

도시부 간선도로의 고정식 트램 우선신호를 위한 교통신호운영 전략

Traffic Signal Control Strategy for Passive Tram Signal Priority on City Arterial

정 영 제* 김 영 찬** 김 대 호***
(Young-Je Jeong) (Young-Chan Kim) (Dae-Ho Kim)

요 약

본 논문은 도시부 간선도로의 트램을 위한 고정식 우선신호 전략으로 트램의 연동모형 MAXBAND MILP-Tram을 제시하였다. MAXBAND MILP-Tram은 전통적인 간선도로 연동모형인 MAXBAND를 기반으로 하고 있으며, 중앙트램 전용 차로의 트램과 일반차로의 승용차 모두를 위한 이중화된 연동폭을 산정할 수 있다. 본 모형은 일반차량 대비 낮은 속도와 정류장 정차시간이 포함되는 통행시간을 가지는 트램 통행특성을 고려하여 연동폭을 산정할 수 있다. 중앙트램전용 차로에서는 현시순서에 따라 트램의 녹색시간이 크기를 달리하게 되며, 이를 제약조건으로 표현하였다. 미시적 시뮬레이션 효과분석을 수행하여 트램 연동모형의 효과분석을 위한 트램과 교차로의 제어지체와 사람당 제어지체 변화를 확인하였다. MAXBAND MILP-Tram으로 산출된 신호시간을 VISSIM에 적용한 결과 MAXBAND MILP-2 대비 트램의 차량당 평균 제어지체는 57%가 감소된 결과를 나타내었으나, 교차로 평균 제어지체의 경우 일반차량의 연동폭이 감소함에 따라 MILP-Tram은 MILP-2 대비 18% 증가된 결과를 나타내었다. 또한 일반차량의 교통량 변화를 이용한 민감도 분석에서는 과포화 상태에 근접함에 따라 MAXBAND MILP-Tram과 같이 윗셋과 현시순서만을 변경시키는 우선신호 기법은 사람당 지체를 감소시킬 수 있는 유용한 수단임을 확인하였다.

Abstract

This research proposes new tram signal coordination model, called MAXBAND MILP-Tram for a passive tram signal priority strategy. The proposed model was formulated based on the MAXBAND model that was a traditional arterial signal optimization model. The model could calculate the bandwidth solutions for both general-purpose-lane traffic and median-tram-lane traffic. Lower progression speed are applied for the tram traffic considering lower running speed and dwell time at the stations. A phase sequence procedure determines the green times and left-turn phase sequences for tram traffic in median tram lane. To estimate the performance of the MILP-Tram model, the control delay of trams were estimated using the micro simulation model, VISSIM. The analysis results showed 57 percent decrease of the tram compared to the conventional signal timing model. The delay for car, however, increased 18 percent. The sensitivity analysis indicated that the passive tram signal priority strategy using the offset and phase sequence optimization was effective in reducing the person delay under the congested traffic condition.

Key words : 트램, 고정식 우선신호, 트램 연동, 연동폭 최대화, MAXBAND Model

* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 박사과정

** 공저자 및 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

*** 공저자 : 경기개발연구원 교통정책연구부장

† 논문접수일 : 2010년 12월 30일

† 논문심사일 : 2011년 2월 7일

† 게재확정일 : 2011년 2월 8일

수식표기의 정의

| 변수명 | 변수설명 | 형태 |
|---------------------------------|---|----|
| i | : 교차로 번호 | 상수 |
| n | : 교차로 개수 | 상수 |
| S_i | : i 번째 교차로 | - |
| b, \bar{b} | : 진출, 진입방향의 일반차량 연동폭(초/주기) | 변수 |
| pb, \overline{pb} | : 진출, 진입방향의 트램 연동폭(초/주기) | 상수 |
| w_i, \overline{w}_i | : 진출, 진입방향 i 교차로 일반차량 적색시간 오른쪽 끝 부터 연동폭 왼쪽 끝까지 시간거리(초/주기) | 변수 |
| pw_i, \overline{pw}_i | : 진출, 진입방향 i 교차로 트램 적색시간의 오른쪽 끝 부터 연동폭 왼쪽 끝까지 시간거리(초/주기) | 변수 |
| r_i, \overline{r}_i | : 진출, 진입방향의 i 번째 교차로의 일반차량 적색시간(초/주기) | 상수 |
| pr_i, \overline{pr}_i | : 진출, 진입방향의 i 번째 교차로의 트램 적색시간(초/주기) | 상수 |
| $\delta_i, \overline{\delta}_i$ | : i 번째 교차로의 진출 및 진입방향의 좌회전 현시 순서 | 변수 |
| L_i, \overline{L}_i | : i 번째 교차로의 진출 및 진입방향의 좌회전 현시 길이(초/주기) | 상수 |
| $\phi(i, i+1)$ | : $i, i+1$ 번째 교차로간 진출방향의 일반차량 적색시간 중심간 거리(초/주기) | 변수 |
| $\overline{\phi}(i, i+1)$ | : $i, i+1$ 번째 교차로간 진입방향의 일반차량 적색시간 중심간 거리(초/주기) | 변수 |
| $m(i, i+1)$ | : $i, i+1$ 번째 교차로의 일반차량 loop integer 변수 | 변수 |
| $p\phi(i, i+1)$ | : $i, i+1$ 번째 교차로간 진출방향의 트램 적색시간 중심간 거리(초/주기) | 변수 |
| $p\overline{\phi}(i, i+1)$ | : $i, i+1$ 번째 교차로간 진입방향의 트램 적색시간 중심간 거리(초/주기) | 변수 |
| $pm(i, i+1)$ | : $i, i+1$ 번째 교차로의 트램 loop integer 변수 | 변수 |
| $qm(i, i+1)$ | : $i, i+1$ 번째 교차로의 진출방향 일반차량과 트램 loop integer 변수 | 변수 |
| $rm(i, i+1)$ | : $i, i+1$ 번째 교차로의 진입방향 일반차량과 트램 loop integer 변수 | 변수 |
| Δ_i | : i 번째 교차로의 진출 및 진입방향의 일반차량 적색시간 중심간 윗셋(초/주기) | 변수 |
| α_i | : i 번째 교차로의 좌회전 현시순서에 따른 트램의 적색시간 범위 결정을 위한 변수 | 변수 |
| $\tau_i, \overline{\tau}_i$ | : i 번째 교차로의 진출 및 진입방향의 일반차량 초기 대기행렬 해소시간(초/주기) | 변수 |
| d_i, \overline{d}_i | : i 번째 링크의 진출 및 진입방향 거리(meter) | 변수 |
| t_i, \overline{t}_i | : i 번째 링크의 진출 및 진입방향의 일반차량 통행시간(초/주기) | 변수 |
| pt_i, \overline{pt}_i | : i 번째 링크의 진출 및 진입방향의 트램 통행시간(초/주기) | 변수 |
| f_i, \overline{f}_i | : i 번째 링크의 진출 및 진입방향 일반차량 속도범위의 상한(m/s) | 상수 |
| e_i, \overline{e}_i | : i 번째 링크의 진출 및 진입방향 일반차량 속도범위의 하한(m/s) | 상수 |
| pf_i, \overline{pf}_i | : i 번째 링크의 진출 및 진입방향 트램 속도범위의 상한(m/s) | 상수 |
| pe_i, \overline{pe}_i | : i 번째 링크의 진출 및 진입방향 트램 속도범위의 하한(m/s) | 상수 |
| h_i, \overline{h}_i | : i 번째 링크의 진출 및 진입방향 일반차량 속도변화범위의 상한(m/s) | 상수 |
| g_i, \overline{g}_i | : i 번째 링크의 진출 및 진입방향 일반차량 속도변화범위의 하한(m/s) | 상수 |
| ph_i, \overline{ph}_i | : i 번째 링크의 진출 및 진입방향 트램 속도 변화범위의 상한(m/s) | 상수 |
| pg_i, \overline{pg}_i | : i 번째 링크의 진출 및 진입방향 트램 속도 변화범위의 하한(m/s) | 상수 |
| p_i, \overline{p}_i | : i 번째 링크의 진출 및 진입방향 정류장 존재여부 | 상수 |
| st_i, \overline{st}_i | : i 번째 진출 및 진입방향 정류장의 정차시간(초) | 상수 |
| k | : 진출방향 대비 진입방향의 일반차량 연동폭 크기의 비율 | 상수 |
| C_2, C_1 | : 주기 길이의 하한 및 상한(초) | 상수 |
| z | : 주기 길이의 역수(1/주기) | 변수 |

1. 서론

저탄소 녹색성장이란 환경의 지속 가능성을 고려한 경제적 성장의 유지를 의미하며, 세계적인 에너지 및 기후변화에 관한 협약에 따라 저탄소 녹색 성장이 새로운 가치로 떠오르면서 전체 탄소배출의 상당부분을 차지하고 있는 교통부문 또한 친환경 교통수단의 도입과 운영에 대한 관심이 증대되고 있다. 이와 관련하여 2010년 1월 공포된 저탄소 녹색성장 기본법에서는 환경의 지속 가능성을 유지하기 위해 에너지와 자원의 효율적 사용을 강조하고 있다. 저탄소 녹색성장을 위한 주요 산업으로 교통물류 등을 지적하고 있으며, 보편적 환경의 가치를 보존하면서 도시와 건물, 교통 등 기반시설을 녹색 성장에 부합하도록 재편할 것을 요구하고 있다.

