

# V2I 통신환경을 활용한 연동교차로 교통신호 실시간 제어 연구

## Development of Real-time Traffic Signal Control Strategy for Coordinated Signalized Intersections under V2I Communication Environment

한 음\* · 윤 일 수\*\* · 이 상 수\*\*\* · 장 기 태\*\*\*\* · 박 병 규\*\*\*\*\*

\* 주저자 : 도로교통공단 시설장비연구처 연구원  
 \*\* 교신저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 부교수  
 \*\*\* 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수  
 \*\*\*\* 공저자 : 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 부교수  
 \*\*\*\*\* 공저자 : 버지니아주립대학교 토목환경공학과 부교수

Eum Han\* · Ilsoo Yun\*\* · Sang Soo Lee\*\*\* · Kitae Jang\*\*\*\* · Byungkyu Park\*\*\*\*\*

\* Dept. of Traffic Safety Facilities & Enforcement System, Korea Road Traffic Authority  
 \*\* Dept. of Transportation System Engineering, Univ. of Ajou  
 \*\*\* Dept. of Transportation System Engineering, Univ. of Ajou  
 \*\*\*\* The Cho Chun Shik Graduate School for Green Transportation, KAIST  
 \*\*\*\*\* Dept. of Civil and Environmental Engineering, the University of Virginia  
 † Corresponding author : Ilsoo Yun, Ilsooyun@ajou.ac.kr

Vol.17 No.3(2018)

June, 2018

pp.59~71

ISSN 1738-0774(Print)

ISSN 2384-1729(On-line)

<https://doi.org/10.12815/kits.2018.17.3.59>

2018.17.3.59

Received 31 May 2018

Revised 18 June 2018

Accepted 28 June 2018

© 2018. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

### 요 약

본 연구에서는 V2I 통신환경 하에서 수집되는 개별 차량 정보를 활용하여 연동교차로의 교통상황에 대응할 수 있는 실시간 교통신호 제어 알고리즘을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 알고리즘은 매 초 간격으로 V2I 통신환경에서 수집되는 차량 정보를 가공 처리하여 연동교차로 교통신호 제어에 필요한 현시 그룹 길이, 현시 길이, 현시 순서 등을 결정할 수 있다. 개발된 연동교차로 교통신호 제어 알고리즘의 효과 평가를 위해 미시교통시뮬레이션 모형인 VISSIM을 이용하였다. 다양한 교통조건 하에서 기존 정주기식 연동 교통신호 제어 방식과 개발된 알고리즘의 성능을 비교한 결과, 개발된 알고리즘의 성능이 우수한 것으로 확인되었다.

핵심어 : V2I, 연동교차로, 교통신호, 실시간 제어 알고리즘, 최적화

### ABSTRACT

This study was initiated to develop an optimal signal control algorithm for coordinated signalized intersections using individual vehicle's information which can be collected in a format of prove vehicle data (PVD) via V2I (Vehicle to Infrastructure) communication environment. For developing this signal optimization algorithm, three modules were developed for phase group length computation, split distribution, and phase sequence assignment. The simulation analysis using the microscopic simulation model, Vissim, was conducted for evaluating the effectiveness of the developed algorithm. The analysis result represented that the performance of the developed algorithm is far superior to that of the fixed coordinated signal control method which is the most common signal control method for coordinated signalized intersections in Korea.

Key words : Vehicle-to-infrastructure, Coordinated signalized intersection, Traffic signal, Real-time signal control algorithm, Optimization

## I. 서 론

### 1. 연구의 배경 및 필요성

제1차 산업혁명 이후, 산업화와 도시화에 따른 직주분리 등으로 인하여 도시지역에서 교통혼잡이 발생하였으며, 많은 시간이 지났지만 여전히 현대 사회의 해결하여야 하는 중요한 교통문제로 남아있다. 한국 역시 비단 도시지역뿐만 아니라 전국적으로 교통혼잡이 발생하고 있으며, 이로 인하여 큰 정신적, 물질적 피해를 입고 있다. 예를 들어, 2015년 기준 우리나라의 교통혼잡비용은 총 33조 4천억 원으로서 국내총생산(GDP) 대비 2.13%에 이르고 있으며, 이는 미국의 GDP 대비 혼잡비용이 0.83%인 것을 감안한다면 매우 높은 수준임을 알 수 있다(Joo, 2017). 이러한 도시지역 도로의 교통혼잡을 해결하기 위해서는 도로의 신설이나 확장과 같은 전통적인 방식의 도로용량 증대가 필요하지만, 도로용량 증대를 위해서는 막대한 투자재원과 시간이 소요되고, 현재와 같이 교통 SOC에 대한 투자보다는 운영 효율성을 중요시하는 정부의 투자 패러다임 하에서는 물리적인 투자를 통하여 교통혼잡을 해결하는 데 한계가 존재한다. 따라서 기존 교통 인프라의 보다 효율적인 운영이 중요한 시기라고 할 수 있다.

도심지 교통혼잡의 주요한 원인 중에 하나가 교통신호이다. 따라서 교통신호에서 발생하는 교통혼잡을 해소하기 위한 많은 노력들이 있어왔다. 특히, 여러 개의 신호교차로가 연속해서 연결되어 있는 연동신호교차로(coordinated signalized intersection) 네트워크에서는 하나의 공통된 신호주기 길이(common cycle length)와 오프셋(offset)을 이용하여 연동신호교차로를 효과적으로 제어하는 연동신호 제어시스템(coordinated signal control system)이 존재한다(Do, 1989). 우리나라의 대표적인 교통신호 운영모델인 COSMOS(Cycle, Offset, Split MOdel for Seoul)도 연동신호 제어를 효과적으로 할 수 있는 기능을 갖추고 있다.

연속된 신호교차로 네트워크에서의 연동신호 제어시스템 적용의 목적은 횡단보도 보행자의 안전한 보행 시간 안에서 차량의 연속진행 및 안전운행을 통한 쾌적한 운전환경을 조성하여 동일한 신호시간으로 최대의 차량을 빠른 시간 내에 통과시키는 것이다(Do, 1989). 또한 차량의 주행속도를 연동속도로 제어하므로 불필요한 과속 및 신호위반 등을 예방할 수 있어 사고 감소효과를 가져올 수 있으며, 지체시간 감소에 따른 공회전을 줄여 공해요소 배출 억제로 환경적 효율성을 기대할 수 있다.

