

## 해석적 방법을 이용한 능동식 트램 우선신호의 신호시간 및 교차로 대기시간 산정 모형

정영제\* · 정준하 · 주두환 · 이호원 · 허낙원

도로교통공단 교통과학연구원

### Signal Timing and Intersection Waiting Time Calculation Model using Analytical Method for Active Tram Signal Priority

JEONG, Youngje\* · JEONG, Jun Ha · JOO, Doo Hwan · LEE, Ho Won · HEO, Nak Won

Traffic Science Institute, Korea Road Traffic Authority, Seoul 100-789, Korea

#### Abstract

This research suggests a new tram signal priority model which determines signal timings and tram intersection waiting time using analytical method. This model can calculate the signal timings for Early Green and Green Extension among the active tram signal priority techniques by tram detection time of upstream detector. Moreover, it can determine the tram intersection waiting time that means tram intersection travel time delay from a vantage point of tram travel. Under the active tram signal priority condition, priority phases can bring additional green time from variable green time of non-priority phases. In this study, the signal timing and tram intersection waiting time calculation model was set up using analytical methods. In case studies using an isolated intersection, this study checks tram intersection waiting time ranged 12.7 to 29.4 seconds when variable green times of non-priority phases are 44 to 10 seconds under 120 seconds of cycle length.

본 연구에서는 트램의 능동식 우선신호를 위해 해석적 방법을 이용하여 신호시간 및 트램의 교차로 대기시간을 산정하기 위한 모형을 제시하였다. 본 모형을 통해 상류부 검지기에서 트램이 검지된 시간을 기준으로 능동형 우선 신호 기법 중 Early Green 및 Green Extension을 위한 신호시간을 결정할 수 있다. 또한 본 모형은 트램 통행의 관점에서 트램의 교차로 지체를 의미하는 트램의 교차로 대기시간을 산정할 수 있다. 우선신호의 구동환경에서 비우선현시의 잔여녹색시간에서 우선현시의 추가녹색시간을 제공하게 되며, 트램은 비우선현시의 최소녹색시간 동안 교차로에서 대기하게된다. 본 모형에서는 우선신호의 신호시간 및 트램의 교차로 대기시간을 해석적 방법으로 모형화하였다. 독립교차로를 대상으로 하는 사례분석에서는 120초의 주기길이에 비우선현시의 여유녹색시간을 44초에서 10초까지 적용하여 트램의 평균 교차로 대기시간이 12.7초에서 29.4초까지 산정됨을 확인하였다.

#### Keywords

active signal priority, non-priority phase, priority phase, signal timing, tram intersection waiting time, tram  
능동식 우선신호, 비우선현시, 우선현시, 신호시간, 트램 교차로 대기시간, 트램

\* : Corresponding Author  
sleep108@koroad.or.kr, Phone: +82-2-2230-6394, Fax: +82-2-2230-6339

Received 22 April 2014, Accepted 24 June 2014

© Korean Society of Transportation  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

대중교통 우선신호는 1960년대 유럽에서 최초로 적용되기 시작하였으며, 미국의 경우 로스엔젤레스에서 1970년대부터 시범적용이 이루어져왔다(Evans and Skiles, 1970; Khasnabis et al., 1993). 이때의 우선신호는 버스 또는 궤도차량의 교차로 통과를 우선처리하는데 집중하는 Preemption 형태가 주류를 이루었으며(Wilbur, 1976; Wattleworth et al., 1977), 현재 대중교통 분야에서 승용차의 소통상태를 고려하는 Priority 전략들은 1990년대 연구들에 해당한다. 이후에는 대중교통 우선신호를 실시간 신호제어시스템에 결합하기 위한 연구들이 진행됨바 있으며, 이들 연구는 우선신호로 인해 지체가 증가하는 승용차의 소통개선에 초점이 맞춰져 있었다(Garrow and Machemehl, 1998; Currie and Shalaby, 2008; Gardner et al., 2009). 우선신호와 관련한 국내 연구로는 DSRC(Dedicated Short Range Communication) 기반의 무선검지체계를 이용하는 버스 우선신호시스템에 대한 실험이 진행됨바 있으며(Kim, 2007), 최근에는 경찰청의 도시교통정보시스템(UTIS) 무선통신체계 기반의 버스 우선신호시스템이 제시됨바 있다(Hong et al., 2011).

능동형 대중교통 우선신호에서는 차량의 검지, 우선신호의 요청 및 허용, 우선신호 구동 등 일련의 과정이 차례로 수행되며 (Smith et al., 2005; Li et al., 2008), 대중교통이 검지되었을 때에 한해 조건부로 우선현시를 제공하게 된다. 이때 우선신호 프로세스에서는 버스 등 대중교통이 신호교차로에서 최소의 지체 만을 경험하도록 하기 위한 신호시간을 운영하게 된다.

우선신호의 제공방법과 관련한 다양한 기법들이 개발되어왔으며, 우선현시를 조기에 시작하는 Early Green 과 우선현시를 연장하는 Green Extension, 우선현시

를 삽입하는 Phase Insertion이 세계적으로 가장 널리 적용되고 있다(Skabardonis, 2000; Chada and Newland, 2002; Smith et al., 2005; Gardner et al., 2009). 이때 우선신호의 길이는 보통 10초 내외의 시간이 적용되며, 이는 정지선 상류부의 우선신호 요청을 위한 검지기 위치와 관련된다. 우선현시의 녹색시간이 종료되기 직전 대중교통이 검지되는 경우 우선신호를 제공하여 교차로를 무정차로 통과하기 위해서는 검지기부터 정지선까지 통행시간 크기의 추가적인 녹색신호가 요구되며, 일반적으로 정지선에서 100-200m 전방에 검지기가 설치되는 것을 고려할 때 10초 내외의 시간이 소요된다(Jeong and Kim, 2010). 일반적으로 대중교통의 경우 높은 승객 점유율로 인해 교차로 지체를 최소화 하기 위한 신호운영 전략이 요구된다.

본 연구에서는 다양한 능동형 우선신호 기법들 중 Early Green 및 Green Extension이 적용되는 과정에서 우선신호를 위한 신호시간의 산정방법을 제시하고, 이때 우선현시의 변화에 따른 트램의 교차로 대기시간 산정모형을 제시하였다. 본 연구는 전용차로를 운영하는 중앙트램전용궤도, 중앙버스전용차로, BRT에도 동일하게 적용이 가능한 대중교통 우선신호 전략에 해당하며, 향후 버스 우선신호의 운영전략으로 확장이 가능하다.

