

중앙버스전용차로상에서 결정적 지체모형을 이용한 능동형 버스우선신호의 최적 신호시간 산출방안

Optimal Signal Times for Active Bus Signal Priority on Median Bus Lane Using Deterministic Delay Model

김 태 운*
(Tae-woon Kim)

정 영 제**
(Young-Je Jeong)

김 영 찬***
(Young-chan Kim)

요 약

버스우선신호는 도로상에서 버스에 물리적, 운영적 통행우선권을 부여하는 방법으로 신호 교차로에서 버스의 정시성 및 신속성, 서비스 개선을 통해 승객의 수송 효율과 도로 교통의 수송 용량을 높일 수 있는 대중교통 우선정책 기법이다. 본 연구에서는 결정적 지체모형의 하나인 HCM모형을 이용하여 중앙버스전용차로가 존재하는 독립교차로에서 능동형 버스우선신호 제공 방법론을 제시하였다. 능동형 버스우선신호의 기법 중 Early green과 Green extension 기법을 이용하여 버스가 이용하지 않는 비우선현시의 여유녹색시간을 버스가 이용하는 우선현시에 재분배 하었을 때 차량당 지체 및 사람당 지체가 어떻게 변화하는지에 대하여 분석하고 여유녹색시간의 민감도 분석을 통해 여유녹색시간이 정확한 값인지 알아보았다. 그 결과 교차로 전체의 차량당 지체는 다소 증가하고 사람당 지체는 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 민감도 분석결과 여유녹색시간의 변화가 30%미만일 경우 지체의 큰 차이는 없었으나 30%이상일 경우 버스우선신호의 효과가 떨어지는 것으로 분석 되었다.

핵심어 : 능동형 버스우선신호, 중앙버스전용차로, 사람당 지체, 차량당 지체, 결정적지체모형, HCM 지체모형

ABSTRACT

Bus signal priority is a name for various techniques to speed up bus public transport services at intersections with traffic signals. In this study propose methodology to optimize signal times for Early green, Green extension out of the active bus signal priority using deterministic delay model in isolated intersection on median bus lane. Fluctuation is found in the vehicle delay and person delay in the event that using this methodology redistributed to green time and checking slack green time is correct value by sensitivity analysis. As a result of the study, car delay is increased a little and person delay is decreased. As a result of slack green time sensitivity, delay is not much in it if variation of slack green time under 30%. But this methodology effectiveness is under claimed capacity if variation of slack green time over 30%.

Key words : bus signal priority, active priority, early green, green extension, deterministic delay model

* 주저자 및 교신저자 : 한국건설기술연구원 도로교통정보사업단 연구원

** 공저자 : 도로교통공단 연구원

*** 공저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

† 논문접수일 : 2013년 12월 10일

† 논문심사일 : 2014년 02월 04일

† 게재확정일 : 2014년 02월 05일

I. 서 론

우리나라는 승용차의 이용이 증가한 반면 도로의 공급은 부족하기 때문에 대중교통의 중요성이 대두되고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 지방자치단체를 중심으로 중앙버스전용차로, 버스우선신호와 같은 대중교통우선 정책을 시행중에 있다.

버스우선신호란 도로상에서 버스에 물리적, 운영적 통행우선권을 부여하는 방법으로 신호 교차로에서 버스의 정시성 및 신속성, 서비스 개선을 통해 승객의 수송 효율과 도로 교통의 수송 용량을 높일 수 있는 대중교통 우선정책 기법이다.[1] 국내에서는 서울시 및 경기도의 중앙버스전용차로와 Bus Rapid Transit(BRT) 등 버스우선처리를 위한 도로시설의 증가와 더불어 버스 서비스의 질을 향상시키기 위한 다양한 설계가 이루어지고 있다.[2]

본 연구에서는 결정적 지체모형을 이용하여 중앙버스전용차로가 존재하는 독립교차로에서 능동형 버스우선신호의 효과분석을 시행하였다. 버스우선신호가 적용되지 않는 현시의 녹색시간을 버스우선신호가 적용되는 현시에 재분배하는 최적 신호시간 산출 방법론을 제시하고 녹색시간을 재분배 하였을 때 차량당 지체 및 사람당 지체를 분석하였다. 또한 최적의 버스우선신호가 적용된 신호시간을 민감도 분석을 통해 검증하고자 한다.

원활한 연구의 진행을 위해 다음과 같은 내용적 범위 하에 연구를 진행하였다. 첫째, 교차로의 포화도는 비포화 상태만을 연구의 대상으로 선정하였다. 둘째, 분석대상의 구간은 동서 방향으로 중앙버스전용차로가 존재하는 독립교차로이다. 셋째, 중앙버스전용차로를 제외한 도로의 차종은 승용차로만 구성되어있다. 넷째, 능동형 버스우선신호의 기법 중 Early green과 Green extension을 연구의 대상으로 선정하였다.

