $\beta_i = \infty$ 이면 $\alpha_i < \beta_i$ 이다.

$SI(t_i)$ 에 대한 (α_i, β_i) 의 간격은 트랜지션 t_i 의 고정 발화시간(Static firing time) 간격이라 하며, 좌 반면 경계 α_i 는 고정 최초 집화시간(Static earliest firing time) 우 반면 경계 β_i 는 고정 최종 발화시간(Static latest firing time)라 부른다. 즉, α_i 는 트랜지션이 발화하기까지 기다려야 하는 최소 대기시간, β_i 는 트랜지션이 반드시 발화해야 하는 최대 대기시간을 표현한다. 활성화된 트랜지션은 시간 간격 (α_i, β_i) 사이에 발화되어야 하는데 이를 계산하는 방법으로는 Berthomieu에 의하여 제안된 계산 방법이 있다 [3].

그러나, 시간 페트리 넷은 트랜지션의 노드에 시간 값이 할당되어 있으므로 트랜지션이 발화하는 순서와 조건에 따라 시간 값이 변화한다. 이러한 시간 값의 변화는 시스템의 성능을 평가하는데 어려움을 주기 때문에, 발화시간을 명확하게 제어할 필요성이 대두되었다. 따라서 본 논문에서는 이러한 트랜지션의 발화 시간이 페트리 넷 자체의 상태 변화와 순서에 따라 변하는 것이 아니라 퍼지이론을 적용하여 현재 상태에서 상태천이에 관련된 정보 및 자료 등을 구하고 이 정보를 퍼지 집합의 소속 함수로 정의하고 추론하여 최적의 발화 시간을 제어할 수 있는 FTTPN 이라는 새로운 시간 페트리 넷을 제안한다.

3. 퍼지 트랜지션 시간 페트리 넷

페트리 넷(Ordinary Petri Net)모델은 플레이스에 토큰이 로드되는 것에 의하여 상태를 표현하거나 토큰이 가지고 있는 성질에 의하여 상태를 표현한다 [6, 7]. 그러나 시간 페트리 넷은 토큰의 변화 뿐 아니라 트랜지션에 할당된 시간 구간이 발화 순서와 상태에 따라 변화함으로써 발생하는 시간 구간의 변화를 고려해야만 한다 [2, 3]. 이런 시간 구간의 변화를 고려하는 것은 모델링된 시스템의 해석이나 성능분석을 어렵게 한다. 따라서 본 논문에서는 시스템에 대한 불확

실한 정보(시간 구간)를 퍼지 이론을 통하여 표현하여, 시간 페트리 넷의 트랜지션의 발화 시간을 제어 할 수 있도록 FTTPN을 제안하였다. FTTPN은 다음 6개의 구성 요소로 정의한다.

정의 1

FTTPN = < P, T, I(·), O(·), M₀, FTSI >은 퍼지 트랜지션 시간페트리 넷.

P = { p₁, p₂, ..., p_m }는 유한 플레이스의 집합.

T = { t₁, t₂, ..., t_n }는 유한한 트랜지션의 집합.

I: (P×T) → N, 플레이스로부터 트랜지션으로의 입력함수.

O: (P×T) → N, 트랜지션으로부터 플레이스로의 출력함수.

M₀: P → N, 은 초기 마킹.

FTI: T → Q* × (Q* ∪ ∞)는 고정 간격(Static Interval) 매핑, 여기서 Q*는 양의 유리수.

임의의 트랜지션 t_i에 대하여 FTI(t_i) = (α_i, β_i, γ_i)라 정의하고, 0 ≤ α_i ≤ ∞, 0 ≤ β_i ≤ ∞, α_i ≤ γ_i ≤ β_i이다. 만일 β_i ≠ ∞이면 α_i ≤ β_i이고, β_i = ∞이면 α_i = γ_i < β_i이고 γ_i는 퍼지 제어기의 출력이다.

여기서 트랜지션 발화 시간 γ_i는 시간페트리 넷에서처럼 트랜지션 상호 관계에 의하여 결정되는 것이 아니라 외부 입력, 즉 제어기에 의하여 결정된다.

상태의 변화를 위한 정확한 시간 값을 결정하기 위해서는 상태 천이에 관련된 정보가 필요하며, 이런 정보를 퍼지이론에 적용하여 설계된 퍼지 제어기는 최적의 상태 천이 시간을 결정할 수 있다 [8].