또한 국내에서는 대중교통의 신호교차로 우선처리와 관련하여 Priority와 Preemption에 대한 용어정립이 없는 상황이며, 본 연구를 위해 Table 1과 같이 우선신호 관련 한글 용어들을 정립하여 사용하였다.

## 우선신호를 위한 신호시간

능동식 우선신호에는 Early Green, Green Extension, Phase Insert, Phase Rotation 등의 기법이 세계적으로 널리 적용되고 있다. Early Green은 Figure 1과 같이

**Table 1.** Definition of transit signal priority terms in this study

Technique	Definition (Source: US TSP Handbook)	Korean term in this study
Signal Preemption	Preemption is a special signal control mode for purposes of servicing railroad crossings, emergency vehicle passage, and other special tasks. It requires terminating normal traffic control to provide service needs	우대신호
Signal Priority	Priority is a preferential treatment of one vehicle class (such as a transit vehicle) over another vehicle class at a signalized intersection without causing traffic signal controllers to drop from coordinated operations.	우선신호
Active Signal Priority	Active priority strategies provide priority treatment to a specific transit vehicle following detection and subsequent priority request activation.	능동식 우선신호
Passive Signal Priority	Passive priority does not require the hardware and software investment of active priority treatments. Passive priority operates continuously, regardless, based on knowledge of transit route and ridership patterns.	고정식 우선신호

대중교통이 적색시간 동안에 도착하였을 경우, 현시를 정상상태 보다 일찍 시작하는 방법에 해당하며, Green Extension은 대중교통이 녹색시간 종료 전 까지 교차로를 통과하는 것이 불가능한 경우 현시를 일부 연장하는 방법을 의미한다(Skabardonis, 2000; Smith et al., 2005). Green Extension 기법은 적색시간 만큼 통행 시간 감소가 발생하여 Early Green 대비 지체 개선 효과가 우수하나 발생가능 시간대가 Early Green 대비 짧아 발생빈도는 상대적으로 낮다. 이와는 반대로 Early Green은 대중교통 현시가 적색인 경우 언제나 구동이 가능하다. 능동식 우선신호는 일반적으로 차량의 검지 및 위치확인, 우선신호 요청 및 허용여부 결정, 우선신호의 적용 과정을 거치게 된다. 이때 우선신호의 길이는 Green Extension과 Early Green이 적용될 때 우선 현시를 위해 비우선현시로 부터 가져오는 녹색시간 크기를 의미한다.

우선신호의 시간길이는 비우선현시의 승용차 지체 증가를 고려하여 최대 크기를 지정하여 적용하며, 일반적으로 Table 2와 같이 10초 내외의 시간이 적용된다. 일례로 Melbourne에서 운용되고 있는 SCATS에서는 버스현시 녹색시간의 확대를 위해 비우선현시의 최대

20% 범위에서 우선현시로 사용하며, Tronoto에서는 중요교차로는 최대 30초, 비중요교차로는 최대 16초의 우선신호 길이를 적용하고 있다. 이외 다수의 적용 사례 및 연구 결과에서도 우선신호를 위해 10초 내외의 시간 길이를 적용 중에 있다(Garrow and Machemehl, 1998; Chada and Newland, 2002; Levinson et al., 2003; Rephlo and Haas, 2006; Currie and Shalaby, 2008). 또한 우선신호의 시간길이 결정을 위한 방법으로 결정적 지체모형을 이용하여 우선신호가 구동되는 조건에서의 지체변화를 고려하여 우선현시의 지체 감소량과 비우선현시의 지체 증가량을 동일하게 만드는 신호시간의 산정방법이 제시된바 있다(Liu et al., 2008; Jeong, 2011; Jeong et al., 2011; Jeong and Kim, 2013). 하지만 이들 전략의 경우 모형별로 차이는 있으나, 일반차량의 관점에서 우선현시의 지체 감소량과 비우선현시의 지체 증가량을 동일하게 만드는 신호시간을 산정함에 따라 우선신호의 목적에 해당하는 트램 지체를 고려하지 못한다.

우선신호의 신호시간 산정과 관련된 또 다른 연구로 Kim(2004)는 Early Green, Green Extension, Phase Insertion의 기법에 대해 신호시간의 산정방법

Table 2. Application examples of priority signal

City & Researcher	Priority Techniques	Priority Phase
Los Angeles (Levinson, 2003)	Green Extension	10 sec
Melbourne (Currie, 2008)	Early Green/Green Extension	Max 20% of Cycle Length
Tronoto (Currie, 2008)	Early Green/Green Extension	16-30 sec
Sacramento (Rephlo, 2006)	Early Green/Green Extension	10 sec
Chada (2002)	Early Green/Green Extension	10 sec
Garrow (1998)	Early Green/Green Extension	10-20 sec

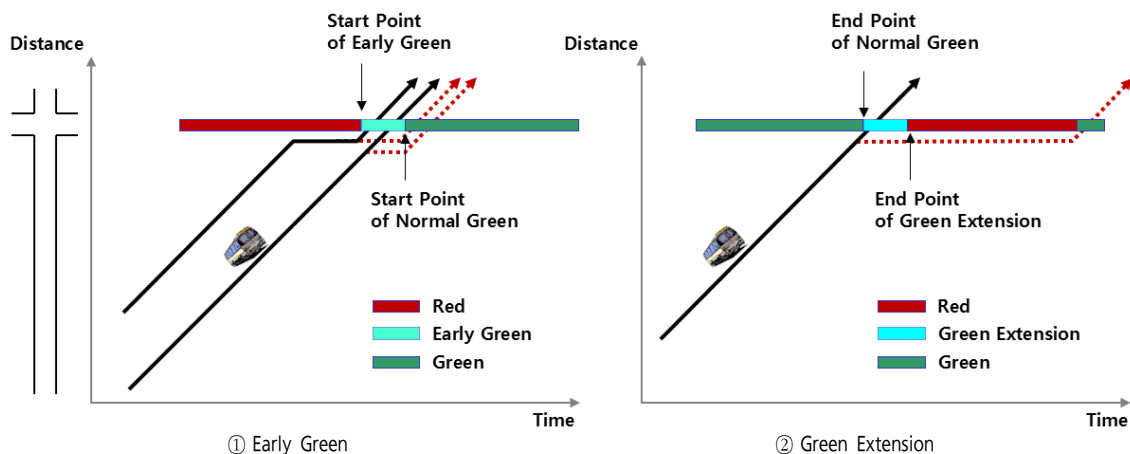


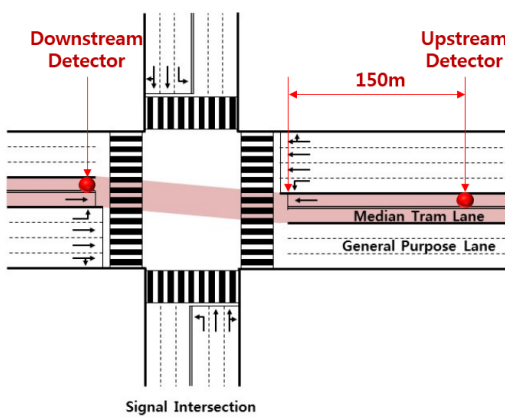
Figure 1. Phase Change for early green and green extension (source: Kim, 2004)

