

# UTIS를 활용한 수요 기반의 능동형 버스우선신호 제어 알고리즘에 관한 연구

A Study on the Active Transit Signal Priority Control Algorithm based on Bus Demand using UTIS

홍 경 식

(도로교통공단 교통과학연구원 선임연구원)

안 계 형

(도로교통공단 교통과학연구원 연구위원)

정 준 하

(도로교통공단 교통과학연구원 수석연구원)

이 영 인

(서울대학교 환경대학원 정교수)

## 목 차

- I. 서론
  - II. 관련 연구 고찰
    - 1. TSP(Transit Signal Priority) 제어 기법
    - 2. UTIS(Urban Traffic Information System)
    - 3. 국내·외 TSP 관련 연구 고찰
  - III. UTIS를 활용한 TSP 제어 알고리즘
    - 1. 시스템 구성
    - 2. 수요 기반의 TSP 제어 알고리즘
    - 3. UTIS 기반의 TSP 제어 절차
  - IV. TSP 제어 알고리즘의 검증
    - 1. 시뮬레이션 모형 선택
    - 2. 시나리오 및 효과측도 설정
    - 3. 결과 분석
  - V. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : 능동형 버스우선신호, 버스통행시간, 정지제어지체, 녹색시간 조기종결, 녹색시간 연장, 신호제어, 도시교통정보시스템(UTIS)  
Active TSP(Transit Signal Priority), Bus Travel Time, Control Delay, Early Green, Green Extension, HILS(Hardware In the Loop Simulation), Signal Control, UTIS (Urban Traffic Information System)

## 요 약

본 연구에서는 수도권을 중심으로 구축 운영 중인 UTIS를 활용하여 버스의 서비스 개선 및 운행 효율성을 증진함과 동시에 일반 차량의 지체를 최소화하기 위한 버스 수요 기반의 TSP 제어 알고리즘을 개발하였다. 이를 위해 버스의 수요를 기반으로 버스 우선신호의 우선권 강도를 조정하는 알고리즘을 제안하였으며, 주도로의 버스 우선권 제공으로 인한 부도로의 지체 증가를 막기 위해 부도로의 포화도에 따른 우선권 강도를 조정하는 보상 알고리즘을 제안하였다. 또한 연구 결과를 CORSIM RTE를 활용할 HILS 기반의 평가시스템을 통해 효과 분석하여 현장의 적용 가능성을 검증하였다. 시뮬레이션 결과 버스의 통행시간은 10% 정도 개선 효과가 있었으나, 이 경우 전체차량의 제어지체에는 큰 영향을 받지 않음을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 국내의 대중교통 활성화 정책에 기여할 것으로 기대된다.

In this paper, we implement an algorithm of transit signal priority control that not only maximizes service quality and efficiency of bus, but also minimizes the control delay of passenger cars using UTIS currently being deployed and operated in Seoul national capital area. For this purpose, we propose an algorithm that coordinates the strength of TSP by estimating bus demand. Typically, the higher the strength of TSP is on main street, the bigger the control delay is on the cross street. Motivated by this practical difficulty, we proposes an algorithm that coordinates TSP's strength by checking the degree of saturation of cross street. Also, we verify the possibility of field implementation via simulation analysis using CORSIM RTE based HILS (Hardware In the Loop Simulation). The result shows that travel time of bus improves about 10 percent without increasing control delay of passenger cars by TSP. We expect the result of this research to contribute to increasing the overall transit ridership in this country.

## 1. 서론

저탄소 녹색성장 중심 국가 발전전략이 수립된 이후에 교통정책의 방향도 대중교통 우선 및 서비스 향상을 목표로 전환되고 있다. 이에 따라 차량당 지체를 최소화하는 신호운영방식에서 사람당 지체를 최소화하고, 대중교통의 정시성을 높일 수 있는 제어전략으로의 전환이 필요하다.

따라서, 이러한 버스 대중교통 우선 정책에 부응하는 대중교통(버스) 우선신호(TSP, Transit Signal Priority) 제어시스템을 구현하여 현장에 적용하는 것이 필요하다. 또한, TSP 제어 시스템 구현에 있어서 기존에 구축되어 있는 ITS 인프라를 활용하면 경제적인 시스템 구축은 물론, 시스템 구현 및 확장이 용이하기 때문에 이에 대한 적극적인 활용이 필요하다.

이에 본 연구에서는 수도권을 중심으로 구축 운영 중인 도시교통정보시스템(UTIS, Urban Traffic Information System)을 활용한 능동형 TSP 제어 시스템을 구현하고자 하였다. 이를 위해 버스 대중교통의 정시성 향상, 서비스 개선 및 운행 효율성을 증진함과 동시에 일반 차량의 지체를 최소화하기 위한 버스 수요 기반의 TSP 제어 알고리즘을 개발하였다. 또한 연구 결과를 HILS 기반의 평가시스템을 통해 효과 분석하여 현장의 적용 가능성을 검증하였다.

## II. 관련 연구 고찰

### 1. TSP(Transit Signal Priority) 제어 기법

#### 1) 수동형 TSP

수동형 TSP는 센터에서 수행하는 제어 방식으로 버스 검지 유무와는 상관없이 정해진 신호계획에 따라 TSP를 제공하는 것으로 교통상황, 버스의 운행 스케줄 등을 기반으로 현시 조정 및 주기 변화를 통해 TSP가 제공되는 방식이다. 이 방식은 주어진 조건에 따라 제어되는 것으로 버스 검지 유무와 관계없이 과거 패턴 자료를 통해 적용되기 때문에 예상치 못한 교통류의 변화가 발생되면 불필요한 지체를 유발할 수 있다.