표 1 대기 차량 수 데이터
Table. 1 Data for the number of waiting vehicles

차량수	실제 측정값	퍼지 모델 출력값	오차
1	2.4000	2.4424	-0.0424
2	4.4000	4.4159	-0.0159
3	6.4000	6.3440	0.0560
4	8.3000	8.2268	0.0732
5	10.1000	10.0643	0.0357
6	11.8000	11.8564	-0.0564
7	13.5000	13.6032	-0.1032
8	15.3000	15.3046	-0.0046
9	17.0000	16.9607	0.0393
10	18.6000	18.5715	0.0285
11	20.2000	20.1758	0.0242
12	21.8000	21.8053	-0.0053
13	23.4000	23.4318	-0.0318
14	25.0000	25.0550	-0.0550
15	26.7000	26.6751	0.0249
16	28.3000	28.2921	0.0079
17	29.9000	29.9059	-0.0059
18	31.6000	31.5166	0.0834
19	33.1000	33.1241	-0.0241
20	34.7000	34.7285	-0.0285

본 논문에서는 FTTPN의 응용 예로써 교차로의 교통 신호기를 설계하였으며, 제어기(모델)입력이 되는 차량수에 따른 고정점 통과시간 데이터는 측정된 20개의 데이터를 사용하였고, 이 데이터를 기준으로 퍼지 제어기를 설계하였다 [7]. 데이터는 표 1과 같다 [9].

FTTPN의 트랜지션의 발화 시간을 결정하기 위한 소속 함수로는 삼각 함수를 사용하며, 소속 함수의 개수는 3개, 소속 함수의 파라메타는 고정된 값을 사용하였다. 그림 1은 퍼지 집합의 소속함수를 보인다.

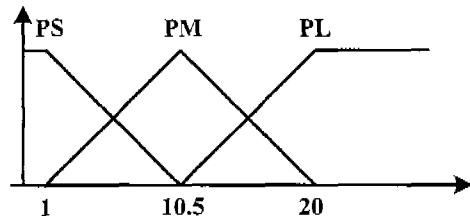


그림 1. 퍼지 집합의 소속 함수
Fig. 1. Fuzzy set of membership function

퍼지 추론은 3개의 규칙을 사용하여 다음과 같이 구성한다.

- IF x is PS THEN y = a₁₀ + a₁₁x
- IF x is PM THEN y = a₂₀ + a₂₁x
- IF x is PL THEN y = a₃₀ + a₃₁x

20개의 시간 값에 가장 근접한 모델 출력을 얻기 위하여 경형적 방법에 의한 선형 추론법을 사용하였고, 후반부 파라미터 a₀, a₁는 최소자승법에 의하여, 최종 출력은 무게 중심법은 사용하였다 [6]. 표 1의 실제 측정값은 교차로에서 차량이 통과하는 시간을 반복 측정하여 평균한 값이므로 퍼지 모델의 출력값과의 오차는 무시해도 좋은 것으로 가정한다.

제안된 교통 신호 제어기에서 퍼지 제어기는 동기 신호를 받아 동작하므로 신호 상태에 있는 방향 검출기만의 정보를 처리하면 되기 때문에 단일입력 단일출력으로 모델링하였다.

본 논문에서는 이미디어트(Immediate) 트랜지션, 디터미니스틱(Deterministic) 트랜지션, 시간 트랜지션(Timed transition), 퍼지 시간 트랜지션(Fuzzy Timed Transition)을 사용하였다. 이 네 개의 트랜지션은 모두 위의 페트리 넷의 정의를 만족한다. 이미디어트 트랜지션은 활성화 된 후 지연 시간 없이 바로 발화하며, 짧은 선으로 표현된다. 디터미니스틱 트랜지션은 활성화 된 후에 상수 지연시간을 가지고 발화하며, 굵은 막대로 표현된다. 시간 트랜지션은 일정한 시간간격을 가지고 간격 사이에 발화하며, 직사각형으로 표현된다 [1, 2, 4]. 퍼지 시간 트랜지션은 활성화 된 후 일정 시간 간격 사이에 발화되는데 이 발화 시간은 외부 입력, 즉 퍼지 제어기 출력에 의하여 결정되며, 넷에서 직사각형 중간에 마킹된 것으로 표현된다.

4. 교통 신호기에의 응용

교통은 현대 사회에서 중요한 역할을 한다. 차량의 급속한 증가에 따른 교통 체증으로 인하여 교통상황은 악화 되고있어 기존 도로 용량을 최적으로 활용하기 위해서 교통흐름을 효과적으로 관리하는 것이 중요하다. 교통흐름을 효과적으로 관리하기 위한 교통 신호 제어에 대하여 많은 고전적인 방법

