

간선도로 트램 전용차로에서 트램과 일반차량을 위한 신호최적화 모형 개발

이인규 · 김영찬*

서울시립대학교 교통공학과

A Development of the Traffic Signal Progression Model for Tram and Vehicles

LEE, In-kyu · KIM, Youngchan*

Department of Transportation Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

Abstract

A tram has been the focus of a new public transportation that can solve a traffic jam, decreasing of public transit usage and environmental problem in recent years. This study aims to develop a signal optimization model for considering the traffic signal progression of tram and vehicles, when they are operated simultaneously in the same signalized intersections. This research developed the KS-SIGNAL-Tram model to obtain a minimum tram bandwidth and to minimize a vehicle's delay to perform a tram passive signal priority, it is based on the KS-SIGNAL model and is added to the properties of a tram and its system. We conducted a micro simulation test to evaluate the KS-SIGNAL-Tram model, it showed that the developed optimization model is effective to prevent a tram's stop on intersection, to reduce a tram's travel time and vehicle's delay.

최근에 친환경 신교통수단으로서 주목받고 있는 트램은 철도교통 중 도시부 도로교통을 대체할 수 있는 대중교통 수단으로 인식되어 북미지역과 유럽 등의 주요 선진국에서 주요 교통수단으로 운영되고 있고, 우리나라에서도 도심의 혼잡증가와 대중교통 수송분담율 감소, 교통분야의 환경에 대한 관심으로 트램의 도입이 추진되고 있다. 본 연구는 간선도로의 트램 전용차로 구간에서 트램과 일반차량의 효과적인 운영을 위해 트램의 우선 통행권을 확보하면서 일반차량의 지체를 최소화하는 신호 최적화 모형을 개발하였다. 간선도로의 신호 연동화 모형인 KS-SIGNAL 모형을 기초로 트램의 통행특성과 트램 전용차로 시스템의 특성을 반영한 KS-SIGNAL Tram 모형을 개발하였고, 이 신호 최적화 모형을 통해 트램차량의 최소 연동폭을 확보하여 고정식 기반의 트램 우선신호를 구현하였으며, 이와 동시에 일반 이동류의 신호교차로 대기시간을 최소화하는 신호시간을 산출하였다. 미시적 시뮬레이션 프로그램을 통해 KS-SIGNAL Tram 모형의 신호제어 효과를 분석한 결과, 새로운 모형으로 산출한 교차로 신호시간을 적용했을 때 트램차량의 신호교차로 정지수와 통행시간이 감소했음을 확인하였고, 일반차량도 트램 우선신호에 따른 지체증가가 거의 나타나지 않음을 확인하였다.

Keywords

KS-SIGNAL, tram, priority, signal progression, traffic signal
KS-SIGNAL 모형, 트램, 우선신호, 신호연동화, 교통신호

* : Corresponding Author
yckimm@uos.ac.kr, Phone: +82-02-6490-2821, Fax: +82-02-6490-2819

Received 29 March 2014, Accepted 16 May 2014

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

서론

1. 연구의 배경 및 목적

우리나라의 자동차 등록대수는 2010년 1,679만대를 넘어섰고, 2014년에는 2,000만대에 도달할 것으로 예측되며, 그에 따른 교통혼잡비용이 23조원을 넘어섰다. 이러한 승용차 이용의 지속적인 증가에 비해 대중교통의 수송 부담율은 2000년의 38%에서 2010년 기준 31%로 감소하였으며, 승용차의 부담율은 약 3%가 증가하여 앞으로 교통혼잡은 더욱 큰 사회문제가 될 것으로 예상된다(KOTI, 2013). 특히 도시지역과 주변에서 이러한 교통혼잡이 발생되고, 그 주요 원인으로 승용차 위주의 교통체계를 들 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 그 동안 버스나 지하철 등의 대중교통 수단 활성화 수단으로 중앙버스전용차로제 운영, BIS(Bus Information System) 설치, 대중교통 환승시스템, 환승요금체계 등의 대중교통 우선정책을 시행해 왔지만 그 실효성에 한계가 있어왔다.

따라서 최근에 우리나라의 각 지방자치단체에서는 이러한 도시부 간선도로의 교통혼잡을 해결하기 위해 트램의 도입을 통해서 도시지역 교통혼잡 문제를 해결하려 하고 있고, 창원시는 현재 트램의 예비타당성 조사를 수행하여 트램 시스템의 도입을 위한 적극적인 움직임을 보이고 있다.

트램(Tram)이란 영미권에서는 Streetcar, 유럽에서는 Tramway로 불리는 철도를 기반으로 발전한 도시교통수단으로서 1970년대 후반부터 발전된 전기전인엔진, 저상차량, 모듈화 된 차체 등 다양한 현대화된 시스템을 적용하기 시작하여 최근에 도시교통을 책임지는 한 축으로 성장하였다. 우리나라에서는 본격적인 산업화 이전인 1968년 운행이 폐지되어 현재 트램의 운영에 대한 노후가 전무한 실정이다. 따라서 위에서 언급한 트램 시스템

의 도입 필요성에 따라 도시부의 간선도로에 트램 시스템이 도입되었을 때 승용차, 버스, 자전거, 보행자 등의 교통과 혼재하게 되면 각 이동류의 이동성과 안전성에 문제가 발생하게 된다.

따라서 트램이 매력적인 도심 교통수단으로서 성공적인 운영을 수행하려면 보다 효율적인 신호운영과 안전성 확보를 위한 새로운 우선신호 전략과 신호계획이 요구된다. 본 연구는 간선도로의 트램 전용차로 구간에서 트램의 이동성을 확보하고 일반차량의 지체를 최소화하는 신호 최적화 알고리즘을 개발하는 것을 주요 목적으로 하고, 이러한 연구목표를 달성하기 위해 간선도로에서 트램을 운영하기 위한 방안으로 고정식 우선신호를 이용하여 트램의 교차로 우선통행 기회를 확보하고, 이와 동시에 일반교통류의 지체를 고려하여 트램의 우선신호로 인한 일반교통류의 피해를 최소화 할 수 있는 최적 신호시간을 산출하였다.

2. 연구의 범위 및 방법

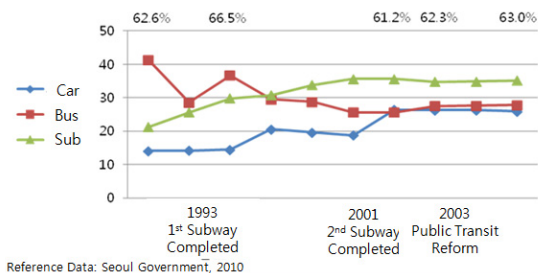
본 연구의 기본적인 틀은 간선도로에서 트램과 자동차가 혼재되어 동일한 신호교차로를 이용할 때 발생할 수 있는 문제점을 분석하고, 그 문제를 고려한 신호최적화 알고리즘을 개발하여 효과를 평가하는 것이다.

기존연구 고찰을 통해 트램과 자동차의 신호운영을 위한 이전 연구결과를 정리하고, 기존 연구의 한계를 분석하였으며, 트램차량의 고정식 우선신호를 위한 신호최적화 알고리즘을 개발하여 미시적 시뮬레이션 모형을 통해 그 효과를 검증하였다.

본 연구에서는 간선도로에 설치되는 트램 전용차로의 운영 전략을 개발하기 위해 공간적 범위를 도시지역의 중앙 트램 전용차로가 설치된 간선도로로 한정하였으며, 일반차량과 함께 동일한 평면상의 신호교차로를 이용하여 교통신호의 제어를 받는 형태를 가정하였다. 또한 한대의 트램차량이 전용차로를 따라 각각의 방향별로 1개 노선을 일정한 배차간격으로 주행하는 상황을 가정한다.