#### 2) 능동형 TSP

능동형 시스템은 버스 검지유무에 따라 적절한 우선

〈표 1〉 능동형 TSP 알고리즘

종류	특징
Early green	· TSP를 위해 버스 현시가 정상 운영 상태보다 일찍 시작되는 방법으로 상충 현시의 최소녹색 시간 등이 보장된 상태에서 제공됨
Green extension	· TSP를 위해 버스 현시가 정상 운영 상태보다 길게 운영되는 방법으로 버스가 녹색 시간동안 교차로를 통과하지 못할 경우에 시간을 연장시켜주는 방식
Phase insert	· TSP가 요청될 경우 정상 운영 상태에 버스현시가 삽입되는 방식으로 교통 흐름의 단절이 발생
Phase rotation	· 부도로 녹색시간동안 TSP 요청을 받게 되었을 경우 현시 순서를 바꾸어서 TSP를 제공되는 방식으로 운전자의 혼란과 교통 흐름의 단절이 발생
Phase suppression	· TSP가 요청될 때 수요가 적은 현시를 생략하는 방식으로 주로 회전 교통량이 많은 곳에서 사용

신호가 제공되는 것으로 실시간 신호제어와 스케줄 기반 신호제어, 차두시간 기반 신호제어를 기초로 운영된다.

즉, 검지기를 통해 실시간으로 TSP를 제공해 주는 교통운영 전략으로서 세부적으로는 조건 우선신호와 비조건 우선신호로 구분된다. 조건 우선신호는 승객수, 노선 스케줄 등의 특정 조건을 만족하는 경우 TSP를 제공해 주는 방식이며, 비조건 우선신호는 검지되는 버스 모두에게 우선신호를 제공해 주는 방식으로서 〈표 1〉과 같은 세부 알고리즘이 있다.

### 2. UTIS(Urban Traffic Information System)

UTIS는 경찰청과 지방자치단체에서 추진하고 있는 국가 ITS 구축사업인 도시지역 광역교통정보 기반확충 사업의 핵심 시스템으로 무선랜(IEEE 802.11a) 기반의 실시간 교통정보수집·제공하는 시스템이며 주요 특징은 〈표 2〉와 같다.

〈표 2〉 UTIS 특징

구분	내용
통신방식	IEEE 802.11a
통신주파수	5.725 ~ 5.825GHz
통신반경	500m(LOS, Line Of Sight)
통신속도	6 ~ 54Mbps
접속시간	167msec
주요서비스	· 링크 및 세그먼트 정보 · 문자 및 음성 정보 · CCTV 정지영상 정보 · 기타 멀티미디어 정보

UTIS에서의 교통정보 수집 및 제공의 기본 과정은 다음과 같다. 차량내단말기(OBE, On Board Equipment)에 GPS 및 전자지도를 탑재하여 주행경로에 대한 링크정보를 작성하여 교차로에 설치된 노변기지국(RSE, Road Side Equipment)과 통신이 이루어지면 축적 후 전송(Cumulating and Flushing)하는 방식으로 RSE에 전송하고, 센터에서 가공된 교통정보는 RSE를 통해 전송 받아 표출하는 방식으로 이루어져있다. UTIS는 필요한 교통정보를 센터로 요청하여 전송받을 수 있는 실시간 양방향 무선 통신 기반의 교통정보수집·제공시스템이다.

### 3. 국내·외 TSP 관련 연구 고찰

#### 1) 국내 TSP 관련 연구

장상우(2005) 등은 단거리전용통신(DSRC) 방식을 이용한 버스우선 신호제어 시스템을 개발하였다. DSRC 통신을 통해 버스의 검지 시 Early green + Extended green을 적용하여 버스의 여행시간이 10% 정도 개선되는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하고, 현장시험을 통해 검증하였다.

한명주(2006) 등은 실시간신호제어시스템에서의 버스우선신호 알고리즘 정립 연구를 통해 교통상황에 대응하여 신호시간을 결정하는 실시간신호제어시스템에서 버스의 효율성을 높이는 TSP 제어 알고리즘을 정립하고 그에 대한 효과를 평가하였다. 기존 TSP 제어 알고리즘에 비해 부도로의 교통상황을 고려할 수 있다는 장점을 제시하였으며 차량당 지체, 버스의 통행시간, 사람지체 분석을 통해 효과를 평가하였다.

조한선(2007) 등은 철도건널목 인근 신호교차로에서의 우선신호 전략 비교 분석 연구를 통해 TPS (Transition Preemption Strategy)에 대한 비교 분석을 통하여 교차로의 안전과 효율성 측면에서의 최상의 운영 전략을 제시하였다.

#### 2) 국외 TSP 관련 연구

Peter G.(2010) 등은 버스의 통행량이 많은 보스턴의 대규모 버스 터미널 근처에 TSP를 적용하여 그 효과를 분석하였다. 일반차량의 지체에는 미세한 영향을 미치면서 버스 지체가 약 22% 정도의 감소함을 마이크로 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

Graham(2008) 등은 호주의 멜버른과 캐나다 토론토의 Street car 기반의 TSP 시스템에 대한 문제점과 이슈사항을 비교 분석하였다.

Jiayang(2008) 등은 미국 south snohomish 지역의 TSP 프로젝트에 대한 효과 평가를 현장 데이터를 기반으로 수행하여 TSP 시스템 도입이 일반차량에 대한 부정적인 영향 보다 대중교통에 대한 혜택 월등하다는 것을 입증하였다.

Yun(2007) 등은 감응제어시스템을 대상으로 다양한 긴급차량 우선신호 제어 전략에 대하여 HILS 기반으로 해당 교차로 및 네트워크에 대한 여행시간과 지체의 영향에 대하여 평가를 하였다.

#### 3) 본 연구의 차별성

유·무선통신을 활용하여 구현된 기존의 TSP 제어 시스템에서는 교차로 내의 특정 위치에서 버스가 검지되면 해당 현시의 최소 녹색시간 부여 후 일률적으로 Early green이나 Green extension 기법을 적용하여 TSP를 제공하는 것이 일반적이었다.

