

## 충격파 이론을 이용한 대중교통 우선신호의 신호시간 산정모형

박상섭\* · 조혜림\*\* · 김영찬\*\*\* · 정영제\*\*\*\*

Park, Sang Sup\*, Cho, Hye Rim\*\*, Kim, Youngchan\*\*\*, Jeong, Youngje\*\*\*\*

### Signal Timing Calculation Model of Transit Signal Priority using Shockwave Theory

#### ABSTRACT

This research suggested the traffic signal calculation model of active transit signal priority using a shockwave model. Using this signal priority timing optimization model, the shockwave area is computed under the condition of Early Green and Green Extension among active transit signal priority techniques. This study suggested the speed estimation method of backward shockwave using average travel time and intersection passing time. A shockwave area change is calculated according to signal timing change of transit signal priority. Moreover, this signal timing calculation model could determine the optimal signal priority timings to minimize intersection delay of general vehicles. A micro simulation analysis using VISSIM and its user application model ComInterface was applied. This study checked that this model could calculate the signal timings to minimize intersection delay considering saturation condition of traffic flow. In case studies using an isolated intersection, this study checked that this model could improve general vehicle delay of more over ten percentage as compared with equality reduction strategy of non-priority phases. Recently, transit priority facilities are spreading such as tram, BRT and median bus lane in Korea. This research has an important significance in that the proposed priority model is a new methodology that improve operation efficiency of signal intersection.

**Key words :** Transit, Active signal priority, Early green, Green extension, Optimal signal timing

#### 초 록

본 연구에서는 충격파 모형을 이용하여 능동식 우선신호의 최적 신호시간을 산정하기 위한 모형을 제시하였다. 본 신호 최적화 모형을 이용하여 능동형 우선신호 기법 중 Early green 및 Green extension이 적용되는 조건에서 충격파 면적을 산정할 수 있다. 본 연구에서는 평균통행시간 및 교차로 진출시각을 이용해 충격파의 발생 속도를 산정하기 위한 방법을 제시하였으며, 이를 이용해 우선신호로 인한 현시 변화량에 따라 충격파 면적 변화량을 산정할 수 있다. 또한 교차로 전체의 충격파 면적이 최소화되는 신호시간을 산정하여 우선신호로 인해 증가하는 일반차량의 지체를 최소화할 수 있도록 하였다. 우선신호 신호시간 산정 모형의 효과평가를 위해 VISSIM과 ComInterface를 이용한 미시적 시뮬레이션 분석을 시행하였으며, 이동류의 포화상태를 고려하여 지체 최소화를 위한 신호시간이 산정됨을 확인하였다. 독립교차로를 대상으로 하는 사례분석에서 우선신호를 위해 비우선현시를 균일하게 단축하는 전략 대비 본 모형에서 일반차량 지체가 10% 이상 개선됨을 확인하였다. 본 연구는 트램, BRT, 중앙버스 전용차로 등 대중교통 우선시설이 확산되고 있는 최근 국내 상황에서 신호교차로의 운영효율을 높이기 위한 새로운 우선신호 제어 방법을 제시하였는데 의의가 있겠다.

**검색어 :** 대중교통, 능동식 우선신호, Early green, Green extension, 최적 신호시간

\* 서울시립대학교 교통공학과 박사과정 (University of Seoul · sspark5540@naver.com)

\*\* 서울특별시 교통정책과 박사 (Seoul Metropolitan Government · hrcho@seoul.go.kr)

\*\*\* 정회원 · 서울시립대학교 교통공학과 교수 (University of Seoul · yckimm@uos.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 도로교통공단 교통과학연구원 박사 (Corresponding Author · Road Traffic Authority · sleep108@koroad.or.kr)

Received January 21, 2015/ revised February 26, 2015/ accepted June 15, 2015

## 1. 서론

Signal preemption 또는 Signal priority는 신호교차로에서 대중교통, 궤도차량, 응급차량 등을 우선처리하기 위한 신호운영방법을 의미한다. Signal preemption 또는 Priority 전략들은 1960년대 유럽에서 최초로 적용되기 시작하였으며, 미국은 로스앤젤레스에서 1970년대부터 운용되었다(Evans and Skiles, 1970; Khasnabis et al., 1993). 이때는 우선처리 대상의 교차로 통과에만 집중하는 Preemption의 형태가 주류였으며(Wilbur, 1976; Wattleworth et al., 1977), Signal priority와 같이 일반차량들의 소통상태를 고려하는 전략들은 실시간 신호제어와 우선신호를 결합하고자 했던 90년대 연구들이 주류를 이루고 있다. 이들 연구는 Priority로 인해 추가되는 일반차량의 지체를 실시간 신호제어로 최소화 시키는데 목적이 있다. 국내에서는 DSRC(Dedicated Short Range Communication)와 같은 무선통신기술을 이용하는 Signal priority 전략 개발이 이뤄진바 있으며(Kim, 2006), 최근 경찰청 도시교통정보시스템(UTIS)의 무선통신체계를 이용한 버스의 Signal priority를 위한 시스템이 제시된바 있다(Hong et al., 2012).

국내에서는 Signal preemption 및 Priority의 적용이 활발하지 않아 우선신호로 통칭되고 있으며, 본 연구에서는 Table 1과 같이 Preemption을 우대신호, Priority를 우선신호로 한글용어를 정립하여 사용하였다.

우선신호는 차량검지, 우선신호 요청, 우선신호 허용, 우선신호 기법 구동의 프로세스로 진행되며(Jeong, 2011), 대중교통이 신호교차로에서 최소의 지체를 경험하거나, 또는 무정차 통과 시키기 위한 신호시간이 적용된다. 이때 우선신호 기법으로는 현시를 조기에 시작하는 Early green과 현시를 연장하는 Green extension, 현시를 삽입하는 Phase Insertion이 세계적으로 가장 널리 적용되고 있다(Skabardonis, 2000; Smith et al., 2005; Gardner et al., 2009; Jeong, 2011).

