

■ 論 文 ■

중앙버스전용차로 버스전용신호 도입시 신호 최적화에 관한 연구

Development of Determining Technique of Optimum Signal Time of Intersections On Median Exclusive Bus Lane using Bus-only Signal

김 보 겸

(서울시립대학교 교통공학과 석사과정)

김 승 일

(서울시립대학교 교통공학과 박사수료)

김 영 찬

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

김 진 태

(서울지방경찰청 교통개선기획실 실장)

목 차

- | | |
|----------------------|------------------|
| I. 서론 | 1. 신호시간 계산과정 |
| 1. 연구배경 및 목적 | 2. 적용사례 |
| 2. 연구범위 및 수행과정 | 3. 효과분석 |
| II. 기존연구 고찰 | IV. 결론 및 향후 연구과제 |
| III. 신호시간 결정 알고리즘 개발 | 참고문헌 |

Key Words : 버스전용차로, 버스전용신호, 최적신호주기, 신호운영, 중첩현시, 중앙버스전용차로
Exclusive bus lane, Bus-only signal, Optimum cycle time, Traffic Signal control, Overlap phase, Median exclusive bus lane

요 약

서울시를 포함한 수도권 각 도시는 중앙버스전용차로의 적극적인 도입으로 버스속도 및 정시성 향상을 통해 대중교통우선 처리 전략을 적극 추진 중에 있다. 그러나 이로 인해 중앙부 1~2개 차로를 버스전용차로가 차지함으로써 기존 신호운영체계에 큰 변화를 가져오게 되었다. 좌회전 차량과 중앙버스전용차로를 이용해 직진하는 버스 간에 새로운 상충이 발생하게 되어 동시신호 기법 등 교차로 신호운영대안이 줄어들게 된 것이다. 이 해결방안으로서 버스전용신호를 도입하여 중첩현시 및 동시신호 등 Dual-Ring방식의 다양한 신호 운영을 가능케 하는 방안이 모색되고 있다. 본 연구에서는 이러한 버스전용신호 도입 시 교차로 정체를 최소화할 수 있는 신호설계방법을 제시하였고, 중앙버스전용차로가 운영 중인 양재역사거리에 동 기법을 이용한 최적신호 설계를 적용, 시뮬레이션을 통해 그 효과를 검증하였다.

Seoul and many large cities in Korea have implemented Median Exclusive Bus Lane(MEB). But exclusive bus lane in the middle of the road caused new contradictions between left turn movement and through bus movement and several signal operation techniques like 'left turn protected' and 'overlap phase' couldn't be applied in intersections on MEB. We suggest 'Bus-only Signal for median lane' technique as solution of these problems.

This study presents optimum signal time design process and detailed algorithms for intersections where bus-only signals are installed. As a test field, we took Yang-Je intersection where Median Exclusive Bus Lane go through, and have large gap in volume of left turn in main direction. And we verified that revised optimum signal time including overlap phase can reduce average delay time of vehicle through before and after simulation.

I. 서론

1. 연구배경 및 목적

현재 서울시를 포함한 수도권 각 도시는 대중교통체계 개편과 더불어 중앙버스전용차로의 적극적인 도입으로 버스속도 및 정시성 향상을 통해 대중교통우선 처리 전략을 적극 추진 중에 있다. 이중 시설측면에서 가장 큰 변화라 할 수 있는 중앙버스전용차로는 중앙부 1~2개 차로를 버스전용차로가 차지함으로써 기존 신호운영체계에 큰 변화를 가져오게 되었다.

좌회전차로 좌측에 설치된 중앙버스전용차로로 인해 동시신호로 운영 시 같은 접근로 상의 좌회전 차량과 중앙버스전용차로를 이용해 직진하는 버스 간에 새로운 상충이 발생하게 되었다. 이로 인해 현 신호체계에서는 직진과 좌회전의 동시신호 운영방식을 배제한 채 분리신호의 신호 운영만이 가능하다.

교차로를 분리신호 방식으로만 운영할 경우, 교통특성에 따라 동시신호 및 중첩신호 등의 다양한 신호운영이 가능한 Dual-Ring 신호 운영방식에 비해 최적 신호운영 전략수립에 제한을 받는다. 특히 같은 현시에 진행되는 대향 접근로 간의 교통량 차이가 클 때 교통량이 적은 접근로에서 중첩(overlap)등 최적현시의 구현이 불가능하게 되어 교차로 전체의 지체도가 증가하게 된다.

본 연구에서는 중앙버스전용차로에 버스전용신호를 설치하여 Dual-Ring 신호운영이 가능할 때 교통특성에 따른 최적 신호주기 도출 및 현시분할 기법을 정립하여 교차로 신호운영 효율을 제고하는 방안을 연구하고자 한다.

2. 연구범위 및 수행과정

본 연구를 수행하는데 앞서 현재 사용되고 있는 신호운영 방식에서의 신호시간 결정 알고리즘과 중앙버스전용차로의 신호운영 전략 및 버스우선정책을 위한 기존 연구를 살펴보고, 버스전용신호를 이용한 최적의 신호운영을 위한 신호주기 도출 및 현시분할 알고리즘을 개발하고자 한다. 또한 본 연구에서 정립한 신호운영 전략을 현재 중앙버스전용차로로 인해 분리신호 방식으로 운영 중인 실제 대상 교차로에 적용하여 그 효과를 검증하도록 한다.

II. 기존연구 고찰

신호교차로의 최적 운영을 위해 도로용량편람(2004)에서는 교차로 구조와 교통조건이 주어졌을 때 지체시간을 최소로 하는 최적 신호시간을 산출하는 설계분석 과정을 설명하였다. 교차로 적정주기를 구하는 방법으로는 Webster의 최적신호주기 산출 공식을 이용하였으며, 주기 내 각 현시의 녹색시간은 현시별 임계차로군의 교통량비에 비례하여 할당하였는데 이는 각 현시의 임계차로군이 동등한 서비스 수준을 갖는 것을 목표로 한 방법이라 할 수 있다.