세계에너지기구(IEA)의 보고에 따르면 세계 이산화탄소 배출량 중 교통 부문이 23%를 차지하고 있으며, 그 총량도 290억톤에 이르는 것으로 파악되고 있다[1]. 국내 상황도 이와 유사하여 교통부문의 에너지 소비는 2006년 국내 에너지 소비의 21%에 달하는 37백만톤을 기록하였으며, 이중 도로부문이 전체 교통부문의 79%를 차지하고 있다. 또한 국내 교통부문 온실가스 배출량은 2004년을 기준으로 약 1억톤 정도로 추정되고 있으며, 이를 2008년 9월 탄소거래가격 기준으로 환산할 경우 약 4조 5천억원의 엄청난 경제적 가치를 지닌다. 이중 도로교통이 86백만톤으로 80% 이상을 차지하고 있어 도로부문의 온실가스 배출이 심각하다[2]. 국내에서의 온실가스 대부분은 자동차 교통 위주의 편중된 수송분담에서 기인한다. 친환경 녹색성장을 위한 교통체계의 재편을 위해 철도교통은 필수 불가결한 요소로 고려되어 지고 있으며, 국가적 교통체계 또한 철도 중심으로 옮겨가고 있는 추세이다.

철도교통 중 도시부 도로교통을 대체할 수 있는 경전철의 궤도교통으로는 트램, 트롤리 등이 있으며, 이들은 다양한 명칭으로 불리고 있으나 모두 경량의 궤도를 이용하는 측면에서 경전철(Light Rail Transit)의 하나로 분류될 수 있다[3]. 국내에서는 서울, 울산, 수원, 창원, 등 다수의 지자체에서 간선도

로와 노면을 공유하는 형태의 경전철 도입을 검토 중에 있다. 국내에서는 전통적으로 도로교통을 위한 신호운영만이 이루어져 왔으며, 신호운영 체계 변화를 위한 본격적 연구가 필요한 상황이다.

일반적으로 대중교통을 위해 사용되는 우선신호 전략은 고정식(Passive)과 능동식(Active) 우선신호로 구분할 수 있다[4-6]. 이중 고정식 우선신호 전략은 주기길이를 감소시키는 기법, 우선현시를 분할하는 기법, 우선현시를 증가시키는 기법, 비우선현시의 차량의 통행을 제한하는 기법이 일반적으로 사용되고 있다[7-9]. 국내 간선도로는 폭원 25m 이상의 광로·대로가 대다수로 부방향 현시가 보행자 신호시간에 의해 결정되는 상황이다. 이때 우선 현시의 일시적 변동을 위해 여유녹색시간(Variable Green Time)을 필요로 하는 능동식 우선신호의 적용에는 한계가 있다. 신호시간의 계획에서 대중교통을 고려하기 위한 방법으로 고정식 우선신호가 적합하다.

국내에 경전철과 가장 유사한 시설로 BRT가 있으며, 중앙버스 전용차로의 형태가 다수이다. 그러나 BRT 신호운영은 버스의 통행특성을 고려하지 못하고 있다. 국내 경전철은 승객수요와 궤도공간 등을 고려하여 주간선도로에 설치가 예상된다. 도심 주요 간선도로는 일정수준 이상의 혼잡이 지속적으로 발생되고 있어 부방향 현시의 Skip 또는 조기종결의 강제적 신호운영이 이뤄지는 우대신호(Preemption) 및 능동식 우선신호(Active Priority) 보다 고정식 우선신호의 (Passive Priority) 형태가 적합하며, 경전철 우선신호가 설치되더라도 간선도로 기능유지를 위해서는 일반차량의 연동유지가 필수적이다. 국내 경전철 설치의 특수성을 고려하기 위해 본 연구에서는 간선도로에서의 경전철 운영을 위한 교통신호운영 방안으로 트램의 연동을 위한 고정식 우선신호 전략을 제시하였다. 트램의 우선신호와 함께 간선도로 일반교통류의 연동상태를 고려함으로써 대중교통 우선신호의 적용으로 인한 일반교통류의 충격을 최소화 할 수 있도록 하였다.

국내에는 우선신호 관련 용어가 명확히 정의되어 있지 않은 관계로 <표 1>과 같이 Preemption, Priority의 정의와 한글용어를 정립하였다.

〈표 1〉 대중교통 우선신호 관련 용어의 정립
 〈Table 1〉 Definition of transit signal priority terms

| 우선신호 관련 용어 | 정 의 | 연구의 용어정립 |
|-------------------------|---|----------|
| Signal Preemption | 현시를 강제로 종료하여 대중교통 현시를 제공하는 방식 | 우대신호 |
| Signal Priority | 정상 현시의 운영상황을 고려하여 대중교통에 교차로 통행의 우선권을 주기 위한 대중교통 현시의 제공 방식 | 우선신호 |
| Active Signal Priority | 대중교통의 검지 시에만 우선신호를 요청하여 대중교통에 유리한 신호시간을 일시적으로 적용하는 방식 | 능동식 우선신호 |
| Passive Signal Priority | 대중교통의 운영패턴을 이용하여 대중교통에 유리한 신호시간을 고정적으로 적용하는 방식 | 고정식 우선신호 |

II. 기존 연구 고찰

대중교통 우선신호는 1960년대 유럽에서 최초로 적용되기 시작했으며, 미국의 경우 LA에서 1970년대 초부터 적용되기 시작했다[10]. 현재 적용되고 있는 대중교통 우선신호의 전략들은 1990년대의 연구들이 주류를 이루고 있으며[11], 본 연구에서는 고정식 우선신호를 사람당 지체를 이용한 방식, 신호시간을 조정하는 방식, 대중교통을 연동시키는 방식으로 구분하여 기존 연구고찰을 수행하였다.

첫째, 고정식 우선신호의 가장 대표적인 유형은 신호최적화 과정에서 사람당 지체(Person Delay) 및 통과 인원수(Person Throughput)를 고려하여 대중교통 현시에 가중치를 부여하는 방식이 있다. 지체와 정지수 최소화를 목적함수로 하는 신호최적화 도구인 Transyt-7F를 이용하여 버스의 주행특성을 고려한 신호운영에 관한 연구가 제시된바 있다[12].

Transyt 모형의 목적함수는 식 (1)과 같이 지체와 정지횟수를 기준으로 하며, 개별 링크에 대한 가중치를 고려하기 위한 W 및 KW 를 적용할 수 있다. 이때 대중교통 현시에 대해 재차인원을 이용하여 가중치를 결정할 수 있으며, 신호시간 최적화 분석 결과는 대중교통 지체는 감소하나 일반승용차의 지체는 증가시키게 된다[4]. Transyt 모형을 이용하여 대중교통 현시에 가중치를 적용하는 유형의 고정식 우선신호는 실시간 신호제어시스템 SCOOT에서 적용된바 있다[13].

$$PI = \sum_{j=1}^p (W_j \times Delay_j + KW_j \times Stops_j) \quad (1)$$

- PI = Performance Index
- p = 전체 링크 개수
- $Delay_j$ = 링크 j 의 지체
- W_j = 링크 j 의 지체 가중치
- $Stops_j$ = 링크 j 의 정지회수
- KW_j = 링크 j 의 정지회수 가중치

둘째, 고정식 우선신호의 또 다른 유형으로 대중교통에 유리한 신호시간으로 조정하는 방식이 있다. 이는 대중교통의 통행특성을 반영하여 주기길이를 조정하는 방식, 현시를 분할하여 교통유율이 낮은 대중교통에 대해 현시 서비스 빈도를 높이는 방법, 대중교통 현시길이를 확대하는 방법, 일반차량을 미터링하는 방법 등이 있다[4, 9].

셋째, 대중교통의 정류장 정차시간을 고려하여 대중교통을 연동대상으로 하는 고정식 우선신호 전략이 있다. 대중교통은 정류장 정차시간과 일반차량 대비 낮은 속도로 승용차 기준의 연동 서비스에 포함되기 되기 어려우며, 이때 정류장의 위치를 조정하여 정류장 정차시간을 고려한 우선신호를 제공할 수 있다[4].

대표적인 고정식 우선신호 기법들 이외에 대중교통의 연동을 위해 신호최적화 도구를 이용한 연구들이 있으며, 대중교통의 연동을 위해 신호시간을 조정하는 방법들이 적용되고 있다.

