독립교차로의 통행시간 기반 신호제어 알고리즘

정영제 · 박상섭 · 김영찬*

서울시립대학교 교통공학과

Traffic Signal Control Algorithm for Isolated Intersections Based on Travel Time

JEONG, Youngje · PARK, Sang Sup · KIM, Youngchan*

Department of Transportation Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

Abstract

This research suggested a real-time traffic signal control algorithm using individual vehicle travel times on an isolated signal intersection. To collect IDs and passing times from individual vehicles, space-based surveillance systems such as DSRC were adopted. This research developed models to estimate arrival flow rates, delays, and the change rate in delay, by using individual vehicle's travel time data. This real-time signal control algorithm could determine optimal traffic signal timings that minimize intersection delay, based on a linear programming. A micro simulation analysis using CORSIM and RUN TIME EXTENSION verified saturated intersection conditions, and determined the optimal traffic signal timings that minimize intersection delay. In addition, the performance of algorithm varying according to market penetration was examined. In spite of limited results from a specific scenario, this algorithm turned out to be effective as long as the probe rate exceeds 40 percent. Recently, space-based traffic surveillance systems are being installed by various projects, such as Hi-pass, Advanced Transportation Management System (ATMS) and Urban Transportation Information System (UTIS) in Korea. This research has an important significance in that the propose algorithm is a new methodology that accepts the space-based traffic surveillance system in real-time signal operations.

본 연구에서는 개별차량의 구간통행시간 정보를 이용한 독립교차로의 실시간 신호제어 알고리즘을 개발하였다. DSRC와 같이 개별차량의 ID와 검지시간 정보를 수집할 수 있는 검지체계를 적용하였으며, 개별차량의 통행시간 정보로부터 도착교통류율, 지체, 적색시간 변화에 따른 지체 변화량을 산정하기 위한 모형을 정립하였다. 통행시간 기반 신호제어 알고리즘은 교차로 지체를 최소화 시키기 위한 현시별 적색시간 변화량을 결정하며, 선형계획모형을 적용하여 신호시간의 최적화 과정을 수행한다. 알고리즘의 효과평가를 위해 CORSIM과 RUN TIME EXTENSION을 적용한 미시적 시뮬레이션 분석을 시행하였으며, 이동류의 포화상태를 확인하여 지체 최소화를 위한 신호시간이 산정됨을 확인하였다. 또한 Probe 차량의 비율에 따라 이동류의 지체추정 성능을 확인하였으며, 특정 시나리오에 한정된 결과이나 40% 이상 Probe 차량 비율이 확보되는 경우 효과적 신호제어가 가능함을 확인하였다. 최근 국내 교통관리분야에서는 하이패스, 첨단교통관리시스템(ATMS), 광역교통정보사업(UTIS) 등 개별차량의 구간정보를 수집할 수 있는 검지체계가 급격히 확산되고 있으며, 본 연구는 실시간 신호운영 분야에서 검지체계의 변화를 수용하기 위한 방안으로서 새로운 형태의 신호제어 방법론을 제시하였다는데 의의가 있겠다.

Key Words

Arrival Traffic Flow Rate, Delay Change, Linear Programming, Real Time Traffic Signal Control, Travel Time
도착교통류율, 지체 변화량, 선형계획모형, 실시간 신호제어, 통행시간

* : Corresponding Author
yckimm@uos.ac.kr, Phone: +82-2-2210-2671, Fax: +82-2-2210-2653

Received 30 January 2012, Accepted 11 December 2012

수식표기의 정의

$d_{i,j}$	i 이동류, j 번째 차량의 지체(초)
$TT_{i,j}$	i 이동류, j 번째 차량의 통행시간(초)
L_i	i 이동류의 링크 길이(m)
FFS_i	i 이동류의 자유속도(m/s)
s_i	i 이동류의 출발교통류율(대/초)
λ_i	i 이동류의 도착교통류율(대/초)
$t_{i,j}$	i 이동류, j 번째 차량의 교차로진출시각(초)
r_i	i 이동류의 적색시간(초)
g_i	i 이동류의 녹색시간(초)
TD_i	i 이동류의 총 지체(초-대)
D_i	i 이동류의 차량당 평균지체(초/대)
T_i	i 이동류의 적색시간 변화량(초)
w_i	i 이동류의 여유녹색시간(초)
ΔTD_i	i 이동류의 총 지체 변화량(초-대)
ΔD_i	i 이동류의 평균지체 변화량(초/대)
C	주기길이(초)
Q_i	i 이동류의 초기대기행렬 길이(대)
c_i	i 이동류의 용량(대/초)
p	주기번호
ΔC	단위주기 변화량(초)
δ	주기변화를 위한 지체변화의 임계값(초-대)
n	교차로의 총 현시개수
ND_i	i 이동류의 다음 주기 평균 지체(초/대)
u_i	적색시간 변화량 T_i 의 최소값(초)
mg_i	i 이동류의 최소 녹색시간(초)

