

☒ 응용논문

지능형 교통체계에서의 신호제어와 동적 경로안내\*\*  
-Signal Control and Dynamic Route Guidance in ITS-

박 윤 선\*  
Park, Yun Sun

Abstract

An ideal traffic control system should consider simultaneously both route guidance of vehicles and signal policies at intersection of a traffic network. It is known that an iterative procedure gives an optimal route to each vehicle in the network. This paper presents an iterative procedure to find an optimal signal plan for the network. We define the optimal solution as a signal equilibrium. From the definition of signal equilibrium, we prove that the fixed point solution of the iterative procedure is a signal equilibrium, when optimal signal algorithms are implemented at each intersection of the network. A combined model of route guidance and signal planning is also suggested by relating the route guidance procedure and the signal planning procedure into a single loop iterative procedure.

1. 서론

ITS(Intelligent Transportation Systems)는 현재의 교통시스템이 안고있는 혼잡, 비효율성, 위험, 공해 등과 같은 문제들을 해결하기 위해 발전되어왔다. ITS연구에서의 중요한 목적 중 하나는 차량에 더욱 적절한 경로를 제공함으로써 교통망 활용도를 향상시키는데 있다. 그런데 각 차량이 적절한 경로를 취하기 위해서는 교통망 내의 교차로에서 취하는 신호정책의 영향을 받는다. 그러므로 경로안내 문제와 신호정책은 개별적으로 생각할 수 없다. 이 상호의존적인 문제들에 대해 동시에 최적의 해를 부여하기 위하여서는 이 두 가지 문제가 통합되어야한다. 그러나 이러한 현저한 상호의존성에도 불구하고 각각의 문제들은 최근까지 고립적으로 연구되어왔다. 본 연구에서는 각각의 신호정책 알고리즘이 각 신호등에서 최적일 때 신호계획에 대한 반복적인 절차의 정점이 신호균형이라는 것을 증명하고 신호균형을 정의내림으로써 경로안내와 신호정책의 통합된 문제에 대한 이론적 배경을 제공한다. 경로안내와 신호정책의 통합된 모델 또한 단일 루프 안에서의 반복절차를 수행함으로써 최적해를 얻을 수 있음을 제안한다.

\* 명지대학교 산업공학과 교수

\*\* 본 논문은 1997년도 학술진흥재단의 대학교수 해외파견 연구지원에 의하여 연구되었음

## 2. 연구 배경

본 연구에서 고려하는 교통망 환경은 동적이다. 즉, 링크 통과시간은 차량이 링크에 있을 때의 시간의 함수이다. 또한 시간에 따라 변하는 링크 통과 시간이 차량을 운행하다가 경험하게 될 미래의 조건들을 반영하기 때문에 “anticipatory”라고 부른다. 본 논문에서 고려하는 교통망이 “anticipatory”라는 특성을 갖기 때문에 그 값이 수렴할 때 정점을 찾는 반복적인 절차를 이용하여 최적해를 찾는 것이 합당하리라 생각된다. 물론 하나의 수학적 모델을 통하여 경로안내와 신호정책에 관한 각각의 문제나 혹은 통합된 문제들을 구축할 수도 있다. 그러나 비선형 및 불연속함수의 존재와 변곡점과 연속범위의 부족으로 인해 Wunderlich(1994)에 의해 보여진 것처럼 이러한 수학적 모델을 통하여서는 경로안내 문제 하나 조차도 최적해를 찾는 것이 불가능하게 되었다. 따라서 본 논문은 반복적인 절차를 이용하여 교통망에서의 신호정책에 대한 최적해를 제공하려 하고 또한 반복적인 절차를 통하여 경로안내와 신호정책의 통합된 동적인 문제를 푸는 방법론을 제안하고자 한다.

Allsop(1974)는 경로안내와 신호정책의 조합된 문제를 반복적인 절차를 이용하여 처음으로 다루었다. 그 이후로 많은 알고리즘들이 하나의 수학적 모델이나 반복적인 절차에 기초를 둔 통합된 문제들을 풀기 위해 제시되었다. (Gartner(1976), Gartner et al. (1980)), Tan et al. (1979), Smith (1985), Cantarella et al. (1991)). 그러나 대부분의 이러한 연구들은 경로나 신호정책의 어느 한쪽에 고정시켜서 최적해를 찾았다. 또한 모든 연구들은 링크 통과시간이 상수인 정적인 네트워크에 기초를 두었다.