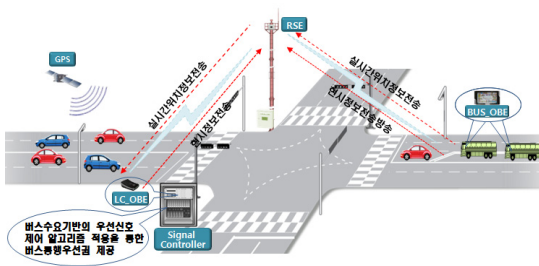
반면, 본 연구에서는 일률적인 TSP 제어 알고리즘에서 벗어나 TSP의 수요가 되는 버스의 많고 적음을 UTIS 무선통신망을 활용하여 신호제어기에서 실시간으로 파악이 가능하도록 하여 버스의 수요에 비례한 TSP 제어가 가능하도록 구현하였다. 또한 부도로 지체의 영향을 최소화하기 위한 전략도 함께 제시하였다.

### III. UTIS를 활용한 TSP 알고리즘

#### 1. 시스템 구성

일반적으로 TSP 제어 시스템은 검지체계, 통신체계, 교통신호제어체계의 상호작용을 통해 서비스가 제공된다. 본 연구에서는 검지체계 및 통신체계는 UTIS 무선통신망을 활용하도록 하였다.

<그림 1>은 UTIS 기반의 TSP 제어 시스템 구성도이다. UTIS를 활용한 TSP 제어시스템의 특징은 버스(BUS\_OBE)가 노변기지국(RSE)을 통하여 신호제어기(LC\_OBE)와 직접 무선으로 통신을 할 수 있다는 것이다. 신호센터나 UTIS 센터 간의 통신 연계는 필요하지 않다. UTIS 무선통신을 통해 신호제어기에서는 버스의 위치, 진행방향, 속도 정보를 실시간으로 제



〈그림 1〉 UTIS 기반의 TSP 시스템 구성도

〈표 3〉 TSP 시스템 구성요소별 역할

구성요소	역할
Signal Controller	TSP 제어기법을 적용하는 신호제어기
LC_OBE	신호제어기 및 RSE와 버스 위치 및 제어기 정보를 교환하는 무선단말
RSE	LC_OBE 와 BUS_OBE 간의 정보를 교환하는 노변기지국
BUS_OBE(s)	LC_OBE에 RSE를 통해 버스 위치를 실시간으로 전송하는 무선단말(들)

공받아 TSP 제어 알고리즘을 수행하게 된다.

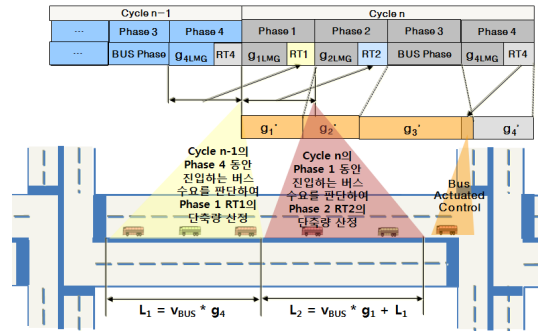
UTIS를 활용한 TSP 제어 시스템은 Signal Controller, LC\_OBE, RSE, BUS\_OBE(s)로 구성되며, 각 구성요소의 역할은 〈표 3〉과 같다.

## 2. 수요 기반의 TSP 제어 알고리즘

본 연구에서는 Early green, Green extension, Phase insert, Phase rotation, Phase suppression 등의 TSP 제어 기법 중 운전자들의 혼란 및 교통 흐름의 단절을 최소화하기 위하여 Early green과 Green extension 기법을 적용하여 TSP 제어 알고리즘을 구현하였다.

UTIS의 유효통신거리는 500m 이상으로 교차로 전체를 커버할 수 있기 때문에 교차로 내에 존재하는 버스의 위치정보를 실시간으로 확인할 수 있는 장점이 있다. 이러한 UTIS 무선 통신망 활용을 통해 버스의 대수를 실시간으로 확인하여 버스의 수요 비율에 따른 Early green 및 Green extension을 적용하는 TSP 제어 알고리즘을 제안하였다. 또한, TSP 제어로 인해 버스 현시 이외의 부도로 지체가 지속적으로 증가하는 것을 방지하기 위한 보상 알고리즘을 적용하였다.

본 연구에서는 4현시 체계에서 버스 통과 현시를 3번째 현시로 정의하였으며, 앞의 1, 2 현시에서 일정량



〈그림 2〉 버스 수요판단 개념도

의 Range Time( $RT_1$ ,  $RT_2$ )을 할당하여 Early green을 적용하고, 마지막 4현시에서 일정량의 Range Time( $RT_4$ )을 할당하여 Green extension을 적용하는 것을 기본 전제로 하였다. 또한, 버스 전용차로(중앙차로 또는 갓길차로)에서 TSP를 제공하는 것을 기본 가정으로 하였으며, TSP 제어에 따른 주기 변동의 혼란을 최소화하기 위하여 주기 및 Offset은 고정하였다.

〈그림 2〉는  $RT_i$ 를 할당하고, 버스의 수요를 판단하여 Early green 및 Green extension을 적용하는 개념을 설명하고 있다.

### 1) TSP 제공을 위한 Range Time( $RT_i$ ) 결정

본 연구에서는 교통축 간 연동에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 신호 주기를 고정하여 TSP를 제공하고, 교차로 전체의 지체를 최소화하기 위하여 Webster의 지체 분석식에 의해 도출된 최적주기( $C_0$ )에서  $0.75C_0 \sim 1.5C_0$  범위에서는 차량의 지체의 변동 폭이 적다는 것에서 착안하여 각 현시에서  $0.25C_0$ 에 해당하는 비율만큼 TSP의 Early green 및 Green extension을 위한 Range Time( $RT_i = 0.25g_i$ )으로 할당하여 이를 우선권의 조정 강도로 활용하였다.