I. 서론

2011년 9월 한국도로공사의 보고에 따르면 고속도로의 전차요금징수체계인 하이패스 장착차량이 600만대를 넘어섰으며, 하이패스 시스템 구축 3년 9개월 만에 전체 등록차량의 3대 중 1대에 단말기가 보급되었다 (Construction Times, 2011). 하이패스는 국내 교통관리에서 무선통신을 기반으로 하는 검지체계가 적용된 대표적 사례에 해당한다. 최근 서울, 부산, 대구, 광주 등 대도시권에서는 첨단교통관리시스템(ATMS), 광역교통정보사업(UTIS)을 구축·운영 중에 있으며, 이들은 통신기술에서는 차이가 있으나 교통관리의 관점에서 무선통신 기반의 구간검지체계로부터 개별차량의 구간통행시간 정보를 교통정보제공 서비스에 이용하고자 하는 취지는 동일하다. 특히 첨단교통관리시스템에서는 한국도로공사의 하이패스 단말기 부착차량을 정보 수집원으로 이용함에 따라 DSRC Dedicated Short Range Communication)의 노변단말기를 설치하는 것만으로도 유

용한 교통정보의 수집이 가능한 상황이다. 하이패스 단말기 부착 차량의 증가세는 향후 새로운 통신방식의 통행요금 징수 시스템이 도입되기 전까지 꾸준히 지속될 것으로 판단되며, 이러한 변화는 기존 ITS 서비스의 적용방식에 있어 변화를 가져올 것으로 판단된다.

국내 교통관리분야에서는 과거 루프, 영상검지기 등 지점검지체계가 주류를 이루었으며, 특히 도시부 간선도로의 ITS 중 핵심 서비스 분야라 할 수 있는 실시간 신호제어 서비스는 지점검지체계에 해당하는 루프검지기의 점유율 및 교통량 정보를 근간으로 한다. 이는 국내의 COSMOS 뿐만 아니라 SCATS, SCOOT 등 국외 신호제어시스템에서도 동일하다. 이때 루프검지체계는 다차로 구간에서 차로별 검지기 설치가 요구되며, 점유율 정보는 100% 이상을 나타내지 못하여 과포화상태에서는 대기행렬 등 지점정보로부터 추정된 별도의 구간정보를 이용한다(Seoul Metropolitan Police Agency, 2001; Bonneson, 2009).

본 연구에서는 현재까지 고속도로 요금징수체계, 교통정보제공의 정보수집체계로만 머물고 있는 무선통신 기반의 구간검지체계를 타 ITS 서비스 분야에서 활용하기 위한 방법으로 통행시간을 기반으로 하는 실시간 신호제어 알고리즘을 제시하고자 한다. DSRC와 같이 개별차량의 ID와 검지기 통과시각을 수집할 수 있는 검지체계를 이용하여 개별차량 단위로 구간통행시간을 수집하며, 이를 이동류별 지체 및 지체변화량으로 산정하여 지체를 최소화하는 최적 신호시간 산정모형을 제시하였다. 본 연구에서는 독립교차로만을 대상으로 하며, 실시간 신호제어를 위한 주기길이 및 현시분할 과정을 제시하였다. 통행시간을 기반으로 하는 독립교차로의 신호제어 알고리즘을 정립하여 미시적 시뮬레이터인 CORSIM과 API 모듈을 이용하여 효과분석을 수행하였다.

II. 구간정보 기반의 실시간 신호제어

구간검지체계의 통행시간 및 지체 정보를 기반으로 하는 실시간신호제어와 관련된 연구는 지진의 영향으로 매설식 검지체계의 유지관리에 어려움이 있는 일본에서 주요 연구결과들이 제시된바 있으며, 국내에서는 DSRC를 기반으로 하는 차세대 무선통신 신호제어시스템의 서비스시스템으로 통행시간 기반 신호제어 알고리즘이 제시된바 있다. 본 연구에서는 다양한 형태의 신호제어시스템 중 구간정보 기반으로 하는 실시간 신호제어와 관련

된 연구만을 대상으로 고찰하였다.

