한국ITS학회논문지
J. Korea Inst. Intell. Transp. Syst.
15(6) : 90~101 (2016)
ⓒ 2016. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.
ISSN 1738-0774(Print), ISSN 2384-1729(On-line)
DOI https://doi.org/10.12815/kits.2016.15.6.090

V2X 통신환경에서의 독립교차로 신호 최적제어 알고리즘 개발 연구

The Development of an Algorithm for the Optimal Signal Control for Isolated Intersections under V2X Communication Environment

한 음*	박 상 민**	정 하 림***	이 철 기****	윤 일 수*****
(Eum Han)	(Sangmin Park)	(Harim Jeong)	(Chulki Lee)	(Ilsoo Yun)
(Ajou University)	(Ajou University)	(Ajou University)	(Ajou University)	(Ajou University)

요 약

본 연구에서는 V2X 통신환경 하에서 개별 차량 기반 수집 데이터를 활용하여 독립교차로의 실시간 교통상황대응 최적 교통신호 제어 알고리즘을 개발하였다. 매초 간격으로 V2X 통신환경에서 수집되는 정보를 이용하여 주기, 현시, 현시 순서를 결정하는 알고리즘과 이 알고리즘 안에서 감응식 신호를 적용하여 독립신호 교차로의 신호 최적제어를 실시하였다. 최적화된 신호시간과 본 연구에서 개발된 알고리즘을 활용한 신호제어 성능을 비교하면 전제적으로 평균 지체, 평균 정지지체, 정지횟수, 평균속도가 개선되었음을 나타나고 있으며, 개선 폭이 교통량이 많아질수록 커지는 것으로 분석되었다. 또한 시장점유율에 따른 도입 시기 평가 결과, 평균 지체의 경우 교통량이 500대의 경우 시장점유율이 50% 이하로 내려가면 본 연구에서 개발된 알고리즘이 기존 신호알고리즘보다 높은 지체를 보였으나, 교통량이 1,000대일 경우 시장점유율 25% 이하에서 지체가 높아졌다. 하지만 1,500대일 경우 시장점유율에 25%에 불과해도 기존의 신호제어 알고리즘보다 지체가 낮아지는 것으로 분석되었다.

핵심어 : 신호최적화, 독립교차로, 자율주행자동차, V2X

ABSTRACT

This study was initiated to develop an algorithm for traffic condition adaptive optimal traffic signal control for isolated intersections based on the vehicle trajectory data. The algorithm determines the optimal cycle length, phase lengths, phase sequences using the data collected under V2X communication environment every second. In addition, the algorithm utilizes a traditional feature of the actuated signal control, gap-out, using traditional detector systems to consider the mixture of normal vehicles and vehicles equipped with the V2X communication function. The performance of the algorithm was compared with that of the fixed signal timing plan which was optimized with Synchro under a microscopic traffic simulation-based test bed. As a result, the overall performance, including average delay, average stop delay, the number of stops, and average speed, are improved apparently. In addition, the amount of improvement get bigger as the traffic volume in the intersection as well as the number of vehicles equipped with the V2X communication function increase.

Key words : optimal signal control, isolated intersection, autonomous vehicle, V2X

† 본 연구는 국토교통부 국토교통기술사업화지원의 연구비지원(15TLRP-C105654-01)에 의해 수행되었습니다.
* 주저자 : 아주대학교 건설교통공학과 석박사 통합과정
** 공저자 : 아주대학교 건설교통공학과 박사 과정
*** 공저자 : 아주대학교 건설교통공학과 석사 과정
**** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수
***** 교신저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 부교수
† Corresponding author : Ilsoo Yun(Ajou University), E-mail ilsooyun@ajou.ac.kr
† Received 4 October 2016; reviewed 17 October 2016; Accepted 24 October 2016

Ⅰ. 서 론

1. 배경 및 필요성

전 세계적으로 도시지역 도로의 교통 처리 용량이 한계에 도달하였으며, 교통 혼잡이 일상화되어 막대한 규모의 경제적 손실 발생하고 있다. 국내의 7대 대도시에서 발생한 교통혼잡비용은 2012년 기준 19조원으로 전체 교통혼잡비용의 63.3%를 차지하는 것으로 분석되었다[1]. 이러한 도시지역 도로의 교통 혼잡을 해결하기 위해 도로의 신설·확장 등의 용량 증대가 분명히 필요하나, 용량 증대를 위해서는 막대한 투자재원과 시간이 소요되기 때문에 실질적으로 교통혼잡을 해결하는 데 한계가 존재한다. 따라서 도심지 교통 혼잡을 줄이기 위하여 기존 교통운영 및 관리 시스템의 개선대책이 필요하다.

또한, 일명 구글카를 시작으로 자율주행 자동차(autonomous vehicle)의 시대가 다가오고 있으며, 자율주행 자동차의 도입으로 도시지역에서 악화되는 혼잡 문제와 안전문제에 대한 해결방안으로 기대하고 있다. 이미 글로벌 자동차 업체 및 IT 업체들은 자율주행 자동차 기술 개발이 끝나고 시장에 내놓기 위한 법제도 개선 및 차량의 안전성 평가를 진행 중에 있으며, 국내에서는 자율주행 자동차와 관련한 제도 정비, 인프라 확충 등을 통해 2020년 상용화 될 것으로 예상하고 있다. 따라서 자율주행 자동차의 도입은 기정사실이 되었으며 자율주행 자동차 도입에 대비한 새로운 신호제어 방식 또한 필요한 실정이다.