우선신호 적용 시 대중교통은 통행시간 단축 효과가 발생하나, 일반차량은 적색시간 증가로 지체가 증가한다. 우선신호에서 일반

차량과 대중교통의 신호운영 효율성은 상충관계에 있다. 대중교통에 보다 많은 우선신호가 부여됨에 따라 일반차량의 신호시간은 감소하며, 일반차량의 지체는 증가하게 된다. 이때 가장 일반적인 우선신호 전략인 Early green, Green extension을 기준으로 우선신호 길이의 결정 특성은 다음과 같이 요약된다. 첫째, 우선신호 시간길이는 경험적인 수치로 10초 내외의 길이로 적용되고 있다. 40년 이상 우선신호를 운영해온 유럽과 북미에서는 과도한 일반차량의 지체 증가를 방지하고, 대중교통의 명확한 지체 개선을 위해 10초 내외의 우선신호 시간을 적용하고 있다(Garrow and Machemehl, 1998; Levinson et al., 2003; Chada and Newland, 2002). 둘째, 우선신호 길이는 검지기 위치와 관련이 있다. 우선신호에서 대중교통 검지를 위해 정지선으로 부터 100~150m 상류에 검지기를 설치하며, 우선신호 구동을 위한 여유시간을 확보하는데 목적이 있다(Jeong, 2011). 검지기에서 정지선까지 40kph 속도인 경우 약 10초 내외의 우선신호 시간이 요구된다.

우선신호 길이를 길게 확보하는 경우 대중교통의 소통증진 효과는 우수하나, 승용차의 지체 증가 및 보행자 신호 확보에 있어 문제가 발생하게 된다. 또한 우선신호가 과도하게 짧은 경우 대중교통의 실질적인 지체 감소 효과는 기대하기 어렵다. 따라서 우선신호를 위한 최적 시간길이를 결정하는 과정이 요구되며, 본 연구에서는 우선신호 전략 중 Early green 및 Green extension이 적용되는 상황에서 일반차량의 지체 증가를 최소화하기 위한 신호시간의 결정방법을 제시하였다. 일반차량을 대중교통 현시와 동일한 이동 방향의 우선현시와 대중교통 현시와 상충되는 비우선현시로 구분하였으며, 우선현시와 비우선현시의 충격과 면적이 최소화되기 위한 우선신호의 신호시간을 결정하여 교차로 지체를 최소화하는 신호 최적화 모형을 수립하였다.

## 2. 우선신호의 신호시간 산정과 관련한 선행연구

능동식 우선신호에는 Early green, Green extension, Phase insertion이 세계적으로 가장 널리 적용되고 있다. Early green은

Table 1. Definition of Transit Signal Priority Terms

Technique	Definition (Source: US TSP Handbook)	Korean Term
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

Fig. 1과 같이 대중교통이 적색시간 동안에 도착하였을 때, 현시를 정상상태 보다 일찍 시작하여 대중교통이 교차로를 보다 빨리 통과시키기 위한 전략이다. Green extension은 대중교통이 녹색시간 동안에 검지되었으나, 녹색 종료 전 까지 교차로를 통과하지 못하는 경우 현시를 연장하여 대중교통이 교차로를 정차없이 통과하도록 하는 전략이다. Phase insertion는 Early green과 유사하며, 비우선 현시들 사이에 우선신호를 삽입하는 경우에 해당한다. Green extension 기법은 Early green 대비 지체감소 효과가 우수하나 발생가능 시간대가 Early green 대비 짧아 발생빈도는 상대적으로 낮다(Smith et al., 2005; Jeong, 2011).

능동식 우선신호는 일반적으로 차량검지 및 위치확인, 우선신호 요청 및 허용여부 결정, 우선신호의 적용 과정을 거치게 된다(Li et al., 2008; Jeong, 2011). 이때 우선신호의 허용여부를 결정하는 방법에 따라 모든 대중교통에 우선신호를 제공하는 Full priority와 지체된 차량만을 대상으로 하는 Conditional priority, Queue jump와 같은 대중교통 우선시설과 결합된 Integrated priority로 구분할 수 있다(Gardner et al., 2009).

우선신호에서 적용기법의 종류, 우선신호 적용 프로세스와 함께 우선신호의 길이는 우선신호의 효율성을 결정하는 중요한 요소이

다. 우선현시의 시간길이는 Green extension과 Early green이 적용될 때 비우선현시로 부터 가져오는 녹색시간의 크기를 의미한다. 비우선현시의 지체를 고려하여 최대 시간길이를 지정하며, 일반적으로 Table 2와 같이 10초 내외의 시간이 적용된다. 실제 적용사례로서 Melbourne의 SCATS에서는 우선신호로 주기길이의 최대 20%를 비우선현시의 포화상태에 따라서 선택적으로 적용하며, Tronoto에서는 중요교차로는 최대 30초, 비중요교차로는 최대 16초의 우선현시 길이를 적용하고 있다(Chada and Newland, 2002; Rephlo and Haas, 2006; Currie and Shalaby, 2008). 우선신호의 크기를 결정하는 과정에서 최대 크기를 지정하여 과도한 우선신호로 일반차량의 지나친 지체 증가를 예방하고 있다. 또한 실시간 신호제어시스템과 우선신호를 통합하여 우선신호 제공 이후 비우선현시를 위한 신호최적화를 수행함으로써 일반차량 관점에서 우선신호를 위한 최적 신호시간을 결정하고 있다(Dion and Ghanim, 2007; Gardner et al., 2009).

본 연구에서는 일반차량의 지체 증가를 최소화하는 우선신호 시간결정 방법으로 충격과 모형을 이용하여 충격과 면적의 증가량을 최소화하는 우선신호 신호시간 산정방법을 제시하였다.