II. 기존연구 고찰

1. 국내 사례

한명주(2006) 등은 교통상황에 대응하여 신호시

간을 결정하는 실시간신호제어시스템에서 대중교통, 특히 버스의 효율성을 높이는 버스우선신호 알고리즘을 정립하여 모의실험을 실시하였다. 그 결과 버스우선신호를 적용할 경우 버스가 포함된 이동류의 지체가 감소하고 버스통행시간의 감소하였다. 또한, 실시간신호제어시스템을 기반으로 버스우선신호를 적용할 경우 사람당 지체가 감소하는 것으로 나타났다.[3]

이주건(2006)은 능동형 버스우선신호의 Early green, Extended green, Actuated transit phase 기법을 선정하여 고양시 중앙로, 승전로를 대상으로 분석을 시행하였다. 분석결과 부방향의 영향을 최소화하여 우선신호를 적용 시 차로 전체의 사람당 지체는 감소하였다. 또한, 차두시간기반 제어전략은 특정노선의 이용자 통행시간 감소에 효율적이며, 무계약 우선신호 제어전략은 네트워크 지체에 큰 증가 없이 전체 노선버스의 통행시간이 감소하는 효과가 있었다.[4]

이호준(2012) 등은 버스 우선신호시스템의 도입시 발생하는 운영상 효과를 현장조사 자료를 기반으로 평가하여 제시하였다. 그 결과 승용차 속도는 6.5% 증가하였고, 버스는 10.5% 속도가 증가하는 것으로 나타났다.[5]

2. 국외 사례

Jesse Jacobson(1979) 등은 일방통행인 독립교차로에서 Bus Signal Preemption 기법인 Green extension과 Red shortening을 사용하였을 때 확률밀도함수를 이용하여 Preemption 전략에 따라 버스, 승용차의 지체를 분석하였다. 또한, 차량의 승차인원을 고려할 경우 버스우선신호 사용 시 사람당 지체가 감소한다는 사실을 밝혔다.[6]

Yu-Chium Chiou(2005) 등은 Transit Preemption Signal(TPS)을 사용하였을 때와 Gemetic Fuzzy Logic Controller(GFLC)상에서 TPS를 사용하였을 때 사람당 지체변화를 분석하였다. 그 결과 우선신호가 적용된 주방향 차량의 지체는 감소한 반면 우선신호가 적용되지 않는 부도로의 차량당 지체는 증가하였다. 또한, 대중교통 차량의 승차인원이 많을수록

TPS전략 중 Green extension과 Red truncation에서 사람당 지체가 감소하였고 GFLC상에서 TPS를 사용할 경우 Green extension에서 효과가 높은 것으로 나타났다. 또한, 이러한 기법들은 승용차의 교통량이 적을수록 효과가 높은 것으로 나타났다.[7]

Liu Hongchao(2008) 등은 Webster의 지체모형을 이용하여 가로변 버스전용차로상에서 Early green 및 Green extension을 사용하여 버스가 이용하지 않는 비우선현시의 지체 증가를 최소화하는 녹색시간을 산출하였다. 또한, 우선현시에 비우선현시의 여유녹색시간을 재분배하는 방법론을 제시하고 버스 및 승용차의 지체를 분석하였다. 분석 결과 비우선현시를 이용하는 차량들의 지체는 증가하지만 우선현시를 이용하는 버스 및 승용차의 지체는 감소하는 것으로 나타났다.[8]

Alexander Skabardonis(2008) 등은 가로변 버스전용차로상에서 버스의 검지를 통해 버스가 도착할 교차로에 도착하기 이전에 승용차의 대기행렬을 모두 소비되도록 하는 신호체계를 구현하여 버스가 교차로에서 대기행렬로 인한 지체를 최소화 되도록 하는 버스우선신호 방법론을 제시하였다. 분석 결과 버스와 같은 현시를 이용하지 않는 승용차의 지체는 증가하였고 승차인원을 고려한 사람당 지체는 감소한 것으로 나타났다.[9]

3. 버스우선신호 구축 사례

버스우선신호의 구축은 국외의 경우 미국과 유럽에서 그 사례를 찾아볼 수 있었으며, <표 1>과 같이 대부분 능동형 버스우선신호의 Early green, Green extension 기법을 사용하는 것으로 나타났다.[10]

국내의 경우 시범적용 또는 설계단계에서 그쳤으나 천호~하남간 BRT 시범사업에서 버스우선신호에 대한 설계가 이루어진바 있으며, 고양시 BRT 사업에서는 4개의 교차로에서 버스우선신호가 시행된 바 있다.[11, 12]

<표 1> 버스우선신호 구축 사례
<table 1> Practice case of bus signal priority

site	number of intersections	number of buses	priority
Brighton-UK	8	-	Early green Green extension
London-UK	3200	8000	Early green Green extension
Vienna-Austria	185	-	Early green Green extension
Portland-USA	250	650	Early green Green extension
King County-USA	28	1400	Early green Green extension
LA-USA	654	283	Early green Green extension

4. 기존연구 고찰 결과

버스우선신호에 따른 지체변화와 관련된 기존연구 고찰 결과 능동형 버스우선신호 기법 중 Early green 및 Green extension 전략을 활용한 사례가 많았으며, 승용차 지체의 증가는 최소화하고 버스의 지체는 줄이는 연구 전략이 필요함을 알 수 있었다. 또한 중앙버스전용차로를 고려한 연구가 많지 않음을 알 수 있었다.

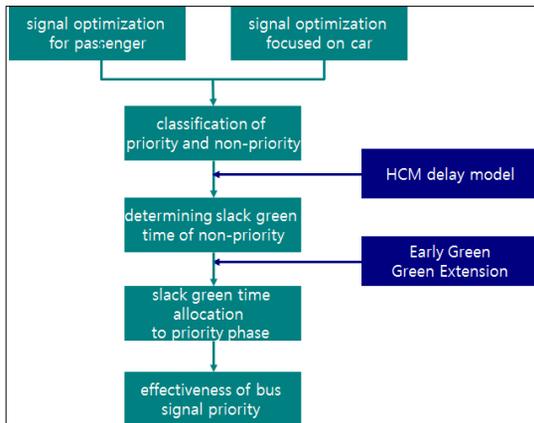
따라서 본 연구에서는 중앙버스전용차로 상에서 버스의 지체는 줄이고 승용차 지체의 증가는 최소화 하는 녹색시간 재분배 방법론을 통해 차량당 지체 및 사람당 지체를 산정하였으며, 여유녹색시간의 변화에 따라 지체를 분석하여 여유녹색시간의 값이 가장 최적의 여유녹색시간인지 알아본다.

