

트램의 연속통행을 위한 능동식 우선신호 전략 연구

A Study on Active Priority Control Strategy for Traffic Signal Progression of Tram

이 인 규*
(In-Kyu Lee)

김 영 찬**
(Kim, Young-Chan)

요 약

해의 주요 도시에서 운영되고 있는 트램은 도시부의 교통혼잡과 대중교통의 수송분담율 감소 문제, 환경문제를 해결할 수 있는 대중교통 수단으로 인식되어 우리나라의 각 지방자치 단체에서 시스템 도입을 진행 중에 있다. 본 연구에서는 기존 신호운영 체계에서 트램을 효율적으로 운영하기 위한 능동식 트램 우선신호 전략을 개발하였다. 트램 우선신호를 수행하기 위한 시스템을 구성하고, 트램 정류장의 정차시간을 제어를 통해 트램의 교차로 무정차 통과를 구현하는 알고리즘을 개발하였으며, 대향방향의 트램차량을 고려하여 트램의 신호교차로 연속통행을 구현하였다. 또한 트램의 교차로 도착시간에 따라 정류장의 정차시간을 최소화하기 위한 능동식 우선신호 전략을 선택함으로써 신호제어 효과를 극대화 하였다. 개발된 신호제어전략을 평가하기 위해서 VISSIM 모형의 API 기능을 이용하여 트램 우선신호 제어전략을 구현하여 신호제어 효과를 분석한 결과, 트램차량의 신호교차로 정지수와 통행시간이 감소했음을 확인하였고, 일반차량도 트램 우선신호에 따른 지체증가가 거의 나타나지 않음을 확인하였다.

핵심어 : 트램, 능동식 우선신호, 트램 전용차로, 신호연동화, 정차시간 제어

ABSTRACT

Recently, our local governments are conducting the introduction of tram system because it is recognized as an effective public transit that can solve a traffic jam in downtown, decreasing public transit share and environmental issues in world wide cities. We developed the Active Priority Control Strategy to efficiently operate a tram in our existing traffic signal system.

This study organized the tram system for operating the Active Priority Signal Control, developed the algorithm that calculates a tram-stop dwell time in order to pass the downstream intersection without a stop. The dwell time is determined by arrival time at tram-stop, downstream signal time, and the location of a opposite tram, it can be reduced by choosing the optimal one among Signal Priority Controls.

Using the VISSIM and VISVAP model, we conducted a simulation test for the city of Chang-won that it is expected to install a tram system. It showed that a developed signal control strategy is effective to prevent a tram's stop in intersections, to reduce a tram's travel time.

Key words : Tram, Active Priority Control, Exclusive lane, Progression, Tram Dwell Time Control

† 본 연구는 국토교통과학기술진흥원 교통체계효율화사업(12교통체계효율화-자유07) '자동차와 트램 교통신호 통합운영기술 개발'의 지원으로 수행되었습니다.

* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 연구교수

** 공저자 및 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

† 논문접수일 : 2014년 04월 10일

† 논문심사일 : 2014년 05월 23일

† 게재확정일 : 2014년 06월 10일

I. 서 론

트램은 현재 유럽과 북미의 선진국에서는 도심 교통의 주요 수단으로 사용되고 있고, 다양한 신호 운영기법을 통해 신호운영의 효율성과 안전성을 향상시키고 있다. 최근에 우리나라에서 녹색교통에 대한 관심이 증가하고, 도시의 교통혼잡이 증가함에 따라 새로운 대중교통 수단으로서 트램에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 창원, 위례신도시, 수원 등의 지방자치단체에서 트램의 도입을 적극적으로 추진하고 있다. 하지만 기존 신호운영체계에 트램 시스템이 그대로 도입되면, 현재 트램 시스템의 운영과 신호교차로에서의 신호운영에 대한 경험과 기술이 없기 때문에 서로 다른 특성의 이동류 간의 효율성과 안전에 문제가 발생할 것으로 예상된다. 우리나라에 도입될 트램이 보다 매력적인 도심 교통수단으로서 정착하기 위해서는 효율성과 안전성을 확보하기 위한 신호운영기술의 확보가 필요하다. 이를 위해서 새로운 신호운영 전략과 알고리즘의 개발이 요구되며, 이러한 신호운영 기술을 확보하는데 본 연구의 필요성이 있다.

본 연구는 간선도로의 트램 전용차로 구간의 이동성과 안전성을 확보하기 위해서 트램 정류장의 정차시간을 제어하고, 신호교차로에서 능동식 우선신호를 적용함으로써 트램차량이 신호교차로에서 정차하지 않고 통과할 수 있는 신호제어 전략을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 위해서 간선도로에 트램이 설치되는 것을 가정하여 시스템 구성 방안을 정의하였고, 트램 정류장의 정차시간을 효율적으로 제어할 수 있는 신호제어 알고리즘과 정차시간을 최소화 할 수 있는 우선신호 판단 알고리즘을 개발하였다.

연구의 기본적인 틀은 기존연구 고찰을 통해 기존 트램의 신호운영과 관련한 연구결과를 정리하여 기존 연구의 한계를 분석하였고, 트램차량과 운영시스템의 특성을 이용한 우선신호제어 알고리즘을 개발하여 미시적 시뮬레이션 모형을 통해 그 효과를 검증하였다.

신호운영 알고리즘의 개발을 위해서 연구의 공

간적 범위를 중앙 트램 전용차로가 설치된 간선도로로 한정하였고, 한 대의 차량이 전용차로를 따라 각각의 방향별로 1개 노선을 일정한 배차간격으로 주행하는 것을 가정하였다. 차량의 특성은 선행차량의 영향이 없이 독립적으로 운행하는 한량의 차량 또는 다량의 차량으로 정의하였고, 전용차로의 트램 정류장 위치는 중앙 전용차로의 신호교차로의 정지선으로부터 80이상 상류부의 Mid-Block과 Far-Side에 위치하여 다수의 승객이 10초부터 45초까지 무작위로 승·하차 하는 것을 가정하였다.

II. 기존연구 고찰

현재 유럽과 북미지역에서 운영되고 있는 현대적 개념의 트램은 과거 노면전차와 같이 도시의 관광을 위한 상품으로 운영되던 것에서 벗어나 도시의 주요 통행수단으로 사용되고 있다. 이를 위해서 해외의 주요 트램 시스템에서는 대중교통 우선정책과 효율성의 확보를 위해 능동식 우선신호 제어전략을 사용하고 있다. 일반차량의 대중교통 우선신호에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 능동식 우선신호의 적용과 개발이 필요하고, 무선통신 기술과 IT 기술이 발전함에 따라 이를 이용한 능동식 우선신호 제어전략을 개발하여 효과적인 운영에 적용할 필요성이 있다.

