한국ITS학회논문지
제13권, 제1호 (2014년 2월)
pp.01~14

http://dx.doi.org/10.12815/kits.2014.13.1.001

구간통행시간 정보 기반의 대기행렬길이를 이용한 실시간 신호제어 모형 개발

Queue Length Based Real-Time Traffic Signal Control Methodology Using sectional Travel Time Information

이 민 형* (Minhyoung Lee)　김 영 찬** (Youngchan Kim)　정 영 제*** (Youngje Jeong)

요 약

국가정책 및 사회적 여건의 변화에 따라 도시부의 교통혼잡 완화를 위한 물리적 도로 확대가 한계에 다다른 지금 혼잡 완화를 위해서는 기존 도로의 효율성을 재고하는 방안이 간구되어야한다. 또한 지능형교통체계(ITS)는 과거 루프 및 영상검지기 등을 통한 도로기반 지점검지 중심의 교통정보 수집체계에서 도로, 자동차 및 보행자간의 다양한 수집 체계를 통한 실시간 구간검지 체계 중심의 차세대 지능형교통체계(C-ITS :Co-operative ITS)로 빠르게 진화하고 있으나 현재 교차로의 운영 및 제어를 위한 교통정보의 수집방법은 지점검지체계에 국한되어 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 현재 Hi-pass에 적용된 DSRC기술을 통해 수집이 가능한 구간정보를 이용하여 접근로의 대기행렬 길이를 산정하고 이를 활용하는 독립교차로의 실시간 신호제어모형의 개발 및 평가를 목적으로 하였다. 대기행렬길이 추정을 위해 구간검지기를 통해 수집된 개별차량의 통행시간을 이용하여 시공도 상에 4개의 좌표값을 추정하였으며 한 주기동안 추정된 좌표값들을 통해 대기행렬이 생성되는 충격파의 속도 및 대기행렬길이를 추정하였다. 실시간 신호제어를 위해 각 방향별 추정된 대기행렬길이를 통해 전체 교차로의 대기행렬길이의 합이 최소가 되는 신호시간을 산정하였으며 API 기능을 제공하는 미시적 시뮬레이션 프로그램인 VISSIM을 활용하여 총 3개의 시나리오를 평가하여 알고리즘에 의해 교차로의 대기행렬길이의 합이 최소가 되는 신호시간의 산정이 가능함을 확인하였다.

핵심어 : 대기행렬, 실시간 신호제어, 충격파, 통행시간, 최소제곱법

ABSTRACT

The expansion of the physical road in response to changes in social conditions and policy of the country has reached the limit. In order to alleviate congestion on the existing road to reconsider the effectiveness of this method should be asking. Currently, how to collect traffic information for management of the intersection is limited to point detection systems. Intelligent Transport Systems (ITS) was the traffic information collection system of point detection method such as through video and loop detector in the past. However, intelligent transportation systems of the next generation(C-ITS) has evolved rapidly in real time interval detection system of collecting various systems between the pedestrian, road, and car. Therefore, this study is designed to evaluate the development of an algorithm for queue length based real-time traffic signal control methodology. Four coordinates estimate on time-space diagram using the travel time each individual vehicle collected via the interval detector. Using the coordinate value estimated during the cycle for estimating the velocity of the shock wave the queue is created. Using the queue length is estimated, and determine the signal timing the total queue length is minimized at intersection. Therefore, in this study, it was confirmed that the calculation of the signal timing of the intersection queue is minimized.

Key words: Queue length, Real time traffic control, Shockwave theory, Travel time, least square method

† 이 논문은 2012년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의하여 연구되었음.
* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 박사과정
** 공저자 및 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수
*** 공저자 : 서울시립대학교 교통공학과 연구교수
† 논문접수일 : 2013년 10월 23일
† 논문심사일 : 2013년 12월 23일
† 게재확정일 : 2014년 01월 03일

Ⅰ. 서 론

1903년 최초로 국내에 자동차가 도입된 이래 사회경제규모의 증가와 함께 2013년 자동차 등록대수는 1,900만대를 돌파했으며 2015년 2,000만대를 돌파할 것으로 예측된다.[1]

이와 같은 차량의 지속적인 증가는 사회경제규모의 증가와 함께 교통사고 및 환경오염과 같은 부작용을 증가시키는 원인이 되고 있으며, 교통 혼잡에 의해 발생하는 추가적인 운행비용 및 시간비용의 증가분인 교통혼잡비용 또한 2003년 22.8조원에서 2010년 28.5조원으로 매년 소폭의 상승세를 보이고 있다.[2]

2010년 도시부도로의 혼잡비용은 18.1조원(64%)으로 지역간도로의 혼잡비용 10.4조원(36%)에 비해 높은 것으로 추정된다. 하지만 2010년 전체 도로사업 투자의 72.1%인 12.8조원이 지속적인 국가 기간교통망 구축 사업을 위해 지방부 도로의 투자에 사용되고 있으며[3] 정부정책 변화에 따른 사회간접자본(SOC)의 예산감소는 도시부 도로의 시설확장 및 신설과 같은 물리적인 개선을 제한하고 있다.

지능형교통체계(ITS : Intelligent Transportation System)의 정의는 교통수단과 시설에 전자·제어 및 통신 등과 같은 첨단교통기술과 교통정보를 활용하여 교통체계의 운영 및 관리를 과학화·자동화하여 기존의 시설을 효율성과 안정성을 향상시키는 교통체계를 말한다. 현재 도시부도로의 교통혼잡의 해소를 위해 서울시를 비롯한 주요 광역시에서는 첨단교통관리시스템(ATMS)을 구축 운영 중에 있다.

또한, 과거 루프 및 영상검지기 등을 통한 도로기반 지점검지 중심의 교통정보 수집체계는 도로, 자동차 및 보행자간의 다양한 수집 체계를 통한 실시간 구간검지 체계 중심의 차세대 지능형교통체계(C-ITS :Co-operative ITS)로 빠르게 진화하고 있다.

한국도로공사에서 자동요금징수시스템(ETCS : Electronic Toll Collection System)을 위해 구축한 하이패스(Hi-Pass)는 자동요금징수 기능 이외에 OBU (On-Board Unit)을 장착한 프루브 차량을 기반으로 도로변에 설치된 RSE(Road Side Equipment)와의 DSRC(Dedicated Short-Range Communications)방식의 무선통신을 통해 구간의 교통정보를 수집할 수 있는 시스템이다.

하이패스는 2012년 12월 700만대를 넘어 전체 등록차량의 3대중 1대 꼴로 단말기가 보급되어[4] 추가적인 인프라의 구축을 통해 고속도로 이외의 도로에서 구간정보 수집을 위한 프루브 차량을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 DSRC방식의 무선통신을 통한 프루브 차량의 구간정보를 활용하여 대기행렬 길이의 추정 및 독립신호교차로의 대기행렬 길이의 합이 최소가 되는 신호제어 알고리즘을 개발하고 평가하였다.