기존의 우리나라 신호 제어 전략으로서 루프 검지기에서 수집된 자료를 이용한 수요 대응형 신호제어(traffic responsive control) 방식인 COSMOS가 활용된 적이 있지만, 현재에는 교통량 조사자료에 기반하는 TOD(Time of Day)에 따른 정주기식 신호운영(fixed time signal control)이 대부분이고, 최근에 루프/영상 검지기 기반 감응식 신호 운용(actuated signal control)이 도심지 및 국도에서 일부 운영되고 있다. 하지만, 이러한 기존의 신호시스템으로는 도심지 교통혼잡을 줄이고 또한 자율주행 자동차의 도입에 따른 교통환경 변화에 적용할 수 없다. 이러한 문제를 보완하고자 해외에서는 도심지 교차로 내에서 V2V(Vehicle-to-Vehicle) 서비스 연구가 활발하였으나 국내에서는 이제 막 시작하는 단계이다.

또한 V2V를 넘어서 V2X(Vehicle-to-Everything) 통신기술이 주목을 받고 있다. V2X란 차량과 도로 간 통신(Vehicle-to- Infrastructure) 및 차량과 차량 간 통신(V2V)을 의미하며, 차량이 주행하면서 도로인프라 및 다른 차량과 지속적으로 정보를 주고받는 기술이다. V2X는 차량 내 장치인 OBU(on board unit)와 도로에 설치된 RSE(roadside equipment)가 DSRC (dedicated short-range communications)통신을 통해 BSM(basic safety message)을 주고받는다[2]. 개별 차량에서 생산되는 BSM에는 해당 차량의 실시간 위치, 속도, 방향 등의 정보가 포함되어 있기 때문에 차량의 경로 데이터를 실시간으로 확인이 가능하다. 하지만 미국에서는 V2X 통신이 가능한 차량이 95%까지 도달하는데 최소 25년이 소요될 것이고 예측하였다[3].

V2X 통신이 가능한 차량이 보급이 되면 도심지 혼잡해소를 위한 새로운 데이터 생성이 가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 도시지역 신호교차로에서 발생하는 지체를 최소화하기 위해 V2X 환경하에서 개별차량 기반 수집 데이터를 활용하여 독립교차로(isolated intersection)의 실시간 교통상황대응 최적 제어 알고리즘 개발을 하였다. 또한 개발된 알고리즘을 평가하기 위하여 미시교통시뮬레이션 모델인 VISSIM을 이용하여 기존 신호체계에서의 지체 결과와 V2X 환경에서 개발된 알고리즘의 결과를 비교하였다. 마지막으로 V2X 통신이 가능한 차량이 점차 증가함에 따라 개발된 알고리즘의 효과가 나타나는 시나리오를 설정하여 개발된 알고리즘의 도입 시기를 평가하였다.

2. 연구 방법론

본 연구에서는 V2X 환경에서 수집되는 교통정보인 차량의 위치, 차량의 속도를 이용하여 독립신호교차로에 신호최적 제어 알고리즘에 사용되는 변수인 주기(cycle), 현시(phase), 현시 순서(phase sequence)를 결정하게 된다. 매초 간격으로 V2X에서 수집 정

보 중 차량의 위치는 차량의 교차로 접근방향, 차로의 위치, 교차로 정지선까지의 남은거리 등을 포함하고 있다. 이러한 정보들은 기존에 개발되어진 대기행렬 길이 예측 알고리즘이나 차량 도착 추정 알고리즘 등을 적용하지 않고 실시간으로 수집되는 정보를 이용하여 산출이 가능하다는 장점이 존재한다.

따라서 매초 간격으로 V2X 통신환경에서 수집되는 정보를 이용하여 주기, 현시, 현시 순서를 결정하는 알고리즘과 이 알고리즘 안에서 감응식 신호운영을 적용하여 독립신호 교차로의 최적 제어를 실시하였다. 만일 V2X 통신이 가능한 차량의 시장점유율이 100%라고 하면 Gap out이나 신호연장시간을 고려하지 않은 감응신호 운영이 가능하나, 시장점유율이 100%가 되기 이전까지는 그 차이를 극복하기 위하여 지점 검지기 기반 감응식 신호 운영을 함께 운영하는 것이 타당하다고 판단하였다.

개발된 최적 제어 알고리즘은 Vissim을 이용하여 toy network에서의 평균 지체, 평균 정지지체, 정지수, 평균속도를 산출하였다. 또한 교통신호 산출 S/W인 Synchro를 이용하여 toy network의 신호를 적용하여 개발된 알고리즘과 성능을 비교하였다. 마지막으로 개발된 알고리즘의 적용시점을 파악하기 위하여 V2X 통신이 가능한 차량의 비율을 변경하여 정확한 알고리즘의 도입 시기를 살펴보았다.

Ⅱ. 관련 이론 및 연구 동향

1. 관련 연구 동향

1960~70년대부터 점차 증가하는 승용차로 인해 대기오염 및 교통혼잡과 같은 여러 가지 사회문제들이 대두되면서, 이러한 고질적인 교통문제를 해결하기 위해 최적 신호제어와 관련된 다수의 연구들이 진행되었다. 하지만 통신환경의 발달로 실시간으로 차량의 위치정보나 속도정보를 습득할 수 있게 되었다. 이러한 상황에서 기존의 신호제어 연구에서 발전된 V2V 혹은 V2I 환경에서의 신호최적화 연구가 활발하게 진행되고 있는 실정이다.

2. 기존 실시간 신호제어 연구

Yun(1998)은 차량 도착률 및 대기행렬 길이 자료를 이용해 대기차량을 최소화 하는 신호 연동 모델을 제시하였다. 일반적으로 신호 연동모델은 고정주기 하에 평균 유입 교통량을 산출한 후 선형 최적화 이론을 통해 최적 신호를 산출한다. 하지만 해당 연구에서는 주기별 차량도착률을 이용해 대기차량 길이를 예측하고 이를 통해 주기별 주기길이 및 현시신호시간을 최적화할 수 있는 거시적 모형을 제시하였다[4].