이영인(2004)은 기존의 도로용량편람 방식에 의한 신호시간 계산방식은 소요현시를 계산 단계에서 중앙버스전용차로 상의 버스 수요교통량을 반영하지 못함을 지적하였고, 중앙버스전용차로에 직진하는 버스이동류만 존재한다는 가정에서 중앙버스전용차로의 버스교통량을 소요현시를 계산에 반영하는 중앙버스전용차로구간의 신호제어 개선방안을 제시하였다.

이 연구에서 일반차로 각 차로군의 교통량비와 중앙버스전용차로의 교통량비를 각각 구하여 직진차로군의 소요현시율을 계산할 때 일반 직진 이동류와 중앙버스전용차로의 직진 이동류를 비교하여, 교통량비가 큰 이동류를 직진에서의 임계차로군으로 선택하여 버스전용차로가 있는 접근로의 직진 현시율을 결정하고 최적 주기 결정을 위해 Webster 공식을 이용하되 변수를 버스전용차로를 고려하여 조정하였다.

$$C_0 = \frac{1.5L+5}{1 - \sum_{i=1}^n y'_i}$$

여기서, C_0 : 최적 신호주기 (초)

L : 주기별 손실시간 (초)

y'_i : 임계차로군의 $\text{Max}(v/s, v'/s')$

v, v' : 일반차량, 버스의 교통량

s, s' : 일반차량, 버스의 포화교통류율

이 방법은 일반차량 직진 이동류와 중앙버스전용차로의 버스 직진 이동류를 하나의 직진차로군으로 간주하므로 분리신호로 운영되는 교차로의 신호주기 최적화를 통해 효율성을 높이는 방법으로 이용될 수 있으나 동시신호나 중첩신호의 구현은 고려하지 않으므로 다양

한 신호운영이 가능한 현시분할 최적화 방법을 본 연구에서 보완코자 하였다.

도철용(1989)은 그의 저서에서 교차로 신호계획을 위한 방안을 체계적으로 제시하였다. 교차로에서 좌회전을 통제하는 방법은 보호좌회전 신호를 설치하는 방법, 좌회전을 금지시키는 방법, 그리고 비보호좌회전으로 운영하는 방법이 있고 좌회전 통제방식으로 교차로의 현시 수 및 현시방법을 결정하였다.

보호좌회전의 신호현시 방법에는 증첩현시가 없는 두 현시 방법으로 양방향보호좌회전, 일방보호좌회전, 방향별 분리좌회전 등이 있으며, 증첩현시를 이용한 세 현시 방법으로 양방 및 일방보호좌회전, 선행 및 후행 보호좌회전, 방향별 분리 및 양방보호좌회전 등으로 지체를 최소화할 수 있음을 제시하였다.

중앙버스전용차로 구간에서는 상기 신호 대안 중 두 현시 방법 중에서도 동시신호가 포함되지 않는 양방향 보호좌회전 방식으로만 좌회전을 진행시킬 수밖에 없는 문제가 있어 버스전용신호 대안만이 두 현시 방법 및 세 현시 방법을 모두 사용할 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요함을 알 수 있다.

이에 김균조(2004)는 기존 신호현시 구현방법에 대한 이론을 중심으로 버스전용차로가 운영되는 4지 교차로에서 Dual-Ring 또는 Single-Ring 환경 하에서 구현 가능한 신호운영 방안을 제시하고 신호운영 방안별 Signal map을 구성하였다.

또한 여기서 동시신호 및 증첩현시를 이용한 Dual-Ring 방식의 신호구현을 위해 동일방향의 일반차량 좌회전과 버스 직진 이동류 간의 상충문제를 해결할 수 있는 방안으로 버스전용신호등의 설치를 제안하였다.

이러한 버스전용신호의 국내 도입 사례로는 서울에서 버스전용차로 구간의 엇갈림 방지를 위해 버스와 일반차량의 신호를 분리 운영한 버스게이트 신호를 미야로에 시범도입(1999)한 사례가 있으나 운전자의 혼동으로 인한 잦은 위반으로 큰 효과를 거두지 못하였다.

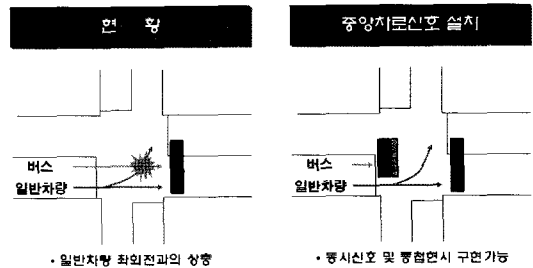
기타 버스 우선신호의 도입사례로는 미주의 각급도시(Portland, Seattle, LA 외 다수)에서 버스 우선신호의 도입 평가를 시행한 사례가 있고, 이를 국내 상황에 맞게 개선하여 도입 가능성에 대한 연구도 구지선(2004), 이주진(2006)에 의해 진행된 바 있다.

기존연구 및 시행사례 고찰결과 버스게이트를 위한 전용신호는 버스우선 정책을 위한 시범적으로 추진된 바 있으나, 이와는 달리 현재 도입된 중앙버스전용차로

구간은 전체 축에서 이동류 상층으로 신호 불합리 현상이 보편적으로 발생하고 있어 시급한 해결이 필요한 실정이며 그 해결방안으로 버스전용신호의 본격적 도입과 신호 최적화 방안의 연구가 필요하다.