하지만 연동신호 제어시스템 운영이 장점만 존재하지는 않는다. 교차로에서 양방향 모두를 연속 진행시킨다는 것이 어렵기 때문에 양방향 통행에서 연속진행이 잘 이루어지려면 모든 교차로의 교차로 규모와 교차로 간의 간격이 일정한 것이 유리하다(Do, 1989). 그러나 이와 같은 조건을 가질 경우는 도시 구조상 매우 드물기 때문에 진행대폭(bandwidth)과 진행속도의 조절을 위해 신호교차로들을 특정 그룹으로 편성하여 공통 신호주기를 부여해야 한다. 이러한 공통 신호주기는 일반적으로 교통량이 특별히 많은 교차로를 기준으로 설정하여 운영한다. 현재 도심지에서 나타나는 교통패턴은 첨두시간의 개념이 따로 없고 주말과 휴일의 교통패턴이 일정하지 않으므로 현장상황에 최적으로 대처하기 위해서는 부단한 현장조사와 자료정리를 통해 신호의 오프셋값을 변경해주어야 한다. 또한 사고나 정차 등의 일시적으로 변경되는 교통패턴 발생 시 오히려 연동신호 제어시스템은 운영의 효율성을 저하시킬 수도 있다.

이와 같이 전통적인 교통신호 운영만으로는 고질적인 도심지의 교통문제를 해결하기가 기술적으로 어려운 상황이다. 이러한 기술적 어려움을 해결을 위한 대안으로서 지능형교통체계(Intelligent Transport Systems, ITS) 또는 차세대 지능형교통체계(Cooperative-Intelligent Transport Systems, C-ITS)와 같이 기존 교통시설의 효율성을 증대시키기 위한 다양한 노력들이 개발 및 시도되고 있다. 신호교차로 운영에서도 동일한 연구개발이 진행되고 있다. 특히, 해외에서는 도심지 교차로 내에서 V2X(Vehicle-to-Everything) 통신기술을 이용한 신호제어

연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 기술은 구체적으로 차량과 차량 간(Vehicle-to-Vehicle, 이하 V2V) 통신을 기반으로 차량 간의 정보 공유를 통한 안전사고 예방, 차량과 도로인프라 간(Vehicle-to-Infrastructure, 이하 V2I) 통신을 기반으로 하는 차량과 도로 인프라 간의 정보 공유를 통하여 실시간 교통 상황을 체크해 차량에 알려주거나 신호 대기 시간의 제어가 가능하며, 또한 우회로를 설정해 차량의 집중을 완화할 수 있다는 장점이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 도시지역의 정형화되지 않는 교통패턴을 대응하고 신호교차로에서 발생하는 지체를 최소화하기 위해 차량과 도로인프라 간의 V2I 통신환경을 기반으로 수집된 개별 차량의 정보를 활용하여 연동신호교차로의 실시간 교통신호 제어 알고리즘을 개발하고자 하고, 이를 다양한 교통 환경에서 평가하고자 한다.

## 2. 연구 방법론

본 연구에서는 V2I 통신환경에서 수행한 독립신호교차로 교통신호 최적 제어 알고리즘 개발 연구의 결과를 연동신호교차로에 확장 적용시키고자 하였다(Han, 2016; Han et al., 2016). 즉, 기존 연구에서는 제어 대상인 교차로의 접근로 상에서 주행 중인 V2I 통신이 가능한 커넥티드 차량(connected vehicle, CV)의 위치와 속도를 사용하여 해당 교차로의 교통신호를 실시간 제어하였다. 하지만, 본 연구에서는 상기 정보와 함께 해당 교차로와 연결된 상류부 교차로의 접근로 상에 존재하는 CV의 정보까지 함께 활용하여 연동신호교차로의 실시간 교통신호 제어를 수행하고자 한다. 매초 간격으로 V2I를 통해 수집된 정보는 CV의 위치, CV가 이용하는 차로, 하류부 교차로 정지선까지의 남은 거리, 그리고 하류부 교차로의 접근로에 도달하는 시간을 포함하며, 네트워크 상의 전체 접근로 상에서 수집된다. 다시 말해서, 특정 신호교차로의 실시간 교통신호 제어를 위하여 해당 교차로의 접근로 상에 있는 CV들의 정보뿐만 아니라, 조만간 해당 교차로의 접근로로 진입하게 될 CV들의 정보들까지 활용함으로써 공통 신호주기 시간을 사용하는 대신에 적절한 신호주기 시간을 설정할 수 있기 때문에 신호운영에 융통성을 높일 수 있다는 장점이 존재한다. 자세한 설명은 뒤에서 설명될 예정이다.

본 연구의 주요 연구 절차와 방법론은 다음과 같다. 첫 번째, V2I 환경에서 수집되는 CV의 정보를 가공하는 알고리즘을 개발하였다. 일반적인 실시간 교통신호 제어 알고리즘은 교차로 대기 길이를 추정한다. 하지만, 본 연구에서는 실시간으로 수집되는 CV의 위치 및 속도 정보를 이용하여 교통신호 제어 알고리즘의 입력변수인 개별차량의 도착시간을 추정함으로써 각 접근로의 정지지체를 예측할 수 있다.

두 번째, 연동신호교차로 실시간 최적 교통신호 제어를 위한 알고리즘을 개발하였다. 최적 교통신호 제어 알고리즘은 현시그룹 길이, 현시 길이, 그리고 현시 순서를 결정한다.

세 번째, 미시교통시뮬레이션을 기반으로 본 연구에서 개발된 알고리즘에 대하여 다양한 교통 조건 하에서 성능평가를 실시하였다. 성능평가를 위한 분석에서는 기존에 운영되고 있는 정주기식 및 감응식 교통신호 제어기법과 본 연구에서 개발된 알고리즘의 성능을 비교하였다. 또한, V2I 통신이 가능한 Probe Car의 시장점유율에 따른 개발 알고리즘의 효과를 평가하였다.