운전자 최적해(user optimal solution (user equilibrium))를 제공하는 동적이고 실시간 예측의 경로안내방법은 Kaufman(1981)에 의해 처음으로 소개되었다. 운전자 최적해 혹은 운전자균형(User Equilibrium)이란 어떠한 차량도 기존에 설정된 경로를 다른 경로로 변경함으로써 운행시간을 더 이상 줄일 수 없는 그러한 해나 상태를 의미한다.

그 반복적인 절차에 기초하여 Kaufman(1981)은 운전자 최적경로를 찾기 위한 최단경로 계산 루틴과 시뮬레이션을 사용하여 동적인 경로안내 문제를 푸는 SAVaNT(Simulation of Anticipatory Vehicle Network Traffic)를 개발했다. SAVaNT를 이용하면 반복적인 절차가 수렴할 경우 최적의 경로를 찾아낼 수 있다.

단일 교차로 신호정책에 대한 교통 제어 계획은 크게 두 가지 범주로 분류될 수 있다. 하나는 고정된 주기를 이용한 방법들이고, 다른 하나는 적응통제계획(Adaptive Control Scheme)으로 되어있다. 고정된 주기 계획에 기초한 방법은 Webster(Webster(1958))방법이다. 이 방법과 그의 변형된 방법들은 널리 이용되어왔다. 그 방법들은 고정된 주기의 교차로에서 녹색점등 시간의 최적의 분할에 대한 공식을 제공하고 있다. 또한 효과적인 주기 시간도 찾을 수 있다. 그러나 고정된 신호정책은 일반적으로 과거의 기록과 관찰된 통행량에 기초를 두고 있기 때문에 실제적인 실시간 통행을 조정하고 현재의 복잡한 교통 계획을 안정시키기 위하여서는 보다 정교한 유형의 교통 제어가 필요하다. 적응 신호제어정책은 현재의 통행량 요구를 만족시키기 위하여 실제 통행량의 변화에 따라 신호정책을 변경시켜주는 신호정책이라 하겠다. SCOOT(Hunter (1981))와 SCATS(Sims (1979))가 최근에 개발되고 널리 이용되는 실시간 적응 교통 제어 시스템이다. 그러나 그들이 채택하는 신호정책은 중앙 집중 방식이다. 즉 그 방법들은 미리 결정된 신호정책에 기초를 두고 off-line의 신호정책을 선택하고 있다. OPAC(Gartner(1983)), SPORT(Yager and Han(1994)), UTOPIA(Mauro and Di Taranto(1990)), 그리고 ALLONS-D(Porche and Lafortune(1997))는 휴리스틱한 적응 신호 제어 방법들이지만 집중방식이 아닌 분산 방식이다.

이러한 분산방식의 방법들은 실시간 데이터를 측정하고, 최적의 신호정책을 찾고, 또한 on-line으로 찾은 신호정책을 실행한다. 또한 이 방법들은 시간 주기를 더 짧은 단계로 나누고 오직

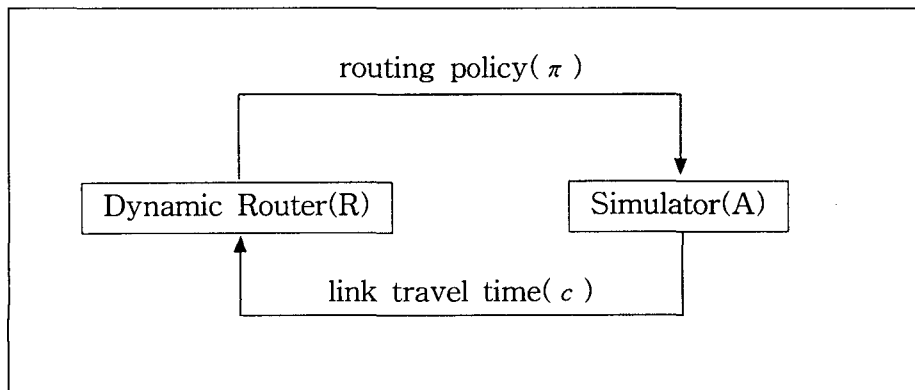
각 단계의 첫 번째 결정만 수행하는 rolling horizon 개념을 사용하였다. 최근에 실시간 적용 교통제어에 대한 COP (Controlled Optimization of Phases)와 EDPAS (Efficient Dynamic Programming for Signalling)라는 두 개의 알고리즘이 Sen and Head(1997) 와 Park and Smith(1998)에 의해 각각 개발되었다. 두 가지 모두가 동적계획(Dynamic Programming)의 개념을 사용하지만 COP는 교차로에서 차량들의 총 지연 경험을 최소화하기 위한 최적의 신호 정책을 산출하지는 않는다. 그러나 EDPAS는 신호 변경에 대한 교차로에서의 총 지연시간을 최소화하는 최적해 방법론이다. 그러나 단일 교차로가 아닌 교통망 전체에 대하여 최적 신호 정책을 구하는 방법론에 대하여는 많은 연구가 되어지지 않아 왔다. 대부분의 신호정책에 관한 연구들은 앞서 언급한 것과 같이 단일 교차로에서 효과적인 정책을 찾는 것이 제한되어왔다. 본 논문에서는 교통망 전체에서의 최적 신호를 구하기 위하여 반복적인 절차 사용의 이론적인 배경을 제공 할 것이다. 신호정책 반복적 절차에 기초를 두어서 경로안내와 신호정책의 통합된 문제에 대한 반복적인 절차를 제안할 것이다. 3절에서는 신호균형(Signal Equilibrium)을 정의하고, 이 균형해(Equilibrium Solution)의 특성을 살펴보고, 반복적인 절차의 정점이 신호균형이라는 것을 증명한다. 3절에 기초를 두고 4절에서는 반복적인 절차에 대한 경로안내와 신호정책의 통합된 모델을 제안하고, 그 절차로부터의 해에 대한 의미를 부여할 것이다.

