

트램 운영을 위한 신호제어 전략 및 신호제어기의 개발

이인규^{1*} · 김영찬¹ · 이주일¹ · 오승훈²

¹ 서울시립대학교 교통공학과, ² 경기대학교 도시·교통공학과

Development of the Traffic Signal Control Strategy and Signal Controller for Tram

LEE, In-kyu^{1*} · KIM, Youngchan¹ · LEE, Joo il¹ · OH, Seung Hwoon²

¹ Department of Traffic Engineering, University of Seoul, Korea

² Department of Urban & Transportation Engineering, Kyonggi University

Abstract

In recent years, tram has been the focus of a new mode of public transportation that can solve traffic jams and decrease public transit usage and environmental problem. This research is in the works to develop a tram signal controller and signal control strategies, and aim to resolve the problem of what could happen if a tram system was installed in general road. We developed the hierarchical signal control strategies to obtain a minimum tram bandwidth and to minimize vehicle delay, in order to perform a priority control to include passive and active signal priority control strategies. The strategies was produced for S/W and H/W, it is based in standard traffic signal controller. We conducted a micro simulation test to evaluate the hierarchical signal control strategies, which showed that the developed optimization model is effective to prevent a tram's stop in intersection, to reduce a tram's travel time and vehicle's delay.

본 연구는 최근 국내 도입이 추진되고 있는 궤도교통수단인 트램이 일반교통류와 도로를 공유했을 때 발생할 수 있는 문제를 예상하고, 트램운영의 효율성과 안정성을 확보할 수 있는 신호운영 전략과 통합 신호운영이 가능한 신호제어기 시작품을 개발하는데 연구의 목적이 있다. 통합 신호운영을 위해 고정식 트램 우선신호와 능동식 트램 우선신호를 포함한 3단계의 유기적인 통합 신호제어 전략을 수립하였고, 각 단계별 전략수행을 위한 신호운영 알고리즘을 개발하였다. 개발된 신호제어 알고리즘을 S/W로 구현하고, 표준 신호제어기에 기반한 H/W로 제작하였고, 이를 평가하기 위한 통합 신호제어 시뮬레이터(Hardware in the Loop Simulation system: HILS)를 개발하였다. 미시적 시뮬레이션 프로그램을 통해 통합 신호제어 전략의 효과와 개발된 통합 신호제어기의 성능을 평가한 결과, 본 연구를 통해 개발된 신호제어 알고리즘으로 산출한 교차로 신호 시간이 트램차량의 신호교차로 정지수와 통행시간을 감소시켰음을 확인하였고, 트램 우선신호에 따른 일반차량의 지체증가가 거의 나타나지 않음을 확인하였다. 또한 통합 신호제어 시뮬레이터를 통해 개발된 통합 신호제어기의 H/W와 S/W의 기능 수행 여부를 확인하였다.

Keywords

hierarchical strategy, signal progression, tram, traffic signal priority, traffic signal controller
계층적 전략, 신호제어기, 트램, 우선신호, 신호 연동화

* : Corresponding Author
photohk31@uos.ac.kr, Phone: +82-02-6490-5646, Fax: +82-02-2210-2653

Received 18 July 2014, Accepted 6 January 2015

서론

1. 연구의 배경 및 목적

최근에 계속해서 증가하는 도시의 교통정체와 대중교통 이용률의 정체 문제를 해결하기 위한 방안으로 기존의 도시철도, 버스와 다르게 경제성과 효율성을 갖춘 새로운 대중교통수단의 도입에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 문제의 대안으로 국내에서는 도로교통과 철도교통의 장점을 흡수하여 현대적으로 재해석한 트램의 도입을 통해 도시지역의 교통 문제를 해결하려는 움직임이 나타나고 있다. 창원시와 수원시, 위례신도시 등에서 예비타당성 조사와 기본설계가 진행되고 있으며, 이러한 선형 도시들의 성공여부에 따라 타 도시에서도 트램의 도입을 추진할 것으로 예상된다. 하지만, 현대화된 최신식 트램을 도입하기 위해서 무가선 트램, 바이모달 트램 등의 H/W에 관련된 연구와 개발이 진행되고 있는 반면, 기존 도시교통 환경에서 트램을 운영하기 위한 교통법규, 도로구성 기준, 신호운영 기술 등의 적용 및 운영을 위한 기본적인 S/W의 연구는 아직까지 진행된 바가 없다. 특히 우리나라는 산업화 이후, 트램의 운영이 폐기되어 기본적인 신호운영에 대한 기술이 전무한 실정이다.

본 연구는 도시부의 간선도로에 트램 시스템이 도입될 경우를 대비하여 전체 도시부 신호제어 및 교통류 흐름을 저해하지 않으면서 운영 효율을 증대시키기 위한 목적으로 수행되었고, 철도교통이 아닌 도시부 도로교통의 관점에서 트램의 제어 및 원활한 운영을 지원할 수 있는 신호운영기술을 개발하였다.

2. 연구의 목표 및 범위

본 연구의 최종목표는 트램과 같은 제2의 대중교통수단 도입에 대비하여 대중교통과 일반 도로교통이 공존하는 도시부 복합도로의 제반운영기술 및 신호제어기 개발을 수행함으로써 궁극적으로 도시부 간선도로의 대중교통 이용률 증진 및 이동성 확보와 그에 따른 온실가스 감축을 최종 목표로 하고 있다. 구체적인 연구 산출물로 도시부 중앙 전용차로에서 트램과 자동차의 통합운영을 위한 통합 신호제어 전략과 신호제어기 개발을 최종 목표로 하고 있다.

연구의 주요내용은 크게 통합 신호제어 전략 수립 및

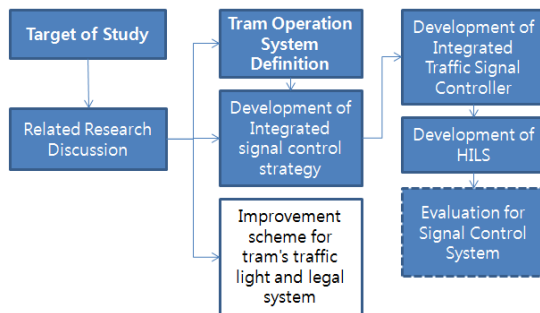


Figure 1. Research procedure

평가와 통합 신호제어기 및 평가시스템의 개발로 나눌 수 있다. 기초 연구에서는 해외 트램의 운영사례와 운영 전략에 대해 조사를 수행하여 국내에서 기존 자동차 중심의 도로운영체계에 궤도교통수단인 트램을 추가하였을 때 예상되는 문제점을 분석하고, 이를 해결하기 위한 기본적인 운영목표 설정하였다. 이를 바탕으로 신호제어 전략 및 신호제어 알고리즘 개발과 통합 신호제어 수행을 위한 신호제어기의 H/W 간 기초 인터페이스를 설계하였고, 개발된 통합 신호제어 알고리즘을 S/W로 구현하여 표준 신호제어기를 기반으로 한 통합 신호제어기를 제작하였다. 본 연구에서는 트램의 도입이 예정된 지역의 현장조사를 통해 수집된 교통정보를 이용하여 시뮬레이션 분석을 통한 효과분석을 수행하였고, 개발된 H/W와 S/W의 직접적인 효과검증 및 현장평가를 대체하기 위한 방안으로 HILS 시스템을 이용한 평가를 수행할 계획에 있다.