현재 사용되고 있는 해외 주요도시의 능동식 트램 우선신호 전략은 일반적인 버스우선신호와 동일한 방식으로 트램의 위치정보와 교차로의 감응식 신호제어 시스템을 이용하여 트램차량에 추가적인 녹색시간을 제공하고 있다. 우선신호의 제공여부는 트램의 운전자가 직접 우선신호를 요청하기도 하고, 차량 간 거리, 승차인원 등을 고려하여 센터에서 우선신호 수행여부를 판단하기도 한다. 미국의 Portland와 Huston 등에서는 Green Extension 전략과 Early Green 전략을 통해 능동식 우선신호 제어를 수행하고 있으며 프랑스의 Nantes, Strasbourg, Paris 지역에서는 Green Extension 방식의 능동식 우선신호를 적용하고 있다. 그 밖에 일본의 구마모토, 스페인의 Madrid, 영국의 Sheffield 등에서도 능동식

우선신호를 통해 트램차량에 통행 우선권을 부여하고 있다.

Eleni(2010)은 실시간 신호제어 시스템을 이용하여 단일교차로를 대상으로 전체 Person Delay를 최소화하는 교통대응식 신호제어 전략에 대해서 연구하였으며, 2대 이상의 버스가 교차로에 접근할 때 조건적인 우선신호를 제공함으로써 교차로 전체의 Person Delay를 최소화시켰다. Meenakshy(2005)의 연구에서는 간선도로에서 버스우선신호 전략을 위한 연동폭을 최대화하기 위한 신호제어 전략을 개발하였다. 이 연구에서 고정식 우선신호 제어와 능동식 우선신호 제어를 수행하기 위한 3단계의 신호제어 시스템 전략을 구성하였고, 두가지 우선신호 제어를 3단계 신호제어 시스템을 통해 동시에 수행하는 방법을 제안하였다. Garrow(1998)는 Green Extension 기법을 적용하는 경우 Early Green 기법보다 일반차량에 미치는 영향이 더 적은 것을 확인하였으며, 비우선 현시의 교통량비가 클수록 우선신호로 인한 일반 교통류의 충격이 증가함을 미시적 시뮬레이션을 통해 증명하였다. Kim(2004)의 연구에서는 버스의 정류장 정차시간과 지체시간을 대중교통 우선신호제어 전략에 반영하기 위해서 버스의 정류장 지체시간을 추정하는 확률모형과 가중회귀분석모형을 이용하여 예측된 정차시간을 버스의 교차로 간 연동시간에 반영하였다. 이 연구에서는 예측된 하류부 교차로 도착시간을 이용해 버스의 교차로 통과를 위한 능동식 우선신호 제어를 수행하여, 일반적인 감응식 신호제어나 능동식 우선신호 제어를 수행하는 것 보다 버스의 교차로 지체와 정지수를 감소시킬 수 있었다.

트램과 관련한 신호운영 연구는 지금까지 주로 버스 우선신호 제어와 유사한 형태의 신호제어 전략의 개발에 집중되어 왔다. 주로 트램이 신호교차로에 도착했을 때 차량에 우선현시를 제공하기 위한 비우선현시의 소거방법과 우선신호 이후의 비우선현시의 Restoring을 위한 방법론이 주요 제어전략의 핵심이고, 이와 동시에 실시간 신호제어 시스템과 연계하여 운영하는 방법이 연구되어 왔다.

Mirchandani(2001)는 첨단통신 장비와 미국의 실

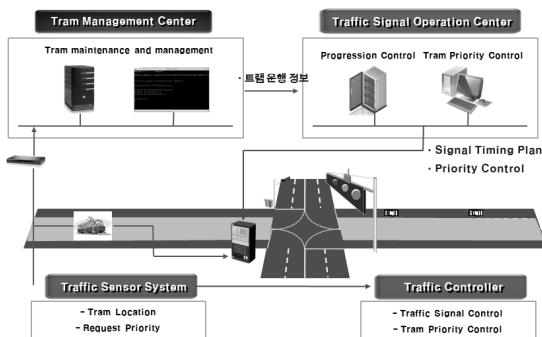
시간 신호제어 시스템인 RHODES를 이용한 우선신호전략을 개발하였다. 기존의 우선신호 전략보다는 덜 공격적인 제어전략을 사용하여 신호교차로에 접근하는 경전철 차량의 예측정보를 교차로에 제공하고, 경전철 차량을 처리할 준비를 미리 수행할 수 있게 하여 일반차량과 보행자의 추가적인 지연시간을 야기하지 않으며 경전철의 효율성을 보장하고 있다. Abebe(1996)는 신호교차로에서 자동차와 함께 운영되는 경철철의 신호운영에 대해 연구하였다. 서로 다른 특성의 이동류를 통합적으로 운영하기 위한 방안을 제시하였고, 신호제어기에서 경전철을 위한 독립적인 신호시간을 계산하기 위해 트램의 특성을 고려하여 일반차량과의 상충을 고려한 현시순서를 최적화하였다. Barton(2003)은 경전철의 우선신호 제어를 위한 고정식과 능동식 우선신호 전략을 구분하여 그 특성에 따른 효과를 분석하였다. 이 연구에서는 경전철의 지체 및 통행시간 최소화를 위한 효과적인 우선신호 전략으로 Green Extension과 Phase Skipping 기법을 제시하였다. Li(2009)의 경전철을 위한 능동식 우선신호 제어에 대한 연구에서는 경전철의 우선신호 제어를 위해 필요한 시스템을 4가지로 정의하였고, 경전철 우선신호 제어에 의한 타 이동류의 영향을 최소화 할 목적으로 정류장 정차시간을 예측하고, 이를 우선신호 녹색시간길이에 반영하였다. 이 연구에서는 능동식 우선신호의 적용을 최소화하기 위해 고정식 우선신호를 활용하였고, 이 신호제어 전략을 미국의 San Diego 지역에 적용시켜 시뮬레이션 분석을 수행한 결과, 경전철은 약 67.4%의 지체가 감소하였다. Jeung(2011)의 논문에서는 트램의 주행특성을 고려하여 능동식 우선신호 제어를 위한 최적 검지기 위치산정 모형을 개발하였다. 트램의 우선신호 전략으로 Early Green과 Green Extension 전략을 적용하였고, 우선신호 효율을 높이기 위한 검지기의 최적위치를 해석적 방법으로 산출하였다. 이 연구결과에서 우선신호의 효과를 최대로 할 수 있는 트램 전용차로의 검지기 설치위치를 제시함과 동시에 교차로의 최적 신호시간 길이를 산출하기 위한 방법도 제시하였다.