이때 연동폭에 영향을 미치지 않는 여유녹색시간(Slack Green)을 조정하여 일반차량의 연동폭을 보완하는 방법을 제시된바 있으나, 일반차량의 소통개선에는 한계가 있다[14]. 이외 버스의 연동을 위해 Robust 알고리즘을 이용하여 버스의 교차로 도착 분포를 이용한 시뮬레이션 모형이 개발된바 있으며, 정류장 정차시간은 정규분포임을 가정하여 버스 기반 연동계획이 제시된바 있다[15].

경전철의 고정식 우선신호 적용사례로서 미국 캘리포니아의 San Diego Trolley는 다음과 같은 신호 운영 방법을 적용 중에 있다[16].

- ① 트롤리는 정류장에서 하류부 교차로의 녹색신호 시작 때 까지 정차하여 대기한다.
- ② 트롤리는 하류부 교차로의 녹색신호가 시작 이후 5초 이내에 정류장을 출발한다.
- ③ 정류장에서 지정된 5초 이내에 출발하지 못하는 경우 정류장에서 다음 녹색신호를 기다린다.
- ④ 정상적인 시간 내에 정류장을 출발한 트롤리는 교차로를 정차 없이 통과하여 다음 정류장 까지 주행하게 된다.

본 사례에서는 트롤리의 원활한 신호운영을 위해 신호교차로는 2현시 운영을 권장하고 있으며, 트롤리의 운영원칙과 고정식 신호운영이 결합된 방식에 해당한다.

고정식 우선신호에 대한 기존 이론 고찰 결과, 대중교통에 유리한 신호시간을 작성하기 위해 현시의 크기와 연동을 조정하는 등의 방법을 적용하고 있으나, 간선도로에서 우선신호 적용 시 일반차량의 용량감소는 불가피한 현상이다. 현재까지의 우선신호 방법들은 대중교통의 통행우선권 확보에만 집중하고 있으며, 일반차량의 용량개선은 실시간 신호제어와 우선신호의 결합 등 외부적인 요소를 이용하여 왔다[17]. 본 연구에서는 대중교통 중 도로중앙에 전용의 궤도로 운영되는 트램을 대상으로 고정식 우선신호를 적용하기 위한 트램의 연동모형을 제시하고자 하며, 트램과 일반차량 모두의 연동을 고려함으로써 고정식 우선신호로 인해 영향을 받게 되는 일반차량의 소통을 개선하기 위한 방법을 제시하고자 한다.

Ⅲ. 트램의 연동모형

트램 연동모형을 위해 간선도로 연동폭 최대화를 위한 혼합정수선형계획(Mixed Integer Linear Program) 문제에 해당하는 MAXBAND를 이용하였다. MAXBAND는 MILP-1을 이용하여 양방향 동일한 크기의 연동대역폭을 확보할 수 있으며, MILP-2를 이용하여 연동대역폭 최대화를 위한 방향별 특정 비율의 연동대역폭과 연동속도, 주기길이, 좌회전 현시의 순서 등을 결정할 수 있다[18]. 본 연구에서는 중앙트램 전용차로의 연동을 고려하여 MILP-2를 개량한 모형을 제시하였으며, MILP-2에서 최적화가 가능한 변수와 더불어 트램의 연동대역폭을 고려할 수 있도록 하는 MAXBAND MILP-Tram을 제시하였다. 연동폭, 적색시간, 연동폭과 적색시간 시작점의 거리 등 본 모형에서 적용되는 시간의 의미하는 변수와 상수는 주기길이에 대한 비율로 표현된다.

1. MAXBAND MILP-2 모형

MAXBAND MILP-2는 <그림 1>과 같이 노드 i 로 정의된 총 n 개의 신호교차로 S_i 에 대해 연동대역폭을 산정할 수 있으며, 각각의 변수 및 제약식에 대한 정의는 다음과 같다.

선형계획 문제를 위한 제약식 중 진출(outbound) 및 진입(inbound)방향의 연동폭은 각각 b , \bar{b} 로 표현되어 식 (2)와 같이 교차로 S_i 에서 연동폭 시작지점과 적색시간의 간격을 의미하는 w_i , \bar{w}_i 와 적색시간 r_i , \bar{r}_i 으로 표현될 수 있으며, 이는 전체 녹색시간 범위에서 연동대역폭과 적색시간과의 간격이 모두 수용되어 저야함을 의미한다.

$$w_i + b \leq 1 - r_i \tag{2a}$$

$$\bar{w}_i + \bar{b} \leq 1 - \bar{r}_i \tag{2b}$$

다음은 loop integer 제약식으로 교차로 S_i , S_{i+1} 의 적색시간 중심간 거리는 진출(outbound) 및 진입(inbound)방향이 동일함을 이용하여 식 (3)과 같이

주기의 정수배로 표현될 수 있다. 교차로 S_i, S_{i+1} 에서 $\phi, \bar{\phi}$ 는 진출 및 집입방향 적색시간의 중심간 거리는 의미하며, Δ_i 는 적색시간 윗셋을 의미한다. 적색시간 중심간 거리 $\phi, \bar{\phi}$ 를 w_i, \bar{w}_i 와 r_i, \bar{r}_i 를 이용하여 표현하여 직접적인 모형 적용이 가능하다.

$$\phi(i, i+1) + \bar{\phi}(i, i+1) + \Delta_i - \Delta_{i+1} = m(i, i+1) \quad (3)$$

MAXBAND는 연동폭 크기와 상하류부 교차로간 윗셋, 링크별 통행시간, 링크별 통행시간의 변화를 제약조건으로 하여 연동폭을 최대화 하기 위한 신호시간을 계획이 가능하다. MAXBNAD는 선형계획 모형으로 수식의 간결함으로 현장 적용이 용이하며, 연동폭을 최대화 하기 위해 좌회전 현시순서를 최적화가 가능하며, 이중 MILP-2는 MAXBAND version 3.1에서 휴리스틱한 방법의 최적화 기법의 적용 전까지 알고리즘의 핵심사항 이다[18].

MAXBAND MILP-2 Find $b, \bar{b}, z, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i, \delta_i, \bar{\delta}_i, m_i$

$$\text{MAX } (b + k\bar{b})$$

subject to

$$(1-k)\bar{b} \geq (1-k)b$$

$$1/C_2 \leq z \leq 1/C_1$$

$$w_i + b \leq 1 - r_i; i = 1, \dots, n$$

$$\bar{w}_i + \bar{b} \leq 1 - \bar{r}_i$$

$$(w_i + \bar{w}_i) - (w_{i+1} + \bar{w}_{i+1})$$

$$+ \delta_i L_i - \bar{\delta}_i \bar{L}_i - \delta_{i+1} L_{i+1} + \bar{\delta}_{i+1} \bar{L}_{i+1}$$

$$= m_i + (r_{i+1} - r_i) + (\tau_i + \bar{\tau}_i) - (t_i + \bar{t}_i); i = 1, \dots, n-1$$

$$(d_i/f_i)z \leq t_i \leq (d_i/e_i)z; i = 1, \dots, n-1$$

$$(\bar{d}_i/\bar{f}_i)z \leq \bar{t}_i \leq (\bar{d}_i/\bar{e}_i)z; i = 1, \dots, n-1$$

$$(d_i/h_i)z \leq (d_i/d_{i+1})t_{i+1} - t_i \leq (d_i/g_i)z; i = 1, \dots, n-2$$

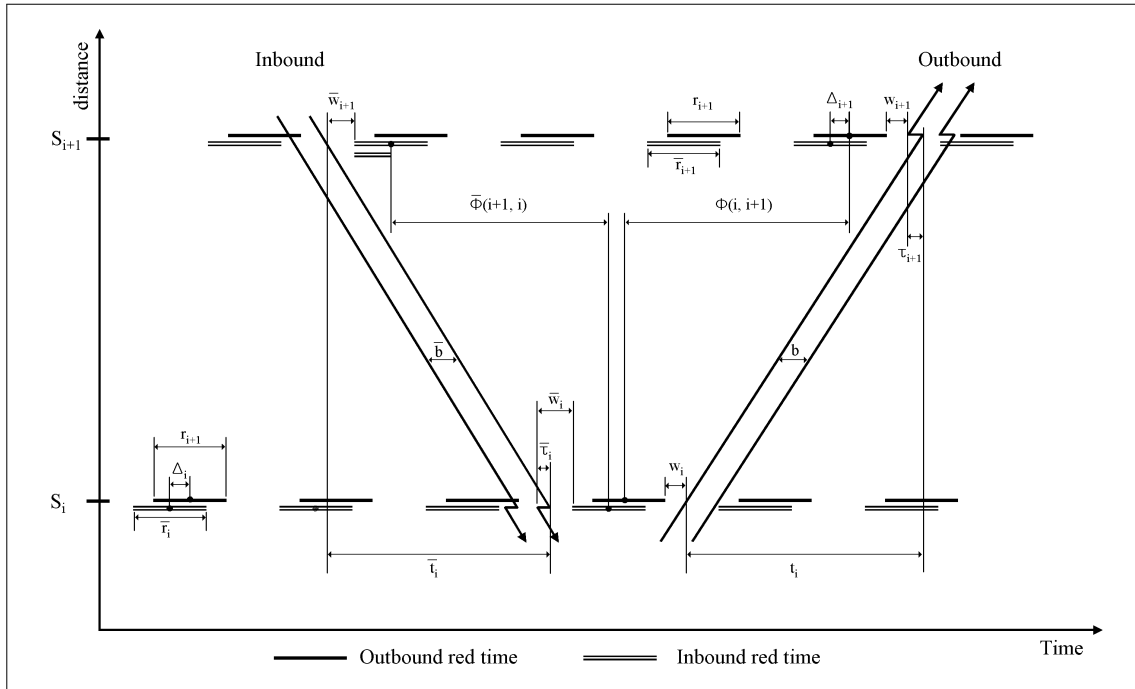
$$(\bar{d}_i/\bar{h}_i)z \leq (\bar{d}_i/\bar{d}_{i+1})\bar{t}_{i+1} - \bar{t}_i \leq (\bar{d}_i/\bar{g}_i)z;$$

$$i = 1, \dots, n-2$$

$$b, \bar{b}, z, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i \geq 0$$

m_i ; integer

$\delta_i, \bar{\delta}_i$; binary variable (0/1)