Lee et al.(2000)은 시뮬레이션 모형이 아닌, 수식으로 나타낸 각 진입로의 대기차량 예측모델을 이용하여 다음 주기에서의 대기차량수를 예측하고 이를 통해 최적 신호시간을 산출하였다. 차량도착모형 구축을 위해 해당 연구에서는 각 접근로의 차량 도착률은 일정(Uniform)하다고 가정하였으며, 링크 이동시 차량밀도가 변하는 차량분산현상 또한 없는 것으로 가정하였다[5].

Han et al.(2012)는 지체시간과 연동성 두 가지 척도를 동시에 고려하는 신호교차로 거시적 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 두 가지 척도를 동시에 고려하기 위해서 각 셀의 밀도를 통해 지체도와 연동지표를 개발하고 이를 시뮬레이션 모형에 반영하였다. 정의한 지체도와 연동지표를 이용해 구축한 거시적 시뮬레이션 모형과 기존의 지체모형 및 연동모형의 효과척도를 비교 분석한 결과, 기존 신호최적화 모형에서 산출한 지체시간과 비교하여 유사한 패턴을 나타내는 것을 확인하였다[6].

3. V2X 환경에서의 신호최적화 연구

Kattan et al.(2010)의 연구에서는 V2V차량의 존재가 전체 교통 네트워크에 어떤 영향을 주는지 연구하였다. 특히 사고 발생 상황에서 connected vehicle화 되어 있는 것이 이후의 네트워크에 끼치는 영향을 정량적으로 보이고자 하였다. 분석 결과, V2V 차량 비율이 증가할수록 사고가 일어날 확률이 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 심각한 지체 상황에서 V2V 차량이 존재할 때 통행 시간이 오히려

증가하는 것을 확인하였다[1].

Noah et al.(2013)의 연구에서는 Rolling Horizon 알고리즘을 적용하여 현시를 할당하고 이때 차량 위치를 짧은 간격으로 추정하여 군집 이동 및 대기시간을 측정하였다. 미래 15초 간격으로 목적 함수 최적화를 하여 현시를 할당하는 것이 특징이며 목적함수는 지체 또는 정지 수, 가속도 등과의 조합으로 결정된다. 분석 결과, 일반적인 감응 신호 제어보다 성능이 좋게 나오지만 포화 및 과포화 상태에서는 높은 수준으로 신호 제어를 하지 못해 만족할 만한 결과를 얻기 힘들었다. 또한 개발된 알고리즘에서 connected vehicle에 따른 시장점유율 변화와 관련하여 평가한 결과 50%일 때 지체 및 정지수 측면에서 결과가 좋았으나, 50% 미만일 때는 Unconnected vehicle이 증가함에 따라 기존의 신호시스템이 더 나은 효과가 나타났다[7].

Feng et al.(2015)의 연구에서는 connected vehicle 자료를 기반으로 실시간 감응 교통 제어 알고리즘을 제시하였다. 신호 현시를 할당하는 알고리즘은 신호 현시의 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 최소화와, 대기길이 최소화 두 가지로 선정하였다. 도착정보를 추정하는 데 사용되는 알고리즘은 EVLS (Estimation of Location and Speed) 알고리즘을 적용하였다. 분석결과 시장점유율이 100%인 경우 총 지체와 대기길이가 각각 감소함을 알 수 있고, 시장점유율이 최소 50% 이상이어야만 알고리즘이 효과적으로 작동하며 수요가 많은 경우에는 connected vehicle이 증가하여 알고리즘의 오류가 감소하는 것으로 확인하였다[8].

Simon et al.(2015)의 연구에서는 수단 선택과 교통 네트워크 이동성에서 connected vehicle의 효과를 평가하는 것으로 수단(mode)을 선택하는 것과 교통량을 배정하는 두 부문으로 구성된다. 분석결과 connected vehicle이 증가함에 따라 전체 승용차(auto mode)의 평균 통행시간은 감소하였으며, connected vehicle의 비율이 높을 때 통행시간이 감소하는 것은 동적 경로 안내 시스템에 의한 것으로 판단하였다[9].

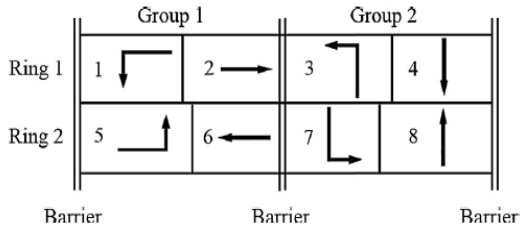
4. 기존 연구와의 차이점

기존의 실시간 제어연구와 V2X 연구에서는 수집되는 정보의 한계로 인하여 검지기와 알고리즘을 통하여 현재의 교통상태인 대기행렬 길이, 예측 교통량 등을 추정하였다. 하지만 본 연구의 배경에서는 차량의 정보 획득에 있어 바로 적용이 가능하다. 또한 국외에서는 V2X 환경에서의 신호제어 연구가 활발한 실정이나 국내에서는 아직 미흡한 실정이다.

Ⅲ. 교통신호 최적제어 알고리즘 개발

1. 차량 도착 테이블 및 정지지체 테이블 작성

신호제어 알고리즘은 NEMA(the National Electrical Manufacturers Association) 현시(phase) 체계를 따라 구현하게 된다. NEMA 현시 체계는 다음 <Fig. 1>과 같이 2개의 그룹(group)과 2개의 링(ring)으 구성되어져 있다. 신호 주기는 Group 1과 Group 2의 합으로 구성되어지며 Group간의 사이에 장벽(Barrier)이 존재한다. Barrier는 Group간의 침범할 수 없는 경계선을 의미하게 된다. 따라서 Phase 1의 시간과 Phase 2의 합은 phase 5와 phase 6의 합과 항상 동일하게 된다. 또한 Group 1과 Ring 1에 속해있는 Phase 1과 2의 순서는 바뀌어도 무방한 특성이 존재한다.