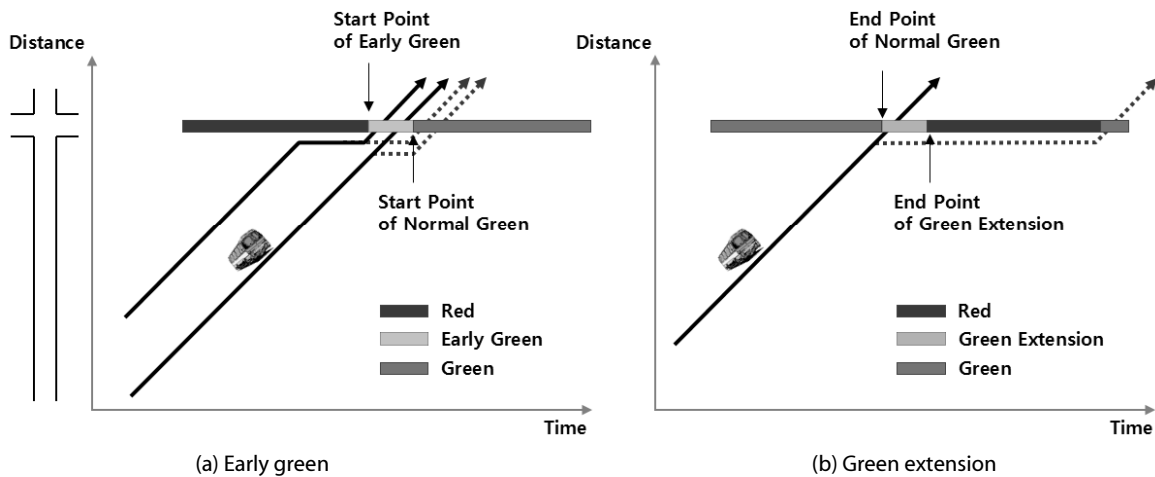


Fig. 1. Early Green and Green Extension Strategies(Source: Kim, 2004; Jeong, 2011)

Table 2. Application and Research Examples of Priority Phase

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

### 3. 신호시간 산정 모형을 위한 우선신호 구동 환경

본 연구에서는 능동식 우선신호 중 Early green 및 Green extension이 적용되는 상황에서 교차로의 지체 최소화를 위한 우선 신호 신호시간 산정 모형을 제시하였으며, 본 모형은 Fig. 2(a)와 같이 대중교통 중앙전용차로가 설치되어 있는 전형적인 간선도로 4지교차로를 대상으로 하였다. 대중교통은 버스 또는 트램에 해당하며, 중앙전용차로를 주행하여 일반차량 대기행렬의 영향은 배제하였다. 교차로 진출입부에서 UTIS(Urban Transportation Information System), DSRC(Dedicated Short Range Communication)와 같이 무선통신 방식으로 일반차량 ID 및 통과시각을 수집할 수 있는 검지체계를 설치하여 우선신호 구동을 위한 대중교통 접근여부를 확인하고, 일반차량의 충격파 면적 산정을 위한 구간통행시간을 수집할 수 있도록 하였다. 대중교통을 위한 검지체계는 교차로 진출부와 교차로 상류부 150m 전방에 설치하였으며, 일반차량을 위한 검지체계는 비포화 상태의 대기행렬을 포함하는 통행시간을 수집하기 위해 교차로 상류부 500m에 설치하였다.

신호시간 산정모형을 위한 신호현시는 Fig. 2(b)에서와 같이 직진과 좌회전으로 구성되는 4현시 체계로 구성하였다. 이때 대중 교통 현시에 해당하는 1현시를 우선현시(Priority phase)로 하였으며, 2-4현시에 해당하는 주방향 좌회전 및 부방향 현시를 비우선현시(Non-priority phase)로 설정하였다. 비우선현시의 여유녹색시간(Variable green)들을 우선현시의 조기시작 및 연장을 위한 우선 신호 시간으로 사용하였다.

본 연구에서 우선신호를 위한 신호시간 산정을 위해 Fig. 3과 같이 비포화 조건의 충격파 모형을 이용하며, 일반차량의 충격파 면적 산정을 위해 평균 지체  $d$ 와 교차로의 평균 진출부 검지시각  $p$ 로부터 대기행렬 발생 충격파의 속도  $u$ 를 산정한다. 대기행렬 해소 충격파의 속도  $w$ 를 포화교통류율과 동일 의미에서 상수로 적용하며, 적색시간  $r$ , 자유속도  $u_f$ 를 이용하여 평균 지체와 평균 교차로 진출시각으로부터 Eq. (1)과 같이 충격파 속도  $u$ 를 산정한다.

$$u = [u_f (\frac{u_f p - wr}{u_f - w} - p)] / [\frac{u_f p - wr}{u_f - w} - d]; \tag{1}$$