을 제시하고, Nearside 버스정류장에서 버스가 우선신호를 제공받는 확률을 개선하기 위해 버스의 정류장 정차시간을 예측하여 우선신호 프로세스에 반영하기 위한 연구를 제시한바 있다. 또한 Jeong(2010)은 중앙버스 전용차로에서 버스의 검지시각에 따른 대기시간의 예측 모형을 적용하여 최적 검지기 위치산정을 위한 방법을 제시한바 있다.

능동식 대중교통 우선신호에서 우선현시의 크기 산정 방법과 관련하여 선행연구의 고찰을 통한 본 연구의 방법론은 다음과 같이 요약된다. 첫째, 트램의 능동식 우선신호를 위해 트램 통행의 관점에서 우선신호의 신호시간 산정모형을 개발하였다. 우선신호의 목적은 대중교통의 지체 최소화에 해당하며, 이를 달성하기 위한 신호 운영전략에 해당한다. 본 모형에서는 상류부 검지체계의 트램 검지시각을 기준으로 Early Green과 Green Extension의 구동을 위한 우선현시와 비우선현시의 크기, Early Green과 Green Extension의 크기를 산정할 수 있도록 하였다. 둘째, 우선신호에 따른 트램의 통행패턴 변화를 관찰하기 위해 우선신호를 고려한 트램의 교차로 대기시간 산정모형을 정립하였다. 신호교차로의 결정적 지체모형에서 Vertical Queue와 유사한 개념으로 트램이 교차로에 도착한 이후 잔여 적색시간을 산정하며, 이를 트램의 교차로 대기시간으로 정의하여 우선신호 구동에 따른 트램의 통행패턴 변화를 확인할 수 있도록 하였다.

### 신호시간 및 대기시간 산정모형

트램 능동식 우선신호의 Early Green과 Green

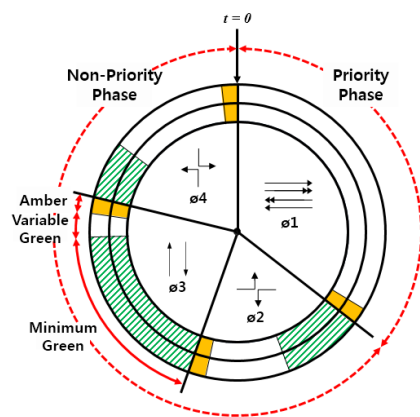


① Intersection design and detector layout

Extension 구동을 위해서는 Figure 2의 ①과 같이 트램의 교차로 접근을 확인하기 위한 진입부 검지기와 교차로 진출여부를 확인하기 위한 검지기가 요구된다. 본 연구에서는 정지선으로부터 150m 상류에 검지기가 위치하는 것을 가정하였으며, 독립교차로를 대상으로 하였다. 또한 트램은 주기길이 이상의 차두간격으로 도착하여 군집의 영향은 없으며, 40kph의 고정된 속도로 통행 속도의 변동성은 고려하지 않았다. 현시체계는 Figure 2의 ②에서와 같이 1현시에 해당하는 트램의 직진현시를 우선현시로 하며, 이외 주방향 좌회전과 부방향 현시를 비우선현시로 한다. 이때 Early Green 및 Green Extension이 적용되는 경우에서 우선현시에 추가되는 녹색시간은 비우선현시의 최소녹색시간과 황색시간을 제외한 여유녹색시간 만을 이용하며, 트램이 상류부 검지기의 검지시각을 기준으로 우선신호 구동체계에 따라 우선현시와 비우선현시의 시간길이를 결정하기 위한 모형을 정립하였다.

첫째, Green Extension 기법은 우선현시의 녹색시간 종료이후에 트램이 교차로에 도착하는 경우 구동된다. 이때 식(1)과 같이 트램 검지시각  $t$ , 검지기부터 정지선까지 통행시간  $TT$ , 우선현시 녹색시간  $g_1$ 를 이용하여 Green Extension의 구동 시간이 표현된다. 여기에서 트램 상류부 검지기 검지시각  $t$ 는 0에서 주기까지의 범위로 우선신호 구동 및 신호시간 산정 기준이 된다.

Green Extension은 Figure 3의 ①과 같이 트램의 검지시각  $t$ 가 우선현시 미제공시 트램이 교차로를 통과하지 못하는 시점인  $g_1 - TT$ 에서부터 우선현시가 종료되는 시간인  $g_1$ 까지 구동된다.



② Signal operation plan

Figure 2. Operation condition of signal intersection for active signal priority

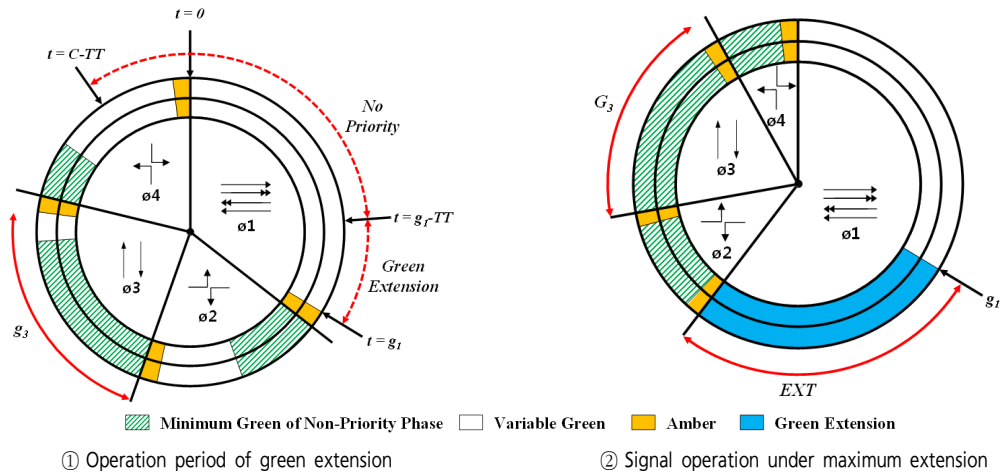


Figure 3. Operation condition of green extension

$$\begin{cases} g_1 - TT \leq t \leq g_1 - TT + EXT; & TT > EXT; \\ g_1 - TT \leq t \leq g_1; & TT \leq EXT; \end{cases} \quad (1)$$

