스마트교차로 데이터를 활용한 실시간 교통신호제어 운영 효과 분석

Study on the Operational Effect of Real-time Traffic Signal Control Using the Data from Smart Instersections

이 상 욱* · 전 보 배** · 오 석 진*** · 윤 일 수****

* 주저자 : 더로드아이앤씨(주) 부장
** 공저자 : 김포시청 교통과 주무관
*** 공저자 : 호남대학교 토목환경공학과 교수
**** 교신저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수

Sangwook Lee* · Bobae Jeon** · Seok Jin Oh*** · Ilsoo Yun****

* Department manager, THEROAD INC. Co., Ltd.
** Officer, Dept. of Transportation, Gimpo City
*** Professor, Civil & Environmental Eng., Univ. of Honam
**** Professor, Dept. of Transportation Eng., Ajou University

† Corresponding author : Ilsoo Yun, ilsooyun@ajou.ac.kr

Vol. 22 No.4(2023)
August, 2023
pp.48~62

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.4.48

Received 1 May 2023
Revised 24 May 2023
Accepted 26 June 2023

ⓒ 2023. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

최근 국내 많은 지능형교통체계 사업에서 스마트교차로를 설치하고 있으나, 교통량 수집 및 통계분석 이외에 교통신호운영에 활용하는 사례가 미비한 상태이다. 하지만, 고질적인 교통혼잡에 대응하기 위해서는 스마트교차로에서 수집된 자료를 활용하여 효율적인 신호운영을 수행하는 방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 효율적인 교통신호운영을 위해 스마트교차로 자료를 활용한 실시간 교통신호제어 알고리즘 운영을 위한 절차를 수립하였으며, 기존 알고리즘을 개선하여 실제 스마트교차로에서 운영이 가능하도록 하였다. 효과 분석 결과, 교차로 지체가 감소하였고 옵셋 조정 시 구간 속도도 개선되는 효과가 나타나는 것으로 확인되었다.

핵심어 : 스마트교차로, 교통신호, 실시간, 제어, 영상자료

ABSTRACT

Recently, smart intersections have been installed in many intelligent transportation system projects, but few cases use them for traffic signal operations besides traffic volume collection and statistical analysis. In order to respond to chronic traffic congestion, it is necessary to implement efficient signal operations using data collected from smart intersections. Therefore, this study establishes a procedure for operating a real-time traffic signal control algorithm using smart intersection data for efficient traffic signal operations and improving the existing algorithm. Effect analysis confirmed that intersection delays are reduced and the section speed improves when the offset is adjusted.

Key words : Smart intersection, Traffic signal, Real-time, Control, Video data

Ⅰ. 서 론

1. 연구의 배경 및 필요성

우리나라의 자동차 등록대수는 최근 5년간(2018년~2022년) 연평균 2.4%로 매년 자동차가 증가를 하고 있으며, 2022년 현재는 25,503,078대에 이른다(Statistics Korea, 2023). 이로 인해 우리나라의 대부분의 도시들에서는 교통혼잡이 심각한 상황이다. 특별시, 광역시 등의 대도시는 물론이고 전국 도시부 도로 및 국도 또한 교통혼잡으로 인해 많은 도로 이용자들이 불편함을 겪고 있다. 코로나 이전 기준 교통혼잡비용은 지속적인 증가추세를 보였고 코로나 이후 일부 감소하였지만 이전 수준으로 회복될 전망이다(Kim et al., 2021). 지금까지의 증가 추세로 보아 향후 교통량이 증가할 것으로 예상되기 때문에 교통혼잡에 대한 대비가 필요하다.

우리나라는 이러한 교통혼잡에 대응하기 위하여 1990년대부터 지능형교통체계(intelligent transport systems, ITS)를 도입하여 추진 중에 있다. ITS란 교통수단 및 교통시설에 대하여 전자·제어 및 통신 등 첨단 교통기술과 교통정보를 결합함으로써 교통체계의 운영 및 관리를 과학화·자동화하고 상호 유기적으로 작용토록 하는 교통의 효율성과 안전성을 향상시키는 교통체계를 의미한다(Lee, 1999). 현재 우리나라 대부분의 지자체에서 ITS를 추진하거나 도입하여 운영하고 있다. ITS 운영은 실시간 교통정보를 제공하여 우회도로 이용 유도 등 교통량을 일부 분산시키는 효과는 있겠으나 정해져 있는 도로 인프라에서 교통정보 제공만으로 직접적으로 교통혼잡 문제를 해결하기에는 한계가 있다.

ITS 사업의 일환으로 교통신호제어시스템 사업을 추진하여 운영하고 있다. 좌회전 및 부도로 반감응 신호 구축, 신호 연동화 사업 등 교통신호운영 구간의 교통신호를 개선하고 있지만, 현재 교통신호 운영 체계인 정주기 교통신호제어(time of day, TOD) 운영은 실시간으로 변화하는 교통량에 대해 효율적으로 대응하기에 한계가 있다. 따라서, ITS를 통하여 수집된 현장의 데이터를 기반으로 보다 효율적으로 교통신호를 운영하는 노력이 필요한 시점이다. 또한, 국토교통부(Ministry of Land,Infrastructure and Transport, MOLIT)는 2018년부터 스마트교차로(smart intersection) 시스템을 본격적으로 추진하고 있다. 스마트교차로란 교차로를 통행하는 차량의 방향별, 차종별 정보를 카메라를 통해 수집된 영상정보에서 추출하여 생성된 데이터를 기반으로 최적의 교통신호(주기, 현시 등)를 산출하여 반영하는 방식을 말한다(MOLIT, 2021). 스마트교차로에서 수집된 영상정보에서 딥러닝 알고리즘과 객체추적 방법을 통해 차종별 교통량, 대기행렬 길이 등의 자료가 추출된다. 하지만, 스마트교차로에서 수집된 데이터는 통계 분석 이외에 교통신호제어에는 제대로 활용되지 못하고 있다.

2. 연구의 목적

본 연구는 국내에 사용 중인 교통신호제어 운영 방식을 고찰한 후, 스마트교차로에서 생산된 영상분석 데이터를 본 연구에서 제안하는 실시간 교통신호제어 알고리즘에 적용하는 절차 및 방법을 결정하고자 한다. 또한, 스마트교차로가 설치되어 있는 분석대상구간에서 본 연구에서 제안하는 실시간 교통신호제어 운영을 실제로 수행하고자 한다. 이를 통해 실시간 교통신호제어 운영의 효과를 분석하고자 한다.