들이 있다. 퍼지 논리에 근거한 교통 신호 제어는 모델링된 시스템을 쉽게 이해하기에 곤란하며, 상태의 변화에 따른 신호의 흐름이나 차량의 변화를 표현하기는 어렵다 [10, 11]. 이런 이유 때문에 페트리 넷의 도식적이고 논리적인 성질을 이용하여 교차로의 신호를 제어하려는 연구들이 시도되었다 [12, 13]. 또한 기존의 교통 제어에 관한 연구들은 시스템의 성능을 위하여 많은 가정들을 하여 성능 면에서는 모두 좋은 특성을 보이기는 하나 실제로 적용하기에는 어렵다는 단점들이 있다 [9, 10, 11]. 기존의 방법들이 성능향상을 위하여 현시 혹은 신호길이를 무시한 반면 본 논문에서는 설계자에 의하여 적절히 결정된 현시 순서는 변하지 않으며 신호는 생략이 가능한 것으로 설계되었다. 즉 실제 교통 상황에서 대기 차량의 수가 적다고 하여 다음상태로 변화 할 때까지 대기한다면 교통흐름은 비능률적인 일이 될 것이다. 따라서 본 논문에서는 실제 교통 문제에 가장 근접하게 설계하여 실제 적용할 수 있도록 하였으며, 고전적 교통 신호 제어 방법인 단위시간 연장 방법과 비교하였다 [14].

4.1 교통 신호기의 퍼지 트랜지션 시간 페트리 넷 모델

현재 일반적으로 사용되고 있는 정주기식 교통 신호기는 차량의 진입을 고려하지 않고 신호주기 및 각 차량 진행방향에 할당되는 신호시간이 일정하다. 이것은 단기간의 차량 변화에 대처하지 못하므로 불필요한 시간을 소요하여 교통문제를 가중시키는 원인이 된다. 이에 반하여 본 논문에서 제안한 교통 신호기는 각 방향에서의 차량의 진입량에 따라 신호시간이 변동하고 신호순서가 생략되는 신호기이다.

그림 2는 일반적인 교차로 모델이다.

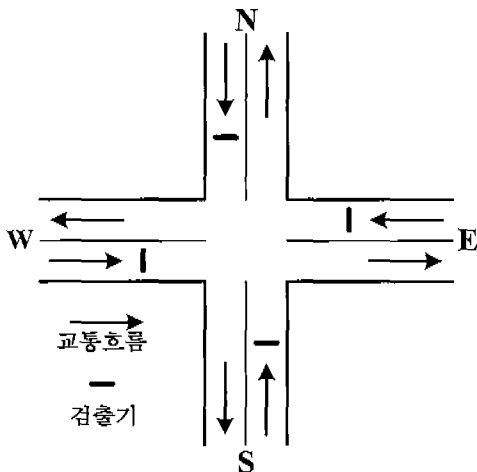


그림 2. 교차로 모델
Fig. 2. Intersection model

이 교차로에서 각 방향의 신호는 그림 3의 8가지 현시로 나뉘어진다 [9]. 이 중 4개의 현시를 가지고 교차로의 신호상태를 모두 표현할 수 있으며, 교통상황에 따라 설계자가 4개의 현시를 1개의 주기로 하여 교차로의 신호 흐름을 선택한다. 주기는 한 방향에서 교통신호의 점등을 나타내며, 현시는 교통 신호의 녹색신호가 지속되는 시간이다. 예를 들면 그림 3의 현시 5는 서에서 동으로 그리고 동에서 서로의 교통에 대한 상태이다. 교통상황에 따라 가장 적절한 현시와 주기는 매우 신중하게 결정되어야 한다. 이는 교통 신호기 효율성에

매우 큰 영향을 미치기 때문이다. 따라서 설계자가 교통상황을 잘 파악하고 적절한 현시들을 하나의 주기로 선택하는 것이 중요하다.

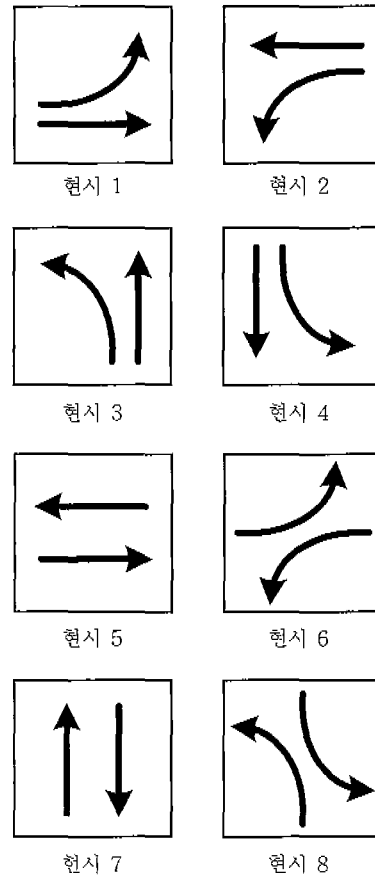


그림 3. 신호 현시 모델
Fig. 3. Signal phase model

교차로의 교통 신호기 설계를 위하여 그림 2의 교차로 신호 상황을 다음과 같이 가정하였다.

- 차량은 우측으로 통행한다.
- 보행자의 통행을 위한 횡단보도나 신호는 고려하지 않는다.
- 별도의 우회전 신호는 존재하지 않는다.
- 신호는 좌회전, 직진, 적색, 녹색 신호가 있으며 직진 신호 후에는 각각 황색 신호가 존재한다.