〈그림 1〉 MAXBAND MILP-2 모형을 위한 시공도
 〈Fig. 1〉 Time-space diagram for MAXBNAD MILP-2 model

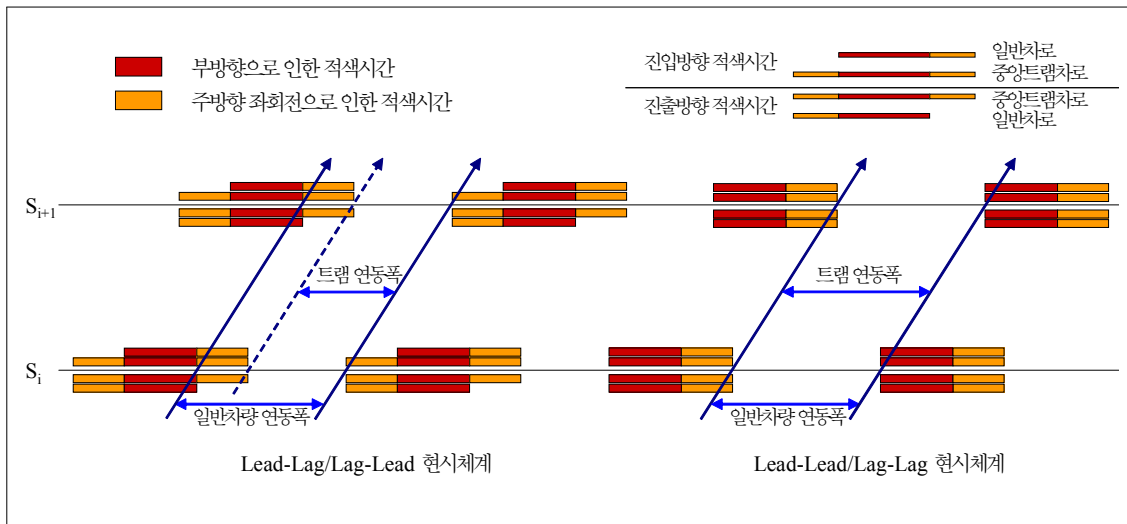
2. 트램의 고정식 우선신호를 위한 연동모형

간선도로에 중앙트램 전용궤도가 설치되는 경우 MAXBAND를 이용한 연동폭 최대화를 위한 신호 최적화를 위해 다음의 사항들이 고려되어야 한다.

첫째, 현시체계에서 동일한 베리어에 존재하나 일반차량 좌회전현시와 트램 직진현시가 중첩이 이루어질 수 없다. 일반차량과 트램의 녹색시간은 좌회전 현시순서에 따라 <그림 2>와 같이 서로 다른 녹색시간 트기를 가질 수 있다. 둘째, 트램은 정류장 정차시간으로 인해 연동을 위해서는 통행시간에 정차시간이 포함되어야 한다. 셋째, 트램은 일반적으로 저속의 차량 1대가 주행함에 따라 승용차와 연동폭의 기울기를 달리하며, 트램 1대의 주행을 위해 최소의 고정된 연동폭 만을 필요로 한다.

본 연구에서는 간선도로의 중앙트램 전용궤도를 위해 트램 직진현시와 중첩되지 못하는 좌회전 현시순서, 정류장 정차시간이 포함된 링크 통행시간, 일반차량 대비 낮은 트램 속도, 차량군이 아닌 단일의 트램차량 주행의 특징을 고려하여 트램의 교차로 연동을 위한 고정식 우선신호 전략을 제시하였다. 트램 연동모형은 MAXBAND MILP-2 모형을 기반으로 하며, MAXBAND MILP- Tram으로 정의하였다.

트램의 고정식 우선신호를 위한 연동모형 MAXBNAD MILP-Tram의 특징은 다음과 같이 요약된다. 첫째, MAXBNAD MILP-2의 기능들을 모두 유지하고 있다. 고정된 트램 연동폭을 확보한 이후 일반차량의 연동폭을 최대화하기 위한 신호시간계획을 수립할 수 있다. 둘째, 일반차량 연동폭의 최대화와 더불어 트램의 통행시간을 최소화할 수 있다. 목적함수로서 연동대역폭 최대화와 함께 진출 및 진입방향 트램 통행시간 합을 최소화 적용하였다. 셋째, 트램의 직진현시와 일반차량의 좌회전 현시는 중첩되지 못하며, 이때 좌회전 현시순서에 따라 트램과 일반차량의 녹색시간은 크기를 달리한다. 트램과 일반차량 모두의 연동폭을 확보하기 위한 현시순서를 결정할 수 있다. 일반적인 교차로 신호최적화는 일반차량을 기준으로 하는 지체 최소화 또는 연동폭 최대화에 해당한다. 본 연구에서는 트램의 고정식 우선신호를 위한 신호시간모형으로서 MAXBNAD를 기반으로 중앙트램 전용차로의 연동을 우선적으로 확보한 이후 일반차량 연동폭을 최대화 할 수 있는 선형계획 모형을 제시하였다. 트램 속도와 정류장 정차시간은 균일함을 가정하고, 단일 트램이 주행하기 위한 비교적 짧은 시간의 연동폭을 확보할 수 있도록 하였다.



〈그림 2〉 현시순서에 따른 트램 연동폭의 제약사항
 〈Fig. 2〉 Constraints of tram bandwidth according to a phase sequence

트램은 정류장에서만 정차하도록 연동 운영되며, 일반차량의 연동폭이 최대화될 수 있도록 하였다. 트램을 위한 MAXBAND MILP-2의 수정된 모형은 <그림 3>과 같이 트램 연동폭을 기준으로 새로이 작성되었다. 첫째, 진출 및 진입방향의 트램 연동폭은 pb , $p\bar{b}$ 로 표현되어지며, 식 (4)와 같이 트램 연동폭과 트램 적색시간의 간격을 의미하는 pw_i , $p\bar{w}_i$ 와 트램 적색시간 pr_i , $p\bar{r}_i$ 으로 표현될 수 있으며, 이는 MILP-2와 동일한 의미로서 녹색시간 범위에 연동대역폭이 수용되어야 함을 의미한다.

$$pw_i + pb \leq 1 - pr_i \quad (4a)$$

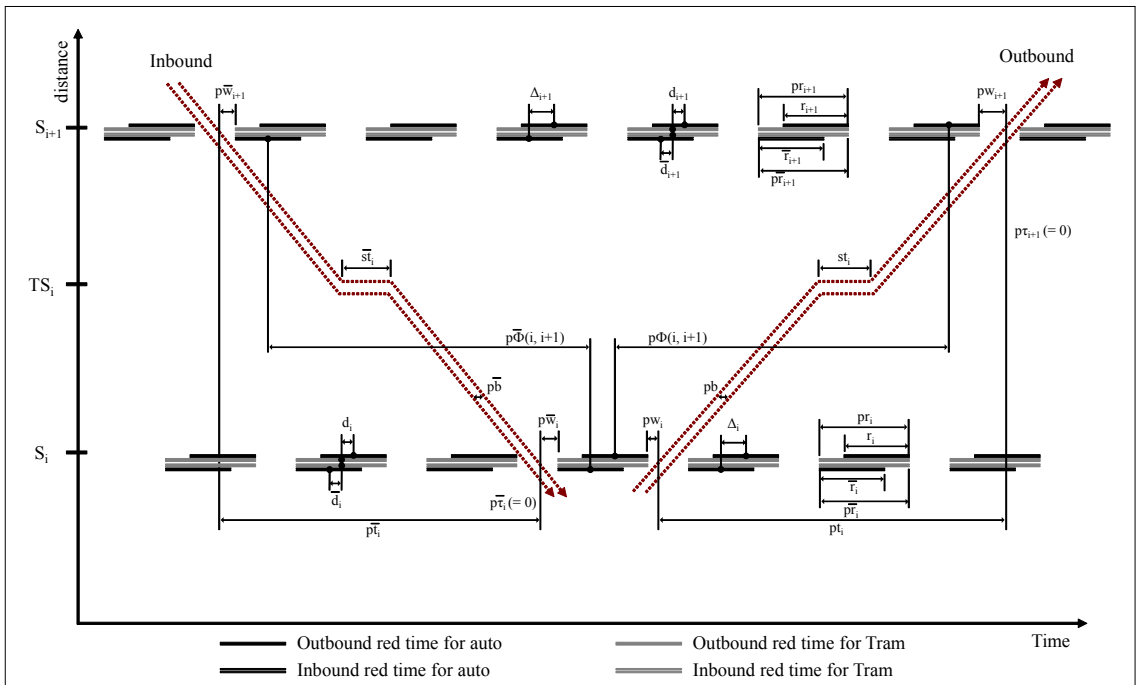
$$p\bar{w}_i + p\bar{b} \leq 1 - p\bar{r}_i \quad (4b)$$

