

신호제어 변수들의 기호적 시간해석을 이용한 최적 교통 신호제어 방법

윤동영* · 이종근* · 지승도*

The optimal traffic signal control method using the symbolic timing analysis

DongYoung Yoon · JongKeun Lee · SungDo Chi

요 약

본 연구는 첨단 신호 시스템 알고리즘의 최적해를 구하는 문제를 기호적 시뮬레이션 기법으로 해결하기 위한 방법론을 제시한다. 최근 지능형 교통 시스템의 일환으로 최적화 된 교통신호를 생성하기 위한 신호제어 기법들이 많이 개발되었다. 하지만 이러한 신호제어 기법은 복잡한 교통환경에서 신호제어 변수간의 다양한 상호작용의 모든 해를 제공할 수 없는 한계를 지닌다. 한편 기호적 시뮬레이션 기법은 발생 가능한 모든 사건과 시간관계를 자동 생성시킴으로써 동적으로 변화하는 다양한 교통환경에 대해서 신호제어 변수간의 모든 시간관계를 추론해 낼 수 있는 장점을 지닌다. 하지만 기호적 시뮬레이션을 이용한 모델링에 있어서 교통량과 같은 양적인 요소들의 기호적 표현에는 어려움이 따른다. 따라서 본 논문에서는 교통량과 같은 양적인 요소들을 시간에 따른 변화량으로 해석하여 첨단 신호 시스템 알고리즘의 최적해를 구하는 문제에 접근한다. 이를 위해 국내 첨단 신호 시스템을 대상으로 신호제어 전략에 필요한 양적 요소를 검토하고, 이러한 양적 요소를 시간에 따른 변화량으로 해석하여 모델링 하고, 기호적 시뮬레이션 실험을 수행하여 최적 신호 제어 알고리즘을 생성한다.

1. 서론

대도시의 혼잡한 교통환경을 개선할 수 있는 주요한 요소 중의 하나는 교차로의 신호제어 전략이다. 최적화 된 신호제어 전략의 사용은 도로의 교통용량 증대와 서비스 수준 향상, 그리고 교통사고 감소, 보행자의 안전도모 등의 효과를 기대할 수 있고, 이에 따라서 수많은 신호제어 기법들이 개발되었고 또한 개발 중에 있다. 기존에 개발된 신호제어 기법은 크게 3가지로 나누어 살펴볼 수 있는데, 첫째 교차로내에서 차량들의 지체시간을 최소화시키는 전략을 가진 Delay-

minimized 모델과 둘째, 차량이 통과한 유효녹색 시간을 최대화시키는 전략을 가진 Bandwidth-maximized 모델, 그리고 마지막으로 이 둘의 장점을 혼용한 모델로 분류할 수 있다[7,8,9,10]. 또한 최근에는 실시간으로 수집된 교통정보를 이용하여 최적 신호시간을 산출하는 다양한 시스템들이 개발되기도 하였다. 하지만 이러한 방법은 고정된 알고리즘을 통해 해를 구함으로써 복잡한 교통환경에서 신호제어 변수간의 다양한 상호작용의 모든 해를 구할 수 없다는 한계를 지닌다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 기호적 시뮬레이션 기법을 이용하여 최적 신호제어 알고리즘을 생성한다. 기호적 시뮬레이션 기법은 발생 가능한 모든 사건과 시간관계

