

論文99-36S-3-5

스토케스틱 페트리 넷를 이용한 교통량 대응 신호기 설계 및 교통흐름 분석

(Design of Traffic-Adaptive Signal Controller and Analysis of Traffic Flow in Intersections Using Stochastic Petri Nets)

高仁善 *

(Inseon Koh)

요 약

본 논문에서는 DSPN(Deterministic and Stochastic Petri Net)을 이용, 교차로에서의 차량 진입과 같은 이산 사건(discrete events)적인 상황을 해석하고, 교통신호기의 동작과 차량흐름을 모델링하였다. 교차로에서의 차량 흐름을 확률적 개념으로 표현하여, 차량 변화에 따른 교차로의 상황을 토큰의 변화로 나타내었다. GreatSPN을 사용한 모의 실험을 통하여, 모델링된 교통신호기하에서의 차량의 평균 지체시간을 분석하였다. 차량 지체시간을 이용하여 단위시간연장 교통량 대응 신호기와 본 논문에서 제안한 최대시간허용 교통량 대응 신호기의 성능을 비교 분석하여, 최대시간허용 교통량 대응 신호기가 단위시간연장 교통량 신호기보다 좋은 특성을 나타냄을 보였다. 2개의 교차로로 이루어진 시스템을 본 논문에서 개발한 기본 모듈들을 서로 연결하여 분석하였고, 이러한 성능 분석을 통하여 주위 여건에 적합한 새로운 교통신호기를 구현할 수 있음을 보였다.

Abstract

In this paper, the analysis for discrete dynamic systems, such as the entrance of vehicles from all directions of the intersection, is performed, and the operation of traffic signal controllers and the flow of vehicles are modeled by DSPN(Deterministic and Stochastic Petri Nets). The flow of vehicles in the intersection are described using the concept of probability. The situations of the intersection due to the change of the number of vehicles entering the intersection are represented by the variation of tokens in the modeled system. Through simulation, we analyse the average delay time of vehicles in the modeled traffic signal system, and the results of the evaluation are derived from a Petri Net-based simulation package, GreatSPN. Two kinds of the traffic-adaptive signal controller are modeled and analyzed, which are an unit-time extension controller and a maximum-time allowing controller. The latter one introduced in this paper has better performance than the former one from the average delay-time point of view. Two intersections are merged into a single model using the synthesis method of Petri nets. A new traffic signal controller suitable to specific road condition can be easily implemented on the base of the result of the evaluation.

* 正會員, 弘益大學校 電子工學科
(Dept. of Electronics Engineering, Hong-Ik University)

※ 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제
연구비에 의하여 연구되었음
接受日: 1998년 4월 24일, 수정완료일: 1998년 12월 4일

I. 서론

교통신호기는 차량의 충돌 현상을 방지하면서, 적절한 신호시간의 배분을 통해 교차로를 통과하는 차량의 지체시간을 줄이고, 원활한 차량흐름을 목적으로 한다. 교통 혼잡이 빈번한 상황이나 차량 유입의 변화가 큰 곳에서 교통신호 제어의 주안점은, 방향별로 진입하는 차량 수에 연동하여 각 방향별 신호시간의 배분을 최적화 하는 것이다. 차량의 종류, 상태, 운전자의 숙련도, 도로 상황, 차량 진입율, 기상 상태 등의 여러 가지 요인들이 교통흐름에 영향을 미친다. 이 원인들 중에서 교통흐름에 가장 큰 영향을 주는 것은 차량 진입율이다. 일반적으로 차량 진입은 일정한 주기를 형성하지 않기 때문에, 교차로와 같이 차량 진입이 중첩되는 곳에서의 교통흐름 분석을 어렵게 한다.

교통신호 제어시스템에서 교차로의 신호화는 중요하고 복잡한 요소들 중 하나이다. 동일한 시간에 다른 방향의 차량들이 동시에 통행 우선권을 원하기 때문에, 부적절하게 설정된 교통신호는 불필요한 신호를 발생 시킴에 따라 차량 지체를 일으키는 원인이 된다. 차량의 단기적인 변동이 심한 경우나 차량의 통행이 적은 경우에, 기존의 정주기식 교통신호기는 교차로에 진입하는 차량 수에 관계없이 일정한 신호시간과 주기를 유지함으로써 차량의 지체시간이 증가한다. 각 진입 방향의 차량 진입율의 차이가 심한 경우도 같은 현상을 유발한다. 이러한 이유로 차량의 원활한 소통을 위해 지능적으로 교통흐름을 제어하는 알고리즘의 개발이 필요하다. 새로운 교통량 대응 교통신호 제어시스템은 검지 체계의 발달에 따른 다양한 교통정보를 바탕으로, 전체 교차로 이용 차량의 평균 지체시간을 최소화시키는 동시에 급격한 주기 변동에 따른 교통흐름의 충격을 최소화시킬 수 있도록 신호주기를 변화시켜야 한다.

위에서 지적한 동시적(concurrent), 비동기적(asynchronous), 사건 유도적(event driven) 상황의 교통흐름을 모델링하고 제어하는 도구로써 페트리 넷트는 다른 모델링 기법보다 여러 가지의 장점을 가지고 있다. 현재까지 교통흐름 분석을 위한 기존의 페트리 넷 모델링에서, 시간개념이 없는 페트리 넷트를 이용, 차량의 충돌 현상 문제나 신호시간 배분 등의 문제를 해결하였다^[1]. 시간 개념을 첨가한 차량 흐름과 교통신호기에 대한 모델링을 제시하는 실험적 연구가 진행

되고 있다 [2], [3].

본 논문에서는 Deterministic and Stochastic Petri Nets(DSPN)으로 모델링된 새로운 교통량 대응 신호기를 소개하고, 개발된 교통량 대응 신호기하에서의 각 방향의 교통흐름을 분석한다. 차량의 교차로 진입과 차량흐름을 제어하는 교통신호는 연속적으로 발생하지만, 서로 상관관계를 갖지 않기 때문에, 신호에 의해 차량 흐름이 영향받는 부분만 제외하면 상호 독립된 시스템으로 모델링이 가능하다. 또한, 다른 곳에 위치한 동일 형태의 교차로의 모델링은, 기본 교차로 모델에서 차량 진입율의 변경을 통해 이루어질 수 있다. DSPN에서는 교차로의 차량 유입을 확률 변수로 표현할 수 있고, 이의 변화에 따른 교차로의 상황, 해당하는 플레이스(place)의 토큰 변화로 알 수 있다. 본 논문에서는, 모델링된 시스템에서 차량의 지체시간, 단위시간당 교차로 통과 차량수와 같은 교통신호 제어 시스템의 성능 변수 값들을 DSPN을 사용한 모의실험을 통하여 얻는다. 또한, 교차로 대기 차량의 지체시간을 통해 기존의 교통신호기와 본 논문에서 제안한 교통신호기의 성능을 상호 비교하고, 이를 바탕으로 교통신호 제어시스템을 수정, 개발할 수 있음을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 사용된 기본용어와 DSPN을 간략히 소개하고, 3장에서는 교차로에서의 차량 흐름과 교통신호기에 대한 페트리 넷 모델링을 제시한다. 4장에서는 신호결정 패턴 알고리즘을 설명하고, 모의 실험 결과를 제시한다. 끝으로, 5장에서는 결론 및 향후 과제를 논의한다.