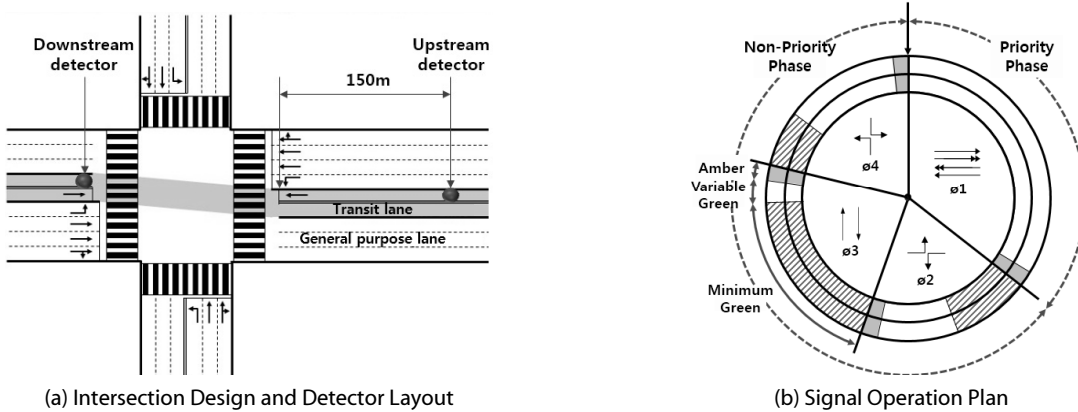


Fig. 2. Operation Condition of Signal Intersection

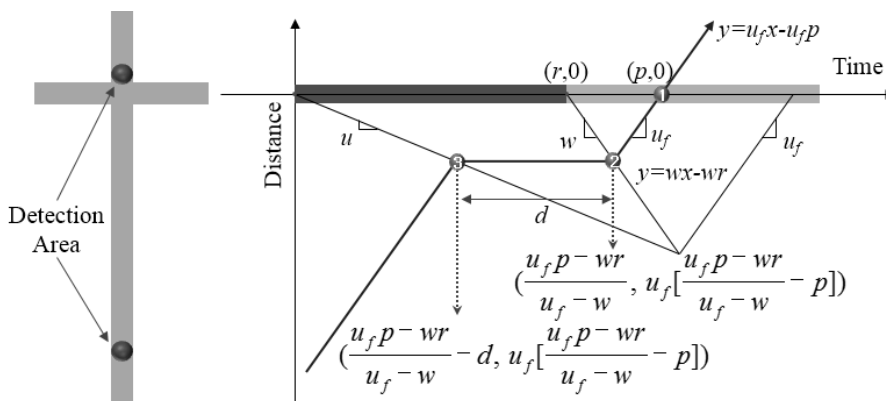


Fig. 3. Shock Wave Area Calculation using Average Delay and Detection Time

#### 4. 충격파모형을 이용한 최적 신호시간의 산정

능동식 우선신호에서 현시체계는 대중교통 현시와 동일하게 처리되는 우선현시와 우선현시 이의 현시들을 의미하는 비우선현시로 구분된다. 일반적으로 대중교통 신호와 함께 서비스되는 일반 차량 직진신호가 우선현시에 해당하며, 이의 주방향 좌회전 및 부방향 현시들이 비우선현시이다. Early green 및 Green extension 과 같은 능동식 우선신호가 적용되는 과정에서 대중교통 신호가 조기시작 또는 연장됨에 따라 일반차량 우선현시 또한 함께 변경되며, 증가된 우선현시와 동일한 크기로 비우선현시의 녹색시간이 감소한다. 비포화 상태에서 비우선현시는 Fig. 4(a)와 같이 녹색신호가 감소하여 충격파의 면적은 증가한다. 또한 우선현시는 Fig. 4(b)와 같이 녹색시간이 증가하여 충격파의 면적은 감소한다. 이때 비포화 상태에서의 충격파 면적은 교통류의 상태에 따라 Eqs. (2) and (3)과 같이 적색시간  $r$ , 대기행렬 발생 충격파의 속도  $u$ , 대기행렬 해소 충격파의 속도  $w$ , 자유속도  $u_f$ 를 이용해 산정된다.

$$Area B = \frac{1}{2} r^2 \frac{wu}{w-u}; \tag{2}$$

$$Area C = \frac{1}{2} w \left( \frac{ru}{w-u} \right)^2 \left( \frac{w}{u_f} + 1 \right); \tag{3}$$

Early green 및 Green extension과 같이 우선신호 제공을 위해  $t$  크기의 녹색시간 감소 또는 증가가 발생하는 경우 충격파 면적의 변화가 나타나며, 우선현시는 면적 감소, 비우선현시는 면적 증가가 발생한다. 기존 충격파 면적과 우선현시  $t$  적용 이후 산정되는 충격파 면적 간의 차이를 이용해 충격파의 면적 변화량을 산정할 수 있으며, 교통류의 상태에 따라 Eqs. (4) and (5)와 같이 우선현시의 시간길이  $t$ 를 이용해 표현할 수 있다.

$$\Delta Area B(t) = t \left( r + \frac{1}{2} t \right) \frac{wu}{w-u}; \tag{4}$$

$$\Delta Area C(t) = wt \left( r + \frac{1}{2} t \right) \left( \frac{u}{w-u} \right)^2 \left( \frac{w}{u_f} + 1 \right); \tag{5}$$

충격파 면적의 증가량과 감소량을 합산하여 교차로의 지체 최소화를 위해 충격파 면적을 최소화시키는 신호시간을 최적 우선신호 시간길이라고 적용하였다. Eq. (6)과 같이 현시  $i$ 의 최적 신호시간 증감량  $t_i$ 를 탐색하며, 이때 Eq. (7)과 같이 전체 이동류  $n$ 에 대해 현시  $i$ 의 충격파 면적  $SW_i$ 를 최소화하게 된다. 현시  $i$ 의 충격파 면적  $TA_i$ 는 Eq. (9)와 같이 Fig. 4에서 영역 B, C 면적을 의미하는  $Area B_i$ 와  $Area C_i$ 를 합산하여 산정한다. 이때  $DA_i(t_i)$ 는 Eq. (10)과 같이 우선신호  $t_i$  부여되어 현시  $i$ 에서 발생한 충격파 면적 변화량  $Area B_i(t_i)$ 와  $Area C_i(t_i)$ 를 합산하여 산정한다. 현시  $i$ 에서 우선신호 적용으로 변경된 충격파 면적  $SW_i$ 는 기존 충격파 면적  $TA_i$ 에 충격파 면적 변화량  $DA_i(t_i)$ 을 합산하여 Eq. (8)과 같이 산정한다. 이때 녹색시간 변화는 Eq. (11)과 같이 최대 녹색시간 변화량  $max t_i$  범위에서 이루어지며, 녹색시간  $g_i$ 는 Eq. (12)와 같이 최소녹색시간  $min g_i$ 을 유지해야 한다.