위에서 살펴본 바와 같이 현재까지 개발된 대부분의 트램 우선신호 전략은 대부분 버스 우선신호와 동일한 제어전략을 그대로 사용하거나 현재 운영되고 있는 실시간 또는 감응식 신호운영 시스템과 연동하여 적용하기 때문에 트램의 특성을 반영하지 못하고, 시스템의 효율과 안전을 보장하지 못하였다. 기존의 버스우선신호는 한 주기에 여러대의 차량이 소규모 차량군을 이루고 통행하기 때문에 다수의 차량을 위한 연동폭을 확보하는 것이 필요하고, 능동식 우선신호의 경우에는 감응식 우선신호의 녹색시간 단위연장 방법을 그대로 사용하였다. 하지만 트램은 차량간의 영향이 없는 독립적 주행과 정류장의 정차특성을 고려하여 하류부 교차로와 연동한 신호제어가 가능하다. 본 연구에서는 이러한 해외의 트램 운영형태와 전략과 특성을 반영하여 국내 도로환경에 적합하고, 트램의 정시성을 보장하면서 일반차량의 지체를 최소화하는 능동식 트램 우선신호 제어전략을 개발하였다.

III. 우선신호 전략 개발

1. 시스템 구성

능동식 트램 우선신호 전략을 수행하기 위해서는 신호제어 전략과 결합된 형태의 시스템 H/W를 구성해야 한다. 능동식 신호운영을 위한 시스템은 <그림 1>과 같이 신호운영센터 시스템, 차량검지 시스템, 신호제어 시스템의 3가지로 구성된다.



<그림 1> 트램 우선신호 시스템 구성
<Fig. 1> Tram System Configuration

트램의 정차시간을 제어에서 트램의 대기공간으로 활용되는 트램 정류장은 도로의 중앙에 교통섬의 형태로 설치되며, 승객의 승/하차 및 트램차량의 신호대기 공간으로 활용된다. 정류장의 설치위치는 도로의 기하구조와 토지의 이용에 영향을 받게 되는 트램 정류장 위치결정의 특성을 고려하여 다음과 같다.

$$D = U \times V \tag{1}$$

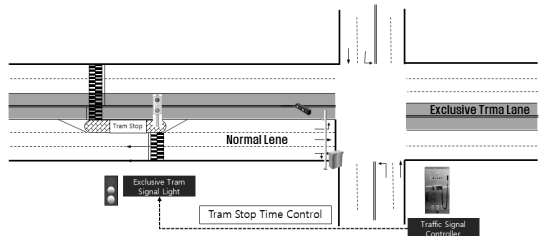
여기서,

D : 정류장의 정지선으로부터 교차로 정지선까지 거리 (m)

U : 우선현시의 연장시간(초)

V : 트램 정류장에서 정지선까지의 평균주행속도 (m/sec)

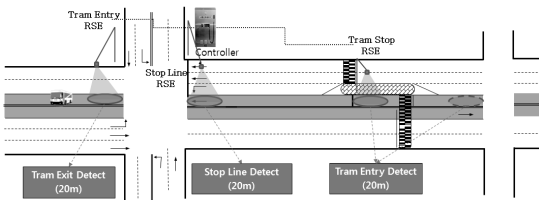
트램 전용 신호등은 트램의 신호교차로 무정차 통과와 교차로 신호운영의 효율성 증대를 위해 트램 정류장과 신호교차로에 각각 설치되어 신호교차로에서 계산된 우선현시 길이에 따라 트램의 출발과 정지를 제어한다. 전용차로 및 일반차로의 운전자 혼동을 방지하기 위해 중앙 트램 전용차로에 지주식 중앙차로 신호등을 운영한다.



<그림 2> 트램 전용 신호등 설치 위치
<Fig. 2> Exclusive Tram Signal Light Installation Place

트램의 신호운영을 위해 사용되는 정보수집장치는 일반차량의 통행과 관련한 제반 정보수집뿐만 아니라, 트램 우선신호제어 시스템의 요구에 부합하는 지점 및 공간검지방식 중에서 유지관리 및 데이터의 신뢰성이 검증된 IR-DSRC 방식을 사용하여 우선신호 제어를 위한 데이터를 수집한다. 정류장 진입정보를 위해 정류장이 설치된 링크에서는 트램 정류장의 정지선에서 위치정보와 시간정보를 수집

하고, 트램 정류장이 설치되지 않은 링크에서는 링크 상류부 80~150(m) 지점에 RSE를 설치하여 위치 정보와 시간정보를 수집한다. IR-DSRC의 적외선 광대역 통신의 통신영역은 20(m)로 규정하고, 트램 차량의 진출정보를 수집하기 위해서 하류부의 링크의 진입부에서 위치정보와 시간정보를 수집하며, 돌발상황으로 인해 트램차량이 교차로의 정지선에서 정차했을 경우, 우선신호의 요청을 위해 교차로 정지선의 위치정보와 시간정보를 수집한다. 트램의 검지체계 구성은 <그림 3>과 같이 정의한다.



<그림 3> 트램 우선신호를 위한 검지체계 구성
<Fig. 3> Tram Detection System Configuration

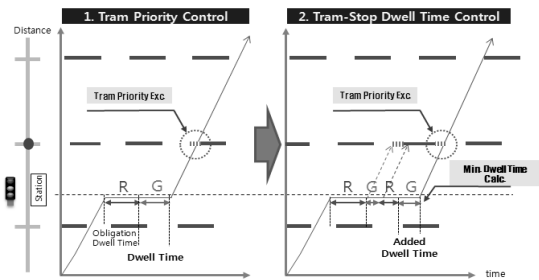
2. 능동식 트램 우선신호 제어 개념

능동식 우선신호는 대중교통의 검지시간에 따라 적절한 우선신호가 제공되는 방식으로 검지기나 비콘, 통신장치를 통해 실시간으로 우선신호를 요청, 응답, 제공해 주는 효율적인 교통운영 방법이다.