다음은 트램 연동폭의 loop integer 제약식으로 MAXBAND MILP-2와 동일한 원리로 S_i, S_{i+1} 의 적색시간 중심간 거리는 진출, 진입방향이 동일함을 이용하여 식 (5)와 같이 주기의 정수배로 표현된다.

교차로 S_i, S_{i+1} 에서 $p\phi$, $p\bar{\phi}$ 는 <그림 3>과 같이 트램 통행시간을 고려한 진출 및 진입방향 적색시간 중심간 거리를 의미하며, Δ_i 는 진출과 진입방향 적색시간 윗셋을 의미한다.

$$p\phi(i, i+1) + p\bar{\phi}(i, i+1) + \Delta_i - \Delta_{i+1} = pm(i, i+1) \quad (5)$$

중앙트램 전용차로의 현시체계에서 나타나는 특징으로 <그림 4>와 같이 좌회전 현시가 일반차로 직진현시와는 중첩이 발생할 수 있으나, 트램 직진 현시는 중첩되지 못한다. 트램의 연동폭을 표현하기 위해서는 동일 배리어 내에 존재하나 중첩되지 못하는 트램의 녹색시간을 표현하여야 한다. 이를 위해 일반차량 적색시간과 트램 적색시간 간의 윗셋을 의미하는 d_i , \bar{d}_i 를 지정하였다. 진출과 진입방향의 좌회전의 크기가 동일함을 ($L_i = \bar{L}_i$) 가정하면, 방향별 좌회전이서로 다른 시간대에 제공되는 경우 즉, $\delta, \bar{\delta}$ 가 각각 (0, 1), (1, 0)인 경우에만 특정 d_i, \bar{d}_i 를



<그림 3> MAXBAND MILP-Tram 모형을 위한 시공도
(Fig. 3) Time-space diagram for MAXBAND MILP-Tram model

가지게 된다. $\delta_i, \bar{\delta}_i$ 가 각각 (0, 0), (1, 1)의 경우에는 적색시간 윗셋 또한 0를 나타낸다. 이러한 제약조건을 표현하기 위해 더미변수로서 이진변수 α_i 를 적용하였으며, 트램 적색시간은 식 (6)과 같이 r_i, \bar{r}_i 와 좌회전 현시 길이 L_i, \bar{L}_i 로 표현되어 진다.

$$pr_i = r_i + \alpha_i L_i \quad (6a)$$

$$p\bar{r}_i = \bar{r}_i + \alpha_i \bar{L}_i \quad (6b)$$

α_i 를 이용하여 식 (7)과 같이 $\delta_i, \bar{\delta}_i, \alpha_i$ 의 범위를 지정함으로써 $\delta_i, \bar{\delta}_i$ 가 각각 (0, 1), (1, 0)의 경우에서만 α_i 는 1을 나타내어 좌회전 현시순서로 인한 일반차량과 트램 적색시간 차이가 표현되어 진다.

$$\delta_i + \bar{\delta}_i + \alpha_i \leq 2 \quad (7a)$$

$$\delta_i + \bar{\delta}_i - \alpha_i \geq 0 \quad (7b)$$

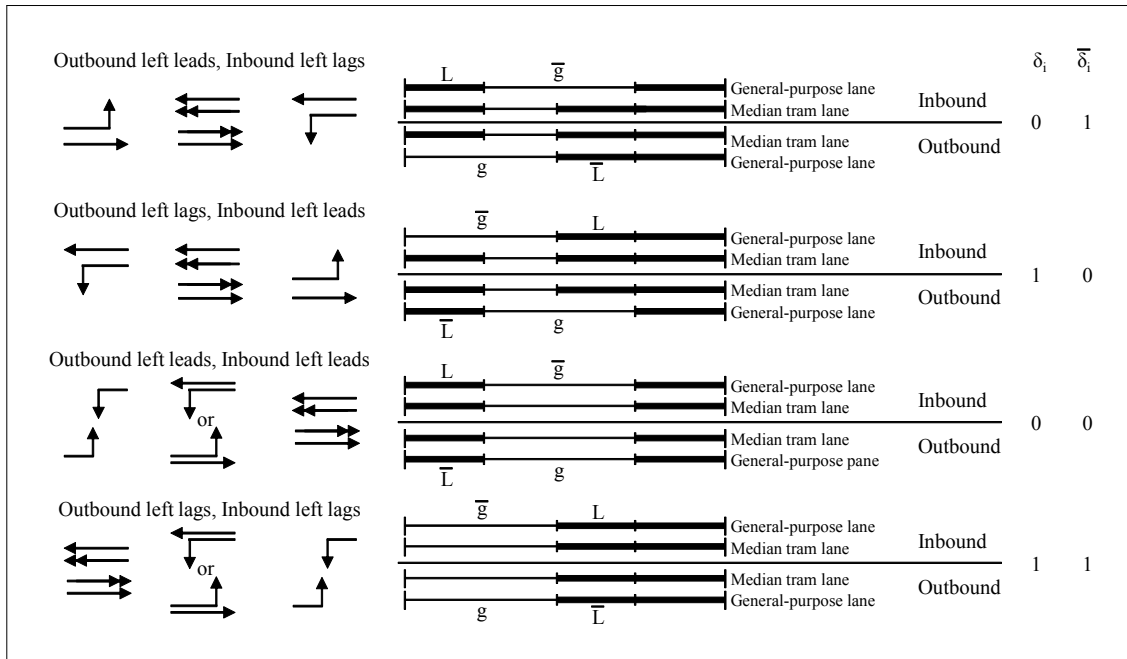
$$\delta_i - \bar{\delta}_i - \alpha_i \leq 0 \quad (7c)$$

$$\delta_i - \bar{\delta}_i + \alpha_i \geq 0 \quad (7d)$$

트램의 연동폭 제약조건을 일반차량 변수로 표현하기 위해 진출 및 진입방향의 트램 통행시간은 동일한 크기임을 이용한 트램 loop integer 제약식을 일반차량의 적색시간으로 표현할 수 있다. 트램 및 일반차량의 적색시간 관계식을 이용하여 식 (5)와 식 (6)을 일반차량 적색시간으로 표현하면 트램 연동폭 시작지점과 적색시간의 간격을 의미하는 $pw_i, p\bar{w}_i$, 트램의 통행시간 $pt_i, p\bar{t}_i$, 일반차량 적색시간 r_i, \bar{r}_i 를 이용하여 식 (8)와 같이 표현할 수 있다.

$$(pw_i + p\bar{w}_i) - (pw_{i+1} + p\bar{w}_{i+1}) + (pt_i + p\bar{t}_i) + \frac{1}{2}(r_i + \bar{r}_i) - \frac{1}{2}(r_{i+1} + \bar{r}_{i+1}) + \frac{1}{2}\alpha_i(L_i + \bar{L}_i) - \frac{1}{2}\alpha_{i+1}(L_{i+1} + \bar{L}_{i+1}) = pm_i \quad (8)$$

중앙트램 전용차로의 신호운영 특성을 고려한 트램 적색시간 중심간 거리의 loop integer 제약식과 더불어 트램 연동폭과 일반차량 연동폭 간의 관계를 표현하기 위한 loop integer 제약식이 필요하다.