국내·외 관련 연구

1. 대중교통 우선신호 연구

대중교통 차량에 대한 우선신호 제공은 1960년대부터 유럽에서 적용하기 시작했으며, 대중교통의 우선처리를 위해 현재 사용되는 전략들은 1990년대 이후 실시간 신호제어 시스템을 기반을 둔 연구사례들이 주를 이루고 있다. 특히 최근에 IT 기술과 무선통신 기술이 괄목할만한 성장을 이루었고, 이를 활용한 대중교통 우선신호 연구가 활발히 진행되고 있다.

대중교통 우선신호는 대중교통 차량의 지체를 감소시키고, 이동성을 확보하는데 그 목적이 있으나, 일반적인 교차로 신호운영은 전체 교차로의 지체를 최소화하거나 간선도로의 연동을 확보하는데 목표를 두고 있다. 따라

서 대중교통 우선신호는 교차로 전체의 지체를 감소시키는 신호최적화 목표 내에서 대중교통의 통행 우선권을 보장하는 처리가 이루어지도록 하는 것이 무엇보다 중요하다. 대중교통 우선신호는 크게 고정식 우선신호와 능동식 우선신호로 구분할 수 있고, 고정식 우선신호의 경우 차량의 검지여부에 상관없이 신호가 제공되고, 능동식 우선신호는 대중교통의 위치 및 수행조건에 따라 신호운영 방식이 결정된다.

국내에서는 2000년대 이후 BRT(Bus Rapid Transit)가 설치되면서 대중교통 우선신호에 대한 연구가 활발히 이루어졌고, 하남, 고양, 청라 등의 수도권 BRT가 구축되면서 고정식과 능동식 우선신호를 이용한 대중교통 우선신호가 사용되고 있다.

고정식 우선신호에 대한 연구로 Skabardonis(1985)는 정류장의 정차시간을 고려한 교차로 대중교통 신호계획을 작성하였고, Skabardonis(2000)의 또 다른 연구에서는 개별차량의 위치정보를 이용하여 능동식 우선신호의 효율을 높이는 방법을 적용하여 우선신호의 효율성을 높였다. Han(2009)의 연구에서는 중앙버스 전용차로의 신호시간계획을 최적화하기 위해서 TRANSYT-7F 모형과 PASSER 모형을 결합하여 사용하였고, 두 모형을 이용한 단계적 신호최적화 방법을 수행함으로써 버스 및 일반차량을 모두 고려한 신호계획을 작성하였다. 능동식 우선신호는 대중교통의 검지여부에 따라 적절한 우선신호가 제공되는 방식으로서 루프 검지기나 비콘, 통신장치를 이용한 실시간 교통정보를 활용하여 대중교통 차량의 우선신호 요청에 대해 실시간으로 최적신호를 응답, 제공해 주는 방식을 사용하고 있다.

실시간 신호제어 시스템과 연계한 우선신호 연구로서 Eleni et al.(2010)은 단일교차로를 대상으로 전체 Person Delay를 최소화하는 교통대응식 신호제어 전략에 대해서 연구하였으며, 2대 이상의 버스가 교차로에 접근할 때 조건적인 우선신호를 제공함으로써 교차로 전체의 Person Delay를 최소화하였다. Vasudevan(2005)의 연구에서는 간선도로의 버스우선신호 수행을 위해 실시간으로 버스의 연동폭을 최대화하기 위한 신호제어 전략을 개발하였다. 이 연구에서 고정식 우선신호 제어와 능동식 우선신호 제어를 수행하기 위한 3단계의 신호제어 시스템 전략을 구성하였고, 교차로의 최소녹색시간과 정류장의 평균대기시간 및 실시간 교통정보를 이용한 버스의 연동폭 최대화 모형을 개발하였다.

앞에서 살펴본 대중교통 우선신호 전략은 크게 고정

식과 능동식 우선신호, 실시간 신호제어 전략으로 구분할 수 있고, 운영 시스템의 수준과 우선신호 수행조건 등에 따라 각 시스템에 적합한 우선신호 전략을 적용하고 있다. 따라서 우선신호를 통해 트램의 이동성을 확보하고, 일반차량을 지체를 최소화하기 위해서는 해외의 트램 운영형태와 전략을 반영한 통합적인 고정식과 능동식 우선신호 전략의 개발이 필요하다.

2. 트램 신호운영 및 평가

지금까지 트램의 신호운영과 관련한 연구는 주로 버스 우선신호 제어와 유사한 형태의 신호제어 전략 개발에 집중되어 왔다. 주로 트램이 신호교차로에 도착했을 때 트램차량에 우선현시를 제공하기 위한 비우선현시의 소거방법과 우선신호 이후의 비우선현시의 Restoring을 위한 방법론이 제어전략의 핵심이었고, 이와 동시에 실시간 신호제어 시스템과 연계하여 운영하는 방법이 연구되어 왔다.

Meng et al.(2007)는 경전철을 위한 능동식 우선신호 제어에 대한 연구에서 경전철의 우선신호 시스템을 차량검지, 정류장 정차시간 예측, 우선신호 요청, 우선신호 제어기의 총 4가지 시스템으로 정의하였고, 신호교차로에서 우선신호의 영향을 최소화 할 목적으로 경전철 차량의 정류장 정차시간을 예측하여 교차로 신호시간의 계산에 반영하였다. Dreher(2007)는 영국 노팅엄 지역의 경전철을 중심으로 대중교통 우선시스템과 일반교통의 상호작용과 신호운영 계획에 대해서 연구를 수행하였고, VISSIM 모형과 VISVAP 모형을 통한 사례중심의 평가를 수행하였다. Jeong(2011)의 논문에서는 트램의 우선신호를 위한 전략으로 기존의 고정식 우선신호 제어와 능동식 우선신호를 동시에 적용한 트램 신호제어 전략을 개발하였다. Cho(2003)는 능동식 우선신호 제어와 관련하여 열차의 도착시간 예측알고리즘을 개발하고, 그것을 바탕으로 Preemption 알고리즘을 개발하였다.