이를 위해 스마트교차로에서 수집된 자료를 검증하고 기존 실시간 교통신호제어 알고리즘을 개선 및 적용하였다. 또한 기존 TOD 운영과 비교한 효과분석을 위해 해당 구간의 교통량, 속도, 교통신호운영 현황 등을 조사, 분석하고 실시간 교통신호제어 운영에 따른 교통지표가 개선되었는지 효과를 분석하였다.

본 연구를 통하여 기존 TOD 운영의 단점을 보완하여 시간대별 교통량 변화가 많은 구간의 효율적인 교통신호운영을 기대하고자 한다. 또한 아직 스마트교차로 시스템을 구축하지 않은 지자체에서 본 연구를 발판

삼아 고도화된 시스템을 구축하여 효율적인 교통신호운영이 될 수 있기를 기대한다.

Ⅱ. 관련 이론 및 연구 고찰

1. 관련 이론 고찰

국내에서 보편적으로 사용되는 교통신호제어 운영 방식은 TOD와 감응식 교통신호제어(actuated signal control), 교통대응식 교통신호제어(traffic responsive signal control), 실시간 교통신호제어(real-time signal control) 등으로 나눌 수 있다. TOD 운영은 미리 정해진 시간계획에 따라 신호를 규칙적으로 운영하는 것을 말한다. TOD 운영에서 신호시간계획(signal timing plan)은 과거의 교통량 변화 자료를 토대로 신호시간계획을 달리 적용할 첨두시, 비첨두시, 심야시간 등 시간 대를 결정한 후, 각 시간대별 교통량 규모를 고려하여 적절한 신호시간계획을 수립하여 시간대별로 달리 운영하는 것을 말한다. 이러한 교통신호운영방식은 하루 내의 교통량 변화에 대하여 적극적으로 대응하기 위한 것으로서 1시간 이내와 같은 짧은 시간 동안의 교통량의 실시간 변동에는 적극적으로 대응하지 못한다(Do, 2020). 우리나라의 대부분의 교통신호제어는 TOD 방식을 사용하고 있다. 이에 반해, 실시간 교통신호제어 방식은 실시간으로 수집되는 교통량, 점유율, 대기행렬길이, 속도 등의 자료를 이용하여 신호주기, 녹색신호시간, 옵셋 등을 변경할 수 있다. 본 연구에서 참조하는 실시간 교통신호제어 알고리즘은 경찰청(Korean National Police Agency, KNPA)에서 제공하는 CAERUS(Control Algorithm for dElay Reduction Using travel time)이며, 이 알고리즘은 사전제어(Module 1), 실시간제어(Module 2), 과포화제어(Module 3)로 구성되어 있다(KNPA, 2019). 이 CAERUS를 스마트교차로에 적용하고자 한다.

CAERUS의 사전제어(Module 1)는 실시간으로 향후 5분간 통행시간을 예측하는 “BIG DATA 혼잡예측 알고리즘”과 과거 패턴데이터를 활용하여 TOD 업데이트 여부를 결정하여 시간경계 및 시간경계별 대푯값(교통량)을 산출하는 “TOD Update 알고리즘”으로 구성된다. 사전제어에서 산출된 시간경계 및 시간경계별 대푯값(교통량)은 광역신호시간 관리 S/W로 전달하여 기준신호시간을 생성하고, 실시간으로 교통신호 조정 시 활용하는 향후 5분간 예측 통행시간 정보를 제공한다(KNPA, 2019). 실시간제어(Module 2)는 구간별/방향별 예측통행시간을 활용해 교통상황의 변수 값을 추정하고 실시간 교통상황에 대응할 수 있도록 운영하고 있는 신호시간을 교통상황에 따라 조정하여 방향별 포화도 균등화를 수행한다(KNPA, 2019). 과포화제어(Module 3)는 진입 및 진출로의 소통상황을 판단하여 이동류별 우선권을 부여하여 배리어 간 및 상충현시 간 신호시간을 조정한다. 과포화제어의 기본 개념은 앞막힘 및 대기행렬의 검지체계를 통해 데이터를 수집하여 지체가 발행한 구간의 녹색시간을 증가시키고, 소통이 원활한 구간의 녹색시간을 감소시켜 상류부의 과포화 발생을 방지하고 접근로의 대기행렬을 관리한다. 단, 하류부의 소통수준에 따라 대기행렬 수용 가능성을 파악한 다음, 대기행렬 수용이 가능할 경우 추가로 녹색시간을 배분해 해당 구간의 대기행렬을 해소해 높은 수준의 통과교통량을 유지하고, 대기행렬 수용이 불가능할 경우 녹색시간을 감소시켜 하류 구간 진입교통량을 줄임으로써 하류구간의 지체수준을 완화한다(KNPA, 2019).

2. 관련 연구 고찰

Park et al.(2008)는 천안시 교통정보센터에서 운영하고 있는 외곽 교차로에서 TOD 운영과 감응식 교통신호제어 운영의 성능을 비교하였다. 감응식 교통신호제어를 위해 최대녹색시간, 최소녹색시간, 좌회전 및 직

진의 단위연장시간 결정, gap reduction을 적용하였으며, 감응식으로 운영할 교차로의 기하구조에 부합하도록 교통신호제어 변수들을 설정한 후 현장실험을 실시하였다. 현장실험 결과, 감응식 교통신호제어 운영이 TOD 운영에 비해 주기시간 및 현시 길이가 짧아져 운전자의 대기시간을 감소시켰고, 약 46%의 교차로 제어지체 감소효과를 확인하였다. 또한 차량의 검지에 따라 안정적으로 주기길이 및 현시 길이의 변화가 이루어짐을 확인하였다.

Ahn and Lee(2006)는 CORSIM의 RTE(run-time extention)를 이용하여 좌회전 감응식과 결합된 교통대응식 교통신호제어 운영의 효과를 분석하였다. 교통대응식 교통신호제어가 주기길이, 배리어(barrier), 현시길이를 결정하고, 좌회전 감응식 교통신호제어는 좌회전 전용차로 후방에 검지기를 설치하여 녹색시간연장(green extention)을 실시하였다. 모의 실험을 위해 기하구조 설정 및 좌회전, 직진 이동류에 대한 시나리오를 설정하였으며, 4지교차로 모든 접근로에 정지선 검지기를 설치하였다. 연구 결과, 일반적인 비포화 상황에서 좌회전 감응식 교통신호제어와 결합된 실시간 교통신호제어 운영이 TOD 운영에 비해 효과가 탁월하게 나타났다. 과포화 상황에서는 그 효과가 줄어드는 것으로 나타났다.