원래의 신호계획에서 할당된  $RT_i$ 를 제외한 현시( $g_{iLMG} = g_i - RT_i = 0.75g_i$ )가 최초 TSP 제어 알고리즘 적용시의 각 현시의 Logical Minimum Green Time이 된다. 이렇게 할당된  $RT_i$  범위 내에서 UTIS 무선통신망을 활용하여 버스의 수요를 판단하여 TSP 제어 알고리즘을 구현하였다. 또한 매 주기의 종료 시 부도로의 포화도( $v/c$ )를 체크하여 포화도가( $v/c$ )가 일정값 이상으로 증가하는 경우  $RT_i$ 를 줄이는( $g_{iLMG}$ 를

늘리는) 방안을 적용하여 부도로의 지체 영향을 최소화하는 알고리즘을 구현하였다.

## 2) Early green

버스의 평균통행속도 및 수요판단 대상 현시를 활용하여 수요판단의 대상 거리를 산정한 후 버스의 포화차 두시간을 통한 임계밀도의 개념을 통해 대상 거리 내에 최대 존재할 수 있는 버스의 대수와 실제 존재하는 버스의 비율을 통해 수요를 판단하여 Early green 적용을 위한 단축량을 결정한다. 이에 대한 자세한 단축량 결정 방법은 다음과 같다.

### ① 수요판단 시점

수요는 Early green 적용 대상 현시인  $g_1$ ,  $g_2$ 에 대하여 각각 이전 현시 기간 동안 판단한다.

즉, 현시  $g_1$ 의 Early green 적용의 수요는 이전 주기의 현시  $g_4$  동안, 그리고 현시  $g_2$ 의 Early green 적용의 수요는 이전 주기의 현시  $g_3$  동안 판단한다.

### ② 수요판단의 거리 범위( $L_i$ )

$$L_i = v_{BUS} \times g_{i-1} + L_{i-1}, \quad i = 1, 2, L_0 = 0$$

여기서,  $g_0$  : 이전 주기의  $g_4$  (sec)

$v_{BUS}$  : 버스의 평균 통행 속도(m/s)

또한,  $L_1$ 은 현시  $g_1$ 의 Early Green 단축량을 결정하기 위한 거리 범위로서 이전 주기의 현시  $g_4$ 의 녹색 시간 동안 해당 거리 범위에 존재하는 버스의 대수를 파악하여 수요를 판단하기 위한 거리 범위이며,  $L_2$ 은 현시  $g_2$ 의 Early Green 단축량을 결정하기 위한 거리 범위로서 현시  $g_1$ 의 녹색시간 동안 해당 거리 범위에 존재하는 버스의 대수를 파악하여 수요를 판단하기 위한 거리 범위로서  $L_1$ 과  $L_2$ 로 구분한 것은  $L_1$ 에서 수요로 판단된 버스의 대수가  $L_2$ 에서도 수요로 중복 적용되는 경우를 배제하기 위한 것이다.

### ③ 수요 기반의 Early green 적용을 위한 현시 감소 시간

( $x_i$ ) 산정

$$x_i = K_i \times RT_i \times \frac{n_i - n_{i-1}}{[N_i] - [N_{i-1}]}$$

$K_i$  : 단축량의 비율을 조정하는 Scaling Factor  
 $n_i$  : 정지선으로부터 거리  $L_i$  이내에 실제 도착한 버스의 수

$N_i$  : 정지선으로부터 거리  $L_i$  이내에 존재할 수 있는 최대 버스의 수

$[N_i]$  : N을 넘지 않는 최대 정수

$$N_i = k_m \times \frac{L_i - L_{i-1}}{1000} = \frac{3600}{v_{BUS}} \times \frac{L_i - L_{i-1}}{1000} \\ = \frac{3.6(L_i - L_{i-1})}{hv_{BUS}}$$

$k_m$  : 임계밀도(=  $q/u$ )

$v_{BUS}$  : 버스의 평균 통행 속도

## 3) Green extension

$RT_4$ 를 Green extension용으로 할당하여 버스 현시 ( $g_3$ )+ $RT_4$ 를 Maximum Green으로 하는 Actuated Control을 진행한다. Green extension 적용 후 남은  $RT_4$ 의 경우  $g_4$  현시에 할당한다.

## 4) 부도로 현시 보상

매 주기 TSP의 적용으로 인하여 부도로의 신호시간이 반복적으로 줄어드는 경우를 방지하기 위하여 부도로에 대한 현시 보상이 필요하다. 이를 위해 검지기 데이터로부터 얻을 수 있는 부도로 현시에 대한 평균 포화도(v/c) 정보를 매 주기 종료시 마다 산출하여 다음 주기에 반영할 현시 보상 방법을 다음과 같이 적용한다. 여기서 부도로 보상을 위한 v/c 기준은 운영 상황에 따라 다르게 적용할 수 있다.

### ① Case 1 : $v/c < 0.6$

부도로에 대한 보상 없이 TSP 제어 알고리즘을 적용

### ② Case 2 : $0.6 \leq v/c < 0.8$

Early green 적용을 위한 현시 감소 시간( $x_i$ ) 산정 시 적용된 대상 현시의  $g_{iLMG}$ 를 다음과 같이 증가시켜 Early green 적용을 위한  $RT_i$  비율을 감소시킴

$$g_{iLMG} = g_{iLMG} \times \left(0.4 + \frac{v}{c}\right) \\ \text{단, } g_{iLMG} > g_i \text{ 이면 } g_{iLMG} = g_i$$

③ Case 3 :  $0.8 \leq v/c < 1.0$

Early green 기법은 적용하지 않고, Green extension 기법만 적용

④ Case :  $v/c \geq 1.0$

$RT_i$ 를 0으로 설정하여 TSP 제어 알고리즘을 적용하지 않음

3. UTIS 기반의 TSP 제어 절차

UTIS를 활용한 버스 수요 기반의 능동형 TSP 제어 절차는 <그림 3>와 같으며 세부 절차는 다음과 같다.