주행차로의 특성은 일반차로, 전용차로, 혼용차로로 구분할 수 있으나, 본 연구에서는 간선도로 전 구간의 중앙 트램 전용차로를 가정하여 신호제어 전략을 개발하였다.

차량의 특성은 일반차량과 분리되어 독립적으로 운행하는 한 량의 트램차량이나 다량의 트램차량으로 정의한다. 또한 일정한 거리의 폐색구간(Block Section) 내에서는 1대의 트램차량이 독립적으로 주행하여 신호교차로와 정류장을 통과하는 상황을 가정한다.



Reference Data: Seoul Government, 2010
Figure 1. Problem of activating the public transit in seoul

트램의 운영조건에서 트램 정류장의 위치는 중앙 트램 전용차로의 Mid-Block과 Far-Side에 위치하고, 다수의 승객이 10초부터 60초까지 무작위로 승/하차 하는 것을 가정하였다. 트램 전용차로는 전 구간에서 복선으로 운행되며, 1방향 1개의 노선이 운행하여 트램차량 간의 추월이나 교차의 상황은 제외하였다.

관련 연구의 검토

첫 번째로 트램의 운영사례를 살펴보면 트램은 현재 북미와 유럽 등의 수많은 대도시에서 도심의 주요 교통수단으로서 이용되고 있고, 트램의 효율적이고 안전한 운영을 위한 신호제어 전략들이 수행되고 있다. 해외에서 운영 중인 트램 시스템은 대부분 대중교통 우선정책에 의한 이동성을 확보하기 위해 대중교통 우선신호 제어전략을 채택하고 있다. 2000년대 이후 트램의 르네상스라고 불릴 만큼 트램의 운영이 활발하게 이루어지고 있는 프랑스에서는 낭뜨(Nantes)에서는 트램이 3개 노선으로 41.1km 구간에서 운영 중이고, 스트라스부르그에서 5개 노선의 55km, 파리에서는 4개 노선 39.1km 구간에서 고정식과 능동식 우선신호 제어를 사용해 운영 중에 있다. 독일의 뮌헨은 11개 노선으로 75km구간에서 운행 중이며, 독일의 실시간 신호제어 시스템인 BALANCE시스템을 통해 트램 우선신호 제어를 수행하고 있다. 이와 유사하게 캐나다의 켈거리, 미국의 LA, 호주의 멜버른에서도 각 도시의 신호제어시스템과 연계하여 트램을 운영하고 있다.

현재 운영되고 있는 대부분의 트램 시스템에서 BRT와 유사한 형태의 대중교통 우선신호가 적용되고 있지만, 트램은 전용차로를 주행하는 버스나 차량과 통행특성이 다르기 때문에 고유의 특성을 반영한 새로운 우선신호 제어전략의 개발이 필요하다. 도시부 간선도로의 일반 교통류의 흐름을 저해하지 않으면서 신호운영 효율을 증대시킬 수 있도록 도시부 도로교통의 관점에서 트램 전용차로와 일반차로의 운영기술 및 원활한 운영을 지원할 수 있는 신호운영기술 개발이 반드시 필요하다.

최근에 개발되어 운영되고 있는 현대적인 의미의 트램 시스템은 대중교통 운영측면에서 철도의 장점인 정시성을 보장하면서 이동성이 뛰어나고, 버스의 장점인 이용자의 접근성을 확보하였다. 이와 동시에 전기를 이용한 동력수단을 사용하여 친환경적이며, 교통약자와 보행자를 배려하여 교통복지측면과 교통 서비스의 질을 향상

시킬 수 있는 시스템으로 발전되어져 왔다. 최근에 국내에서는 현재 트램과 가장 유사한 형태의 대중교통 시설로 BRT가 운영 중에 있으며, 최근에 국내의 여러 지방자치단체에서 예비타당성 조사와 함께 트램의 도입을 적극적으로 추진하고 있다.

현재 운영 중인 대부분의 트램 시스템은 세계 각 도시들의 대중교통 우선정책에 따라 트램에 교차로 통행 우선권을 부여하는 우선신호 형태로 신호운영을 수행하고 있다. 각 도시의 주요 간선도로에서 운영되고 있는 트램의 우선신호는 크게 고정식 우선신호 제어, 능동식 우선신호 제어, 실시간 신호제어 시스템으로 나눌 수 있다. 본 연구와 직접적인 관련이 있는 고정식 우선신호는 차량의 검지 유/무와 상관없이 미리 정해진 신호계획에 따라 우선신호를 제공하는 방식으로, 도로 기하구조 및 교통 상황, 대중교통의 특성을 기반으로 신호주기, 오프셋, 현시길이, 현시순서의 변화를 통해 우선신호를 제공하는 신호제어 기법이다.

두 번째로 대중교통 우선신호 관련연구를 살펴보면, 고정식 우선신호와 관련된 연구로 Sunkari(1995)는 고정식 우선신호 제어를 수행하기 위해서 일반적으로 신호교차로의 신호제어 변수를 조정하는 방법과 대중교통 차량에 가중치를 부여하여 신호최적화를 수행하는 두 가지 방법을 사용하여 신호최적화를 수행하였고, Al-Mudhaffar(2006)는 TRANSYT-7F 모형을 이용하여 대중교통의 신호최적화 기준에 의해 버스의 평균제차인원을 고려한 가중치를 적용하여 지체와 정지횟수가 최소화되는 신호시간을 산출하였다. 이러한 방식의 신호시간 최적화 분석한 결과, 버스의 지체는 감소하나 일반승용차의 지체는 증가하는 것을 확인하였다.

이밖에도 대중교통을 위한 신호최적화를 위해서 Alexanders(2000)는 정류장의 정차시간을 고려한 교차로 대중교통 신호계획을 작성하였으며, Mohammad와 Francois(2007)의 연구에서는 버스정류장이 Near-Side에 위치할 경우, 정류장의 위치가 버스우선신호에 미치는 영향에 대해서 연구를 수행하여 고정된 버스정차시간을 적용하는 것보다 확률적 버스정차 시간이 지체를 더 낮출 수 있음을 미시적 시뮬레이션 프로그램을 통해 증명하였다. Han(2010)은 중앙버스 전용차로의 신호시간계획을 최적화하기 위해서 TRANSYT-7F 모형과 PASSER-II 모형을 결합하여 두 단계의 신호최적화 방법을 수행하여 버스와 일반차량을 모두 고려한 신호계획을 작성하였다. 이와 같이 고정식 우선신호를 위한 연구들은 대중교통

중심의 신호시간 계획을 최적화하기 위한 방법론들이 주를 이루고 있으며, 대중교통의 지체를 최소화하고, 서비스율 및 정시성을 최대화 하는 방법들에 해당한다.

세 번째로 트램 우선신호와 관련된 연구로써 Abebe (1996)는 일반 이동류과 함께 운영되는 경전철 시스템을 위한 신호교차로 운영에 대해 연구하여 경전철과 일반 이동류의 통합 신호운영전략을 제시하였다. 독립적으로 운영되는 경전철의 전용 신호등을 위해 신호제어기에서 신호시간을 계산하여 제공하며, 이때 경전철의 현시와 일반차량을 위한 현시의 상충을 고려한 현시순서를 신호계획에 포함하였다. Barton(2003)은 경전철에 적용이 가능한 고정식과 능동식 우선신호 전략의 종류를 구분하고, 이와같은 신호제어 전략들에 대해서 미국 Richmond 지역을 대상으로 각각의 효과분석을 수행하였다. 이 연구에서 경전철의 지체 및 통행시간 최소화를 위해서는 Green Extension과 Phase Skipping 기법이 가장 유용한 전략이 될 수 있음을 제시하였다.