Green Extension을 위해 제공 가능한 최대시간  $EXT$ 는 식(2) 및 Figure 3의 ②와 같이 주기  $C$ 에서 우선현시의 녹색시간  $g_1$ 과 비우선현시의 최소녹색시간  $ming_i$ , 황색시간  $A_i$ 를 제외한 비우선현시 여유녹색시간의 총합으로 정의된다. 또한 Green Extension을 위한 적정 우선신호의 길이  $ext$ 는 식(3)과 같이 트램의 정지선 도착 예정시간  $t + TT$ 와 우선현시  $g_1$  간의 차이이며, 트램이 교차로를 무정차 통과하기 위한 시간이다.

$$EXT = C - g_1 - \sum_{i=2}^n ming_i - \sum_{i=1}^n A_i; \quad (2)$$

$$ext = t + TT - g_1; \quad (3)$$

이때 우선신호가 구동되는 조건에서 비우선현시의 신호시간  $G_i$ 는 식(4)에서와 같이 정상 녹색시간  $g_i$ 에서 우선신호  $ext$ 의 일정 부분을 제외하여 산정하며, 비우선현시의 최적 시간길이를 산정할 수 있다.

이때 비우선현시의 녹색시간 감소량을 결정하는  $ext$ 의 감소비율  $\alpha_i$ 는 총 합이 식(5)와 같이 1.0이 되며, 우선신호 구동에 따른 조정된 비우선현시의 녹색시간은 식(6)과 같이 최소 및 정상녹색시간 범위에서 결정되어야 한다.

$$G_i = g_i - \alpha_i \frac{ext}{n-1}; \quad i = 2, \dots, n; \quad (4)$$

$$\sum_{i=2}^n \alpha_i = 1.0; \quad (5)$$

$$ming_i \leq G_i \leq g_i; \quad (6)$$

다음으로 Early Green은 Figure 4의 ① 및 식(7)에서와 같이 검지시각  $t$ 가 Green Extension이 구동 가능한 시간이 종료된 이후를 의미하는  $g_1$ 에서부터 우선신호 없이도 트램이 교차로에 도착하면, 우선현시의 녹색시간이 시작되는  $C - TT$ 의 범위에서 구동된다.

$$\begin{cases} g_1 - TT + EXT < t \leq C - TT; & TT > EXT; \\ g_1 < t \leq C - TT; & TT \leq EXT; \end{cases} \quad (7)$$

Early Green을 위해 제공 가능한 최대 시간  $EAR$ 은 Figure 4의 ②와 식(8)에서와 같이 비우선현시의 여유녹색시간 합계에 해당하며, Early Green을 적정 우선신호 길이  $ear$ 은 식(9)와 같이 주기길이에선부터 우선현시,  $t$  시점에 완료된  $k-1$  현시의 신호시간, 현재 현시를 의미하는  $k$  현시의 누적진행시간, 다음 현시를 의미하는  $k+1$  현시의 최소녹색시간과 차이로 표현된다.

$$EAR = C - g_1 - \sum_{i=2}^n ming_i - \sum_{i=1}^n A_i; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} ear = C - (g_1 + A_1) - \sum_{i=2}^{k-1} (g_i + A_i) \\ - (mg_k + mA_k) - \sum_{i=k+1}^n (ming_i + A_i); \end{aligned} \quad (9)$$

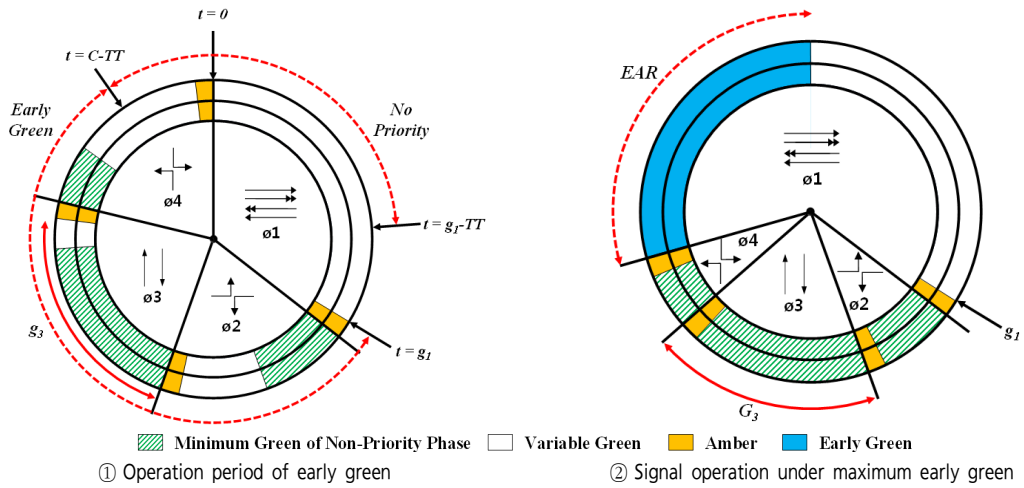


Figure 4. Operation condition of early green

$$mg_k = \begin{cases} ming_k; & t \leq \sum_{i=1}^{k-1} (g_i + A_i) + ming_k; \\ cumg_k; & \sum_{i=1}^{k-1} (g_i + A_i) + ming_k < t; \end{cases} \quad (10)$$

$$mA_k = \begin{cases} A_k; & t \leq \sum_{i=1}^{k-1} (g_i + A_i) + ming_k; \\ \sum_{i=1}^k (g_i + A_i) - t; & t > \sum_{i=1}^{k-1} (g_i + A_i) + ming_k; \end{cases} \quad (11)$$

이때 트램이 검지된  $t$  시점에 서비스되는  $k$  현시에서 도출 가능한 여유녹색시간은 식(10)과 같이 현시 진행 시각이 최소녹색시간을 경과하지 않은 경우 여유녹색시간 전체를 이용가능 하며, 최소녹색시간을 경과한 경우  $t$  시간 까지 누적녹색시간  $cumg_k$ 를 제외한 녹색시간에 해당한다. 이때 우선신호 제공 이후의 비우선현시의 녹색시간  $G_i$ 는 식(12)에서와 같이 정상현시의 녹색시간에서 Early Green을 위해 제공되는 추가 녹색시간  $ear$ 에 가중치  $\beta_i$ 를 고려하여 산정한다.