Step 1. LC\_OBE와 RSE의 무선링크 형성

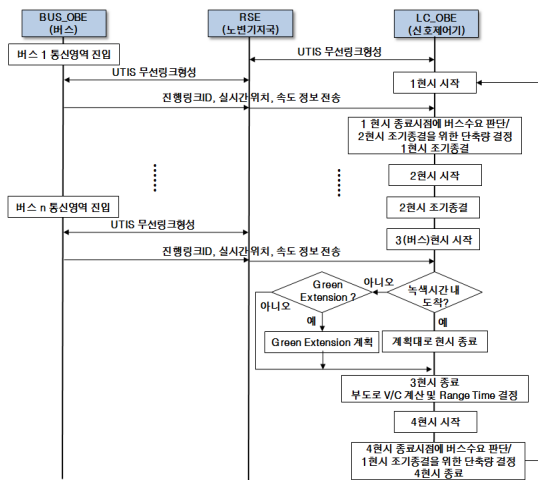
Step 2. BUS\_OBE가 RSE 통신영역 진입 시 RSE와의 무선링크 형성

Step 3. BUS\_OBE는 TSP 제어 대상 링크 진입 후 RSE를 통해 LC\_OBE에 매 초 단위로 진행방향, 실시간 위치좌표 및 속도 정보 전송

Step 4. 신호제어기는 1현시 종료시점에 버스의 수요를 판단하여 2현시 Early Green 적용을 위한 단축량을 결정하고, Step 8에서 결정된 현시계획에 따라 1현시 조기종결

Step 5. 신호제어기는 Step 4에서 결정된 현시계획에 따라 2현시 조기종결

Step 6. 신호제어기는 3(버스) 현시 종료 직후 도착될 것으로 예상되는 버스에 대해 Actuated control 적용을 통한 Green extension TSP 제어 알고리즘을



<그림 3> UTIS 기반의 TSP 제어 절차

적용하여 현시 조정

Step 7. 신호제어기는 3현시 종료 시점에 부도로  $v/c$  산정하고 다음 주기의 Range Time 결정

Step 8. 신호제어기는 4현시 종료시점에 버스의 수요를 판단하여 1현시 Early Green 적용을 위한 단축량을 결정하고, 4현시 종결

Step 9. Step 4에서 8의 과정을 매 주기 반복

여기서, Step 2와 3은 새로운 버스가 UTIS 통신영역내에 진입 후 교차로 통과 시점까지 반복된다.

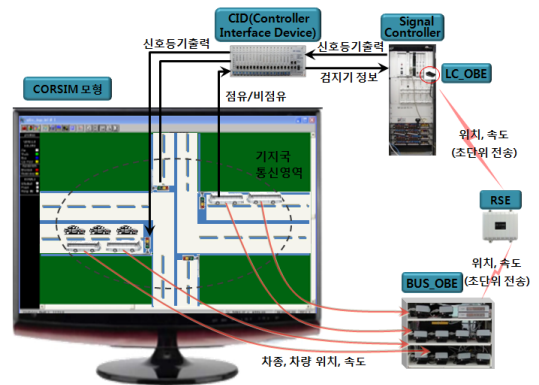
IV. TSP 제어 알고리즘의 검증

1. 시뮬레이션 모형 선택

현장 적용 가능성에 대한 보다 정확한 검증을 위하여 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 기반의 CORSIM 모형을 이용하여 평가시스템을 구성하였다. TSP 제어 적용 시 최적화된 신호 주기 및 현시 시간 분석을 위해 교통상황에 따른 적정신호시간 산정 및 최적화가 가능한 TRANSYT-7F 모형을 활용하여 신호시간 및 주기를 최적화하여 CORSIM 모형의 입력 자료로 활용하였다.

시뮬레이션 모형의 구성은 <그림 4>와 같으며, 시뮬레이션 동작 세부 절차는 다음과 같다.

- ① CORSIM 모형에서 생성된 버스 정보(위치, 속도 등)를 매초 단위로 Ethernet 통신을 통하여 BUS\_OBE로 전달
- ② BUS\_OBE는 버스 정보를 실시간으로 UTIS 무선망을 통해 RSE로 전달



<그림 4> HILS 기반 TSP 제어 평가시스템 구성도

- ③ RSE는 BUS\_OBE로부터 전달받은 버스 정보를 UTIS 무선망을 통해 신호제어기(LC\_OBE)로 전달
- ④ 신호제어기(LC\_OBE)에서는 버스의 정보를 기반으로 버스의 수요를 판단하여 Early green 및 Green extension 적용을 위한 TSP 제어 알고리즘 수행
- ⑤ 신호제어기는 TSP 적용 결과에 대한 신호등기 출력을 CID로 전달
- ⑥ CID는 신호등기 출력을 검지하여 CORSIM 모형에 현시정보 입력

여기서, CID(Controller Interface Device)는 신호제어기와 CORSIM 모형을 연동해주는 역할을 한다. 즉, 신호제어기에서 나오는 신호등기 출력(전압)을 감지하여 CORSIM 모형에 입력해주고, 반대로 CORSIM 모형의 검지기 자료를 이용해서 실제 검지기 신호 파형으로 변환하여 제어기로 입력해주는 인터페이스 장치이다.