Megn Li(2006)는 경전철을 위한 능동식 우선신호 제어에 대한 연구에서 경전철의 우선신호 시스템을 차량검지, 정류장 정차시간 예측, 우선신호 요청, 우선신호 제어기의 총 4가지 시스템으로 정의하고, 대중교통 차량의 우선신호의 영향을 최소화 할 목적으로 경전철 차량의 정류장 정차시간을 예측하여 우선신호 시간의 계산에 반영하였다. 이 연구에서 경전철 차량의 정류장 정차시간의 오류와 능동식 우선신호의 요청을 최소화 할 목적으로 경전철 차량의 연동폭을 최대화해서 적용하였으며, 이를 San Diego 지역에 적용시켜 시뮬레이션 분석을 수행한 결과, 약 67.4%의 경전철의 지체감소와 32.5%의 일반차량 지체감소 효과를 나타냈다.

Frank Dreher(2007)는 영국 Nottingham 지역의 경전철을 중심으로 대중교통 우선시스템과 일반교통의 상호작용과 신호운영 계획에 대해서 연구를 수행하고, VISSIM 모형과 VISVAP 모형을 통한 사례중심의 평가를 수행하였다.

Jeoung(2011)의 논문에서는 트램의 우선신호를 위한 전략으로 기존의 고정식 우선신호 제어와 능동식 우선신호를 동시에 적용한 트램 신호제어 전략을 개발하였다. 이 연구에서는 트램의 최적 신호시간 산출을 위해 식 (1)과 같이 트램의 연동폭을 최대화하고, 통행시간을 최소화하기 위한 목적함수를 설정하고, 기존의 MAXBAND를 수정한 신호최적화 모형을 제시하였다. 이 모형에서는 기존의 MAXBAND 모형의 변수 및 제약조건을 수용

함과 동시에 좌회전 현시순서, 정류장의 정차시간, 차량의 속도 등의 통행특성을 반영하였다. 이 모형을 통한 신호최적화 결과, 일정시간의 트램 연동폭을 확보하면서 승용차의 연동폭을 최대화 하였고, 트램의 정차시간을 고려한 교차로 간 읍셋을 산출하였다.

$$MAX (b+k\bar{b})+pt \tag{1}$$

여기에서,

$b(\bar{b})$: 일반차량의 연동폭

k : 진출방향 대비 진입방향 일반차량의 연동폭 크기의 비율

pt : 트램의 통행시간

이 논문에서는 교차로와 정류장에서 트램의 정차시간을 반영한 트램의 연동폭을 확보하였으며, 이때 1대의 트램 차량이 통과할 수 있는 최소한의 연동폭을 유지하였다. 반면에 일반차량을 위한 연동폭은 최대화함으로써 주방향의 일반차량 연동기회를 확보하였다.

네 번째로 간선도로 신호최적화 모형은 목적함수에 따라 교통류의 지체를 최소화하는 모형과 간선도로의 연동폭을 최대화하는 두가지 모형으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 트램 중앙 전용차로의 최소 연동폭을 확보하여 트램의 정시성을 높이는 것이 주목적이므로 이와 관련한 간선도로의 연동폭 최대화에 대한 기존 연구를 검토하였다. 간선도로 축에서 연동폭을 확보하기 위한 신호최적화 모형으로서 주방향의 연동폭을 최대화시키는 목적함수를 가진 모형에는 MAXBAND, MULTIBAND, BANDTOP, PASSER-II 등이 있다.

MAXBAND 모형은 간선도로의 연동폭을 최대화하며, 혼잡정수선형계획법을 이용하여 최적해를 도출하는 신호최적화 모형이다. 진입과 진출방향에 대한 구분 없이 전체 연동폭을 최대화하는 MAXBAND 초기모형의 개발 이후, 방향별 연동폭의 범위를 조정할 수 있는 확장모형으로 MAXBAND MILP-2가 제시된 바 있으며, MAXBAND MILP-2를 기반으로 방향별 교통류에 따라 링크별 연동대역폭을 달리할 수 있는 MULTIBAND 모형이 제시되었다. MULTIBAND는 MAXBAND MILP-2가 전체 교차로에서 고정된 연동폭을 유지하도록 설계된데 비해 개별 링크에서 연동폭의 크기를 교통류에 따라 달리할 수 있도록 연동폭 제약식을 구성하였다. 간선도로 축에서 회전교통류로 인해 개별 링크의 직진 교통류율은 각기 다르며, 이때 MULIBAND를 이

용하여 각 링크별로 중방향이 최적화된 연동폭을 확보할 수 있다(Gartner, 1991).

연동폭 최대화를 위한 신호최적화 모형이 실제 교통 상황을 지나치게 단순화 시키는 문제점을 개선하기 위해서 H.S. Tssay와 L.J. Lin은 BANDTOP 모형을 개발하였으며, 사용자에 의하여 주관적으로 주어지는 대기 차량 소거시간을 차량도착형태를 감안하여 모형 자체에서 계산하도록 하고, 여유녹색시간을 대기차량소거시간과 차량군이 도착하기 전에 도착하는 차량의 지체시간으로 처리하여 여유녹색시간을 새롭게 정의하였다.

PASSER-II모형은 간선도로의 신호계획을 최적화해 주는 거시적 교통류 모델로 양방향의 통과폭을 최대화하는 모형이다(Messer, 1973). 이 모형은 통과폭을 최대화하면서 지체를 줄이는 신호주기, 신호시간, 현시순서, 업셋을 산출하며, 방향별 통과폭에 가중치를 두어 변수들을 최적화 할 수 있다.

PASSER-II모형과는 달리 연동기회를 최대화하는 TRANSYT-7F 모형은 연동의 기회를 방향별, 교차로별, 단위시간별로 분할하여 계산하는 방법을 사용하여 간선도로의 신호를 최적화했으며, 지체 및 정지수와 같은 목적함수를 결합하여 최적화를 수행할 수 있다.

Megn Li(2009)의 연구에서는 MAXBAND 모형에 기초하여 신호연동화를 위한 시뮬레이션 기반의 최적화 모델을 개발하였다. 이 연구에서 Cell Transmission을 기반으로 한 Simulation-Based Genetic Algorithm을 개발하여 간선도로 내의 시스템 총지체를 감소시키기 위한 최적 신호시간을 계산하였다. Shin(1997)은 MAXBAND 모형을 기초로 대기차량소거시간을 최소화하여 간선도로의 지체도를 최소화하는 모형으로 KS-SIGNAL을 개발하였다. 이 모형에서는 간선도로의 신호연동화를 위해 지체를 최소화하는 주기, 녹색시간, 업셋, 현시를 산출할 수 있으며, 특히, 비선형 형태의 지체를 대기차량소거시간을 이용하여 선형화하여 지체를 감안하지 못하는 연동폭 최대화 모형을 단점을 보완하였다. KS-SIGNAL 모형은 본 연구에서 개발한 고정식 트램 신호 최적화 모형의 트램의 특성을 반영한 수정된 모형의 근간이 되므로 3장에서 상세히 다루도록 하겠다.

본 장에서는 트램의 운영사례 및 우선신호, 기존 대중교통의 우선신호와 관련한 연구를 고찰하였고, 현재 운영되고 있는 트램 신호가 일반적인 대중교통 우선신호 전략과 동일하게 사용되고 있음을 알 수 있었다. 또한 일반차량을 고려하는 신호제어 전략의 부재로 트램의 특성

과 일반차량의 지체까지 고려하는 우선신호 제어전략이 부재하다. 따라서 트램의 운행특성과 기존 간선도로 최적화 모형 중 혼합정수선형계획법을 이용한 신호최적화 모형을 사용하여 트램과 일반차량의 안전성과 효율성을 보장할 수 있는 신호최적화 모형의 개발이 필요하다.