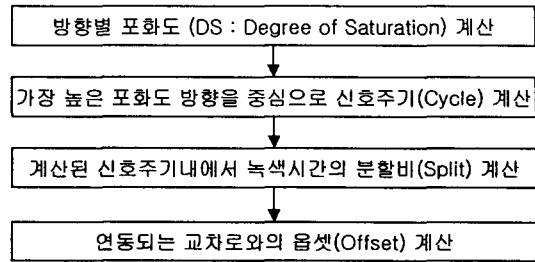
* 한국항공대학교 컴퓨터공학과

를 자동 생성시킴으로써 주어진 Goal 상태에 이르는 모든 사건과 시간관계를 추론해 낸다[1]. 따라서 동적으로 변화하는 다양한 교통환경에 대해서 신호제어 변수간의 모든 시간관계를 추론하여, 최적 신호 시간을 산출해 낼 수 있다[2]. 하지만 기호적 시뮬레이션을 이용한 모델링에 있어서 교통량과 같은 양적인 변수의 기호적 표현에는 어려움이 따른다. 따라서 본 논문에서는 교차로를 통과하는 교통량의 차두시간(Headway)을 이용하여 교통량을 시간에 따른 변화량으로 해석하여 기호적 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 이를 위해 본 연구에서는 신호제어에 필요한 변수 및 차두시간과 교통량의 관계를 이해하고, 독립교차로를 대상으로 기호적 시뮬레이션 실험을 수행하여, 최적 신호제어 알고리즘을 자동 생성한다. 마지막으로 향후 연구에 대해 토론하고, 결론을 맺는다.

2. 차두시간을 이용한 교통량 해석

2.1 교통량을 토대로 한 신호제어 시스템

실시간 교통상황을 토대로 신호제어를 실시하는 시스템은 국내를 비롯한 여러나라에서 이미 실시되고 있다. 이 중 가장 대표적인 것으로 호주 시드니에 설치, 운영되어 전세계적으로 보급이 확산되고 있는 SCATS과, 영국에서 개발된 SCOOT을 들 수 있으며, 이외 일본의 ATCS 등을 들 수 있다[3,4]. 우리나라에서는 '97년부터 첨단신호시스템을 운영하고 있는데, 국·내외의 이러한 시스템은 지역에 설치된 검지기로부터 수집된 교통상황 데이터를 중앙의 신호제어센터로 보내 <그림 1>과 같은 몇단계의 알고리즘 처리 과정을 거쳐 다음주기의 최적 신호시간을 산출한다[3]. <그림 1>의 '방향별 포화도 계산'은 방향별로 녹색시간동안 차량이 교차로를 통과하여 실제로 사용한 녹색시간의 비율을 의미한다.

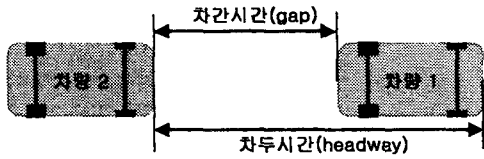


<그림 1> 첨단신호시스템 신호제어 알고리즘 순서도

즉 첨단신호시스템의 기본적인 동작 원리는 실시간으로 교차로에 접근하는 교통량을 측정하여 교통량이 많은 방향을 중심으로 신호의 전체주기를 계산하고, 녹색시간을 분할해 주는 것이다.

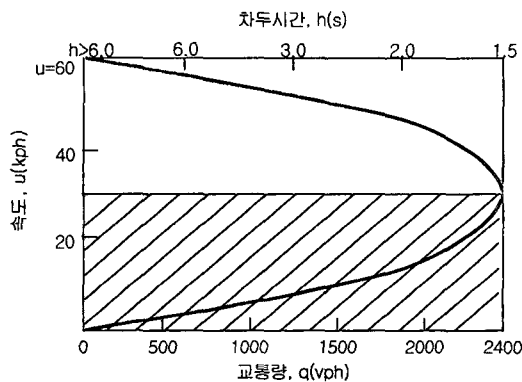
2.2 교통량의 시간적 해석을 위한 교차로 통과차량의 차두시간 해석

서론에서 언급했듯이 본 연구에서는 교통량에 대응하는 신호제어 알고리즘을 생성하기 위해 신호제어변수중 교통량을 기호적 시간으로 해석하였다. 기호적 시뮬레이션에 대해서는 다음 절에서 설명하고, 본 절에서는 먼저 교통량을 기호적 시간변수로 해석하기 위해 차두시간에 대하여 알아본다. 교통량은 특정시간(관측시간)동안 한지점을 지나간 차량의 대수[5,6]로 양적인 특성을 지니는 변수다. 따라서 기호적 시뮬레이션에서 교통량을 표현하기 위해서는 교통량과 상호 관계가 있는 시간 변수를 이용하는 것이 바람직하다. 차량과 차량사이의 시간간격을 차두시간이라 하는데, 이는 차량의 앞부분(또는 뒷부분)이 한지점을 통과한 시점부터 다음 차량의 앞부분(또는 뒷부분)이 통과할 때까지 걸린 시간이다[5,6]. 또한 차량사이의 순간격을 차간시간(Gap)이라고 하는데, 이 둘을 도식화하면 <그림 2>와 같다. 일반적으로 차간시간(Gap)은 차량의 진행속도에 영향을 미치게 된다. 따라서 차량의 속도와 차두시간과 교통량은 <그림 3>과 같은 관계를 갖는다[5,6].