트램차량의 통행특성을 살펴보면 1주기에 1대의 차량이 신호교차로를 통과하므로 트램차량 1대가 교차로를 통과할 수 있는 최소한의 신호시간을 확보하면 된다. 트램의 일정한 배차간격으로 인해 버스 우선신호처럼 다수의 차량이 불확실한 녹색연장시간을 요구하는 상황이 일어나지 않으며, 이에 따라 타 이동류의 현시변화에 따른 영향이 적다. 따라서 능동식 트램 우선신호 제어는 1대의 트램차량이 하류부 교차로에서 정지 없이 통과하는 것을 신호제어의 목표로 하며, 이를 위해 트램 정류장의 정차시간을 제어함으로써 교차로 정지선에서의 의미 없는 대기시간을 방지하고, 능동식 우선신호 제어를 통해 트램차량의 정류장 대기시간을 최소화한다.

<그림 4>의 능동식 트램 우선신호 제어개념을

보면, 트램차량은 정류장에서 의무정차시간 동안 정차하고, 이후에는 능동식 우선신호 알고리즘에 의해 계산된 하류부 교차로를 통과 가능 여부를 트램 전용신호등을 통해 트램 운전자에게 알려준다. 트램운전자는 적색신호일 때 정류장에 대기하여 다음 녹색시간을 기다린다.



<그림 4> 능동식 트램 우선신호 개념
<Fig. 4> Active Tram Priority Signal Concept

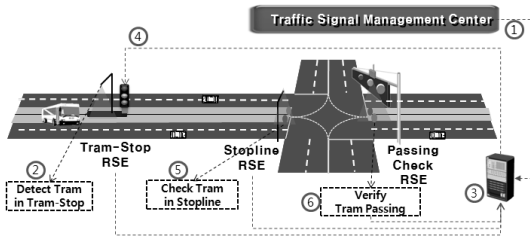
3. 능동식 트램 우선신호 제어 전략 개발

능동식 트램 우선신호 제어 전략은 트램 정류장이나 상류부 트램 검지기에서 요청된 우선신호를 트램정류장과 신호교차로에서 신호제어 알고리즘을 통해 효과적으로 처리하기 위한 전략이다. 트램 정류장에서는 정차시간 제어를 통해 트램의 교차로 정차를 방지하고, 신호교차로에서는 정류장에서 정차시간을 단축시킬 수 있는 능동식 우선신호 제어 전략을 수행한다.

트램 우선신호 제어의 첫 번째 목표는 정류장 정차시간의 제어를 통해 트램의 교차로 정차를 방지하는 것이고, 두 번째 목표는 트램의 대기시간을 단축시키는 능동식 제어기법의 선택을 통해 좀 더 효과적인 신호제어를 수행하는 것이다.

트램 정류장이 설치된 링크에서는 교차로 무정차 통행을 목표로 차량의 진입과 동시에 신호제어기에 우선신호를 요청한다. 신호제어기는 예측된 교차로 도착시간을 기준으로 우선신호의 수행여부를 판단하여 차량의 정류장 정차시간을 계산하고, 정류장 의무정차시간 이후, 매초마다 교차로 무정차 통과에 필요한 정류장 정차시간을 계산하여 트

램 정류장의 전용 신호등을 등기하게 된다. 능동식 트램 우선신호 제어의 기본 제어순서는 <그림 5>와 같다.



<그림 5> 트램 우선신호 제어 순서
<Fig. 5> Tram Priority Signal Control Process

- ① 신호운영센터에서 계산된 최적신호시간을 받아서 고정식 우선신호 수령
- 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

트램 정류장 정차시간 제어의 개념은 차량이 고정식 우선신호를 통해 확보된 연동폭을 벗어났을 경우, 트램 정류장의 정차시간을 임의로 조정함으로써 다시 연동폭 안으로 회복시키는 방법이다. 이 제어에서는 트램이 정류장에 도착해서 출발하는 시점에 따라 능동식 우선신호의 전략, 현시의 길이, 하류부 신호교차로의 현시계획 등이 결정되고, 트램의 정류장 정차시간을 최소화해서 트램 운전자에게 정류장의 출발 시점을 알려주는 역할을 수행한다.

트램 정류장 정차시간 제어 순서를 살펴보면, 첫

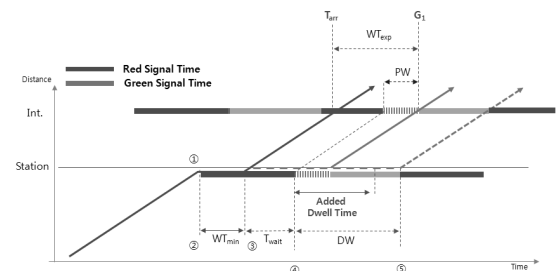
번째로 트램차량이 트램 정류장으로 진입했을 때, 하류부 교차로의 트램현시와 트램차량이 의무정차시간(WT_{min}) 이후 바로 출발했을 때의 교차로 도착 예상시간(T_{arr})을 비교하여 우선신호 제어가 필요한지 판단하게 된다.

두 번째로 트램 우선신호 제어가 필요한 경우, 우선신호 판단 알고리즘에 의해 Early Green과 Green Extension 전략 중에 교차로 대기시간을 최소화하는 전략을 선택한다.

세 번째로 트램이 교차로를 정지없이 통과하는데 필요한 우선신호 시간인 Priority Window(PW_m)를 계산하여 트램의 교차로 대기시간(T_{wait})을 계산한다. 이때 하류부 폐색구간에 선행차량이 존재할 경우, 폐색구간 길이까지 트램의 교차로 대기시간을 연장한다. 이때 대향방향의 트램 차량의 진입 여부를 체크하고, 제어단위가 분리되는 교차로인지 확인하여 대향방향 상층 알고리즘과 제어단위 간 연동제어 알고리즘을 수행한다.

마지막으로 트램차량이 승객들의 승/하차 시간이나 하류부 폐색구간에 선행차량이 존재하여 Departure Window(DW_m) 시간 내에 출발이 불가능할 경우, 다음 Departure Window(DW_{m+1})까지 교차로에서 대기한다.

<그림 6>의 트램의 정류장 도착부터 Departure Window의 종료까지 제어순서는 아래와 같다.