Jeong(2021)은 부산시의 녹색산업도로를 대상으로 스마트 영상검지기에서 수집된 자료를 활용하여 감응식 교통신호제어 운영의 도입 효과를 분석하였다. 기존 TOD 운영의 문제점을 분석하고 반감응 교통신호제어 운영 및 부도로 현시 조정을 통한 개선방안을 제시하였다. 주도로 직진 녹색시간, 주도로 연동효율, 주도로 통행속도를 효과척도(measures of effectiveness, MOE)로 하여 효과를 분석하였다. 연구 결과, 교통량이 적은 시간대(비첨두)에서 교통량이 많은 시간대(첨두)보다 직진 녹색시간, 연동효율, 통행속도가 모두 개선되는 것으로 분석되었다.

Lee et al.(2018)는 딥러닝을 통해 실시간으로 추정하는 차량대기길이 기반의 감응식 교통신호제어 알고리즘을 제시하고 효과를 분석하였다. 이 알고리즘은 COSMOS 교통신호제어 알고리즘에서 제시한 포화도를 이용한 방식에서 차량대기길이로 대체하여 수행하였다. 분석 결과, TOD 운영에 비해 차량지체가 약 5% 감소하였다. 다만, 교차로 간 sub area 그룹으로 묶여 있는 상태에서 하나의 교차로만 감응식으로 운영하다보니 그룹제어에 있어 효과가 제약될 수 밖에 없었다.

Lee et al.(2002)는 서울시에서 운영되고 있는 COSMOS 교통신호제어 알고리즘의 안정화를 위해 교통축, sub area를 중심으로한 운영방안과 좌회전 감응제어 및 대기길이 추정방법에 대한 검토를 수행하였다. 교통축 제어 기본방향을 정립 및 제어기법을 제시하여 교통축내 sub area 간 연결성을 확보하였고 교통축 교차지점의 축별 연동성을 제고하였다. 또한 횡단보도, 현시구조를 고려한 좌회전 감응신호제어 및 대기길이 추정 파라메터 운영방안을 제시하였다. 실험은 실제 교통신호운영 데이터를 이용하여 시공도 분석과 CORSIM 분석을 진행하였다. 또한 옵셋 전이(transition)로 인한 영향을 분석하였다. 실험 결과 기존 운영 방법과 비교하여 매우 개선된 결과를 얻었다.

Lee et al.(2017)에 따르면 대부분의 지자체에서 ITS 운영을 위해 루프검지기를 설치하여 운영 중에 있으며, 광주광역시, 울산광역시 등 현장 루프검지기 원시자료 수집을 위한 유지관리를 진행하는 지자체도 있으나, 대부분의 지자체에서는 도로 노면 상태 및 단선 등으로 정확한 관리가 어려운 상태라고 분석하였다. 또한 교통량, 속도 수집 등 교통정보용으로는 활용하고 있으나 교통신호 운영 자료는 활용되지 않고 있으며, 루프검지기로 수집되는 원시자료의 신뢰성 부족으로 인해 교통신호제어에 활용되지 않는 것으로 분석하였다.

3. 연구의 차별성 도출

국내에서는 감응식 및 교통대응식 교통신호제어 운영에 대한 다양한 연구가 활발하게 진행되어 왔고, 과

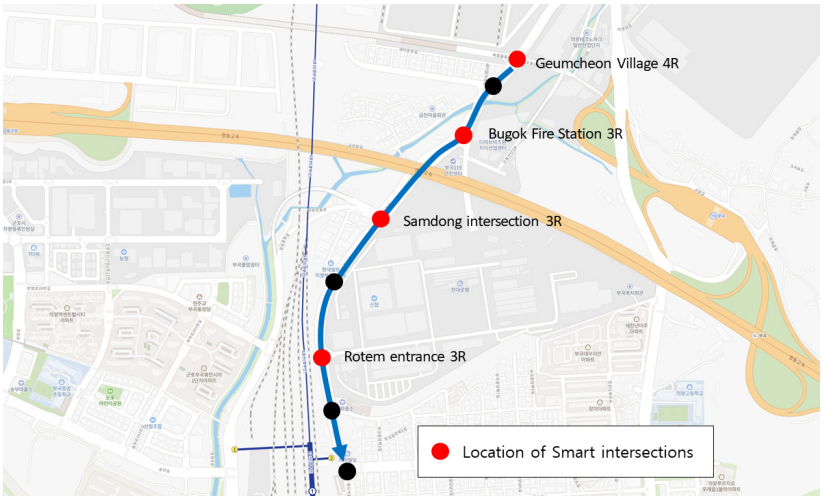
거 대부분의 지자체는 교통신호 루프검지기 설치와 함께 COSMOS 신호제어시스템을 운영하였다. 하지만 루프검지 유지보수의 어려움과 신호제어 신뢰도 저하로 인해 대부분의 지자체들이 교통신호제어에 어려움을 겪고 있는 것으로 확인되었다. 본 연구는 이를 보완한 스마트교차로에서 생산되는 신뢰도 높은 데이터를 이용한 CAERUS 기반 실시간 교통신호제어 운영에 대한 효과를 분석하고자 한다.

지금까지의 연구를 살펴보면 스마트교차로 영상분석 소프트웨어를 활용하여 실시간 교통신호제어에 직접적으로 활용한 사례를 찾아볼 수 없고 대부분 영상검지기를 활용한 좌회전 또는 부도로 감응식 교통신호제어로 주로 연구를 진행해 왔다. 또한 실시간 교통신호제어 연구에 있어서도 대부분 현장조사나 루프검지기에 의한 조사를 통해 진행하였다. 본 연구에서는 센터 영상분석서버와 신호서버 간 통신을 통해 스마트교차로 영상분석 데이터를 활용하여 신호제어시스템의 실시간 제어를 수행하고 현재 거의 모든 지자체에서 운영하고 있는 TOD 운영과 비교를 통해 효과를 분석한다.