Early Green을 위한 가중치의 합은 Green Extension에서와 동일한 방식으로 식(13)와 같이 총합이 1.0으로 처리되어야 한다. 또한 우선신호를 위해 조정된 비우선현시의 녹색시간은 식(14)과 같이 정상 및 최소 녹색시간들의 범위에서 결정되어야 한다.

$$G_i = g_i - \beta_i \frac{ear}{\sum_{i=k}^n i}; \quad i = k, \dots, n; \quad (12)$$

$$\sum_{i=k}^n \beta_i = 1.0; \quad (13)$$

$$ming_i \leq G_i \leq g_i; \quad (14)$$

상류부 검지기의 트램 검지시간  $t$ 가 식(15)와 같이 교차로 도착 시점에 녹색시간이 제공되는 시점인  $C - TT$ 에서부터 녹색시간 종료 전 트램의 교차로 통과가 가능한 시간을 의미하는  $g_1 - TT$ 까지의 경우 우선신호의 구동없이도 비우선현시의 정상 녹색시간 동안 트램의 교차로 통과가 가능하다.

$$C - TT < t < g_1 - TT; \quad (15)$$

또한 우선신호 구동조건에서 트램의 교차로 대기시간  $TW$ 는 식(16)에서와 같이 트램이 교차로에 도착이후 대기여부에 따라 결정되며, Early Green의 제공 조건에서만 교차로 대기가 발생한다.

Green Extension과 No Priority 조건에서는 트램의 교차로 대기시간이 발생하지 않으며, Early Green 중 교차로 도착 이후에도 대기 후 교차로를 통과하는 경우로서 현재 시점에서  $k$  현시의 잔여 녹색시간  $remg_k$  및 잔여 황색시간  $remA_k$ 와 현재 이후  $k+1$ 현시 부터의 최소녹색시간 및 황색시간의 합에서 검지기에서 교차로까지 통행시간과의 차이로 표현된다.

$$TW = \begin{cases} 0; & C - ear \leq t + TT; \\ (remg_k + remA_k) - TT & \\ + \sum_{i=k+1}^n (ming_i + A_i); & C - ear > t + TT; \end{cases} \quad (16)$$



Table 3. Signal operation plan for case studies

(unit: sec)

ALT	Priority Phase		Non-Priority Phase (Minimum Green / Variable Green / Amber / Split)		Cycle	Maximum Priority Time
	Phase No.1 Through of Major Road & Tram Through	Phase No.2 Left Turn of Major Road	Phase No.3 Through of Minor Road	Phase No.4 Left Turn of Minor Road		
ALT No.1	40	9 / 13 / 3 / 25	9 / 18 / 3 / 30	9 / 13 / 3 / 25	120	44
ALT No.2	40	6 / 16 / 3 / 25	25 / 2 / 3 / 30	6 / 16 / 3 / 25	120	34
ALT No.3	40	10 / 12 / 3 / 25	25 / 2 / 3 / 30	10 / 12 / 3 / 25	120	26
ALT No.4	40	18 / 4 / 3 / 25	25 / 2 / 3 / 30	18 / 4 / 3 / 25	120	10

이때 현재  $k$  현시의 잔여녹색시간  $remg_k$ 는 식(17)과 같이 트램의 검지시점이 최소녹색시간을 경과하지 않은 경우 현재 시점 이후로 남아있는 최소녹색시간에 해당하며, 최소녹색시간을 경과한 경우 즉시 녹색시간이 종료됨에 따라 0으로 처리된다. 잔여황색시간  $remA_k$  또한 잔여녹색시간과 동일한 방법으로 식(18)과 같이 트램의 검지시점에 황색신호의 진행 여부에 따라  $k$  현시의 잔여 황색신호를 결정한다.

$$remg_k = \begin{cases} 0; & t \geq \sum_{i=1}^{k-1} (g_i + A_i) + ming_k; \\ \sum_{i=1}^{k-1} (g_i + A_i) + ming_k - t; & t < \sum_{i=1}^{k-1} (g_i + A_i) + ming_k; \end{cases} \quad (17)$$

$$remA_k = \begin{cases} A_k; & t \leq \sum_{i=1}^{k-1} (g_i + A_i) + ming_k; \\ \sum_{i=1}^k (g_i + A_i) - t; & t > \sum_{i=1}^{k-1} (g_i + A_i) + ming_k; \end{cases} \quad (18)$$

본 연구에서는 능동형 우선신호의 Early Green 및 Green Extension에서 적용하기 위한 신호시간 및 트램 교차로 대기시간 산정모형을 제시하였으며, 트램의 검지시각별로 구분하여 우선현시 및 비우선현시의 시간 길이를 결정할 수 있도록 하였다.

### 사례분석

능동형 우선신호의 신호시간 및 트램의 교차로 대기시간 모형의 사례분석을 수행하였다. 분석대상은 Figure 2와 동일한 교차로 및 신호운영 조건을 선택하였으며, Table 3에서와 같이 최소녹색시간 제약에 따라 4개의 대안을 구성하였다. 대안 1은 모든 비우선현시의 최소녹색시간을 9초로 지정하여 우선신호의 구동을 최우선적

으로 고려할수 있도록 하였으며, 대안 2의 경우 직진현시가 횡단보도 신호와 연계됨을 고려하여 부방향 직진현시의 3현시 만을 최소녹색시간 25초로 구성하였다. 대안 3는 보행자신호와 연계되지 않는 비우선현시 좌회전의 최소녹색시간을 10초로 설정하였다. 또한 대안4는 일반적인 버스 우선신호와 유사한 경우로 전체 이용 가능한 여유녹색시간이 10초에 해당한다. 트램 우선신호의 사례분석에서는 해석적 방법의 신호시간 및 트램 대기시간 산정모형을 적용을 위해 엑셀을 이용하였다.