<그림 6> 트램의 정류장 정차시간 제어순서
<Fig. 6> Tram-Stop Signal Control Process

- ① Departure Window 종료 ~ 트램의 정류장 도착
- ② 의무 정차시간 동안 정차

- ③ Priority Window와 Departure Window 계산 대기 시간 동안 교차로 정차
- ④ Departure Window 시작 및 녹색등화 트램차량 출발
- ⑤ Departure Window 종료 및 적색등화

$$T_{arr} = WT_{min} + (D/V_{avg}) \quad (2)$$

$$WT_{exp} = G_1 - T_{arr} \text{ (if, } G_1 < T_{arr} \leq G_2, WT_{exp} = 0) \quad (3)$$

$$MaxPW = C - [\sum_1^i (G_i) + \sum_1^n (Min G_i)] \quad (7)$$

$$PW_{EG} = WT_{exp} \text{ (if, } PW_{EG} \geq MaxPW, PW_{EG} = MaxPW) \quad (4)$$

$$PW_{GE} = T_{arr} - G_1 \text{ (if, } PW_{GE} \geq MaxPW, PW_{GE} = MaxPW) \quad (5)$$

$$PW_m = Min(PW_{EG}, PW_{GE}) \quad (6)$$

$$T_{wait} = WT_{exp} - PW_m + BS (\geq 0) \quad (8)$$

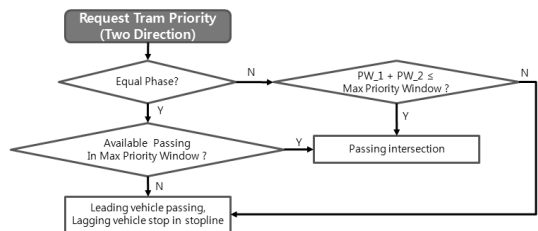
여기서,

- i = 교차로 도착 현시번호
- n = 현시개수
- m = 주기번호
- C = 주기
- D = 정류장에서 교차로정지선까지 거리 (km)
- V_{avg} = 트램 평균 주행속도 (km/h)
- G_i = i 현시의 녹색 시작 시간 (sec)
- T_{arr} = 트램이 최소정차시간 이후에 평균주행속도로 하류부 교차로 도착 시간 (sec)
- WT_{min} = 정류장 승객 최소 승/하차 시간 길이 (sec)
- WT_{exp} = WT_{min} 이후 바로 출발했을 때 교차로에서 정차하는 시간 길이 (sec)
- $MaxPW_m$ = m 번째 주기의 최대로 제공 가능한 우선신호 시간 길이 (sec)
- PW_m = m 번째 주기에 필요한 우선신호 시간 길이 (sec)
- PW_{EG} = Early Green에 필요한 우선신호 시간 길이 (sec)
- PW_{GE} = Green Extension에 필요한 우선신호 시간 길이 (sec)
- T_{wait} = 의무정차시간 이후 출발 가능한 시간까지 정류장에 정차해야 하는 시간 길이 (sec)
- DW_m = m 번째 주기에 정지없이 하류부 교차로 통과가 가능한 시간 길이(sec)
- BS = 폐색구간 내 선행차량 존재 시 대기시간 (sec)

트램은 양방향 복선으로 운행되기 때문에 1주기 동안 양방향에서 동시에 교차로에 진입하여 우선신호를 요청하면 교차로 정차가 발생할 수 있고, 양방

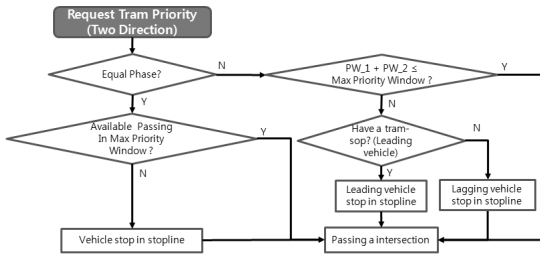
향 트램의 정류장 도착시간 및 교차로 예상 도착시간에 따라 대향방향 상충판단 알고리즘을 수행한다.

트램 전용차로는 링크 양쪽 방향의 트램 정류장 유/무에 따라서 양쪽 링크에 트램 정류장이 있는 경우와 한쪽 링크에만 트램 정류장이 있는 경우, 양쪽 링크에 모두 트램 정류장이 없는 경우로 구분할 수 있다. 또한 우선신호를 요청하는 시간순서에 따라 양쪽방향에서 한 신호주기 동안에 Early Green이나 Green Extension을 동시에 요청하는 경우와 각각 요청하는 경우로 구분할 수 있다. 링크의 양쪽방향에 정류장이 설치된 교차로에서는 양쪽방향에서 두 대의 트램 차량이 동시에 같은 우선신호를 요청했을 경우에는 문제없이 교차로의 동시통과가 가능하지만 양방향의 차량이 같은 주기에 각각 Green Extension과 Early Green을 요청하게 되면 후행차량은 교차로에 정차할 수 있는 상황이 발생한다. 이런 경우에는 <그림 7>와 같이 후행차량이 정류장에 대기 후 출발하여 교차로 정차를 방지한다.

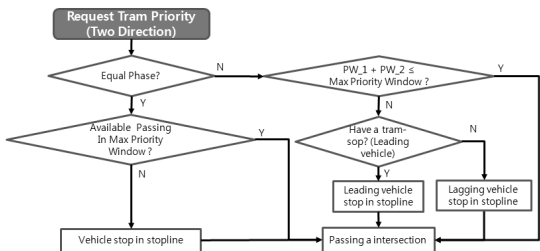


<그림 7> 양방향 정류장의 대향방향 상충판단 알고리즘
(Fig. 7) Consideration of Opposite Tram in Case of Both Side-Station

두 번째로 링크의 한쪽방향에만 정류장이 설치된 교차로에서는 동일한 현시에 두대의 차량이 우선신호를 요청할 경우에 두 차량 모두 교차로를 통과할 수 있지만, 두 차량이 동시에 우선신호를 요청했을 경우에는 우선신호의 요청순서에 따라 후행차량이 교차로에 정차하게 될 상황이 발생한다. 따라서 이러한 경우에는 <그림 8>과 같이 정류장이 있는 링크의 트램차량이 정류장에 대기 후, 두 차량이 동시에 교차로를 통과한다.



〈그림 8〉 한방향 정류장의 대방향 상충판단 알고리즘
 〈Fig. 8〉 Consideration of Opposite Tram in Case of One Side-Station



〈그림 9〉 정류장이 없는 경우 대방향 상충판단 알고리즘
 〈Fig. 9〉 Consideration of Opposite Tram in the Absence of a Station

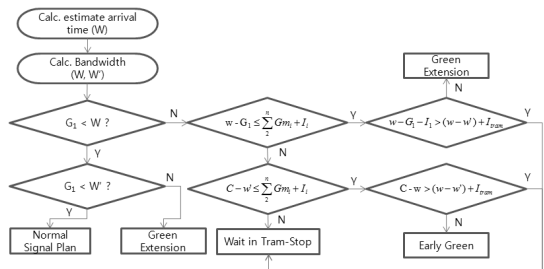
링크의 양방향에 정류장이 없는 경우에는 동일한 현시에 두 차량이 동일한 우선신호를 요청했을 때, Max Priority Window를 초과하는지 판단하여 양쪽 차량이 모두 교차로를 동시에 통과하거나 <그림 9>의 대방향 상충판단 알고리즘을 통해 선행차량이 교차로를 통과하고, 후행차량은 정차한다.