### 3. 신호균형

본 논문의 주된 목적은 반복적인 절차에 기초를 둔 경로안내와 신호정책의 통합된 문제의 해결 방법론에 대한 이론적인 배경을 제공하는 데 있다. 본 절에서는 신호정책에 대한 반복적인 절차에 초점을 맞춘다. 경로안내에 대해서 SAVaNT가 사용자 최적의 동적인 경로안내를 제공하는 반복적인 방법이라는 것을 알고 있다. 그러므로 최적의 신호정책에 대한 신호균형을 얻기 위하여 신호정책 문제에 대한 비슷한 루프를 채택하기로 하자. SAVaNT로부터 반복적인 절차의 수렴해는 운전자균형(User-Equilibrium)이 된다는 것을 알고 있다. 그러나 신호정책에 대한 반복적인 절차를 적용할 때 결과해의 특징에 대해서는 모르고 있다. 그러므로 먼저 신호정책에 대한 반복적인 절차의 수렴해를 정의하고 이 해의 특성을 고려할 필요가 있다.

#### 3.1. 신호계획에 대한 반복절차

<그림 1>에서 묘사된 경로안내에 대한 SAVaNT 반복 절차를 생각해 보자.



<그림 1> Route Loop

함수  $A: \pi \rightarrow c$  는 교통망 안의 모든 차량들이 정책  $\pi$ 에 따라 움직일 때 교통망내 각각의 링크의 통과시간을 주는 함수이다. 또한 함수  $R: c \rightarrow \pi$  는 동적 계획을 사용하여 계산된 교통망 내에서의 시간에 종속적인 가장 빠른 경로  $\pi = R(c)$ 를 계산한다. 이러한 루프(반복적 절차)를 이용하기 위해서는 그것이 수렴할 때 그 루프의 정점의 특성이 먼저 특징지어져야 한다. 다행히도 운전자균형(User-Equilibrium)의 정의 하에서 운전자균형이 정점이라고 Kaufman et al [1991]에서 보여졌다. 다음의 정의와 정리는 앞의 결과를 나타낸다.

**정의 1** 모든 차량들이 경로정책  $\pi$ 에 따른 경로를 따를 때 시간  $t \in T$ 에 노드  $n \in N$ 으로부터 어떤 목적지  $d \in D$ 까지의 통과시간이 어떤 다른 경로를 통한 통과시간 보다 적게 걸리면 정책  $\pi \in \Pi$ 는 운전자균형이라 한다.

**정리 1.** <그림 1>의 반복적 절차의 정점 경로안내 정책은 운전자균형을 만족시킨다.

pf) Kaufman et al. (1991) 참조.

본 논문에서는 신호정책에 반복적인 절차를 적용하기 위하여 <그림 1>과 유사한 논의를 권유하고자 한다. <그림 2>에 묘사된 루프에서

함수  $S: a \rightarrow x$ 는 차량 도착 패턴  $a$ 가 각 교차로의 링크에 주어졌을 때 신호정책  $x = S(a)$ 를 제공하고 함수  $Q: x \rightarrow a$ 는 신호정책  $x$ 가 주어졌을 때 차량 도착 패턴  $a = Q(x)$ 를 제공한다.