II. 기본 용어

인히비터(inhibitor) 호선(arc)을 가진 페트리 넷트는 아래와 같이 여섯 개의 구성 요소로 정의된다.

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

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 은 플레이스(place) 집합;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 은 트랜지션(transition) 집합;

$I: P \times T \rightarrow N$ 은 입력함수;

$O: P \times T \rightarrow N$ 은 출력함수;

$H: P \times T \rightarrow N$ 은 인히비터 함수;

$M_0 = [m(p_1), m(p_2), \dots, m(p_n)]$ 은 초기 마킹.

입력 함수와 출력 함수는 플레이스들과 트랜지션들의 입력과 출력 관계이데, 연결된 호선의 수로 표시한

다. 입력 함수는 입력 플레이스에서 트랜지션으로 연결된 호선수이고, 출력 함수는 트랜지션에서 출력 플레이스로 연결된 호선수를 나타낸다. 인히비터 함수는 입력 함수의 일종이나, 입력 플레이스의 토큰의 역할이 다르다. 입력 함수에서는 입력 플레이스의 토큰은 트랜지션을 활성화하지만, 인히비터 함수의 입력 플레이스의 토큰은 연결된 트랜지션의 발화를 제한하는 조건이 된다. 인히비터 함수는 호선의 끝을 화살표가 아닌 조그만 원으로 표현한다. 플레이스의 토큰은 점으로 표현되며, 모델링된 시스템의 특정 상태를 나타낸다. M_0 는 초기 마킹이라고 불리는데, 시스템의 초기 상태를 보여준다. 본 논문에서 대부분의 경우, 트랜지션은 특정 사건(event)의 시작 혹은 끝을, 플레이스의 토큰은 시스템의 상태나 발화조건을 의미한다.

어떠한 트랜지션이 발화해야 할지는 외부에서 결정해야 한다. 이러한 현상을 충돌현상(conflict situation)이라고 한다. 그림 1(b)에서는 p_4 에 토큰이 존재하므로, 인히비터 호선 때문에 p_5 의 토큰이 p_7 로 이동하지 못한다. p_5 와 p_6 모두에 토큰이 존재하므로, t_3 가 발화하여 토큰이 p_8 로 이동한다. 만약 p_4 에 토큰이 존재하지 않을 경우, t_2 나 t_3 중 하나만 발화한다. 이와 같은 충돌 현상은 보통(ordinary) 페트리 네트에서는 우선권을, 시간(timed) 페트리 네트나 스토케스틱(stochastic) 페트리 네트의 경우에는 트랜지션들의 서로 상이한 지연시간을 이용하여 해결할 수 있다.

본 논문에서 교통 시스템을 모델링할 때 Deterministic and Stochastic Petri Nets(DSPN)를 사용하였다. DSPN은 위에서 설명한 페트리 네트의 정의를 모두 만족하며, 세 가지 종류의 트랜지션: 이미디어트(immediate) 트랜지션, 디터미니스틱(deterministic) 트랜지션, 스토케스틱(stochastic) 트랜지션이 있다. 이미디어트 트랜지션은 활성화된 후 즉시 발화하며, 짧고 가는 선으로 표현된다. 디터미니스틱 트랜지션은 발화하는데 주어진 상수값의 지연 시간을 가지며, 굵은 막대 선으로 표현된다. 스토케스틱 트랜지션은 발화 지연시간이 지수함수로 분포되어있고, 네모난 상자로 표현된다. 이미디어트 트랜지션은 디터미니스틱 트랜지션과 스토케스틱 트랜지션에 대해 발화 우선권을 가지며, 디터미니스틱 트랜지션과 스토케스틱 트랜지션에 의한 충돌 현상은 지연 시간의 비율에 따른 토큰의 변화로 해결된다.

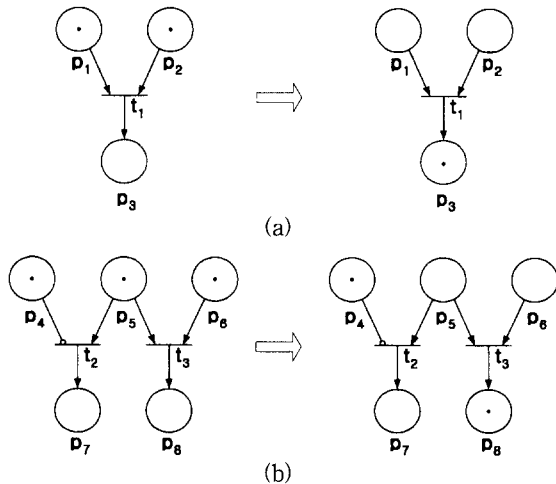


그림 1. 발화 규칙 (a) 트랜지션의 발화 (b) 인히비터 호선의 역할

Fig. 1. Firing rule. (a) Transition firing (b) Role of an inhibitor arc

그림 1은 페트리 네트에서 트랜지션 발화 규칙을 보여준다. 그림 1(a)에서, 두 개의 플레이스 p_1, p_2 에 모두 토큰이 존재하므로 트랜지션 t_1 이 활성화된다. 만약 둘 중 하나라도 토큰이 존재하지 않으면, t_1 은 활성화되지 못한다. 활성화된 t_1 이 발화하면, 토큰은 p_3 로 이동한다. 그림 1(b)에서는, p_4 와 t_2 가 인히비터 함수로 연결되어 있다. 또한, p_5 의 토큰은 t_3 의 발화 조건인 동시에, t_3 의 발화 조건이다. 만약 p_4 와 t_2 가 인히비터 호선으로 연결되어 있지 않고, 일반 호선으로 연결되어 있으면, 두 트랜지션들을 동시에 활성화시키나, 하나의 트랜지션밖에 발화할 수 없기 때문에,

III. 교차로의 스토케스틱 페트리 네트 모델

그림 2는 본 논문에서 취급할 교차로이다. 이 교차로에서의 신호 상황을 다음과 같은 가정하였다.