Ⅲ. 최적 신호시간 산출방법론

본 연구에서는 중앙버스전용차로가 존재하는 독립교차로에서 결정적 지체모형의 하나인 HCM모형을 이용하여 능동형 버스우선신호를 제공하는 방법론을 제시한다. <그림 1>과 같이 승차인원을 고려한 신호 최적화와 차량 중심의 신호 최적화를 시행한다. 현시체계를 버스에 제공되는 우선현시와 버스에 제공되지 않는 비우선현시로 분류하였으며, HCM모형을 이용하여 비우선신호에서 여유녹색시

간을 산정한 후 비우선현시의 여유녹색시간 합을 우선현시에 재분배되도록 하는 방법론을 제시한다.

비우선현시에서 대기차량들의 대기행렬 해소시간이 녹색시간의 종료시점과 동일하지 않다면 비우선현시와 우선현시 어느 한쪽의 현시를 이용하는 차량의 지체가 더 줄어들거나 늘어날 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 비우선현시에서의 대기행렬 해소시간이 녹색시간의 종료시점과 동일하도록 하는 여유녹색시간을 산정하고 비우선현시의 여유녹색시간 합을 능동형 버스우선신호의 **Early green**과 **Green extension** 기법을 이용하여 우선신호에 분배한다. 이후 버스우선신호가 적용되기 전후의 차량당 지체 및 사람당 지체를 분석한다.



<그림 1> 연구의 진행순서
<Fig. 1> Study processing

Early green, **Green extension**에 따른 분석구간의 사람당 및 차량당 지체 증·감량 산정과정은 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서는 교차로의 포화상태가 비포화 상태만을 연구의 대상으로 가정하였기 때문에 비우선현시에서 대기행렬이 모두 해소된 이후에 여유녹색시간이 존재한다. 따라서 **Early green**이 발생하는 <그림 3>과 **Green extension**이 발생하는 <그림 5>에서 비우선현시를 이용하는 차량의 대기행렬이 소거되는 시간인 t_{cenp} , t_{cgnp} 와 녹색시간의 종료시점인 $g_{bep} - t$, $g_{bgp} - T$ 를 동일하게 하도록 하는 여유녹색시간의 산정식은 각각 식(1), 식(2)와 같다. 비우

선현시의 여유녹색시간 합을 우선현시에 제공할 경우 비우선현시의 지체증가를 최소화한다. 또한, 우선현시를 이용하는 승용차 및 버스의 차량당 지체 및 사람당 지체를 최소화한다. 둘째, **Early green**이 발생할 경우 우선현시에서는 <그림 2>와 같이 녹색시간의 증가에 따라 지체가 감소하며, 식(3)은 **Early green** 시 우선현시의 지체감소량을 나타낸다. 비우선현시의 경우 <그림 3>과 같이 녹색시간이 감소함에 따라 지체가 증가하며, 식(4)는 **Early green** 시 비우선현시의 지체증가량을 나타낸다.[13] 셋째, 우선현시에서 **Green extension**이 발생하였을 경우 우선현시에는 <그림 4>와 같이 녹색시간이 증가함에 따라 지체가 감소하며, 식(5)는 **Green extension** 시 우선현시의 지체감소량을 나타낸다. 비우선현시의 경우 <그림 5>와 같이 녹색시간이 감소함에 따라 지체가 증가하며, 식(6)은 **Green extension** 시 비우선현시의 지체증가량을 나타낸다.[13]

$$g_{bep} - t = t_{cenp} = \frac{q(r_{enp} + t)}{(s - q)}$$

$$t = (q - \frac{qr_{enp}}{s - q}) / (\frac{s}{s - q}) \tag{1}$$

$$g_{bgp} - T = t_{cgnp} = \frac{q(r_{gnp} + t)}{(s - q)}$$

$$T = (q - \frac{qr_{gnp}}{s - q}) / (\frac{s}{s - q}) \tag{2}$$

$$d_1 = \frac{1}{2} r_{ep} q (r_{ep} + t_{cep}) - \frac{1}{2} (r_{ep} - \sum t) q (r_{ep} + t_{cep} - \sum t) = \frac{1}{2} q \sum t (2r_{ep} + t_{cep} - \sum t) \tag{3}$$

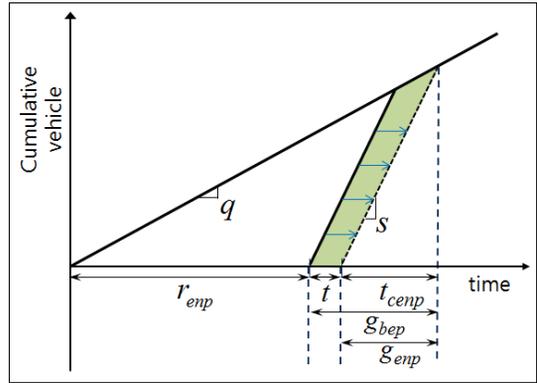
$$d_2 = \frac{1}{2} q (r_{enp} + t) (r_{enp} + t + t_{cenp}) - \frac{1}{2} q r_{enp} (r_{enp} + t_{cenp}) = \frac{1}{2} q t (2r_{enp} + t_{cenp} + t) \tag{4}$$

$$d_3 = \frac{1}{2} q r_{gp} (r + t_{cgp}) - \frac{1}{2} q (r_{gp} - \sum T) (r_{gp} - \sum T + t_{cgp}) = \frac{1}{2} q \sum T (2r_{gp} + t_{cgp} - \sum T) \tag{5}$$