트램의 능동식 우선신호 적용에 따른 Early Green 및 Green Extension의 구동시간은 Figure 5와 같이 트램 검지시점에 따라 표현된다. Green Extension은 트램이 우선현시의 녹색시간 종료 이후에 교차로에 도착하게 되는 상황에서 구동되며, 검지기에서 정지선 까지 트램의 통행시간은 14초로 트램의 검지시각이 23초에서부터 우선현시가 종료되는 37초까지에 해당된다.

Early Green은 우선현시의 황색이 시작되는 38초에서부터 트램 검지이후 교차로 도착시 우선신호 제공없이 녹색신호를 제공받는 106초(=120초(C)-14초(TT))까지 구동된다. 이때 우선신호로 제공이 가능한 최대 시간길이는 Figure 5 및 Table 3에서와 같이 비우선현시 여유녹색시간의 차이에 따라 대안 1이 최대 44초, 대안 2가 34초, 대안 3이 26초, 대안 4가 10초에 해당한다. 대안1의 경우 트램이 교차로에 도착하였을 때 녹색신호가 종료되는 상황인 트램 검지시각  $t$ 가 23초(=37초( $g_1$ )-14초(TT))부터 Green Extension의 구동이 시작된다. 또한 우선현시가 종료되는 37초 까지 Green Extension이 구동되며, 이때 최대 14초까지 우선현시가 연장된다. 우선현시의 녹색이 종료된 이후인 트램 검지시각 38초 부터는 Early Green이 구동되며, 우선신호 없이도 교차로 도착시 녹색이 제공되는 106초(=120초(C)-14초(TT))까지 지속된다. 이때 Early Green의 길이는 트램 검지시각  $t$ 가 38초인 경우 전체

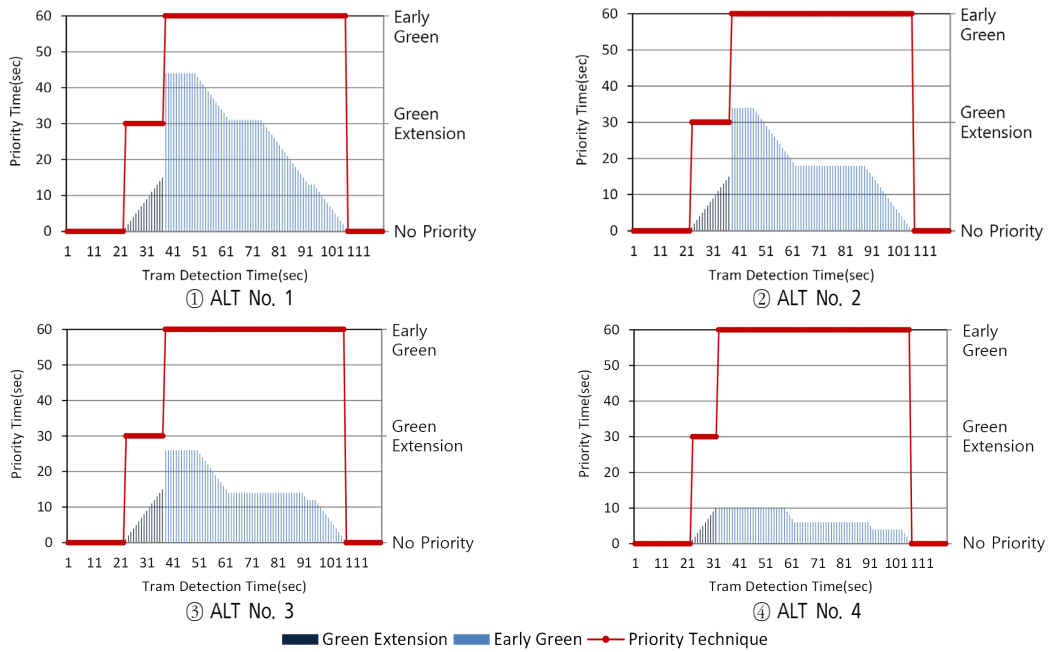


Figure 5. Signal priority technique and signal time by tram detection time

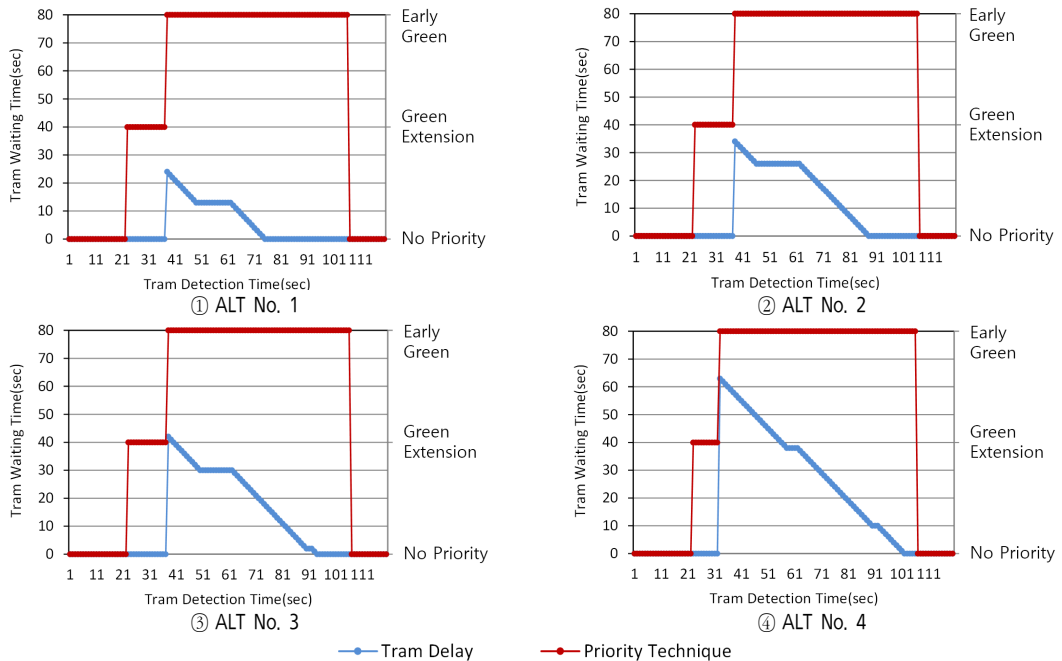


Figure 6. Tram intersection waiting time by tram detection time

여유녹색시간에 해당하는 44초까지 이용되며, 이후 트램 검지기각 경과에 따라 잔여 여유녹색시간을 우선신호로 이용하게 된다. 우선신호 구동시간 및 시간길이는 전체 대안에서 동일한 패턴을 나타내었으며, 대안 4에서는

총 10초의 우선신호 적용으로 인해 Green Extension 및 Early Green 또한 최대 10초의 시간범위 내에서 구동이 이뤄졌다.