〈그림 5〉 중앙트램 전용차로를 위한 현시순서
(Fig. 4) Phase sequence for median tram lane

트램과 일반차량 각각의 적색시간 중심간 시간 거리를 의미하는 ϕ , $p\phi$ 의 관계는 식 (9)와 같이 주기길이의 정수배로 표현된다. 트램과 일반차량 연동폭 간의 loop integer 제약식을 트램 및 일반차량의 적색시간, 통행시간 등을 이용하여 식 (10)과 같이 표현할 수 있다. 이러한 제약조건은 진입방향 또한 식 (11), (12)와 같이 동일하게 적용된다.

$$p\phi(i, i+1) - \phi(i, i+1) = qn(i, i+1) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} (pw_i - w_i) - (pw_{i+1} - w_{i+1}) + (pt_i - t_i) + \tau_{i+1} \\ + \frac{1}{2}(\alpha_i L_i - \alpha_{i+1} L_{i+1}) \\ - \frac{1}{2}[\delta_i L_i - \bar{\delta}_i \bar{L}_i - \frac{1}{2}(r_i - \bar{r}_i)] \\ + \frac{1}{2}[\delta_{i+1} L_{i+1} - \bar{\delta}_{i+1} \bar{L}_{i+1} \\ - \frac{1}{2}(r_{i+1} - \bar{r}_{i+1})] = qn_i \end{aligned} \quad (10)$$

$$p\bar{\phi}(i, i+1) - \bar{\phi}(i, i+1) = (i, i+1) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (p\bar{w}_i - \bar{w}_i) - (p\bar{w}_{i+1} - \bar{w}_{i+1}) + (p\bar{t}_i - \bar{t}_i) + \bar{\tau}_i \\ + \frac{1}{2}(\alpha_i \bar{L}_i - \alpha_{i+1} \bar{L}_{i+1}) \\ - \frac{1}{2}[\delta_i \bar{L}_i - \bar{\delta}_i \bar{L}_i - \frac{1}{2}(r_i - \bar{r}_i)] \\ + \frac{1}{2}[\delta_{i+1} \bar{L}_{i+1} - \bar{\delta}_{i+1} \bar{L}_{i+1} \\ - \frac{1}{2}(r_{i+1} - \bar{r}_{i+1})] = rm_i \end{aligned} \quad (12)$$

트램 연동속도를 의미하는 연동폭의 기울기는 링크의 방향별 정류장 존재 유무와 정차시간의 범위를 지정할 수 있도록 하였다. 트램의 통행시간 pt_i 는 최대 및 최소 속도 pf_i , pe_i 의 범위에서 결정되며, 정류장 유무를 나타내는 p_i 와 정류장 정차시간 st_i 를 고려하여 연동속도를 위한 통행시간 제약조건을 식 (13)과 같이 구성하였다.

$$(d_i/pf_i + p_i st_i)z \leq pt_i \leq (d_i/pe_i + p_i st_i)z \quad (13a)$$

$$(\bar{d}_i/p\bar{f}_i + \bar{p}_i \bar{st}_i)z \leq p\bar{t}_i \leq (\bar{d}_i/p\bar{e}_i + \bar{p}_i \bar{st}_i)z \quad (13b)$$

트램의 링크별 통행시간과 함께 링크간 통행속도의 차이가 고려되어 저야한다. 진출 및 진입방향에 대해 통행속도 차이의 최대 및 최소 범위를 의미하는 ph_i , $p\bar{h}_i$, pe_i , $p\bar{e}_i$ 를 이용하여 식 (14)와 같이

정류장 정차시간을 제외한 통행시간의 차이를 결정하기 위한 제약조건을 제시하였다.

$$\begin{aligned} (d_i/ph_i)z \leq (d_i/d_{i+1})(pt_{i+1} - p_{i+1}st_{i+1}z) \\ - (pt_i - p_i st_i z) \leq (d_i/pg_i)z \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\begin{aligned} (\bar{d}_i/p\bar{h}_i)z \leq (\bar{d}_i/\bar{d}_{i+1})(p\bar{t}_{i+1} - \bar{p}_{i+1}\bar{st}_{i+1}z) \\ - (p\bar{t}_i - \bar{p}_i \bar{st}_i z) \leq (\bar{d}_i/p\bar{g}_i)z \end{aligned} \quad (14b)$$

트램의 고정식 우선신호를 위한 연동모형으로 MAXBAND MILP-Tram을 제시하였다. 본 모형은 MAXBAND MILP-2의 전체 제약조건을 모두 수용하며, 일반차량과 트램의 이중화된 연동폭을 산정할 수 있다. 목적함수로는 일반차량 연동폭 최대화와 함께 트램 통행시간의 최소화가 가능하도록 기존 MAXBAND MILP-2의 목적함수에 트램 통행시간을 반영하였다. 그러나 트램과 일반차량의 적색시간 크기를 보다 간결하게 모형화하기 위해 양방향 좌회전의 크기가 동일한 상황만을 대상으로 함에 따라 현장적용을 위해서는 개선되어 저야하겠다.

MAXBANDMILP- TRAM

$$\begin{aligned} Find \ b, \bar{b}, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i, \delta_i, \bar{\delta}_i, pw_i, p\bar{w}_i, pt_i, p\bar{t}_i, \alpha_i, \\ m_i, pm_i, qm_i, rm_i \end{aligned}$$

$$MAX \ (b + k\bar{b}) + pt$$

subject to

$$(1-k)\bar{b} \geq (1-k)kb$$

MAXBANDMILP-2

$$\text{식(4); } i = 1, \dots, n$$

$$\text{식(7); } i = 1, \dots, n$$

$$\text{식(8); } i = 1, \dots, n-1$$

$$\text{식(10); } i = 1, \dots, n-1$$

$$\text{식(12); } i = 1, \dots, n-1$$

$$\text{식(13); } i = 1, \dots, n-1$$

$$\text{식(14); } i = 1, \dots, n-2$$

$$pt = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} (pt_i + p\bar{t}_i)$$

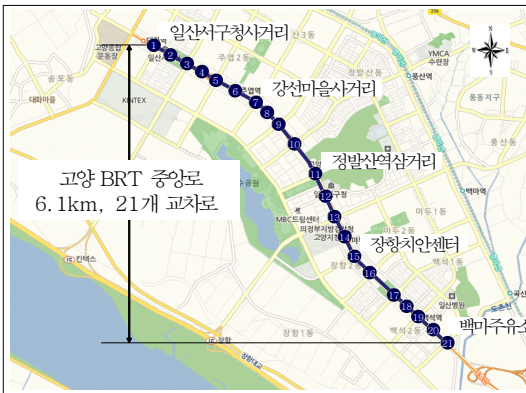
$$b, \bar{b}, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i, pw_i, p\bar{w}_i, pt_i, p\bar{t}_i \geq 0$$

$$m_i, pm_i, qm_i, rm_i; \text{ integer}$$

$$\delta_i, \bar{\delta}_i, \alpha_i; \text{ binary variable } (0/1)$$

IV. 효과분석

트램 연동모형 MAXBAND MILP-Tram의 미시적 시뮬레이션 효과분석을 수행하였다. 국내에서는 트램이 운영되고 있지 않는 상황으로 트램과 가장 유사한 형태의 신호운영이 이루어지고 있는 BRT의 중앙버스 전용차로를 효과분석 대상으로 하였다. 2006년 10월 개통된 고양시 BRT 중 중앙로의 약 6.1km 구간에 대해 오전첨두시를 분석대상으로 하였으며, 본 효과분석 대상구간은 <그림 5>와 같이 중앙버스전용차로 정류장을 위한 단일로를 포함하여 총 21개의 신호교차로로 구성된다. BRT 구간 내에 버스가 아닌 트램 만이 주행함을 가정하여 분석을 수행하였다. 트램 연동폭의 크기는 <표 2>에서와 같이 차량 1대를 위한 시간으로서 전체 구간에서 10초를 고정하여 적용하였으며, 연동 속도는 일반차량 대비 트램의 낮은 속도를 고려하여 트램 11~14m/s, 일반차량 16~22m/s를 적용하였다.



<그림 6> 효과분석 대상 구간

<Fig. 5> Arterial for effectiveness analysis

<표 2> 효과분석의 조건

<Table 2> Constraints for effectiveness analysis

| 분석조건 | | 적용내용 | |
|------|---------|----------------|--------------|
| 트램 | 연동폭 크기 | $pb, p\bar{b}$ | 10초 |
| | 연동속도 | pf, pe | 14m/s, 11m/s |
| 일반차량 | 연동폭 비율 | k | 1.0 |
| | 연동속도 | f, e | 22m/s, 16m/s |
| | 연동속도 변화 | h, g, ph, pg | 변화 없음 |

일반적인 우선신호 전략의 효과는 대중교통의 통행시간과 지체를 감소시키고, 정시성을 개선시켜 줄 수 있다. 또한 대중교통의 연료소모량과 대기오염물질의 배출을 감소시키며, 운영비용을 개선시킨다[6]. 본 연구에서는 MAXBAND MILP-Tram의 목표가 트램의 신호교차로 통행권 확보 및 일반차량의 소통개선에 있음에 따라 미시적 시뮬레이션 분석에서 <표 3>과 같이 트램과 교차로의 차량지체 및 사람지체를 효과적으로 적용하였다.

효과분석 대상인 총 21개 교차로에 대해 2개의 구간으로 구분하여 MAXBAND MILP-2 및 MILP-Tram을 이용하여 신호시간을 산정하였다. MILP-2를 이용한 신호시간 산정결과 최적 주기길이 140초인 조건에서 <표 4>와 같이 일반차량 연동폭은 구간1이 34초, 구간2가 32초로 분석되었으며, 모든 구간에서 트램의 연동폭은 확보되지 못하였다. 트램 연동모형 MILP-Tram을 이용한 분석에서는 MILP-2와 동일한 결과로서 최적주기 140초의 상황에서 일반차량 연동폭은 구간1이 28초, 구간2가 23초로 분석되었다.