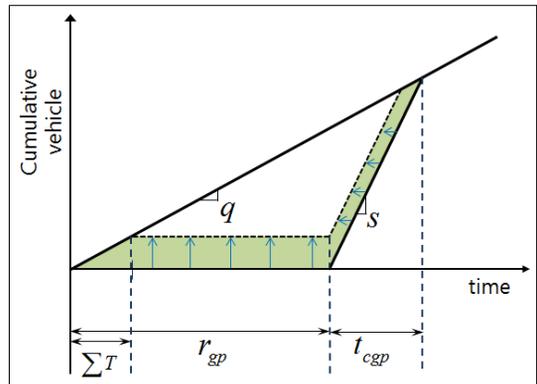
$$d_4 = \frac{1}{2} q (r_{gnp} + T) (r_{gnp} + T + t_{cgnp}) - \frac{1}{2} q r_{gnp} (r_{gnp} + t_{cgnp}) = \frac{1}{2} q T (2r_{gnp} + t_{cgnp} + T) \tag{6}$$

여기에서,

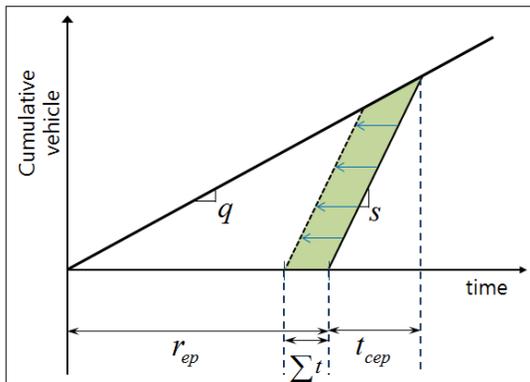
- d_1 = Early green 시 우선현시 지체감소량
- d_2 = Early green 시 비우선현시 지체증가량
- d_3 = Green extension 시 우선현시 지체감소량
- d_4 = Green extension 시 비우선현시 지체증가량
- g_{bep} = Early green이전의 비우선현시 녹색시간
- g_{enp} = Early green 시 비우선현시의 녹색시간
- g_{bgp} = Green extension이전의 비우선현시 녹색시간
- g_{gnp} = Green extension 시 비우선현시의 녹색시간
- r_{ep} = Early green 시 우선현시의 적색시간
- r_{enp} = Early green 시 비우선현시의 적색시간
- r_{gp} = Green extension 시 우선현시의 적색시간
- r_{gnp} = Green extension 시 비우선현시의 적색시간
- t = Early green 시 비우선현시의 여유녹색시간
- $\sum t$ = Early green 시 우선현시에 제공되는 비우선현시 여유녹색시간의 합
- T = Green extension 시 비우선현시의 여유녹색시간
- $\sum T$ = Green extension 시 우선현시에 제공되는 비우선현시 여유녹색시간의 합
- t_{cep} = 우선현시에서 Early green이 발생이전 대기차량의 소거시간
- t_{cenp} = Early green 시 비우선현시의 대기차량 소거시 걸리는 시간
- t_{cgp} = 우선현시에서 Green extension이 발생이전 대기차량의 소거시간
- t_{cgnp} = Green extension 시 비우선현시 대기차량의 소거에 걸리는 시간
- s = 포화교통류율
- q = 교차로에 도착하는 차량의 도착률



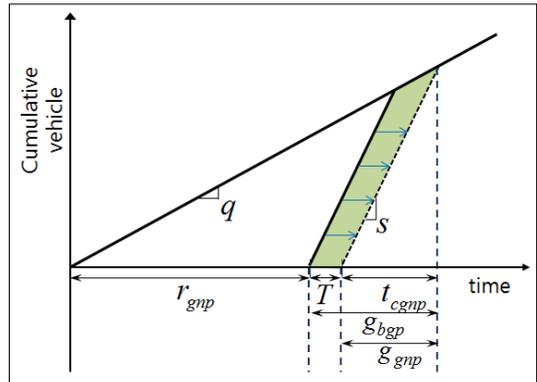
〈그림 3〉 Early green으로 인한 비우선현시의 지체증가
(Fig. 3) Impact of Early green on non-prioritized approach



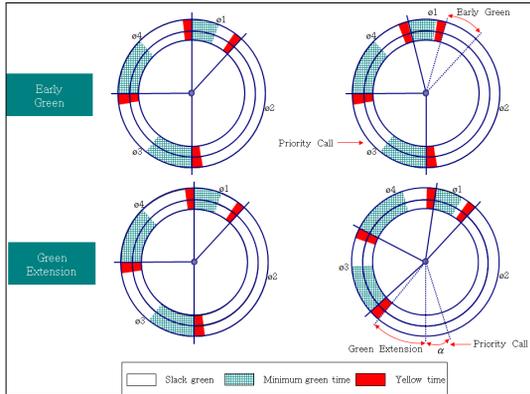
〈그림 4〉 Green extension으로 인한 우선현시의 지체감소
(Fig. 4) Impact of Green extension on prioritized approach



〈그림 2〉 Early green으로 인한 우선현시의 지체감소
(Fig. 2) Impact of Early green on prioritized approach



〈그림 5〉 Green extension으로 인한 비우선현시의 지체증가
(Fig. 5) Impact of Green extension on non-prioritized approach



<그림 6> Green extension 및 Early green이 발생하는 버스 검지 시점

<Fig. 6> Detection time of bus on Green extension and Early green

버스의 검지 시점에 따라 Early green 및 Green extension이 발생하며, <그림 6>과 같이 검지기부터 교차로 정지선까지 통행시간인 α 시간 사이에 버스가 검지될 경우 우선현시에 Green extension이 제공된다. 비우선현시 시간에 버스가 검지될 경우 버스가 검지된 다음 비우선현시들의 여유녹색시간 합을 우선현시에 Early green으로 제공한다. 예를 들어 3번 현시의 여유녹색시간 때에 버스가 검지되면 4, 1번 현시의 여유녹색시간 합을 우선현시에 Early green으로 제공한다. 우선현시 제공으로 인해 비우선현시를 이용하는 차량의 지체를 최소화하기 위해 Early green과 Green extension이 동시에 발생하지 않도록 하였으며, 현시의 생략은 발생하지 않도록 하였다.