Ⅱ. 기존이론 및 관련문헌 고찰

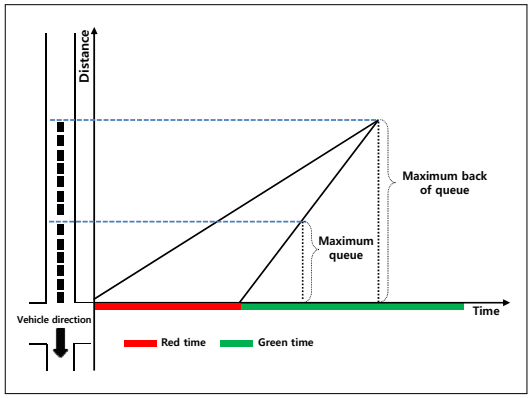
1. 대기행렬 이론

1) 대기행렬의 정의

신호교차로에서는 각 접근로마다 적색과 녹색신호의 반복에 따라 대기행렬이 생성 및 소멸을 반복하게 되며 이때 정지선 후방으로 생성되는 대기행렬 길이는 한주기 동안 <그림 1>과 같이 최대대기행렬(Maximum queue)과 후방최대대기행렬(Maximum back of queue)의 두 가지 형태의 대기행렬 길이를 가진다.

최대대기행렬의 경우는 적색시간 동안 정지선 후방으로 형성된 차량의 대기행렬 길이를 의미하는 것으로 최대대기행렬을 구성하는 차량은 정지한 차량으로 구성되어 각 차량은 접근지체 및 정치지체의 값을 모두 가지게 된다. 하지만 후방최대대기행렬의 경우 한주기 동안의 최대대기행렬 및 정지한 대기행렬에 의해 지속적으로 후방으로 생성되는 대기행렬 길이를 포함하는 것으로 정지치제 없이 접근지체만을 가지는 차량도 존재하게 된다.

따라서 후방최대대기행렬이 최대대기행렬 보다 한주기 동안에 적색신호와 접근로의 수요에 따라 정지선 후방으로 형성되는 대기행렬의 영향범위를 잘 표현해 주게 된다.



〈그림 1〉 신호교차로에서의 대기행렬의 정의
〈Fig. 1〉 Definition of Queue at intersection

2) 대기행렬 길이 추정

교차로에서 대기행렬 길이를 추정하기 위한 방법에는 대기행렬모형(Input-output model)과 충격파 이론(Shock-wave analysis)이 사용되고 있다.

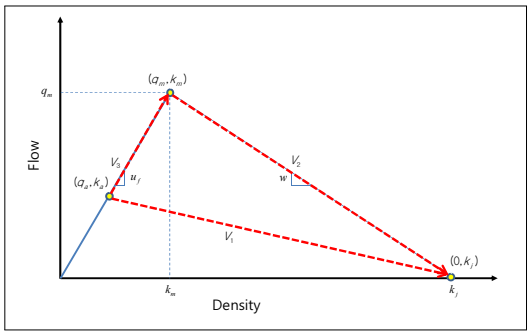
대기행렬모형의 경우 대기행렬 길이를 산정하기 위해 정지선을 기점으로 순차적으로 도착한 차량을 누적한 누적도착교통량곡선과 녹색시간동안 정지선을 통과한 차량을 누적한 누적출발교통량곡선을 사용하며 두곡선의 차를 통해 대기행렬의 차량대수를 산정할 수 있다. 하지만 대기행렬 길이가 아닌 차량의 대수를 추정하게 되므로 대기행렬 길이로 변환하는 과정에서 오차가 발생하게 된다.

충격파 이론은 대기행렬모형이 분석을 위해 지점 교통량 자료만을 사용한 것과 달리 분석을 위한 복잡한 과정 및 가정이 필요하다. 먼저, 충격파 이론의 경우 교통량(q), 속도(v), 밀도(k)의 상관관계를 기초로 하고 있어 분석대상지역의 교통량-밀도 관계를 규명하여야 한다. 둘째, 충격파의 속도를 추정하기 위해 실시간으로 교통량과 밀도의 데이터 수집이 가능하여야 한다. 셋째, 교통류 3대 변수 중 교통량과 밀도의 관계는 임계밀도를 기준으로 좌우대칭의 포물선 형태로 나타낼 수 있으며, 수학적 표현의 현실성을 높이기 위해 포물선 모형(Greenshields)과 지수모형(Greenberg, Underwood)등이 제안되었다.[5] 하지만 기존의 교통량-밀도 관계식은 포물선형으로 부수적으로 발생하는 충격파를 해석하는 과정이 복잡하다.

Newell(1993)은 종전의 포물선 형태의 교통량-밀도 관계를 통한 수학적 계산의 복잡성을 보완하기 위해 포물선 형태의 Greenshields 모형을 기준으로 삼각형 형태의 교통량-밀도 관계 모형을 제시하였다. 모형은 임계밀도를 기준으로 비혼잡상태와 혼잡상태의 2개의 영역과 각 상태별 동일한 충격파 속도로 단순화 되어 수학적 표현 및 계산의 어려움을 제거하였으며 실제 모형의 적용성이 뛰어나 많은 연구에 적용되고 있다.

신호교차로에서 발생하는 충격파의 종류는 <그림 2>와 같이 교통량-밀도 관계에 따라 3가지로 구분할 수 있다.

첫째, v_1은 적색등화시 정지선 후방으로 차량들이 대기행렬을 형성함에 따라 정지선 후방으로 발생하는 충격파로서 도착하는 차량군의 밀도에 따라서 충격파의 속도가 달라진다. 둘째, v_2은 녹색신호시간 동안 정지선 후방으로 대기행렬이 와해되며 발생하는 충격파로 최대밀도(Jam density)와 임계밀도의 기울기로 나타낼 수 있다. 셋째, 일반적으로 후방으로 생성된 두 개의 충격파 중 v_2의 속도가 v_1의 속도보다 크다. 따라서 특정시점에 두 충격파가 만나게 되며 이때의 지점이 후방최대대기행렬이 생성되는 지점이 된다. 또한 두 충격파가 만나 새로운 충격파(v_3)가 생성되게 되며 이는 정지선 방향으로 생성되어 대기행렬의 끝단의 움직임과 동일하게 이동하게 된다.



〈그림 2〉 신호교차로에서의 교통량-밀도 관계
〈Fig. 2〉 Flow-Density relationship at intersection

대기행렬 모형을 통해 산정된 대기행렬 길이와 충격파 이론을 통해 산정된 대기행렬 길이는 산정하는 방식에서부터 차이가 있다. 대기행렬 모형의 경우 대기행렬 길이는 수학적 대기행렬로서 정지선에 도착한 시간을 기준으로 하여 수직을 축척된 차량의 수학적 수량을 통해 평균 차량의 길이를 곱하여 산정하게 되며 평균 차량길이의 오차로 인해 실제 도로상에 수평으로 늘어선 물리적인 대기행렬길이와의 차이가 발생하게 된다.

앞서 정의한 후방최대대기행렬 길이는 정지한 차량뿐만이 아니라 대기행렬에 의해 속도의 변화를 보이는 차량을 모두 포함한다. 또한 실제 대기행렬의 끝 지점은 대기행렬을 구성하는 차량의 수가 증가할수록 상류지점으로 이동하게 되어 대기행렬 모형의 경우 대기행렬의 끝단에 차량이 도착하는 시점을 정확하게 예측할 수 없는 단점이 있다.