트램 신호최적화 모형 개발

1. 트램의 통행 특성 분석

트램차량은 일반차량과 다른 주행특성으로 인해 발생하는 상충을 방지하기 위해 교차로 신호운영 및 대중교통의 우선처리 시 이를 고려한 대책을 세워야 한다. 일반적으로 고속의 주행속도를 가지는 대중교통 차량은 입체 교차로로 처리되고, 트램과 같이 비교적 낮은 속도의 차량은 신호교차로에서의 우선신호를 통해 효율적인 운행을 지원한다. 일반교통류와 대중교통이 혼재된 경우에는 대중교통 우선신호 제공이 효율적이지 못하므로 전용차로를 고려해야 하고, 차량의 주행성능은 최대 주행속도, 감·가속 능력, 응급상황 시 급정거 능력 등 다양한 관점에서 고려한다. 따라서 신호최적화 알고리즘에 반영할 트램의 통행특성은 다음과 같다.

첫 번째로 트램차량은 1량의 차량이 일반차량에 비해 저속으로 전용차로를 주행하여 일반차량과는 다른 연동폭의 기울기를 갖는다. 두 번째, 일반적인 트램의 운행특성으로 도로의 중앙에 전용차로가 운영되고 있으므로 좌회전을 하는 일반차량과 상충이 일어나게 되므로 동일한 주기 내에 트램현시와 동일한 방향의 좌회전 현시는 중첩이 발생할 수 없다. 따라서 트램과 일반차량의 직진현시는 동일한 크기의 통과폭을 가져야 한다. 세 번째로 트램은 정류장에서 일정시간동안 승객의 승/하차를 위해 정차해야 하며, 트램과 일반차량의 정류장의 유/무에 따라 구간통행시간의 차이를 갖는다. 네 번째로 트램차량은 차량군을 형성하지 않고, 일정한 연동폭을 사용하여 하류부 신호

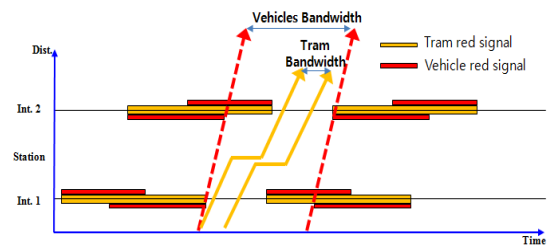


Figure 2. Duplex bandwidth of tram and vehicles

교차로를 통과하므로 일반 대중교통 우선신호 차량과는 교차로의 통과형태와 통과폭의 크기에서 차이를 갖는다.

이러한 트램의 주행특성을 트램의 신호최적화 모형에 적용하여 트램 운영구간에서 트램의 최소연동폭과 일반 차량의 지체개선을 위한 신호시간 계획을 작성한다. 본 논문에서는 이를 위해서 간선도로 연동화를 위한 신호최적화 모형인 KS-SIGNAL 모형에 트램의 주행특성을 반영하여 간선도로 연동대역폭의 최대화를 위한 혼합정수선형계획 모형인 KS-SIGNAL Tram 모형을 개발하였고, 다음과 같은 모형 개선작업을 수행하였다.

첫째, 트램과 일반차량은 중첩된 현시로 운영될 수 없으므로 트램과 일반차량 각각의 최적화된 연동폭을 산출한다. 둘째, 차량 1대 만이 독립적으로 주행하는 트램은 1대의 차량이 신호교차로를 통과할 수 있을 만큼의 연동폭을 확보하며, 차량군이 주행하는 일반차량은 최대화된 연동폭을 산정할 수 있도록 한다. 셋째, 트램과 일반차량은 서로 다른 자유속도를 가지므로 연동폭의 기울기가 서로 다르고, 이에 따라 동일한 주기 내에 두 개의 연동폭을 산출한다. 넷째, 중앙 트램 전용차로로 인해 Figure 2와 같이 좌회전 현시순서에 따라 일반차량은 중첩신호 동안에 통과가 가능하지만, 트램은 중첩신호를 이용하지 못하므로 두 이동류의 녹색시간 크기가 달라질 수 있으며, 트램의 연동폭 확보와 일반차량의 연동폭 최대화를 위한 좌회전 현시순서를 최적화 할 수 있도록 한다. 다섯째, 트램의 정류장 정차시간을 통행시간에서 고려할 수 있어야 하며, 정차시간은 개별 정류장 마다 평균 정차시간을 변수로 사용하여 달리 적용할 수 있도록 한다.

2. KS-SIGNAL 모형 분석

KS-SIGNAL 모형은 MAXBAND 모형을 기초로 하여 다수의 정수변수와 자유변수, 이진변수들로 구성된 혼합정수선형계획법 형태의 제약식을 만족하는 최적해를 산출하는 모형이다. 모형의 특징으로는 비선형 형태의 지체를 대기차량소거시간을 이용하여 선형화하고 있으며, 지체를 최소화하는 현시순서를 최적화 한다. KS-SIGNAL 모형의 차량도착 및 출발형태는 Figure 3과 같다.

여기서,

$i, i+1$: 상류부 교차로, 하류부 교차로

C : 주기

g_j : 교차로 i 의 녹색시간

r_i : 교차로 i 의 적색시간

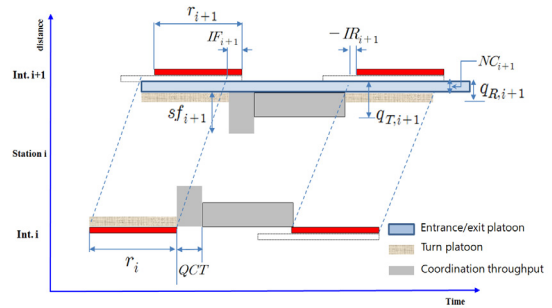


Figure 3. Departure/arrival form of platoon in KS-SIGNAL

NC_{i+1} : 교차로 i 와 하류부 교차로 $i+1$ 간 진출입 교통량

IF_i : 교차로 i 의 전방직진방해시간

IR_i : 교차로 i 의 후방직진방해시간

sf_i : 교차로 i 의 포화교통류율

$q_{T,i}$: 교차로 i 의 연동직진차량과 진출입차량의 교통류율

$q_{R,i}$: 교차로 i 의 회전차량과 진출입차량의 교통류율

QCT_i : 교차로 i 의 대기차량 소거시간

Figure 3에서 나타난 직진방해시간(IF_i, IR_i)은 연동방향 차량군의 흐름을 방해하는 적색시간을 의미하며, 차량군의 위치에 따라 전방직진방해시간과 후방직진방해시간으로 구분된다. 만약에 차량군이 방해 받으면 직진방해시간은 양수를 나타내고, 그렇지 않으면 음수를 나타낸다. KS-SIGNAL은 혼합정수선형계획법의 형태이므로, 목적함수와 많은 제약식으로 이루어져 있다. 목적함수는 한 주기동안 발생하는 N 개의 모든 교차로의 연동방향과 연동반대방향에 대한 대기차량 소거시간의 합으로 정의한다.

$$Min \sum_{i=1}^N (QCT_i + \overline{QCT_i}) \quad (2)$$

여기서 $QCT_i(\overline{QCT_i})$ 는 교차로 정지선에서 순방향(역방향)의 대기차량 소거시간으로 한 주기동안 발생하는 총 대기차량과 총 대기차량소거시간은 Figure 3에서 표현된 세 가지 차량군에 대한 값들의 합이 된다. i 교차로의 대기차량소거시간은 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$QCT_i = sf_i \times IFP_i \times sh_i - sf_i \times IFFP_i \times sh_i + q_{T,i} \times IFFP_i \times sh_i + q_{T,i} \times (IRP_i - IRRP_i) \times sh_i + sf_i \times IRRP_i \times sh_i + q_{R,i} \times (r_i - IFP_i - IRP_i) \times sh_i \quad (3)$$

여기서,

$$IFP_i = \max(0, IF_i)$$

$$IFFP_i = \max(0, IF_i - QCT_{i-1})$$

$$IRR_i = \max(0, IR_i)$$

$$IRRP_i = \max(0, QCT_{i-1} - IF_i - (1-r_i))$$

KS-SIGNAL의 제약식은 같은 혼합정수선형계획법의 형태인 MAXBAND의 형태를 따르고 있다.