〈Fig. 1〉 NEMA phase diagram

본 연구의 신호최적화 알고리즘을 구현하기 위

하여 V2X 통신차량에서 매 초 간격으로 수집되어진 차량 ID, 속도, 접근방향, 위치정보(정지선까지 거리 및 차선위치)를 이용하여 다음 Eq. [1]을 통해 차량이 정지선 혹은 대기차량 뒤에 도착할 시간 테이블을 작성한다. 또한 차량 도착테이블을 이용하여 각 접근로의 정지지체 테이블 작성이 가능하다. 이러한 정지지체 테이블은 신호의 현시 순서를 결정하는데 이용할 수 있다.

$$\frac{l_j - q_k - position_i}{speed_i} = estimated\ time\ of\ arrival \qquad [1]$$

l_j : $length\ of\ link\ j$

q_k : $queue\ length\ of\ lane\ k$

$position_i$: $position\ of\ vehide\ i$

$speed_i$: $speed\ of\ vehide\ i$

차량 도착테이블은 위 Eq. [1]을 이용하여 매초마다 작성되어 다음과 같이 나타낼 수 있다. 아래 <Table 1>을 보면 1초 뒤에 1번 접근로의 1차선에 차량이 도착한다고 해석할 수 있다. 이러한 방식은 차량이 차선 변경 없이 그대로 정지선까지 진행한다는 가정 하에 도착 테이블을 작성하게 된다.

〈Table 1〉 Example of arrival table

estimated time of arrival	link 1			…
	lane 1	lane 2	lane 3	…
current				…
1 sec	veh ID			…
2 sce		veh ID		…
3 sec				…
4 sec		veh ID		…
5 sec	veh ID		veh ID	…
6 sec				…
…	…	…	…	…

다음 과정에서는 차량 도착 테이블을 이용하여 각 접근로 혹은 진행 방향의 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 테이블을 이용하여 계산하게 된다.

다음 <Table 2>를 보면 앞서 예시로 작성한 차량 도착 테이블을 이용하여 정지지체 테이블을 작성한 것이다. 차량이 도착함에 따라서 정지지체 테이블의 숫자가 변함을 알 수 있다. 이는 현재 그 차선에 정지하고 있는 차량의 수를 의미하게 되는데 매 초 간격으로 작성하기 때문에 차량의 숫자가 곧 정지지체가 된다. 예를 들어, 링크 1의 6초 동안의 예측 정지지체는 다음 Eq. [2]와 같이 계산될 수 있다.

$$\sum_{current}^{6\sec} lane\,1 + \sum_{current}^{6\sec} lane\,2 + \sum_{current}^{6\sec} lane\,3 = 18\sec \qquad [2]$$

〈Table 2〉 Example of stop delay table

estimated stop delay	link 1			…
	lane 1	lane 2	lane 3	…
current	0	0	0	…
1 sec	1	0	0	…
2 sce	1	1	0	…
3 sec	1	1	0	…
4 sec	1	2	0	…
5 sec	2	2	1	…
6 sec	2	2	1	…
…	…	…	…	…

이러한 정지지체는 신호가 고려되지 않은 차량의 도착에 따른 정지지체만을 고려한 값이다. 따라서 차량 도착 테이블과 정지지체 테이블을 이용하여 신호 최적제어 알고리즘을 구현할 변수인 Group의 최대 녹색시간, phase의 최대 녹색시간, phase 순서를 계산한다.

2. 최대 녹색시간 및 최소 녹색시간 산정 방법

최적주기란 지체를 최소화시키는 주기를 말하며 녹색신호 때 통과시켜야 할 차량 대수는 적색신호에서 기다리는 차량뿐만 아니라 녹색 및 황색시간

때에 도착하는 차량도 통과시켜야 한다[11]. 따라서 최적주기를 산출하기 위하여 각 Group의 지체를 최소로 하는 최대 녹색시간 값을 구하기 위해 Webster 방법을 이용하였다[11].

각 접근로의 최소녹색시간과 Webster 방법을 이용하여 Group의 최대 녹색시간을 다음 Eq. [3]과 같이 나타날 수 있다.

$$Group1_{Maxgreen} = Max(phase2_{Ming} + phase6_{Ming}, \frac{1.5*(L)+5}{1-\sum_{i=1}^{n} y_i}) \quad [3]$$

$$Group2_{Maxgreen} = Max(phase4_{Ming} + phase8_{Ming}, \frac{1.5*(L)+5}{1-\sum_{i=1}^{n} y_i})$$

L : 주기당 총 손실시간으로 주기에서 총 유효녹색시간을 뺀 값

y_i : i $phase$ 때 임계차로군의 교통량비, 즉 교통수요/포화교통량

Group1의 최대녹색시간은 phase2의 최소녹색시간 + phase6의 최소녹색시간을 더한 값과 Webster 방법을 통해 계산되어진 녹색시간 값 중 큰 값을 사용되게 된다. 하지만 Webster 방법에서 사용된 y_i는 조사된 교통량을 이용하여 산출하게 된다. 하지만 본 연구에서 사용된 V2X 통신환경에서는 매 주기의 교통량을 산출할 수 있기 때문에 식을 수정하면 다음 Eq. [4]와 같이 나타낼 수 있다. Eq. [4]를 살펴보면 최대녹색시간 산출을 위하여 Group1의 교통량 비를 산출하는 과정이다. Group1의 30초 후에 정지하고 있는 차량이 가장 큰 phase 조합을 찾고 1시간 교통량으로 변환하는 과정과 phase 조합의 차선 수와 포화교통량으로 나누어 교통량 비를 산출하게 된다. 여기서 산출된 교통량 비는 Eq. [3]에 대입하여 Group의 최대녹색시간을 계산한다.