2. 대기행렬 길이 산정 및 신호제어 전략

대기행렬 길이는 지체와 함께 신호교차로를 제어하기 위한 주요 변수로 사용되고 있으며 과거 및 현재에도 많은 연구자에 의한 추정방법론이 연구되고 있다. 또한 과거 대기행렬 길이의 추정을 위한 자료의 수집 방법은 루프검지기에서 수집된 속도 및 점유율 자료 등이 사용되었으나 정보통신기술의 발달에 따라 다양한 검지방식을 이용하여 주행궤적 및 지체등과 같은 개별차량의 구간 및 실시간 정보를 통한 대기행렬 길이의 추정 방안이 연구되고 있다. 따라서 본 논문에서 제시하고자하는 대기행렬 길이의 추정방안 및 구간통행시간 정보를 활용한 신호제어 전략과 관련된 문헌을 고찰하였다.

Hanabusa et al.(2010)은 영상검지기를 통해 개별차량의 검지시각 및 차량번호를 수집하여 개별차량의 통행시간 및 지체시간 산출하였다. 또한 연속된 차량의 정보를 통해 누적도착교통량곡선과 누적출발교통량곡선을 추정하여 이동류의 지체시간을 산정하였다. Wu et al.(2010)은 과포화 신호교차로에서 정지선 상류부에 설치된 루프검지기의 고밀도 자료를 이용하여 점유율 및 차간시간의 변화지점을 도출하였으며, 교통특성이 변하는 지점을 충격파 이론에 적용하여 대기행렬 길이를 추정하는 방안을 제안하였다. Lertworawanich(2011)은 신호교차로에서 대기행렬 길이가 검지기와 정지선 사이의 거리를 초과한 경우 대기행렬모형을 이용하여 대기행렬 길이를 추정하는 것에 대한 어려움을 해결하기 위해 대기행렬 길이가 검지기를 초과할 시 검지기의 점유율 자료를 이용하여 시공도 상에서 검지기의 지점과 동일지점의 지체시간을 산정하였으며 이를 통해 후방최대대기행렬 길이를 추정하였다. 또한 각 접근로별 시공도상에서 적색시간의 증가에 따른 지체의 증가분을 산정하여 교차로의 총 지체가 최소가 되는 주기 및 현시시간의 산정 방안을 제시하였다. Cheng et al.(2011)은 GPS 자료를 통해 수집된 개별차량의 주행궤적으로 이용하여 대기행렬 길이를 추정하였다. 이때 개별적으로 수집된 샘플 차량의 궤적을 통해 대기행렬 생성에 따른 개별 차량의 주행궤적의 변화지점을 구분하였으며 이를 이용하여 접근로의 대기행렬 길이를 추정하는 방안을 제시하였다. Wu and Yang(2013)은 중국 난징시에 RFID 방식의 구간검지체계를 이용하여 개별차량의 통행시간 및 지체시간을 산정하였다. 이때 시공도상에서 차량의 지체를 통해 대기행렬이 생성되는 충격파 및 대기행렬이 해소되는 충격파의 기울기를 추정하였으며 두 충격파가 만나는 지점을 통해 후방최대대기행렬 길이를 추정하였다.

국내의 연구로는 Lee(1998)는 영상검지기를 사용하여 각 접근로의 대기행렬 길이를 추정하였으며 전방향의 대기행렬 길이를 이용하여 신호교차로의 주기 및 현시 산정하는 방안을 제시하였다. Kim et al.(2002)은 기존 신신호시스템의 대기행렬길이 산정방식이 과포화 상태에는 적절하지 못함을 제기하고 과포화 상태에서 대기행렬 길이를 추정하고 이를통해 대기행렬 길이를 균형화하는 신호제어 전략을 제시하였다. Jung et al.(2005)는 DSRC를 통한 구간검지체계로부터 산정되는 개별차량의 통행시간을 이용하여 이동류별 대기행렬 길이를 산출하였으며 대기행렬 길이 균형화를 수행하는 실시간 신호제어 알고리즘을 제시하였다. Park et al.(2007)은 루

프검지기 속도값을 통해 산정되는 신신호시스템의 대기행렬길이 추정방식이 평균차량길이의 가정에 따라 발생하는 근본적인 오차를 해결하기 위해 평균점유시간을 변수로 사용하여 대기행렬 길이를 추정하는 방안을 제시하였다.

문헌고찰 결과 대기행렬 길이 추정 방식은 대기행렬의 생성과정에서 교통류의 특성이 변하는 지점 또는 시점을 이용하거나 개별차량을 통해 수집된 정보를 이용하여 접근로 전체의 대기행렬의 생성과정을 추정하는 방식을 사용하고 있다.

이때 과거 지점검지방식의 경우 대부분 대기행렬모형을 통한 대수의 추정 또는 검지기의 위치에 따른 단점을 해소하기 위한 점유율 및 속도자료를 이용하는 방법이 제시되고 있으며 현재에는 개별차량의 통행정보의 수집 방안의 발달에 따라 개별차량의 통행정보를 이용하여 대기행렬의 생성과정을 충격파모형을 이용하여 역으로 추정하는 방법을 주로 사용하고 있다. 따라서 본 연구는 DSRC 통신방식을 통해 수집이 가능한 개별차량의 통행시간정보를 이용하여 개별차량의 통행시간 및 지체를 추정하였으며 시공도상에서 각 차량의 상태가 변화하는 지점을 추정하여 충격파 이론을 통해 접근로의 대기행렬이 생성되는 충격파의 속도를 추정하였다.

또한 각 접근로별로 추정된 대기행렬 길이를 통해 적색시간의 증가분에 따른 대기행렬의 해소시간을 산정하였으며 이를 활용하여 교차로 전체의 대기행렬을 해소하는데 필요한 시간이 최소가 되는 신호시간을 산정하여 기존 연구와의 차별성을 두고자 하였다.

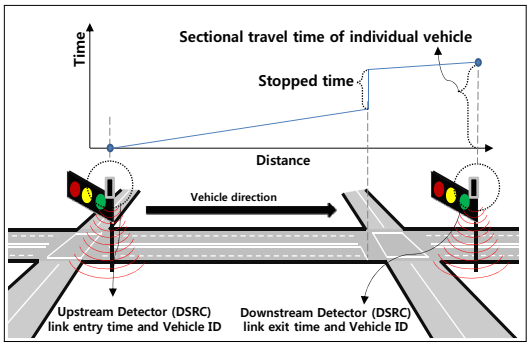
Ⅲ. 신호제어모형 개발

1. 구간검지체계 구성

구간검지체계는 지점검지체계와는 달리 일정 구간을 통과한 차량의 구간통행시간을 수집하여 속도 및 기타 자료를 산정하게 됨으로서 원리가 간단하고 교통정보의 가공에 따른 오차를 줄일 수 있다.

구간검지체계를 통해 통행시간을 산출하기 위해서는 통행시간을 산출하기 위한 산출시점과 산출종점을 지정해 주어야 하며 연속된 신호교차로를 통과하는 차량의 통행시간에 영향을 미치는 요소를 고려하여 산출시점과 산출종점을 선정하여야 한다.

연속된 신호교차로에서 차량의 통행시간에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 교차로의 상충을 방지하기 위한 신호시간이다. 따라서 본연구의 구간검지체계의 구성은 <그림 3>와 같이 상류 및 하류 검지기 모두 정지선 전방 교차로를 통과한 지점에 설치함으로서 구간정보를 수집하는 검지기 사이에 하나의 신호교차로를 포함하게 된다.