## II. 관련 연구 동향

### 1. 관련 연구 동향

교통신호는 상충하는 다른 방향으로 진행되는 교통류에 적절한 시간 간격으로 통행우선권을 할당하여 상충을 줄이고 교차로의 이용효율을 높이는 방향으로 접근되어야 한다(Do, 1989). 교통신호 제어방식에는 정주기식, 감응식(완전감응, 반감응), 적응식 교통신호 제어기법 등이 존재한다(Do, 1989). 이러한 시스템들은 대부분 루프 검지기 및 영상 검지기 등을 활용하여 해당 교차로에 연결된 접근로 상의 일부 지점에 대한 정보를 추출하여 교통신호 운영을 시행한다. 하지만, 이러한 방식은 공간적 및 내용적 측면에서 취득할 수 있는 교통정보의 한계로 인하여 다양한 교통상황에 적절한 실시간 교통신호 운영과 도로 상에 발생하는 각종 돌발 상황 대처에 한계를 보이고 있다. 최근 적용되고 있는 C-ITS 사업들에서는 영상 검지기, 레이더 검지기와 같은 지점 기반 검지 시스템 외에도 차량 내 설치된 차량탑재장치(on board equipment, OBE)와 노변장치(road side equipment, RSE)를 이용한 차량과 도로인프라 간 V2I 통신을 통해 OBE를 장착한 차량 정보를 추출하여 다양한 서비스를 하고 있다. 이러한 V2I 통신기술은 신속하고 정확한 정보 공유를 통해 교통사고 위험을 줄이고 이동성(mobility)을 개선할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 본 연구에서는 기존 교통신호 제어 방법에 대하여 간단하게 고찰하고, V2I 통신기술을 이용하여 교통신호 제어 방법을 개선하려고 하는 연구들을 조사하였다.

Kattan et al.(2010)의 연구에서는 CV의 존재가 전체 교통 네트워크에 어떤 영향을 주는지 연구하였다. 특히 교통사고 발생 상황에서 CV화 되어 있는 것이 이후의 네트워크에 끼치는 영향을 정량적으로 보고자 하였다. 분석 결과, CV 차량 비율이 증가할수록 사고가 일어날 확률이 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 심각한 지체 상황에서 CV 차량이 존재할 때 통행 시간이 오히려 증가하는 것을 확인하였다.

Cheng et al.(2011)의 연구에서는 CV의 궤적 정보를 수집하여 충격과 이론을 적용한 대기차량 길이를 추정하였다. 궤적차량의 수집된 정보를 네 가지 유형으로 나누어 유형별 충격과 속도를 이용하여 대기차량길이를 추정하였다. 다음은 궤적차량의 수집된 정보를 네 가지 유형으로 나눈 결과이다.

- CP 1: 정지로 인한 감속 시작하는 지점
- CP 2: 차량이 정지로 대기행렬 길이에 합류하는 지점
- CP 3: 출발 신호로 차량의 가속이 시작되는 지점
- CP 4: 정지 없이 정지선을 통과하는 지점

Jung et al.(2012)는 CV의 통행시간 정보를 활용하여 도착 교통류율, 지체, 적색시간 변화에 따른 지체 변화량을 산정하기 위한 모형을 정립하였다. 교차로 지체 최소화를 위한 현시별 적색시간 변화량 결정을 통해 통행시간기반 신호제어 알고리즘을 개발 평가함으로써 지체 최소화를 위한 신호시간이 산정됨을 확인하였으며 CV 차량의 비율에 따라 이동류의 지체추정 성능이 개선되었다. 또한 CV가 실제 도입될 경우 효과적 신호제어가 가능함을 확인하였다.

Goodall et al.(2013)의 연구에서는 CV에서 수집된 정보를 활용하여 Rolling Horizon 알고리즘을 적용하여 현시를 할당하고 이때 차량 위치를 짧은 간격으로 추정하여 군집 이동 및 대기시간을 측정하였다. 미래 15초 간격으로 목적 함수를 최적화 하여 현시를 할당하는 것이 특징이며 목적 함수는 지체 또는 정지 수, 가속도 등과의 조합으로 결정하였다. 분석결과, 일반적인 감응신호제어보다 성능이 좋게 나오지만 포화 및 과포화

상태에서는 높은 수준으로 신호제어를 하지 못해 만족할 만한 결과를 얻기 힘들었다. 또한 개발된 알고리즘에서 CV 시장점유율 변화와 관련하여 평가한 결과 50%일 때 지체 및 정지 수 측면에서 결과가 좋았으나, 50% 미만일 때는 일반 차량의 비율이 증가함에 따라 기존의 신호시스템이 더 나은 효과가 나타났다.

Lee et al.(2014)는 충격파이론을 통해 CV의 통행시간 정보를 활용하여 접근로의 대기행렬 길이를 예측 하였다. 이를 활용하여 단일 교차로의 전체적인 대기행렬길이의 합이 최소가 되는 신호제어 모형의 개발 및 효과평가를 실시한 결과 교차로의 대기행렬길이의 합이 최소가 되는 신호제어가 가능함을 확인하였다.

Feng et al.(2015)의 연구에서는 CV로부터 수집된 자료를 기반으로 실시간 감응 교통 제어 알고리즘을 제시하였다. 신호현시를 할당하는 알고리즘은 신호현시의 순서 및 길이를 배정하는 데 사용하였다. 신호최적화 알고리즘은 upper level과 lower level로 구분하였고, upper level은 다시 forward recursion과 backward recursion으로 구성하였다. 이 알고리즘은 신호 최적화의 목적함수를 총 차량지체 최소화과 대기길이 최소화 두 가지로 선정하였다. 도착정보를 추정하는 데 사용되는 알고리즘은 EVLS(Estimation of Location and Speed) 알고리즘을 적용하였다. 분석 결과 CV의 시장점유율이 100%인 경우 총 지체와 대기길이가 각각 감소함을 알 수 있었고, 시장점유율이 최소 50%이상이어야만 알고리즘이 효과적으로 작동하며 수요가 많은 경우에는 CV가 증가하여 알고리즘의 오류가 감소하는 것으로 확인하였다.