$$Group1 \sum_{i=1}^{n} y_i = \frac{Max_{30\sec flow}(phase(1+2), phase(5+6), phase(1+6), phase(2+5)) \times 120}{L \times S} \quad [4]$$

$$Group2 \sum_{i=1}^{n} y_i = \frac{Max_{30\sec flow}(phase(3+4), phase(7+8), phase(3+8), phase(7+4)) \times 120}{L \times S}$$

L : $Nmber\ of\ lane$
S : $Saturated\ traffic$

앞서 계산된 Group의 최대녹색시간을 이용하여 각 phase별 최대 녹색시간을 산출할 수 있다. 차량 도착 테이블과 30초 동안 도착할 교통량을 이용하여 좌회전과 직진의 녹색시간 비율을 결정하게 된다. 따라서 직진 현시의 최대녹색시간을 계산하고 Group의 최대 녹색시간에서 직진 현시의 최대녹색시간을 빼면 좌회전의 최대 녹색시간이 계산되게 된다. 각 phase의 최대 녹색시간은 다음 Eq. [5]를 이용하여 계산한다.

$$phase_T = Max(phase_{Ming(T)}, Group_{Maxg} \times \frac{flow_{30\sec T}}{\frac{flow_{30\sec T}}{L_T} + \frac{flow_{30\sec L}}{L_L}}) \quad [5]$$

$$Group_{Maxg} - pahse_T = phase_L$$

$flow_{30\sec T}$: $predicted\ 30\ \mathrm{seconds}\ Staight\ vehicle$
$flow_{30\sec L}$: $predicted\ 30\ \mathrm{seconds}\ left\ vehicle$
L_{TL} : $Nber\ of\ lane\ Staight\ \mathrm{and}\ Left$

각 phase의 최소녹색시간은 직진 phase인 2, 4, 6, 8의 경우 분석자가 도로의 기하구조와 보행자 안전을 위한 횡단보도 시간에 맞게 설정한 시간을 부여하였으며, 좌회전 phase인 1, 3, 5, 7의 경우 선행좌회전 현시일 경우 대기차량의 수 × 2초를 부여하였다.

이러한 방식은 신호시간을 계산함에 있어서 각 주기마다의 접근 교통량 변동을 반영하여 최대녹색신호시간을 계산한 것이다. 따라서 V2X 환경에서 수집되는 예측 교통량을 이용하여 지체를 최소화하는 현시별 최대녹색시간과 주기의 최대녹색시간을 계산할 수 있다.

3. 현시 순서 결정 방법

산출된 주기와 현시의 최대녹색시간을 이용하여 현시 순서에 따라 정지지체를 예상할 수 있다. 이는 V2X 환경에서 각 차량의 도착시간과 대기행렬 길이를 산출할 수 있기 때문이다. 따라서 각 현시의 최대녹색시간 동안의 정지지체를 이용하여 다음과 같이 현시 순서를 결정하게 된다.

각 phase의 순서는 다음 Eq. [6]을 이용하여 계산한다. phase의 순서는 그룹번호와 링 번호에 귀속되

기 때문에 phase(1, 2), phase(5, 6), phase(3, 4), phase (7, 8)끼리 계산하게 된다. 그룹의 최대녹색시간 안에서 해당 ring의 직진교통량과 좌회전 교통량의 예측교통량을 이용하여 각 phase의 최대녹색시간을 계산한다. 이후 각 phase의 최대녹색시간동안 생기는 정지지체를 매초간격으로 계산하여 현시순서를 경정하게 된다. 예를 들어 직진인 phase 2가 먼저 점등되었을 동안 정지하고 있는 좌회전 차선의 정지지체의 합과 phase 1이 켜졌을 때부터 쌓인 phase 2의 정지지체의 합 그리고 출발손실시간을 더하기 위해 신호가 점등 되었을 때의 차량 대 수로 계산하게 된다.

$$first\,phase_T = \sum_{j=0}^{phase_{Marg(T)}} phase_L SD + \sum_{Group_{Marg}-phase_{Marg(T)}}^{Group_{Marg}} phase_T SD + (1.63 \times (flow_{(T)} + flow_{(L)}) \quad [6]$$

$$first\,phase_L = \sum_{j=0}^{phase_{Marg(L)}} phase_T SD + \sum_{Group_{Marg}-phase_{Marg(L)}}^{Group_{Marg}} phase_L SD + (1.63 \times (flow_{(T)} + flow_{(L)})$$

$$Min\,(first\,phase_T, first\,phase_L)$$

$phase_L SD$: $stop\,delay$ for $left\,lane$
$phase_T SD$: $stop\,delay$ for $straight\,lane$