III. 신호시간 결정 알고리즘

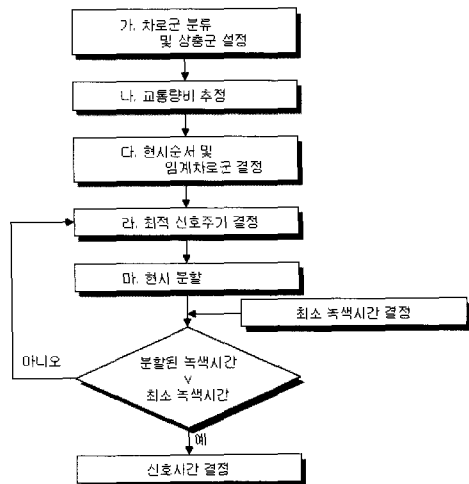
버스전용신호는 중앙버스전용차로를 이용하는 버스만을 대상으로 규제를 시행하는 신호로 다음 그림과 같이 도입시 다양한 증첩현시를 고려할 수 있다. 이를 이용한 최적의 신호운영을 위한 신호주기 도출 및 현시분할 알고리즘을 제시하고 현재 중앙버스전용차로로 인해 분리신호 방식으로 운영 중인 교차로에 적용하여 그 효과를 알아본다.



〈그림 1〉 중앙버스 전용신호 도입 개념

1. 신호시간 계산과정

버스전용신호를 이용한 최적 신호시간을 결정하는

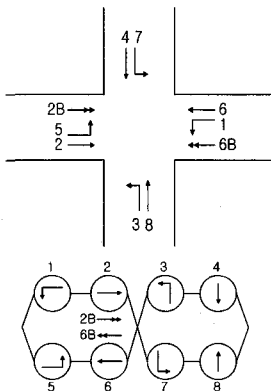


〈그림 2〉 신호시간 결정 알고리즘

과정은 기존에 연구된 Dual-Ring 신호체계에서의 신호시간 산출 과정을 기본 틀로 하며, 주방향 직진 버스를 위한 중앙버스전용차로가 있을 때 일반차로 좌회전 이동류와 중앙버스전용차로의 직진 버스 이동류 간의 상충을 고려하여 최적 신호주기를 산출하고 현시시간을 분할할 수 있도록 계획하였다.

1) 차로군 분류 및 상충군 설정

동서방향 도로를 주도로라 하고 주도로에 직진 버스를 위한 중앙버스전용차로가 있을 때 교차로에서 제어하는 각 차로군에 대한 NEMA (National Electrical Manufacturers Association) 방식을 응용한 현시 번호는 <그림 3>와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 일반차량의 차로군은 →, ↗로 중앙버스전용차로의 직진 버스 차로군은 →로 표현하였다.



<그림 3> 중앙버스전용차로 구간 차로군 및 현시번호

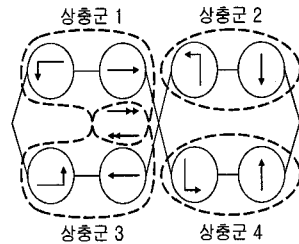
일반차로만으로 이루어진 부도로 접근로에서는 좌회전 차로군과 대향 직진 차로군 사이의 상충만이 발생한 것에 비해 중앙버스전용차로가 설치된 주도로 접근로에서는 직진 버스 차로군이 존재하여 직진 버스와 대향

<표 1> 발생 가능한 상충의 종류

주도로 : 중앙버스전용차로가 있는 도로			부도로
직진일반차량과 대향좌회전	직진버스와 대향좌회전	직진버스와 동방향좌회전	직진차량과 대향좌회전
1 vs 2 5 vs 6	1 vs 2B 5 vs 6B	1 vs 6B 5 vs 2B	3 vs 4 7 vs 8

좌회전 차로군 및 직진 버스와 동일방향 좌회전 차로군 간의 상충이 추가로 발생한다.

중앙버스전용차로 구간에서 하나의 좌회전 차로군이 세 개의 직진 차로군과 상충이 발생하므로 각 접근로의 좌회전 차로군과 이에 상충되는 직진 차로군들을 묶어 이를 각 접근로별 좌회전에 대한 상충군으로 설정한다.



<그림 4> 좌회전에 대한 상충군

2) 차로군별 포화도비 추정

신호교차로 접근로에 대한 버스전용차로 및 일반차로에서 차로군별 교통수요 및 포화교통류율을 추정한다. 일반차로 및 버스전용차로의 각 차로군에 대해 추정된 교통량을 v_i 라 하고 포화교통류율을 s_i 라 하면 차로군별 교통량비 y_i 의 산출식은 아래와 같다.

$$y_i = v_i / s_i$$

포화교통류율(s_i) 추정 방법으로는 기본 포화교통류율에 도로용량편람에서 제시한 보정계수를 곱하여 산출하는 방법과 단위시간(3,600초)에 대한 포화차두시간의 역수로 산출하는 방법이 있다. 후자의 방법이 포화교통류율의 정의에 보다 부합한 방법이나 다차로, 다차종으로 구성된 일반차로의 경우 차로별, 차종별 포화차두시간이 다르므로 일반화된 계산식에 의한 전자의 방법을 따르는 것이 효율적이다. 중앙버스전용차로는 버스 통행을 위해 설치된 1개 차로이므로 대상차로의 포화차두시간의 역수로 포화교통류율을 추정한다.

3) 현시순서 및 임계차로군 결정

중앙버스전용차로에 버스전용신호가 설치되면 일반차로에서 같은 접근로 상의 직진과 좌회전의 동시 진행이 가능해져 중첩현시 및 동시신호를 이용한 다양한 현시조합을 구현할 수 있다. Dual-Ring 신호체계에서는

주로 증첩현시를 이용한 '양방 및 일방보호좌회전' 또는 '선행 및 후행보호좌회전' 방식으로 운영되며, 임계차로군의 교통량비의 합이 최소가 되는 방법을 선택한다.

$$\sum Y = \max \begin{pmatrix} Y_{A1} \\ Y_{A2} \\ Y_{A3} \end{pmatrix} + \max \begin{pmatrix} Y_{B1} \\ Y_{B2} \end{pmatrix}$$

(1) 양방 및 일방보호좌회전(both left turns protected-with overlap)