## 2. 기존 연구와의 차이점

기존 교통신호 최적화 연구들이 대부분 교통신호 제어를 위하여 지점 정보인 교통량, 포화도 등을 기반으로 교통신호 제어 변수를 산출하고 있다. 최근 들어 검지시스템의 발전에 따라 구간정보인 통행시간 등을 이용하여 교통신호 제어의 효율성을 높이려고 하고 있다. 또한 검지된 교통상황 변수를 통해 지체, 정지 수 최소화, 통과교통량 최대화 및 그 조합을 기반으로 하는 목적함수를 설정하여 최적화를 수행하였기 때문에 대부분의 시스템이 교통신호 제어 변수를 산출하는 것이 아니라 기존의 교통신호 제어 변수를 교통상황에 반영하여 일부 조정하는 방법을 통해 최적화를 달성하였다. 이에 비해, 본 연구에서는 차량의 경로정보를 활용한 감응식 교통 제어 알고리즘을 개발하였으며, 연구 결과로 안전성, 이동성, 환경 측면에서 V2X를 활용한 신호 제어 방식이 활용가능성이 높다고 제시하고 있다. 기존의 연구들은 대부분 CV를 대상으로 수행돼왔다. 하지만, 최근에는 자율협력주행차량(connected automated vehicle, 이하 CAV)의 도입을 가정하여 유사한 연구들이 많이 진행되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 아직까지는 CAV의 운전 특성을 충분히 반영하는 데 한계가 있어 충분한 연구결과가 도출되지는 못하고 있는 것으로 확인되었다. 하지만 대부분의 연구가 단일교차로에 집중되어 있으며, 연동신호교차로에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 연구의 공간적 범위를 단일교차로가 아닌, 연동신호교차로로 확장하고자 한다.

## III. 연동신호교차로 교통신호 최적 제어 알고리즘 개발

### 1. 알고리즘의 구성

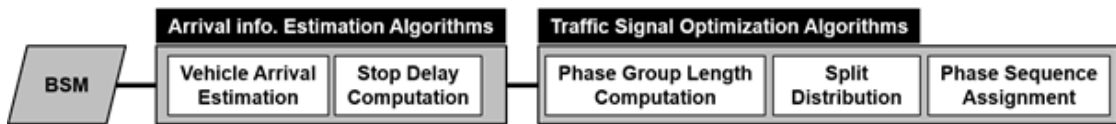
본 연구에서 개발한 연동신호교차로 교통신호 최적 제어 알고리즘은 V2I 통신환경에서의 교차로 접근로 공간에 진입하는 각 CV로부터 수집되는 차량 정보를 이용한다. 이 차량 정보는 미국 자동차 공학회(SAE)에서 차량간 통신 기반 안전서비스에서 사용되는 필수 데이터 항목들을 SAE DSRC J2735의 표준 형태로 제정한 BSM(Basic Safety Message)을 기반으로 한다. BSM에는 수집공간에서 개별차량에게 부여한 ID, 수집 시각,

차량 위치, 속도, 이동 방향, 가속도, 차량 길이 정보를 포함하고 있다. 하지만 BSM 정보에는 차량 경로 정보가 포함되어 있지 않다. 미국교통안전국에서는 차량 경로 정보를 개인 정보 보호를 위해 지켜야 할 보안사항으로 미교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)에서는 규정하고 있기 때문에 본 연구에서는 사용하지 않는 것으로 정의하였다(Han et al., 2016). BSM의 전달방식은 도로 주변에 설치되어 있는 RSE와 차량에 설치되어 있는 OBE간의 V2I 통신으로 전달받게 된다. 본 연구에서는 RSE와 OBE사이의 통신 성공률에 대한 별도의 고려는 하지 않았다(Han, 2016).

<Table 1> Description of BSM set

| Basic Description |  |
|-------------------|--|
| · Message         | Sequence Number                          |
| · Temporary       | ID                                       |
| · Time            |  |
| · Position        | Latitude, Longitude, Elevation, Accuracy |
| · Vehicle         | Speed, Heading                           |
| · Vehicle         | Acceleration                             |
| · Vehicle         | Length                                   |

본 연구에서 개발된 알고리즘은 크게 V2I 통신을 이용하여 차량의 도착 정보를 추정하는 알고리즘과 교통신호를 배정하는 알고리즘으로 구성되어 있다. 개발 모형의 알고리즘 구성은 다음 <Fig. 1>과 같다(Han, 2016).



<Fig. 1> Algorithm Configuration

도착 정보 추정에서는 차량이 언제 정지선 혹은 대기행렬에 도착하는지 예측하기 위하여 매초마다 차량의 현재 속도와 남은거리, 대기행렬 길이를 계산하게 된다. 이를 이용하여 차량 도착 테이블을 작성하게 되며 기존의 독립신호교차로 신호제어 알고리즘과 다르게 이전 교차로에 대기하고 있는 차량의 정보 또한 포함하게 된다(Han et al., 2016). 차량 도착 테이블을 이용하여 네트워크를 평가할 수 있는 MOE인 정지지체를 산출하는 테이블로 구성한다. 최적 신호 배정 알고리즘에서는 앞서 계산된 도착 정보와 정지지체 정보를 이용하여 해당 교차로의 현시그룹 길이, 현시 길이, 현시 순서를 산출한다. 산출된 신호 변수는 감응식 제어를 이용하여 연속교차로를 운영하게 된다.

## 2. 차량도착정보 추정알고리즘

차량 도착정보 추정 알고리즘은 교통신호 최적화 알고리즘의 입력변수를 산출하는 알고리즘이다. <Fig. 1> 개발 모형 알고리즘 구성과 같이 차량 도착정보 추정 알고리즘은 차량 도착정보 추정 모듈과 정지지체 산출 모듈로 구성된다. 차량 도착정보 추정 모듈에서는 수집자료인 BSM 데이터의 차량 ID, 속도, 접근방향, 위치 정보를 이용하여 차량 도착에 대한 테이블을 작성하게 되며, 다음의 절차를 통해서 수행 된다.