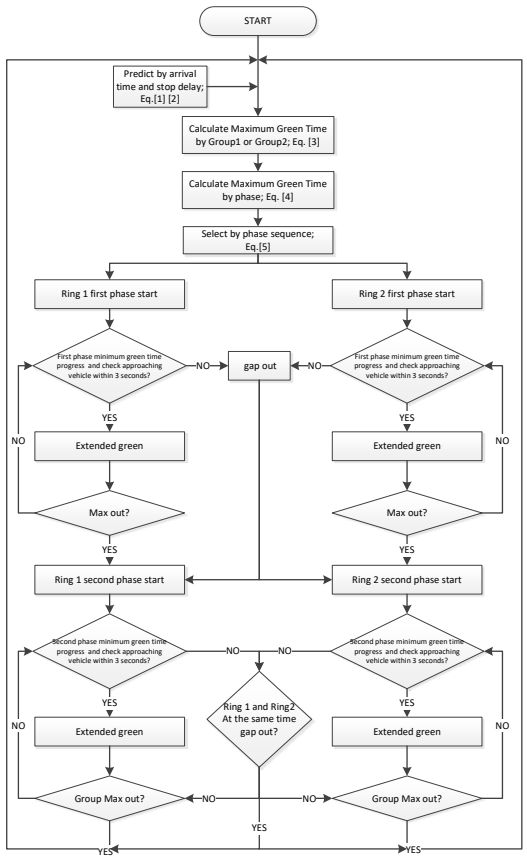
이렇게 계산된 값 중 낮은 값을 가진 방법이 현시 순서가 먼저 제공할 수 있도록 운영된다. 이러한 방식 또한 앞으로 차량이 언제 도착하는지 알 수 있기 때문에 정지지체를 최소화 하는 신호현시순서 결정을 할 수 있게 된다.

4. 독립신호교차로 최적 신호제어 알고리즘

산정된 Group의 최대 녹색시간과 phase의 최대 녹색시간, 최소 녹색시간, 그리고 현시의 순서를 이용하여 독립신호 교차로의 최적 신호제어 알고리즘을 다음과 <Fig. 2>와 같이 나타낼 수 있다.

본 연구에서 제안하는 최적 신호제어 알고리즘은 V2X 환경에서 수집된 차량의 위치정보를 이용하여 최대녹색시간을 계산하고 그 시간 안에서 실시간 감응신호로 제어하게 된다. 따라서 Group의 최대 녹색시간을 결정하고, phase의 최대 녹색시간, phase의 순서를 결정하게 되면 각 phase 별로 gap out과 max out이 발생함에 따라 신호가 진행되어진다.

이러한 방식은 기존의 루프검지기를 이용한 감응신호 제어방법과 유사하지만 주기가 교통량의 변동을 반영하기 때문에 지속적으로 달라지는 차이점을 나타내고 있다. 또한 루프검지기를 이용한 감응신호 제어방식은 검지기에 차량이 검지가 되면 신호를 연장시켜 주었으나 V2X 환경에서는 차량의 도착 예정시간을 알 수 있기 때문에 바로 판단하여 현시 축소(gap out)을 적용할 수 있는 장점이 존재한다.

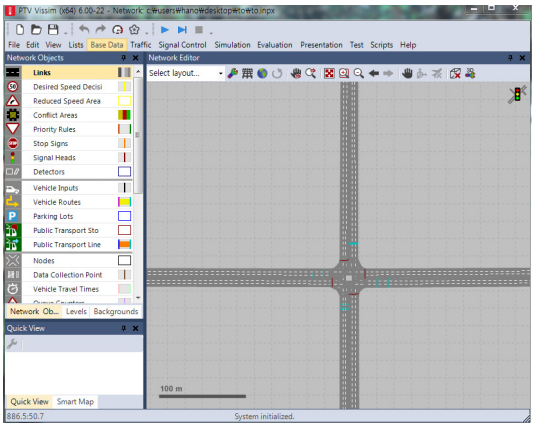


〈Fig. 2〉 Realtime signal control diagram

Ⅳ. 시뮬레이션을 이용한 알고리즘 평가

1. 네트워크 구축 및 시나리오 작성

본 연구에서 개발된 알고리즘을 평가하기 위하여 국내에서 많이 사용되는 미시교통시뮬레이션모형인 VISSIM ver 6.0을 이용하여 편도 3차로인 독립교차로의 toy network를 구성하였다.



〈Fig. 3〉 Vissim toy network

개발된 알고리즘을 적용하기 위하여 Vissim에서 제공하는 외부 모듈인 Com interface 모듈을 이용하였으며 visual basic을 이용하여 코드를 작성하였다.

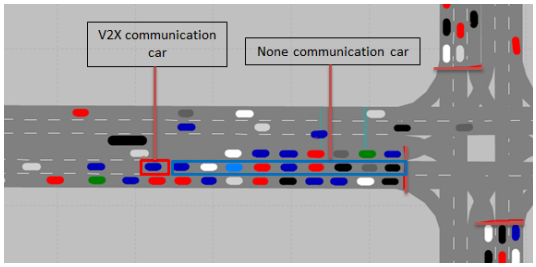
네트워크 구성 시나리오는 각 접근로 교통량을 500, 1000, 1500(대/시)로 구분하였으며, 모든 시나리오의 회전비율은 직진, 좌회전, 우회전 6:3:1의 비율을 적용하였다. 구성된 네트워크의 평가는 기존 신호알고리즘의 경우 신호최적화 프로그램인 Synchro 6.0을 이용하여 각 시나리오의 최적 신호를 적용하였다.

마지막으로 시장점유율에 따른 개발된 알고리즘이 어떻게 변화하는지를 알아보기 위하여 V2X 통신환경이 가능한 차량이 100%, 75%, 50%, 25%로 구분하여 평가하였다.

평가를 위한 MOE는 개별차량의 평균 지체, 평균 정지지체, 평균 정지횟수, 평균 속도를 이용하였으며 random seed를 변화하여 시나리오 당 5번의 분석 결과를 평균 내어 산출하였다.

2. 시장점유율에 따른 예측교통량 보정

본 연구에서 개발된 알고리즘에서 최대주기 산출 시 예측교통량을 이용하게 된다. 하지만 시장점유율에 따라서 V2X 통신환경 차량이 감소하게 됨에 따라 주기 산정에 오차가 발생할 수밖에 없다.