Ⅲ. 자료수집 및 분석

1. 자료 수집 개요

본 연구의 시간적 범위는 2022년 10월 4일 ~ 21일까지의 사전데이터 수집 기간과 2022년 11월 9월 ~ 16일까지의 사후데이터 수집 기간으로 구성되어 있다. 공간적 범위는 <Fig. 1>에서 보인 바와 같이 실시간 교통신호제어 운영이 가능한 의왕시 내 철도박물관로(금천마을4R~의왕역)를 분석대상구간으로 선정하였다. 내용적 범위는 본 연구에서 제안한 실시간 교통신호제어 운영과 운영 전후 수집된 통행시간, 속도, 교통량, 교통신호운영 정보를 이용한 효과분석으로 구성되었다.



<Fig. 1> Test site

2. 자료 수집

스마트교차로 시스템의 일환으로 분석대상구간에 설치된 DSRC-RSE에서 수집된 원시 데이터를 분석하여

통행시간 및 속도를 수집하였고, 신호제어기의 DB에서 교통신호 운영 현황을 수집하였다. 교통량은 스마트교차로 영상분석 소프트웨어를 통해 수집하였다. 수집된 자료는 <Table 1>에 제시되었다.

<Table 1> Data collection method

Collected data	Collection method
Travel time and speed	• Processing raw data collected from DSRC-RSE
Traffic signal timing	• Upload of database of traffic singal controllers
Traffic volume	• Processing using video analysis software of smart intersection system

참고로, DSRC-RSE는 차량의 하이패스 단말기 정보를 수집한다. 즉, 하이패스 단말기를 장착한 차량이 DSRC-RSE가 설치된 연속된 두 지점을 통과할 때의 통과시각이 수집되고, 이 자료를 센터에서 가공하여 구간통행시간을 산출한다. 구간통행속도는 구간통행시간을 환산하여 산출하였다.

Ⅳ. CAERUS 적용 절차 및 개선

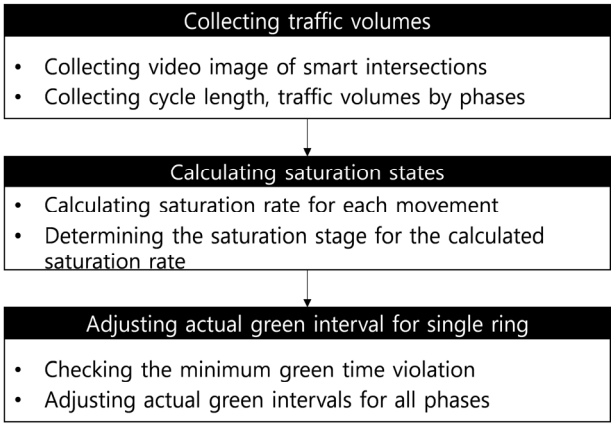
1. 알고리즘 개요

도시부 교차로 정체 예방을 위한 이동류별 통행시간 정보 기반의 실시간 교통신호제어 기술 개발을 목표로 진행된 경찰청 과제에서 CAERUS 알고리즘 개발 등 아래와 같은 내용을 개발하였다(KNPA, 2019). 본 연구에서는 KNPA(2019)에서 개발한 실시간 교통신호제어 알고리즘인 CAERUS를 적용하고 현장 상황에 맞게 일부 개선하였다.

- 스마트 신호운영을 위한 시그널 타이밍 최적화 알고리즘 개발
- 광역 신호시간 관리 S/W 개발
- 스마트신호 기반 긴급차량 경로관리 및 신호서비스 알고리즘 개발
- VDS 및 V2I 기반 대기차량길이 추정 알고리즘 개발 및 가용검지기, 빅데이터 등 정보 융합 교통상황 판단 알고리즘 개발
- 돌발상황 등 교통 이벤트에 실시간 대응이 가능한 신호제어 알고리즘 개발
- 스마트 신호제어 중앙시스템 설계

2. CAERUS 수정

CAERUS 알고리즘 내용 중 본 연구에서 사용할 실시간 제어 알고리즘 내용을 현장에 맞게 수정하여 적용하였다. CAERUS의 사전제어 모듈은 현재 구성되어 있는 교통신호운영 DB를 사용하기 때문에 적용하지 않으며, 과포화제어 모듈은 알고리즘을 수행하기 위한 데이터 수집이 불가하여 제외하였다. 따라서, CAERUS의 세 가지 모듈 중 실시간 제어 모듈만 본 연구에서 사용되었다. 기존 실시간 제어 모듈에서 링구조, 현시시간 배분 방법, 데이터 수집 주기, 포화도 단계 구분이 수정된 실시간 제어의 알고리즘의 운영 절차는 <Fig. 2>와 같다.

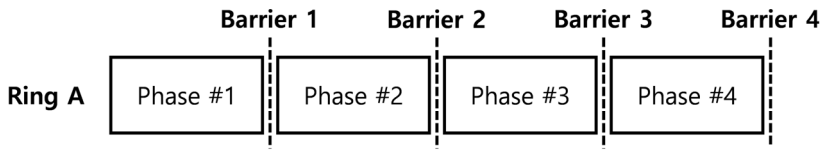


<Fig. 2> Procedure of the improved algorithm

1) 교통신호운영 링 구조 및 현시시간 배분

CAERUS는 단일링(single ring)과 이중링(dual ring) 구조를 모두 사용할 수 있다. 여기서, 이중링을 사용할 경우, 2개의 상충 배리어와 각 배리어의 상충 현시로 구분되어 있다. 기존 CAERUS 알고리즘은 신호주기의 증가와 감소를 판단한 이후 상충 배리어, 상충 현시 간 포화도를 검토 후 신호시간을 배분한다. 현시시간 배분 시 배리어 1과 배리어 2의 포화도를 비교하여 각 배리어의 시간을 늘리거나 줄인다. 그 다음 시간이 늘거나 줄어든 배리어 안에서의 현시시간은 포화도를 비교하여 배분한다. 현시길이는 1초를 최소 단위로 하여 배분된다.

본 연구에서는 현장 운영에 맞게 단일링(single ring)으로 알고리즘을 개선하였다. 개선한 구조는 <Fig. 4>와 같다. 현시시간 배분 시 각 배리어를 모두 비교하여 시간을 배분한다. 현장 여건상 주기가 고정되어 있는 상태에서 각 배리어 간 포화도를 비교 후 신호시간을 배분한다. 다만, 현시시간은 여러 가지 시도 끝에 3초 단위로 배분하였다. 본 분석대상구간의 경우 다양한 단위로 현시길이를 조정하는 실험을 진행하였으며, 3초 단위를 사용할 경우 가장 우수한 결과를 보였기 때문에 3초를 적용하였다. 다른 분석대상구간에 적용할 경우 현시길이 조정 단위를 새롭게 설정할 필요가 있다.