〈그림 3〉 구간검지체계의 구성
〈Fig. 3〉 Detector layout

2. 개별차량의 지체 산정

구간검지체계를 통한 개별차량의 통행시간 산출은 산출시점과 산출종점에 설치된 검지기를 통해 수집된 개별차량의 ID와 통과시각을 활용하여 식(1)에 의해 산출되며, 산출된 통행시간은 신호 교차로에서의 신호시간에 따른 가·감속 및 정지에 따른 지체시간을 포함한 값이 된다.

$$t_{AB_i} = t_{B_i} - t_{A_i} \quad (1)$$

여기서,

t_{A_i} : 차량 i가 시점검지기 A를 통과한 시각

t_{B_i} : 차량 i가 종점검지기 B를 통과한 시각

개별차량의 지체를 산정하기 위한 식은 개별차량의 구간통행시간과 자유속도 통행시간과의 차를 이용한 식(2)를 통해 산정된다.

$$Delay_i = t_{AB_i} - \frac{L}{v_f} \quad (2)$$

여기서,

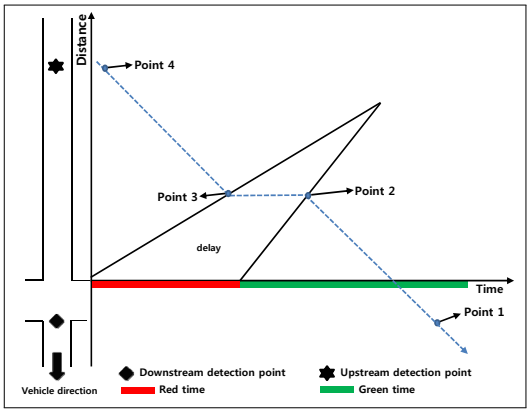
L : 구간 AB의 거리

v_f : 대상도로의 자유속도

3. 개별차량의 좌표추정

신호교차로에서 교차로를 통과하는 개별차량의 주행궤적은 신호의 변화에 따라 적색신호시간에는 차량들이 정지하게 됨으로서 대기행렬을 형성하고 녹색신호시간의 시작과 함께 생성된 대기행렬이 해소되게 된다. 이는 시공간 상에서 밀도와 교통량이 불연속적으로 나타나는 경계선을 발생시키며 이러한 파동을 신호교차로에서 발생하는 충격파로 정의 할 수 있다.

본 연구의 알고리즘은 구간검지체계를 통해 수집된 정보를 이용하여 대기행렬이 생성되는 충격파의 속도를 추정하기 위해 주기가 시작되는 시점과 정지선을 원점으로 하는 시공도 상에서 <그림 4>와 같이 개별차량의 좌표 값 4개를 추정하였다.



〈그림 4〉 시공도에서의 개별차량의 좌표
〈Fig. 4〉 Coordina/te of Individual vehicle on time-space diagram

Point 1과 Point 4의 좌표값은 상류부와 하류부의 검지기에서 수집된 정보를 통해 산정이 가능하다. Point 4는 개별차량이 상류부 검지기에서 검지된 시간과 정지선에서 상류로 이격된 상류부검지기 사이의 거리값으로 나타낼 수 있으며 Point 1은 개별차량이 하류부 검지기를 통과한 시간값과 정지선에서 하류로 이격된 하류부부검지기의 거리 값으로 교차로의 폭과 동일한 값을 가진다.

Point1과 Point4의 좌표는 식(3), 식(4)와 같으며 Point1의 시간값은 총 녹색시간 중 개별차량이 하류부검지기를 통과하는데 소요된 녹색시간과 적색시간의 합으로 나타낼 수 있다.

$$Point1(Redtime + T_i^s, w_{Down}) \quad (3)$$

$$Point4(t_i, w_{Up}) \quad (4)$$

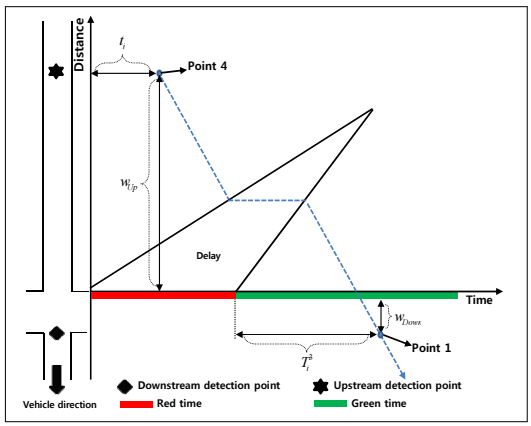
여기서,

T_i^s : 하류부 검지기 검지시간과 적색시간의 차

t_i : 차량 i의 상류부 검지기의 검지시간

w_{Down} : 정지선과 하류부 검지기 사이의 거리

w_{Up} : 정지선과 상류부 검지기 사이의 거리



〈그림 5〉 시공도에서의 Point1과 4의 좌표 추정
〈Fig. 5〉 Estimation method of coordinate (point 1, point 4)

Point 2와 Point 3은 충격파상에 위치한 차량의

좌표로서 신호시간의 변화에 따른 차량의 속도 변화가 발생하는 부분의 좌표값을 의미한다.

Point 2는 개별차량이 녹색신호에 따라 포화교통류율로 대기행렬을 이탈하면서 발생하는 충격파상에 위치하고 있다. 이는 정지선 후방으로 생성되는 충격파 $Shockwave_2$를 나타내며 정지선 후방으로 생성되는 충격파의 속도는 교통량-밀도 관계에서 최대밀도와 임계밀도의 기울기로 나타낼 수 있으며 이는 교통량-밀도 관계에 의해 항상 고정된 값으로 가정한다.

$$Point2(Redtime + T_i^1, h_i) \quad (5)$$

여기서,

$Shockwave_2$: 후방으로 생성되는 충격파의 속도

T_i^1 : $Shockwave_2$가 차량 i에 도달하는 시간

h_i : 정지선과 차량 i의 거리

총 녹색시간 중 개별차량이 하류부검지기를 통과하는데 소요된 녹색시간 T_i^3는 T_i^1과 T_i^2의 합으로 나타낼 수 있다. T_i^1은 녹색시간이 시작된 이후 대기행렬의 해소과정에서 정지한 차량이 움직이기 시작하는 시점으로 $Shockwave_2$가 개별차량에 도달하는 시간을 의미하며 T_i^2는 정지한 차량이 자유속도로 움직이기 시작하여 하류에 있는 검지기를 통과하는데 소요되는 시간간격을 의미한다.

대기행렬 내에 속하는 차량 i와 정지선과의 거리를 나타내는 h_i는 식(6)로 나타 낼 수 있다.

$$h_i = Shocwave_2 \times T_i^1 \quad (6)$$

이때, h_i와 하류부 교차로의 폭을 나타내는 w_{down}의 합은 차량이 T_i^2동안 움직인 거리이며 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

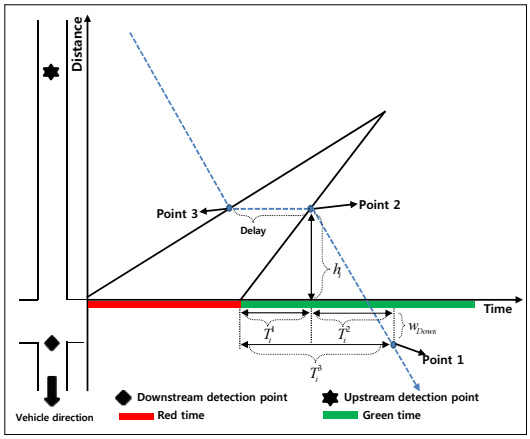
$$h_i + w_{down} = T_i^2 \times v_f \quad (7)$$

T_i^2은 T_i^3와 T_i^1의 차로 나타낼 수 있으며 식(8)을 통해 T_i^1의 값을 산정할 수 있다.

$$T_i^1 = \frac{v_f \cdot T_i^3 - w_{down}}{Shockwave_2 + v_f} \quad (8)$$

Point3의 위치좌표는 Point2와 동일한 값을 가지며, 시간좌표는 Point2의 값에서 지체를 제한 값을 가지게 된다.

$$Point3(Redtime + T_i^1 - delay_i, h_i) \quad (9)$$



〈그림 6〉 시공도에서의 Point 2와 3의 좌표 추정
〈Fig. 6〉 Estimation method of coordinate (point 2, point 3)

4. 대기행렬 길이의 추정

1) 충격파의 속도 추정

한주기 동안 검지된 개별차량의 통행시간 정보를 통해 추정된 Point 3의 좌표 값을 이용하여 접근로의 수요를 나타내는 충격파인 $Shockwave_1$의 속도를 추정하게 된다.