트램의 신호운영과 관련한 해외사례에서는 각 도에서 현재 운영 중인 실시간 신호제어 시스템과 연계하고 있음을 확인하였고, 트램의 운행특성을 반영하지 못한 일반적인 우선신호 제어전략을 수행하고 있음을 확인하였다. 이와 관련하여 트램의 고유특성을 반영하기 위한 노력이 국내·외 연구를 통해 진행되었고, 본 연구에서는 이러한 연구의 심화를 통해 트램의 개별차량 주행, 전용차로 이용, 정류장 정차 등의 특성을 반영한 신호제어 전

략을 개발하는 것이 필요함을 확인하였다.

신호운영 전략 및 신호제어기 H/W의 평가와 관련하여 HILS(Hardware-In-Loop Simulation system)는 현장적용 평가를 대신하여, 개발중인 평가 대상장치나 시스템을 모형에 연결하여 실시간으로 시뮬레이션 하는 기술로서 개발되어 왔다. 미국의 경우는 기존에 우주항공 및 방위산업 분야에서 활용되고 있던 HILS의 개념을 신호제어시스템의 효율성을 평가할 목적으로 현재 무선장치 활용 분야로의 적용을 시도 중이고, 유럽은 광역 실시간 교통신호 제어전략의 평가를 위하여 기존 소프트웨어 기반 시뮬레이션 모형을 발전시켜 나가는 형태로 개발 중에 있으며, 한국은 2007년에 도로교통공단에서 자체 개발한 한국형 중계장치(Real-CID라 칭함)를 개발한 사례가 있다. 2010년의 'u-Transportation 운영관리기술 개발' 연구에서는 신호교차로의 유비쿼터스 신호제어를 평가하기 위한 용도로 HILS를 개발하였다.

본 연구에서는 개발된 통합 신호제어전략의 실용화를 위해 현장적용이 가능한 신호제어기 기반의 S/W와 H/W를 제작하였고, 앞선 사례에서와 같이 S/W에 기반을 둔 신호제어전략과 신호제어기를 평가하기 위해서 HILS 시스템을 제작하여 통합 신호제어기 시작품의 기능과 활용성을 평가하는데 활용하였다.

자동차와 트램의 통합운영 기술 개발

1. 통합 신호운영 전략 개발

국내의 트램 시스템 적용을 위해 고려해야할 법제도와 트램 신호의 문제점 및 개선방안을 살펴보면, 현재 우리나라에는 일반 차량을 위한 신호등 뿐만 아니라 중앙버스전용 신호등, 자전거 신호등 등이 마련되어 실제 도로상에 설치·운영되고 있으나 트램을 위한 신호등은 별도로 준비되어 있지 않은 실정이다. 트램의 특성상 기존

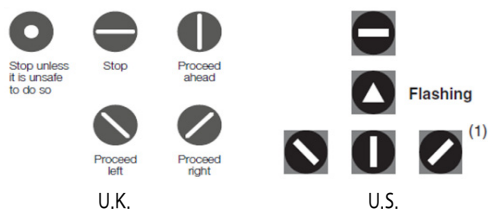


Figure 2. Tram signal light of U.K. and U.S.

신호체계의 이동류와는 별도로 정해진 궤도를 따라 이동류가 통행한다는 점과 이동류의 회전에 제약이 따른다는 점을 고려할 때 별도의 전용 신호등이 필요하다. 향후 제정될 것으로 예상되는 트램 관련법을 기본으로 하여 도로교통법에서 인용/준용한 후에 도로교통법시행규칙에 관련 규정을 삽입하고, 아울러 교통신호기 설치·관리 매뉴얼에서 노면전차 전용신호등의 만드는 방법, 설치장소, 설치기준 등을 규정해야 할 것으로 판단된다. 또한 Figure 2과 같이 유럽과 북미에서 백색과 문양으로 표출되는 일반적 트램 신호등을 사용하기 위해서는 도로교통법시행규칙 및 교통신호기 설치·관리 매뉴얼을 수정해야 한다. 트램은 차량과 보행자 및 일반차량의 통행을 중심으로 구성된 도로에 새롭게 추가되는 교통수단으로 운송수단으로서의 정의, 운행방법에 대한 규정 등의 보완이 필요하다. 따라서 도로교통, 도시철도, 도시교통 등의 다양한 법규에 대한 관련 조문을 해석하여 기존 법규와 상충되는 않는 법제도의 개정이 필요하다.

일반 간선도로에서 트램과 일반차량을 동시에 제어하기 위한 트램의 운영시스템은 앞에서 살펴본 법제도 및 전용 신호등 설치방안 등을 고려하여 설계되어야 하고, 일반차량과의 상충을 방지하면서 우선신호를 수행하기 위해서 Figure 3과 같은 트램 정류장 위치, 전용 신호등 설치위치, 차량 검지체계의 설치위치가 정의되어야 한다.

통합 신호제어전략을 개발하기 위해서 국내의 도로여건과 트램 운행여건, 기존 대중교통과의 연계 및 경쟁력 확보 등을 고려한 트램의 운영목표 및 요구기능을 정의하였다. 우선 트램 차량의 무정차 통행을 보장함으로써 대중교통의 이동성과 정시성을 확보하고, 트램 차량이 교차로에서 정지하지 않기 위해 상류부 정류장에서 장시간 대기하는 것을 방지하기 위해 트램 우선신호를 통해 정차시간을 최소화하는 것을 목표로 한다. 또한 트램 우선신호로 인해 일반차량의 지체가 증가하는 것을 최소화하고, 일반교통류와의 상충을 방지하여 신호교차로의 안전성을 확보한다.

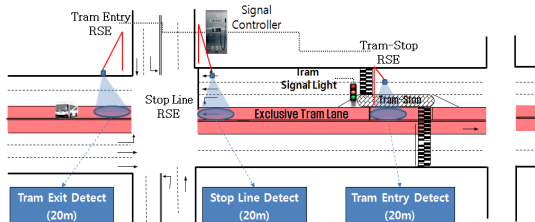


Figure 3. Component of tram operation system

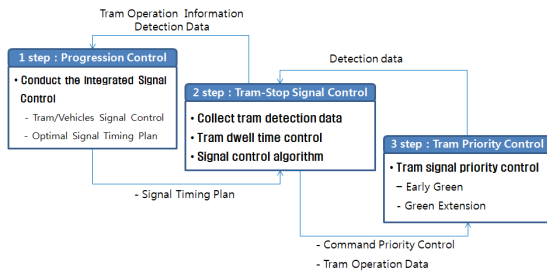


Figure 4. Integrated traffic signal strategy

위와 같은 트램의 운영목표를 기본으로 Figure 4와 같은 3단계 유기적인 통합 신호제어 전략을 구축하였다.