양방 및 일방 보호좌회전에서 신호시간 결정을 위한 임계차로군은 좌회전에 대한 각 상충군에서 서로 상충되는 차로군의 교통량비의 합이 최대가 될 때이며, 이는 곧 좌회전 차로군의 교통량비와 대향 일반차로 직진 및 양방향 버스 차로군 중 가장 큰 교통량비의 합으로 나타낼 수 있다. 상충군별 임계차로군의 교통량비의 합을 Y_i 라 하면, 각 상충군에 대한 임계교통량비는 아래식과 같다.

$$\text{주도로 : } Y_1 = y_1 + \max \begin{pmatrix} y_2 \\ y_{2B} \\ y_{6B} \end{pmatrix} \quad Y_3 = y_3 + \max \begin{pmatrix} y_{2B} \\ y_{6B} \\ y_6 \end{pmatrix}$$

$$\text{부도로 : } Y_2 = y_3 + y_4 \quad Y_4 = y_7 + y_8$$

최적 신호 주기 산출을 위한 교차로 전체의 임계교통량비 $\sum Y$ 는 다음 식에 의해 구해질 수 있으며, 이 때의 차로군의 구성이 교차로 전체의 임계차로군이 된다.

$$\sum Y = \max \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_3 \end{pmatrix} + \max \begin{pmatrix} Y_2 \\ Y_4 \end{pmatrix}$$

(2) 선행 및 후행보호좌회전(lead and lag left turns protected)

선행 및 후행 보호좌회전에서 중앙버스전용차로구간의 임계차로군은 각 접근로 좌회전 차로군과 대향 직진 차로군의 조합 또는 양방향 좌회전 차로군과 중앙버스 전용차로의 직진 버스 차로군의 조합 중 교통량비의 합이 큰 경우가 된다.

주도로의 임계차로군의 교통량비를 Y_{Ai} , 부도로의 임계차로군의 교통량비를 Y_{Bi} 라 하면, 차로군 조합에 따른 교통량비는 다음 식에 의해 결정된다.

$$\text{주도로 : } Y_{A1} = y_1 + y_2 \quad Y_{A2} = y_5 + y_6$$

$$Y_{A3} = y_1 + y_5 + \max \begin{pmatrix} y_{2B} \\ y_{6B} \end{pmatrix}$$

$$\text{부도로 : } Y_{B1} = y_3 + y_4 \quad Y_{B2} = y_7 + y_8$$

교차로 전체의 임계교통량비를 $\sum Y$ 라 하면,

이 방법은 버스와 상충을 일으키는 좌회전 현시가 중앙버스전용차로의 직진 현시 앞뒤로 나뉘어 배분되어 있으므로 직진 버스 차로군의 교통량비가 클 경우 양방향 좌회전과 직진 버스 차로군의 조합(Y_{A3})이 임계차로군을 형성할 가능성이 높다. 이러한 경우 양방 및 일방 보호좌회전 방식에 비해 임계교통량비가 필요 이상으로 크게 산출되어 큰 신호주기를 요구하며, 이는 교차로 효율을 감소시키므로 중앙버스전용차로구간에는 적합하지 않다.

4) 최적 신호주기 결정

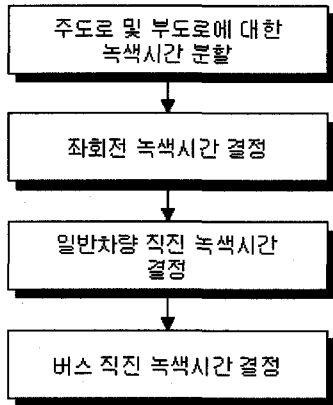
위에서 결정된 임계차로군의 교통량비를 기반으로 하여 최적 신호주기를 계산한다. 최적 신호주기 산출방법에는 Pignataro method, Failure rate method, Webster method 등이 있으나, 본 연구에서는 국내 중앙버스전용차로구간의 특성 상, 교통량이 많을 때에도 안정적인 결과를 도출하며 교차로에서의 신호시간으로 인한 지체를 최소화할 수 있는 Webster method를 이용하고자 한다. Webster 식은 주기 내 손실시간과 임계차로군의 교통량비의 합을 변수로 하는 아래 식에 의해 최적 신호주기를 산출한다.

$$C_{opt} = \frac{1.5L+5}{1 - \sum Y}$$

Webster 방법으로 계산된 신호주기를 기준으로 $\frac{3}{4}C_{opt} \leq C \leq \frac{3}{2}C_{opt}$ 의 범위에서는 지체의 차이가 크지 않은 것으로 나타나므로 이 범위 내에서 교차로 간 연동 등을 고려하여 최적 신호주기를 결정한다.

5) 현시별 녹색시간 분할

산출된 최적 신호주기를 현시별 교통량비에 따라 녹색시간을 분할하기 위하여 우선 주도로 및 부도로에 대한 유효녹색시간을 분할하고, 도로별 좌회전 유효녹색시간을 결정한 후, 일반차량과 버스의 직진의 유효녹색시간을 결정하는 <그림 5>의 과정에 따라 수행된다.