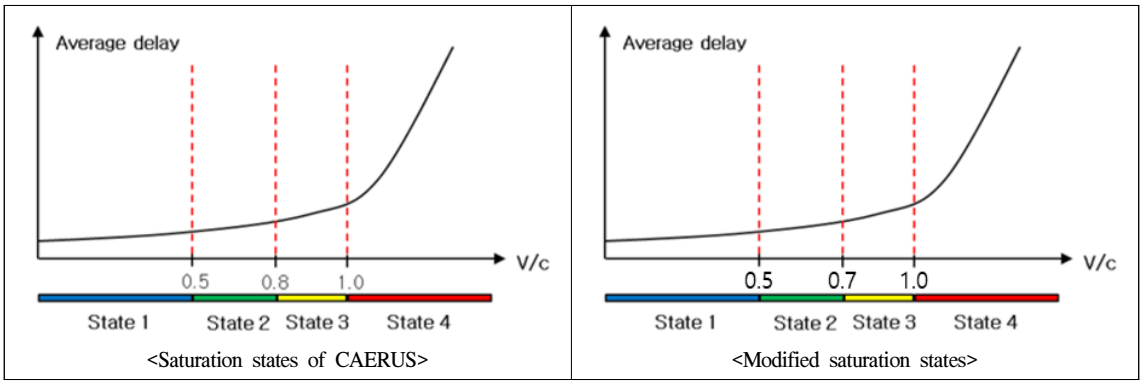
<Fig. 3> Modified ring structure

2) 수집데이터

CAERUS는 구간별/방향별 예측통행시간을 활용해 교통상황변수(교통량)을 추정하고 5분 데이터를 활용해 포화도를 산정한다. 개선된 알고리즘은 신호 현시별, 주기별 통과 교통량 및 잔여교통량 데이터를 실시간으로 수집하여 포화도를 산출한다.

3) 포화도 단계 기준

실시간제어(Module 2)는 구간별/방향별 예측통행시간을 활용해 교통상황의 변수 값을 추정하고 실시간 교통상황에 대응할 수 있도록 운영하고 있는 신호시간을 교통상황에 따라 조정하여 방향별 포화도 균등화를 수행한다(KNPA, 2019). 이를 위해, CAERUS는 포화도를 몇 가지 단계로 구분하여 교통신호제어에 사용한다. 본 연구에서는 KNPA(2019)에서 제시한 포화도 경계값을 사용하였으나, 현장 적용 결과 실시간 교통상황 대응에 부적절하여 시행착오법을 이용하여 조정하였다. 최종적으로 조정된 포화도 경계값은 <Fig. 5>의 오른쪽 그림과 같다. 참고로, <Fig. 5>의 왼쪽 그림은 기존 CAERUS는 포화도 경계값을 제시하고 있다.



<Saturation states of CAERUS> <Modified saturation states>

<Fig. 4> Comparison of states of saturation rates

3. 알고리즘 적용

수집된 영상을 분석하여 영상분석서버에서 생성된 교통량 데이터는 신호서버에서 주기, 현시정보에 맞추어 신호서버로 전송한다. 신호서버에서는 현시별 교통데이터를 받아 수요교통량을 산출한다. 수요교통량은 녹색시간의 통과교통량과 정지신호 순간의 잔여교통량을 합한 교통량이다. 앞막힘이 발생하는 과포화 교차로의 경우 녹색시간의 통과교통량이 많지 않아 알고리즘에서 신호시간을 줄여줄 수 있기 때문에 수요교통량을 사용하였다. 수요교통량은 녹색신호시 통과교통량과 적색신호시 잔여교통량의 합계를 통해 산출한다. 수요교통량은 오정보 방지 및 안정적 수집을 위해 최근 3주기 가중이동평균값을 사용하였다.

1) 교통량 수집 및 가공

본 연구에서 CAERUS에 입력하기 위하여 통과교통량(passing traffic volume)과 잔여교통량(remaining traffic volume)을 수집한다. 수집된 자료 및 내용은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Data collected through video analysis of smart intersections

Data	Contents	Unit
Passing traffic volume	• Number of vehicles by vehicle types (passenger car, truck, bus, motor cycle) that passed the lane detection baseline for each movement (through, left, right, u-turn) during the signal cycle	Vehicle per cycle
Remaining traffic volume	• Number of vehicles by vehicle type that exist within the detection area at n seconds after the end of the corresponding signal	Vehicle per cycle

교차로 접근로의 각 차로별로 설정되는 검지영역에 의해 수집된 통과교통량과 잔여교통량 데이터를 차로별 정보로 가공한다. 자료 가공 내용은 <Table 3> 및 <Table 4>와 같다. 참고로, 스마트교차로 시스템에서는 차종 구분이 가능하기 때문에 차종별 교통량을 산출하여 도로용량편람에서 제시된 중차량보정계수를 적용하여 승용차 단위로 환산하였다.

<Table 3> Data processing

Data processed	Contents	Unit
Passing traffic volume by lane	• Calculating the passing traffic volume for each lane movement flow by using the traffic volume for each vehicle type. • Passenger car×1 + truck×1.5 + bus×2.0 + motor cycle×0.5 • Passing traffic volume by lane = passing traffic volume by movement / number of lanes	Passenger car pre cycle per lane
Remaining traffic volume by lane	• Calculating the remaining traffic volume for each lane movement flow by using the traffic volume for each vehicle type. • Passenger car×1 + truck×1.5 + bus×2.0 + motor cycle×0.5 • Remaining traffic volume by lane = remaining traffic volume by movement / number of lanes	Passenger car pre cycle per lane

<Table 4> Calculation method of remaining traffic volume by movements

Movements	Contents
Through	• Remaining traffic volume of the lanes including the through movement within the detection area is summed up and the average remaining traffic volume divided by the number of lanes is determined as the remaining traffic volume of the straight movement. • In the case of a common lane type including left-turn traffic flow, it is classified by the ratio of the passing traffic volume of the previous cycle.
Left-turn	• Remaining traffic volume of the lanes including the left-turn movement within the detection area is summed up and the average remaining traffic volume divided by the number of lanes is determined as the remaining traffic volume of the left-turn movement. • In the case of a common lane type including through traffic flow, it is classified by the ratio of the passing traffic volume of the previous cycle.