## 2. 시나리오 및 효과척도 설정

### 1) 시나리오

본 연구에서 제안한 TSP 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 교통량이 일정한 경우와 변동하는 경우의 두 가지의 시나리오를 가지고 시뮬레이션을 진행하였다.

#### ① 시나리오 1(교통량 고정)

시나리오 1은 본 연구에서 제안한 버스 수요기반의 TSP 제어 알고리즘을 검증하기 위한 것이다. 버스 교

〈표 4〉 시나리오 1

Case	포화도(v/c)	버스교통량	신호운영
Case 1	1.0	소 (90대/시)	Non-TSP
			TSP
			TSP(보상제외)
Case 2	1.0	대 (180대/시)	Non-TSP
			TSP
			TSP(보상제외)
Case 3	0.7	소 (90대/시)	Non-TSP
			TSP
			TSP(보상제외)
Case 4	0.7	대 (180대/시)	Non-TSP
			TSP
			TSP(보상제외)

통량을 많은 경우와 적은 경우로 나누어 버스 수요기반의 TSP 제공 효율을 검증하였다. 또한, 주·부도로의 교통량(v/c)을 1.0인 경우와 0.7인 경우로 나누고, 각 경우에 대하여 보상알고리즘을 적용 유·무에 따른 TSP 적용 결과를 검증하였다. 그리고, 각 case에 대하여 본 연구에서 제안한 보상 알고리즘을 적용하지 않은 TSP 제공 결과도 함께 검토하고자 하였다. 시나리오 구성은 〈표 4〉와 같다.

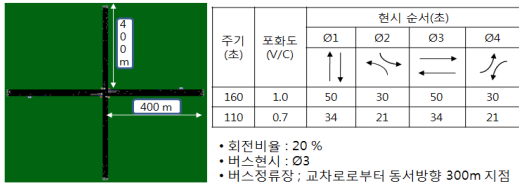
#### ② 시나리오 2(교통량 변동)

시나리오 2는 현장 적용성 검증을 위하여 실제 도심 환경에서 UTIS의 노변기지국이 1Km 간격으로 설치된 상황을 가정하여 3개의 교차로 중 가운데 교차로에서만 TSP가 제공되며 주도로의 교통량은 일정하고, 부도로의 교통량이 변동되는 경우에 대하여 평가를 하였다. 본 연구에서 제안한 버스 수요기반의 TSP 제어 알고리즘은 부도로의 포화도를 기반으로 보상하는 방안을 포함하고 있기 때문에 최적화된 주기 및 현시 배분 상황에서는 TSP의 효과가 그다지 크지 않을 수 있다. 따라서 주도로의 교통량은 일정하고, 부도로의 교통량이 변동하여 교통상황이 여유가 있는 경우에 대한 TSP의 효과를 검증하고자 하였다.

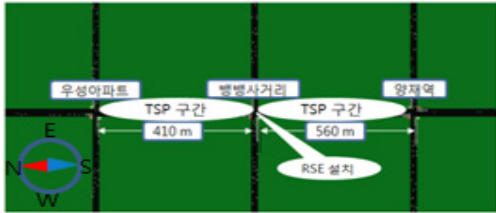
시나리오 2의 구성은 〈표 5〉와 같으며, 주도로의 교통량(v/c)을 1.0과 0.7로 고정하고, 부도로의 교통량(v/c)을 일정시간(15분) 간격으로 변화시켜 가면서 TSP를 제공하는 경우와 NON-TSP 상황을 비교하고자 하였다. 여기서, 교차로에 진입하는 교통량(v/c = 0.7/0.4)을 현시 보상 알고리즘에 적용된 교통량(v/c = 0.8/0.6) 기준보다 작게 설정하였는데, 이는 버스우선신호 제공으로 인하여 부도로의 v/c가 점차적으로 증가하는 동안 보상이 적용되는 임계 v/c에서의 보상 알고리즘 적용 여부를 보다 정확하게 확인하기 위한 것이다.

〈표 5〉 시나리오 2

Case	교통량(v/c)		버스 교통량	신호운영
	주도로	부도로		
Case 1	1.0 (60분)	1.0(15분)	180대/시	Non-TSP
		0.7(15분)		
		0.4(15분)		TSP
		0.7(15분)		
Case 2	0.7 (60분)	0.7(15분)	180대/시	Non-TSP
		0.4(15분)		
		0.7(15분)		TSP
		0.4(15분)		



〈그림 5〉 시나리오 1의 기하구조 및 교통조건



〈그림 6〉 시나리오 2의 기하구조

### 2) 시나리오별 변수 설정

시나리오 1의 기하구조 및 교통조건은 〈그림 5〉와 같다.

기하구조는 주·부도로의 링크길이를 모두 400m로 구성하였으며, 남북방향은 2개의 직진, 1개의 좌회전 차로로 구성하고, 동서방향은 2개의 직진, 1개의 버스전용차로, 1개의 좌회전 차로로 구성된 독립 교차로이다.

시나리오 2의 기하구조는 〈그림 6〉과 같으며, 동서방향으로 중앙버스전용차로가 운영 중인 강남대로의 3개 교차로(우성아파트-뽕뽕사거리-양재역) 구간을 선정하였다. 여기서 UTIS RSE는 뽕뽕사거리에 설치되어 있으며, TSP 제어 알고리즘도 이 교차로에서 남북 방향의 버스 진행 현시에 제공되는 것으로 가정하였다. 또한 〈그림 6〉의 3개 교차로의 신호조건은 〈그림 5〉에서의 교통량에 따른 주기 및 현시 배분과 동일하다.

### 3) 효과척도(MOE, Measure of Effectiveness)

일반적으로 버스에 대한 MOE로는 버스통행시간, 버스 정지횟수, 스케줄 준수를 등을, 교차로 전체에 대한 것으로는 일반차량 제어지체, 정지횟수, 여행시간 등을 적용하여 효과를 분석하는데, 본 연구에서는 버스통행시간과, 일반차량(버스 포함) 제어지체를 MOE로 하여 각 시나리오별에 대한 시뮬레이션 결과를 분석하였다.