<그림 2> 차두시간(Headway)과 차간시간(Gap)

즉, 도로에 차량이 증가하면 차량간의 Gap이 줄어들게 되어 평균속도가 감소하게 되고, 차두시간(Headway) 역시 감소한다. <그림 3>에서 그래프 위쪽부분을 살펴보면 도로에 차량이 많아짐에 따라 교통량이 증가하고, 속도가 감소하며, 차두시간이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 하지만 도로에 진입하는 차량이 계속 증가하여 도로 용량을 넘어서는 시점이 되는 아래쪽의 빗금친 부분을 살펴보면 교통량은 오히려 감소함을 알 수 있다. 결국, 차량이 계속 증가하여 속도가 줄어들다가 차량이 완전히 움직일 수 없는 상태가 되면, 어떤 지점을 통과한 차량수가 0이 되어 교통량은 0이 되고, 차두시간은 무한대가 된다[6]. 따라서 차두시간을 이용하여 교통환경을 인식할 때 교통량이 용량을 넘어서 과포화가 되면 차두시간이 다시 증가하게 되어 교통상황 판단에 오류가 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 도로의 과포화 상태는 제외한다는 가정하에 실험을 수행한다. 즉, 신호제어가 이루어지는 교차로에서의 과포화는 교차로를 통과한 차량이 전방 도로가 혼잡하여 희망속도에 도달할 수 없는 상태



<그림 3> 속도, 차두시간, 교통량의 관계[5,6]

를 의미하므로, 본 연구에서는 교차로를 통과한 차량은 희망속도로 주행할 수 있다고 가정한다. 또한 교차로에서 차두시간의 측정은 교차로 정지선을 기준으로 한다. 따라서 본 연구에서 차두시간은 교차로 정지선에서 녹색신호를 받아 차량이 출발하기 시작하는 시간부터 녹색신호가 종결되기 전까지 지나간 차량의 평균 차두시간을 의미한다.

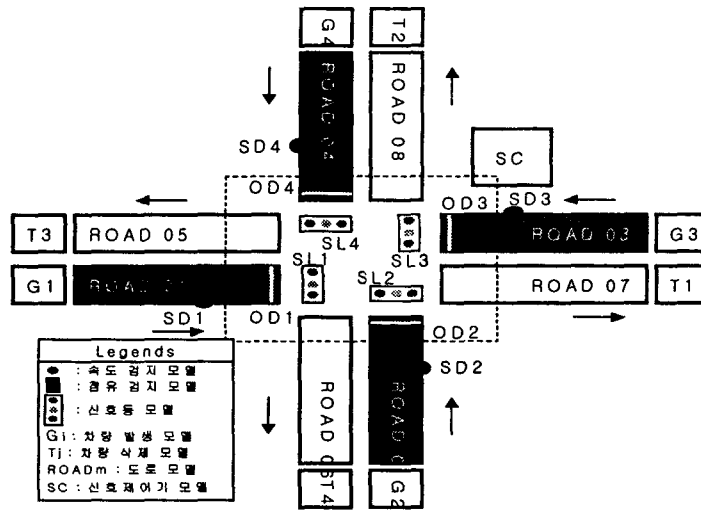
3. 차두시간을 고려한 기호적 시뮬레이션 모델링 및 시뮬레이션

3.1 기호적 시뮬레이션 개요

기호적 시뮬레이션은 기존 DEVS의 시간대가 실수였던 것을 선형 다항 기호식으로 확장시켜 사건 시간의 기호적 표현을 가능하게 하였다[1]. 예를 들면 교차로 신호등의 green time의 시작 시간과 차량이 교차로에 도착하는 arrival time에 관한 사전 지식이 없다면 green time이 arrival time보다 작을수도($green\ time < arrival\ time$) 또는 클수도($green\ time > arrival\ time$) 있다. 이와 같은 경우 기호적 시뮬레이션은 두 개의 가치를 만들어가면서 각 경우를 모두 시뮬레이션 한다. 또한 " $green\ time < arrival\ time$ "의 궤적 뒤에 " $arrival\ time < arrival\ time$ "라는 조건의 시뮬레이션을 하는 경우가 발생하면 시뮬레이션의 효과적인 관리를 위해 앞의 조건들을 이용하여 " $green\ time < arrival\ time$ "라는 조건을 추론할 필요가 생기는데, 이와 같이 선형 다항식으로 표현되는 기호적 시간 조건들의 추론을 위한 알고리즘은 Zeigler와 Chi에 의해 개발되어 발표되었다[1].