첫 번째 과정은 BSM 데이터의 가공을 통한 개별차량의 주행 차로 산출이다. 위치정보(x좌표, y좌표)를 이

용하여 개별차량의 주행차로를 산출하기 위해서는 교차로 기하구조 데이터와의 비교 과정이 필요하다. 이 과정에서 실제 환경에서는 GPS 오차로 인해 주행 차로 정보 산출에 대한 오차가 발생하게 된다. 하지만, 본 연구에서는 시뮬레이션 기반 분석이므로 오차가 없는 것으로 가정하였다. 두 번째 과정은 개별차량이 주행 중인 차로의 정지선까지 남은 거리를 계산하는 과정이다. 교차로 진입로의 시작지점을 0, 정지선을 총 링크 길이로 고정하여 x좌표의 이동에 따라 남은 거리를 산출한다. 세 번째 과정은 i차량이 주행 중인 차로의 대기행렬길이를 계산하는 과정이다. 대기행렬길이는 링크길이에서 마지막으로 도착한 차량의 위치를 제할 경우 산출가능하다. 하지만, 돌발 상황 등으로 “정지”차량이 링크 중간에 존재하는 경우가 발생하므로 속도가 0인 차량들의 길이 합을 이용하여 제약조건을 설정하였다. 네 번째 과정에서는 i차량이 주행 중인 차로를 기반으로 다음 진입교차로에 대한 정보를 추가하는 것이다. 마지막 과정에서는 i차량이 정지선이나 대기행렬 뒤에 도착할 시간 테이블을 작성한다. 차량 도착 테이블은 아래 식(1), (2)를 이용하여 매초마다 작성되며 연속교차로의 차량 도착 테이블은 독립교차로에서의 차량 도착 테이블에 이전 교차로의 신호를 반영한 차량이 추가적으로 반영이 된다(Han, 2016).

$$AT_{i(Current)} = \frac{DR_i^{j_2,k} - QL^{j_2,k}}{v_i} \tag{1}$$

$$AT_{i(Previous)} = \frac{IL^{j_1,j_2} + L^{j_2,k} + QL_i^{j_1,k} - QL^{j_2,k}}{v_{sl}^{j_2}} + RT_i + 1.67 \tag{2}$$

where,

$AT_i$  = Arrival time of vehicle i on stop-line or the tail of the queue(sec)

$v_i$  = Current speed of vehicle i(m/s)

$v_{sl}^{j_2}$  = speed limit at link  $j_2$ (m/s)

$DR_i^{j,k}$  = Remained distance of vehicle i at k lane in j link(m)

$QL_i^{j,k}$  = Queue length of vehicle i at k lane, j link(m)

$IL^{j_1,j_2}$  = Distance between link  $j_1$  and link  $j_2$ (m)

$L^{j_2,k}$  = Total distance at link  $j_2$  and lane  $k$ (m)

$RT_i$  = Remained red time of vehicle i

1.67 = Average start-up loss time

식(2)에서 RT(remained red time of vehicle i)는 현재 교차로에서 다음 교차로로 진행하기 위한 신호시간으로 할 수 있다. 현재 신호가 녹색시간이라면 RT는 0초가 되며 다음 녹색신호시간까지 남은 시간이 60초라면 RT는 60초가 된다.

연속교차로에서도 차량 도착 테이블 작성 방식에서도 단점은 존재한다. 차량의 현재위치의 차선을 이용하여 다음 경로를 예측하는 것이다. 이는 BSM set의 정보에 경로정보가 없기 때문에 단순히 차선의 위치로 다음 경로를 예측하게 된다. 이러한 문제는 공용차로에서 발생하게 된다. 직진 및 좌회전 공용차선이나 직진 및 우회전 공용차선의 경우 어느 경로로 진행할지에 대한 추정이 필요하다. 공용좌회전 차선의 경우 신호 배분을 위하여 직진 및 좌회전 회전비율을 적용하였으나, 공용우회전 차선의 경우 전부 직진으로 가정하여 연구를 수행하였다. 이러한 가정은 CV의 시장 점유율이 높아질수록 개선될 것으로 기대된다.

정지지체 테이블 작성 과정에서는 차량 도착 테이블을 이용하여 각 접근로 혹은 진행방향의 정지지체를

계산하게 된다. 정지지체는 차량이 신호 혹은 다른 차량으로 인해 정지함으로 생기는 지체를 의미한다. 따라서 현재 접근로에 정지하고 있는 차량이 몇 대인지 앞으로 몇 초 뒤에 몇 대의 차량이 정지하고 있을지에 대한 정보를 차량 도착 테이블과 식(3)을 이용하여 계산하게 된다. 정지지체 산출 후 차량 도착테이블과 정지지체 테이블을 이용하여 신호 최적제어 알고리즘을 구현할 변수인 현시그룹 길이, 현시 길이, 현시 순서를 결정하게 된다(Han, 2016).

$$SD^{j,k,s} = \sum_{t=0}^{180} n_t^{j,k,s} \tag{3}$$

where,

$SD_{60}^{j,k}$  = Total stopped delay for 60 seconds of k lane, j link

t = Time(sec), t=0 means the present

$n_t^{j,k}$  = Number of total waiting vehicles at time t of k lane, j link

### 3. 연속교차로 신호최적화 알고리즘

신호최적화 알고리즘은 최적 현시 그룹 길이 산출, 신호 현시 분할, 현시 순서 배정으로 구성된다. 먼저, 최적 현시 그룹 길이 산출에서는 각 현시 그룹의 지체를 최소로 하는 최대 녹색시간 값을 구하는 것을 목표로 한다. Webster의 연구에서는 최적주기 산출을 위하여 각 그룹이나 접근로별로 그룹길이를 산출해서 주기를 산출하는 방법을 제시하고 있다(Webster, 1958). 최적 현시 그룹 길이는 Webster가 제안한 방법과 현시 그룹내의 현시별 최소녹색시간 합 중 큰 값을 사용한다. Webster 방법의 포화교통류율의 합은 사전 조사된 교통량을 이용하지만 개발 알고리즘은 매 주기의 산출 교통량을 이용한다(Han, 2016).