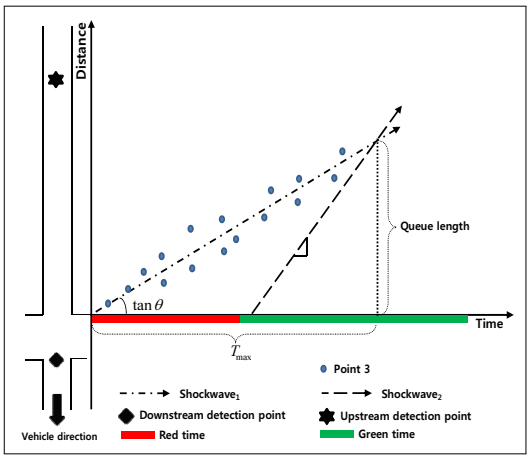
최소제곱법은 측정값(y_i)과 함수값($f(x_i)$)의 차를 제곱한 것의 총합이 최소가 되는 함수($f(X)$)값을 찾는 것으로 본 연구에서는 최소제곱법의 원리를 이용하여 충격파의 속도를 추정하였다.

시공도 상의 기울기 값인 충격파의 속도는 항상

양의 값을 가지며 정지선을 기점으로 항상 원점을 지나는 일차방정식으로 표현이 가능하다. 이때 식(10)을 통해 최소제곱법의 원리와 같이 한 주기동안 추정된 각 차량의 Point 3 좌표값과 거리가 최소가 되는 일차방정식의 기울기값을 구할 수 있다.

$$Find\ \tan\theta$$

$$Minimize \sum_{i=1}^{n} \frac{|t_i \times \tan\theta - d_i|}{\sqrt{\tan^2\theta + 1}} \quad (10)$$



〈그림 7〉 충격파의 추정방법
〈Fig. 7〉 Estimation method of shockwave

2) 대기행렬길이 산정

대기행렬길이의 산정은 대기행렬의 끝단이 정지선 후방으로 미치는 최대 길이인 후방최대대기행렬의 길이를 산출하기 위해 $Shockwave_1$와 $Shockwave_2$가 만나는 시점인 $t_{\max}$를 식(11)을 통해 산정하며 식(12)에 의해 대기행렬길이를 결정하게 된다.

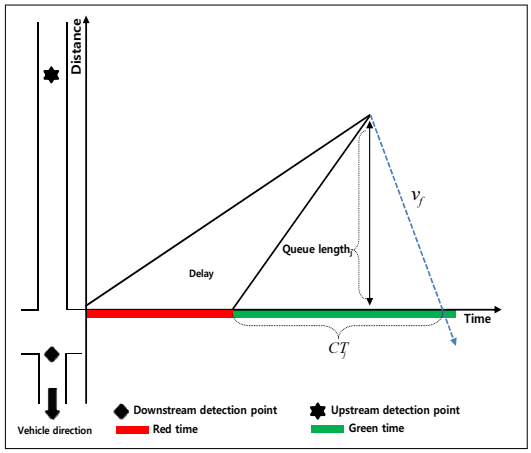
$$t_{\max} = Redtime + \frac{Shockwave_1 \times Redtime}{Shockwave_2 - Shockwave_1} \quad (11)$$

$$Queue\ length = Shockwave_1 \times t_{\max} \quad (12)$$

5. 신호제어 알고리즘

본 연구에서는 이동류별로 산정된 대기행렬길이를 통해 교차로의 최적 신호시간을 산정하고자 한다. 이동류별로 대기행렬길이가 해소되는 과정은 <그림 8>과 같이 대기행렬의 끝단이 자유속도로 정지선 방향으로 이동하게 되며 식(13)을 통해 대기행렬이 해소되는데 필요한 시간을 산정할 수 있다.

$$CT_j = \frac{Queuelenth_j}{Shockwave_2} + \frac{Queuelenth_j}{v_f} \quad (13)$$



〈그림 8〉 대기행렬 해소시간의 추정
〈Fig. 8〉 Estimation method of queue clearance time

신호시간의 계획 시 각 현시별 대기행렬을 해소하기 위한 시간의 합 X_C는 식(14)와 같으며 총 대기행렬을 해소하기 위한 시간과 주기시간의 비교를 통해 최적 주기를 결정하게 된다.

$$X_C = \sum_{j=1}^{n} CT_j \quad (14)$$

최적주기의 결정은 X_C와 주기시간의 차를 기준값 ε_C와 비교하여 결정하며 식(15)와 같이 3가지 경우에 따라 주기시간을 증가 또는 감소시킨다.

$$\begin{aligned} &If\ \ X_C > \varepsilon_C \quad then\ \ C_{Z+1} = C_Z + \triangle_c \\ &If\ \ X_C < -\varepsilon_C \quad then\ \ C_{Z+1} = C_Z - \triangle_c \\ &If\ \ |X_C| \le \varepsilon_C \quad then\ \ C_{Z+1} = C_Z \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,
$\triangle_C$: 주기시간의 증가분

다음은 결정된 주기시간에 따라 현시시간을 최적화 하기 위해 각 이동류별로 적색시간 증가분에 대한 대기행렬의 해소시간을 고려하였다. 각 이동류별 산정된 $Shockwave_1$은 각 이동류의 수요를 대변하며 적색시간의 증가에 따라 대기행렬길이의 값이 변하게 되어 변화된 대기행렬길이를 해소하기 위한 시간 또한 변하게 된다. 식(16)은 이동류별 적색시간 증가에 따른 대기행렬의 해소시간 증가분을 의미한다.

$$\triangle CT_j = \frac{\triangle Queuelength}{Shockwave_2} + \frac{\triangle Queuelength}{v_f}$$

$$\triangle Queuelength = Shocwave_1 \times \triangle Redtime + \frac{(Shockwve_1)^2 \times \triangle Redtime}{Shockwave_2 - shockwave_1} \quad (16)$$

여기서,

$\triangle Queuelegth$: 대기행렬길이의 증가분

$\triangle Redtime$: 적색시간의 증가분

현시의 분할은 전체 교차로의 대기행렬길이를 최소화 시키는데 목적이 있다. 교차로의 신호시간이 4현시로 구성된 경우 식(17)을 통해 각 현시의 신호시간을 산정하게 된다.