① 기하구조 제약식

기하구조 제약식은 간선도로가 양방향 연동신호체제로 운영되기 위하여 만족해야하는 조건으로 모든 시간변수들은 주기에 대한 비율로 표현된다. 이 제약식은 두 개의 교차로는 방향별로 각각 동일한 통행시간을 가져야 하고, 이 두 시간을 합하면 주기의 정수배가 되어야 한다는 것을 의미한다.

$$\gamma_i - \gamma_{i+1} + t(i, i+1) \times Z + \bar{t}(i, i+1) \times Z + IF_{i+1} + \overline{IR}_i + \frac{1}{2}(r_i + \overline{r_{i+1}}) = m_{i+1} \quad (4)$$

여기서,

$t(i, i+1)$: 교차로 i 와 $i+1$ 간의 통행시간

γ_i : 교차로 i 의 중첩현시를 나타내는 값 (주기비율)

Z : $\frac{1}{C}$, 주기의 역수

m_{i+1} : 정수값(주기의 정수배)

\overline{IR}_i : 교차로 i 의 역방향 후방직진방해시간 (주기비율)

② 신호주기 제약식

모형에서 지체를 최소화하는 주기를 산정하기 위해서는 신호주기가 모형 내에 변수로 포함되어야 한다. 신호주기는 하한치와 상한치 내에서 연속적인 값으로 최적화가 이루어지는데, 여러 가지 제약조건들을 선형으로 표현하기 위해서 신호주기에 역수를 취한 신호빈도수(Z)를 사용한다.

$$Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max} \quad (5-1)$$

$$1 - r_i = IF_{i+1} + (1 - r_{i+1}) + IR_{i+1} \quad (5-2)$$

$$1 - \overline{r}_i = \overline{IF}_i + (1 - \overline{r}_i) + \overline{IR}_i \quad (5-3)$$

③ 직진방해시간 제약식

직진방해시간은 한 주기 내에서 존재해야 하므로 아래의 조건을 만족해야 한다.

$$-(1 - r_{i+1}) \leq IF_{i+1} \leq r_{i+1} \quad (6-1)$$

$$-(1 - r_{i+1}) \leq IR_{i+1} \leq r_{i+1} \quad (6-2)$$

$$-(1 - \overline{r}_i) \leq \overline{IF}_i \leq \overline{r}_i \quad (6-3)$$

$$-(1 - \overline{r}_i) \leq \overline{IR}_i \leq \overline{r}_i \quad (6-4)$$

④ 대기차량 및 대기차량소거시간 제약식

대기차량 및 대기차량소거시간 제약식은 Max 함수를 선형화하기 위해서 이진변수와 값이 큰 정수를 이용하여 다음과 같이 표현하고 있다.

$$IFFP_{i+1} \geq 0 \quad (7-1)$$

$$IFFP_{i+1} \geq IF_{i+1} - QCT_i \quad (7-2)$$

$$IFFP_{i+1} \leq M \times Z_{j_{i+1}} \quad (7-3)$$

$$IFFP - (IF_i - QCT_h) \leq M \times (1 - Z_{j_i}) \quad (7-4)$$

$$IRRP_{i+1} \geq 0 \quad (7-5)$$

$$IRRP_{i+1} > QCT_i - IF_{i+1} - (1 - r_i) \quad (7-6)$$

$$IRRP_{i+1} \leq M \times Z_{r_{i+1}} \quad (7-7)$$

$$IRRP_{i+1} - (QCT_i - IF_{i+1} - (1 - r_{i+1})) \leq M \times (1 - Z_{r_{i+1}}) \quad (7-8)$$

여기서,

$Z_{j_{i+1}}, Z_{r_{i+1}}$: 이진변수

M : 값이 큰 정수

⑤ 현시순서 최적화에 대한 제약식

좌회전 현시순서는 신호연동화에 큰 영향을 미치는 요소로 중첩을 허용하는 4가지 형태로 표현할 수 있다. 좌회전 현시순서를 최적화하기 위한 제약조건은 노드 내 읍셋으로 나타내는데, 지체를 최소화하는 주도로의 현시순서를 최적화하기 위하여 선행좌회전, 후행좌회전, 연동방향 우선 동시신호, 연동반대방향 우선 동시신호의 4가지 중첩이 허용되는 현시순서를 사용한다. 현시순서는 주기 내 읍셋인 Δ_i 와 좌회전 시간인 $l_i(\overline{l}_i)$, 이진변수 $\delta_i(\overline{\delta}_i)$ 를 사용해서 나타낸다.

$$\Delta_i = \frac{1}{2} [(2\delta_i - 1) \times l_i - (2\bar{\delta}_i - 1) \times \bar{l}_i] \quad (8)$$

여기서,

$l_i (\bar{l}_i)$: 교차로 i 에서 N(S)방향의 좌회전에 할당되는 시간

$\delta_i (\bar{\delta}_i)$: Binary Integer

이와 같은 KS_SIGNAL의 모형에서 교차로의 대기 차량소거시간을 최소화하는 목적함수가 트램의 통행시간을 최소화 할 수 있도록 수정하고, 목적함수에 대한 제약식을 트램의 특성에 맞도록 수정하고, 트램의 최소연동폭을 확보할 수 있도록 추가하여 수정된 KS-SIGNAL Tram 모형을 개발한다.

3. KS-SIGNAL Tram 모형 개발

KS-SIGNAL Tram 모형은 앞에서 분석한 기본적인 KS-SIGNAL 모형을 이용하여 일반적으로 최적화가 가능한 변수인 주기길이, 연동폭의 크기, 연동속도, 좌회전 현시의 순서의 수용과 더불어 트램의 연동속도와 연동폭을 추가적으로 최적화할 수 있는 모형이다. 따라서 전용차로를 주행하는 트램차량이 일반 도로교통과 함께 간선도로를 이용할 때 트램의 통행권을 확보하면서 일반차량의 효율성을 최대화할 수 있으며, 개발된 모형을 통해 간선도로의 고정식 트램 우선신호 시간을 산출한다. 이때 트램은 일정한 속도, 균일한 정차시간으로 주행함을 가정하였고, 트램 1대가 주행하기 위한 비교적 짧은 시간의 연동폭을 확보한 이후 일반차로를 주행하는 승용차의 교차로 대기시간을 최소화할 수 있도록 하였다.

개발된 모형에서는 KS-SIGNAL의 변수 및 제약조건을 수용하여 일반차량의 대기차량 소거시간을 최소화함과 동시에 트램의 통행을 방해하는 적색시간을 최소화하여 트램의 통행시간을 최소화 하게 된다.

Figure 4에서는 모형의 차량출발 및 도착형태를 도식화하여 표현하였다. 그림에서와 같이 일반차량의 직진방해시간(IF_i, IR_i)과 트램차량의 직진방해시간(pIF_i, pIR_i)은 각각의 개별변수로 적용되고, 트램의 정류장 정차시간 (st_i)도 모형에 변수로 반영되었다.

기존의 MAXBAND와 같은 모형에서는 직진방해변수로 통과폭 밖의 녹색시간을 사용하지만, 개발된 모형에서는 일반차량과 트램차량의 교차로 통과를 방해하는 적색시간을 사용하여 모형의 해석이 보다 직관적이며,

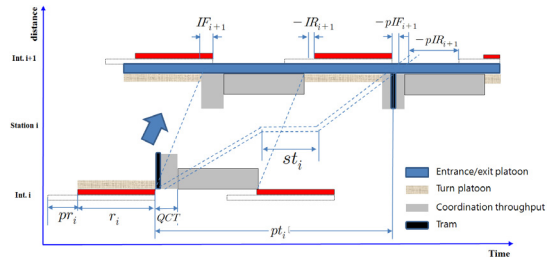


Figure 4. Departure/arrival form of developed model

녹색시간을 포함한 모든 시간대를 변수로 사용할 수 있다. 또한 기존 모형은 모든 교차로를 동시에 제약하지만, 본 모형은 인접한 두 교차로를 차례로 제약해감으로 트램과 일반차량의 연동기회를 확보하고 기하구조에 민감하게 적응해 간다.