$$X_g^{max} = \max(C_{min}^{p_2} + C_{min}^{p_6}, \frac{1.5 \times L_g + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_i}) \tag{4}$$

where,

$X^{max_g}$  = Optimal length of phase group g

p = Phase sequence number of NEMA phase

$C_{min}^p$  = Minimum green time of phase number p

$x_g^{max}$  = Maximum allowance time of group g

$L_g$  = Total lost time of group g

$\sum_{i=1}^n y_g$  = Summation of saturation flow rate for group g

신호 현시 분할은 현시별 길이(phase length)를 할당해주는 기능을 수행한다. 개발 알고리즘의 신호현시 분할은 NEMA phase에 따른 링(ring)의 직진과 좌회전 교통량의 비로 신호현시를 분할하는 비례법을 적용하였다. 앞서 계산된 현시 그룹 길이를 이용하여 각 phase별 길이를 산출할 수 있다. 차량 도착 테이블과 60초 동안 도착할 교통량을 이용하여 좌회전과 직진의 녹색시간 비율을 결정하게 된다. 따라서 직진 현시 길이를 계산하고 현시 그룹 길이에서 직진 현시 길이를 빼면 좌회전의 현시 길이가 계산 된다. 각 phase의 길이는 다음 식 (5)를 이용하여 계산한다(Han, 2016).



$$G_{\max}^T = \max \left[ G_{\min}^T, \left( X_g^{\max} \times \frac{\frac{n_s^T + n_{bs}^T}{n_t^T}}{\frac{n_s^T + n_{bs}^T}{n_t^T} + \frac{n_s^L + n_{bs}^L}{n_t^L}} \right) \right] \quad (5)$$

where,

$X_g^{\max}$  = Optimal length of phase group g

$G_{\max}^T$  = Maximum through phase green time of NEMA phase ring combination

$G_{\min}^T$  = Minimum through phase green time of NEMA phase ring combination

$N_{s,bs}^T$  = 30 seconds expected traffic volume of NEMA phase ring combination

$N_t^{T,L}$  = Number of the through and left lanes of NEMA phase ring combination

앞서 언급한 것과 같이 도착시간과 대기행렬 길이의 추정이 가능하다. 이를 기반으로 산출된 현시 그룹 길이와 현시 길이를 이용하여 현시 순서 변경에 따른 정지지체를 산출할 수 있다. 따라서 각 현시의 최대녹색시간 동안의 정지지체를 이용하여 다음과 같이 현시 순서를 결정하게 된다. 각 phase의 순서는 다음 식(6)을 이용하여 계산한다. phase의 순서는 그룹번호와 링 번호에 귀속되기 때문에 phase(1, 2), phase(5, 6), phase(3, 4), phase(7, 8)끼리 계산하게 된다. 현시 그룹 길이 안에서 해당 링의 직진 및 좌회전의 예측 교통량을 이용하여 각 phase의 현시 길이를 계산한다. 이후 각 phase의 최대녹색시간동안 생기는 정지지체를 매초 간격으로 계산하여 현시 순서를 결정하게 된다(Han, 2016).

$$\begin{aligned} \text{first phase } T &= \sum_{t=0}^{G_{\max}^T} SD_t^L + \sum_{X_g^{\max} - G_{\max}^T}^{X_g^{\max}} SD_t^T + [1.63 \times (n_{t=0}^T + n_{t=G_{\max}^T}^T)] \\ \text{first phase } L &= \sum_{t=0}^{G_{\max}^L} SD_t^T + \sum_{X_g^{\max} - G_{\max}^L}^{X_g^{\max}} SD_t^L + [1.63 \times (n_{t=0}^L + n_{t=G_{\max}^L}^L)] \\ \text{Min}(\text{first phase } T, \text{first phase } L) & \end{aligned} \quad (6)$$

where,

$SD_t^L$  = Stopped time day of time t

$n_{t=0}^T$  = Number of stopped vehicle for through direction at present

1.63 = Average departure lost time

이렇게 계산된 값 중 낮은 값을 가진 방법이 현시 순서가 먼저 제공할 수 있도록 운영된다. 이러한 방식 또한 앞으로 차량이 언제 도착하는지 알 수 있기 때문에 정지지체를 최소화 하는 신호 현시 순서 결정을 할 수 있게 된다.

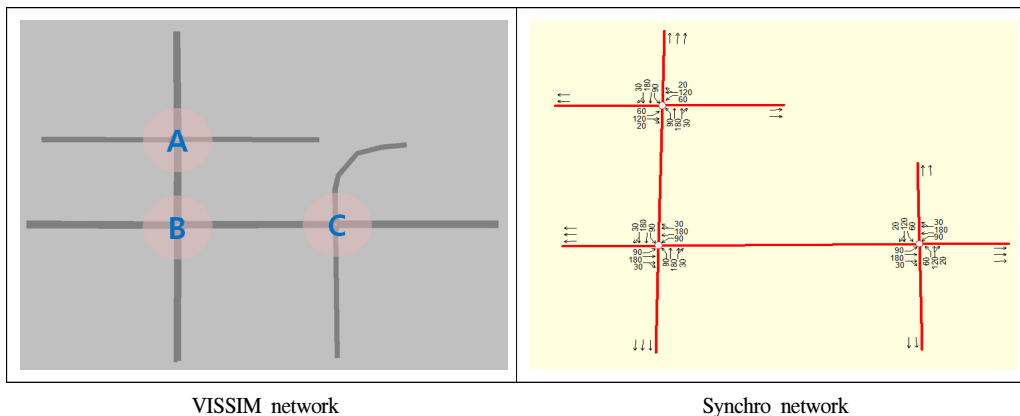
## IV. 시뮬레이션 환경에서의 알고리즘 평가

### 1. 시뮬레이션 분석 개요

본 연구에서 개발된 V2I 통신환경을 활용한 연동교차로 교통신호 실시간 제어 알고리즘을 평가하기 위하여 미시교통 시뮬레이션을 이용하였다. 현재 V2I 통신환경이 도입되지 않아 교차로 현장에 적용하는데 한계

가 존재한다. 따라서 다양한 신호운영의 적용이 가능하고, 이동성과 안전성 분석이 가능한 자료를 생성할 수 있는 미시교통시물레이션 툴인 Vissim ver. 9.0을 사용하였다. 시물레이션 시간은 1시간을 사용하였으며, 네트워크를 채우기 위한 초기 시간(warm-up time)은 15분을 사용하였다. 각 시나리오는 5번씩 반복 수행하였으며, 각 반복수행의 평균값을 실험 결과로 사용하였다.