교통량에 따라 비우선현시에서 감소한 녹색시간이 최소녹색시간보다 작을 수도 있지만 본 연구에서는 비우선현시에서 적색시간에 교차로에 도착한 차량의 대기행렬이 해소되는 시점과 녹색시간의 종료시점을 같게하는 시간만을 고려하여 여유녹색시간을 산출하기로 한다.

IV. 사례분석

1. Scenario 구성 및 지체분석

HCM 지체모형을 이용한 능동형 버스우선신호상에

서 버스우선신호시간을 산출하기 위한 scenario 구성을 <표 2>과 같이 구성하였다. scenario1은 일반적인 최적화 방식인 일반차로의 용량과 일반차로를 이용하는 승용차의 교통량을 이용하여 신호최적화를 수행하였고 scenario2는 도로전체의 승차인원과 도로 전체의 용량을 이용하여 최적화를 수행하였다. 여기서 도로전체의 승차인원은 승용차 승차인원과 버스 승차인원을 합친 인원을 의미하며, 도로 전체의 용량은 일반차로의 용량과 버스전용차로의 용량을 합친 용량을 의미한다. 신호 최적화는 대표적인 최적화 프로그램인 TRANSYT-7F 10.3을 이용하여 주기와 녹색시간을 최적화한 값을 각각 scenario1-1과 scenario2-1로 구성하였다. Webster의 최적주기 산정식에 의하면 최적 주기의 0.75~1.5배의 주기는 지체에 크게 영향을 주지 않는다.[14] 따라서 최적 주기에 대해 1.3배, 1.5배하여 녹색시간을 최적화한 값을 각각 scenario1-2, scenario2-2와 scenario1-3, scenario2-3으로 각각 구성하였다.

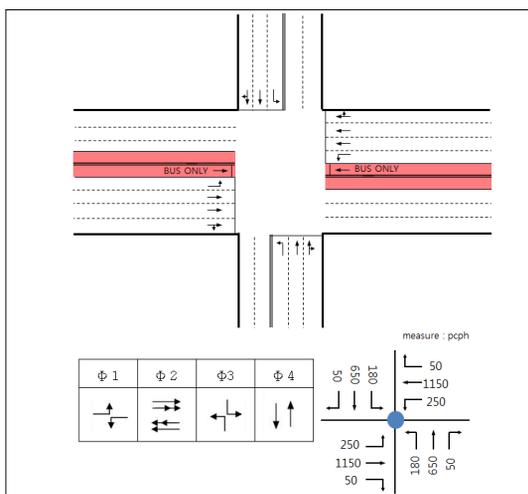
<표 2> scenario별 여유녹색시간
(table 2) Slack green time for each scenario

scenario	cycle length	phase	before priority green time(s)	slack green time(s)
scenario1	80sec (scenario1-1)	1	13	-1
		2	23	9
		3	10	-2
		4	22	-6
	100sec (scenario1-2)	1	18	-3
		2	30	13
		3	13	-2
		4	27	-8
	120sec (scenario1-3)	1	21	-3
		2	38	16
		3	15	-2
		4	34	-11
scenario2	70sec (scenario2-1)	1	12	-2
		2	19	8
		3	8	-1
		4	19	-5
	90sec (scenario2-2)	1	16	-3
		2	25	13
		3	11	-1
		4	26	-9
	110sec (scenario2-3)	1	20	-4
		2	31	18
		3	14	-2
		4	33	-12

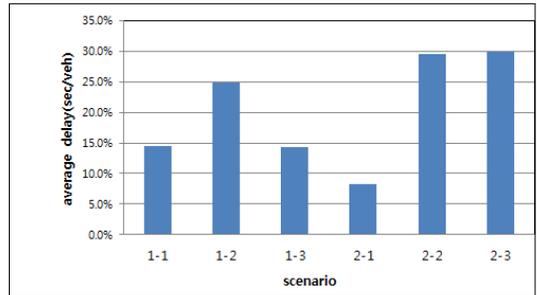
실험대상 기하구조, 현시체계, 교통량은 <그림 7>과 같이 구성하였다. HCM 모형을 이용하여 녹색시간 산출 시 축 구조의 교차로에는 적용이 힘들기 때문에 실험대상의 기하구조는 동서방향으로 중앙버스전용차로를 대상으로 하는 4지 독립교차로를 선정하였고, 현시체계는 중첩이 없는 4현시체계로 구성하였다. 교통량은 도로용량편람 기준 서비스 수준 C~D를 유지하는 정도로 구성하였다.[15] 또한, 승용차 승차인원은 1.27명, 버스의 승차인원은 17명으로 가정하였으며 버스전용차로의 버스 배차간격은 2분 즉, 양방향 60대/시로 가정하였다.

Scenario의 차량당 지체 및 사람당 지체분석은 독일 PTV사의 VISSIM4.0을 이용하여 미시적 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 중앙버스전용차로의 버스 우선신호를 구현하기 위해 VISSIM의 외부 컨트롤러 기능인 VISVAP을 이용하여 Early green 및 Green extension을 구현하였으며, 랜덤시드는 분석단위 별로 총 10회 변경하여 분석을 시행하였다.