〈그림 5〉 현시별 녹색시간 분할

(1) 도로별 녹색시간 분할

산출된 주기에서 손실시간을 뺀 전체 유효녹색시간을 주도로 및 부도로 임계교통량비에 따라 분할한다.

$$g_A = \frac{\max(Y_1, Y_3)}{\sum Y_i} (C-L)$$

$$g_B = \frac{\max(Y_2, Y_4)}{\sum Y_i} (C-L)$$

여기서, g_A : 주도로의 전체 유효녹색시간

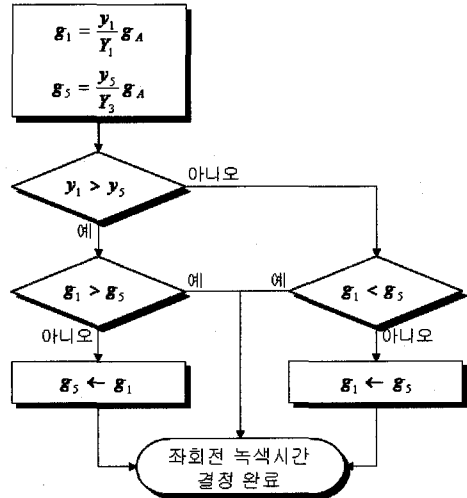
g_B : 부도로의 전체 유효녹색시간

(2) 좌회전 녹색시간 결정

중앙버스전용차로의 좌회전 녹색시간은 대향 직진 이동류뿐만 아니라 같은 방향 직진 버스 이동류에도 영향을 주므로 적절한 좌회전 시간의 배분이 중요하다. 특히 대향 좌회전에 비해 교통량비가 작지만 상충되는 직진 교통량이 적어 상대적으로 더 많은 녹색시간을 부여받는 좌회전 역전현상이 발생하면 직진 버스에 대한 녹색신호 부여에 불리하게 되므로 현시별 신호시간 분배의 조정이 필요하다.

주도로의 좌회전 녹색시간 결정은 기본적으로 주도로에 배분된 유효녹색시간을 상충군별 임계교통량비 중 좌회전 차로군의 교통량비가 차지하는 비중에 따라 분배함을 기본 원칙으로 하며 좌회전 역전현상을 방지하기 위해 다음 알고리즘에 따라 녹색시간을 결정한다.

부도로의 경우에도 같은 방법으로 부도로에 배분된 유효녹색시간을 임계교통량비에 대한 좌회전 차로군의 교통량비에 따라 녹색시간을 결정하며 좌회전 역전현상이 생길경우 이 알고리즘에 따라 보정해 준다.



〈그림 6〉 좌회전 역전현상 방지 알고리즘

(3) 일반차량 직진 녹색시간 결정

일반차량 직진의 경우 도로별로 배분된 유효녹색시간 중 대향 좌회전 차로군의 유효녹색시간을 제외한 시간이 일반차량 직진에 대한 유효녹색시간으로 배분된다.

주도로 : $g_2 = g_A - g_1$ $g_6 = g_A - g_5$

부도로 : $g_4 = g_B - g_3$ $g_8 = g_B - g_7$

(4) 버스 녹색시간 결정

주도로 버스전용차로에서 신호대기 중인 직진 버스는 주도로 일반차로가 동시신호로 운영되는 동안에도 동일방향 좌회전 차량과 상충이 발생하므로 직진 버스가 진행할 수 없도록 버스전용신호는 적색신호가 주어진다. 결국 직진 버스에 대한 버스전용신호의 녹색신호는 양방향 좌회전이 모두 종료된 후에 주어질 수 있으므로 주도로에 배분된 유효 녹색시간에서 양방향 좌회전 녹색시간 중 큰 시간을 제외한 시간이 버스전용신호의 유효녹색시간(g_{BUS})이 된다.

$$g_{BUS} = g_A - \max(g_1, g_5)$$

2. 적용사례

중앙버스전용차로 신호계산 알고리즘을 2004년 중앙버스전용차로가 도입된 강남대로의 양재역사거리로 예로 최적 신호주기 산정 및 현시분할 과정을 살펴본

다. 양재역사거리는 중앙버스전용차로 설치 전 남북방향 접근로에 대해 중첩현시로 운영되던 대표적 대형 교차로로서 전용신호의 도입을 통해 교차로 신호효율을 높일 수 있는 적절한 지점으로 판단하였다.

1) 분석대상 교차로 현황 (양재역사거리)

주도로인 강남대로의 양재역사거리 접근로는 직진 버스를 위한 중앙버스전용차로와 좌회전 2개 차로, 일반차량 직진 3개 차로로 이루어져있으며, 좌회전 버스는 좌회전 차로를 이용하도록 설계되었다.

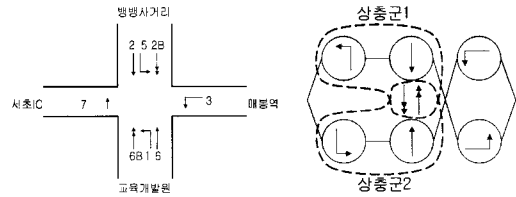
분석을 위한 설계교통량은 2005년 10월의 오전 첨두시(08:00~09:00)의 현장조사 자료이며, 일반차로의 승용차, 대형차량, 중앙버스전용차로의 버스로 구분하여 조사하였다. 조사 결과 남북방향 좌회전 이동류의 교통량비가 크게 차이나며, 전반적으로 남향보다 북향 접근로의 교통량이 많다. 현재 양재역사거리의 오전첨두시 신호운영은 TOD방식으로 신호주기 150초의 선행좌회전의 분리신호로 운영 중이다.

2) 최적 신호시간 계산

(1) 차로군 분류 및 상충군 설정

양재역사거리의 기하구조 상 전방향 우회전 차량이 교통섬에 의한 도류화 처리 되고 부도로 직진 차량은 지하차도만을 이용하도록 되어 있으므로 교차로 신호시간 결정에 영향을 주지 않는 것으로 볼 수 있다. 또한 주도

로의 중앙버스전용차로를 이용하는 직진 버스 이동류는 하나의 새로운 차로군을 형성한다. 이와 같은 교통 특성을 바탕으로 신호시간 결정을 위해 고려하여야 할 양재역사거리의 차로군을 살펴보면 (그림 8)와 같다.



<그림 8> 양재역사거리의 차로군 및 상충군

남북방향 각 접근로의 좌회전 차로군은 대향 접근로의 일반차량 직진 차로군과 중앙버스전용차로를 이용하는 직진 버스 차로군과 상충을 일으킨다. 그러므로 남북방향의 두 좌회전 차로군에 대해 각각 상충을 일으키는 직진 차로군들을 묶어 주도로의 상충군으로 설정한다.