모형의 목적함수는 모든 교차로의 연동방향과 연동반대방향의 일반차량과 트램차량의 지체와 통행시간을 최소화 하는 대기차량소거시간과 트램 통행시간의 합으로 정의한다. 연동과 지체도는 비선형의 관계를 가지므로 지체시간 대신 적색시간에 발생하는 대기차량을 기초로 산출한 대기차량 소거시간과 1주기 동안 1대가 통과하는 트램의 통행시간을 최소화하였으며, n 개의 교차로를 갖는 간선도로에 대한 목적함수는 식(9)과 같다. 또한 일반차량의 연동대역폭의 크기를 N방향 통과폭에 대한 S방향 통과폭의 목적비인 k 에 의해 결정할 수 있다.

$$MIN \sum_{i=1}^n [(QCT_i + k\overline{QCT}_i) + pt_i + \overline{pt}_i] \quad (9)$$

여기서,

QCT : 일반차량의 대기차량 소거시간

$pt(\overline{pt})$: 트램 차량의 통행시간

k : 연동의 가중치 (N방향 교통량/S방향 교통량, $k \geq 1$)

KS-SIGNAL Tram 모형의 세부적인 변수 및 제약조건은 다음과 같다.

첫 번째, 모형의 기하학적 제약조건으로 간선도로가 양방향 연동신호체계로 운영되기 위해서 일반차량과 트램 모두 이 조건을 만족해야 한다. 모든 변수들은 주기에 대한 비율로 표현되며 교차로 i 에서 $i + 1$, $i + 1$ 에서 i 는 한 개의 순환루프를 형성하게 되는데, 이 루프의 시간을 모두 합하면 다음과 같은 주기의 정수배가 되어야 한다.

$$\Delta_i - \Delta_{i+1} + \varnothing(i, i+1) + \overline{\varnothing}(i, i+1) = m_i \times C \quad (10)$$

여기서,

- $\Delta_i (\Delta_{i+1})$: 동일 노드 내 옵셋, 적색시간의 중심에서 가장 가까운 적색시간의 중심까지 시간
- $\varnothing(i, i+1)$: i 교차로의 적색시간 중심에서 $i+1$ 교차로의 적색시간의 중심까지의 시간
- C : 주기
- m : 정수형 *Loop Integer* 변수

이 식을 이용하여 일반차량의 교차로 간 통행시간과 트램의 통행시간을 고려하고, 트램차량이 일반차량과 다른 크기의 연동시간을 가질 수 있으므로 pm_i 의 변수를 추가적으로 적용하면 다음과 같은 Loop Integer 제약식을 구성할 수 있다.

$$pm_i - p\Delta_{i+1} + p\varnothing(i, i+1) + \overline{pm}(i, i+1) = pm_i \times C \quad (11)$$

여기서,

- $t(i, i+1)$: i 교차로에서 $i+1$ 교차로까지의 차량진행 시간
- $r_i (r_{i+1})$: i 교차로의 적색시간
- $p\Delta_i (\Delta_{i+1})$: 트램의 동일 노드 내 옵셋, 적색시간의 중심에서 가장 가까운 적색시간의 중심까지 시간
- $p\varnothing(i, i+1)$: i 교차로의 트램 적색시간 중심에서 $i+1$ 교차로의 트램 적색시간 중심까지의 시간
- pm : 트램의 정수형 *Loop Integer* 변수

트램차량의 좌회전 현시 제약에서는 일반차량의 좌회전 현시는 트램의 직진현시와 중첩될 수 없다는 조건을 반영한다. 이러한 트램차량의 중첩현시 방지를 위해서 일반차량 적색시간 중심과 트램차량의 적색시간 중심간의 옵셋을 의미하는 $p\Delta_i (\overline{p\Delta_i})$ 라는 Binary 변수를 이용하여 각 신호교차로의 좌회전이 방향별로 현시순서를 달리하는 경우에 $p\Delta_i (\overline{p\Delta_i})$ 가 0 또는 1의 값을 갖도록 하여 각 교차로의 현시순서를 구분한다. lead-lag 및 lag-lead의 $(\delta, \overline{\delta})$ 의 조합이 (0, 1), (1, 0)인 경우에 1을 나타내게 하고, lead-lead 및 lag-lag의 조합이 (0, 0), (1, 1)인 경우에는 일반차로 적색시간과 중앙트램 전용차로의 적색시간이 동일하므로 $p\Delta_i (\overline{p\Delta_i})$ 는 0을 나타낸다. 진입방향과 진출방향의 좌회전 시간이 동

일함을 가정하면, 더미변수로 이진변수(α_i)를 이용하여 트램차로의 적색시간을 다음과 같이 표현한다.

$$pr_i = r_i + \alpha_i L_i \quad (12-1)$$

$$\overline{pr_i} = \overline{r_i} + \alpha_i L_i \quad (12-2)$$

여기서,

- α_i : 좌회전 현시순서에 따른 트램의 적색시간 범위 결정을 위한 더미변수(이진변수)
- $L_i (\overline{L_i})$: 진입 및 진출방향의 좌회전 현시 길이

좌회전 현시순서를 의미하는 변수인 $(\delta, \overline{\delta})$ 와 α_i 를 이용하여 일반차로와 트램 전용차로의 적색시간 길이가 다른 경우를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_i + \overline{\delta_i} + \alpha_i \leq 2 \quad (13-1)$$

$$\delta_i + \overline{\delta_i} - \alpha_i \geq 0 \quad (13-2)$$

$$\delta_i - \overline{\delta_i} - \alpha_i \leq 0 \quad (13-3)$$

$$\delta_i - \overline{\delta_i} + \alpha_i \leq 0 \quad (13-4)$$

여기서,

- $\delta_i (\overline{\delta_i})$ = 진입(진출)방향의 좌회전 현시순서

트램의 Loop Integer 조건 수정을 보면, 트램의 Loop Integer 식을 제약조건으로 사용하기 위해서 정의한 $p\varnothing$ 와 $\overline{p\varnothing}$ 를 식(12)와 식(13)을 이용하여 재정의 하였다.

트램의 Loop Integer 제약조건은 주기의 정수배로 다음과 같이 사용한다.

$$pt(i, i+1) + \overline{pt}(i, i+1) \times \frac{1}{C} + (pIF_{i+1} - pIF_i) + \frac{1}{2}(r_i + \overline{r_i}) - \frac{1}{2}(r_{i+1} + \overline{r_{i+1}}) + \frac{1}{2}\alpha_i(L_i + \overline{L_{i+1}}) - \frac{1}{2}\alpha_i(L_{i+1} + \overline{L_{i+1}}) = pm_{i+1} \quad (14)$$

트램과 일반차량의 진행대폭 관계 제약에서는 트램차량과 일반차량이 서로 다른 주기 동안에 각각의 연동폭 내에서 개별교차로를 통과할 수 있음을 나타낸다. 여기서 주방향의 좌회전 길이가 동일함을 가정하였고, 트램과 일반차량의 적색시간 중심간 거리를 의미하는 $\varnothing, p\varnothing$ 는 진입/진출 방향 모두 주기길이의 정수배와 동일한 차이를 보인다. 따라서 좌회전 현시가 방향별로 동일하므로

트램과 일반차로 적색시간 중심간 거리인 $p\Delta_i(\overline{p\Delta_i})$ 는 $\frac{1}{2}\Delta_i$ 로 표현될 수 있다.