식(17)은 각 현시의 대기행렬 해소시간의 증가분이 고려된 총 대기행렬 해소시간과 각 방향별 현시시간과의 차를 모두 더한 합이 최소가 되는 해를 구하는 것으로 각 현시별 대기행렬이 소거되고 남는 시간이 최소가 될 수 있도록 각 현시별로 시간값을 비교하게 된다.

$$Find\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 0$$

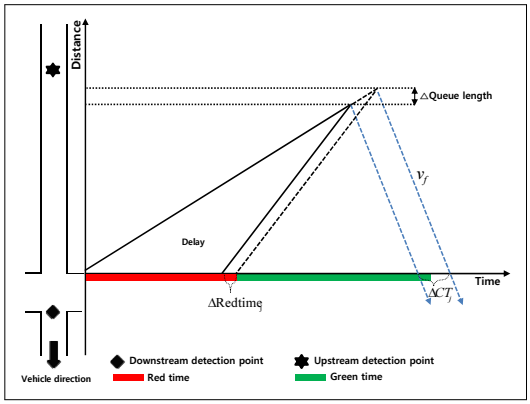
$$\min \sum_{j=1}^{4} (CT_j + \triangle CT_j - Phase_j) x_j \quad (17)$$

$$x_j = \begin{cases} -1 & Phase\ j\ is\ decresed\ by\ \triangle_s \\ 1 & Phase\ j\ is\ incresed\ by\ \triangle_s \\ 0 & Phase\ j\ is\ reminds\ the\ same \end{cases}$$

여기서,

$x_j \in \{-1, 0, 1\}$

$\triangle_s$: 현시시간의 증가분



〈그림 9〉 적색시간증가에 따른 해소시간의 증가분
〈Fig. 9〉 Increase of queue clearance time

Ⅳ. 시뮬레이션 효과분석

1. 대기행렬길이 추정 알고리즘 검증

본 연구에서 제시하는 알고리즘의 효과를 분석하기 위해 미시적 시뮬레이션인 VISSIM을 이용하였다. VISSIM의 경우 API 기능인 COM interface를 제공하고 있으며 이를 통해 개별차량의 정보수집 및 신호시간 조정이 가능하다.

먼저 신호시간을 결정하는 대기행렬길이 추정 알고리즘의 검증을 위해 모의실험을 실시하였다. 가상네트워크는 편도 3차로이며 검지기간 거리는 500m로 설정하였다. 전체 차량은 모두 승용차로 구성하였으며 모의실험을 위한 신호시간은 100초의 주기를 가지며 녹색시간은 50초 설정하였다.

시나리오는 총 4가지로 설정하였으며 모든 차량을 수집대상으로 하였다. 접근로의 포화도는 시나리오별 0.35~0.9로 알고리즘에 의해 예측된 대기행렬의 길이와 시뮬레이션 소프트웨어 상에서 측정된 대기행렬의 길이를 비교하여 평가하였다.

〈표 1〉 대기행렬 검증을 위한 시뮬레이션 시나리오 구성
〈Table 1〉 Simulation scenario for queue length estimation

Scenario	1	2	3	4
V/C	0.35	0.55	0.7	0.9
Vehicle detection rate(%)	100			

적합도의 평가를 위해 평균절대편차(MAD: Mean Absolute Deviation)와 평균절대비율오차(MAPE: Mean Absolute Percent Error)를 사용하였다.

$$MAD(m) = \frac{\sum |A_i - F_i|}{n} \quad (18)$$

$$MAPE(\%) = \frac{\sum \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right|}{n} \times 100 \quad (19)$$

여기서,

A_i : 측정값 F_i : 추정값

〈표 2〉 대기행렬 검증을 위한 시뮬레이션 결과
〈Table 2〉 Simulation result of queue length estimation

Scenario (V/C)	Seed number	Averrage Queue Length(m)		MAD(m)	MAPE(%)
		Observe	Estimate		
1 (0.35)	43	33.7	45.9	12.3	38.8
	999	36.4	48.3	12.3	50.5
	1009	37.6	47.4	10.3	32.9
	2566	35.8	48.1	12.5	45.5
2 (0.55)	247	57.9	68.4	11.3	20.5
	777	50.8	58.2	8.5	18.3
	873	56.9	66.4	9.8	18.8
	2777	69.2	80.2	11.3	17.4
3 (0.7)	72	94.7	101	8.7	9.9
	322	89.7	95.6	7.9	8.7
	432	93.5	104.2	11.6	13.2
	452	96.6	100.8	9.6	10.9
4 (0.9)	12	170.4	183.4	18	10.5
	222	168.8	174.5	16.4	9.3
	432	149.5	158.1	14.1	10.3
	3553	157.2	162.6	15.7	9

대기행렬길이를 추정하는 알고리즘의 적합도를 평가한 시나리오의 결과값은 <표 2>과 같다. 시나리오1 ~ 4는 접근로의 포화도를 증가시켜가며 측정 대기행렬 길이와 알고리즘에 의해 추정된 대기행렬 길이를 비교한 것으로 실제 대기행렬의 길이보다 추정된 대기행렬의 평균 길이가 크게 나타났으며 시나리오3까지 접근로의 포화도가 증가할수록 적합도가 높아지는 것을 알 수 있다.

시나리오4는 시나리오3의 결과값 보다 평균절대편차의 경우 결과값이 높게 나타나며 평균절대비율오차의 경우 약 10%로 시나리오3과 비슷한 결과값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 포화도가 높아짐에 따라 평균 대기행렬 길이가 길어져 더 많은 샘플 차량의 정보 수집에도 불구하고 대기행렬의 생성속도 추정값의 오차가 줄어들지 않음을 의미한다. 하지만 시니라오1 ~ 4의 분석을 통해 샘플수가 증가할 경우 평균절대비율오차의 값이 감소하여 적정 샘플차량의 수가 확보될 경우 평균절대비율오차가 약 10% 미만의 대기행렬의 길이를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

2. 신호제어 모형 모의실험

통행시간을 활용한 대기행렬길이 기반의 신호제어 모형의 효과를 분석하기 위해 좌회전 1차로, 직진 2차로로 구성된 4지교차로를 대상으로 하였으며 우회전 차량은 없다고 가정하여 동·서방향의 직진을 우선으로 하는 4현시 체계를 적용하였다.

〈표 3〉 신호제어 검증을 위한 시뮬레이션 시나리오 구성
〈Table 3〉 Simulation scenario for traffic signal control

Unit : veh/hr

	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3	
Bound	East & West	North & South	East & West	North & South	East & West	North & South
Warm-up period (0:10)	1100	1100	1100	1100	1100	1100
0:00~ 0:10	1100	1100	1100	1100	1100	1100
0:10~ 0:20	1100	1100	1500	1100	1100	1900
0:20~ 0:30	1100	1100	1500	1500	1100	1900
0:30~ 0:40	1100	1100	1100	1500	1100	1100
0:40~ 0:50	1100	1100	1100	1100	1100	1100
0:50~ 0:60	1100	1100	1100	1100	1100	1100

시나리오의 구성은 <표 3>과 같이 3개로 구성하였다. 총 4,200초의 분석시간 중 초기 600초는 warm-up period를 두었으며 나머지 3,600초의 시간을 이용하여 신호제어 모형의 효과를 분석하였다. 시나리오1의 경우 분석 시간동안 전 방향에 동일한 교통량이 통과하게 되며 시나리오 2와 3의 경우 일시적으로 특정방향에 교통량을 증가시켜 신호제어 모형을 평가하였다. 각 시나리오는 Transyt-7F로 분석된 정주기 신호시간의 결과값과 신호제어모형의 결과값의 비교를 위해 대기행렬 길이 및 지체를 효과척도로 사용하였다.