- 보행자의 통행을 위한 횡단 보도나 신호는 존재하지 않는다.
- 별도의 우회전 신호는 존재하지 않는다.
- 신호는 좌회전, 직진, 황색, 적색 신호의 네 종류의 신호가 있으며, 좌회전 신호와 직진 신호 후에는 각각 황색 신호가 존재한다.

차량 검지기는 교차로 각 진입 방향에 위치하여, 교차로에 유입되는 차량의 수를 파악한다. 차량 검지기의 위치도 그 방향에서의 대기 차량수를 결정하는 한 요인이 되고, 신호가 바뀌는 순간의 차량 충돌을 방지하

기 위하여, 검지기 위치는 적절한 지점에 설정되어야 한다.

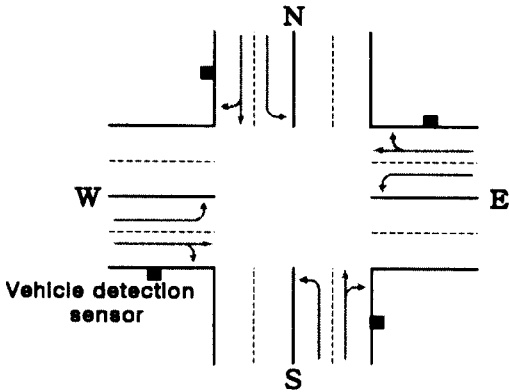


그림 2. 교차로
Fig. 2. Intersection.

1. 차량 흐름 모델

차량 흐름 모델은 교차로에서의 교차로 진입과 차량 경로와 같은 동적인 동작과 상태를 표현한다. 차량은 특정 플레이스 내의 토큰으로 표현되며, 토큰 수는 차량수를 의미한다. 교차로에서의 차량의 상태는 일반적으로 진입, 대기, 통과와 세 상태로 구분된다. 이러한 차량의 상태는 플레이스들의 조합으로 표현할 수 있는데, 임의의 상태를 표현하는 데에 하나 또는 그 이상의 플레이스가 사용될 수 있다. 현재 상태는 플레이스 내에서의 토큰의 유무를 통하여 결정된다. 그림 3은 단일 방향에 대한 차량 흐름을 DSPN으로 모델링한 것이다. 이 차량 흐름 모델은 참고 문헌 [3]의 모델의 성능과 근본적으로 동일하나, 네트 구조상 인히비터 호선을 제거하여 이해하기 쉽도록 하였다. 각 트랜지션, 플레이스와 토큰의 의미는 다음과 같다.

- t_1 : 차량의 교차로 진입.
- t_2 : 신호를 얻어 교차로 통과 시작.
- t_3 : 교차로 통과(상수 지연 시간).
- t_4 : 교차로 통과(지수 함수적 지연 시간).
- p_w : 차량 진입후 대기 상태(토큰수: 차량수).
- p_1 : 차량 통과 시작 상태(토큰수: 차량수).
- p_2 : 차량 통과 상태(토큰수: 차량수).
- p_3 : 차량들간의 간섭(토큰: 통과 허가)
- p_c : 교통신호기의 신호 상태(토큰: 신호 점등).

그림 3의 차량 흐름 모델의 동작 순서는 아래와 같다. t_1 이 발화한다. 차량 진입이 시작되었다는 상태,

즉, 검지기에 차량이 검지 되는 것을 나타내며, 차량들 도착 사이의 시간간격(inter-arrival time)은 지수함수 분포를 가진다고 가정한다. 이 가정은 실제 상황과 크게 다르지 않다. 플레이스 p_1 이 마킹 된다. 진입한 차량이 대기하며 신호를 기다린다. p_c 에 토큰이 존재하면, p_1 의 토큰이 t_2 를 통하여 p_2 로 발화한다. 대기 차량이 신호를 얻어 교차로를 통과하기 시작한다. p_2 의 토큰은 t_3 를 활성화시키고, t_3 에서 p_3 와 p_4 로 발화한다. t_3 는 차량이 교차로를 통과하는데 상수값의 지연 시간 (평균 통과시간)을 의미하고, p_3 의 토큰은 통과 상태를 의미한다. p_4 의 토큰은 차량 사이의 시간간격을 의미한다. p_3 는 t_4 를 활성화시킨다. t_4 의 발화율은 지수 함수 분포를 가지며, 차량의 교차로를 통과하는데 그 평균 시간만큼 지연된다. 사거리 교차로의 차량 흐름은 이 기본 차량 흐름을 각 사거리 진입에 적용함으로써 이루어진다.

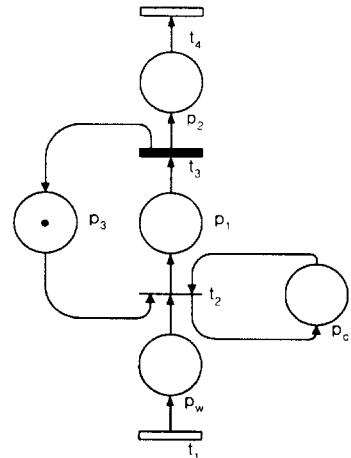


그림 3. 단일 방향의 차량 흐름 모델
Fig. 3. Vehicle flow model for a single direction.

2. 교통신호 동작 방식

현재 보편적으로 사용되고 있는 정주기식 교통신호기는 시간대에 따라서 변화할 수 있는 차량 진입율을 고려하지 않고, 신호주기 및 각 차량 진행 방향에 할당되는 신호시간이 일정하다. 이보다 발전된 정주기식 교통신호기는 일정 기간의 통계 자료를 토대로 시간대별로 몇 가지 유형을 신호기에 부여한다. 그럼에도 불구하고 이것은 단기간의 차량의 변화에 대처하지 못하므로 불필요한 시간을 소요하여 교통 문제를 가중시키는 원인이 되기도 한다. 이에 반해 교통량 대응 신호기는 교차로 각 방향에서의 차량의 진입량에 의해

신호시간 및 신호순서가 조절되는 신호기이다. 교통량 대응 신호기는 단기간의 차량의 변화에 대응하여 그 신호시간 및 주기를 가변할수 있다. 교통량 대응 신호기는 동작 알고리즘에 따라 세분화될 수 있다.