능동식 트램 우선신호는 일반적으로 교차로 통과 우선처리를 위한 현시 제공 방식에 따라 Early Green, Green Extension, Actuated Transit Phase, Phase Insertion, Phase Rotation, Phase Suppression으로 구분할 수 있다. 이는 트램 우선신호를 위한 현시제공의 강제성에 따라 Priority와 Preemption으로 구분할 수 있다. 본 전략에서는 타 이동류의 현시변화에 따른 충격을 감안하여 우선신호 제어기법 중에서 Early Green 및 Green Extension 전략을 사용한다.

능동식 트램 우선신호 기법 중 Early Green은 차량 검지 이후 우선신호의 요청 시 트램을 위한 현시를 단위시간 조기에 시작하는 방법이며, Early Green으로 인해 시간길이가 감소하는 비우선현시도

각 방향별 최소녹색시간의 확보가 가능하다.

트램차량의 우선신호 판단 알고리즘은 트램차량이 정류장에 진입하거나 정류장이 없는 링크의 상류부에 검지됐을 때, 능동식 우선신호 전략의 수행여부와 Green Extension, Early Green, 트램정류장에서 대기하는 것 중에 어떤 전략이 가장 효과적인지 판단하는 알고리즘이다. 링크상의 특정 위치에 설치된 검지기나 트램 정류장에 설치된 검지를 기준으로 차량의 교차로 도착시간을 예측하여 우선신호 수행전략을 판단할 뿐만 아니라, 트램 정류장의 정차시간과 연계하여 우선신호의 적용이 필요할 때만 우선신호 판단 알고리즘을 수행하게 된다. 우선신호 전략의 판단기준은 트램 정류장이 설치된 링크에서는 의무정차시간 이후, 트램의 정류장 대기시간을 가장 짧게 하는 전략을 선택하게 되고, 트램 정류장이 설치되지 않은 링크에서는 트램의 검지점을 기준으로 Early Green과 Green Extension 중에 적용이 가능한 우선신호 제어전략을 선택한다.



〈그림 10〉 우선신호 판단 알고리즘 순서도
 〈Fig. 10〉 Tram Priority Decision Process

<그림 10>에서 교차로 예상도착시간 시작지점 (W)과 이후 트램의 고정 연동폭(15초)을 더한 교차로 예상도착시간 종료지점(W')을 계산한다. 두 변수가 모두 트램현시 (G₁) 내에 속하게 되면 특별한 제어 없이 일반 현시계획으로 운영되고, W가 트램현시에 속하지만 W'가 트램현시를 벗어난 경우, 둘다 벗어났지만 W - G₁ - I₁ > (W - W') + I₁의 조건에 부합하면 Green Extension 기법을 수행한다. W가 트램현시보다 크고, 비우선 현시의 최소녹색시간의 합보다 작으며, C - W가 최소녹색시간의 합보다

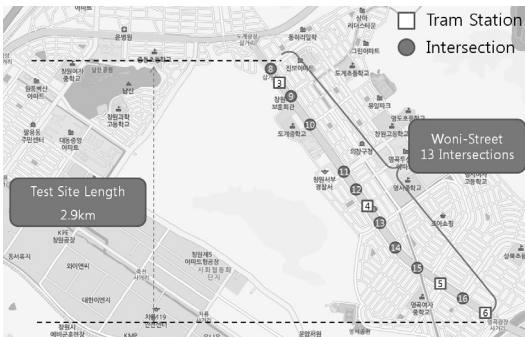
작으면 정류장에 대기한다. 나머지 경우는 Early Green 기법을 사용한다.

- W = 교차로 예상도착시간 시작지점
- W' = 교차로 예상도착시간 종료지점 ($W + 15$)
- G_{m-i} = 현시 i 의 최소녹색시간 길이
- I_i = 현시 i 의 Change Interval

IV. 시뮬레이션 분석

1. 효과분석 개요

개발된 트램 우선신호 제어전략의 효과를 평가하기 위해서 현재 시스템의 도입을 위해 기본계획을 수행중인 경상남도 창원시 원이대로 분석구간을 설정해서 미시적 시뮬레이션 평가를 수행하였다. 분석구간은 원이대로 상의 2.7km 구간의 13개의 신호교차로와 4개의 트램 정류장을 포함하고 있다. 간선도로 중앙에 전용차로가 운영 중인 것을 감안하여 일반 차량과 트램차량의 상충이 없는 것을 가정하였다.



〈그림 11〉 분석대상 구간
 〈Fig. 11〉 Geometry Condition of Study area

능동식 우선신호 제어의 효과를 검증하기 위해 트램 정류장의 정차시간을 15초부터 45초까지 변화시키면서 현행신호와 고정식 우선신호 제어와 능동식 트램 우선신호 제어에 대해서 각각 1시간동안 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 시뮬레이션 분석을 위한 도구는 VISSIM 모형과 우선신호 제어 알고리

즘을 구현하기 위한 VISVAP 모델을 사용하였고, 랜덤시드를 달리하여 10회씩 반복하여 시뮬레이션 평가를 수행하였다.

트램 운영조건 및 변수의 범위로서 승용차와 트램의 연동속도는 각각 30km/h와 60km/h로 설정하였으며, 트램차량의 배차간격은 3분, 5분, 7분으로 가정하였고, 일반차량의 입력교통량은 $V/C=0.6$ 정도의 오전첨두시 현황교통량을 적용하였다.

〈표 1〉 시뮬레이션 조건
 〈Table 1〉 Analysis Condition

Conditions		Contents
Tram	Station No.	4
	Tram Interval Changing	Apply tram interval of 3 min, 5 min, 7 min in Scenario 1, 2, 3
	Speed	30
	Dwell Time	15~45
Vehicle	V/C	0.6
	Speed	60

평가 시나리오는 현재 창원시의 해당구간에서 운영하고 있는 현행신호와 고정식 트램 우선신호, 고정식 트램 우선신호와 능동식 트램 우선신호 전략을 적용한 3가지를 선정하였다. 고정식 우선신호의 신호시간 산출방법은 트램의 평균주행속도를 기준으로 PASSER-II 모형에서 신호제어 변수인 주기, 현시길이, 현시순서, 옵션을 최적화 한다. T-7F 모형에서는 PASSER-II 모형에서 계산된 주기, 현시길이, 현시순서를 고정하고, 트램의 최소연동폭 범위를 고정한 후, 일반차량에 대한 옵션을 최적화하여 트램과 일반차량을 고려한 최종 옵션값을 산출한다.