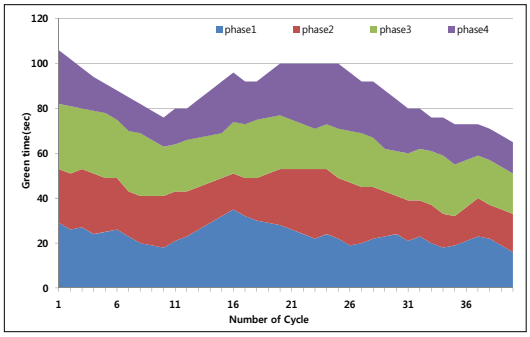
시나리오별 신호제어 모형의 경우 최적주기를 위한 파라미터의 값을 기준 값(ε_C) 10초, 증가분($\triangle_C$) 4초를 적용하였다. 또한 과도한 주기의 증가 및 감소를 막기 위해 최대주기는 150초, 최소주기는 60초로 적용하였으며 각 현시의 최소현시시간을 15초로 제한하였으며 현시분할을 위한 현시의 증가분($\triangle_s$)은 1초를 적용하여 분석하였다.

시나리오1 ~ 3의 평가결과 <표 4>와 같으며 전체적으로 통행시간을 활용한 대기행렬길이 기반의 신호제어 모형의 교차로의 평균대기행렬의 길이와 지체값이 작은 것을 알 수 있다.

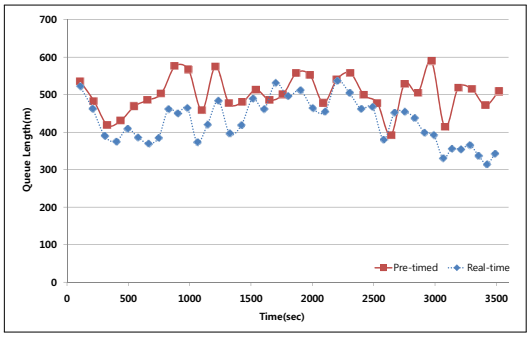
시나리오1의 경우 제시된 모형을 통해 <그림 10>과 같이 주기 및 현시시간이 결정되었으며 시간에 따른 교차로 평균 대기행렬길이의 변화는 <그림 11>과 같이 정주기식과 유사하거나 적은 값을 보여 수요의 변화에 적절히 대응하였음을 알 수 있다.

〈표 4〉 신호제어 검증 검증을 위한 시뮬레이션 결과
〈Table 4〉 Simulation result of for traffic signal control

		Average Queue length (m/cycle)	Average Delay (sec/veh)
Scenario1	pre-timed	501.8	44.8
	Real-time	426.5	41.4
Scenario2	pre-timed	670.1	55.0
	Real-time	607.7	52.5
Scenario3	pre-timed	1160.8	112.1
	Real-time	770.2	73.5

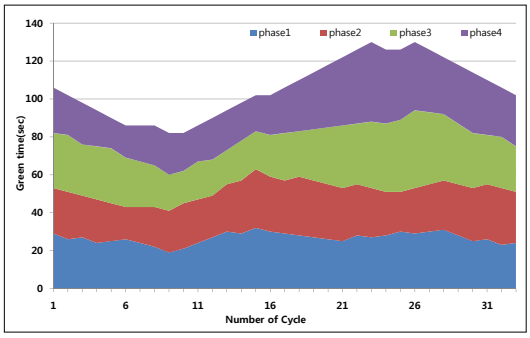


〈그림 10〉 시나리오 1의 신호시간의 변화
〈Fig. 10〉 Traffic signal timings of scenario1

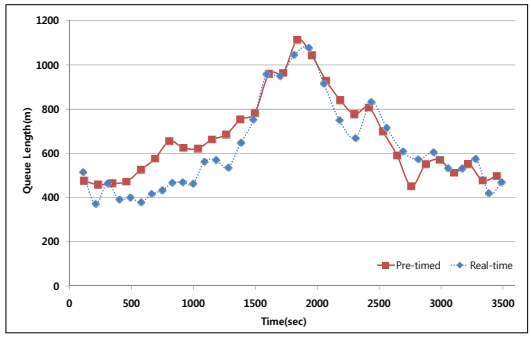


〈그림 11〉 시나리오 1의 대기행렬길이 변화
〈Fig. 11〉 Changes in average queue length of scenario1

시나리오2는 동서방향의 경우 0:10~0:30에 교통량이 증가하며 남북방향의 경우 0:20~0:40에 교통량이 증가하여 0:20~0:30에는 모든 방향에 교통량이 증가하게 되어 <그림 11>과 같이 주기 증가 및 동서와 남북방향별 순차적으로 현시시간이 배분된다.



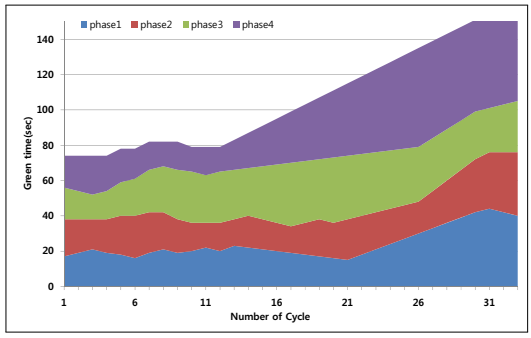
〈그림 12〉 시나리오 2의 신호시간의 변화
〈Fig. 12〉 Traffic signal timings of scenario2



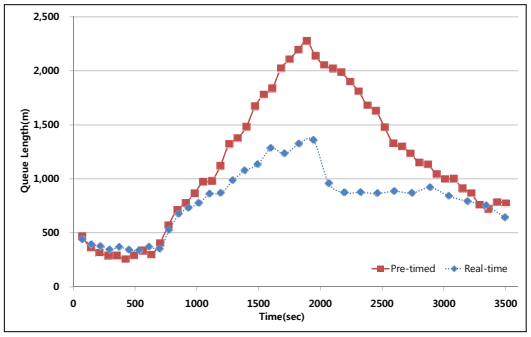
〈그림 13〉 시나리오 2의 대기행렬길이 변화
〈Fig. 13〉 Changes in average queue length of scenario2

시간에 따른 교차로의 평균 대기행렬길이 또한 전체적으로 적은 값을 보이지만 양방향의 교통량이 집중되는 0:20~0:30 사이에는 정주기식의 신호와 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다.

시나리오3의 경우는 0:10~0:30에 남북방향에만 교통량의 증가시킨 경우로 주기 및 남북방향의 이동류와 관련된 현시시간이 <그림 14>과 같이 증가하였다. 따라서 <그림 15>와 같이 교차로의 평균 대기행렬길이의 변화는 정주기식의 경우 지속적으로 증가하여 수요의 감소(0:30~)와 함께 평균 대기행렬길이가 감소하는 모습을 보인다. 하지만 통행시간을 활용한 대기행렬길이 기반의 신호제어 모형의 평균 대기행렬길이의 변화는 정주기식과 동일하게 교통량이 증가함에 따라 증가하지만 주기의 증가 및 남북방향의 현시에 동서방향 보다 많은 시간이 배분되어 정주기식에 비하여 증가의 폭이 적은 것을 알 수 있다.