3단계 통합 신호제어전략은 고정식 우선신호를 지원하여 트램과 일반차량의 연동을 확보하는 첫 번째 단계의 Progression Control 전략, 트램의 정류장 정차시간을 최적화하여 교차로 무정차 통행을 지원하는 두 번째 단계의 Tram-Stop Signal Control 전략, 트램의 능동식 우선신호를 지원하여 트램차량의 교차로의 우선신호 전략을 수행하는 세 번째 단계의 Tram Priority Control 전략으로 구성된다. 이러한 3단계의 계층적인 신호제어 전략 구성은 상위 제어단계인 Progression Control에서 하위 제어단계인 Tram Priority Control 단계까지 차량의 검지정보, 신호시간 계획, 트램 운행정보 등의 유기적인 정보교환을 수행한다. 신호제어 과정은 상위 제어단계에서 하위 제어단계로 순차적으로 명령을 전달하고, 각 전략들은 상호 유기적으로 제어에 필요한 정보를 제어단위(100ms) 마다 실시간으로 교환한다. 이러한 계층적 신호제어 전략을 통해 고정식 우선신호와 능동식 우선신호의 한계를 상호 보완하고, 정류장의 정차시간 제어를 통해 트램의 교차로 정차 가능성을 낮춘다.

1단계 전략에서 기본적인 고정식 우선신호를 통해 일반차량에 영향을 미치지 않는 가장 낮은 수준의 우선신호 제어를 수행하고, 2단계에서 정류장 정차시간 제어를 수행하여 트램의 교차로 무정차 통행을 지원하고, 3단계 제어에서는 트램의 능동식 우선신호를 수행함으로써 교차로 무정차 수행을 위한 가장 높은 수준의 제어를 수행하게 된다. 1단계에서 3단계까지 수준별 제어를 수행함으로써 트램의 무정차통행 가능성을 높이고, 일반차량의 영향을 낮추기 위한 우선신호제어 적용 강도를 조절할 수 있고, 차량의 검지체계와 트램 우선신호 시스템의 수준에 따라 적합한 신호제어 전략을 적용할 수 있다.

Progression Control 단계의 전략은 일반적으로 신

호운영센터에서 수행하는 전략으로 통합 신호제어를 위한 전체 시스템의 관리와 트램과 자동차의 교통정보 수집 및 최적 신호시간 산출을 수행하고, 별도의 우선신호제어를 위한 시스템을 필요로 하지 않는다.

Tram-Stop Signal Control 단계의 전략은 트램 운영구간 내 개별교차로의 통합 신호제어기에서 수행되는 전략으로서 트램 우선신호를 위한 검지자료를 수집하여 트램 우선신호를 명령하고, 트램차량의 교차로 무정차 통과를 위한 정류장 최소 정차시간을 계산하며, 신호제어를 위해서 정류장의 전용신호등과 트램 검지기 설치를 필요로 한다.

Tram Priority Control 단계의 전략은 요청된 우선신호 제어를 신호교차로에서 효과적으로 수행하기 위한 전략으로서 능동식 우선신호를 판단하는 알고리즘과 Figure 3에서 정의된 트램 운영 시스템을 필요로 한다. 통합 신호제어전략에서는 기존 능동식 우선신호 전략과 같이 주기, 오프셋, 현시순서를 변경하지 않고, 일반차량에 신호시간 변경에 따른 교통흐름의 충격과 지체를 최소화하기 위해 트램의 정류장 정차시간을 이용한다. Green, Green Extension, Phase Insertion 전략 중, 현시길이 변경을 최소화 할 수 있는 전략을 선택해서 사용하고, 특히 Phase Insertion 전략의 경우에는 교차로의 양방향에서 트램이 동시에 우선신호를 요청할 경우에만 한정적으로 적용하여 교차로의 현시순서 변경에 따른 안전상의 문제를 최소화 한다.

2. 통합 신호운영 알고리즘 개발

3단계 통합 신호운영 전략을 수행하기 위해서 일반차량의 지체를 최소화하면서 트램과 일반차량의 연동폭을 확보하기 위한 신호최적화 방안, 트램의 효율적인 무정차 전략을 구현하기 위한 정류장 정차시간제어 알고리즘, 효율적인 우선신호 제어를 위한 우선신호 판단 알고리즘, 신호교차로에서 트램의 대항방향 상충을 고려하기 위한 대항방향 상충판단 알고리즘 등을 개발하였다.

Progression Control에서 고정식 우선신호를 위한 신호시간 산출 방법은 Figure 5에서 표현된 것과 같이 구간 통행속도를 일반차량이 아닌 정류장 정차시간을 포함한 트램 통행속도를 기준으로 1단계 트램 연동중심의 신호시간을 산출한다. 이때 트램의 연속진행이 가능한 최소 연동폭을 확보하게 되고, 이후 2단계로 최소연동폭의 제약기능이 있는 T-7F 모형을 이용하여 앞서 산출된

Object	Used S/W	Consideration	Output
Maximize tram's bandwidth	Passer-II	- Input vehicle's volume - Tram's dwell time - Tram's average running speed	Cycle, Phase length, Phase order, Offset
Minimize vehicle's delay	T-7F	- Vehicle's average running speed - Constraint max/min offset for tram	Recalculation Offset

Constraint Tram's bandwidth

Figure 5. Passer + T-7F combined model

트램의 연동폭을 고정한 채, 일반차량 지체변화를 최소화하는 읍셋을 산출한다.

Tram-Stop Signal Control은 트램차량이 고정식 우선신호를 통해 확보된 연동폭을 벗어났을 경우, 트램 정류장의 정차시간을 임의로 조정함으로써 다시 연동폭 안으로 회복시키는 방법이다. 신호제어기에서 트램의 운행정보를 수집하여 첫 번째로 트램의 교차로 도착 예상 시간에 트램의 교차로 통과가 가능한지를 판단하고, 두 번째로 트램 우선신호 제어를 통해 교차로 통과가 가능한지 판단하여 무정차 통과가 불가능할 경우, 트램 우선신호를 요청하고, 교차로를 통과하는데 필요한 우선신호 시간간이(Priority Window)를 계산한다. 마지막으로 트램 우선신호 수행을 통해 교차로 통과가 불가능할 경우, 트램의 정류장 정차시간과 현재 교차로 신호시간을 고려하여 트램의 정류장 최소 정차시간을 계산하고, 트램이 정차없이 교차로를 통과할 수 있는 시간(Departure Window)을 계산하며, Departure Window를 기준으로 트램 정류장의 전용 신호등을 등기한다. Figure 6에서 트램의 정류장 정차시간 제어 순서는 다음과 같다.