$$p\emptyset(i, i+1) - \emptyset(i, i+1) = qm(i, i+1) \quad (15-1)$$

$$pt(i, i+1) - t(i, i+1) + (pIF_{i+1} - IF_{i+1}) \quad (15-2)$$

$$- \frac{1}{2}(\alpha_i L_i - \alpha_{i+1} L_{i+1}) + \delta_i L_i - \delta_i \overline{L}_i - \frac{1}{2}(L_i - \overline{L}_i)$$

$$- \delta_{i+1} L_{i+1} - \delta_{i+1} \overline{L}_{i+1} - \frac{1}{2}(L_{i+1} - \overline{L}_{i+1})$$

지체를 최소화하는 최적신호주기를 산정하기 위해서는 신호주기가 모형 내 변수로 신호주기 제약식이 포함되어야 한다. 신호주기는 상한과 하한값 내에서 최적화가 수행되며, 선형으로 표현하기 위해 신호주기 대신 역수를 취한 빈도수 (Z)를 사용한다.

$$Z = 1/C \quad (16-1)$$

$$1/C_{\max} \leq Z \leq 1/C_{\min} \quad (16-2)$$

$$1 - pr_i = pIF_i + (1 - pr_i) + pIR_i \quad (16-3)$$

$$1 - \overline{pr}_i = \overline{pIF}_i + (1 - \overline{pr}_i) + \overline{pIR}_i \quad (16-4)$$

트램차량의 직진방해시간은 한 주기 내에 존재해야 하므로 다음과 같은 제약조건을 만족해야 한다.

$$-(1 - pr_i) \leq pIF_i \leq pr_i \quad (17-1)$$

$$-(1 - pr_i) \leq pIR_i \leq pr_i \quad (17-2)$$

$$-(1 - \overline{pr}_i) \leq \overline{pIF}_i \leq \overline{pr}_i \quad (17-3)$$

$$-(1 - \overline{pr}_i) \leq \overline{pIR}_i \leq \overline{pr}_i \quad (17-4)$$

트램의 통행시간은 정류장 정차시간을 포함하고, 정류장의 존재와 정차시간의 범위를 방향별로 포함해야 한다. 또한 최대 및 최소속도의 범위에서 통행시간이 결정되어야 하며, 정류장의 유/무를 나타내는 이진변수와 정차시간을 적용하여 진입/진출방향에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$(p\Delta_i/pf_i + p_i \times st_i) \times \frac{1}{C} \leq pt_i \quad (18-1)$$

$$\leq (p\Delta_i/pc_i + p_i \times st_i) \times \frac{1}{C}$$

$$(\overline{p\Delta}_i/p\overline{f}_i + \overline{p}_i \times \overline{st}_i) \times \frac{1}{C} \leq \overline{pt}_i \quad (18-2)$$

$$\leq (\overline{p\Delta}_i/p\overline{c}_i + \overline{p}_i \times \overline{st}_i) \times \frac{1}{C}$$

트램의 연동폭은 트램 적색시간을 제외한 주기 내에 존재하고, 최소 연동폭을 보장해야 하므로 다음의 제약조건을 만족해야 한다.

$$\min pb_i \times Z \leq 1 - (pr_i + pIF_i + pIR_i) \leq \max pb_i \times Z \quad (19)$$

$$pIF_i \leq 0, \quad pIR_i \leq 0$$

여기서,

$\min pb_i$: i 번째 진출 및 진입방향의 최소연동폭 크기

$\max pb_i$: i 번째 진출 및 진입방향의 최대연동폭 크기

모형의 효과분석

1. 효과분석의 개요

연구에서 제시한 신호최적화 모형의 효과를 평가하기 위해 1개의 대상 신호제어 구간에 대해 KS-SIGNAL Tram 모형을 이용하여 신호최적화를 수행하고, 미시적 시뮬레이션 모형을 통해 모형의 효과를 확인하였다.

분석대상 구간은 현재 트램의 도입을 위해 기본계획을 수행중인 경상남도 창원시 원이대로 상의 13개 교차로에 대해서 시뮬레이션 평가를 수행하였다. 분석 대상 구간은 총 2.7km 구간에 13개의 신호교차로를 포함하고, 총 4개의 트램 정류장을 포함하고 있다. 대상구간에는 도로 중앙부에 트램을 위한 전용차로가 운영중인 것을 가정하였고, 도로 중앙부에 트램 정류장을 설치하여 일반 이동류와 트램차량의 상충이 없는 것을 가정하였다. 또한 트램 정류장의 정차시간은 본 모형의 고정식 우선신호 제어 효과와 트램 연동폭 산출 여부를 검증하기 위해 트램차량의 정차시간을 고정하였고, 트램차량이 고정식 최적신호시간 연동폭 내에서 모든 교차로를 정지없이 운행하는지 평가를 수행하였다.

실험대상 축의 기하구조 조건과 함께 본 전략의 적용을 위한 트램 운영조건 및 변수의 범위로서 Table 1과 같은 조건을 설정하였다. 1량의 트램차량이 일정한 속도로 주행하고, KS-SIGNAL Tram 모형의 우선신호 제어효과를 검증하기 위해 정류장의 정차시간을 고정하였기 때문에 트램의 최소 연동폭을 15초로 가정하여 최적화를 수행하였다. 승용차와 트램의 연동속도 범위는 각각 80km/h, 45km/h로 설정하였고, 트램차량의 배차간격은 3분으로 고정하였으며, 일반차량의 입력교통량은 $V/C = 0.6$ 정도의 오전첨두시 현황교통량을 적용하였다.

시뮬레이션 분석을 위한 도구는 VISSIM 모형을 사

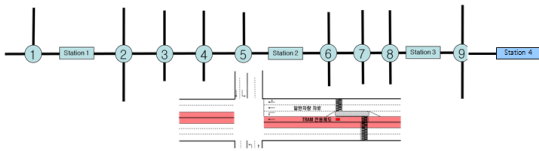


Figure 5. Geometry condition of study area

Table 1. Condition of simulation evaluation

Analyze condition	Application contents	Note	
Tram	bandwidth	15초	minimum bandwidth
	coordination speed	45km/h	free speed
	stop time in station	15초	fixed time
Vehicles	coordination speed	80km/h	free speed

용하고, 랜덤시드를 달리하여 10회씩 반복하여 시뮬레이션 평가를 수행하였다. 평가 시나리오는 현재 경상남도 창원시의 트램 설계구간에서 운영하고 있는 현황신호와 PASSER-II 모형을 이용한 신호최적화, 본 연구의 개발모형 적용의 3가지 시나리오로 평가를 수행하였다. 트램과 일반차량의 개선효과를 검증하기 위한 평가 지표로서 트램의 경우, 이동성의 확보를 평가하는 통행시간과 차량진행의 연속성을 판단하는 정지수를 사용하여 평가를 수행하였다. 일반차량은 신호교차로의 평균정지체와 평균통행시간을 통해 지체개선 여부를 판단하고, 정지수를 통해 연동효과를 판단하였다.

2. 효과분석 결과

현재 창원시 원이대로에 적용되고 있는 현황신호로 제어구간의 연동폭을 산정한 결과, 현황신호에서는 트램과 일반차량 모두 연동폭을 확보하지 못하였고, Passer-II 모형을 이용하여 트램차량의 속도와 정류장 정차시간을 고려한 신호최적화를 수행한 결과에서는 Figure 6과 같이 트램에 대한 연동폭을 25초 확보할 수 있었으나, 일반차량은 양방향 모두 연동폭을 확보하지 못하였다.