본 연구에서는 두 가지의 교통량 대응 신호기를 스토캐스틱 페트리 넷으로 모델링하고, 이들의 성능을 비교 분석한다. 정주기식 신호기도 모델링을 하여 성능 분석을 하였으나, 교통량 대응신호기가 아니므로 결과를 나타내지는 않았다. 참고로, 정주기식 교통 신호기에서의 차량 당 평균 지체 시간은, 각 교차로 방향에서의 차량 진입율이 차이가 많이 날 경우, 교통량 대응 신호기의 차량 당 평균 지체 시간 보다 크다.

두 가지의 교통량 대응 신호기 중 하나는 단위시간 연장 교통량 대응 신호기이고, 다른 하나는 최대시간 허용 교통량 대응 신호기이다. 단위시간연장 교통량 대응 신호기는 [3]의 모델을 수정한 것이고, 최대시간허용 교통량 대응 신호기는 본 논문에서 제안하고, 모델링하였다. 아래에서는 단위시간연장 교통량 대응 신호기와 최대시간허용 교통량 대응 신호기를 각각 단위시간 신호기와 최대시간 신호기로 줄여서 표현하였다.

단위시간 신호기는 다음과 같은 동작 알고리즘을 갖는다.

- 기본 신호시간을 부여한다.
- 기본 신호시간 기간에 통과하지 못한 차량의 유무를 파악한다.
- 대기 차량이 존재하면, 신호시간을 최대연장 횟수 범위 내에서 단위시간씩 연장한다.

최대시간 신호기는 다음과 같은 동작 알고리즘을 갖는다.

- 대기 차량의 유무를 파악하여 신호를 점등한다.
- 대기 차량이 없으면, 신호를 종료하고 다음 신호로 바뀐다.
- 대기 차량이 존재하면, 이러한 동작을 최대시간이 경과 할 때까지 반복한다.

위에서 대기차량의 수는 차량 검지기 범위 내의 차량 수로써, 급정거로 인한 사고를 배제할 수 있도록 한다.

3. 교통신호기 모델

교통신호기의 스토캐스틱 페트리 넷 모델은 신호 점등의 순서와 교차로 각 방향의 교통신호의 상태를 표현한다. 또한, 이 모델은 충돌 현상이 발생할 방향들

에 녹색 신호 부여를 방지하는 상호 배척 특성을 가진다.

정주기식 신호기에서 신호를 부여하는 순서는 좌회전 후 직진을 바탕으로, NS방향 좌회전, NS방향 직진, EW방향 좌회전, EW방향 직진순이다. 여기에서, NS방향은 남쪽에서 북쪽, 북쪽에서 남쪽으로의 차량 진행 방향 모두를 의미한다. 마찬가지로, EW는 동쪽과 서쪽에서의 차량들의 진행 방향이다. 이 방식의 교통 신호기에서는 설계자가 신호주기 및 각 방향의 신호시간의 패턴을 정할 수는 있으나, 일단 정해진 값은 고정된다.

정주기식 신호기와 달리 교통량 대응 신호기는 시간에 따른 교차로 각 방향에서 진입하는 차량수 변동에 의해 신호주기가 조절되는 신호기이다. 또한, 신호주기 뿐만 아니라 신호순서도 변할 수 있다. 본 논문에서 기본적인 신호 점등 순서는 정주기식 신호기와 동일하게 NS방향 좌회전, NS방향 직진, EW방향 좌회전, EW방향 직진 신호의 순서를 가진다고 가정한다. 근본적으로 정주기 신호기와 다른 점은, 정주기 신호기에서는 이러한 순서가 신호를 부여하는 순서이지만, 교통량 대응 신호기에서는 대기차량 검사 순서이다. 교통량 대응 신호기의 한 종류인 최대시간 신호기에서는 대기차량 유무에 따라 어떤 방향의 신호가 생략 될 수도 있다.

단위시간 신호기의 신호시간은 기본신호시간과 단위시간의 연장으로 구성된다. 그림 4는 단일 방향에 대한 단위시간 신호기를 스토캐스틱 페트리 넷으로 모델링한 것이다. 여기에는 스토캐스틱 트랜지션이 존재하지 않으나 나중에 교통흐름 모델과 합성되기 때문에 스토캐스틱 페트리 넷이라고 하였다. 점선 부분은 그림 3의 차량흐름 모델의 일부분으로써 단위시간 신호기와의 연결된 일부분을 나타낸다. 트랜지션, 플레이스, 토큰의 의미는 아래와 같다.

- t_1 : 교차로 진입.
- t_2 : 교차로 통과 시작.
- t_{c1} : 신호 시작.
- t_{e2} : 기본 신호시간.
- t_{c3} : 연장 없이 신호시간 경과.
- t_{c4} : 신호 종료.
- t_{c5} : 대기 차량이 존재하여 신호시간이 연장.
- t_{c6} : 단위 연장 시간.

- t_{c1} : 연장된 신호시간 경과.
- t_{c8} : 연장할 신호 회수의 재입력.
- p_{c1} : 신호 점등 상태.
- p_{c2} : 신호가 시작된 상태.
- p_{c3} : 기본 신호시간이 경과한 상태.
- p_{c4} : 연장 없이 신호가 종료되기 전 상태.
- p_{c5}, p_{c6} : 신호시간이 연장되는 전후의 상태.
- p_{c7} : 연장할 신호시간의 회수(토콘: 연장회수).
- p_{c8} : 연장된 신호시간의 회수.
- p_w : 진입후 대기 상태(토콘: 대기 차량수).

단위시간 연장을 기본으로 하는 교통량 대응 신호기 모델의 동작 원리는 다음과 같다. t_{c1} 이 발화한다. 신호가 시작된다. p_{c1} 의 토콘은 신호가 켜져 있음을 의미한다. p_{c2} 의 토콘이 t_{c2} 를 활성화한다. t_{c2} 의 지연 시간만큼 기본 신호시간의 신호를 유지한다. p_w 에 토콘이 존재하면, $p_{c3} t_{c3} p_{c5} p_{c6} t_{c4} p_{c3}$ 의 경로로 토콘이 이동한다. 이 경우, 기본 신호시간 동안에 교차로를 통과하지 못한 차량이 있으므로, 신호시간이 연장된다. p_w 에 토콘이 존재하지 않으면, $p_{c3} t_{c3} p_{c4}$ 의 경로로 토콘이 이동한다. 대기 차량이 없으면, 신호를 종료한다. p_{c4} 에 토콘이 있으면, 단위시간 연장을 반복한다. 토콘수는 단위시간연장 회수를 의미하며, 남아 있는 토콘만큼 연장이 가능하다. p_{c4} 에 토콘이 없으면, $p_{c3} t_{c3} p_{c4}$ 의 경로로 토콘이 이동한다. 정해진 회수가 경과하면, 현재의 신호를 종료하고 다음 신호로 바꾼다. 초기에 p_w 에 토콘이 존재하면 p_{c1} 의 토콘수만큼 항상 시간이 연장되는 것 같이 보이나, 처음 존재한 p_w 의 토콘은 t_2 (그림 3)의 발화에 의하여 사라지게 되므로, p_w 에 토콘이 있는 경우에만 단위 시간을 연장한다. 여기서 t_2 와 p_{c1} 이 연결된 양방향의 호선은 루프(loop)를 표시한다.