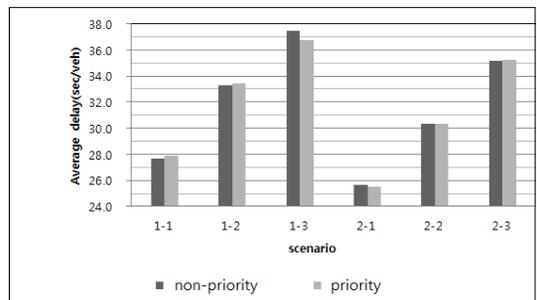
차량당 지체를 기준으로 하여 여유녹색시간을 산정 후 지체 분석결과 비우선신호의 여유녹색시간이 우선현시인 2번 현시에 재분배됨에 따라 2번 현시를 이용하는 승용차 지체 및 버스의 지체가 감소하였다. 특히 주기가 긴 scenario1-3, 2-3에서 가장 크게 지체가 감소하였다. 버스지체의 경우 <그림 8>과 같이 scenario2-3에서 최고 29.9%감소한 결과를 보였다.



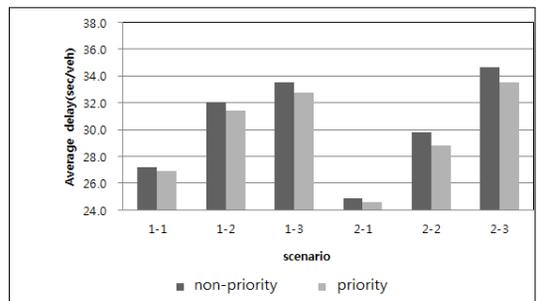
<그림 7> 교차로 기하구조 및 현시체계
<Fig. 7> Geometry and phase sequence



<그림 8> scenario별 버스지체 감소율
<Fig. 8> Decrease ratio bus delay for each scenario



<그림 9> scenario별 차량당 지체변화
<Fig. 9> Car delay change for each scenario



<그림 10> scenario별 사람당 지체변화
<Fig. 10> Person delay change for each scenario

승용차와 버스 지체를 합한 교차로 전체의 차량당 지체는 <그림 9>와 같이 scenario1과 scenario2에서 지체의 변화가 scenario1-3을 제외하고는 지체가 미미하거나 다소 증가하였다. 반면, 사람당 지체의 경우 <그림 10>과 같이 scenario2에서 감소하는 경향을 보였고 scenario2-3에서는 최고 4.1% 지체가 감소하는 효과를 보였다. 특히 사람당 지체의 감소량은 scenario1이 평균 1.9%, scenario2가 평균 2.7%

감소하여 scenario2의 평균 사람당 지체감소량이 큰 것으로 나타났으며, 이는 사람당 지체를 기준으로 여유녹색시간을 산정하여 적용했기 때문으로 분석된다.

반면 미미한 결과이긴 하지만 scenario1과 같이 차량당 지체를 기준으로 하여 여유녹색시간을 산정하여 적용할 경우 차량당 지체가 scenario2에 비하여 평균 0.2%가량 더 낮게 분석되었다. 차량당 지체를 기준으로 여유녹색시간을 산정할 경우 차량당 지체값이 낮게 분석되고 사람당 지체를 기준으로 여유녹색시간을 산정할 경우에는 사람당 지체가 낮게 나타나는 것을 의미한다.

Scenario2에서 사람당 지체가 낮게 나온 이유는 중앙버스전용차로를 이용하는 버스의 승차인원까지 고려하여 최적화했기 때문으로 분석되며, 교통량을 승차인원으로 환산할 경우 중앙버스전용차로와 일반 승용차 차로에 배정되는 차로당 인원이 유사하기 때문으로 분석된다. 본 연구의 분석대상 구간과 같이 중앙버스전용차로에서는 scenario1과 같이 승용차 기준으로 최적화 하는 것 보다 scenario2와 같이 승차인원을 기준으로 하여 최적화 했을 때 평균 사람당 지체가 더 낮게 나타난 것으로 분석되었다. 최적의 주기가 아닌 주기를 사용하여 우선현시에 여유녹색시간을 재분배 할 경우 우선현시를 이용하는 차량의 사람당 지체는 감소하지만 주기가 최적인 상태에서 우선현시에 녹색시간을 재분배하

기 전보다 차량당 지체 및 사람당 지체가 높은 것으로 분석되었다.

2. 여유녹색시간의 변화에 따른 지체분석

본 연구에서는 HCM모형을 이용하여 여유녹색시간을 산정하여 우선현시에 적용하여 지체를 분석하였다. 하지만 HCM모형을 이용하여 산정한 여유녹색시간의 값이 가장 효과적인 결과값 이라고 단정하기는 어렵다. 따라서 시나리오별로 여유녹색시간을 15% 단위로 60% 증가 또는 감소시켜 분석을 시행하였으며, <표 3>과 같이 시나리오별 지체 종류별 여유녹색시간의 증감에 따른 지체 감소율을 산정하였다.