시물레이션 분석은 크게 두 가지로 구분하여 수행하였다. 첫째, V2I 통신환경을 활용한 연동교차로 교통신호 실시간 제어 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 기존 신호제어방식인 정주기식 연동 제어와 운영성능을 비교하였다. 둘째, V2I 통신 가능 차량의 점유율 변동에 따른 V2I 통신환경을 활용한 연동교차로 교통신호 실시간 제어 알고리즘의 성능을 비교하였다. 시물레이션 분석을 위하여 편도 3차로로 구성된 가상의 3개의 교차로를 ‘L’ 모형의 네트워크로 구성하였다. 차로 이용은 좌회전, 직진, 우회전을 개별적으로 구성하였으며 각 방향별 접근로가 동일한 기하구조를 가지고 있다. 정주기식 연동 제어 방식에 필요한 제어변수(주기 길이, 녹색신호시간, 오프셋 등)는 신호최적화 프로그램인 Synchro ver. 6.0로 산출하였다. 또한, V2I 환경에서 데이터 수집을 모사하기 위해 COM Interface를 통해 추출된 개별 차량 자료를 기반, V2I 통신환경을 활용한 연동교차로 교통신호 실시간 제어 알고리즘을 통해 신호제어 변수를 산출하여 시물레이션에 입력하는 구조로 구성하였다.



(Fig. 2) Example of simulation network

## 2. 알고리즘 평가

기존의 신호제어 비교를 위해 네트워크의 서비스수준(level of service, LOS) 변동을 통해 다양한 교통상황에서 비교할 수 있도록 시나리오를 구성하였다. 분석을 위한 효과척도는 네트워크 평균 제어지체, 평균 정지지체, 평균 정지횟수, 평균 속도 등이다. 시물레이션 분석 결과 <Table 2>와 같이 V2I 통신환경을 활용한 연동교차로 교통신호 실시간 제어 알고리즘이 교통량 변화가 존재하는 환경에서 지체가 감소하는 것으로 분석되었다.

정주기식 연동 제어에 비해 V2I 통신환경을 활용한 연동교차로 교통신호 실시간 제어 알고리즘의 차이는 고정 주기의 사용과 가변 현시 길이 및 현시 순서의 실시간 변화에 의해 발생하는 것으로 판단된다. V2I 통신환경을 활용한 연동교차로 교통신호 실시간 제어 알고리즘에서는 예측된 직진, 좌회전 등 교통량에 따라 현시 길이 및 순서를 바꾸기 때문에 좀 더 정확하고 효율적인 신호제어가 가능하다.

<Table 2> Vissim Simulation Results

| LOSs | Algorithms                  | Average Delays (sec) | Average Stop Delays (sec) | Average Number of Stops(number) | Average Speeds (km/h) |
|------|-----------------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| A    | Coordinated fixed           | 26.72                | 19.33                     | 0.97                            | 36.15                 |
|      | Real-time control using V2I | 26.11                | 18.21                     | 0.90                            | 37.13                 |
| C    | Coordinated fixed           | 41.55                | 30.26                     | 1.18                            | 31.97                 |
|      | Real-time control using V2I | 40.77                | 28.72                     | 1.11                            | 32.14                 |
| F    | Coordinated fixed           | 95.76                | 70.64                     | 1.60                            | 21.27                 |
|      | Real-time control using V2I | 89.64                | 68.36                     | 1.51                            | 21.43                 |

Vissim을 이용한 이동성 분석 결과는 <Table 2>와 같다. 자세히 살펴보면, 접근로 교통량의 서비스수준 A에서는 V2I 통신환경을 활용한 연동교차로 교통신호 실시간 제어 알고리즘의 평균 제어지체가 26.11초로 나타났으며, 서비스수준 C에서는 40.77초, F에서는 89.64초로 분석되었다. 이에 반해, 기존 정주기식 연동 제어 알고리즘을 이용할 경우, 각각 26.72초, 41.55초, 95.76초로 나타났다. 본 연구에서 개발한 V2I 통신환경을 활용한 연동교차로 교통신호 실시간 제어 알고리즘 적용 시 시장점유율이 100%에서는 교차로 지체가 낮게 나타나 알고리즘의 효과가 있는 것으로 분석되었다.

<Table 3> Simulation Result of V2I Market Penetration

| LOSs | Market Penetrations | Average Delays (sec) | Average Stop Delays (sec) | Average Number of Stops (number) | Average Speeds (km/h) |
|------|---------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| A    | 100%                | 26.11                | 18.21                     | 0.90                             | 37.13                 |
|      | 75%                 | 26.35                | 18.44                     | 0.91                             | 36.81                 |
|      | 50%                 | 30.23                | 22.47                     | 0.96                             | 35.98                 |
|      | 25%                 | 40.87                | 30.50                     | 1.06                             | 35.03                 |
| C    | 100%                | 40.77                | 28.72                     | 1.11                             | 32.14                 |
|      | 75%                 | 51.99                | 38.37                     | 1.23                             | 31.60                 |
|      | 50%                 | 61.26                | 44.08                     | 1.46                             | 28.41                 |
|      | 25%                 | 63.98                | 45.46                     | 1.48                             | 27.64                 |
| F    | 100%                | 89.64                | 68.36                     | 1.51                             | 21.43                 |
|      | 75%                 | 91.48                | 70.47                     | 1.56                             | 21.40                 |
|      | 50%                 | 126.47               | 91.64                     | 2.56                             | 17.74                 |
|      | 25%                 | 147.95               | 106.72                    | 3.02                             | 16.31                 |

개발된 알고리즘이 V2X 시장점유율에 따라 도입 시기를 판단하기 위하여 시장점유율 변화를 적용하여 결과를 살펴보면 다음과 같이 나타났다. <Table 3>에서 보인 바와 같이 평균 제어지체의 경우 입력 교통량 서비스 수준 A에서는 100% 및 75%의 통신환경에서 정주기식 연동 제어보다 지체가 낮았으며, C에서는 100% 통신환경에서만 좋은 효과를 나타내는 것으로 나타났다. 서비스수준 F에서는 차량점유율이 75% 이상일 때 효과를 보이는 것으로 분석되었다. 이는 본 연구에서 개발한 알고리즘이 수집된 정보의 양에 의해 효과가 낮아지는 것으로 판단된다.