$$Find t_i \tag{6}$$

$$Min z = \sum_{i=1}^n SW_i; i = 1, \dots, n; \tag{7}$$

$$SW_i = TA_i + DA_i(t_i); i = 1, \dots, n; \tag{8}$$

$$TA_i = Area B_i + Area C_i; i = 1, \dots, n \tag{9}$$

$$DA_i(t_i) = Area B_i(t_i) + Area C_i(t_i); i = 1, \dots, n \tag{10}$$

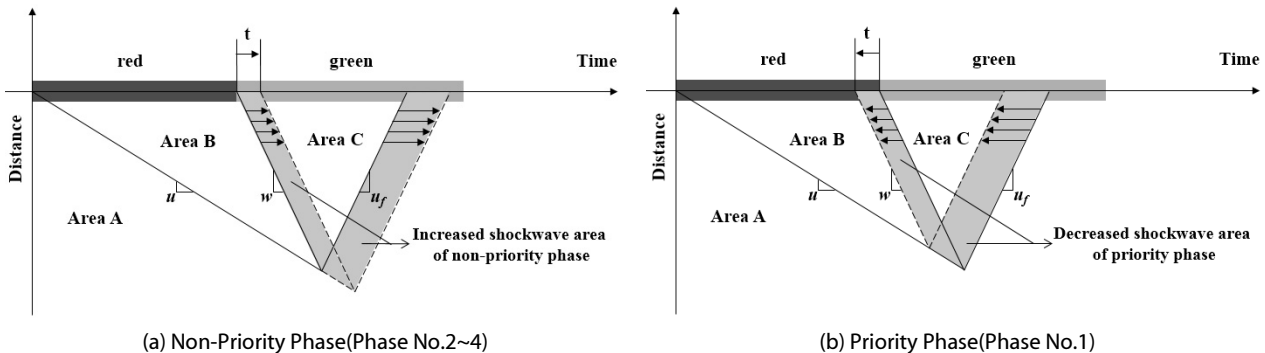


Fig. 4. Shock Wave Area According to Signal Priority

$$t_i \leq \max t_i; i = 1, \dots, n \quad (11)$$

$$g_i - t_i \geq \min g_i; i = 1, \dots, n \quad (12)$$

### 5. 시뮬레이션 효과분석

본 연구에서는 교차로 지체를 최소화하는 대중교통 우선신호를 위해 충격과의 면적을 최소화하는 우선신호 시간 결정방법을 제시하였으며, VISSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행하여 우선신호 신호시간 산정모형의 효과분석을 시행하였다. 사례분석 대상교차로는 Fig. 2에서의 동일한 조건으로 간선도로에 1차로의 중앙버스 전용차로가 설치되어 있는 환경을 Fig. 5와 같이 적용하였다. 또한 일반차로는 4차로의 동서측 접근로를 주방향으로 하며, 3차로의 남북측 접근로를 부방향으로 한다. 검지체계는 일반차량의 통행시간 및 교차로 진출사각 검지를 위해 교차로 진출부와 정지선으로부터 500m 상류 지점에 일반차량 ID 및 통과사각의 수집이 가능한 검지기를 설치하였으며, 우선신호의 요청 및 구동을 위한 버스 검지를 위해 정지선에서부터 150m 상류 지점에 버스 전용 검지기를 설치하였다.

시뮬레이션 사례분석을 위한 신호운영은 후행좌회전(lag-lag left turn phase)를 적용하였으며, Table 3과 같이 4현시 모두 25초에 최소녹색시간을 10초로 적용하여 우선신호를 위한 여유녹색시간은 12초에 해당한다. 또한 분석대상 교차로의 포화도를 Table 4와 같이 3개의 시나리오로 구분하여 분석하였다. S1은 전체 접근로가 0.5의 동일한 포화도에 해당한다. 또한 S2는 주방향이 0.7, 부방향이 0.4로 주방향이 상대적으로 높은 포화도의 조건이며, S3는 S2와 반대의 경우로 부방향이 0.7의 높은 포화도 상황에

Table 3. Signal Timing for Case Study

Signal Timing	Phase No.			
	1	2	3	4
Split	25 sec	25 sec	25 sec	25 sec
Minimum Green	10 sec	10 sec	10 sec	10 sec
Variable Green	12 sec	12 sec	12 sec	12 sec
Amber	3 sec	3 sec	3 sec	3 sec

Table 4. Traffic Flow Condition for Case Study

Scenario	Phase No.			
	1	2	3	4
S1	X=0.5	X=0.5	X=0.5	X=0.5
S2	X=0.7	X=0.7	X=0.4	X=0.4
S3	X=0.4	X=0.4	X=0.7	X=0.7

해당한다. 이때 버스의 차두간격은 5분으로 시간당 12대를 투입하였다. 우선신호 기법은 Early green과 Green extension을 적용하여 버스 검지 시 1현시에 해당하는 우선현시가 조기시작 및 연장이 이뤄질 수 있도록 하였다. 이때 우선신호 프로세스의 구현은 VISSIM과 Visual Basic을 기반으로 VISSIM의 API에 해당하는 ComInterface를 적용하였다.