사거리 교차로에 대한 단위시간 신호기의 모델링은 그림 4의 기본 모듈 4개를 연결함으로써 이루어진다. 여기서는 지면상 그 결과를 나타내지 않았다. 기본 신호시간과 단위시간 연장은 설계자가 쉽게 설정할 수 있고, 단위시간연장 회수를 의미하는 p_{c1} 에 주어지는 토콘수도 설계자가 설정하거나 변경할 수 있다. 이들 변수들은 신호주기 및 각 방향에 대한 신호시간에 직접 영향을 끼치고, 차량 흐름 분석을 위한 중요한 변수들이 된다.

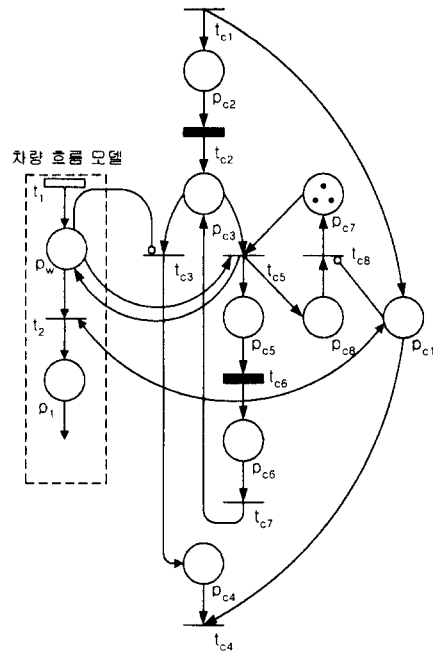


그림 4. 단일 방향의 단위시간연장 교통량 대응 신호기 모델
 Fig. 4. Model of one directional traffic-adaptive signal controller with unit time-extensions.

다음은 본 논문에서 제안한 교통신호기에 대하여 알아본다. 최대시간 신호기는 주어진 최대시간동안 계속 차량의 유무를 감지 하여, 신호시간을 조절하는 신호기이다. 그림 5는 단일 방향의 최대시간 신호기에 대한 스토케스틱 페트리 넷 모델이다. 점선 부분은 그림 3의 차량흐름 모델의 일부분으로써 최대시간 신호기와의 연결된 일부분을 나타낸다. 그림 5의 트랜지션과 플레이스 의미는 아래와 같다.

- t_1 : 교차로 진입.
- t_2 : 교차로 통과 시작.
- t_{c1} : 전 신호가 종료되고 황색 신호 시작.
- t_{c2} : 황색 신호시간.
- t_{c3} : 신호 시작.
- t_{c4} : 대기 차량이 없어서 신호 연장을 하지 않음.
- t_{c5} : 신호 종료
- t_{c6} : 최대시간 부여.
- t_{c7} : 최대시간이 경과한 후 종료
- t_{c8} : 최대시간이 경과하지 않은 상태에서 종료 p_{c1} 의 토콘을 제거하기 위한 보조 트랜지션.
- t_{c9} : 최대시간 경과한 후, p_{c1} 에 토콘이 있을 경우

(대기 차량이 있을 경우) 신호의 종료를 알리고 p_{c3} 에 있는 토큰을 제거한다.

t_{c10} : 최대시간 경과한 후, p_{c3} 에 토큰이 없을 경우 (대기 차량이 없을 경우), p_{c3} 에 있는 토큰을 제거하기 위한 보조 트랜지션.

p_{c1} : 황색 신호 상태.

p_{c2} : 황색 신호 종료 상태.

p_{c3} : 신호 시작 상태.

p_{c4} : 대기 차량이 없어서 신호 연장이 없는 상태.

p_{c5}, p_{c6} : 최대시간 부여를 위한 보조 플레이스.

p_{c7} : 최대시간이 경과한 상태.

p_{c8} : 차량 진입후 대기 상태(토큰수: 대기 차량수).

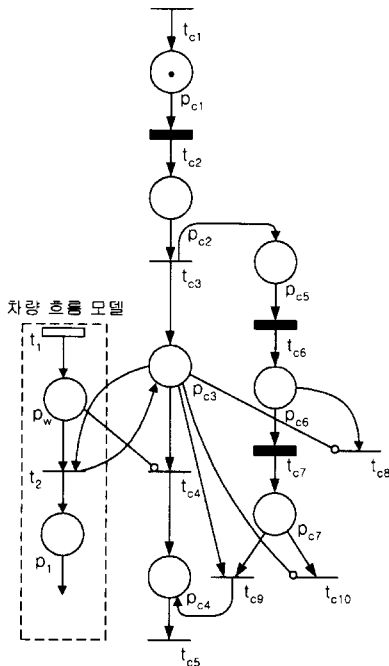


그림 5. 단일 방향의 최대시간 교통량 대응 신호기
Fig. 5. Model of one Directional traffic-adaptive signal controller with maximum time.