〈표 2〉 평가 시나리오
 〈Table 2〉 Analysis Scenarios

Scenario	Contents
1. Present Signal Plan	Conduct the simulation test ussing the present traffic signal plan in Changwon Woni-street
2. Passive Tram Priority Signal	Apply to passive tram signal priority using the PASSER-II and T-7F
3. Active Tram Priority Signal	Scenario 2 + Developed tram signal priority

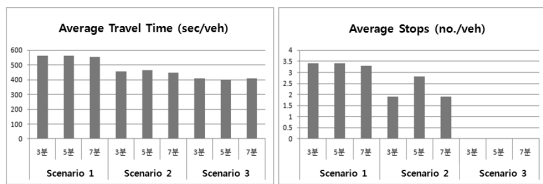
2. 효과분석 결과

각각의 시나리오 별로 시뮬레이션 분석을 수행한 결과를 살펴보면, 현실과 유사하게 트램의 정류장 정차시간을 임의로 변화시킴에 따라 시나리오 2의 고정식 우선신호 만을 적용했을 경우에는 트램 차량이 약 2회의 교차로 정지를 경험하여 트램의 연동효과가 감소하는 것으로 나타났다.

하지만, 시나리오 3의 고정식과 능동식 우선신호를 모두 적용하였을 경우, 능동식 트램 우선신호와 정류장 정차시간 제어로 인해 연동폭을 벗어난 트램 차량이 교차로를 정지없이 통과하는 것으로 분석되었다. 이에 따라서 트램의 평균통행시간도 약 20% 감소하는 것으로 나타났다.

〈표 3〉 트램차량 효과분석 결과
〈Table 3〉 Test Result for Trams

Division		Average Travel Time (sec/veh)	Average Stops (no./veh)
Scenario	Interval		
Present Signal Plan	3min	561.5	3.4
	5min	563.9	3.4
	7min	554.0	3.3
Passive Tram Priority Signal	3min	457.9	1.9
	5min	464.4	2.8
	7min	448.4	1.9
Passive +Developed Strategy	3min	409.1	0.4
	5min	401.9	0.2
	7min	409.5	0.2



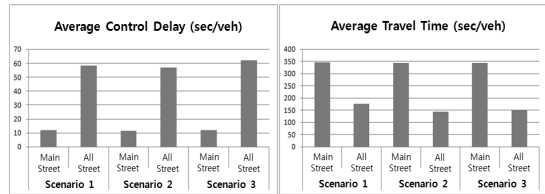
〈그림 11〉 트램차량의 분석 결과
〈Fig. 11〉 Test Result for Tram

일반차량의 효과분석에서 주방향의 차량당 평균 정지지체를 살펴보면 현행신호와 고정식 우선신호, 본 연구의 제어전략에서 주방향의 지체의 변화는 거의 보이지 않음으로 트램 위주의 신호최적화를 수행했음에도 일반차량의 통행에 영향을 크게 미치지 않은 것으로 나타났다. 네트워크 전체의 지체를

살펴보면, 능동식 우선신호 제어를 수행하였을 때 약 8%의 지체가 소폭으로 증가하여 능동식 트램 우선신호 수행에 따른 비우선현시의 지체가 소폭으로 늘어난 것을 알 수 있다.

〈표 4〉 일반차량 효과분석 결과
〈Table 4〉 Test Result for Vehicles

Division		Average Control Delay (sec/veh)	Average Travel Time (sec/veh)
Scenario	Target		
Present Signal Plan	Main Street	11.8	347.5
	Network	58.5	175.2
Passive Tram Priority Signal	Main Street	11.6	344.1
	Network	56.9	143.2
Passive +Developed Strategy	Main Street	11.8	344.0
	Network	61.9	159.1



〈그림 12〉 일반차량의 분석 결과
〈Fig. 12〉 Test Result for Vehicles

트램의 배차간격을 3분, 5분, 7분으로 변화시켜 운행간격에 따른 우선신호의 제어 효과를 분석한 결과, 차량의 운행간격이 변화해도 한 주기에서 우선신호 수행에 의해 차량을 무정차로 통과시켰으므로 평균 주행시간과 평균 정지수에 변화가 없는 것으로 나타났다.

트램의 능동식 우선신호 수행횟수를 살펴보면, 3분의 배차간격을 기준으로 총 20대의 차량이 발생하였고, 이 중 Green Extension은 평균 1.3회, Early Green은 2.2회, 정류장 대기는 0.3회가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 능동식 우선신호의 수행으로 4회의 정류장 정지수 감소와 약 50초의 통행시간 감소효과를 가져온 것으로 분석되었다.

트램 우선신호 제어에 따른 네트워크 전체의 사람에 대한 지체변화를 분석하기 위해 차량의 재차 인원을 고려하여 교차로를 통과하는 모든 차량의

〈표 5〉 평균 사람당 제어지체 분석 결과
 〈Table 5〉 Test Result for Person's Average Control Delay

Scenario	Present Signal Plan	Passive Tram Priority Signal	Passive +Developed Strategy
Person's Average Control Delay(sec/per)	38.2	28.3	25.3

사람당 지체변화를 확인하였다 (일반차량은 부산울산광역시권 승용차 재차인원인 1,360명을 적용, 한국교통연구원, 트램은 트램 승객정원 최소치인 110명을 적용, Shin, 2005). 트램과 일반차량을 포함하여 평균 사람당 제어지체를 살펴본 결과, 현황신호는 38.2초, 고정식 우선신호는 28.3초, 고정식과 능동식 우선신호 제어는 25.3초로 현황신호에 비해 약 34%의 지체개선 효과를 나타냈다. 이러한 결과는 트램을 위한 신호제어 전략의 적용이 차량대수를 기준으로 하는 네트워크 전체의 지체는 8% 가량 증가할 수 있으나, 대중교통 중심의 신호제어를 수행함으로써 사람당 지체는 감소할 수 있음을 보여주는 분석 결과이다.