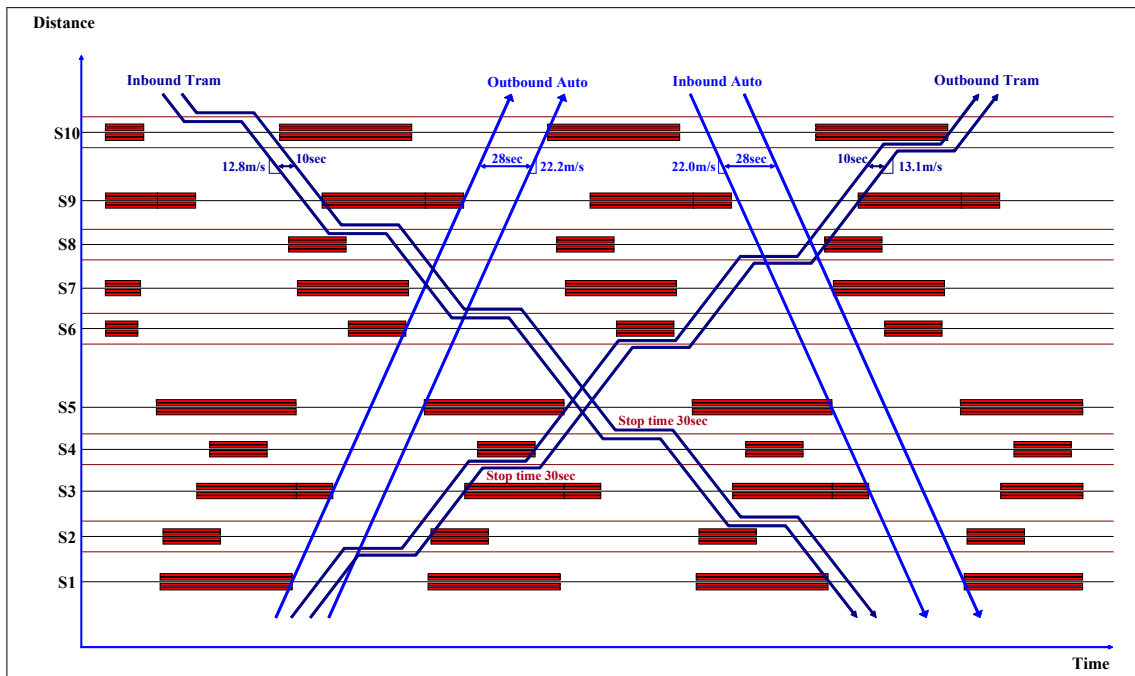
MILP-Tram으로 인해 일반차량의 연동폭은 MILP-2의 분석결과 대비 평균 23% 감소된 크기를 나타내었다. 트램 연동폭의 경우 MILP-Tram의 분석에서는 <그림 6>과 같이 10초의 크기로 전체 구간에서 산정되었으며, 연동폭의 기율기를 의미하는 연동속도는 트램의 연동폭 확보와 일반차량의 연동폭을 최대화 하기위해 최저 8.5m/s에서 최대 13.1m/s로 트램 연동속도 범위 내에서 결정되었다.

<표 3> 미시적 시뮬레이션 분석을 위한 효과척도
<Table 3> MOE for micro-simulation analysis

| 대상 | 효과척도(MOE) | 단위 | 비고 |
|-----|-----------------|-----|------|
| 트램 | 교차로 평균 차량당 제어지체 | 초/대 | MOE1 |
| 교차로 | 교차로 평균 차량당 제어지체 | 초/대 | MOE2 |
| | 교차로 평균 사람당 제어지체 | 초/인 | MOE3 |

〈표 4〉 연동 모형별 신호시간 최적화결과(진출(진입))
 〈Table 4〉 Result of traffic signal timing by coordination model(outbound(inbound))

| 구 분 | | 구간 1 | | 구간 2 | |
|------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | MILP-2 | MILP Tram1 | MILP-2 | MILP Tram1 |
| 일반차량 | 연동폭(초) | 34 [34] | 28 [28] | 32 [32] | 23 [23] |
| | 연동속도(m/s) | 16.7 [17.0] | 22.2 [22.0] | 22.2 [22.0] | 22.2 [17.0] |
| 트램 | 연동폭(초) | - | 10 [10] | - | 10 [10] |
| | 연동속도(m/s) | - | 13.1 [12.8] | - | 8.5 [13.9] |



〈그림 7〉 MAXBAND MILP-Tram 모형을 이용한 구간1의 시공도
 〈Fig. 6〉 Time-space diagram of district no. 1 using MAXBNAD MILP-Tram model

MAXBAND MILP-Tram 모형의 시뮬레이션 분석을 통해 중앙트램 전용차로에서 고정적 우선신호 전략으로서 트램 연동과 일반차량 연동폭 최대화를 동시에 수행하기 위한 신호최적화가 적용 가능함을 확인하였다.

MAXBAND MILP-2와 MAXBAND MILP-Tram을 이용한 신호최적화 결과를 미시적 시뮬레이션 분석에 적용하여 트램과 일반차량에 대한 효과척도를 산출하였다. 미시적 시뮬레이션 모형은 VISSIM을 이용하였으며, 모든 분석은 랜덤씨드를 달리하는 30회의 반복분석을 적용하여 평균에 대한 t-검정을

적용함으로써 연동모형 분석 결과에 대한 통계적 검증을 수행하였다. 30회의 반복실험으로 산출된 21개 교차로의 효과척도 평균에 대한 통계적 차이를 확인하기 위한 귀무가설(H_0)로서 MAXBAND MILP-2와 MAXBAND MILP-Tram의 효과척도간 차이가 없음을 설정하였으며, 이때 t-검정을 위한 유의수준은 0.05를 적용하였다.

H_0 : MAXBAND MILP-2와 MAXBAND MILP-Tram의 효과척도 평균은 차이가 없다. ($\mu_i = \mu_j$)

트램의 교차로 평균 제어지체는 <표 5>와 같이 MILP-2가 23.5초/대, MILP-Tram이 10.2초/대로 트램의 연동모형으로 인해 57% 감소된 결과를 나타내었다. 트램을 포함한 교차로 평균 차량당 제어지체는 일반차량의 연동폭 감소로 인해 MILP-2가 25.3초/대, MILP-Tram이 29.9로 18% 증가한 결과를 나타내었다. 교차로 평균 사람당 제어지체는 MILP-2가 24.4초/인, MILP-Tram이 18.4초/인으로 재차인원이 높은 트램의 연동으로 인해 25% 감소한 결과를 나타내었다. 사람당 제어지체는 트램 또는 트롤리버스의 승객정원 중 최소치에 해당하는 차량당 110인을 적용하였으며[19], 일반차량의 경우 교통사업의 예비타당성 분석을 위한 승용차의 재차인원 기준 중 수도권에 해당하는 1.319인을 적용하였다[20].

트램과 교차로의 차량당, 사람당 제어지체에 대한 연동모형별 평균의 t-검정 수행 결과, 유의수준

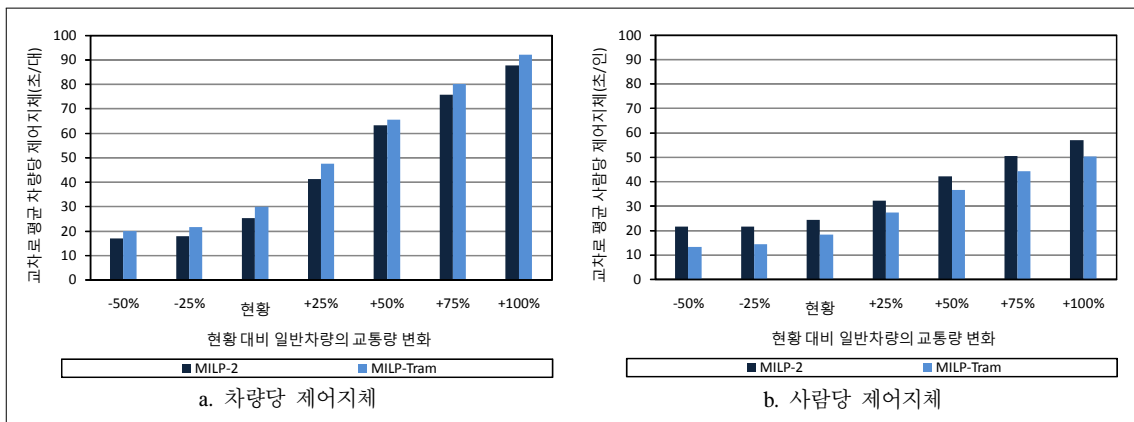
0.05의 전체 효과척도에 대한 분석에서 귀무가설이 기각되어 트램 연동모형의 효과척도 결과에 대한 통계적 유의성이 확인되었다.