〈그림 14〉 시나리오 3의 신호시간의 변화
〈Fig. 14〉 Traffic signal timings of scenario3



〈그림 15〉 시나리오 3의 대기행렬길이 변화
〈Fig. 15〉 Changes in average queue length of scenario3

시나리오1 ~ 3의 분석결과 대기행렬길이 기반의 신호제어 모형을 통한 교차로의 평균 대기행렬 길이를 최소화하는 신호운영의 효과가 있음을 확인하였다. 하지만 시나리오3의 경우 교통량이 집중되는 특정 방향에 신호시간을 적절하게 배분하였지만 시나리오2의 경우 양방향 교통량이 증가하는 분석시간대에는 대기행렬이 정주기식 신호와 크게 다르지 않아 주기 및 현시시간이 적절하게 산정되지 않았음을 알 수 있다. 따라서 수요의 변화에 따른 적절한 파라미터의 값의 선정하기 위한 민감도 분석이 필요할 것으로 판단된다.

Ⅴ. 결론 및 향후연구과제

본 연구는 개별차량의 통행시간 정보를 이용하여 접근로의 대기행렬 길이 산정에 필요한 개별차량의 좌표를 추정하였으며 추정된 좌표를 통해 접근로 수요에 따른 충격파의 속도를 산정하였다. 산정된 충격파의 속도를 통해 대기행렬의 길이를 예측하였으며 이를 통해 단일 교차로에서 교차로의 전체적인 대기행렬길이의 합이 최소가 되는 신호시간을 산정하였다. 알고리즘의 효과를 측정하기 위해 마이크로시뮬레이션 소프트웨어인 VISSIM을 활용하여 대기행렬 길이 추정에 대한 적합도 및 실시간 신호제어의 효과를 분석하였으며 분석 결과 개별차량의 통행시간을 이용하여 대기행렬 길이의 추정이 가능하며 이를 활용하여 교차로의 대기행렬

길이의 합이 최소가 되는 신호제어가 가능함을 확인하였다.

본 연구는 개별차량의 통행시간을 이용하여 대기행렬 길이 추정 및 실시간 신호제어 방안을 연구하였으나 과포화상황 또는 대기행렬이 길어질 경우 대기행렬길이의 추정값과 실제값과의 차가 커지는 단점 및 신호시간 산정 시 주기 및 현시의 증가분에 따라 결과값이 크게 달라지는 단점이 있다.

따라서 향후 대기행렬 길이의 정확한 추정을 위해 먼저 교차로에서 차량의 가·감속에 의한 개별차량의 주행특성을 반영하고 접근로의 차량군에 따른 밀도의 변화를 고려한 충격파의 속도 산정 방안이 연구되어야 하며 수요 변화에 따른 최적의 신호시간 산정을 위해 추가적으로 파라미터 값의 민감도를 분석이 필요할 것으로 판단된다.

또한, 독립 교차로를 대상으로 한 본 연구를 연속된 신호교차로로 확장하기 위해서는 연속된 구간검지체계를 통해 추가적으로 수집이 가능한 정보를 구분하고 옵셋 및 연동과 관련된 교통변수를 추정하기 위한 방법론을 연구하여 현재 지점검지기를 활용한 실시간 신호제어시스템인 COSMOS와의 비교연구가 필요할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Static Korea, E-national Indicator : The Status of Registered Motor Vehicles, retrieved Aug., 20, 2013, from http://www.index.go.kr/

[2] Static Korea, E-national Indicator : The Status of Traffic Congestion Cost, retrieved Aug., 20, 2013, from http://www.index.go.kr/

[3] N. M. Sung, J. S. Park, , H. S. Cho, D. M. LEE , D. H. KIM, and Y. C. KIM, *The Development of Highway Policies to Mitigate Traffic Congestion on Urban Area*, The Korea Transportation Institute, 2012

[4] Hankookilbo, High-pass 5 years... 7,730,000 dissemination, retrieved Dec., 20, 2012, from http://news.hankooki.com/

[5] T. W. DO, *The principles of Transportation engineering*, 2nd Ed., 2004

[6] Newell, G. F. , ″A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, Part I: General theory″, *Transportation Research Part B*, vol. 27, pp. 281-287, 1993

[7] M. Massart, M. Koshi and M. Kuwahara, “Traffic Signal Control based on Travel Time Information from Beacons”, *World Congress on Inteligent Transportaion System*, Yokohama, Japan, 1995

[8] Xinkai Wua, Henry X. Liua and Douglas Gettmanb, ″Identification of oversaturated intersections using high-resolution traffic signal data″, *Transportation Research Part* C, vol. 18, Issue 4, pp.626-638, August 2010

[9] Ponlathep LERTWORAWANICH, ″A self tuning signal control algorithm for isolated intersections based on time space diagrams″, *Eastern Asia Society of Transportation Studies*, vol. 8, 2011

[10] Yang Cheng, Xiao Qin, Jing Jin, Bin Ran, and Jason Anderson, ″ 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, 2011

[11] Aoxiang Wu, Xiaoguang Yang, ″Real-time Queue Length Estimation of Signalized Intersections Based on RFID Data″, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 96, pp.1477‐1484, Shenzhen, China, Nov. 2013

[12] C. K LEE, “Queue Length Based Real-Time Traffic Signal Control Methodology Using Image Detectors”, Ph.D Dissetation, *Aju university*, 1998

[13] H. J. KIM, Y. C. KIM and J. H. KIM, ″Development of Traffic Signal Control Strategy by Balancing Queue Lengths for Oversaturated Traffic Condition″, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 2, no. 2, pp.13-22, Dec. 2002

[14] Y. J. JEONG, Y. C. KIM and H. S. Baek, "Development of The Signal Control Algorithm Using Travel Time Informations of Sectional Detection Systems", *Journal of Korea Society of Transportation*, vol. 23, no. 8, pp.181-191, Dec. 2005

[15] H. S. PARK, Y. C. KIM, H. Y. MOON and H. C. KIM, "A Development of Traffic Queue Length Estimation Model Using Occupancy Time Per Vehicle Based on COSMOS", *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, vol. 27, no. 2, pp.159-164, Mar. 2007

저자소개

이 민 형 (Lee, Minhyoung)
2013년 3월 ~ 현 재 : 서울시립대학교 박사과정 (교통공학 전공)
2013년 2월 : 서울시립대학교 공학석사 (교통공학 전공)
2007년 2월 : 서울시립대학교 공학사 (교통공학 전공)
e-mail : min632954@gmail.com
연락처 : 02) 6490-5646

김 영 찬 (Kim, Youngchan)
1996년 3월 ~ 현 재 : 서울시립대학교 교통공학과 교수
1993년 3월 ~ 1996년 2월 : 명지대학교 교통공학과 조교수
1987년 1월 ~ 1990년 12월 : 미국 Texas A&M University 공학박사 (교통공학 전공)
1983년 3월 ~ 1985년 2월 : 서울대학교 공학석사 (도시전공)
1979년 3월 ~ 1983년 2월 : 서울대학교 공학사 (도시전공)

정 영 제 (Jeong, Youngje)
2011년 3월 ~ 현 재 : 서울시립대학교 교통공학과 연구교수
2011년 2월 : 서울시립대학교 공학박사 (교통공학 전공)
2006년 2월 : 서울시립대학교 공학석사 (교통공학 전공)