그림 5의 최대시간 신호기는 다음과 같이 동작한다. $t_{c3}p_{c3}t_{c4}p_{c4}t_{c5}$ 로 이루어진 경로는 신호기의 동작을 표현하고, $t_{c3}p_{c3}t_{c6}p_{c6}t_{c7}p_{c7}t_{c8}$ 의 경로는 최대시간의 검지를 인식하는 동작을 표현한다. t_{c1} 이 발화하여 p_{c3} 과 p_{c5} 에 토큰이 존재한다. 신호가 시작되고, 대기 차량의 유무를 검지 한다. 대기하는 차량이 없으면 p_{c3} 의 토큰이 p_{c4} 로 이동한다. 대기 차량이 없을 경우에는 최대시간이 경과하지 않더라도 신호를 종료한다(t_{c8}). 대기하는 차량이 있으면 t_{c1} 이 발화한다. 최대시간이 경과

하면 대기차량이 있더라도 신호를 종료한다(t_{c9}). 같은 경우에 대기차량이 없으면 t_{c10} 을 발화시키고 신호를 종료한다. 모든 방향에 차량이 존재하지 않았을 때, 최대시간이 모두 경과되지 않은 상태에서 다음 주기가 시작될 우려가 있다. 이 때, 시간 측정을 위한 토큰이 없어지지 않으므로, 이의 방지를 위해, t_{c10} 을 사용하여 다음 주기가 돌아오기 전에 토큰을 없앤다. 현재의 주기가 끝나고 다음 주기가 시작될 때까지의 최소 시간은 각 방향에서의 황색 시간의 합이다.

사거리 교차로에 대한 최대시간 신호기의 모델링은 그림 5의 기본 모듈 4개를 연결함으로써 이루어진다. 그림 6은 그림 2의 사거리 교차로에서 구현된 최대시간 신호기의 스토케스틱 페트리넷 모델이다. 4개의 기본 모듈은 각각 NS 방향 좌회전, NS 방향 직진, EW 방향 좌회전, EW 방향 직진의 교통 제어 신호를 나타낸다.

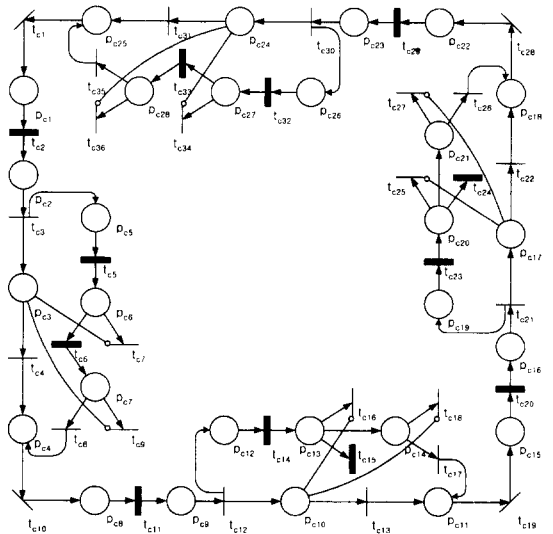


그림 6. 사거리 교차로의 최대시간 신호기 모델
Fig. 6. Traffic-adaptive signal controller with maximum time for 4-way intersection.

다음절에서는 위에서 서술된 2가지 유형의 교통신호기 시스템을 GreatSPN을 이용한 모의 실험을 통해 성능을 비교 분석한다.

IV. 모의 실험

1. GreatSPN

Chiola [7]에 의하여 개발된 GreatSPN은 GRa-

phical Editor and Analyzer for Timed and Stochastic Petri Nets의 약어로, Stochastic Petri Nets를 이용하여 분산 시스템 및 이산 사건 시스템을 모델링하고, 성능을 평가하는 소프트웨어 패키지이다^{8, 9)}. GreatSPN은 플레이스와 트랜지션의 편집 기능과 모의 실험을 통한 분석 기능을 가지고 있다. 데드락(deadlocks), 트랩(traps), 충돌(conflicts), 컨퓨전(confusion)등의 구조적인 특성과 P-불변, T-불변과 리치어빌리티(reachability) 그래프 등을 얻을 수 있고, 모델링된 시스템의 동적 특성을 구할 수 있다. 또한, 트랜지션의 발화를 확률 분포로 구현할 수 있고, 각 마킹에서의 평균 지연시간 등과 같은 성능 분석을 할 수 있다.

2. 성능 분석

그림 3의 p_1 의 토큰수를 분석하면, 대기 차량수를 구할 수 있다. 평균 대기 차량수는 식 (1)과 같다.

$$E[p_1] = \sum_{n=0}^N n_i(p_1)P(n_i(p_1)) \quad (1)$$

여기서, $n_i(p_1)$ 는 차량의 수를 나타내는 0을 포함한 자연수이고, $n_0(p_1)=0, n_1(p_1)=1, \dots, n_N(p_1)=N$ 을 의미하며, N 은 p_1 에서의 토큰수의 최대값을 나타낸다. 최대값은 감지기 내에 차량이 더 들어올 수 없는 상태를 의미한다. 그리고, $P(n_i(p_1))$ 는 $n_i(p_1)$ 의 확률을 나타낸다. 이 확률은 t_1 과 t_2 의 발화에 의해 결정되며, $\sum_{n=0}^N P(n_i(p_1))=1$ 을 만족한다. 또한, 전체 차량 지체시간의 평균값은 평균 대기 차량수에 측정기간을 곱하여 식 (2)와 같이 표현된다.

$$D(p_1) = E[p_1] \times T \quad (2)$$

여기에서, $D(p_1)$ 는 지체시간이고, T 는 측정기간이다. 플레이스 p_1 로의 진입률 $\kappa(p_1)$ 가 주어졌 있을 때, 이 방향으로의 평균 진입 차량수는 $\kappa(p_1) \times T$ 이다. 따라서, 차량 한대당 평균 지체시간 $d(x)$ 는 식 (3)과 같다.

$$d(p_1) = E[p_1] / \kappa(p_1) \quad (3)$$

사거리 모든 방향에서 위 식들이 성립한다.

모의 실험은 크게 두 가지 경우에 대해서 실시하였다. 하나는 랜덤하게 주어지는 차량의 교차로 진입율을 입력으로 하여 위에서 모델링한 교통신호기들에 대한 성능을 비교하는 것이다. 다른 하나는 인접한 교차

로의 연결 문제에 대한 고찰이다. 이를 위해 두 개의 인접 교차로를 연결하고 모의 실험하였다.

첫 번째 모의 실험에서 차량 진입율은 표 1과 같다고 가정하였다. 교차로 각 방향에서 진입하는 차량수는 랜덤하므로, 이를 $f(t) = (1/\tau) \exp(-t/\tau)$ 라는 지수 밀도 함수로 표현하였고, 진입율은 이 함수의 평균값인 $1/\tau$ 을 나타낸다. 통과율은 차량이 교차로를 통과할 시 발생하는 차량들 간의 간섭에 의한 지체시간을 표현한 것으로, 이것도 지수 함수 분포를 가진다고 가정하였고, 통과율은 주어진 지수함수의 평균값이다. 표 1의 진입율 1과 2에 대해 표 2의 각 교통신호기들의 신호시간 패턴을 이용하여 모의 실험하였다. 본 논문에서는 교통신호기들 사이의 성능을 차량 한대당 지체시간으로 비교하였다. 표 2는 신호기에 따른 몇 가지의 신호시간 패턴을 나타낸 것이다. 표 3은 진입율 1에 대한 모의 실험 결과값이고, 표 4는 진입율 2에 대한 모의 실험 결과값이다.