교차로 모델에서 검출기는 차량의 대수를 파악하며, 교차로의 4방향에 각각 존재한다. 본 모델에서 검출기는 교차로에서부터 100m 위치한다고 가정한다. 이는 차량의 평균길이를 4m, 차량간의 간격을 1m라 하였을 때 최대 20대의 차량이 대기할 수 있는 길이이다 [14].

단일 방향의 교통 신호 제어는 신호의 상태를 나타내는 FTTPN 모델과 차량의 대수를 입력으로 하는 퍼지 제어기 모델로 2부분으로 분류된다. 그림 4는 교통 신호기의 단일 방향 FTTPN 모델이다.

그림 4의 모델에서 각 플레이스와 트랜지션의 의미는 다음과 같다.

- t_1 : 전 신호가 종료되고 황색 신호시작.
- t_2 : 황색 신호시간.

- t_3 : 녹색 신호 시작.
- t_4 : 녹색 신호 지속 시간.
- t_5 : 신호 종료.
- p_1 : 황색 신호 상태.
- p_2 : 황색 신호 종료 상태.
- p_3 : 녹색 신호 상태.
- p_4 : 신호 종료 상태.
- p_5 : 적색 신호 상태.

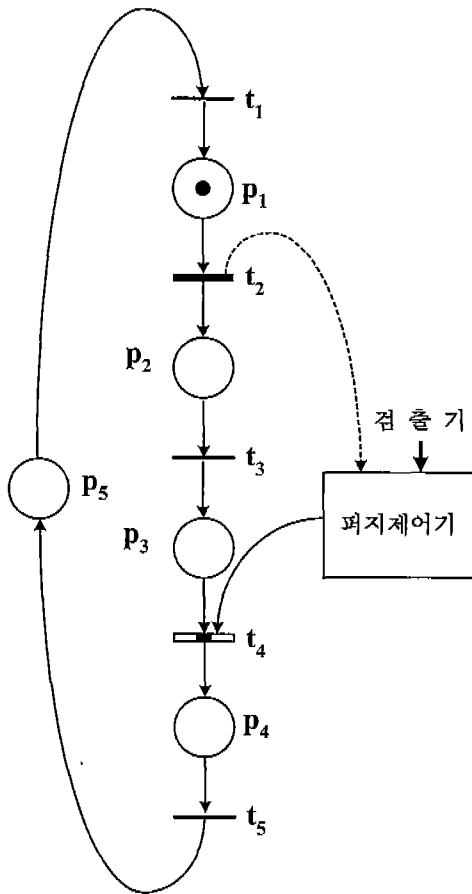


그림 4. 단일 방향 교통 신호기의 FTTPN 모델
Fig. 4. FTTPN model of Traffic signal controller for a direction

그림 4의 교통 신호기는 다음과 같이 동작한다. t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , t_5 로 이루어진 경로는 신호기의 동작을 표현한다. t_1 이 발화하면 p_1 에 토큰이 존재하고 황색 신호가 시작된다. 황색 신호는 t_2 가 발화 할 때까지 계속되는데 t_2 트랜지션은 상수 지연시간을 갖는 이미디어트 트랜지션으로 3초의 지연시간을 갖는다. 이는 실제 교차로에서의 신호길이와 동일하다. t_2 가 발화하면 토큰은 p_2 로 이동하여 황색 신호의 종료를 알린다. 또한 퍼지 제어기에 동기 신호를 제공하여 제어기가 출력값을 계산하도록 하며 점선 화살표로 정의한다. 동기 신호는 페트리 넷의 입, 출력 함수를 나타내는 것이 아니므로 토큰의 변화에는 영향을 미치지 않는다. t_3 , p_3 를 거친 토큰은 녹색 신호를 나타내며, t_4 에서 녹색신호의 길이를 조절한다. t_4 는 입의 시간간격 사이에 발화하게 되는데 발화 시간은 퍼지 제어기가 결정한다. 단, 퍼지 제어기의 출력은 트랜지션 고유의 시간 간격을 넘지 못한다. 즉, 시간 구간(α_i , β_i) 사이

값만을 제어할 수 있다. t_4 가 발화하면 신호는 종료상태 p_4 가 되고, t_5 에 의해 신호가 종료된다. 신호 종료후 각 방향의 신호는 적색 신호 p_5 가 된다. 현재의 신호가 끝나고 다음 신호가 시작 될 때까지의 최소시간은 각 방향에서의 황색 신호의 합이다.

본 논문에서 고려한 4방향 교차로에서의 교통 신호기의 모델은 그림 4의 기본 모델 4개를 연결함으로써 얻어진다. 그림 5는 각각 그림 3의 현시1, 현시2, 현시3, 현시4를 나타낸다.