- ① Departure Window 종료 - 트램의 정류장 도착
- ② 의무 정차시간 동안 정차
- ③ Priority Window와 Departure Window 계산 대기시간 동안 교차로 정차
- ④ Departure Window 시작 및 녹색등화 트램차량 출발
- ⑤ Departure Window 종료 및 적색등화

Priority Signal Control은 Tran-Stop signal Control에서 요청된 트램 우선신호 제어를 신호교차로에서 효과적으로 처리하기 위한 전략이다. Tram Priority Control전략의 첫 번째 목표는 능동식 우선신호 제어를 통해 트램의 교차로 정지를 방지하는 것이고, 두 번째 목표는 트램의 대기시간을 단축할 수 있는 능동식 제어 기법의 선택을 통해 효과적인 신호제어를 수행하는 것이

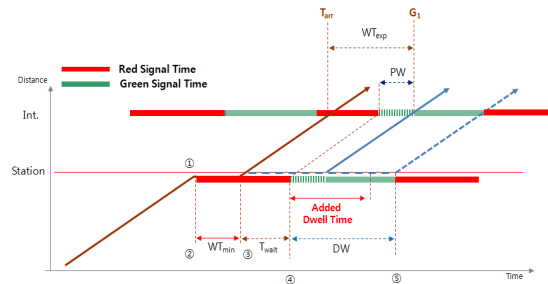


Figure 6. Tram-stop signal control process

다. 정류장에서 트램 정차시간을 최소화하기 위해서는 적합한 능동식 우선신호를 판단하는 처리가 필요하며, 모든 개별교차로 단위에서 트램차량의 도착시간과 하류부 교차로의 신호 현황에 따라 Green Extension과 Early Green, Phase Insertion 전략을 선택적으로 적용한다. 비우선현시의 최소시간 및 보행자 통행시간의 보장이 가능한 Early Green과 Green Extension 기법을 사용하여 트램차량에 우선신호를 제공하고, 대항방향의 트램차량이 동시에 진입할 경우에는 Phase Insert 기법을 적용하여 신호교차로와 정류장의 최적 신호시간을 계산한다. Figure 7의 능동식 트램 우선신호 제어의 제어순서는 다음과 같다.

- ① 신호운영센터에서 계산된 최적 신호시간을 받아서 고정식 우선신호 수행
- ② 트램차량이 트램정류장에 진입 (정류장이 없는 링크에서는 검지기 Check-In)
- ③ 신호제어기로 우선신호제어 요청
- ④ 능동식 우선신호 제어가 필요한지 판단해서 트램의 정류장 정차시간을 계산하고, 트램정류장의 트램 전용 신호등을 제어 (정류장이 없는 링크는 하류부 교차로에서 능동식 우선신호 제어)
- ⑤ 트램차량이 출발한 이후, 정지선 검지기를 통해 트램차량이 교차로 정지선에 정차했는지 확인하고, 링크진출 검지기로 트램차량이 교차로를 통과했는지 확인한 후에 일반신호로 복귀

우선신호 판단 알고리즘은 트램의 신호교차로 무정차 통과를 위해 우선신호제어를 수행할 경우에 Green Extension, Early Green, Phase Insertion 중, 정류장에서 대기 중에 어떤 전략이 가장 효율적인지 판단하는 알고리즘이다. 우선신호 전략의 판단기준은 트램 정류장이 설치된 링크에서는 의무정차시간 이후, 트램의

정류장 대기시간을 가장 짧게 하는 전략을 선택하게 되고, 트램정류장이 설치되지 않은 링크에서는 트램의 검지지점을 기준으로 가장 효율적인 우선신호 제어전략을 선택한다. Figure 8에서 교차로 예상도착시간 시작지점 (W)과 이후 트램의 고정 연동폭(15초)을 더한 교차로 예상도착시간 종료지점 (W')을 계산하고, 두 변수가 모두 트램현시(G_p) 내에 속하게 되면 특별한 우선신호 제어기가 없이 일반현시계획으로 운영되고, W 가 트램현시에 속하지만 W' 가 트램현시를 벗어난 경우나 둘 다 벗어났지만 $W - G_1 > (W - W') + I_1$ 의 조건에 부합하는 경우에 Green Extension 기법을 수행한다. W 가 트램현시 보다는 크고, 비우선 현시의 최소녹색시간의 합보다 작으며, $C > W'$ 조건이거나 $C - 5$ 가 나머지 현시의 최소녹색시

간의 합보다 작으면 정류장에 대기한다. 또한 W' 가 현재 남아있는 현시의 최소녹색시간의 합보다 크다면 Early Green 기법을 사용하고, 트램의 교차로 도착시간과 대향 방향의 트램차량의 영향으로 Green Extension과 Early Green 기법을 적용하였음에도 트램이 교차로에 정차하는 상황이 발생하게 되면 Phase Insertion 기법을 사용하여 교차로의 대기시간을 최소화하는 전략을 선택한다.

대향방향 상충판단 알고리즘은 트램이 양방향 복선으로 운행되기 때문에 1주기 동안 양방향에서 트램차량이 동시에 교차로에 진입하여 우선신호를 요청하는 경우에는 트램의 교차로 정차가 발생할 수 있다. 따라서 트램의 정류장 도착시간 및 교차로 예상 도착시간을 고려하여 대향방향 상충판단 및 제어를 수행한다. 또한 신호제어 단위 간의 연동단절 문제를 개선하기 위해 트램 정류장의 추가적인 정차시간을 보장하여 적용하였다.

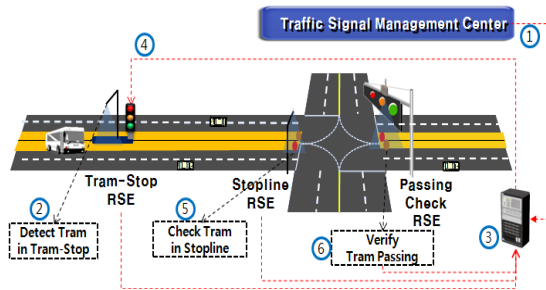


Figure 7. Tram priority signal control process

3. 통합 신호제어기 개발

본 연구에서는 신호제어 전략과 신호제어 알고리즘을 S/W로 구현하고, 표준 신호제어기의 H/W에 적용하여 테스트를 수행함으로써 개발된 신호제어전략이 이론적인 연구에 그치는 것뿐만 아니라, 개발된 전략의 논리와 연