일본의 통행시간 기반 신호제어와 관련한 연구로서 Massart et al. (1995)는 노선에 설치된 비컨형식 무선검지체계를 기반으로 통행시간을 수집하여 실시간 신호제어를 수행하는 알고리즘을 제시한바 있다. 연속된 두 개의 검지체제로부터 구간통행시간 정보를 수집하며, 자유속도 통행시간과의 차이로부터 개별차량의 지체정보를 수집한다. 이때 결정적 지체모형에 의해 지체의 크기가 d 이고, t 시각에 교차로를 진출한 개별차량은 Figure 1의 상단부와 같이 표현된다. 지체 프로파일은 교차로 진출시각에 따라 지체크기를 배치한 것으로 Figure 1의 하단부와 같이 표현되며, 지체의 크기가 0이 되는 지점을 대기행렬의 해소시각으로 판단한다. 해당 연구에서는 비포화상태만을 대상으로 함에 따라 최대 지체는 적색시간과 동일한 크기를 나타내며, 녹색시간 이내에 대기행렬은 모두 해소된다. 대기행렬 해소시간 동안에 지체를 경험한 Probe 대수와 주기길이 동안에 전체 Probe 대수의 비율로부터 해당 이동류의 도착교통유량을 추정하기 위한 모형이 제시되었으며, 이후 Webster 방식의 주기길이 산정과 교통량 비율에 따른 현시분할을 매주기 수행한다. 직진만으로 구성되는 2현시 체계의 4지 독립교차로에 대한 시뮬레이션 분석결과, Probe 차량의 비율이 30% 이상 유지될 경우 지점 검지체계에 준하는 실시간 신호제어가 가능함을 확인하였다. 그러나 대기행렬 해소시간의 산정과정에서 명확히 제시되지 못하였다. 또한 Asano et al. (2000, 2001)는 기존 Massart 연구의 발전된 형태로써 개별차량의 지체시간으로부터 도착교통유량과 출발교통유량을 추정함으로써 지체변화 매트릭스를 작성하여 실시간 신호제어를 수행하는 신호제어 알고리즘을 제시한 바 있다. Asano의 연구는 신호시간의 산정과정에서 주기 및 현시 변화에 따른 지체 변화의 매트릭스를 작성하여 단계적으로 신호시간 변화가 일어날 수 있도록 하였다. 시뮬레이션 분석을 통해 교통량 변화에 따른 신호시간의 대응을 확인하였으며, 수요 증가 이후 감소 단계에서 효율적 신호운영이 가능함을 확인하였다.

구간검지체계를 기반으로 하는 국내 연구로서 Jeong et al. (2005)은 구간검지체제로부터 산정되는 통행시간으로부터 결정적 지체모형을 이용하여 이동류별 대기행렬을 산정하며, 기존 COSMOS에서와 동일한 방식으로 이동류별 대기행렬 균형을 수행하는 실시간 신호제어 알고리즘을 제시한바 있다. 또한 Kim (2006)은 구간검지체계의 통행시간을 이용하여 접근로 총 지체를 산정하며, 미국도로용량

Figure 1. Example of delay profile

편람의 지체모형을 이용하여 평균지체로부터 교통수요를 예측하기 위한 방법을 제안한 바 있다. 추정된 교통수요를 기반으로 Webster 모형을 이용한 실시간 신호제어 알고리즘을 제시한바 있다. DSRC를 이용하는 신호제어시스템을 개발하기 위한 프로젝트인 '차세대 무선통신 신호제어시스템 개발'에서는 DSRC 구간검지체제로부터 통행시간을 수집하고, 이동류별 차량당 평균지체의 변화율을 도입하여 이동류별 지체 균등화를 위한 실시간 신호제어를 수행한다. 본 연구에서는 안양시 국토연구원사거리 등 시민대로 축의 5개 교차로를 대상으로 TOD제어와의 비교평가가 수행되었으며, TOD 제어 대비 이동류별 지체의 표준편차가 10% 이상 감소된 결과를 확인하였다 (Kim, 2007).