이제 경로에 대한 운전자균형과 상응하는 신호 루프의 해에 대한 신호균형을 정의한다.

**정의 2.** (신호균형)

모든 신호들이  $x$ 를 따를 때 만약 모든 노드  $n \in N$ 에서 신호정책 알고리즘에 의한 지연이 어떠한 신호정책에 의한 지연보다 작거나 같으면 정책  $x \in X$ 는 신호균형을 만족시킨다.

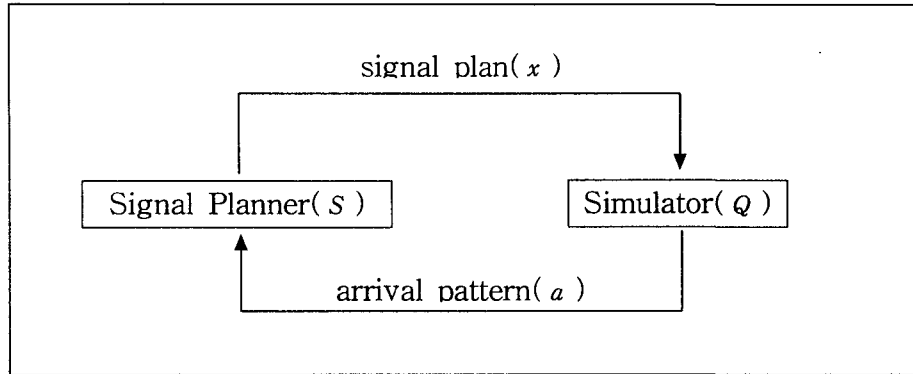
이러한 정의들을 기초로 하여 <그림 2>의 루프의 정점해를 특징지을 수 있다.

**정리 2.** 만약 신호정책 알고리즘이 각각의 교차로에서 “최적”의 해를 제공하면 정점 신호정책은 신호균형을 만족시킨다.

pf)  $x \in X$ 이 신호균형을 만족시키지 않는다고 가정하자. 그러면 도착 패턴  $Q(x)$ 는 어떤  $n$ 에 대한  $x$ 하의 교통망에서 영향을 주는데, node  $n$ 에서의 총 신호 지연은 다른 신호정책  $x'$ 를 선택함으로써 생기는 총 지연보다 커진다. 그러나  $S$ 가 차량 도착 패턴  $Q(x)$ 하의 최적 알고리즘으로부터 최소 지연을 결정하기 때문에  $x' = S(Q(x))$ 는  $x' \neq x$ 라는 것을 의미하고  $x$ 는 정점이 아닌 것이 된다.

경로안내 루프의 경우에, router는 현재의 링크 통과시간이 주어졌을 때 출발점과 목적지의 각 쌍에 대해 동적 계획법을 사용하여 모든 운전자에게 최적의 노정을 제공한다. 그러나 앞의 정리에서 말한 바와 같이 신호정책 루프에 있어서는 교차로를 통한 차량의 통과에 의해 초래된 총 지연을 최소화하는 신호정책에 대한 최적의 알고리즘을 필요로 한다. 앞 절에서 EDPAS가 이러한 목적을 위한 신호정책에 관한 적절한 알고리즘이라는 것을 설명했다.

정점해는 반복적인 절차의 수렴해이다. 만약 위의 정리가 없다면 정점해의 올바른 해석이 가능하지 않기 때문에 위의 정리는 신호정책 문제에 있어서 반복적인 방법의 사용의 타당성을 설명해 주고 있다.