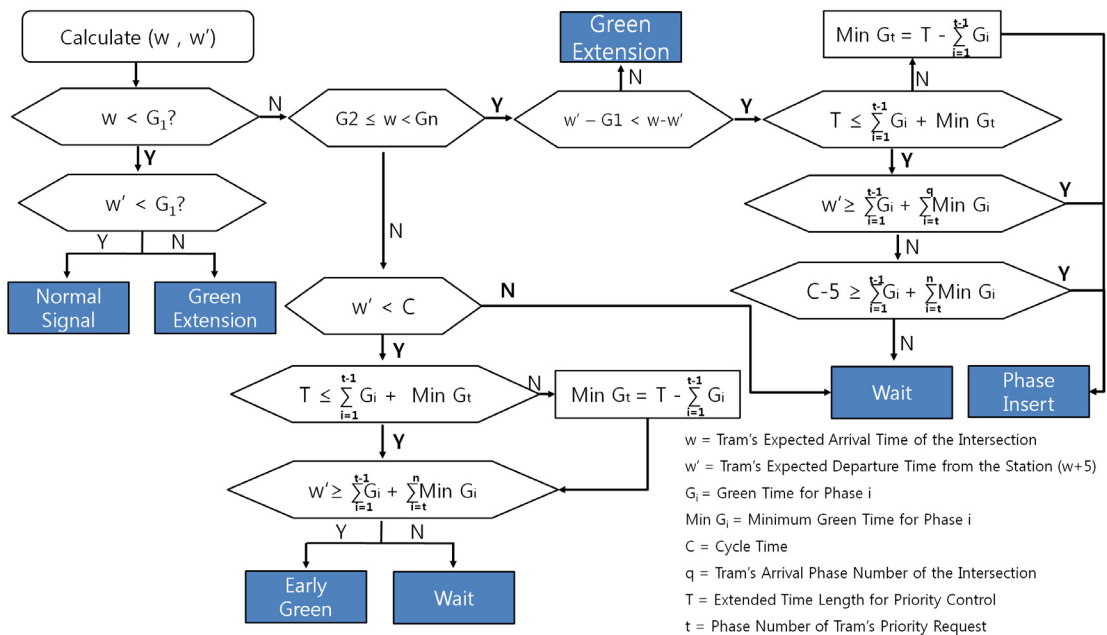


Figure 8. Tram priority control decision algorithm

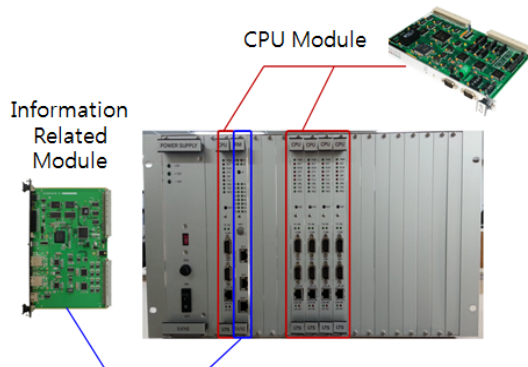


Figure 9. H/W composition of main control module

구의 실용성을 증명하였다. 통합 신호제어기는 표준 신호제어기 기반위에 다양한 교통수단별 검지특성과 인터페이스 사양을 충족하기 위해 도로교통공단의 표준 신호제어기 규격서에서 정의한 PPC (Preemption & Priority Controller) 모듈 인터페이스 사양을 적용하였고, Figure 9에서와 같이 정보연계모듈(IRM: Information Related Module)을 장착하여 트램과의 정보연계를 수행하도록 하였다. 주제어부 역시 표준 신호제어기의 규격을 준수하여 제작하였고, 트램 우선신호 알고리즘 S/W가 탑재된 정보연계 모듈과 신호제어기 CPU 모듈 간의 정보연계 시험과 외부 시스템과의 통신시험을 성공적으로 수행하였다.

평가를 위해 제작된 통합 신호제어 시뮬레이터는 VISSIM 모형의 COM Interface 모듈과 통합 신호제어기 간의 TCP/IP 통신을 이용하여 정보연계를 수행하고, VISSIM 모형에서 트램차량이 검지되면 COM Interface 모듈을 통해 중계모듈과 연결하여 트램차량의 검지데이터를 전송하며, 신호제어기에서 계산된 신호시간을 수신하여 VISSIM 모형에 적용한다. 본 연구에서는 VISSIM 모형을 통해 구현한 현장 데이터를 통합 신호제어기에 송신하고, 신호제어기에서 산출한 신호시간을 다시 수신하기 위해서 API 모듈을 이용한 시스템 연계 프로그램을 작성하여 평가에 적용하였다.

통합 신호제어 전략 평가

1. 통합 신호제어 전략 평가 개요

개발된 트램 신호제어 전략의 평가를 위해 트램 시스템 기본설계가 진행되었던 창원시의 계획구간을 실험대

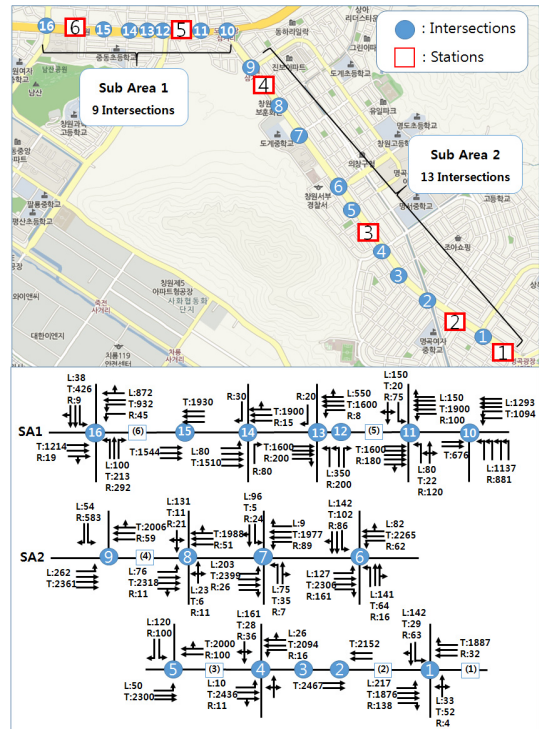


Figure 10. Geometry condition of study area

상 지역으로 선정하였다. 대상구간은 Figure 10에서와 같이 창원시 의창대로와 원이대로에 걸친 총 4.1km 길이의 22개 교차로를 대상으로 하였고, 22개 교차로는 단일로 4개와 트램 정류장 6개를 포함한다. 12개 신호 교차로는 9개의 4지교차로와 3개의 3지 교차로로 구성되어 있고, 정류장 6개는 모두 링크의 중간(mid block)에 위치하는 것으로 가정하였다. 평가대상 구간은 총 2개의 신호제어구간으로 구성되는데, 의창대로의 9개 교차로는 SA1에 포함되고, 원이대로의 13개 교차로는 SA2에 포함되어 있으며, 통행특성이 다른 2개의 제어구간은 본 연구의 Progression Control 전략에 따라 각각 신호최적화를 수행하였다. 해당구간의 교통량 수준은 실제 조사된 침두시 교통량을 적용하여, 개략적으로 주방향 교통량 $V/C=0.7$, 부방향은 $V/C=0.25$ 수준을 가정하였다. Figure 10에서 각 방향별 교통량을 명시하였다.