일반차량의 교통량 변화에 따른 트램연동모형으로 인한 영향을 분석하였다. 현황 교통량 대비 일반차량의 교통량을 최대 +100%에서 최소 -25%까지 변화시킨 분석을 수행하였다. 교차로 평균 차량당 제어지체는 <그림 7>과 같이 일반차량 연동폭 감소로 인해 MILP-2 대비 MILP-Tram이 평균 12% 증가된 지체를 나타내었으나, 과포화 상태에 근접함에 따라 전체 지체 대비 변화비율은 감소하는 경향을 나타내었다.

사람당 제어지체의 경우 차량당 제어지체와 반대의 경향으로 전체 분석에서 재차인원이 높은 트램의 연동으로 인해 MILP-2 대비 MILP-Tram이 평균 21% 감소된 지체를 나타내었으며, 차량당 제어

<표 5> 효과척도별 통계적 검증결과
(Table 5) Result of statistical verification by measurement of effect

| 효과척도 | 모형별 평균 (초/대, 초/인) | | 평균의 동일성에 대한 t-검정 | | | | | 평균차이의 95% 신뢰구간 | | 검증 결과 |
|------------------|----------------------|-----------|------------------|-----|--------------|------|--------------|-------------------|--------|----------|
| | MILP-2 | MILP-Tram | t value | 자유도 | 유의확률 (양쪽) | 평균차 | 평균차의 표준오차 | 하한 | 상한 | |
| 트램 제어지체 MOE1 | 23.5 | 10.2 | 167.8 | 58 | 0.000 | 13.3 | 0.079 | 13.102 | 13.418 | H_0 기각 |
| 교차로 제어지체 MOE2 | 25.3 | 29.9 | -13.2 | 58 | 0.000 | -4.6 | 0.351 | -5.321 | -3.918 | H_0 기각 |
| 교차로 사람지체 MOE3 | 24.4 | 18.4 | 37.8 | 58 | 0.000 | 6.0 | 0.157 | 5.626 | 6.254 | H_0 기각 |



<그림 8> 일반차량의 교통량에 따른 민감도 분석 결과
(Fig. 7) Sensitivity analysis by general vehicle volume

지체의 증가량 대비 상대적으로 높은 지체 감소비율을 유지하였다. 이러한 결과는 MILP-Tram이 윗셋과 좌회전 현시 순서만을 변경시키는 고정식 우선신호 전략에 해당하기 때문이다. 일반차량의 녹색 시간에는 변경이 없으므로 연동에 의해 지체 감소 효과가 미미해 지는 과포화 상태에서는 트램의 연동모형이 일반차량의 지체변화에 미치는 영향은 감소된다. 즉, 과포화 상태일수록 MILP-Tram과 같은 고정식 우선신호의 적극적 활용이 필요하다.

V. 결 론

전통적인 간선도로 연동폭 최대화를 위한 신호 최적화 모형인 MAXBAND MILP-2를 이용하여 고정식 우선신호 전략으로서 트램의 연동모형 MILP-Tram을 제시하였으며, 본 모형은 트램과 일반차량 모두의 연동폭을 산정할 수 있다. 1대의 차량이 독립적으로 주행하는 트램을 위해 고정된 연동폭을 확보할 수 있도록 하였고, 일반차량은 연동폭 최대화의 기능을 유지하고 있다. 이때 트램의 느린 주행 속도, 정류장 정차시간을 반영해 일반차량과 트램의 이중화된 연동폭을 확보할 수 있도록 하였다.

트램의 연동모형 MILP-Tram에 대한 효과분석을 수행한 결과 MILP-2에 의한 신호시간 대비 일반차량의 연동폭은 감소되었으나, 트램의 명확한 연동폭을 확인할 수 있었다. 즉, 전통적인 일반차량 중심의 신호시간 계획에서는 트램의 통행특성으로 잦은 교차로 대기가 발생되나, MILP-Tram으로 트램은 정류장에서만 정차하게 되는 신호시간계획을 수립할 수 있었다. 또한 일반차량의 교통량 변화에 대한 민감도 분석을 수행함으로써 과포화 상태일수록 연동과 현시순서만을 변경하는 MILP-Tram을 이용하여 적극적인 고정식 우선신호를 적용함으로써 교차로의 제어지체 증가는 미미하나, 우수한 사람당 지체감소효과를 가져올 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] "CO2 emissions from fuel combustion Highlights

2009 Edition," International Energy Agency, March 2009.

- [2] 박진영, "녹색성장과 교통부문의 과제," 녹색교통, 녹색교통운동, 제143호, pp.34~35, 2008. 11.
- [3] J. B. Greenberg, "Light rail development in the united states and the united kingdom since 1980: A comparative analysis," *Proceeding of 2004 City Futures Conference*, July 2004.
- [4] A. Skabardonis, "Control strategies for transit priority," *Transportation Research Record 1727*, National Research Council, pp.20~26, 2000.
- [5] R. J. Baker, J. Collura and J. J. Dale, "An overview of transit signal priority," *ITS of America*, April 2002.
- [6] H. R. Smith, B. Hemily and M. Ivanovic, "Transit signal priority(TSP): A planning and implementation handbook," *ITS of America*, May 2005.
- [7] T. Urbanik II, "Priority treatment of buses at traffic signals," *Transportation Engineering*, vol. 47, no.11, pp.31~33, November 1977.
- [8] F. J. McGinley and D. R. Stolz, "The design of tram priority at traffic signals," *Journal of Advanced Transportation*, vol.19, no.2, pp.133~151, July 1985.
- [9] S. R. Sunkari, P. S. Beasley, T. Urbanik II and D. B. Fambro, "Model to evaluate the impacts of bus priority on signalized intersections," *Transportation Research Record 1494*, pp.117~123, 1995.
- [10] S. Khasnabis, G. V. Reddy and S. K. Hoda, "Evaluation of the operating cost consequences of signal preemption as an IVHS strategy," *Transportation Research Record 1390*, National Research Council, pp.3~9, 1993.
- [11] W. H. Kim, "Improved transit signal priority system for networks with nearside bus stops," Ph.D. dissertation, Texas A&M University, December 2004.
- [12] Y. Wang, M. Hallenbeck and J. Zheng, "Comprehensive evaluation of transit signal

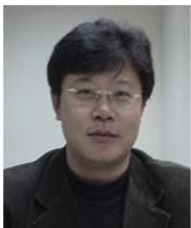
- priority system impacts using field observed traffic data,*” Washington State Transportation Center, University of Washington, June 2008.
- [13] K. Wood and R. Baker, “Using SCOOT weightings to benefit strategic routes,” *Traffic Engineering and Control*, vol.33, no.4, April 1992.
- [14] 한여희, 김영찬, “버스 연동중심제어를 이용한 버스우선신호 최적화 방법론,” 제61회 대한교통학회 학술발표회 논문집, pp.761~765, 2009. 11.
- [15] E. Romeu, C. T. Miquel, M. Roca-Riu and F. Robuste, “Improving bus travel times with passive traffic signal coordination,” *Transportation Research Record 2111*, National Research Council, pp.68-75, 2009.
- [16] S. Celniker and T. E. Wayne, “Trolley priority on signalized arterials in downtown san diego,” *Transportation Research Record 1361*, National Research Council, pp.184~187, 1992.
- [17] K. Gardner, C. D’Souza, N. Hounsell, B. Shrestha and D. Bretherton, “Review of bus priority at traffic signals around the world,” Transportation Research Group, University of Southampton, April 2009.
- [18] J. D. C. Little, M. D. Kelson and N. H. Gartner, “A versatile program for setting signals on arteries and triangular networks,” Massachusetts Institute of Technology, January 1981.
- [19] 신종현, “신도시건설에 따른 신교통수단시스템 선정방안,” 석사학위논문, 서울과학기술대학교, pp.8, 2005. 2.
- [20] 한국개발연구원, “도로·철도 부문 사업의 예비 타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판),” 대한민국 재정기획부, pp.333, 2008. 12.

저자소개



정 영 제 (Jeong, Young-Je)

2007년 ~ 현 재 : 서울시립대학교 교통공학과 박사과정
2006년 : 서울시립대학교 교통공학과 석사



김 영 찬 (Kim, Young-Chan)

1996년 ~ 현 재 : 서울시립대학교 교통공학과 교수
1996년 : 명지대학교 교통공학과 교수
1993년 : 도로교통안전협회 연구소 연구위원
1991년 : 교통개발연구원 선임연구원
1990년 : Texas A&M University 토목공학과 박사



김 대 호 (Kim, Dae-Ho)

2010년 ~ 현 재 : 경기개발연구원 교통정책연구부장
2004년 ~ 2009년 : 경기도청 광역교통기획단장, 교통개선과장
1999년 ~ 2003년 : 서울시특별시청 교통운영개선기획단장