표 1. 각 방향의 차량 진입율 및 통과율

Table 1. Vehicle entering rates and transit rates of each direction.

발화율 방향	진입율 1 (대/초)	진입율 2 (대/초)	통과율 (대/초)
E 방향 좌회전	0.05	0.15	0.5
E 방향 직진	0.07	0.10	0.5
W 방향 좌회전	0.03	0.20	0.5
W 방향 직진	0.09	0.15	0.5
S 방향 좌회전	0.02	0.10	0.5
S 방향 직진	0.10	0.10	0.5
N 방향 좌회전	0.05	0.05	0.5
N 방향 직진	0.05	0.05	0.5

표 2. 각 교통신호기에 대한 신호시간 패턴

Table 2. Signal time pattern of each signal controller.

신호시간 방향	단위시간 신호기						최대 시간 신호기
	패턴1			패턴2			
	기본	연장	회수	기본	연장	회수	
EW 방향 좌회전	10초	5초	2	10초	5초	2	15초
EW 방향 직진	10초	5초	2	10초	5초	2	15초
NS 방향 좌회전	10초	5초	1	10초	5초	2	15초
NS 방향 직진	10초	5초	3	10초	5초	2	15초

표 3. 진입율 1에 따른 성능 비교
Table 3. Performance comparison with the entering rate 1.

방향 \ 신호기	단위 시간 신호기 (초/대)		최대 시간 신호기 (초/대)
	패턴1	패턴2	
E 방향 좌회전	23.41	23.67	15.21
E 방향 직진	25.67	26.37	9.26
W 방향 좌회전	12.81	16.95	11.95
W 방향 직진	20.60	21.18	13.16
S 방향 좌회전	28.99	20.91	9.47
S 방향 직진	21.07	26.18	12.58
N 방향 좌회전	21.87	20.24	13.00
N 방향 직진	19.13	20.68	14.38

표 4. 진입율 2에 따른 성능 비교
Table 4. Performance comparison with the entering rate 2.

방향 \ 신호기	단위 시간 신호기 (초/대)		최대 시간 신호기 (초/대)
	패턴1	패턴2	
E 방향 좌회전	21.30	23.84	11.39
E 방향 직진	14.26	15.11	12.75
W 방향 좌회전	20.84	23.02	13.03
W 방향 직진	26.54	25.06	18.55
S 방향 좌회전	25.51	24.02	14.42
S 방향 직진	26.08	28.34	11.14
N 방향 좌회전	27.44	23.07	10.77
N 방향 직진	19.28	14.77	12.71

표 3과 4의 모의실험 결과값은 차량 한대당 교차로에서의 평균 지체시간을 나타낸다. 단위시간신호기는 임의의 방향에 대한 단위시간 연장으로 인하여 오히려 다른 방향의 차량이 지체된다. 모의 실험결과에서도 최대시간 신호기가 단위시간 신호기보다 우수한 성능을 보여준다. 단위시간 신호기는 신호 시간 패턴에 따라 다른 결과가 나올 수 있으나 최적의 패턴을 구하는 것은 이 논문에서 다루지 않았다. 단위시간 신호기에서 많은 경우의 패턴을 비교하여 보았으나, 전체적으로 큰 차이는 없었고 대부분의 경우 최대시간 신호기를 채용할 때보다 차량당 평균 지체 시간은 크다. 하지만 경계 조건일 경우, 즉, 차량의 진입율이 상당히

크거나, 상당히 작을 경우에는 두 교통 신호기하의 평균 지체시간은 큰 차이가 없었다. 또한, 표 3과 4에서 진입율이 상당히 증가했음에도 불구하고, 동일한 신호기에서 대기시간이 오히려 줄어드는 현상을 보이는 몇몇 결과는 아래와 같은 이유 때문이라고 생각된다. 최대시간 신호기에서 E 방향 좌회전의 진입율이 0.05에서 0.15로 3배 증가하였는데 평균지체 시간은 15.21에서 11.39로 감소된 경우의 주된 이유는 증가된 진입율에 의해 신호시간이 그 방향으로 많이 할당되었기 때문이다. 단위시간 신호기에서 S 방향의 좌회전일 경우 0.02에서 0.1로 바뀌어도 N 방향의 좌회전이 0.05에서 0.05로 바뀌지 않은 사실이 연장회수에 영향을 끼친 결과이다. 또한, 단위시간 신호기의 E 방향 직진 경우는 진입율1에서 각 방향의 진입율들이 일률적인 상관관계를 가지지 않고 진입율2로 변화하였기 때문에 진입율1에서의 각 방향의 차량 진입율의 순서와 진입율2에서의 순서가 변화되어 일어난 결과라고 생각된다.

두 번째 모의 실험은 인접한 교차로를 연결한 후, 첫 번째 모의 실험의 진입율 2에 대한 성능을 비교한 것이다. 교차로 1의 E방향으로 진입하는 차량은 교차로 2의 E방향으로부터의 직진 차량, S방향으로부터의 좌회전 차량, N방향으로부터의 우회전 차량에 의해서 결정된다. 마찬가지로, 교차로 2의 W방향으로 진입하는 차량은 교차로 1의 W방향으로부터의 직진 차량, N방향으로부터의 좌회전 차량, S방향으로부터의 우회전 차량에 의해서 결정된다. 나머지 방향의 차량 진입율은 첫 번째 실험의 진입율 1과 같다. 도로 모델은 차량의 용량 및 지연 시간으로 표현된다. 본 논문에서는 이 도로 모델의 지연 시간을 포함하여 교차로 1의 E방향과 교차로 2의 W방향의 진입율을 좌회전 0.2 [대/초]로, 직진 0.25 [대/초]로 정하였고 우회전 차량은 영향이 별로 없으므로 고려하지 않았다.

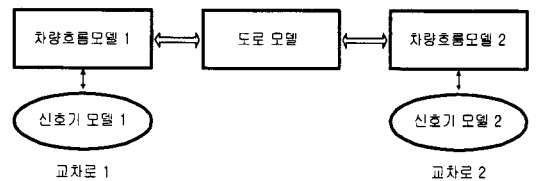


그림 7. 두 교차로의 연결
Fig. 7. Connection of two intersections.