여유녹색시간의 변화에 따른 지체 분석결과 여유녹색시간의 변화가 없을 경우 가장 효과가 높은 것으로 나타났다. 여유녹색시간의 변화가 30%이내 일 경우 차량당 지체 및 사람당 지체의 감소율이 기존의 값과 비교하였을 때 미미하였다. 반면, 여유녹색시간의 변화가 30%를 초과할 경우 버스우선신호의 효과가 감소하는 것으로 나타났다. 여유녹색시간의 변화율이 작을 경우에는 사람당 지체 감소율이 떨어지거나 차량당 지체가 증가하는 폭이 작았지만 여유녹색시간의 변화율이 클 경우에는 차량당 지체가 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 특히 여유녹색시간의 변화율이 가장 높은 scenario2-3의 여유녹색시간을 60% 증가할 경우 차량당 지체가

<표 3> Scenario별 여유녹색시간의 변화에 따른 지체 감소량

<table 3> Delay decrease ratio according to variation of slack green time for each scenario

scenario	cycle	delay type	Delay decrease ratio according to variation of slack green time								
			-60%	-45%	-30%	-15%	0%	15%	30%	45%	60%
scenario1	80sec (scenario1-1)	car	-1.8%	-1.7%	-2.3%	-2.5%	-0.7%	-2.9%	-4.8%	-3.7%	-2.4%
		person	-0.4%	-0.3%	-0.8%	-1.0%	1.0%	-0.6%	0.0%	1.7%	2.8%
	100sec (scenario1-2)	car	0.9%	0.0%	0.2%	-0.2%	-0.4%	0.2%	-0.8%	-2.6%	-5.4%
		person	0.5%	-0.3%	1.2%	1.2%	1.8%	2.4%	2.3%	0.7%	-1.9%
	120sec (scenario1-3)	car	0.7%	2.8%	2.4%	2.6%	2.0%	2.8%	2.1%	1.8%	2.7%
		person	1.0%	3.0%	2.7%	2.9%	2.3%	3.0%	2.4%	2.1%	3.0%
scenario2	70sec (scenario2-1)	car	-0.3%	0.6%	1.6%	0.3%	0.5%	0.3%	0.3%	-0.7%	0.6%
		person	-1.1%	-0.2%	2.3%	0.6%	1.2%	1.0%	1.8%	0.9%	2.1%
	90sec (scenario2-2)	car	-1.0%	-0.4%	-0.7%	-0.8%	0.0%	-1.0%	-2.5%	-2.5%	-0.3%
		person	-0.1%	1.3%	1.0%	1.8%	3.3%	2.3%	1.1%	1.1%	1.4%
	110sec (scenario2-3)	car	-0.3%	-1.8%	-0.9%	-0.5%	-0.2%	1.1%	-1.7%	-4.6%	-9.2%
		person	0.2%	-0.6%	0.2%	2.2%	3.3%	4.4%	1.9%	-0.6%	-4.4%

9.2%, 사람당 지체가 4.4% 증가함에 따라 가장 효과가 떨어지는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 HCM 지체모형을 기반으로 하여 비우선현시의 여유녹색시간을 차량당 지체 및 사람당 지체를 이용하여 산정한 후 우선현시에 재분배하였을 때 다음과 같은 특성을 도출하였다. 첫째, 비우선현시의 여유녹색시간을 우선현시에 재분배할 경우 우선현시의 사람당 지체 총 감소량은 비우선현시의 사람당 지체 총 증가량보다 높게 나타나 총 사람당 지체는 감소하였다. 둘째, 최적주기가 아닌 주기를 채택하여 녹색시간 재분배를 통한 우선신호 적용 시 차량당 지체 및 사람당 지체는 감소하지만 최적주기에서 우선신호를 적용하기 이전의 지체보다는 큰 것으로 나타났다. 셋째, 주방향의 교통량이 많고 중앙버스중앙차로가 존재할 경우에는 사람당 지체를 기준으로 여유녹색시간을 산정하여 적용할 경우 기존의 최적화 방식인 승용차 기준으로 주기 및 녹색시간을 최적화하는 경우보다 사람당 지체가 낮게 분석되었다. 넷째 본 논문과 같이 버스의 교통량이 적고 일반승용차의 교통량이 적은 비포화 상태의 교차로에서 여유녹색시간을 적용할 경우 별도의 보정 작업등을 통해 여유녹색시간의 값을 작거나 크게 하여 적용하면 차량당 지체 및 사람당 지체가 증가한다.

이를 종합해볼 때 결정적 지체모형인 HCM모형을 이용하여 우선현시에 능동형 버스우선신호를 적용할 경우 최적의 주기를 결정하는 것이 최우선적으로 이루어져야한다. 주기를 결정한 이후에 녹색시간의 결정 및 여유녹색시간을 산정하여 우선현시에 재분배해야 사람당 지체를 기준으로 하였을 때 가장 최적의 신호시간을 산출할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 결정적 지체모형의 하나인 HCM 지체 모형을 이용하여 능동형 버스우선신호 적용 시 비우선현시의 여유녹색시간을 우선현시에 재분배하는 방법론을 제시하였다. 또한, 사례분석을 통하여 버스우선신호의 발생 시 차량당 지체 및 사람

당 지체에 대하여 분석하였다. 그 결과 버스우선신호를 적용할 경우 버스우선신호로 인한 비우선현시의 지체 증가량보다 우선현시의 지체감소량이 더 높아 분석구간 전체의 지체는 낮아지는 것으로 확인되었다. 차량당 지체와 사람당 지체를 이용하여 여유녹색시간을 산정하여 적용하였을 경우 사람당 지체의 감소폭이 더 큰 것으로 분석되었다. 또한, 사람당 지체를 기준으로 여유녹색시간을 산정하여 적용할 경우 버스중앙차로를 이용하는 버스의 승차인원을 고려함에 따라 기존의 최적화 방식과 비교하여 최적의 신호시간을 산출할 수 있었다. 이와 같이 여유녹색시간의 산정과정과 지체감소의 분석결과는 본 연구가 버스우선신호를 적용될 수 있도록 하는 이론적 밑바탕이 됨을 의미한다고 하겠다. 향후 연구에서는 본 연구의 일반화를 위한 다양한 교통조건 하에 연구 수행이 필요하다.