수요 교통량은 통과교통량과 잔여교통량을 합산하여 산정하고 최근 3주기에 산정된 수요교통량을 가중이동평균하여 사용하며 (Eq. 1)과 같다. (Eq. 1)에서 0.5, 0.3, 그리고 0.2는 3주기 중 첫 번째 주기, 두 번째 주기 그리고 마지막 주기의 교통량을 가중이동평균하기 위하여 산정한 값이다. 자세한 사항은 KNPA(2019)에서 확인할 수 있다.

$$V = (V_1 \times 0.5) + (V_2 \times 0.3) + (V_3 \times 0.2) \quad \text{(Eq. 1)}$$

where, V = Demand traffic volume (passing traffic volume + remaining traffic volume)

V_1 = Demand traffic before 1 cycle

V_2 = Demand traffic before 2 cycles, and

V_3 = Demand traffic before 3 cycles

2) 이동류별 포화도 단계 산출

(1) 포화도 산출

포화도 산출 식은 아래와 같으며 포화교통류율은 직진 1,900(대/시), 좌회전 1,800(대/시)을 사용하였다(Do, 2020).

(2) 접근로 이동류 별 포화도 가공

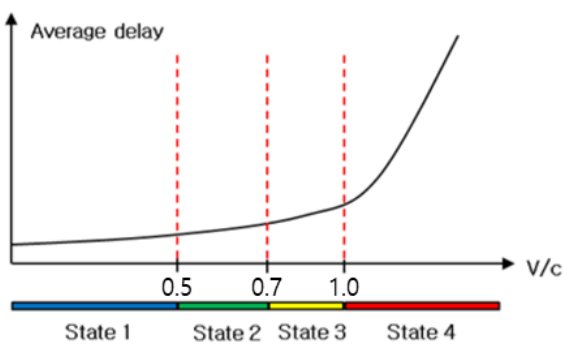
포화도 산출 식을 이용하여 접근로 이동류의 수요교통량과 이동류 용량 정보를 산정하여 해당 이동류의 포화도 정보를 가공한다. 이동류 잔여교통량 산정 방법은 <Table 5>와 같다.

<Table 5> Calculation of saturation rate

Types	Contents
Equation for saturation rate	$X_{(a,k,i)} = \frac{V_{(a,k,i)}}{S_{(a.i)} \times \lambda_{(a,i)}}$
$X_{(a,k,i)}$	• Saturation rate of the *k*-th cycle of approach *a* and movement *i* • a: E(east), W(west), S(south), N(north) • k: cycle • i : T(through), L(left-turn)
$V_{(a,k,i)}$	• Demend traffic volume of the *k*-th cycle of approach *a* and movement *i* • a: E(east), W(west), S(south), N(north) • k: cycle • i : T(through), L(left-turn)
$S_{(a,i)}$	• Saturation rate of approach *a* and movement *i*
$\lambda_{(a,i)}$	• Green interval rate of approach *a* and movement *i*

(3) 산출된 포화도에 따른 단계 구분

포화도 단계는 운영하면서 변경설정이 가능하도록 구현하였다. 기존 알고리즘의 포화도 단계 구분은 1단계 0~0.5, 2단계 0.5~0.8, 3단계 0.8~1.0, 4단계 1.0이상으로 구분하였으나 본 연구에서 0.8 이상의 포화도 값이 나오는 경우가 거의 없었기 때문에 <Fig. 6>와 같이 3단계 구분을 0.7~1.0으로 하향 조정하였다.



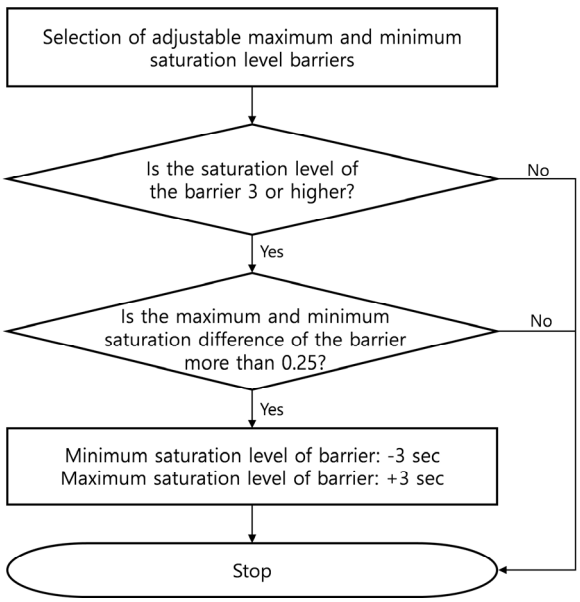
<Fig. 5> Modified states of saturation rates

3) 녹색시간 조정

조정 가능한 최대, 최소 포화도 단계 배리어를 먼저 선정한다. 최소녹색시간 이하로 줄여야 하거나 최대녹색시간 이상으로 늘려야 하는 경우 조정 불가능한 배리어로 판단한다. 각 배리어의 포화도 단계가 3이상일 경우가 하나라도 있을 때 녹색시간 조절 조건을 충족한다. 이후 각 배리어의 최대, 최소 포화도의 차이가 0.25 이상일 경우 현시를 조정한다. 최소 포화도 단계 배리어는 -3초, 최대 포화도 단계 배리어는 +3초를 배분한다. 이 과정은 <Fig. 7>에서 설명하고 있다.

사지교차로의 4현시 신호에서 1현시 1단계, 2현시와 3현시가 2단계, 4현시가 3단계일 경우 1현시에서 4현시로 신호시간을 3초 배분하게 된다. 여기서, 포화도의 차이가 0.25 이상일 경우에만 배분하고 0.25 미만일 경우는 프로세스를 종료한다. 또한 1현시가 최소녹색시간 이하로 줄이지 못해 배분하지 못할 경우 2현시와 3현시 중 낮은 포화도의 값을 갖은 현시(포화도 차이 0.25 이상)에서 4현시로 배분을 하게 된다.