3.2 기호적 시뮬레이션을 이용한 독립교차로 모델링

본 연구에서는 교통량 대응 신호제어의 간단한 예로 <그림 4>와 같은 독립교차로 모델 구조에 기호적 시뮬레이션 실험을 수행한다. 실험



<그림 4> 독립교차로 시뮬레이션 모델 구조

은 다음과 같이 5단계에 거쳐 진행되었다.

- 1단계 : 제약조건 및 Goal선정 등에 의한 분석 대상 결정 - 독립교차로의 시간관계속에서 필요한 제약조건을 선정하고, 결과 분석을 위한 평가기준(Goal)을 선정한다.
- 2단계 : 분석대상에 대한 구조적, 동적 모델 생성 - 제약조건과 Goal조건이 선정된 후 분석대상 시스템의 컴포넌트들을 모델로 생성한다.
- 3단계 : 2단계의 구조적 모델에 변환함수 적용, 시뮬레이션 모델 생성 - 생성된 모델들에 시뮬레이션을 위한 변환함수를 정의한다.
- 4단계 : 1단계에서 설정한 Goal을 만족시킬때 까지 트리 궤적을 자동 생성하면서 기호적 시뮬레이션을 수행한다.
- 5단계 : 트리 궤적 분석을 통하여 Goal 조건에 맞는 시간관계를 추론한다.

3.3 기호적 시뮬레이션 분석

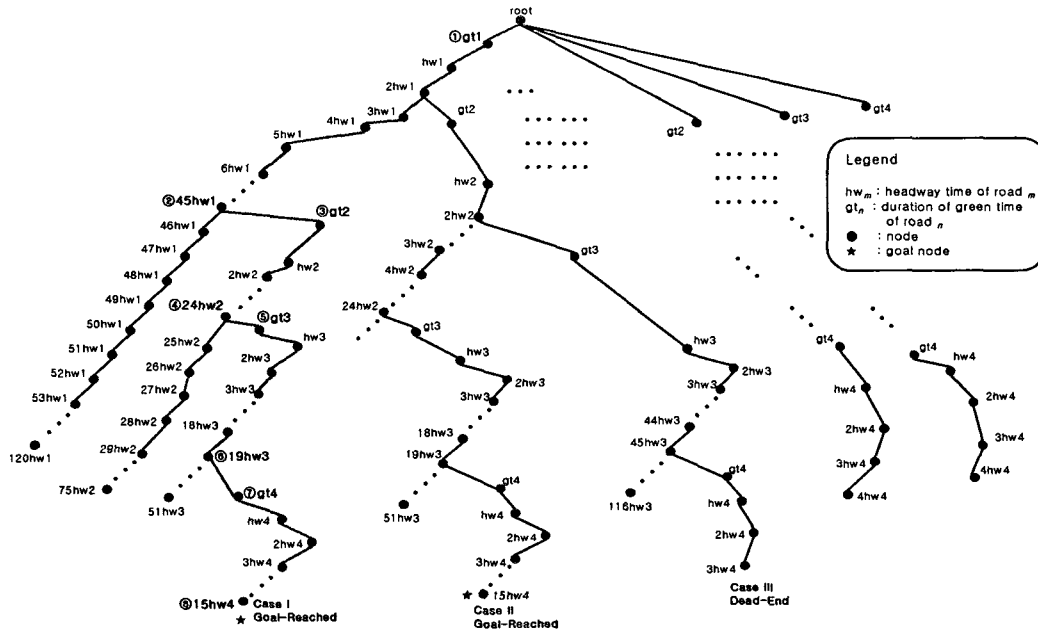
시뮬레이션 분석은 첫째 차량이 교차로를 통과하는 평균 차두시간과 둘째 각 방향별 녹색신호의 지속시간을 대상으로 하였다. 시뮬레이션

실험을 위한 초기조건은 다음과 같다.