〈Fig. 4〉 Example of correction to prediction volume

따라서 <Fig. 4>와 같은 현상을 보정시키기 위하여 V2X 통신환경 차량의 정지위치에 따라 현재 교통량을 보정하는 알고리즘을 추가하였다. <Fig. 4>처럼 통신이 가능한 차량이 정지하였을 때 정지선의 위치로부터 거리를 산출할 수 있다. 이 산출한 거리를 이용하여 통신이 불가능 한 차량의 대수를 현재 예측교통량이 아닌 현재교통량에 추가하여 예측교통량을 보정하는 방식이다.

3. 네트워크 분석 결과

접근로 교통량에 따른 기존 신호알고리즘과 개발된 신호 최적 제어알고리즘의 결과를 살펴보면 다음 <Table 3>과 같이 나타났다.

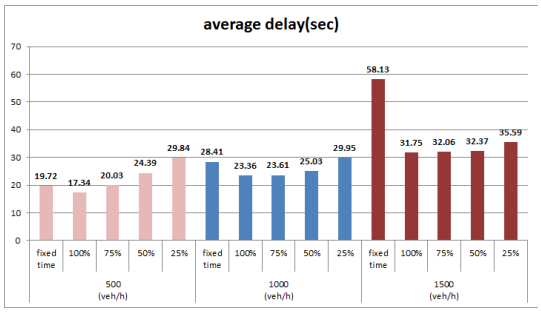
Synchro에서 산출된 신호현시와 본 연구에서 개발된 알고리즘을 비교하면 전제적으로 평균 지체, 평균 정지지체, 정지횟수, 평균속도가 개선되었음을 나타나고 있으며, 교통량이 많아질수록 개선 폭이 커지는 것으로 분석되었다. 이는 개발된 알고리즘이 교통량의 변동에 맞게 최적 주기를 산출하고 더불어 감응신호 운영을 하였기 때문인 것으로 판단된다. 1,500대의 교통량의 경우 Synchro에서 산출된 최적 주기는 180초로 나타났으나 개발된 알고리즘에서는 최대 140초에서 최소 80초 사이에서 주기가 운영되었음을 파악할 수 있었다.

〈Table 3〉 Comparison of fixed time algorithm and V2X algorithm

Traffic volume (ver/h)	Scenario	Level of service	Average delay (sec)	Average stop delay (sec)	Average stop (no.)	Average speed (km/h)
500	fixed time	A	19.72	14.34	0.62	36.43
	V2X algorithm	-	17.34	11.81	0.6	37.84
1000	fixed time	E	28.41	20.92	0.73	31.92
	V2X algorithm	-	23.36	16.24	0.68	34.37
1500	fixed time	F	58.13	46.65	0.92	22.56
	V2X algorithm	-	31.75	21.49	0.83	30.49

개발된 알고리즘이 V2X 시장점유율에 따라 도입 시기를 판단하기 위하여 시장점유율 변화를 적용하여 결과를 살펴보면 다음과 같이 나타났다. <Fig. 5>에서 보인 바와 같이 평균 지체의 경우 교통량이 500대의 경우 시장점유율이 50%이하로 내려가면 기존 신호알고리즘보다 지체가 높아지는 것으로 나타났으나 교통량이 1,000대일 경우 시장점유율 25% 이하에서 지체가 높아졌다. 하지만 1,500대일 경우 시장점유율에 25%에 불과해도 기존의 신호제어 알고리즘보다 지체가 낮아지는 것으로 분석되었다. 이는 알고리즘의 도입 시기가 시장점유율 50%이상일 때 도입이 원활하게 가능할 것으로도 판단될 수 있으며, 다른 측면에서는 V2X 통신이 가능한 차량의 규모가 증가할수록 본 연구에서 개발된 알고리즘이 잘 작동하는 것으로 보여주고 확인된다.

또한 <Table 3>을 살펴보면 평균 지체와 비슷하게 결과가 나타나고 있는 것을 알 수 있는데 교통량이 많아질수록 시장점유율에 따른 변화가 낮아지는 것으로 판단할 수 있다. 이는 500대의 25%의 V2X 통신환경의 차량과 1,500대의 25%의 V2X 통신환경의 차량의 숫자로 인한 것으로 판단된다. 앞서 알고리즘에서 주기판단시 예측 교통량을 이용하였는데 차량보정 알고리즘이 적용되어진 결과로 판단된다. 이는 교통량이 많은 대형교차로의 경우 V2X 통신차량의 시장점유율이 50%보다 낮더라도 충분히 보정이 가능한 것으로 판단할 수 있다.



〈Fig. 5〉 Comparison of fixed time and V2X market penetration by average delay

〈Table 4〉 Comparison of fixed time algorithm and V2X market penetration

Traffic volume (ver/h)	Scenario	Level of service	Average delay (sec)	Average stop delay (sec)	Average stop (no.)
500	fixed time		19.72	14.34	0.62	36.43
	V2X algorithm 100%		17.34	11.81	0.6	37.84
	75%		20.03	14.7	0.61	36.23
	50%		24.39	18.55	0.67	33.92
	25%		29.84	23.37	0.75	31.34
1000	fixed time		28.41	20.92	0.73	31.92
	V2X algorithm 100%		23.36	16.24	0.68	34.37
	75%		23.61	16.56	0.68	34.24
	50%		25.03	17.88	0.7	33.52
	25%		29.95	22.09	0.75	31.27
1500	fixed time		58.13	46.65	0.92	22.56
	V2X algorithm 100%		31.75	21.49	0.83	30.49
	75%		32.06	22.06	0.84	30.37
	50%		32.37	22.31	0.85	30.24
	25%		35.59	24.6	0.88	29.01

Ⅳ. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 매초 간격으로 V2X 통신환경에서 수집되는 정보를 이용하여 주기, 현시, 현시 순서를 결정하는 알고리즘과 이 알고리즘 안에서 감응식 신호를 적용하여 독립신호 교차로의 신호 최적제어를 실시하였다. 개발된 최적제어 알고리즘은 Vissim을 이용하여 toy network에서의 지체, 정지 수, 평균속도 등을 산출하였다. 또한 신호최적화 프로그램인 Synchro를 이용하여 toy network의 신호를 최적화하여 개발된 알고리즘과 비교를 실시하였으며 시장점유율에 따른 도입 시기 등을 평가하였다.