각 현시를 나타내는 단일방향 신호의 흐름은 그림 4와 같으며, 설계자가 그림 3의 신호 현시를 적절히 선택하면 교차로에 대한 모델은 완성된다. 각 방향에서의 교통 흐름에 대한 FTTPN모델은 독립적이므로 적절히 연결하면 4방향 교차로 뿐 아니라 3방향 5방향 교차로를 설계하는 것도 가능하다. 다음절에서는 FTTPN으로 설계된 교통 신호기와 비교하기 위한 단위시간연장 교통 신호기에 대하여 고찰한다.

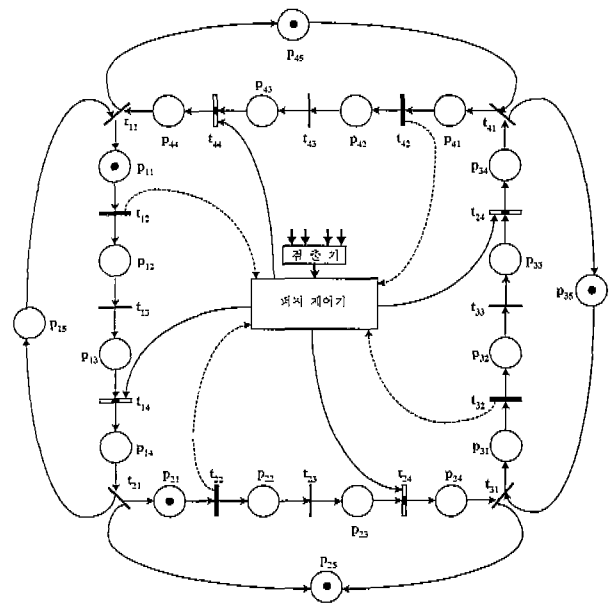


그림 5. FTTPN을 이용한 4방향 교차로의 교통 신호기 모델

Fig. 5. Traffic signal controller using FTTPN in four-way intersection

4.2 단위시간연장 교통 신호기의 시간 페트리 넷 모델

그림 6은 제안된 방법과 성능 비교를 위하여 단위시간연장 교통 신호기를 시간 페트리 넷으로 모델링[14] 한 것으로 무한 루프에 빠지지 않도록 수정한 것이다. 이 모델 역시 그림 2의 교차로를 기준으로 설계되었으며 교차로의 상황은 FTTPN모델과 동일하게 가정한다.

단위 시간 연장 신호기의 동작 원리는 다음과 같다.

- 기본 신호시간을 부여한다.
- 기본 시간에 통과하지 못한 차량의 유무를 파악한다.
- 대기 차량이 존재하면, 최대 연장회수 범위 내에서 단위 시간씩 연장한다.

대기 차량수는 검출기 범위 내의 차량대수로서 급정거로 인한 사고를 배제 할 수 있도록 한다.

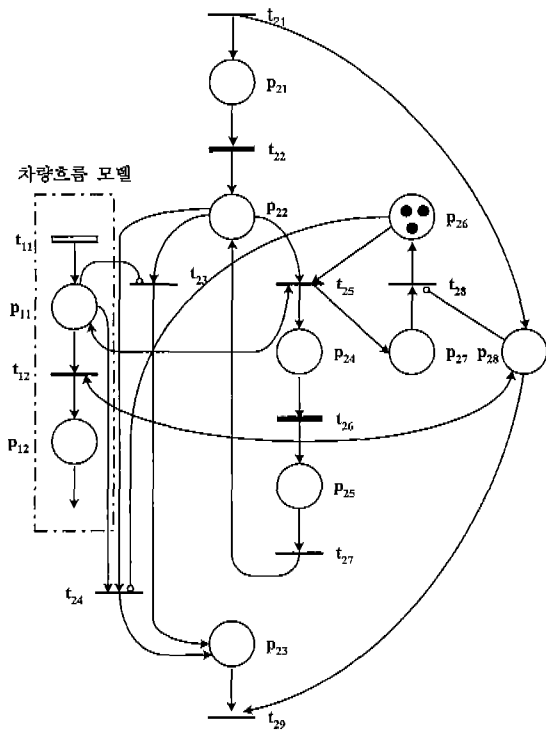


그림 6. 단일 방향에 대한 단위시간연장 교통 신호기의 시간 페트리 넷모델
 Fig. 6. TPN model of unit time-extensions signal controller for a direction

그림 6에서 점선으로 표현된 부분은 교차로에 진입한 차량 흐름 모델로써, 교차로에서 차량의 진입을 나타내는 t_{11} 의 발화 조건은 시간페트리 넷의 발화 간격을 조절함으로써 얻어진다. 즉 t_{11} 의 시간간격을 다르게 조절함으로써 각 방향으로 진입하는 차량수를 결정하며, 교차로의 상황에 따라서 차량의 입력을 모델링할 수 있다. 예를 들어 교차로로 진입하는 차량이 3에서 5초 사이에 한 대씩 진입한다면 t_{11} 의 발화시간구간은 (3, 5)이다. 단위시간 연장 교통 신호기 역시 차량의 대수를 셀 수 있는 검출기(t_{11})가 필요한데 그 위치는 효과적인 차량의 흐름을 위하여 적절한 위치로 선택되어야 한다.