본 연구에서 제안하는 충격과 면적 최소화 전략의 교차로 지체 감소 효과를 확인하기 위해 분석 대안을 우선신호 미적용, 우선신호를 위해 비우선현시의 신호시간을 균등하게 감소시키는 방식, 본 연구에서 제시하는 충격과 면적 최소화 방식으로 구분하여 분석하였다. 여기에서 우선신호 균등 분할 방식은 우선신호를 위해 비우선현시에 적용되는 녹색시간 감소량  $t_i$ 를 전체 비우선현시에 균등하게 배분하는 것이며( $t_2 = t_3 = t_4$ ), 이동류별 포화도 등 교통상황을

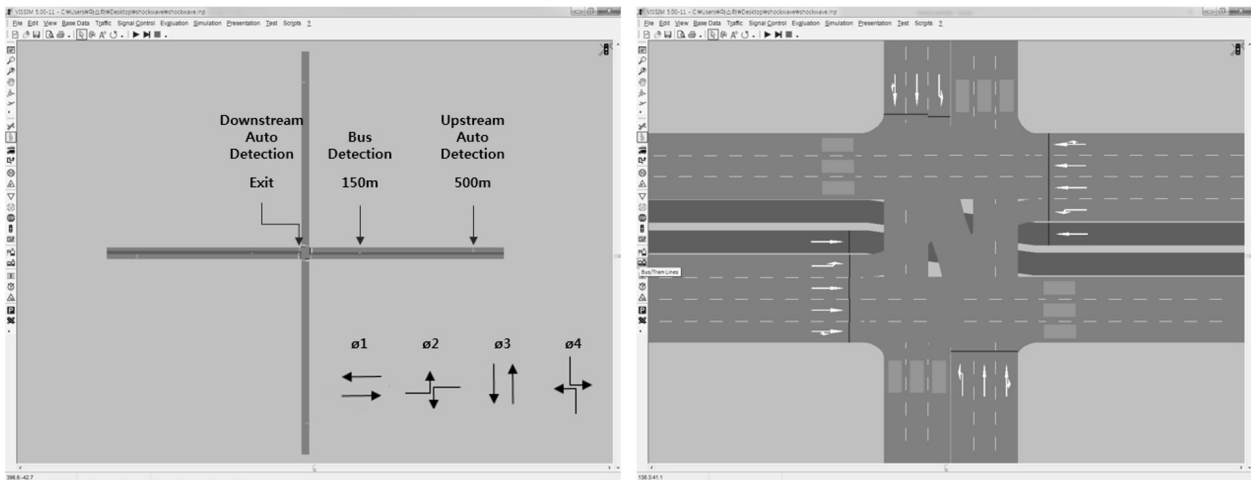


Fig. 5. Simulation Condition for Case Study

반영하지 않는 우선신호 구동 방식에 해당한다.

- ① ALT1 - 우선신호 미적용
- ② ALT2 - 우선신호 균등 분할 방식
- ③ ALT3 - 충격과 면적 최소화 방식

분석대상 교차로에 대해 평균 충격과 발생 속도를 적용하여 주기길이 동안 매초마다 버스가 검지되는 상황에서 우선신호 구동에 따른 신호시간 변화를 Fig. 6과 같이 분석하였다. 이때 우선신호를 위한 시간은 최대 30초 까지 적용하였으며, 매시각 버스가 검지되었을 때 충격과 면적 최소화를 위한 시간을 적용하였다. S1에서는 전체 접근로가 0.5의 동일한 포화도를 유지하는 상황에 해당하며, Fig. 6(a)에서와 같이 비우선현시에 해당하는 2, 3, 4현시 신호시간이 동일한 비율로 감소하는 조건에 해당한다. 150m 전방에서 버스가 검지되고, 버스 직진 현시가 9초 이후부터 우선신호 미적용시 교차로를 통과할 수 없는 조건에 해당하여 최대 14초의 Green extension이 적용된다. 1현시가 황색으로 변경된 23초 이후부터 버스가 검지되는 경우 최대 30초에 해당하는

Early green이 적용되며, S1에서는 비우선현시의 포화도가 동일한 상황으로 충격과 면적 최소화를 위해 동일 비율로 신호시간 감소가 이뤄진다. S2에서는 주방향에 해당하는 1, 2현시가 포화도 0.7, 부방향에 해당하는 3, 4현시가 포화도 0.4로 주방향이 상대적으로 높은 포화도 조건에 해당하며, Fig. 6(b)와 같이 부방향 위주의 신호시간 감소가 발생하였다.

S3에서는 S2와 반대의 경우로 부방향이 포화도 0.7로 주방향 대비 상대적으로 높은 포화도를 나타내는 경우에 해당하며, Fig. 6(c)와 같이 우선신호 제공을 위해 주방향 위주의 신호시간 단축이 발생하였다.

우선신호 구동에 따른 지체 변화를 Fig. 7 및 Table 5와 같이 분석하였으며, 승용차와 버스의 지체를 구분하여 충격과 면적 최소화 전략에 따른 지체 변화를 확인하였다. 이때 우선신호 미적용의 ALT1, 신호시간 균등 감소 전략의 ALT2, 충격과 면적 최소화의 ALT3으로 구분하여 분석을 수행하였다. 전체 접근로가 동일한 포화도의 S1에서 Fig. 7(a)와 같이 승용차의 차량당 평균 지체는 ALT1이 34.8초, ALT2가 53.4초, ALT3이 52.7초로 우선신호 적용에 따라 차량당 평균 18초 이상의 지체 증가가 발생하였으며,