트램 교차로 대기시간은 Figure 6과 같이 No



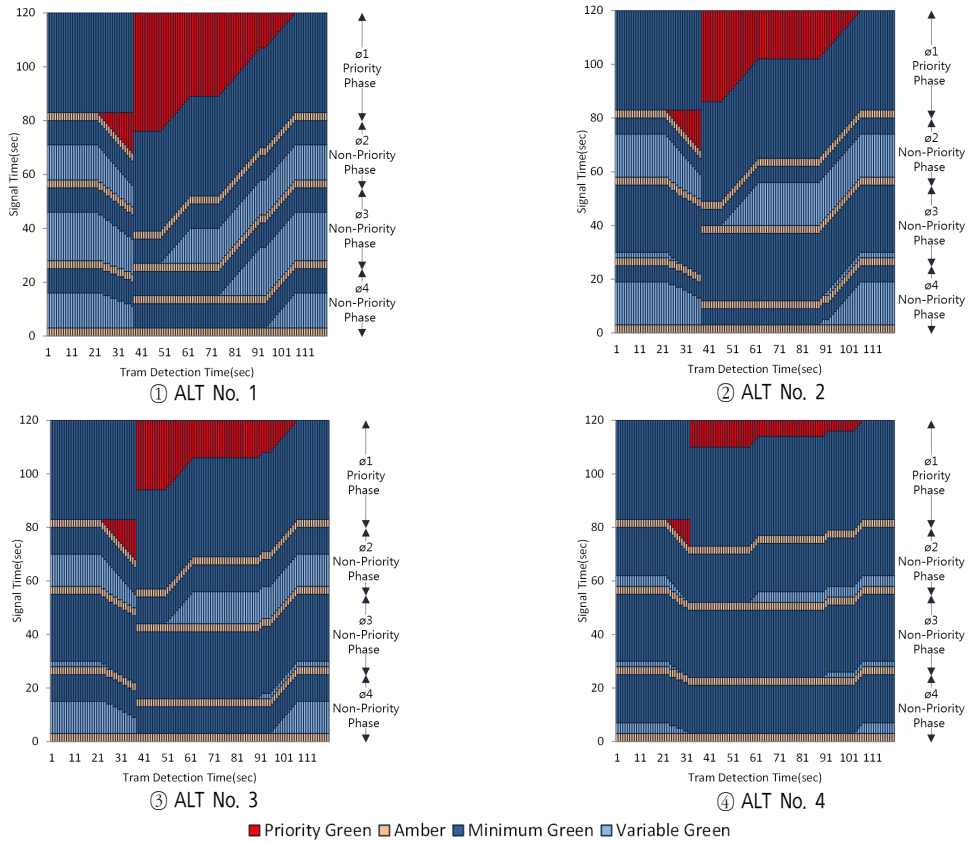


Figure 7. Application results of tram signal priority by tram detection time

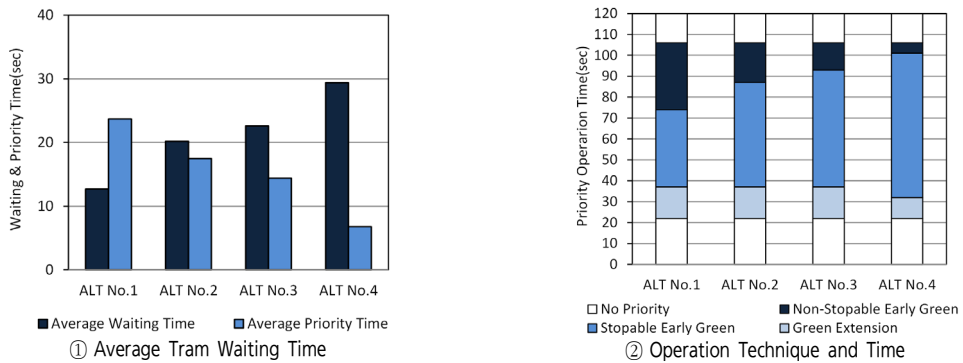


Figure 8. Average tram intersection waiting time and priority time by tram detection time

Priority와 Green Extension에서는 발생하지 않으며, Early Green에서는 비우선현시의 최소녹색 및 황색시간의 합산한 크기를 최대 대기시간으로 하여 검지시간이 경과함에 따라 대기시간 또한 점진적으로 감소하는 결과를 나타내었다. 이때 최대 대기시간은 교차로 도착시점에 비우선현시의 잔여 최소녹색시간의 총합으로 대안 1이 최대 24초, 대안 2가 34초, 대안 3이 42초, 대안 4

가 63초에 해당한다. 또한 트램 검지시각별 우선신호 구동에 따른 우선현시 및 비우선현시의 신호시간 변화는 Figure 7과 같이 우선현시의 연장 및 조기시작 패턴으로 나타내었다. 우선현시의 시간변화에 해당하는 Figure 5에 우선현시와 비우선현시의 패턴을 함께 표현하였으며, 우선신호가 구동되기 위해 개별 비우선현시 신호시간의 변화를 확인할 수 있도록 하였다. 트램의 교차로 대기시

간의 평균은 Figure 8의 ①에서와 같이 대안 1이 12.7초, 대안 2가 20.2초, 대안 3이 22.6초, 대안 4가 29.4초로 분석되었으며, 이때 Green Extension 및 Early Green으로 이용된 평균 우선신호 시간은 대안 1이 23.7초, 대안 2가 17.5초, 대안 3이 14.4초, 대안 4가 6.8초의 결과를 나타내었다. 또한 우선신호의 구동기법은 Figure 8의 ②와 같이 상대적으로 짧은 우선신호 길이가 적용됨에 따라 Green Extension의 발생이 감소하며, Early Green의 구동이 증가함을 나타내었다.