신호시간 배분 이후 교통량의 변화가 없어 조정이 없을 경우 TOD 시간경계에서의 신호시간 계획을 따르도록 하였다. 실시간 제어 시 신호시간은 기존에 운영하고 있는 TOD 계획을 참조한다.



<Fig. 6> Procedure for green interval adjustment

4) 옵셋 조정

녹색시간 조정 후 분석대상구간의 전체적인 속도를 비교한 결과, 조정 전 속도와 큰 차이가 없는 것으로 조사되었다. 이는 옵셋을 변경 없이 CAERUS 기반 실시간 교통신호제어를 운영했을 시 각 교차로 내에서 주도로 뿐만 아니라 좌회전, 부도로에도 신호시간이 실시간으로 조정되어 기존의 차량 도착 흐름에 맞추어진 옵셋으로는 새롭게 바뀐 차량 도착 흐름을 충분히 고려하기 어려웠다. 결론적으로, 옵셋 조정 없이 CAERUS 기반 실시간 교통신호제어를 운영하는 경우 각 교차로의 제어지체 값은 개선될 수 있으나, 구간 속도의 개선을 담보하기 힘든 것으로 나타났다. 따라서, 이러한 점을 고려하여, 본 연구에서는 실시간 교통신호제어에 따른 새로운 차량 도착 흐름에 맞게 양방향이 균등하게 연동되도록 옵셋을 변경하였다. 그 결과, 분석대상구간 전체적으로 차량 속도가 개선되었다.

Ⅴ. 효과분석

1. 효과분석 개요

본 연구에서는 분석대상구간의 CAERUS 기반 실시간 교통신호제어 운영 전과 후의 MOE 비교를 통하여 실시간 교통신호제어의 효과를 분석하였다. 효과분석은 사전에 스마트교차로 시스템을 통해서 수집된 MOE 값과 실시간 신호운영을 적용한 사후에 수집된 MOE 값을 비교하여 수행하였다. 즉, 사전은 TOD 운영시 MOE 값들을 수집하였고, 사후는 실시간 교통신호제어 운영시 결과를 분석하였다. 이를 통하여 적용한 알고리즘이 제대로 구동하고 교통류 개선에 효과가 있는지 여부를 평가하였다. MOE는 실시간 교통신호제어 구간의 평균통행시간, 속도, 평균제어지체, 그리고 교통량을 선정하였다. 교통량의 경우는 TOD 운영시와 CAERUS 기반 실시간 교통신호제어 운영시 교통량 수준의 차이를 가늠하기 위하여 조사되었다. 사전 데이터 수집은 2022년 10월 5일에 수행되었으며, 사후 데이터 수집은 2022년 11월 16일에 수행되었다.

2. 평가 및 결과

먼저, 교차로 교통량 비교 결과, 금천마을 사지교차로는 조사시간 3시간 동안 1시간 평균 68대가 감소하였다. 부곡소방서 삼지교차로는 평균 78대가 감소하였고 삼동교차로 삼지교차로는 평균 38대가 감소하였다. 로템입구 삼지교차로는 평균 61대가 감소하였다. 4개 교차로 모두 교통량이 다소 감소하였지만, 교통량 변화의 큰 차이는 보이지 않았다. 구간 교통량 비교 결과 의왕역 방면으로 조사시간 3시간 동안 1시간 평균 78대 감소하였고 금천마을 사지교차로 방면으로 평균 145대 감소하였다. 양방향 모두 구간 교통량이 다소 감소하였지만, 마찬가지로 구간 교통량 변화의 큰 차이는 보이지 않았다. 따라서, 사전 및 사후 평가를 수행하는 데 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.

교통신호운영에서 가장 중요한 효과척도인 제어지체 값을 이용하여 사전과 사후 효과평가를 수행하였다. 교차로별 평균 제어지체 비교 결과, 4개 교차로 모두 제어지체 값이 감소하였다. 본 연구에서 제안하는 실시간 교통신호제어 알고리즘에서 현시별 포화도에 따라 신호시간을 배분하기 때문에 교통량이 많은 접근로에 신호시간을 더 많이 배분하여 교차로 평균 제어지체가 줄어든 것으로 판단된다.

<Table 6> Comparative analysis of average control delay

Intersections	Before average control delay(sec/veh)			After average control delay(sec/veh)			Difference(sec/veh)		
	07~08H	08~09H	09~10H	07~08H	08~09H	09~10H	07~08H	08~09H	09~10H
Geumcheon Village 4R	59.6	64.4	53.5	51.0	55.0	48.4	-8.6	-9.4	-5.1
Bugok Fire Station 3R	57.3	61.5	48.8	39.2	40.5	36.1	-18.1	-21	-12.7
Samdong intersection 3R	48.3	56.2	45.2	38.8	46.4	36.6	-9.5	-9.8	-8.6
Rotem entrance 3R	28.8	25.6	21.9	25.5	24.8	20.4	-3.3	-0.8	-1.5

또한 분석대상구간의 통행속도를 살펴보았다. 분석 결과, 3시간 구간 평균속도는 의왕역 방향으로 약 5km/h 증가하여 개선되었고, 금천마을 사지교차로 방향으로 약 3km/h 증가하였다. 본 분석대상구간에서 실시간 교통신호제어 운영시 속도측면에서도 개선효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 실시간 교통신호제어 후 변경된 차량의 도착 흐름에 맞게 옵셋을 조정한 결과로 판단된다. 따라서, 각 교차로에서 실시간 교통 패턴

에 따른 현시 배분을 하는 실시간 교통신호제어 운영시, 효과 증대를 위하여 옵셋 조정도 같이 수행되어야 함을 확인하였다.

Ⅵ. 결론 및 향후 연구 과제

1. 결론

본 연구에서는 신호교차로의 효율적, 안정적 교통신호운영을 위해 스마트교차로 영상분석 데이터를 활용한 실시간 교통신호제어를 적용하였으며, 경찰청 스마트시그널 연구과제의 알고리즘을 실제 운영이 가능하도록 현장에 맞게 적용하여 사용하였다.

교통신호운영의 정확성을 위해 스마트교차로 영상분석 데이터의 신뢰도를 95% 이상으로 조정 및 검증하였으며, 통과교통량 뿐만 아니라 초기 잔여교통량을 더한 수요교통량을 사용이 가능하도록 구현하였다. 실시간 교통신호제어 알고리즘은 포화도의 변화에 따라 현시시간을 배분하도록 구현하였고 TOD 시간계획을 참조하여 운영하였다.