- 각방향 녹색시간의 합인 주기는 120초로 한다.
- 시뮬레이션 goal은 모든 녹색시간의 2/3이상 차량이 통과한 유효녹색시간 일 때로 정한다.
- 교차로 현시는 동일시간에는 한 방향에만 녹색시간을 부여한다.
- 교차로 현시순서는 <그림 4>의 ROAD01 →ROAD07 방향을 기준으로 반시계 방향으로 녹색신호를 부여한다.

<그림 5>는 앞서 정의한 조건에 따라 시뮬레이션을 수행한 결과로 얻어지는 시뮬레이션 궤적 트리를 나타낸다. ★로 표시된 노드들이 Goal에 도달한 경우인데, Case I의 예를 순서대로 살펴보면 다음과 같다.

- **root** : 시뮬레이션이 시작되면 각 방향별 도로 모델에서는 각각의 차두시간(hw1, hw2, hw3, hw4)을 가지고 차량들이 교차로를 통과하게 되고, 신호등 모델은 반시계 방향으로 각각 gt1, gt2, gt3, gt4 동안 녹색신호를 해당 도로에 부여하게 된다. 이때 차두시간은 교차로를 통과하는 차량들의 평균 차두시간을 의미하므로 해당 도로의 녹색신호가 시작된 이후에 통과차량이 발생하게 되어 각각의 평균 차두시간



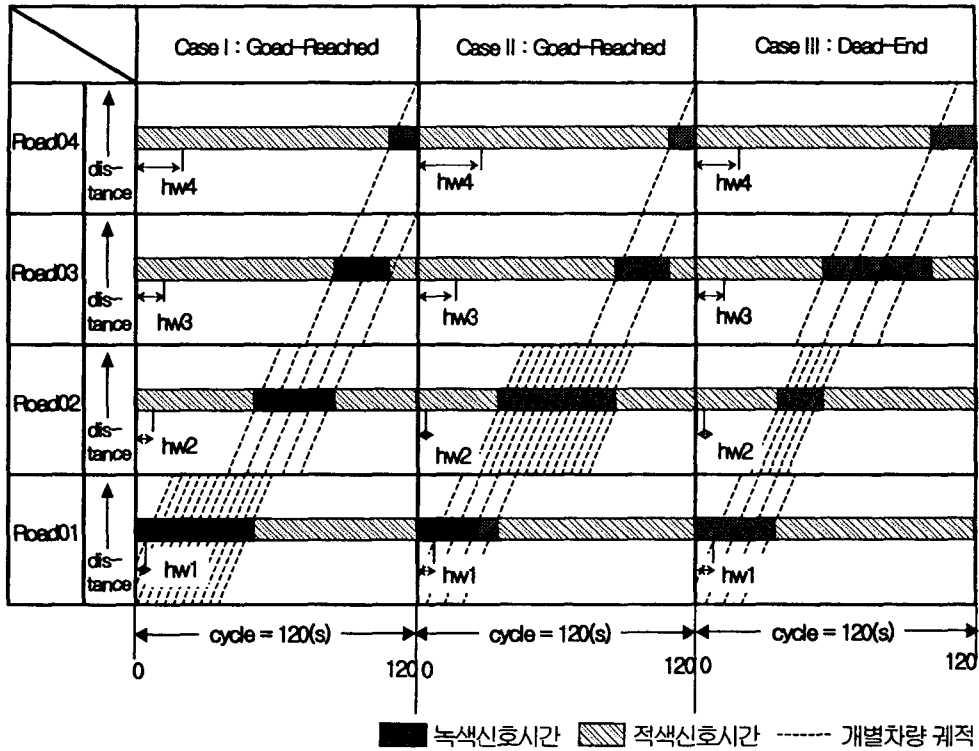
<그림 5> 독립교차로 신호제어 시뮬레이션 궤적 트리

(hw1, hw2, hw3, hw4)은 해당 도로의 녹색신호(gt1, gt2, gt3, gt4)보다 늦게 발생된다. 따라서 $gt1 < hw1$, $gt2 < hw2$, $gt3 < hw3$, $gt4 < hw4$ 의 시간관계를 갖게 된다.