참고문헌

- [1] Y. T. Lee, K. J. Kim, and T. K. Lee, "Bus Signal Priority System in Overseas and Introduction in Korea", *Journal of the Korea Road & Transportation Association*, vol. 100, pp.23-38, 2005.
- [2] Y. J. Jung, and Y. C. Kim, "Study on Optimal Detector Location for Active BUS Signal Priority of Median BUS Lane", *Korea Institute of Intelligent Transport Systems autumn conference*, pp.277-282, Suwon, Korea, Oct, 2009.
- [3] M. J. Han, and Y. I. Lee, "Establishment of Bus Priority Signal in Real-Time Traffic Signal Control", *Journal of Korea Society of Transportation*, vol. 24, no. 7, pp.101-114, Dec, 2006.
- [4] J. G. Lee, "A study on bus signal priority algorithm and strategy", University of Seoul master's Thesis, 2006
- [5] H. J. Lee, S. S. Lee, C. K. Lee, and N. S. Kim, "Effectiveness Assessment of Bus Signal Priority

- Systems”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 11, no. 2, pp.57-66, Apr. 2012
- [6] J. Jacobson, and Y. Sheffi, “Analytical Model of Traffic Delays Under Bus Signal Preemption: Theory and Application”, *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 15, pp.127-138, Apr, 1981.
- [7] Yu-Chiun C., Ming-Te W., and Lawrence W. LAN, “Coordinated Transit-Preemption Signal Along an Arterial: Interactive Genetic Fuzzy Logic Controller(GFLC) Method”, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 6, pp.2321-2336, 2005.
- [8] LIU H., ZHANG J., and CHENG D., “Analytical Approach to Evaluating Transit Signal Priority”, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, vol. 8, pp.48-57, Apr, 2008.
- [9] A. SKABARDONIS, and N. GEROLIMINIS, “Real-Time Monitoring and Control on Signalized Arterials”, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 12. no. 1, pp.64-74, Apr, 2008.
- [10] K. Gardner, C. D’Souza, N. Hounsell, B. Shrestha, and D. Bretherton, *UITP WORKING GROUP: Interaction of buses and signals at road crossings*, International Association of Public Transport, pp.19-39, Apr, 2009
- [11] Metropolitan Transportation Authority(2014), “Seoul~Hanam BRT ITS construction” Retrieved Jan, 30, 2014, from http://www.mta.go.kr/app/bbs/detail.jsp?bcd=news&msg_no=198
- [12] Metropolitan Transportation Authority(2014), “Open smart BRT age in Kyounggi province” Retrieved Jan, 30, 2014, from http://www.mta.go.kr/app/bbs/detail.jsp?bcd=traffic_n&msg_no=445
- [13] Roser P. R., Elena S. P., and William R. M., *Traffic Engineering*, 3rd Ed., Pearson Education Inc, 2004.
- [14] C. U. Do, *Principle Transportation Engineering*, 2nd Ed, Chung-mun-gak, pp.449-450, 2009.
- [15] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, *Korea Highway Capacity Manual*, pp.384-385, Feb, 2013.
- [16] J. H. Jo, Y. C. Jo, and S. H. Kim, “Comparison of Delay Estimates for Signalized Intersection”, *Journal of Korea Society of Transportation*, vol. 23, no. 1, pp.67-80, Feb, 2005.
- [17] M. S. Hoque, and d. A. Imran, “Modification of Webster’s Delay Formula Under Non-Lane Based Heterogeneous Road Traffic Condition”, *Journal of Civil Engineering (IEB)*, vol. 35, no. 2, pp.81-92, Feb, 2007.
- [18] H. Rakha, and Y. Zhang, “Sensitivity Analysis of Transit Signal Priority Impacts on Operation of a Signalized Intersection”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 130, no. 6, pp.796-804. Oct, 2004.
- [19] Y. J. Jung, Y. C. Kim, H. S. Back, “Development of The Signal Control Algorithm Using Travel Time Informations of Sectional Detection Systems”, *Journal of Korea Society of Transportation*, vol. 23 no. 8, pp.181-191, Dec, 2005.
- [20] Transportation Research Board of the National Academies, *Transit Capacity and Quality of Service Manual(TCRP)*, Sep, pp.46-51, 2013.

저자소개



김 태 운(Kim, Tae-Woon)

2011년 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 도로교통정보사업단 연구원
2009년 2월 ~ 2011년 2월 : 서울시립대학교 교통공학과 공학석사(교통운영전공)
2003년 2월 ~ 2009년 2월 : 경기대학교 도시 및 교통공학과 학사
e-mail : climb@kict.re.kr
연락처 : 010-7577-6375



정 영 제(Jeong, Young-Je)

2014년 ~ 현재 : 도로교통공단 연구원
2013년 : 서울시립대학교 교통공학과 연구교수
2011년 : 서울시립대학교 교통공학과 공학박사(교통운영전공)
2006년 : (주)제일엔지니어링 교통·ITS사업부
2006년 : 서울시립대학교 교통공학과 공학석사(교통운영전공)
e-mail : sleep108@hanmail.net
연락처 : 02-2210-2671



김 영 찬(Kim, Young-Chan)

1996년 ~ 현재 : 서울시립대학교 교통공학과 교수
1996년 : 명지대학교 공과대학 교통공학과 교수
1993년 : 도로교통안전협회 연구소 연구위원
1991년 : 교통개발연구원 선임연구원
1990년 : Texas A&M University 토목공학과 공학박사(교통공학전공)
1985년 : 서울대학교 토목공학과 공학석사(도시공학전공)
e-mail : yckimm@uos.ac.kr
연락처 : 02-2210-2768