(2) 차로군별 교통량비 추정

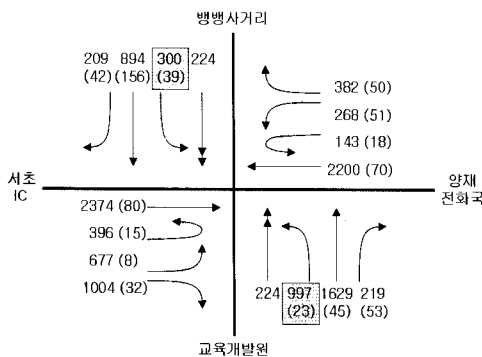
양재역사거리의 현장조사결과를 토대로 도로용량편람(2004)에 따라 차로군별 교통량비를 산정한다.

포화교통류율(S_0)은 다양한 제약 조건에 의한 영향을 배제한 이상적인 상황에서 전국 어디에서나 적용 가능한 값으로서 미국 HCM(2000)에서는 1,900pc phpl을, 국내의 도로용량편람(2004)은 2,200pcph pl을 일반적으로 사용한다. 본 연구에서는 우리나라의 도로용량편람 기준에 따라 2,200pcphgpl의 기본 포화교통류율에 차로 수, 중차량 혼합비율, 차로폭, 차로이용 등에 따른 보정계수를 적용하여 포화교통류율을 산정한다.

$$S_i = S_0 \times N_i \times f_{HV} \times f_W \times f_{LT}$$

- 여기서, S_i : 차로군 i 의 포화교통류율
- S_0 : 기본 포화교통류율 (2,200vphg)
- N_i : 차로군 i 의 차로 수
- f_{HV} : 중차량보정계수
- f_W : 차로폭보정계수
- f_{LT} : 좌회전보정계수

기본 포화교통류율은 승용차를 기준으로 하지만 실제 교통류에는 각종 차량이 혼재되어 있으므로 중차량 보정계수로 보정하여 실교통량으로 조사된 교통량을 직



1현시	2현시	3현시
44 (4,2)	62 (3)	31 (4)

<그림 7> 양재역사거리 교통량 및 신호운영 현황

접 이용한다. 교차로 분석 시 승용차 이외의 모든 중차량의 혼입율을 고려한 평균 승용차 환산계수로 1.8을 사용하여 각 이동류별 중차량보정계수를 산정한다.

$$f_{HV} = 1 / (1 + 0.8P_{HV})$$

여기서, P_{HV} : 중차량 혼합비율

차로폭보정계수(f_w)는 옆 차로 또는 옆 이동류에 의한 진행 방해와 운전자의 심리적 위축감으로 인한 포화교통류율의 변화를 반영한다. 차로폭 3m 이상을 기준으로 차로폭이 감소할수록 포화교통류율은 감소하게 된다.

좌회전 이동류는 차로이용 형태에 따라 전용좌회전, 공용좌회전 등으로 분류되며 차로이용 형태별로 좌회전의 직진환산계수 및 좌회전보정계수 산정식이 다르게 결정된다. 양재역사거리의 경우 각 접근로별로 두 차로 이상의 전용좌회전으로 차로군이 형성되어 있으므로 1.05의 직진환산계수를 사용하며 다음 식을 이용하여 좌회전보정계수를 산정한다.

$$f_{LT} = 1 / E_L$$

여기서, f_{LT} : 좌회전보정계수

E_L : 좌회전의 직진환산계수

조사된 교통량을 산정된 포화교통류율로 나누어 차로군별 교통량비를 결정한다.

중앙버스전용차로를 운행하는 직진 버스 차로군의 포화교통류율은 버스의 포화차두시간의 역수로 추정한다. 2005년 10월 5, 6일 양일간의 현장 조사 결과 남향으로 운행하는 버스의 평균 포화차두시간이 3.52초

〈표 2〉 차로군별 교통량비

현시 번호	교통량 (vph)	①	②	③	④	⑤	교통량비
1	1,020	2	0.98	0.94	0.95	3,870	0.26
2	1,050	3	0.89	1	-	5,899	0.18
3	319	2	0.89	1	0.95	3,716	0.09
5	339	2	0.92	1	0.95	3,838	0.09
6	1,674	3	0.98	1	-	6,462	0.26
7	685	2	0.99	1	0.95	4,152	0.17

① 차로수 ② 중차량보정계수 ③ 차로폭보정계수
④ 좌회전보정계수 ⑤ 포화교통류율(pcp/hg)

인 것으로 나타남에 따라 이를 이용하여 포화교통류율을 산정한 결과 1,023대/시로 결정되었다.

$$S_{BUS} = 3600 / h_{BUS}$$

여기서, S_{BUS} : 중앙버스전용차로포화교통류율

h_{BUS} : 버스의 포화차두시간 (3.52초)

또한 교통량 조사 결과 오전첨두시 중앙버스전용차로의 양방향 버스교통량이 시간당 224대로 동일하여 중앙버스전용차로의 교통량비는 양방향이 0.219로 동일하게 나타났다.

(3) 현시순서 및 임계차로군 결정

양재역사거리의 신호 효율을 최대로 할 수 있는 현시조합을 선택하고 임계교통량비를 최대로 하는 임계차로군을 결정한다. '양방 및 일반보호좌회전'으로 신호를 운영할 경우 상충군별 교통량비의 합이 최대가 되는 차로군 조합이 주도로의 임계차로군을 형성하며, 부도로의 경우 양방향 좌회전 차로군의 교통량비 중 큰 값이 부도로의 임계차로군을 형성한다.