분석 시나리오는 PASSER-II 모형을 이용하여 일반차량을 기준으로 해당구간에 대한 신호최적화 작업을 수행한 첫 번째 시나리오와 Progression Control만을 적용한 두 번째 시나리오, 통합 신호제어 전략을 적용한 세 번째 시나리오, 대향방향 상충판단 알고리즘과 SA 간의

Table 1. Assessment scenario

Scen.	Contents	Note
S0	Passive Tram Priority Signal	Apply to passive tram signal priority using the PASSER-II
S1	Progression Control	Apply to passive tram signal priority using Progression Control Strategy
S2	Integrated Signal Control Strategy	Apply to developed tram signal priority
S3	Modified Integrated Signal Control Strategy	S2 + modified signal priority algorithm

Table 2. Analysis condition

	Condition	Applied value	Note
Tram	bandwidth	15(sec)	Minimum bandwidth
	Average speed	60(km/h)	Free Speed
	Dwell time	15-45(sec)	Comply to Normal Distribution
	Tram interval	2(min)	Directional 30 veh.
vehicles	Average speed	80(km/h)	Free Speed
	volume	V/C=0.7	Research data in peak time
	Cycle Length	120(sec)	Apply the optimal cycle length using PASSER-II model

연동화 전략을 적용한 네 번째 시나리오로 구성하였다.

시뮬레이션 분석을 위한 도구는 VISSIM 모형과 우선신호 제어 알고리즘을 구현하기 위한 VISVAP 모형을 사용하였고, 평가 시나리오 별로 모형의 랜덤시드를 달리하여 10회씩 반복 수행하였고, 각 시나리오 별로 1시간 동안 시뮬레이션 평가를 수행하였다. 설정된 시나리오에 따라 Passer-II 모형과 Passer + T-7F combined model을 사용하여 트램의 최소 연동폭을 15초로 고정하고, 일반차량의 연동폭은 최대화하여 각 제어구간에 최적화 된 교차로 신호계획을 산출하여 적용하였다. 트램의 주행속도는 자유속도를 60km/h로 가정하였고, 일반차량은 해당구간의 제한속도인 80km/h를 사용하였다. 시뮬레이션분석에서 트램의 연동에 가장 큰 영향을 미치는 정류장 정차시간은 최소 정차시간을 15초로 가정하였고, 15초의 최빈값과(+)30초의 최대값을 갖는 정규분포를 따르도록 하였다. 트램의 배차간격을 3분으로 가정하여 1시간에 총 20대가 대상구간의 트램노선에서 발생하도록 하였다.

효과적도는 트램과 일반차량, 두 가지를 동시에 고려

한 부분으로 나누어 선정하였고, 트램이 교차로 무정차 통행을 달성했는지 확인하기 위해 평균 교차로 정지수(회/대)를 산출하였으며, 이동성 평가를 위해 평균 통행시간(초/대)을 확인하였다. 또한 일반차량의 신호제어에 따른 영향을 분석하기 위해서 가장 일반적인 교차로 교차로의 성능평가 항목인 평균제어지체(초/대)를 사용하였고, 중앙 트램 전용차로의 트램현시와 동시에 제어되는 주방향 직진현시와 트램 우선신호 제어에 영향을 받는 비우선현시들을 구분하여 효과적도를 산출하였다. 마지막으로 트램차량과 일반차량의 신호제어 효과를 동일한 기준으로 비교하기 위해서 교차로 평균 사람당 제어지체(초/인)를 산출하여 신호제어 효과를 검증하였다.

2. 통합 신호제어 전략 평가 개요

트램차량의 양방향 평균 주행시간을 분석한 결과, 고정식 우선신호 전략을 적용한 Progression Control(S1) 전략은 트램 전용차로의 신호연동 효과로 인해 Passer-II 최적화 신호시간 적용(S0)에 비해 약 23%의 통행시간 감소효과를 나타낸 것으로 분석되었고, S2는 628.3초의 평균 주행시간을 나타내어, 능동식 우선신호의 추가적인 녹색시간 증가효과로 인해 S0에 비해 약 30%의 통행시간 감소효과를 나타내었다. S3는 599.2초의 평균 통행시간을 나타냄으로서 개선된 통합 신호제어 전략이 S0에 비해 약 33%의 통행시간 개선을 나타내었고, S2에 비해서는 약 5%의 개선효과를 나타낸 것으로 분석되었다. 신호제어 전략별 연동효과와 신호교차로 무정차 통행효과를 확인하기 위해 트램 정류장을 제외한 총 16개 교차로에 대해서 트램의 교차로 평균 정지수를 확인하였고, S0은 6.7회, S1은 3.0회, S2는 1.5회, S4는 0.3회의 평균 교차로 정지수를 나타냈다. 개선된 통합 신호제어(S3)의 경우에는 0.3회 까지 정지수를 감소 시킴으로서 신호제어 목표인 트램의 교차로 무정차 통과를 달성한 것으로 판단된다.

일반차량에 대한 분석결과에서 트램의 우선신호 제어에 따른 일반차량의 지체증감 효과를 확인하기 위해 주방향 우선현시의 교차로 평균 차량당 제어지체를 확인하고, 트램 연동화에 따른 일반차량 직진현시의 영향을 분석하였다. 일반차량의 주방향 평균 제어지체를 분석한 결과, S0은 13초, S1은 15.2초로 2.2초의 지체가 증가하여, 고정식 우선신호 제어에 따른 일반차량의 지체가 약간 증가하였음을 알 수 있다. 하지만 S2와 S3 전략을

Table 3. Test result for trams & vehicles

MOE		S0	S1	S2	S3
Trams	Ave. Travel Time (sec/veh)	898.5	695.8	628.3	599.2
	Ave. Stops (no/veh)	6.7	3.0	1.5	0.3
Vehicles	Ave. Ctrl. Delay in Main Street (sec/veh)	13.0	15.2	13.1	13.1
	Ave. Ctrl. Delay in Network (sec/veh)	32.3	33.5	33.9	34.1

적용했을 경우에는 Passer-II의 최적화 신호와 차이가 없고, 능동식 우선신호 제어에서 추가적인 녹색시간이 제공됨에 따라 일반차량의 동일한 통행기회 증가로 인해 지체가 감소했음을 알 수 있다. 네트워크 전체의 평균 제어지체 분석에서 S0은 32.3초, S1과 S2는 33.5초로 고정식 우선신호 제어에 따른 비우선현시의 지체증가 효과가 나타났고, S2와 S3는 각각 33.9초와 34.1초로 능동식 우선신호 제어의 수행에 따라 부방향과 회진차로의 녹색시간이 줄어들면서 전체적인 지체가 증가한 것으로 확인되었다. 이러한 효과분석 결과는 우선신호 제공에 따른 트램 연동화로 인해 교차로 전체의 지체가 약간 증가하였으며, 교차로 지체의 증가분으로 트램이 무정차 통행을 수행하고 있음을 나타낸다고 볼 수 있다.