- ① : 1번 도로에 녹색신호가 시작된다. 이때 녹색신호 시작시간은 현시순서에 따라 $gt1 < gt2 < gt3 < gt4$ 로 정해진다.
- ①-② : 1번 도로의 녹색신호가 유지되는 동안 1번 도로의 차량들이 해당 평균차두시간(hw1)으로 교차로를 통과한다. 1번 도로의 녹색신호는 2번도로의 녹색시간이 시작되기전에 계속 유지됨으로 계속되는 hw1의 누적 시간이 2번 도로의 녹색신호가 시작하는 gt2보다 빠른 경우 계속해서 차량이 교차로를 통과하게 된다.
- ② : 현재까지 교차로를 통과한 차량이 45대임을 알 수 있다. 이때까지 1번 도로 차두시간의 누적시간은 2번 도로의 녹색신호 시작시간 gt2 보다 빠르다.
- ③ : 1번 도로의 녹색신호가 종결되고, 2번 도로의 녹색신호가 시작되었다.

- ③-④ : 2번 도로의 녹색신호가 유지되는 동안 2번 도로의 평균차두시간(hw2) 간격으로 차량들이 교차로를 통과하고 있다.
- ④ : 2번 도로에서 교차로를 통과한 차량이 24대임을 알 수 있다. 이때까지 2번 도로 차두시간의 누적시간은 3번 도로의 녹색신호 시작시간 g3 보다 빠르다.
- ⑤ : 2번 도로의 녹색신호가 종결되고, 3번 도로의 녹색신호가 시작되었다.
- ⑤-⑥ : 3번 도로의 녹색신호가 유지되는 동안 3번 도로의 평균차두시간(hw3) 간격으로 차량들이 교차로를 통과하고 있다.
- ⑥ : 3번 도로에서 교차로를 통과한 차량이 19대임을 알 수 있다.
- ⑦ : 4번 도로의 녹색신호가 시작되었다.
- ⑧ : 4번 도로에서 교차로를 통과한 차량이 15대임을 알 수 있다.

결국 Case I의 경우 " $gt1+gt2+gt3+gt4 = 120$ ", " $gt1 < gt2 < gt3 < gt4$ ", " $gt1 < 45hw1$ ", " $gt2 < 24hw2$ ", " $gt3 < 19hw3$ ", " $gt4 < 15hw4$ "의 시간관계를 갖는다. 따라서 교차로내 전체 통과차량이 103대



<그림 6> 시뮬레이션 케적트리의 시간관계

(45+24+19+15)로 이는 전체주기 120초의 2/3이상이 유효한 시간으로 사용되어, Goal에 도달했음을 알 수 있다. <그림 5>의 케적트리를 좀 더 자세히 설명하면 <그림 6>과 같이 표현할 수 있다. <그림 6>은 각 Case별로 방향별 접근로에서 교차로를 통과한 차량의 시간간격(차두시간)과 녹색시간의 길이를 보여주고 있다. 그림에서 각 Cell들은 해당 Case의 해당 접근로별 녹색시간 전략을 보여주고 있으며, 각 Cell의 x축은 시간을 나타내며, y축은 차량의 이동거리를 나타낸다. 결국 x축은 1 cycle이 되어 각 Cell은 120초의 시간동안 자신의 시간전략을 보여주고 있다. 예를 들어 Case I의 경우를 살펴보면 Road01의 녹색시간이 다른 접근로(Road02, Road03, Road04)의 녹색시간보다 길고, 통과하는 차량의 차두시간은 짧은 것을 알 수 있다. 결국 Goal에 도달한 경우인 Case I과 Case II를 살펴보면 차두시간이 짧은 경우에 녹색시간을 오랫동안 유지하여 차량들이 통과할 수 있는 시간