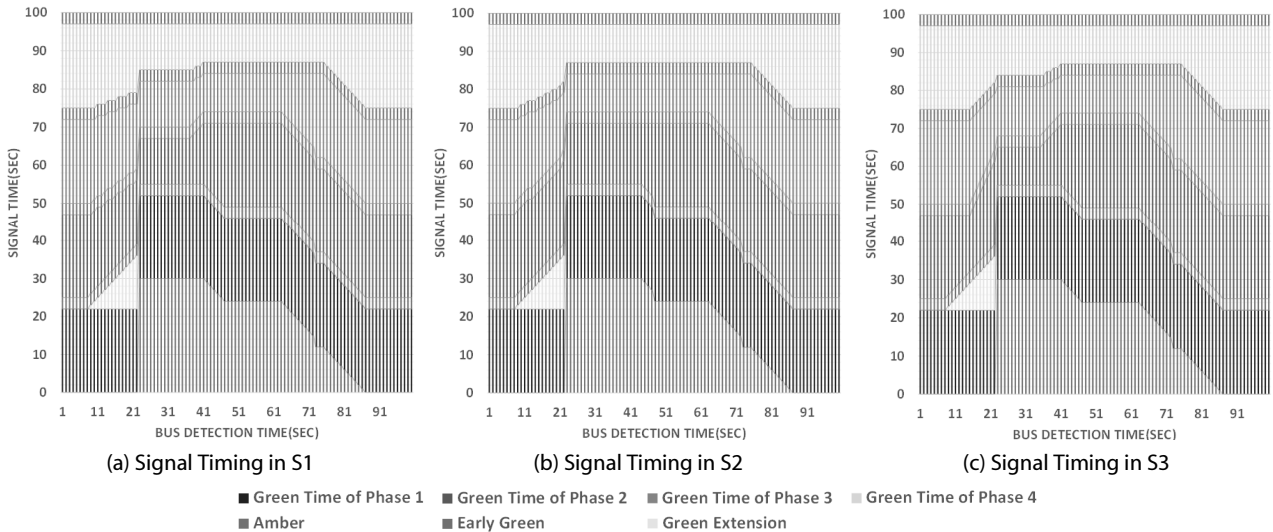


Fig. 6. Signal Timing Analysis According to Signal Priority

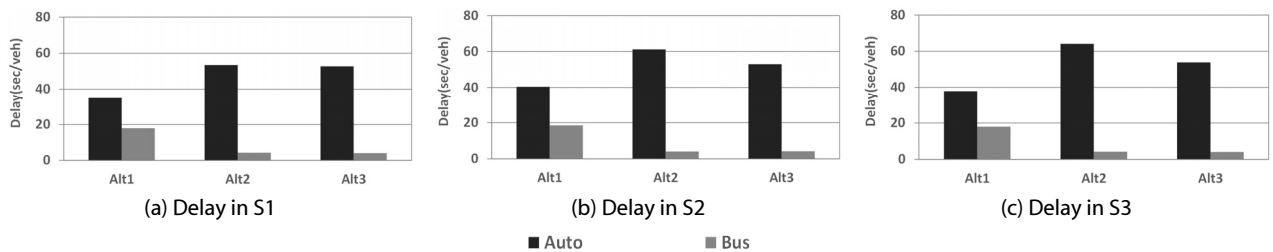


Fig. 7. Delay Analysis According to Signal Priority

Table 5. Delay Analysis Results

Scenario	S1				S2				S3			
	Vehicle delay (sec/veh)			Person delay (sec/per)	Vehicle delay (sec/veh)			Person delay (sec/per)	Vehicle delay (sec/veh)			Person delay (sec/per)
	Auto	Bus	Average		Auto	Bus	Average		Auto	Bus	Average	
ALT1	34.8	17.9	34.7	33.4	40.5	18.5	40.4	39.2	37.8	17.9	37.7	36.6
ALT2	53.4	4.2	53.0	49.3	61.2	4.1	60.9	57.8	64.1	4.2	63.7	60.6
ALT3	52.7	4.0	52.3	48.7	53.1	4.2	52.8	50.2	53.8	4.1	53.5	50.9

ALT2와 ALT3에서의 차이는 1초 미만의 수준을 나타내었다. 현시별 포화도가 동일한 조건으로 균등한 비율로 현시를 단축시키는 ALT2와 충격과 면적을 최소화하는 ALT3이 유사한 결과를 나타내었다. 이때 버스의 경우 차두간격 5분을 기준으로 우선신호 미적용시 차량당 평균 17.9초에서 ALT2 적용시 4.2초, ALT3 적용시 4.0초로 70% 이상의 지체 감소 효과를 나타내었다.

주방향의 1, 2현시에서 0.7의 상대적으로 높은 포화도를 나타내는 S2에서는 Fig. 7(b)와 같이 승용차의 차량당 평균 지체는 ALT1 40.5초, ALT2 61.2초, ALT3 53.1초로 충격과 면적을 최소화하는 전략의 적용으로 8초 이상의 지체 완화 효과를 확인하였다. 버스의 지체는 ALT1 18.5초, ALT2 4.1초, ALT3 4.2초로 S1과 유사한 경향을 나타내었다. 또한 S3에서도 Fig. 7(c)와 같이 승용차의 차량당 평균 지체가 ALT1 37.8초, ALT2 64.1초, ALT3 53.8초로 충격과 면적 최소화 전략의 적용으로 10초 이상의 승용차 지체 감소가 가능함을 확인하였다. 이때 버스의 차량당 평균 지체는 ALT1 17.9초, ALT2 4.2초, ALT3 4.1초로 S1, S2와 동일한 경향을 나타내었다. 또한 교통사업의 예비타당성분석에서 사용되는 차종별 재차인원을 적용하여 사람당 지체를 Table 5와 같이 분석하였으며, 수도권에 해당하는 차량당 재차인원으로 승용차 1.27인, 버스 12.95인을 적용하였다. 사람당 평균 지체가 S1에서는 ALT1 33.4초, ALT2 49.3초, ALT3 48.7초를 나타내었으며, S2에서는 ALT1 39.2초, ALT2 57.8초, ALT3 50.2초, S3에서는 ALT1 36.6초, ALT2 60.6초, ALT3 50.9초를 나타내었다. 방향별 포화도 차이가 있는 경우 충격과 면적 최소화 전략 적용 시 10% 이상의 추가적인 지체 개선이 가능함을 확인하였다. 본 분석결과를 통해 충격과 면적 최소화 전략을 이용하여 우선신호의 적용 과정에서 버스의 지체 변화에는 영향을 미치지 않으나, 승용차 지체 최소화를 수행하기 위한 우선신호 운영이 가능함을 확인하였다.