위의 시뮬레이션 분석 결과에서 본 연구에서 개발된 우선신호 제어전략이 트램차량의 교차로 정지수를 줄이고, 정류장의 정차시간을 줄임으로서 전체 분석구간의 평균통행시간을 단축시킬 수 있는 것으로 나타났다. 특히 본 제어전략은 사람당 평균지체를 크게 감소시켜, 본 연구결과를 활용하여 트램의 서비스질을 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 간선도로 전용차로에서 트램차량의 연속통행을 위한 능동식 트램 우선신호 전략을 개발하였다. 개발된 신호제어 전략은 정류장의 정차시간을 제어하고, 신호교차로에서 정차시간을 최소화하기 위한 최적의 우선신호 전략을 선택하여 트램의 효율적인 신호교차로 연속 통행을 구현하였다.

트램의 정류장 정차시간 제어 전략에서는 정류장의 트램 정차시간 제어를 통해 트램의 교차로 무

정차 통행을 구현하는 알고리즘을 제시하였으며, 대향방향 트램차량을 고려하는 알고리즘을 함께 제시하였다. 신호교차로의 트램 우선신호 제어에서는 선택적인 능동식 우선신호 제어를 통해 정류장의 정차시간을 최소화하고, 교차로의 신호운영 효율을 높이는 전략을 제시하였다.

개발된 능동식 트램 우선신호 전략을 현재 트램 시스템 도입이 예정되어 있는 경상남도 창원시 원이대로 13개 교차로에 적용하여 효과분석을 수행한 결과, 현황신호와 PASSER-II 모형을 이용한 고정식 우선신호 수행 결과에 비해 트램의 통행시간이 약 20% 감소한 것으로 나타났으며, 트램의 교차로 무정차 통과도 달성한 것으로 분석되었다. 특히 일반차량의 지체는 고정식 우선신호에 비해 약 8% 증가하여 비우선현시의 지체가 약간 증가하였지만, 비우선현시의 지체를 최소화 시키면서 트램의 우선신호를 구현할 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 현재 우리나라에 트램 시스템의 도입이 추진되고 있는 상황에서 트램의 운영특성을 고려한 능동식 우선신호 제어전략을 개발하였다는데 의의가 있다. 또한 이러한 연구를 기초로 하여 향후 BRT와 같은 대중교통 우선신호에 본 연구결과와 적용이 가능하고, 대중교통의 신호운영에 대한 다양한 기법을 제시하였다는 의미가 있다.

본 연구는 간선도로의 트램 전용차로를 가정하고 연구를 수행하여 기하구조의 제약 때문에 전용차로의 설치가 불가능한 구간에 대해서는 별도의 추가적인 알고리즘 개발이 필요하고, 1개의 노선을 가정하여 다수의 트램 노선이 같은 전용차로에서 이용하거나 혹은 한 개의 신호교차로에서 두 개의 트램 노선이 교차하는 상황을 고려하지 못하였다. 또한 창원시의 침두시 현장교통량을 시뮬레이션 분석에 적용함으로써 다양한 교통상황에 대한 효과분석이 부족하였다.

따라서 향후에 위에서 언급한 현장적용의 한계나 시스템 운영측면에서 한계를 극복하기 위한 추가적인 연구와 다양한 교통상황에 대한 효과분석이 요구된다. 또한 제어구간 (SA, Sub Area) 간의 트램의 무정차 통행을 위한 추가적인 알고리즘 개발이

필요하고, 정류장의 위치에 따른 신호제어 효과의 변화가 발생하므로 이에 대한 분석이 요구된다.

REFERENCES

- [1] Abebe, Y., Conte, R., Gordon, S., and Mustafa, K. "Planning Methods for Integrating LRT Operations into an Urban Street Traffic Control System.", Presented at 66th ITE Annual Meeting, Institute of Transportation Engineers, Washington D.C., 1996.
- [2] Ahn, Jung-hwa, "A Study for Implementing Innovative Urban Surface Transport Systems in Korea: Focusing on Tramways", KOTI, pp.5-21. 2012.
- [3] Barton, Michael. "Evaluation of Transit Signal Priority Options for Rapid Transit and Light Rail Transit in the City of Richmond.", Master's dissertation, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2003.
- [4] Bo-Kyum Kim, Seung-il kim, Kim, Young-Chan, "Development of Determining Technique of Optimum Signal Time of Intersections On Median Exclusive Bus Lane using Bus-only Signal", Journal of Korean society of Transportation, vol. 24, no. 5, pp.123-133, 2006.
- [5] Eleni M. Christofa, "Traffic Signal Optimization with Conditional Transit Signal Priority for Conflicting Transit Routes". 12th WCTR, 2010
- [6] Garrow, M. and R. Machemehl, "Development and Evaluation of Transit Signal Priority Strategies", Presented at 77th Annual Meeting of the Transport Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1998.
- [7] Jeoung, YoungJe, "Traffic Signal Control Strategy for Tram Priority in Arterial", Doctorial dissertation, University of Seoul, pp.75, 2011.
- [8] Jonghyun Shin, "The Optimal Mass System For New Cities", Master's dissertation, UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOG, pp.20, 2005.
- [9] Meenakshy. Robust Optimization Model for Bus Priority Control Under Arterial Progression. Ph.D. dissertation, University of Maryland, Baltimore, Maryland, 2005.
- [10] WONHO KIM, L R. Rilett, 2"Improved Transit Signal Priority System for Networks with Nearside Bus Stops", Transportation Research Record 1925, Transport Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp.205-214, 2005.
- [11] Meng Li, Guoyuan Wu, Scott Johnston, Wei-Bin Zhang, "Analysis Toward Mitigation of Congestion and Conflicts at Light Rail Grade Crossings and Intersections, California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2009-9, pp.43, 2009.
- [12] Pitu Mirchandani, Larry Head, Anna Knyazyan, Wenji Wu, "An Approach Towards The Integration of Bus Priority, Traffic Adaptive Signal Control, and Bus Information/Scheduling System", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001
- [13] Zhang, J., "Evaluation of Transit Signal Priority using Analytical Method", Master's dissertation, Texas Tech University, 2007.

저자소개



이 인 규 (In-kyu Lee)

2014년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 교통공학과 연구교수

2014년 서울시립대학교 공학박사 (교통공학 전공)

2003년 서울시립대학교 석사 (교통공학 전공)

e-mail: photohk31@uos.ac.kr



김 영 찬 (Kim, Young-Chan)

1996년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

1993년 3월 ~ 1996년 2월 : 명지대학교 교통공학과 조교수

1987년 1월 ~ 1990년 12월 : 미국 Texas A&M University 공학박사(교통전공)

1983년 3월 ~ 1985년 2월 : 서울대학교 공학석사(도시전공)

1979년 3월 ~ 1983년 2월 : 서울대학교 공학사(도시전공)