〈표 3〉 양방 및 일반보호좌회전 임계차로군

상충군	차로군	교통량비의 합	임계차로군
1	1 + 2	0.347	-
	1 + 2B	0.307	-
	1 + 6B	0.307	-
2	5 + 6	0.442	-
	5 + 6B	0.483	○
	5 + 2B	0.483	-
부도로	3	0.165	○
	7	0.086	-

교차로 전체 임계교통량비 $\sum Y = 0.483 + 0.165 = 0.648$

'선행 및 후행보호좌회전'에서 주도로의 임계차로군은 각 방향 접근로의 좌회전 차로군과 대향 일반차량 직진 차로군의 조합 또는 양방향 좌회전 차로군과 중앙버스전용차로 직진 버스 차로군의 조합 중 교통량비의 합이 큰 경우가 되며 부도로의 임계차로군은 양방향 좌회전 차로군의 교통량비 중 큰 경우가 된다.

위에서 고려한 Dual-Ring 신호운영의 두 방식 중 교차로 전체의 임계교통량비를 더 낮게 나타내는 '양방 및 일반보호좌회전' 방식으로 운영하는 것이 교차로 효율을 더 높일 수 있는 방법이다.

〈표 4〉 선형 및 후행보호좌회전 임계차로군

	차로군 조합	교통량비의 합	임계차로군
주도로	A1 = 1 + 2	0.347	-
	A2 = 5 + 6	0.442	-
	A3=1+5+BUS	0.571	○
부도로	B1 = 3	0.165	○
	B2 = 7	0.086	-
교차로 전체 임계교통량비		$\sum Y = 0.571 + 0.165 = 0.736$	

(4) 주기결정

Webster 주기산정식에 의해 교차로의 적정신호주기를 산출한다. 부도로의 직진이 없으므로 교차로는 3현시로 운영되며, 각 현시별 손실시간은 4초라 가정할 때 현재 주도로 직진 현시 후 2초의 전적시간이 들어감으로 주기별 손실시간은 14초로가 된다.

$$C_{opt} = \frac{1.5 \times (3 \times 4 + 2) + 5}{1 - 0.648} = 75 (\text{초})$$

계산에 의한 최적 신호주기 75초는 교차로 전체의 지체시간을 최소화하는 값이기는 하나 실제 3현시 교차로에서 사용하기에 적절하지 않으므로 Webster 식에서 제시한 적정신호주기 범위인 $\frac{3}{4}C_{opt} \leq C \leq \frac{3}{2}C_{opt}$ 내에서 110초로 주기를 결정하였다.

(5) 현시별 녹색시간 분할

산출된 적정 신호주기에서 손실시간을 뺀 유효녹색시간을 교통량비에 따라 현시별로 분할하고 도로별 임계차로군의 임계화도비의 합에 따라 주도로와 부도로의 유효녹색시간을 배분한다.

$$g_A = \frac{0.483}{0.648} (110 - 14) = 72 (\text{초})$$

$$g_B = \frac{0.165}{0.648} (110 - 14) = 24 (\text{초})$$

도로별로 배분된 유효녹색시간 중 접근로별 좌회전에 대한 유효녹색시간을 산출한다. 부도로의 경우 좌회전으로만 이루어져 있으므로 부도로에 배분된 유효녹색시간 24초가 좌회전 차로군에 배분된다.

$$g_1 = \frac{0.088}{0.347} \times 72 = 18 (\text{초})$$

$$g_5 = \frac{0.264}{0.483} \times 72 = 39 (\text{초})$$

$$g_3 = g_7 = 24 (\text{초})$$

주도로 좌회전에 배분된 유효녹색시간과 차로군별 교통량비를 비교해 보면 교통량비가 더 큰 방향에 더 많은 녹색시간이 배분되었으므로 좌회전 역전현상은 발생하지 않았다.

주도로에 배분된 유효녹색시간 중 좌회전에 배분된 유효녹색시간을 뺀 나머지가 반대방향 일반차량 직진에 대한 유효녹색시간으로 배분되며, 양방향 좌회전 유효녹색시간 중에 큰 값을 뺀 시간이 직진 버스를 위한 버스전용신호의 유효녹색시간으로 배분된다.

$$g_2 = 72 - 18 = 54 (\text{초})$$

$$g_6 = 72 - 39 = 33 (\text{초})$$

$$g_{BUS} = 72 - 39 = 33 (\text{초})$$

신호시간 분배 결과 중앙버스전용차로에 버스전용신호를 설치하였을 경우 주도로 양방향 좌회전 차로군 간의 교통량비의 차이를 활용하여 중첩현시 운영이 가능하다. 이는 현재 신호주기 150초로 운영되는 것을 110초로 줄여서 운영할 수 있게 하며 신호주기 감소로 인한 지체시간 감소 효과를 기대할 수 있다.

양재역사거리 신호개선 안 (주기 110초)		
39 (4,2)	34 (3)	24 (4)
←	↓ ↓	↘
↙	↑ ↑	↗
18 (4,2)	55 (3)	24 (4)

〈그림 9〉 양재역사거리 신호시간 계획

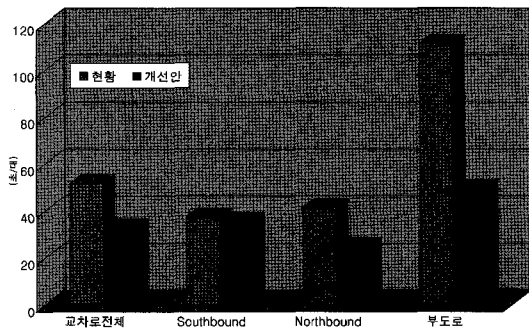
3. 효과분석

버스전용신호를 이용하여 최적화된 신호운영 방안을 VISSIM 시뮬레이션을 통해 현재 신호운영 현황과 비교한 결과 중첩현시 운영으로 인한 신호주기 감소 효과로 교차로 전체 및 일반차량 접근로의 평균지체시간이 감소하며 특히 중첩현시가 구현되는 NB의 지체가 크게 감소함을 볼 수 있다.