## 6. 결론

본 연구에서는 대중교통 우선신호에서 통행시간이 수집이 가능한 상황을 조건으로 하여 교차로의 지체 최소화를 위한 우선신호 운영방법을 제시하였다. 우선신호 기법 중 Early green과 Green

extension이 적용되는 상황에서 현시의 증가 또는 감소에 따른 충격과의 면적 변화량을 산정하기 위한 모형을 제시하였다.

우선신호의 제공과정에서 녹색신호가 증가하는 우선현시의 충격과 면적 감소량과 녹색신호가 감소하는 비우선현시의 충격과 면적 증가량을 합산하여 전체 이동류의 충격과 면적을 최소화하는 신호시간 산정방법을 제시하였다. 또한 충격과 면적 최소화를 위한 우선신호의 신호시간 결정방법에 대해 독립교차로를 대상으로 VISSIM을 이용한 시뮬레이션 사례분석을 시행하였다. 주방향과 부방향의 포화도 조건을 차등 적용한 분석에서 버스 지체에는 영향을 미치지 않으나, 충격과 면적 최소화에 의한 우선신호의 신호시간 적용으로 승용차 의 추가적인 지체 감소 효과를 확인하였다.

도로의 신규건설이 한계에 도달한 현재의 상황에서 중앙버스전용차로, BRT, 트랩 등 대중교통 우선정책이 확대되고 있으며, 이들 시설의 신호교차로 운영효율을 개선하기 위해 대중교통 우선신호가 요구된다. 이때 본 연구에서의 충격과 면적 최소화를 위한 우선신호 구동 프로세스는 우선신호의 효율성 제고를 위해 적용될 수 있으며, 승용차의 지체 증가를 보완하는 유용한 수단으로 적용이 가능할 것이다. 향후 연구사항으로는 우선신호와 실시간 신호제어 시스템의 통합을 고려할 필요가 있으며, 우선신호의 효율성 제고 방안에서 본 연구의 통행시간 기반의 우선신호 신호시간 결정 프로세스를 COSMOS와 같은 실시간 신호시스템에 적용하기 위한 연구가 요구된다. 또한 우선신호의 신호시간을 결정하는 과정에서 도로용량편람(HCM)과 같은 여타 신호최적화 방법론과의 추가적인 비교를 수행하여 보다 면밀한 모형의 성능검증이 필요하다.

## References

- Chada, S. and Newland, R. (2002). *Effectiveness of Bus Signal Priority*, NCTR-416-04, University of South Florida, Florida.
- Currie, G. and Shalaby, A. (2008). "Active transit signal priority for street cars - Experience in Melbourne, Australia and Toronto, Canada." *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, Vol. 2042, pp. 41-49.
- Dion, F. and Ghanim, M. (2007). "Impact of dwell time variability on transit signal priority performance at intersections with nearside bus stop." *Proc. of 86th TRB Annual Meeting*, Transport Research



- Board, Washington, D.C.
- Evans, H. and Skiles, G. (1970). "Improving public transit through bus preemption of traffic signals." *Traffic Quarterly*, Vol. 24, No. 4, pp. 531-543.
- Gardner, K., D'Souza, C., Hounsell, N., Shrestha, B. and Bretherton, D. (2009). *Review of Bus Priority at Traffic Signals around the World*, University of Southampton, UK.
- Garrow, M. and Machemehl, R. (1998). "Development and evaluation of transit signal priority strategies." *Proc. of 77th TRB Annual Meeting*, Transport Research Board, Washington, D.C.
- Hong, K. S., Jeong J. H., An K. H. and Lee Y. I. (2011). "A study on the active transit signal priority control algorithm based on bus demand using UTIS." *J. Korean Soc. Transp.*, Korean Society of Transportation, Vol. 29, No. 6, pp. 107-116.
- Jeong, Y. J. (2011). *Traffic Signal Control Strategy for Tram Priority in Arterial*, Ph.D. Dissertation, University of Seoul, Seoul, Korea.
- Jeong, Y. J., Jeong, J. H., Joo, D. H., Lee, H. W. and Heo, N. W. (2014). "Signal timing and intersection waiting time calculation model using analytical method for active tram signal priority." *J. Korean Soc. Transp.*, Korean Society of Transportation, Vol. 32, No. 4, pp. 410-420.
- Khasnabis, S., Reddy, G. V. and Hoda, S. K. (1993). "Evaluation of the operating cost consequences of signal preemption as an IVHS strategy." *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, Vol. 1390, pp. 3-9.
- Kim, Y. C. (2007). *Development of wireless interface signal control systems for dynamic and optimum management (WISDOM): Real-time Signal Control Algorithm based on Sectional Travel Time*, University of Seoul, Seoul, Korea (in Korea).
- Levinson, H. et al. (2003). *Bus rapid transit volume 1: Case Studies in Bus Rapid Transit*, Transit Cooperative Research Program Report 90, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Li, Y. et al. (2008). *Transit signal priority research tools*, California Partners for Advanced Transit and Highways, California.
- Rephlo, J. and Haas, R. (2006). *Sacramento-watt avenue transit priority and mobility enhancement demonstration project*, Phase III Evaluation Report, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., pp. 5-6.
- Skabardonis, A. (2000). "Control strategies for transit priority." *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, Vol. 1727, pp. 20-26.
- Smith, H. R., Hemily, B. and Ivanovic, M. (2005), *Transit signal priority(TSP): A Planning and Implementation Handbook*, ITS America, Washington, D.C.
- Wattleworth, J. A., Courage, K. G. and Wallace, C. E. (1977). "Evaluation of some bus priority strategies on NW 7th Avenue in Miami." *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, Vol. 626, pp.32-35.
- Wilbur, E. J. (1976). *The green back experiment - signal preemption for express buses : A Demonstration Project*, Report DMT-014, California Department of Transportation, California.