## 3. 결과 분석

### 1) 시나리오 1(교통량 고정)

〈표 6〉은 주·부도로의 교통량(v/c)을 동일하게 하여 1.0과 0.7인 경우에 버스의 교통량이 많고, 적은 경우에 대한 버스통행시간과 전체차량의 제어지체를 분석한 결과이다.

#### ① 버스 수요 변화에 따른 결과

버스의 수요가 많은 경우(case 2, case 4)가 적은 경우(case 1, case 3)에 비하여 버스의 통행시간 개선율이 상대적으로 (최대 7.67 %까지) 높아짐을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 보상 알고리즘을 적용하는 경우와 하지 않는 경우 모두 동일한 추세를 보였다. 반면 교차로 전체의 제어지체 증가율 변화가 미미하거나, 보상을 적용하지 않은 경우에는 증가함을 확인할 수 있다.

#### ② 교통량(포화도)에 따른 결과

보상 알고리즘이 적용되는 경우에는 포화도가 낮은 경우(case 3, case 4)가 높은 경우(case 1, case 2)에 비하여 버스의 통행시간 개선율이 상대적으로 높아짐을 확인할 수 있다. 이는 교통량이 많은 경우 본 연구에서 제시한 보상 알고리즘 적용으로 인하여 버스 우선신호 제공 비율이 감소하였기 때문이라고 분석된다. 또한 이 경우 부도로의 보상 알고리즘 적용으로 전체차량의 제어지체 증가율 변화가 미미하였다.

반면, 보상 알고리즘이 적용되지 않은 경우에는 포

〈표 6〉 버스통행시간/제어지체(교통량 일정)

Case	버스통행 시간(초)		개선율 (%)	전체차량 제어지체(초)		증가율 (%)
	Non-TSP	TSP (보상 제외)		Non-TSP	TSP (보상 제외)	
Case 1	88.03	86.18	2.10	62.14	63.71	2.51
		83.61			5.02	
Case 2	81.59	79.49	2.57	62.81	62.77	-0.06
		75.34			7.67	
Case 3	62.35	59.92	3.90	36.00	36.21	0.78
		59.86			3.99	
Case 4	66.98	62.81	6.22	36.10	35.93	-0.46
		62.44			6.77	



화도가 높은 경우(case 1, case 2)가 낮은 경우(case 3, case 4)에 비하여 버스의 통행시간 개선율이 상대적으로 높아짐을 확인할 수 있다. 즉, 보상하는 경우와 반대의 결과를 보였다. 포화도가 높은 경우의 신호 주기가 낮은 경우의 신호 주기보다 길기 때문에 동일 비율의 Range Time이 적용되어도 절대량이 크기 때문에 우선신호 제공 시간이 커지기 때문이라고 분석된다. 이에 반해 전체차량의 제어지체의 경우 포화도가 높은 경우(case 1, case 2)는 상당히 높은 증가율(최대 46.79% 까지 증가) 보였으나, 포화도가 낮은 경우(case 3, case 4)에는 증가율의 변화가 미미하였다. 이는 포화도가 높은 경우 부도로에 대한 보상없이 버스 우선신호를 제공하여 교차로 전체의 제어지체가 증가하였기 때문이며, 반면 포화도가 낮은 경우에는 우선신호를 제공하여도 보상 알고리즘이 적용될 만큼의 포화도 증가가 이루어지지 않았기 때문이라고 분석된다.

2) 시나리오 2(교통량 변동)

〈표 7〉은 시나리오 2의 조건에서 주도로의 교통량(v/c)을 1.0과 0.7로 고정하고, 부도로의 교통량(v/c)을 일정시간(15분) 간격으로 변화시켜 가면서 버스통행시간과 전체차량의 제어지체를 분석한 결과이다.

〈표 7〉의 결과에서는 TSP를 제공하는 경우보다 제공하지 않는 경우 대비 9.81 ~ 10.95 % 버스의 통행시간이 개선된 것을 확인할 수 있다. 반면에 전체차량의 제어지체의 경우 TSP를 제공하는 경우와 제공하지 않는 경우에 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 신호주기 및 현시를 초기 조건(주/부도로의 교통량이 동일)을 기준으로 최적화한 상태에서 부도로의 교통량이 줄어들었다가 다시 늘어나는 형태로 변화를 시켰기 때문에 교통량이 많은 주도로 방향으로 TSP를 제공하여 교차로 전체적으로 볼 때 전체차량의 제어지체에는 영향을 주기 않기 때문으로 분석된다.

또한, 부도로의 교통량을 고려하는 보상 알고리즘을

적용하여 부도로의 교통량이 증가하여 근포화나 과포화일 경우에는 TSP를 제공하지 않고, 부도로의 교통량이 변동하여 교통상황이 여유가 있는 경우 TSP를 제공하여 버스의 통행시간을 개선하고, 교차로 전체에 대한 차량들의 제어지체를 최소화하고자 하는 알고리즘이 적용되었기 때문에 이와 같은 결과를 보인 것으로 분석된다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 도심에서의 버스의 운행 효율성 향상을 위하여 경찰청과 지자체가 주체가 되어 수도권에서 구축 운영 중인 UTIS를 활용하여 수요 기반의 능동형 TSP 제어 알고리즘을 개발하고, 시뮬레이션을 통해 그 효과를 평가하여 도시의 적용 가능성을 검증하였다.