주목할 점은, 중앙버스전용차로의 버스 차로군이 직

진의 입계차로군을 형성하므로 버스에 대해서는 큰 변동이 없는 것으로 나타난 반면, 중첩현시 구현으로 필요 이상의 SB 좌회전을 NB 일반차로 직진에 배분하여 NB 접근로의 지체를 크게 감소시키는 효과를 나타내었다. 이는 중앙버스전용차로 도입으로 악화된 일반차량의 신호여건을 회복하고자 한 버스전용신호의 의도와 특징을 보인 것으로 판단할 수 있다.

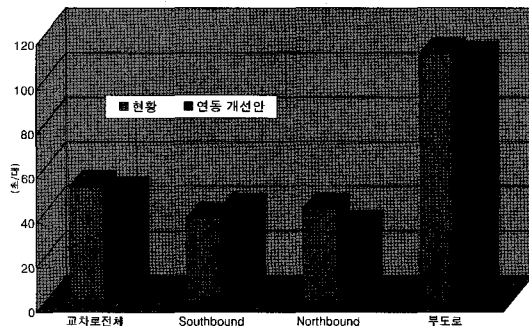
또한 중첩현시 구현으로 인한 신호주기 감소로 부도로의 대기행렬을 감소시켜 부도로의 지체 개선 효과도 큰 것으로 분석되었다.



〈그림 10〉 양재역사거리 평균지체(주기 최적화시)

이번에는 연동을 고려하여 신호주기를 강남대로 측에 고정시켜(150초) 신호계획을 수립하였다. 그 결과 주기최적화와 같이 NB 접근로의 지체는 크게 감소하였으나 교차로 전체의 지체는 〈그림 11〉와 같이 상대적으로 적게 나타났다.

즉, 주기의 최적화를 위해서는 중앙버스전용차로 시행 측 전방에서 버스전용신호를 활용한 중첩현시를 도입함이 바람직하며, 측단위의 정체해소 효과가 극대화될 수 있을 것으로 기대된다.



〈그림 11〉 양재역 사거리 평균지체 (연동고려 주기 최적 미시행)

M. 결론 및 향후 연구과제

현재 서울 및 각급 지자체에서 본격적으로 도입중인 중앙버스전용차로로 인해 대중교통서비스는 증진되고 있으나 교차로 신호 최적화 대안이 줄어들었음은 간과해서는 안 될 것이다.

이에 직진 이동류와 좌회전 이동류에 대해 분리신호로 운영 중인 중앙버스전용차로 구간의 신호교차로를 버스전용신호를 활용한 Dual-Ring 방식 신호최적화 방안을 제시하였다. 이 경우 동시신호 및 중첩현시의 구현을 통해 교통 특성에 따른 다양한 신호운영 전략 수립으로 신호주기 감소 및 교차로 지체시간 감소 등의 교차로 이용효율 증대 효과가 있을 것으로 기대된다.

버스전용신호의 운영은 버스의 운행 자체에 이익을 주는 것이 아니라 중앙버스전용차로로 인한 신호운영 상의 제약을 해소하여 다양한 신호운영 전략 수립이 가능하게 함으로써 일반차로의 불필요한 지체를 감소시키고 교차로 신호 효율을 향상시키는 것을 목적으로 한다. 일반적으로 중앙버스전용차로의 교통량비가 일반차로의 직진 차로군의 교통량비보다 적기 때문에 본 연구에서 제시한 방법으로 교차로의 신호시간을 계산할 경우 신호주기 중 직진 버스를 위해 할당되는 녹색시간의 비가 분리 신호에서의 버스 직진의 녹색시간 비보다 작게 나타날 수 있다. 이러한 경우 전체 교차로 측면에서 최적화가 될 수는 있으나 중앙버스전용차로의 연동 폭이 줄어들 우려도 있다. 이에 대한 대처방안으로 중앙버스전용차로의 교통량 및 포화교통류를 보정 과정에서 승용차에 대한 버스의 비중 산정 시 버스의 도로이용효율 및 차량당 시간가치 등을 이용하여 보정함으로써 '차량당 지체'에 의존하는 현 기법을 '이동승객과 시간가치의 경제성측면에서 최적화하는 방안의 연구가 필요할 것이며, 버스전용신호를 활용한 버스우선신호 기법에 대한 연구 및 타당성도 검토해야 할 시점이라 판단된다.

참고문헌

1. 대한교통학회(2004), "도로용량편람", pp.277~292.
2. 도철웅(1999), "교통공학원론", 청문각, pp.447~456.
3. 이영인(2004), "중앙버스전용차로에서 신호제어전략에 관한 연구", 환경논총 제42권, 서울대학교 환경대학원, pp.95~106.

4. 김균조,김영찬(2004), “중앙버스전용차로제 실시에 따른 신호운영 방안 연구”, 서울시립대: 석사논문.

5. 구지선,김영찬(2004), “버스우선신호 개발 및 평가”, 서울시립대: 석사논문.

6. 이주진,김영찬(2006), “버스우선신호 기법 및 전략에 관한 연구”, 서울시립대: 석사논문.

7. 서울시 교통국(1999), “버스게이트 개선방안”.

8. L.J. Pignataro, (1973), “Traffic Engineering: theory and practice”, Prentice Hall.

9. William R. McShane, Roger P. Roess and Elena S. Prassas (2003), “Traffic Engineering: Third Edition”, Prentice Hall.

10. TRB(2000), “Highway Capacity Manual”

11. ITS America 2002). An Overview of Transit Signal Priority.

12. Kiel Ova, Ayman Smadi (2001), “Evaluation of Transit Signal Priority Strategies for small-medium cities”.

✉ 주 작 성 자 : 김보겸

✉ 교 신 저 자 : 김승일

✉ 논문투고일 : 2006. 4. 21

✉ 논문심사일 : 2006. 6. 16 (1차)

2006. 7. 13 (2차)

✉ 심사판정일 : 2006. 7. 13

✉ 반론접수기한 : 2006. 12. 31