본 연구에서 선정한 구간의 실시간 교통신호제어 운영 전후 비교 분석 결과 기존의 옵셋을 유지하였을 경우 구간속도가 개선된 효과를 보지 못했다. 옵셋을 양방향 균등하게 다시 조정한 이후 양방향 모두 개선된 효과를 보였다. 의왕역 방향으로 평균 약 5km/h, 금천마을 사지교차로 방향으로 약 3km/h로 크게 개선된 효과는 보지 못했는데 이는 주도로 교통량에 비해 좌회전 교통량이 증가한 경우 좌회전의 포화도가 증가하였고 주도로의 불균형한 교통흐름 때문인 것으로 분석하였다. 반면 교차로 평균제어지체는 감소하는 효과가 나타났다. 본 연구의 대상구간의 4개 교차로 모두 평균 제어지체가 감소하였다. 이는 접근로 현시별 포화도에 따라 신호시간을 배분하였기 때문에 교통량이 상대적으로 많은 접근로로 현시시간을 배분하였기 때문으로 분석되었다.

본 연구는 교통량 변화가 빈번한 도심부 신호교차로에 적용 시 주도로 통행량 증가 및 교통혼잡 완화 등의 효과를 기대할 수 있으며, 향후 스마트교차로를 구축하는 지자체에 널리 확대하여 사용할 수 있을 것이라 판단된다. 또한 서울시 COSMOS 신호체계 뿐만 아니라 기존 매설식 검지기를 설치하고 사용했던 지자체의 검지 신뢰도 문제를 해결함과 동시에 유지보수 등의 비용절감으로 인한 경제적 효과도 기대할 수 있다.

2. 연구의 한계 및 향후 연구과제

실시간 교통신호제어 운영은 각각의 교차로는 개선된 효과를 볼 수 있었으나 옵셋의 변경 없이 구간의 속도를 개선하는데는 한계를 보였다. 이는 주도로의 교통량이 많은 경우는 개선이 될 수 있겠으나 부도로나 좌회전의 교통량이 주도로 보다 상대적으로 많은 경우는 신호시간을 주도로에서 가져가기 때문에 주도로 직진 구간 속도가 개선되는 효과를 보기 어렵다고 판단된다. 실시간 교통신호 제어는 운영에 맞게 적절한 옵셋을 재설정 하는 것이 중요하고 무엇보다 알고리즘을 현장상황에 맞게 구현하여 실제 운영이 가능하도록 하는 것이 중요하다. 따라서, CAERUS에서 제시하는 실시간 교통신호제어 전략에 옵셋을 변경하는 전략도 향후에는 개발될 필요가 있다고 판단된다.

실시간으로 신호주기를 변경함에 따라 옵셋을 자동으로 구현하여 구간의 신호연동 시 문제가 없도록 하는 방안이 필요할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 단일링 구조에서 신호를 배분하였는데 신호주기 변

경과 동시에 이중링 구조에서의 효율적 운영방안에 대한 연구가 필요하며, 대기행렬 및 앞막힘에 대한 검지 방안을 마련하여 과포화시 실시간 교통신호제어 운영을 효과적으로 할 수 있는 방안에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

마지막으로 본 연구를 시작하게된 계기는 우리나라에서 최근 활발하게 구축 중인 스마트교차로에서 생산된 다양한 데이터를 교통신호운영에 직접 사용하는 사례가 없다는 점에 착안하여, 본 연구에서는 실제 스마트교차로의 데이터를 교통신호운영에 연결을 하고 여러 가지 발생하는 문제점을 살펴보자는 것이었다. 연구결과, 성공적으로 스마트교차로 데이터를 실제 교통신호운영 서버에 연계하여 보다 합리적인 교통신호운영을 할 수 있었다. 본 연구를 진행하면서 스마트교차로의 데이터를 실제 교통신호운영에 연계하는 것은 가능하지만, 스마트교차로의 데이터를 적극 활용할 수 있는 교통신호제어 알고리즘들이 다양하게 준비되지 않았다는 것이 확인되었다. 따라서, 국가 R&D 등을 통해서 스마트교차로의 데이터를 보다 적극적으로 교통신호운영에 활용할 수 있는 방안들을 모색할 필요가 있다고 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 이상욱의 아주대학교 교통·ITS대학원 석사학위 논문을 기반으로 작성되었다. 또한 본 연구는 2023년도 정부(경찰청)의 재원으로 과학치안진흥센터의 지원(No. 092021C29S01000, 네트워크 제어를 위한 교통정체 및 혼잡 운영관리 기술 개발)을 받아 수행된 연구입니다.

REFERENCES

Ahn, H. and Lee, Y.(2006), “A study on the evaluation of traffic response and sensitive signal control method”, *Fall Conference of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, pp.31-36.

Do, C.(2020), *Transportation Engineering*, Cheongmungak, p.432.

Jeong, D.(2021), *Evaluation of actuated signal control system using smart image detection system data*, Master's Thesis, Kyungsung University, pp.55-85.

Kim, J., Lee, T., Cheon, S., Park, K., Huh, J., Kim, S. and Lee, C.(2021), *National transportation cost forecast in 2021*, Korea Transport Institute, pp.13-14.

Korea National Police Agency(2019), *Development of smart signal operation system*, Final Report, pp.337-361.

Lee, H.(1999), “Domestic and foreign intelligent transport systems (ITS) implementation status and prospect”, *Electronic and Telecommunications Trends*, vol. 14, no. 2, p.58.

Lee, J. I.(2017), *Status diagnosis and evaluation study for local government traffic signal operation improvement* (1st ed.), pp.24-39.

Lee, S., Oh, Y. and Lee, S.(2002), “Traffic signal control methods for functional improvements in COSMOS”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 20, no. 6, pp.31-43.

Lee, Y., Sim, M., Kim, Y., Lee, S. and Lee, C.(2018), “Study of the operation of actuated signal control based on vehicle queue length estimated by deep learning”, *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 17, no. 4, pp.54-62.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2021), *Intelligent transport systems (ITS) master plan 2030*.

Park, S., Kim, D., Lee, D. and Kang, J.(2008), “A study on the application of fully sensitive signal control operation in the outskirts of Cheonan City”, *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 8, no. 3, pp.52-63.

Statistics Korea, *Korean Statistical Information Service*, http://kosis.kr, 2023.04.13.