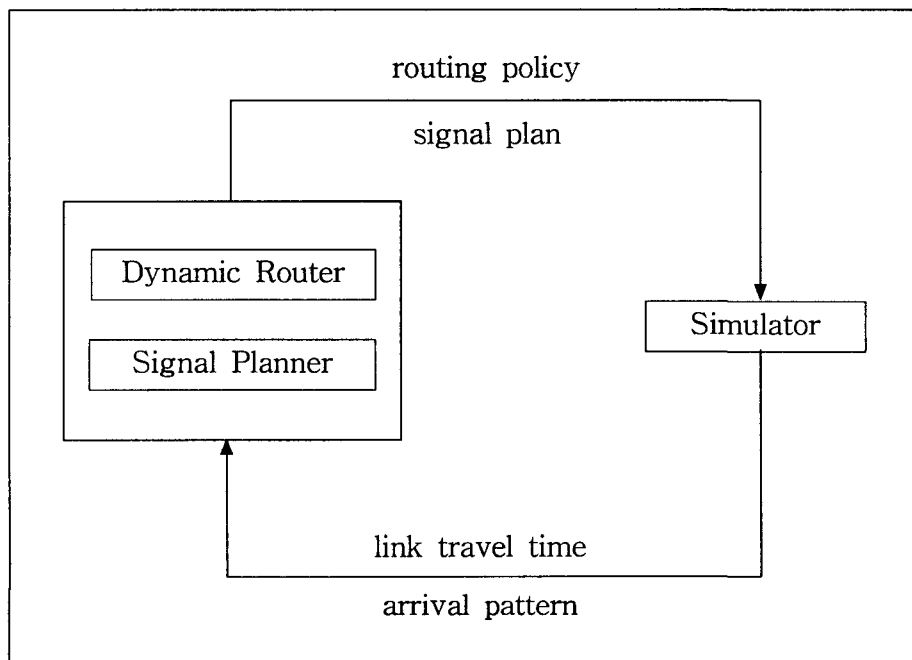


<그림 2> Signal Loop

#### 4. 경로안내와 신호정책의 통합모델

본 절에서는 SAVaNT에 신호 정책 반복 루프를 도입함으로써 경로안내와 신호정책의 통합된 문제에 접근하고자 한다. (<그림 3>에 묘사된 루프 참조)

앞서 언급한 바와 같이 경로문제와 신호정책 문제는 서로 연관되어있다. Vuren et al. (1992)에 는 경로안내와 신호 정책의 통합된 문제를 공략하기 위한 전통적인 반복적인 접근이 언급되어 있다. 하지만 이 방법들은 경로와 신호정책 중 하나를 고정한 후 나머지를 찾으려 하는 방법들 이다. 최근에 Porche and Lafortune(1997)는 경로 반복 루프 안에서 신호 정책을 효과적으로 찾을 수 있는 알고리즘을 개발하였다.



<그림 3> Combined Loop

이러한 접근법과 반대로 <그림 3>의 루프는 그 값이 수렴할 때 균형적인 경로와 균형적인 신호정책을 동시에 제공한다. 그것은 선행의 반복에 기초를 두고 계속적으로 경로와 신호 정책을 바꾸어감으로써 경로문제와 신호정책 문제를 동시에 최적화하고자 하는 것이다.

이제 <그림 3>의 루프가 의미를 갖기 위하여 다음의 문제들이 해결되어야 할 것이다.

1. 루프의 수렴이 보증되었는가?
2. 그것이 수렴할 때 경로문제와 신호정책 문제가 동시에 수렴하는가?

경로안내에 대해서 Wunderlich(1994)는 반복적인 방법이 언제나 수렴함을 보증할 수 있다는 것을 보여주었다. 또한 고정된 경로에 대해 최선의 신호정책은 유일하다고 볼 수 있다. 그러므로 만약 두 번째 질문이 해결되면 그 루프의 수렴성이 언제나 보증되어질 수 있다. 다음의 두 정리는 앞서 서술한 내용을 설명한다.

**정리 3.** <그림 3>에서 그 루프의 반복동안 만약 동적 router가 운전자 균형에 도달하면 동시에 signal planner도 신호 균형에 도달하고 그 역도 성립한다.

pf) 동적 router가 균형에 도달하고 signal planner가 그렇지 못했다고 가정하자. 그렇게 되면 결국 신호 변화는 다른 경로를 초래하는데 그것은 router가 균형에 도달했다는 가정에 모순된다.

**정리 4.** <그림 3>에서의 조합된 루프는 언제나 수렴성이 보증된다. 나아가 그것이 수렴하면 우리는 운전자 균형 경로와 신호 균형 신호정책을 동시에 얻을 수 있다.

pf) 수렴성에 대한 Wunderlich(1994)참조.

## 5. 결론

이상적인 교통 제어 시스템에서는 교통망의 교차로에서 차량에 대한 경로안내와 신호정책을 동시에 고려하여야 한다. 이 논문에서 우리는 반복된 절차를 통한 최적의 신호정책을 찾는 신호균형(Signal Equilibrium)을 정의했다. 신호균형은 교통망의 각각의 신호에 최소 지연 정책을 부여하는 신호정책이다. 본 논문에서는 최적의 신호 알고리즘이 각 교차로에서 적용될 때, 그 정점해가 최적의 신호 정책을 위해 반복적인 절차의 사용을 타당하게 하는 신호균형이라는 것을 증명했다. 신호균형의 정의와 그에 따른 반복적인 절차에 기초를 두고 경로안내와 신호정책의 통합된 모델 또한 단일 루프 안에서의 반복 절차를 수행함으로써 최적해를 얻을 수 있음을 제안하였고 이에 대한 이론적 근거를 제시하였다.