을 오랫동안 확보하고, 반대로 차두시간이 긴 경우 녹색시간을 짧게 부여하여, 녹색시간의 손실을 줄여서 정해진 주기내에서 많은 차량이 교차로를 통과할 수 있는 상황임을 알 수 있다. 이와 같이 차두시간을 이용하여 교차로 신호제어 알고리즘을 기호적 시뮬레이션으로 자동생성하게 되면 교차로 신호제어기의 모든 신호시간들과 교차로에 접근하는 차량의 양을 고려한 복잡한 상호관계에 대하여 모든 해를 찾아낼 수 있으며, 시뮬레이션 케적에 대한 분석을 통해 Goal을 만족시키는 최적해에 도달하게 되는 시간관계를 추론할 수 있다. 이러한 방법은 고정된 알고리즘을 통해 최적해를 찾아내는 기존의 방법으로 해석하기 곤란한 상황에 적용할 때 그 효과가 크게 나타난다. 예를 들어 첨단신호시스템의 경우 교통상황에 따라 결합 가능한 교차로를 선택하고, 선택된 교차로내에서 고정된 알고리즘에 의해 신호제어를 하게 됨으로[3], 결합 가능한 교차로로 네트워크의 크기가 제한되며, 고정된

알고리즘에 따른 신호제어 시간 산출의 한계를 지닐 수 밖에 없다. 따라서 교차로와 교차로 사이의 도로길이가 다양하고 네트워크가 확대되는 복잡한 상황에서 모든 교차로간의 연동제어를 위한 최적해는 찾아내기 어렵다. 반면, 기호적 시뮬레이션 기법을 적용하면 독립교차로내의 모든 신호제어 변수의 상호관계 뿐만 아니라 교차로와 교차로간 시간관계의 모든 해를 찾아낼 수 있어[2] 네트워크 크기의 제한이나 제한된 패턴에 따른 제어와 같은 한계를 제거할 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구는 신호제어 알고리즘의 최적해를 구하는 문제를 기호적 시뮬레이션 기법으로 해결하기 위한 방법을 제시하였다. 이를 위해 양적인 요소를 시간에 따른 변화량으로 나타낼 수 있는 시간변수를 사용하여 표현하고, 신호제어 알고리즘을 자동 생성하였다. 신호교차로의 경우 신호제어 변수간의 다양한 상호작용의 모든 해를 도출할 수 있는 기호적 시뮬레이션 기법을 이용하면, 기존의 첨단신호시스템으로 찾기 어려운 교통상황의 최적 신호제어 알고리즘을 구할 수 있다. 이를 위해서는 본 연구에서 사용한 평균차두시간과 녹색시간 이외에도 보다 다양한 신호제어 변수의 기호적 해석과 시뮬레이션 실험이 필요할 것이며, 기호적 시뮬레이션으로 생성된 신호제어 시간과 첨단신호시스템에서 구해진 신호제어 시간에 따른 시뮬레이션 실험을 통한 비교분석이 필요할 것으로 보인다.

Acknowledgements

본 연구는 한국학술진흥재단 “선도 연구자 지원사업”의 “기호적 시뮬레이션을 이용한 최적 신호제어 전략의 자동생성 방법론” (과제번호 : KRF-2001-041-E00266)의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- 1) Zeigler, B.P. and S.D. Chi, “Symbolic Discrete Event System Specification”, *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, Vol. 22, No. 6, pp.1428-1443. Nov/Dec., 1992.
- 2) Jong-Keun Lee, Min-Woo Lee, Sung-Do Chi, “Using the Symbolic devs simulation to generate the optimal traffic signal time”, *proceeding AI-Simulation 2002. Lisbon, Portugal April.*, 2002.
- 3) “국도 3호선 주요 교차로 신호운영 실시계획 최종보고서”, 한국건설기술연구원, 2000. 9.
- 4) “서울특별시 신신호시스템 기능개선 용역 최종보고서”, 서울지방경찰청 및 도로교통안전관리공단, 1999. 11.
- 5) Donald R. Drew., “Traffic Flow Theory and Control”, *McGRAW-HILL*, pp134-146
- 6) 도철용, “교통공학원론(상)”, 청문각, pp67-71, pp105-110, 1996.
- 7) J.D.C Little, “Optimal Signal Timing for Arterial Signal System”, *Federal Highway Administration*, December, 1980.
- 8) H.s. Tsay and L.J. Lin, “New Algorithm for Solving the Maximum Progression Bandwidth”, *Transportation Research record 1194*, pp15-30, 1988.
- 9) C.E. Wallace and K.G. Courage, “Arterial Progression-New Design Approach”, *Transportation Research record 991*, 1982.
- 10) K.G. Courage and C.E. Wallace. “TRANSYT-7F Users Guide, Transportation Research Center, University of Florida”, *Gainesville, Florida*, Dec. 1991.p