페트리 네트 모델에서 두 교차로 모델을 연결은 하나의 교차로 출력이 다른 교차로의 입력으로 연결되는

부분만 고려하면 되므로 간단히 이루어질 수 있다. 복잡한 시스템을 모델링할 경우, 페트리 네트의 플레이스 와 트랜지션의 수가 너무 많아져 모의실험을 하기가 곤란해진다. 이럴 경우에는 여러 개의 교차로를 하나의 교차로로 압축시킨다. 이는 교차로들간의 영향을 압축된 교차로의 발화율에 반영함으로써 이루어 질 수 있다. 표 5는 두 교차로를 연결한 후 차량 한대당 지체시간을 비교한 것이다. 단위시간 신호기의 연장 회수는 패턴 2를 사용하였다.

표 5. 두 교차로 연결후 신호기들의 성능 비교

Table 5. Performance comparison between signal controllers after connecting two intersections.

방향	신호기	단위시간	최대시간
		신호기 (초/대)	신호기 (초/대)
E 좌회전	교차로 1	15.42	10.71
	교차로 2	19.26	9.54
E 직진	교차로 1	25.08	14.70
	교차로 2	18.84	9.35
W 좌회전	교차로 1	26.36	10.73
	교차로 2	32.21	8.03
W 직진	교차로 1	21.22	8.88
	교차로 2	25.96	11.38
S 좌회전	교차로 1	17.95	11.97
	교차로 2	15.33	11.90
S 직진	교차로 1	20.01	9.44
	교차로 2	21.15	8.60
N 좌회전	교차로 1	28.14	9.40
	교차로 2	15.57	8.71
N 직진	교차로 1	23.01	14.37
	교차로 2	20.09	9.41

이 모의실험 결과에서도 최대시간 신호기가 단위시간 신호기보다 우수한 성능을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 사거리 교차로에서의 교통흐름을 스토캐스틱 페트리 네트를 사용하여 모델링하였고, 이 교통흐름을 제어하는 최대시간허용 교통량 대응 신호기를 소개하였다. 단위시간연장 교통량 대응 신호기와

본 논문에서 제안한 최대시간허용 교통량 대응 신호기의 성능을 GreatSPN을 사용하여 성능을 상호 비교하였다. 모의 실험을 통해, 최대시간허용 교통량 대응 신호기 시스템에서의 차량 한대당 평균 지체시간이 단위 시간연장 교통량 시스템 하에서보다 현저히 감소함을 보였다. 이는 교차로에 단위시간당 진입하여 통과하는 차량수를 증가시키므로, 교통 소통에 많은 도움이 된다. 실제 상황에서 한 교차로의 지체시간의 증감이 교차로에 연결된 도로들에 큰 영향을 줄 수 있으므로, 교차로의 상태와 차량의 상황 등을 제시한 방법으로 모델링한 후, 성능을 분석하여 교차로의 교통신호 제어시스템에 적용하면 주변도로의 교통흐름에도 도움을 줄 수 있다. 최적 성능을 구현하는 교통신호 제어 알고리즘의 검증에도 본 논문의 방법은 매우 유용하게 사용될 수 있다. 또한, 둘 이상의 교차로의 상황을 분석을 위해, 페트리 네트의 합성 방법을 이용한 연속된 교차로에 대한 모델링을 제시하였다.

본 논문에서 소개된 차량 흐름 모델은 교차로 통과 차량의 고장율, 각 운전자의 운전습관이 교통흐름에 미치는 영향, 기상조건 등을 고려하지 않았으므로 실제적인 교통흐름과는 차이가 발생한다. 도로 모델에서도 전용차선, 차선의 수, 횡단보도 등이 고려되지 않았다. 현재 이들에 관한 연구가 진행되고 있다.

참고 문헌

- [1] Anthony Tzes, Seongho Kim, and William R. McShane, "Application of Petri Networks to Transportation Network Modeling," IEEE Trans. Vehicular Technology, vol. 45, no. 2, May 1996.
- [2] F. DiCesare, P. T. Kulp, M. Gile, and G. List, "The Application of Petri Nets to the Modeling, Analysis and Control of Intelligent Urban Traffic Networks," Advances in Petri Nets 1994, Lecture Notes in Computer Science 815, R. Valette(Ed.), Springer-Venlag, pp. 2-15, 1994.
- [3] Huaitien Wang, George F. List and Frank DiCesare, "Modeling and Evaluation of Traffic Signal Control Using Timed Petri Nets," Proc. 1993 Int. Conf. Systems, Man

- and Cybernetics, vol. 2, pp. 180-185, Le Touquet, France, 1993.
- [4] 고 인선, 조현, "스토캐스틱 페트리 넷를 이용한 교통흐름 분석," 한국 자동제어 학술회의 논문집, pp. 1504-1507, 1997
- [5] Al-Jaar R., Desrochers A., "Performance Evaluation of Automated Manufacturing Systems using Stochastic Petri Nets," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 6, no. 6, pp. 621-639, Dec. 1990.
- [6] Jean-Marie Proth and Xiao-Lan Xie, "Cycle Time of Stochastic Event Graphs: Evaluation and Marking Optimization," IEEE Trans. Automatic Control, vol. 39, no. 7, July 1994.
- [7] G. Chiola, "A Graphical Petri Net Tool for Performance Analysis," Proceeding of the 3rd International Workshop on Modeling Techniques and Performance Evaluation, AFCET, Paris, March 1987.
- [8] G. Ciardo, "Manual for the SPNP Package," Duke University, Durham, N.C., July 1988.
- [9] M. A. Marson, G. Balbo, G. Conte, S. Donatelli, and G. Franceschinis, "Modeling with Generalized Stochastic Petri Nets," published by J. Wiley Co., 1995.

 저 자 소 개



高仁善(正會員)

1979년 서울대학교 전자공학과 졸업 (B.S.). 1987년 Marquette University, 졸업(M.S.). 1991년 Rensselaer Polytechnic Institute, Dept. of ECSE 졸업(Ph.D.). 1981년 ~ 1985년 대우전자 근무. 1991년 ~ 1992년 대우전자 근무. 1992년 ~ 현재 홍익대학교 전자공학과 부교수. 1996년 ~ 현재 시스템자동화 연구센터 소장. 관심분야는 이산 사건 시스템 제어, 공장 자동화, 지능 제어, Computer-Integrated Manufacturing(CIM), Petri Nets.