## V. 결 론

본 연구에서는 도시지역 신호교차로에서 발생하는 지체를 최소화하기 위해 V2I 통신환경에서 개별차량 기반 수집 데이터를 활용하여 연동교차로의 신호최적화 알고리즘을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 정주기식 연동 제어의 구성은 V2I 통신환경에서 수집되는 교통정보인 차량의 위치와 속도를 이용하여 차량의 도착 정보를 추정하는 부분과 현시 그룹 길이, 현시 길이, 현시 순서 등을 결정하는 부분으로 구분된다. 개발 알고리즘의 효과 평가를 위하여 미시교통시뮬레이션을 이용한 실험을 실시하였다. 서비스 수준별 환경에서 정주기식 연동신호제어에 비해 개발 알고리즘이 효율적인 것으로 나타났다. 본 연구에서는 CV의 시장점유율을 변경하여 알고리즘 도입을 위한 최소한의 교통정보 수집 비율을 확인한 결과 정주기식 신호제어와 비교 시 최소 75%의 차량으로부터 교통정보를 수집할 경우 개발 알고리즘의 적용이 가능할 것으로 분석되었다.

V2I 통신환경에서 개발한 신호제어 알고리즘의 도입은 먼 미래의 일이 아니며 급변하는 기술의 발달을 대비하는 신호제어 방법은 꾸준히 연구가 진행되어야 한다. 본 연구에서 제시되는 결과는 비록 낮은 시장점유율에서는 좋은 결과를 얻지 못하였지만, 이러한 연구를 바탕으로 연속교차로 및 네트워크 전체를 제어하는 연구가 진행될 것으로 기대된다.

본 연구의 다양한 도로·교통 환경을 고려하여 BSM을 이용한 연속교차로에 실시간 신호제어 알고리즘을 개발하였지만, 다음과 같은 한계를 가지고 있다. 첫째, V2I 통신환경에서 수집되는 차량 정보 중 해당 교차로에서 차량이 우회전할지 또는 좌회전할지와 같은 차량의 경로정보를 보안상의 이유로 사용하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 차량의 이용 차로를 기준으로 전용차로의 경우 해당 방향으로 추정하였으며, 공용차로의 경우 이전 주기의 회전비율에 따라 랜덤으로 회전비율을 부여하였다. 이러한 방식은 신호제어 시 차량의 도착시간 예측 및 교통량의 오차를 발생시킬 수밖에 없는 한계가 존재한다. 따라서 이러한 오차를 극복할 수 있는 다양한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

둘째, 현재 V2I 통신차량을 이용하여 알고리즘을 평가할 수 있는 환경이 구축되어 있지 않다. 따라서 개발 알고리즘의 효과를 시뮬레이션에 국한하여 평가하였다는 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하고자 다양한 실험 네트워크 시나리오를 설정하였으며, 다양한 교통 환경을 구성하여 분석을 실시하였다. 또한 실제 네트워크에서 정산 과정을 통한 분석을 실시하였으나 여전히 시뮬레이션의 근본적인 한계는 존재한다. 따라서 시뮬레이션이 아닌 현장 적용을 통한 알고리즘의 효과분석이 필요한 것으로 판단된다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 국토교통기술사업화지원의 연구비지원(15TLRP-C105654-01)에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Cheng Y., Qin X., Jin J., Ran B. and Anderson J.(2011), "Cycle-by-cycle queue length estimation for signalized intersections using sampled trajectory data," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2257, pp.87-94.
- Do C.(1989), *Principle of Transportation Engineering*, Cheongmoongak, pp.447-453.
- Feng Y., Head K. L., Khoshmashgham S. and Zamanipour M.(2015), "A Real-time Adaptive Signal Control in a Connected Vehicle Environment," *Transportation Research Part C: Emerging*

- Technologies*, vol. 55, pp.460-473.
- Gartner N. H., Little J. D. C. and Gabbay H.(1975), "Optimization of traffic signal settings by mixed-integer linear programming: Part i: The network coordination problem," *Transportation Science*, vol. 9, no. 4, pp.321-343.
- Goodall N., Smith B. and Park B.(2013), "Traffic Signal Control with Connected Vehicles," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2381, pp.65-72.
- Han E.(2016), *Development of Signal Control Methodology for Isolated Intersections Using BSM information Based on V2I*, Ph.D. Dissertation, Ajou University.
- Han E., Park S. M., Jung H. R., Lee C. K. and Yun I.(2016), "The Development of an Algorithm for the Optimal Signal Control for Isolated Intersections under V2X Communication Environment," *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 10, no. 6, pp.90-101.
- Jeong Y. J. and Kim Y. C.(2011), "Real-Time Traffic Signal Control Algorithm based on Sectorial Travel Time Individual Intersection," *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, pp.93-96.
- Joo W.(2017), *Urgent Discussion for the Normalization of SOC Investments*.
- Kattan L., Moussavi M., Far B., Harschnitz C., Radmanesh A. and Saidi S.(2010), "Evaluating the potential benefits of vehicle to vehicle communication (V2V) under incident conditions in the PARAMICS model," In *Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation*, Madeira, Portugal vol. 9.
- Roess R. P., Prassas E. S. and McShane W. R.(2010), *Traffic Engineering*, 4ed, Pearson.
- Webster F. V.(1958), "Traffic signal settings," *Road Research Technical Paper*, pp.1-44.