평균 사람당 제어지체의 분석결과, S0은 28.3초, S2는 21.4초로 고정식 우선신호를 수행함에 따라 교차로의 사람당 평균 제어지체가 약 25% 감소하였고, S2는 19.4초로 S0에 비해 약 32%의 지체감소 효과를 나타내었으며, S3도 약 34%의 지체개선 효과를 나타냈다. 이러한 결과는 트램을 위한 통합 신호제어 전략의 적용이 차량을 기준으로 하는 네트워크 전체의 지체는 약간 증가할 수 있으나, 대중교통 중심의 신호제어를 수행함으로써 사람당 지체는 감소할 수 있음을 보여준다.

결론 및 향후 연구계획

본 연구는 트램과 자동차의 효율적인 통합 운영을 위한 신호제어 전략과 신호제어기의 개발을 목표로 신호제어 알고리즘을 개발하였고, 신호제어 프로세스 및 S/W를 개발하였으며, 통합 신호제어기 H/W 개발을 통해 연구의 이론적인 성과를 실용화하였다.

기초연구의 수행을 통해 국내 트램 도입을 위한 문제점과 트램 신호등 및 법제도의 개선방향을 모색하였고, 통합 신호운영을 위한 3단계의 계층적 신호제어 전략을

개발하였다. 개발된 신호제어 전략을 바탕으로 통합 신호운영 프로세스를 정의하고, 전략의 수행을 위한 각 단계별 세부 신호제어 알고리즘을 개발하였다. 또한 신호제어기에 적용하기 위한 S/W를 개발하였고, 통합 신호제어기의 H/W와 평가를 위한 시뮬레이터를 제작하였다. 개발된 신호제어 전략을 통해 트램 시스템의 도입이 예정되어 있는 경상남도 창원시 원이대로를 대상으로 효과분석을 수행한 결과, 개발된 신호제어 전략이 일반적인 신호최적화 전략에 비해 통행시간 및 정지수 감소효과가 뛰어났으며, 일반차량의 지체도 고려할 수 있음을 확인하였다. 다만, 이 연구에서는 주방향의 V/C가 0.7인 근포화 조건에서 신호운영 효과를 평가하였고, 향후 다양한 기하구조와 교통량 변화에 따른 신호제어 전략의 적용성을 평가할 예정이다.

이 연구는 간선도로에서 기존의 대중교통 우대신호와 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 성공가능성을 제시하였다는데 의미가 있다. 또한 개발된 신호제어 전략을 수행하는 표준 신호제어기 기반의 통합 신호제어기 모듈을 개발함과 동시에 신호제어 전략을 평가하고 분석하기 위한 통합 신호제어 시뮬레이터(HILS)를 개발함으로써 수행된 연구의 실용화 기반을 마련하였다.

향후 연구에서는 통합 신호제어 시뮬레이터를 통해 다양한 교통상황 별로 평가 시나리오를 구축하고, 통합 신호제어기의 테스트를 수행하여 도출된 문제점을 개선해야 하며, 실제 현장에 적용하여 사용할 수 있는 수준의 S/W 및 H/W의 완성도를 높일 예정이다. 또한 트램 전용차로를 설치할 수 없는 구간에서의 일반차로와의 혼용 문제와 다수의 트램 노선이 동일한 전용차로에서 동시에 운영되거나 혹은 한 개의 노드에서 교차하는 상황에서의 트램 우선신호 전략의 개선이 필요하므로 이에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 한다.

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

- A Study on Efficiency Evaluation Model for Realtime Signal Control System (2007), The Road Traffic Authority, Traffic Science Institute, (실시간 신호제어 시스템 효율성 평가모형 개발에 관한 연구).
- Cho H. S. (2003), Preemption Strategy for Traffic Signals at Intersections Near Highway-Railroad Grade Crossings, Texas A&M University.
- Development of Traffic Signal Algorithm based on u-Transportation (2010), Ministry of Land Transport and Maritime Affairs (u-Transportation 운영관리기술 개발).
- Development of Traffic Signal Algorithm for Complete Street (2013), Annual Report of Ministry of Land, Infrastructure and Transport Affairs of Korean government (자동차와 트램 교통신호 통합운영기술 개발, 1 차년도 보고서).
- Development of Traffic Signal Algorithm for Complete Street (2014), Annual Report of Ministry of Land, Infrastructure and Transport Affairs of Korean government (자동차와 트램 교통신호 통합운영기술 개발, 2 차년도 보고서)
- Dreher F., Ahuja S., Van Vuren T., Smith J. (2007), Innovative Modelling and Design of Integrated Light Rail Transit Priority Systems Case Study LRT Nottingham, Mott MacDonald, Birmingham, United Kingdom, Intelligent Transportation Systems, 8, 77-86.
- Eleni M., Skabardonis A. (2010), Traffic Signal Optimization With Conditional Transit Signal Priority for Conflicting Transit Routes, 12th WCTR.
- Han Y. H., Kim Y. C. (2009), Bus Signal Timing Optimization for Bus Progression With PASSER V and TRANSYT-7F, The 61th Conference of Korean Society of Transportation, Korean Society of Transportation, 761-765.
- Jeong Y. J. (2011), Traffic Signal Control Strategy for Tram Priority in Arterial, University of Seoul, 75.
- Meng Li, Guoyuan Wu, Yue Li, Fanping Bu, Wei-bin Zhang (2007), Active Signal Priority for Light-Rail Transit (LRT) at Grade-Crossings, TRB 2007 Annual Meeting.
- Skabardonis A. (1985), Comparative Analysis of Computer Models for Arterial Signal Timing, Transportation Research Record 1021, Transport Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- Skabardonis A. (2000), Control Strategies for Transit Priority, Transportation Research Record 1727, Transport Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Vasudevan M. (2005), Robust Optimization Model for Bus Priority Control Under Arterial Progression, Ph.D. dissertation, University of Maryland, Baltimore, Maryland.
- 알림 : 본 논문은 “자동차와 트램 교통신호 통합운영기술 개발 보고서(한국건설교통기술평가원, 2014. 05)”의 내용을 수정/보완하여 작성한 것입니다.
- ✉ 주 작성자 : 이인규
 ✉ 교신저자 : 이인규
 ✉ 논문투고일 : 2014. 7. 18
 ✉ 논문심사일 : 2014. 9. 26 (1차)
 2014. 11. 6 (2차)
 2014. 12. 16 (3차)
 2015. 1. 6 (4차)
 ✉ 심사판정일 : 2015. 1. 6
 ✉ 반론접수기한 : 2015. 6. 30
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필