그림 6 모델에서의 각각의 트랜지션과 플레이스의 의미는 다음과 같다.

- t_{11} : 차량의 교차로 진입.
- t_{12} : 교차로 통과 시작.
- t_{21} : 신호시작.
- t_{22} : 기본 신호 시간.
- t_{23} : 연장 없이 신호 시간 경과.
- t_{24} : 최대 연장 시간 후에도 대기 차량이 있는 경우 토큰을 제거하기 위한 보조 트랜지션.
- t_{25} : 대기 차량이 존재하여 단위 시간 연장.
- t_{26} : 단위연장 시간.
- t_{27} : 연장된 신호 시간이 경과.
- t_{28} : 연장할 신호 회수 입력.
- t_{29} : 신호 종료.
- P_{11} : 진입 후 대기 상태(토큰: 차량 대수).
- P_{12} : 차량의 교차로 통과 상태.

- P_{21} : 신호 시작 상태.
- P_{22} : 신호가 시작된 상태.
- P_{23} : 신호 종료 전 상태.
- P_{24}, P_{25} : 신호 시간 연장 전후 상태.
- P_{26} : 연장할 신호 시간의 회수.
- P_{27} : 연장된 신호 시간의 회수.
- P_{28} : 신호 점등 상태.

그림에서 양방향 호선은 루프를 의미한다.

단위시간연장 교통 신호기의 동작 원리는 다음과 같다. t_{22} 의 발화에 의하여 신호가 시작되고, P_{28} 의 토큰은 신호가 켜져 있음을 의미한다. t_{22} 의 지연 시간만큼 기본 신호 시간의 신호를 유지한다. 기본 시간 후에 P_{11} 에 토큰이 없으면 P_{23}, t_{29} 를 통하여 연장 신호 없이 종료된다. 만약 P_{11} 에 토큰이 존재하면, $P_{22}, t_{25}, P_{24}, t_{26}, P_{25}, t_{27}, P_{22}$ 의 경로로 토큰이 이동하여 한번의 단위 시간만큼 신호를 연장한다. t_{26} 에 토큰이 있으면 단위시간 연장을 반복한다. 토큰 수는 단위시간 연장 가능 회수를 의미한다. 정해진 회수가 경과한 뒤에도 차량이 존재한다면 t_{24}, P_{23}, t_{29} 에 의하여 신호가 종료된다. 모든 연장이 끝나면 신호는 종료되고 다음 상태로 넘어간다. 단일 방향의 교차로에 대한 그림 6의 모델 4개를 그림 5와 같은 방법으로 결합하면 교차로에 대한 단위시간연장 교통신호기의 모델이 된다.

4.3 시뮬레이션 및 결과

FTTPN에 의해서 모델링된 교통 신호기의 성능을 평가하기 위하여 Matlab을 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 2개의 교통 조건이 시뮬레이션 되었고, 그 결과는 단위시간연장 교통 신호기와 비교되었다. 그 방법들에 대하여 좀더 자세히 설명하고 그 결과를 제시한다.

4.3.1 성능 평가

시뮬레이션을 위하여 그림 5의 $t_{14}, t_{24}, t_{34}, t_{44}$ 발화 시간을 0에서 35초 사이 값으로 제한하였는데, 이는 검출기 사이의 최대 대기차량 20대가 모두 통과 할 수 있는 시간으로, 제어기 출력에 의한 신호연장에 따라서 발생할 수 있는 차량의 충돌을 방지한다. 시뮬레이션은 그림 3의 현시 1, 2, 3, 4를 기준으로 하였기 때문에 검출기 사이에 대기하는 차량수는 직진 차선과 좌회전 차선에 대기하는 차량 중 큰 값을 사용하는 것으로 가정하였다. 모두 2가지의 교통조건이 시뮬레이션 되었으며, 시뮬레이션 시간은 1시간, 시뮬레이션 조건은 표 2와 같다.