하지만 KS-SIGNAL Tram 모형의 적용결과, Figure 7과 같이 트램의 진출방향과 진입방향에 각각 15초의 트램 연동폭을 확보할 수 있었으며, 일반차량의 연동폭도 34초를 확보할 수 있었다. KS-SIGNAL Tram 모형에서 트램 차량은 모든 정류장에서 정차없이 진행이 가능했으나, 이를 위해서는 정류장 2에서 진출방향에서 23초, 진입방향에서 6초의 추가적인 정차가 발생하는

Table 2. Assessment Scenario

Scenario category	Condition of Assessment	Note
1. Present traffic signal	Evaluated by operating traffic signal time in Changwon city	-
2. PASSER-II Opt. signal	Evaluated by optimized signal time of PASSER-II model	Optimized base on tram
3. KS-SIGNAL Tram Opt. signal	Evaluated by optimized signal time of KS-SIGNAL Tram model	-

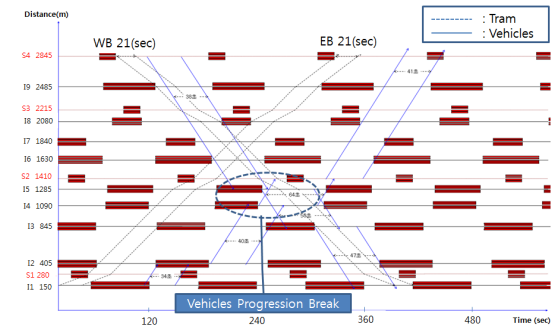


Figure 6. Result of time-space diagram by Passer-II

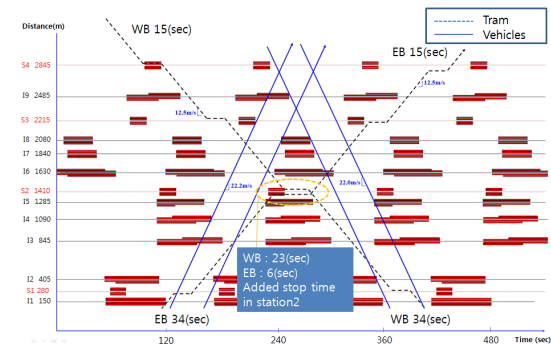


Figure 7. Result of time-space diagram by KS-SIGNAL

것으로 분석되었다. KS-SIGNAL Tram 모형을 적용하였을 때 트램의 분석구간 통행시간은 592초로 현황신호에 비해 약 13.3%의 감소효과를 나타냈고, PASSER-II 모형과는 비슷한 결과를 나타냈다.

차량진행의 연속성을 알아보기 위해서 차량의 교차로 정지수를 살펴보면, KS-SIGNAL Tram 모형과 PASSER-II 모형은 0.2회로 처음 네트워크에 진입해서 겪는 지체를 제외하고는 실험구간 내에서 신호교차로의 정차를 경험하지 않는 것으로 나타났다. 하지만 현황신호의 경우, 평균 3.8회의 신호교차로 정차를 경험하는 것으로 나타나 13개의 신호교차로 중 약 4번의 정차를 경험하는 것으로 분석되었다.

Table 3. Analyzed result (EB/WB)

Application model	Vehicles				Tram		
	Bandwidth (sec)	Travel time (sec)	Average stop delay(sec)		Bandwidth (sec)	Travel time (sec)	Stop no.
			Main Arterial	Network			
Present Traffic Signal	-	391/362	14.8	58.6	-	671/640	3.8
PASSER-II	-	491/432	17.9	79.9	25/21	596/580	0.2
KS-SIGNAL Tram	38/38	402/361	15.1	55.1	15/15	592/599	0.2

일반차량의 평균 정지지체를 살펴보면 PASSER-II 모형은 트램 위주의 신호최적화 결과로 인해 현황보다 주방향과 네트워크 전체의 지체가 모두 증가한 것으로 분석되었다. KS-SIGNAL Tram 모형은 현황신호와 주방향의 지체 결과에서 현황신호의 시뮬레이션 결과와 큰 차이를 나타내지 않아, KS-SIGNAL Tram 모형이 트램의 연동폭을 확보하면서 일반차로의 지체도 고려할 수 있음을 확인하였다.

결론 및 향후 연구과제

본 연구는 도시부 간선도로의 트램 전용차로 구간을 대상으로 트램 우선신호 모형을 개발하여 트램의 도입에 따라 나타날 수 있는 문제점들을 해결하고 트램의 연동화와 기존 일반 이동류들의 지체증가 문제를 해결하려고 하였다. 이를 위해 트램의 간선도로 신호연동화를 위한 트램 신호최적화 모형을 개발하였다.

개발된 신호최적화 모형은 간선도로 신호최적화 모형인 KS-SIGNAL 모형을 기본으로 하여 트램의 최소 연동폭을 확보하고, 일반차량의 지체를 최소화하는 것을 목적으로 개발하였다. 기존 KS-SIGNAL 모형의 변수와 제약조건들을 모두 수용하고, 일반차량과 통행특성이 다른 트램의 간선도로 주행특성을 기존 모형에 적용하여 1대의 트램차량이 간선도로의 전용차로를 정지없이 주행할 수 있는 최소한의 연동폭을 확보하였으며, 비선형 형태의 지체를 선형화한 대기차량소거시간을 이용하여 일반차량의 지체를 최소화하였다.

개발된 KS-SIGNAL Tram 모형을 통해 트램 시스템의 도입이 예정되어 있는 경상남도 창원시 원이대로의 분석대상 구간의 신호주기, 현시순서, 읍셋을 산출하여 효과 분석을 수행한 결과, 현황신호와 기존의 간선도로 연동폭 최대화 모형인 Passer-II 모형을 이용한 신호최적화 결과에 비해 트램의 통행시간과 정지수 감소효과가 뛰어났

으며, 일반차량의 지체도 고려할 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 간선도로에서 트램차량과 일반차량을 동시에 고려하는 신호최적화 모형의 개발로 인해 무엇보다 기존의 대중교통 우선정책과 같이 트램차량에게 통행 우선권을 주는 것만을 고려하는 것이 아니라 일반차량의 지체를 고려한 신호제어 전략을 개발하였다는데 의의가 있으며, 향후 국내에 트램 시스템의 도입 시, 적용이 가능한 신호운영 기술과 그 성공 가능성을 제시하였다는데 의미가 있다.

본 연구의 한계로 간선도로의 중앙 트램 전용차로를 대상으로 연구를 수행하여 시스템 설치지역의 기하구조에 따른 일반차로와의 혼용문제에 대해서 고려하지 못하였으며, 1대의 차량이 독립적으로 운영되는 것을 가정하여 다량편성 트램차량의 속도변화, 정차시간의 변화 등의 다양한 차량성능에 따른 제어효과의 변화에 대해서 분석을 수행하지 못했다. 또한 정류장의 위치에 따른 우선신호의 제어효과에 대해서도 추가적인 연구가 필요하다. 트램 시스템의 운영측면에서 한계를 살펴보면, 다수의 트램 노선이 동일한 전용차로에서 동시에 운영되거나 혹은 한 개의 노드에서 교차하는 상황에서는 트램 우선 신호 전략에 문제가 발생할 것으로 예상된다.

향후 연구과제는 위에서 언급한 현장적용의 한계나 시스템 운영측면에서 한계를 극복하기 위한 추가적인 모형의 개발에 해당된다. 추가적으로 트램차량과 일반차량이 혼재된 형태의 운영구간에 대한 신호제어 전략과 연결구간의 트램과 일반차량의 상충문제에 대한 연구가 필요하고, 이에 대해 통합 신호제어 전략의 수정이 요구된다. 또한 다수의 노선과 다양한 성능의 트램차량이 동시에 운영될 때 신호최적화 모형 및 신호제어 전략에 반영하는 것이 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant(12 Transportation system efficiency 07) from Transportation system efficiency Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport Affairs of Korean Government.

REFERENCES

Abebe Y., Conte R., Gordon S., Mustafa K. (1996), Planning Methods for Integrating LRT Operations