## 결론

본 연구에서는 트램의 능동식 우선신호를 위해 해석적 방법으로 우선현시와 비우선현시의 신호시간을 산정하기 위한 모형을 제시하였으며, 이때 지체와 유사한 개념으로 트램의 교차로 대기시간을 산정하기 위한 모형을 제시하였다. 본 모형을 통해 상류부 검지기에서 트램이 검지된 시간을 기준으로 트램이 교차로에 도착하였을 때의 신호운영 상태를 결정할 수 있으며, 트램 통행의 관점에서 신호시간 및 교차로 대기시간의 결정이 가능하다. 사례분석에서는 트램 우선신호의 원활한 구동을 목적으로 비우선현시가 충분한 여유녹색시간을 제공할 수 있는 경우와 일반적인 버스 우선신호에서와 유사한 경우로 10초 수준의 여유녹색시간으로 구분하여 트램 검지 시각별 신호시간의 산정결과와 트램 교차로 대기시간을 산정하였다. 120초 주기길이에 비우선현시의 여유녹색시간이 44초인 경우 교차로 대기시간은 평균 12.7초 수준을 나타내었으며, 이와 반대로 여유녹색시간이 10초 수준인 경우 우선현시의 연장 및 조기시작의 범위가 감소함에 따라 트램의 대기시간은 평균 29.4초까지 증가하는 결과를 나타내어 우선신호 운영상태에 따른 트램 통행의 관점에서 해석적 방법의 분석이 가능함을 확인하였다.

본 연구는 우선신호의 구동 프로세스를 트램 관점에서 해석하고, 트램의 교차로 대기시간에 대한 분석 및 평가가 가능한 해석적 모형을 제시하였다는데 의의가 있다. 하지만 국내에서는 트램 도입을 위해 시스템 개발이 이뤄지고 있는 단계로 실제 트램 운영 도로를 대상으로 하는 적용성 검증에서는 한계가 있으며, 향후 트램 도입 시 대상 도로의 기하구조, 트램의 통행속도, 주기 길이, 보행신호 길이, 검지기 위치 등을 고려한 민감도 분석 등을 통해 모형의 수정 보완이 요구된다. 또한 미시적 시뮬

레이션 모형과 API 도구를 이용한 효과평가를 수행함으로써 미시적 분석결과와의 비교평가가 필요하며, 능동적 우선신호 중 Early Green 및 Green Extension과 함께 세계적으로 가장 널리 적용 중에 있는 Phase Insertion에 대해 해석이 가능하도록 모형의 보완이 요구된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Rail Technology Development Program(13RTRP-B067379-01) funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

## REFERENCES

- Chada S., Newland R. (2002), Effectiveness of Bus Signal Priority, Final Report, National Center for Transit Research, University of South Florida, Florida.
- Currie G., Shalaby A. (2008), Active Transit Signal Priority for Street Cars - Experience in Melbourne, Australia and Toronto, Canada, TRR, 2042, TRB, 41-49.
- Evans H., Skiles G. (1970), Improving Public Transit Through Bus Preemption of Traffic Signals, Traffic Quarterly, 24(4), 531-543.
- Gardner K., D'Souza C., Hounsell N., Shrestha B., Bretherton D. (2009), Review of Bus Priority at Traffic Signals Around the World, Transportation Research Group, University of Southampton, UK.
- Garrow M., Machemehl R. (1998), Development and Evaluation of Transit Signal Priority Strategies, Presented at 77th Annual Meeting of the TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Hong K. S., Jeong J. H., An K. H., Lee Y. I. (2011), A Study on the Active Transit Signal Priority Control Algorithm based on Bus Demand using UTIS, J. Korean Soc. Transp., 29(6), Korean Society of Transportation, 107-116.
- Jeong Y. J. (2011), Traffic Signal Control Strategy for Tram Priority In Arterial, Ph.D. Dissertation, University of Seoul, Korea.

- Jeong Y. J., Kim Y. C. (2010), Study on the Optimal Detector Location for the Active Bus Signal Priority of the Median Bus Lane, Presented at 2010 ITS World Congress, Korea.
- Jeong Y. J., Kim Y. C. (2013), Optimal Signal Timing for Active Tram Signal Priority, Presented at 2013 Civil EXPO & Conference of KSCE, Korea.
- Jeong Y. J., Kim Y. C., Kim D. H. (2011), Traffic Signal Control Strategy for Passive Tram Signal Priority on City Arterial, Journal of Korea Institute of ITS, 10(1), Korea Institute of ITS, 27-41.
- Khasnabis S., Reddy G. V., Hoda S. K. (1993), Evaluation of the Operating Cost Consequences of Signal Preemption as an IVHS Strategy, TRR, 1390, TRB, 3-9.
- Kim W. H. (2004), Improved Transit Signal Priority System for Networks with Nearside Bus Stops, Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, Texas.
- Kim Y. C. (2007), Development of Signal Control Algorithm Using Travel Time, University of Seoul, Korea.
- Levinson H., Zimmerman S., Clinger J. (2003), Bus Rapid Transit Volume 1: Case Studies in Bus Rapid Transit, TCRP Report 90, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Li Y., Koonce P., Li M., Zhou K. (2008), Transit Signal Priority Research Tools, California DOT, Available at: <[www.dot.ca.gov/research/researchreports/reports/2008/tsp\\_research\\_tools\\_final\\_report.pdf](http://www.dot.ca.gov/research/researchreports/reports/2008/tsp_research_tools_final_report.pdf)>[Accessed 10 Mar 2010].
- Liu H., Jie Z., Dingxin C. (2008), Analytical Approach to Evaluating Transit Signal Priority, Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 8(2), 48-57.
- Rephlo J., Haas R. (2006), Sacramento-Watt Avenue Transit Priority and Mobility Enhancement Demonstration Project Phase III Evaluation Report, FHWA, U.S. DOT, Washington, D.C., 5-6.
- Skabardonis A. (2000), Control Strategies for Transit Priority, TRR, 1727, TRB, 20-26.
- Smith H. R., Hemily B., Ivanovic M. (2005), Transit Signal Priority(TSP): A Planning and Implementation Handbook, ITS America, Washington, D.C.
- Wattleworth J. A., Courage K. G., Wallace C. E. (1997), Evaluation of some bus priority strategies on NW 7th Avenue in Miami, TRR, 626, TRB, 32-35.
- Wilbur E. J. (1976), The Green back Experiment - Signal Preemption for Express Buses : A Demonstration Project Report DMT-014, Sacramento County, California.
- 알림 : 본 논문은 한국ITS학회의 2014년 춘계학술대회 (2014.5.9)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.
- ☞ 주 작성자 : 정영제
  - ☞ 교신저자 : 정영제
  - ☞ 논문투고일 : 2014. 4. 22
  - ☞ 논문심사일 : 2014. 5. 21 (1차)  
2014. 6. 24 (2차)
  - ☞ 심사판정일 : 2014. 6. 24
  - ☞ 반론접수기한 : 2014. 12. 31
  - ☞ 3인 익명 심사필
  - ☞ 1인 abstract 교정필