표 2. 입력 차량 대수
 Table 2. The number of input vehicles

방향	차량대수	차량대수(vehicle/h)	
		A형	b형
E방향 직, 좌회전		548	628
W방향 직, 좌회전		366	370
N방향 직, 좌회전		456	474
S방향 직, 좌회전		501	314

각 방향에서 황색 신호의 길이는 3초로 고정하였다. 제안된 방법과 비교하기 위하여 단위시간연장 교통 신호기는 다음처럼 가정한다. 차량 검출기는 교차로로부터 70m

에 위치한다고 가정하면 교차로와 검출기 사이에는 약 13~14대의 차량이 대기 할 수 있다. 시뮬레이션에서 황색 신호는 3초로 하였고, 기본 신호 시간은 25초로 하였다. 기본 시간 내에 검출기 내에서 대기하고 있는 차량은 모두 통과 할 수 있으며, 기본 시간이 끝나면 대기차량의 차량의 유무를 파악하여, 5초씩 최대 2번의 신호연장이 가능하도록 하였다. 2번의 신호 연장이 모두 끝나면 신호를 종료하고 다음 상태로 천이 되도록 하였다.

4.3.2 시뮬레이션 결과

성능 지수로는 교차로 각 방향에서의 차량의 평균 지연시간이 사용되었으며, 다른 교통 조건을 시뮬레이션하기 위하여 A형의 교차로는 차량의 유입이 일정하도록 하였고, 차량 유입의 변동율도 적게 하였으나, B형의 경우는 차량의 유입이 적으며, 교차로에 들어오는 차량의 유입을 변동에도 많은 차이가 나도록 조건을 주었다. 시뮬레이션 결과는 표 3과 표 4에 보인다.

표 3. A형 교차로의 시뮬레이션 결과
Table 3. Simulation result for A type intersection

A형	평균지연시간		증가율(%)
	제안된 방법	단위시간연장	
E 방향 직, 좌회전	34.0409	35.0000	2.74
W 방향 직, 좌회전	20.3326	25.0000	18.67
N 방향 직, 좌회전	29.7258	31.2963	5.02
S 방향 직, 좌회전	32.4096	35.0000	7.40

표 4. B형 교차로의 시뮬레이션 결과
Table 4. Simulation result for B type intersection

B형	평균지연시간		증가율(%)
	제안된 방법	단위시간연장	
E 방향 직, 좌회전	32.2735	35.0000	7.79
W 방향 직, 좌회전	19.9912	25.0000	20.04
N 방향 직, 좌회전	25.6424	26.9697	4.92
S 방향 직, 좌회전	17.7121	25.0000	29.12

제안된 방법은 모든 경우에서 좋은 성능을 보인다. 교통조건 A(표 3)에서는 2.74%~18.67%의 개선을 보인다. W 방향 직, 좌회전의 경우에 높은 증가율을 보이는데 차량의 입력 조건이 기본 단위 시간 보다 매우 적은 경우를 나타낸다. 다른 방향의 경우에도 평균 대기 시간이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 차량의 입력이 많고 일정한 방향에서는 적은 개선을 보인다. 이런 조건에서는 교통량이 교차로의 용량에 근접하기 때문에 이를 개선하기 위한 여유가 무척 작다는 것을 의미한다. 교통조건 B(표 4)에서는 4.92%~29.12%의 성능개선을 보인다. 이 결과는 차량의 유입이 매우 적을 때 뛰어난 효과를 발휘한다. 특히 S방향의 직, 좌회전의 경우에 많은 차이를 보이는데, 이는 단위 시간 신호기의 기본 시간이 잘못 설정되었다는 결과로 볼 수 있다. 단위 시간 연장 신호기 역시 기본 신호 시간을 적절히 조절함으로써 어느 정도의 성능개선을 이룰 수 있으나 근본적으로 기본 신호를 연장하는 단위 시간연장 교통 신호기 모델은 모델 자체의 한계를 가지고 있으며 단기간의 차량 유입 변동에 따른 상태의 변화

를 직접적으로 제어 할 수 없는 단점이 있다.

위의 시뮬레이션 결과에서 보듯이 동일한 차량입력 조건으로 두 가지 모델을 설계하였을 때 제안된 방법으로 설계된 모델이 뛰어난 성능을 보인다. 즉 교차로에서 한 방향의 평균차량의 입력이 적은 곳에서는 신호 시간을 짧게 하여서 차량의 지연시간을 효과적으로 줄인다.

입력의 교차로에 유입하는 차량은 계절, 날씨, 시간대 별로 변하기 때문에 이에 따라 능동적으로 대처 할 수 있는 교통제어 신호기의 필요성이 제기되었다 [9, 10, 11, 12]. 본 논문에서 제안된 모델은 시시각각 변하는 교통조건에 대하여 효과적인 제어기로 어떠한 교통 조건에도 능동적으로 대처 가능한 모델이다.