## 참고문헌

- [1] Allsop, R. E., "Some possibilities for Using Traffic Control to Influence Trip Distribution and Route Choice", Proceedings of the 6th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Elsevier, Netherland, pp.345-374, 1974.
- [2] Cantarella, G. E., G. Importa, and A. Sforza, "An Iterative Procedure for

- Equilibrium Network Traffic Signal Settings", *Transportation Research*, Vol. 25 B. 4, 1991.
- [3] Gartner, N. H., "Area Traffic Network Control and Network Equilibrium", *Proceedings of International Symposium on Traffic Equilibrium Methods* (M. A. Florian, ed) Springer-Verlag, 1976.
- [4] Gartner, N. H., "OPAC: A Demand Responsive Strategy for Traffic Signal Control", *Transportation Research Record*, Vol. 906, pp. 75-81, 1983.
- [5] Gartner, N. H., S. B. Gershwin, J. D. Little, and P. Ross, "Pilot Study of Computer-Based Urban Traffic Management", *Transportation Research*, Vol. 14 B, pp. 203-217, 1980.
- [6] Hunt, P. B. Robertson, R. D. Bretherton and R. I. Winton, *SCOOT - A Traffic Responsive Method for Coordinating Signals*, Laboratory Report No. LR 1014, *Transportation and Road Research*, Crowthorne, Berkshire, England, 1981.
- [7] Kaufman, D. E., K. E. Wunderlich, and R. L. Smith, "an Iterative Routing/Assignment Method for Anticipatory Real-Time Route Guidance", *The University of Michigan Transportation Research Institute, IVHS Technical Report 91-02*, pp. 701-708, 1991.
- [8] Kaufman, D. E., R. L. Smith, and K. E. Wunderlich, "User-Equilibrium Properties of Fixed Points in Iterative Dynamic Routing/Assignment Methods", *The University of Michigan, Department of Industrial and Operations Engineering, Technical Report 95-33*.
- [9] Mauro, V., D. DiTaranto, "UTOPIA", *Proceedings of the 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers and Communications in Transportation*, No. 12, pp. 245-252, 1990.
- [10] Park and Smith Park Y., R. L. Smith, "An Efficient Signal Control Using Dynamic Programming", *The University of Michigan, Department of Industrial and Operations Engineering, Technical Report 98-13*, 1998.
- [11] Porche, I., S. Lafortune, "Adaptive Look-ahead Optimization of Traffic Signals", *The University Michigan, Department of Electric Engineering and Computer Science, Technical Report No. CGR 97-11*, 1997.
- [12] Sims, A. G., "The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System", *Urban Transport Division of ASCE Proceedings, Engineering Foundation Conference on Research Directions in Computer Control of Urban Traffic Systems*, pp. 12-27. New York, NY, 1979.
- [13] Smith, M. J., "Traffic Control and Route Choice: A Simple Example", *Transportation Research*, Vol. 13 B, pp. 289-294, 1979.
- [14] Smith, M. J., "Traffic Signals in Assignment", *Transportation Research*, Vol. 19 B, pp. 155-160, 1985.
- [15] Tan, H., S. B. Gershwin, and M. Athans, "Hybrid Optimization in Urban Traffic Network", *Report DOT-TSC-RSP-79-7*, *Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, 1979.
- [16] Vuren, T. V., D.V. Vliet, "Route Choices and Signal Control", *Avebury*, 1992.
- [17] Webster, F. V., "Traffic Signal Settings", *Road Research Technical Paper*, No. 39. HMSO. London, 1958.

- [18] Wardrop, J. G., "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research", Priceedings of Institution of Civil Engineering, Vol. 2, NO. 1, pp. 325-378, 1952.
- [19] Wunderlich, K. E., "Link Time Prediction for Anticipatory Route Guidance in Vehicular Traffic Network", The University of Michigan, Department of Industrial and Operation Engineering, Ph.D. Dissertation, 1994.
- [20] Yargar, S., B. Han, "A Procedure for Real-Time Signal Control That Considers Transit Interference and Priority", Transportation Research B, Vol. 28 B, pp. 315-331, 1994.