평가 결과, Synchro에서 산출된 신호현시와 본 연구에서 개발된 알고리즘을 비교하면 전제적으로 평균 지체, 평균 정지지체, 정지횟수, 평균속도가 개선되었음을 나타나고 있으며, 교통량이 많아질수록 개선 폭이 커지는 것으로 분석되었다.

또한 시장점유율에 따른 도입 시기 평가는 평균 지체의 경우 교통량이 500대의 경우 시장점유율이 50%이하로 내려가면 기존 신호알고리즘보다 지체가 높아지는 것으로 나타났으나 교통량이 1000대일 경우 시장점유율 25% 이하에서 지체가 높아졌다. 하지만 1500대일 경우 시장점유율에 25%에 불과해도 기존의 신호제어 알고리즘보다 지체가 낮아지는 것으로 분석되어 시장점유율 50% 이상에서 알고리즘 도입이 가능한 것으로 판단되었다. 하지만 교통량이 많아질수록 차량의 보정에 따른 오차가 적어져 교차로의 교통량이 많은 곳에서는 더 낮은 시장점유율에서도 충분히 효과가 있을 것이다.

하지만 본 연구에서는 단순히 기존의 신호시스템과 개발된 알고리즘을 비교하였기 때문에 이러한 좋은 결과가 나타난 것으로 판단된다. 기존의 감응신호와 개발된 알고리즘을 비교하면 개선폭이 지금보다 낮아질 것으로 판단되며 기존의 검지기 정보를 융합하게 된다면 더 낮은 V2X 시장점유율에서도 적용이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 추후 연구에서는 감응신호와의 비교와 단순히 독립신호교차로에서 벗어나 연동교차로 에서의 V2X 신호알고리즘 개발이 필요할 것으로 판단된다. 마지막으로 교차로에서의 교통안전은 무엇보다 중요하기 때문에 추후 연구에서는 안전성평가 또한 수반되어야 할 필요성이 존재한다.

REFERENCES

[1] Cho H., Lee H. and Kim Y.(2014), "2011, 2012 Traffic Congestion Costs: Estimation and Trend Analysis," *Korea Transport Institute*, pp.1-121.

[2] Dey K. C., Rayamajhi A., Chowdhury M., Bhavsar P. and Martin J.(2016), "Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network - Performance evaluation," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* vol. 68, pp.168-184.

[3] 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.

[4] Yoon K.(1998), "Dynamic Control of Coordinated Traffic Signals for Minimizing Queue-lengths," Proceedings of the KOR-KST Conference, vol. 34, pp.196-205.

[5] Lee Y. and Choi S.(2000), "Estimation of A Car-following Model for Microscopic Simulation Model Based on GM 5th Model," *The Journal of Korean Institute of Transport System,* vol. 18, no. 6, pp.47-61.

[6] Han Y. and Kim Y.(2012), "The Progression-Delay Model for Simulating Performance for Signalized Intersections," *Proceedings of the The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems,* no. 1, pp. 151-155.

[7] Goodall N., Smith B. and Park B.(2013), "Traffic signal control with connected vehicles," *Transportation Research Record: Journal of*

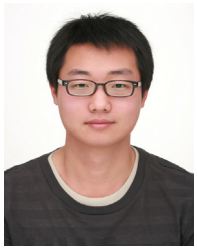
the Transportation Research Board, vol. 2381, pp.65-72.

[8] Feng Y., Head K. L., Khoshmagham 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.

[9] Minelli S., Izadpanah P. and Razavi S.(2015), "Evaluation of connected vehicle impact on mobility and mode choice," *Journal of traffic and transportation engineering (English edition),* vol. 2, no. 5, pp.301-312.

[10] Do C.(1989), "Principle of Transportation Engineering," *Cheongmoongak*, pp.447-453.

저자소개



한 음(Han, Eum)
2012년 2월 : 아주대학교 환경건설교통공학부 교통시스템공학 학사
2012년 2월 ~ 현 재 : 아주대학교 일반대학원 건설교통공학 석박사통합과정
e-mail : hano3106@ajou.ac.kr

박 상 민(Park, Sangmin)
20123년 2월 : 아주대학교 환경건설교통공학부 교통시스템공학 학사
2014년 3월 ~ 2016년 2월 : 아주대학교 일반대학원 건설교통공학 석사
2016년 2월 ~ 현 재 : 아주대학교 일반대학원 건설교통공학과 박사과정
e-mail : stylecap@ajou.ac.kr

정 하 림(Jeong, Harim)
2016년 2월 : 아주대학교 교통시스템공학과 학사
2016년 3월 ~ 현 재 : 아주대학교 일반대학교 건설교통공학 석사과정
e-mail : gkfla0731@ajou.ac.kr

이 철 기(Lee, Choulki)
2015년 2월 ~ 현 재 : 아주대학교 교통ITS대학원 원장
2011년 9월 ~ 현 재 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수
1991년 2월 : 아주대학교 석사(교통공학 전공)
1998년 2월 : 아주대학교 박사(교통공학 전공)
e-mail : cklee@ajou.ac.kr

윤 일 수(Yun, Ilsoo)
2006년 : University of Virginia 교통공학 박사
1995년 : 한양대학교 도시공학 석사
1993년 : 한양대학교 도시공학 학사
현 재 : 아주대학교 교통시스템공학과 부교수
e-mail : ilsooyun@ajou.ac.kr