5. 결 론

많은 이산 사건 시스템들의 상태 천이는 시간과 관련이 있으며, 시간 페트리 넷에 의해서 모델링되고 분석되어진다. 그러나 이런 시간페트리 넷은 트랜지션의 발화 시간을 임의의 시간간격으로만 줄 수 있을 뿐 명확한 발화 시간을 결정 할 수는 없다. 따라서 본 논문은 시간 페트리 넷의 발화 시간구간에서 가장 적절한 트랜지션의 발화 시간을 제어 하기 위해서 시간 페트리 넷에 퍼지 이론을 결합한 FTTPN을 제안하였다 제안된 FTTPN은 트랜지션의 발화 시간을 계산하기 위한 복잡한 계산이나 가정, 고려조건 없이도 트랜지션의 발화 시간을 결정하는 것이 가능하다. 본 논문에서는 이런 FTTPN의 장점을 이용하고 응용하여 교통신호 제어기를 모델링하였다. 제안된 모델은 교차로의 각 방향에 대하여 독립적이고, 시 변 교통 조건에 대하여 능동적으로 동작하기 때문에 교차로의 상태나 교차로의 종류에 따라 광범위하게 응용 할 수 있다.

시뮬레이션으로부터 얻어진 결과는 단위시간연장 교통 신호기 보다 제안된 방법이 우수함을 보인다. 제안된 FTTPN은 FMS등 많은 분야에 적용 가능하며, 단일 교차로가 아닌 둘 이상의 교차로에 대한 연구가 진행되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Jiacun Wang, "Timed Petri Nets Theory and Application", *Kluwer Academic Publishers*, Massachusetts, 1998.
- [2] G. Bucci and E. Member, "Compositional validation of time-critical system using communicating time petri net", *IEEE Transaction on software Engineering*, 21(12), pp. 969-992, 1995.
- [3] B. Berthomieu and M. Diaz, "Modeling and Verification of Timed Dependent Systems Using Time Petri Net", *IEEE Transactions on software Engineering*, 17(3), pp. 259-275, 1991.
- [4] Tadio Murata, "Petri Net: Properties, Analysis, and Application", *Pro. IEEE* vol. 77, pp. 541-880, 1989.
- [5] W. M. Zuberek, "Timed Petri net: Definition, Properties, and Application", *Microelectron. Reliab.*, 1991.
- [6] H. J. Genrich. Predicate/transition. In: Jensen, J. and Rozenberg, G.(Eds), "High-level Petri nets: theory and application", Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [7] A Jensen, A high-level language for system design and

- analysis. In: Jensen, J. and Rozenberg, G. (Eds). "High-level Petri nets: theory and application", Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [8] 오성권, "퍼지 모델 및 제어이론과 프로그램", 기다리. 1999.
- [9] Jee-Hyong Lee and Hyung Lee-Kwang, "Distributed and Cooperative Fuzzy Controllers for Traffic Intersections Group" *IEEE Trans. Syst., Man. Cybern.*, vol. 29, pp. 263-271, 1999.
- [10] C. P. Pappis and E. H. Mamdani, "a Fuzzy logic controller for traffic controller for a traffic junction," *IEEE Trans. Syst., Man. Cybern.*, vol. 7. pp. 707-717, 1977.
- [11] R. Hoyer and U. Jumar, "Fuzzy control of traffic light." in *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems*, 1994, pp. 1526-1531.
- [12] F. DiCesare, P.T. Klup, M. Gile, and G. List, "The Application of petri Net to the Modeling, Analysis and Control of Intelligent Urban Traffic Networks," *Advances in Petri Net 1994, Lecture Notes in Computer Science 815*, R. Valette(Ed.), Springer-Venlag, pp. 2-15, 1994
- [13] Huaitien Wang, George F.List and F.DiCesare "Modeling and Evaluation of Traffic Signal Control Using Timed Petri Net," *Proc. 1993 Int. Conf. System. Man and Cybernetics*, vol. 2, pp. 180-185, LeTouquet, France, 1993
- [14] 고인선, "'스토케스틱 페트리 네트를 이용한 교통량 대응신호기 설계 및 교통 흐름 분석.'" *전자공학회논문지*, pp. 306-316, 3월 1999.

저 자 소 개



황 형 수 (Hyung-Soo Hwang)

1981년 : 전북대학교 전기공학과 졸업
 1987년 : 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박)
 1991년~현재 : 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 교수

관심분야 : 퍼지제어, 지능제어, 이산사건 시스템 모델링 및 제어



김 진 권 (Jin-Kwon Kim)

1998년 : 원광대학교 제어계측공학과 졸업
 2000년~현재 : 동 대학원 전기공학과 박사과정

관심분야 : 지능제어, 이산사건시스템 모델링 및 제어



모 영 승 (Young-Seung Mo)

1998년 : 원광대학교 제어계측공학과 졸업
 1999년~현재 : 동 대학원 제어계측과 석사과정

관심분야 : 지능제어, 이산사건시스템 모델링 및 제어, MCU 제어



김 정 철 (Jung-Chul Kim)

2000년 : 원광대학교 전기공학부 졸업
 2000년~현재 : 동 대학원 제어계측과 석사과정

관심분야 : 지능제어, 이산사건시스템 모델링 및 제어