기존 TSP 제어 알고리즘에서는 버스의 검지 시 타현시의 최소 녹색시간 제공 후 일률적으로 Early green, Green extension 등의 우선신호를 제공하는 방안이 일반적이었다. 이로 인해 버스 현시 이외의 타현시 차량들의 제어지체를 증가시켜 교차로 전체의 제어지체를 증가시키는 경우가 발생한다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 버스의 통행 우선권 제공으로 인해 버스 우선신호를 제공하기 위한 각 현시별 녹색시간의 25% 범위 내에서 Range Time을 설정하고, TSP의 수요가 되는 버스의 많고 적음을 UTIS 무선통신망을 활용하여 신호제어기에서 실시간으로 파악이 가능하도록 하여 버스의 수요에 비례한 TSP 제어가 가능하도록 구현하였다. 또한 부도로 지체의 영향을 최소화하기 위한 전략도 함께 제시하였다.

본 연구에서 제시한 알고리즘을 검증하기 위하여 HILS 기반의 CORSIM 모형을 이용하여 평가시스템을 구성하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

첫째로, 버스의 수요에 따른 버스 통행시간의 개선 비율이 비례적으로 나타남을 확인할 수 있었다. 버스의 교통량이 많은 경우는 버스 통행시간 개선율이 높고, 적은 경우에는 개선율이 낮음을 확인할 수 있었다.

둘째로 부도로에 대한 보상 알고리즘을 적용 여부에 따라 버스의 통행시간 개선 및 전체차량의 제어지체가 변화함을 확인할 수 있었다. 보상 알고리즘을 적용하지 않은 경우는 적용한 경우에 비해 버스 통행시간의 개선

〈표 7〉 버스통행시간/제어지체 비교(교통량 변동)

Case	버스통행 시간(초)		개선율 (%)	전체차량 제어지체(초)		증가율 (%)
	Non-TSP	TSP		Non-TSP	TSP	
Case 1	133.15	120.09	9.81	70.36	71.83	1.18
Case 2	87.61	78.02	10.95	38.83	38.65	0.00

율은 높지만, 전체차량의 제어지체는 증가함을 확인하였다.

결론적으로 본 연구에서 개발한 TSP 제어 알고리즘은 버스의 교통량에 비례하여 버스의 통행 우선권을 보장하고, 부도로의 보상 알고리즘 적용을 통한 교차로 전체의 제어지체도 고려한 수요기반의 능동형 버스우선신호 제어 알고리즘이라 할 수 있다. 다만, 보상알고리즘 적용으로 인하여 교차로 전체가 혼잡한 상황에서는 버스의 통행우선권 확보라는 버스우선신호의 효과가 미미하다고 할 수 있으나, 이러한 경우에는 보상알고리즘 적용을 위한 부도로의 포화도 임계치를 조정하는 방법을 통해 TSP 제어의 효과를 증가시킬 수도 있다.

향후 연구과제로는 본 연구에서 개발한 UTIS를 활용한 수요 기반의 능동형 버스우선신호 제어 알고리즘을 현장에 시범 적용하여 운영함으로써 안정화시킬 필요가 있다. 또한, 버스의 정시성 향상을 위해 버스의 배차간격을 고려하여 운행스케줄에 비해 늦어진 버스에 대하여 선택적으로 우선신호를 제공할 수 있는 조건형 TSP 제어 알고리즘에 대한 연구도 필요하다.

### 참고문헌

1. 장상우 · 손승희 · 곽수진 · 이상선(2005), “단거리 전용무선통신(DSRC)를 이용한 버스우선 신호제어 시스템 개발” 2005년도 제4회 추계학술대회는 문집, 한국ITS학회, pp.125~129.
2. 한명주 · 이영인(2006), “실시간신호제어시스템에서의 버스우선신호 알고리즘 정립 (중앙버스 전용차로를 대상으로)”, 대한교통학회지, 제24권 제7호, 대한교통학회, pp.101~114.
3. 조한선 · 김원호 · 오주택 · 심재익(2007), “철도건

널목 인근 신호교차로에서의 우선신호 전략 비교 분석 (열차속도를 중심으로)”, 대한교통학회지, 제25권 제2호, 대한교통학회, pp.17~26.

4. 이용택 외 2명(2005), “버스우선신호시스템 해외 운영사례 및 국내 도입 방안”, 도로교통, Vol.100, pp.23~38.
5. 정준하 · 하동익 · 이돈주(2001), “교통신호제어시스템 성능평가 시뮬레이션 시스템 개발”, 대한교통학회지, 제19권 제5호, 대한교통학회, pp.71~83.
6. Graham Currie, Amer Shalaby(2008), “Active Transit Signal Priority for Streetcars-Experience in Melbourne and Toronto”, *The 86th TRB Annual Meeting*.
7. Ilsoo Yoon, Matthew Best, Brain Park(2007), “Evaluation of Emergency Vehicle Preemption Strategies on a Coordinated Actuated Signal System Using Hardware-in-the-Loop Simulation”, *The 85th TRB Annual Meeting*.
8. Peter G. Furth, Burak Cesme, Tarannum Rima(2010), “Signal Priority Near a Major Bus Terminal: Case Study of Boston’s Ruggles Station”, *The 88th TRB Annual Meeting*.
9. Jianyang Zheng, Guohui Zhang, Yinhai, Burak Cesme, Tarannum Rima(2010), “Signal Priority Near a Major Bus Terminal: Case Study of Boston’s Ruggles Station”, *The 88th TRB Annual Meeting*.

✉ 주 작성자 : 홍경식  
 ✉ 교신저자 : 홍경식  
 ✉ 논문투고일 : 2011. 6. 9  
 ✉ 논문심사일 : 2011. 7. 18 (1차)  
                   2011. 8. 29 (2차)  
                   2011. 10. 19 (3차)  
                   2011. 11. 2 (4차)  
 ✉ 심사판정일 : 2011. 11. 2  
 ✉ 반론접수기한 : 2012. 4. 30  
 ✉ 3인 익명 심사필  
 ✉ 1인 abstract 교정필