구간검지체계를 기반으로 하는 실시간 신호제어시스템 및 알고리즘에 대한 고찰결과 대부분의 연구들이 개별차량의 통행시간 정보로부터 얻어지는 지체를 대기행렬 길이, 대기행렬 해소시간, 수요교통량 등으로 변환하여 신호제어를 위한 변수로 이용하며, Webster 모형을 기반으로 신호제어를 수행하는 방식을 적용하고 있다. 본 연구에서는 통행시간 및 지체 정보를 신호제어에 직접이용하기 위해 적색시간 변화에 따른 지체 변화량 산정모형을 제시하며, 이후 지체 최소화를 위한 선형계획 모형을 기반으로 하는 실시간 신호제어 모형을 제시하고자 한다.

III. 통행시간 기반 신호제어 알고리즘

구간검지체제로부터 얻어지는 통행시간 정보를 이용하는 실시간 신호제어 알고리즘 개발을 위해 검지체계의 레이아웃을 Figure 2와 같이 링크별 구간통행시간의 수집이 가능하도록 지정하였다. 개별 링크의 진입 및 진출부에서

Figure 2. Detector layout

DSRC와 같이 개별차량의 ID 및 통과시각을 수집할 수 있는 차량검지체계의 적용을 가정하였으며, 상하류부 검지기의 통과시각 차이로부터 개별차량의 통행시간을 산정할 수 있다. i 이동류, j 차량의 지체 $d_{i,j}$ 는 식(1)과 같이 구간통행시간과 자유속도 통행시간과의 차이로부터 산정되며, 이때 통행시간은 신호교차로로 인한 지체를 포함하게 된다.

$$d_{i,j} = TT_{i,j} - L_i / FFS_i \quad (1)$$

본 연구에서의 구간통행시간 기반 실시간 신호제어 알고리즘은 개별차량의 ID 및 검지기 통과시각정보를 수집하여 매 주기 종료 시 개별차량의 교차로 진출시각과 구간통행시간을 산정한다. 이후 최소자승법의 선형회귀분석을 통해 교차로 도착교통류율을 추정하게 되며, 이후 결정적 지체모형을 이용하여 이동류별 지체 및 적색시간 변경에 따른 차량당 평균 지체의 변화량을 추정한다. 주기길이는 이전주기와 현재주기 간의 교차로 총 지체 변화에 따라 증감여부가 결정되며, 이후 혼합정수 선형계획 모형을 이용하여 교차로 전체의 지체를 최소화하기 위한 현시분할을 수행한다.

구간통행시간 기반 실시간 신호제어 알고리즘의 첫 번째 과정으로 교차로 지체를 포함하는 개별차량 구간통행시간으로부터 이동류별 도착교통류율을 추정하기 위한 과정이 수행된다.

i 이동류의 출발교통류율 s_i 를 상수로 가정하여 Figure 3과 같이 교차로 진출시각 $t_{i,j}$ 와 지체 $d_{i,j}$ 의 크기로부터 개별차량의 도착 좌표를 추정할 수 있다. 출발교통류율에 의한 차량출발좌표는 $(t_{i,j}, s_i t_{i,j} - s_i r_i)$ 로 표현되며, 이때 차량도착좌표는 $(t_{i,j} - d_{i,j}, s_i t_{i,j} - s_i r_i)$ 로 표현된다. 개별차량 도착좌표들에 식(2), (3)과 같이 최소자승법을 이용하여 X 절편에 해당하는 도착교통류율 추정치 $\hat{\lambda}_i$ 와 Y 절편에 해당하는 초기대기행렬 추정치 $\hat{Q}_i$ 를 산정할 수 있다. 이때 도착교통류율 좌표의 지체 평균을 의미하는 $\bar{X}_i$ 와 누적차량대수의 평균을 의미하는 $\bar{Y}_i$ 를 이용하

Figure 3. Estimation method of arrival traffic flow rate

여 선형회귀분석을 수행한다. 이러한 도착교통류율 산정 방식은 포화상태와 관계없이 동일 방식을 적용한다.

$$\hat{\lambda}_i = \sum_{j=1}^m (X_{i,j} - \bar{X}_i) (Y_{i,j} - \bar{Y}_i) / \sum_{j=1}^m (X_{i,j} - \bar{X}_i)^2 \quad (2)$$

$$\hat{Q}_i = \bar{Y}_i - \hat{\lambda}_i \bar{X}_i \quad (3)$$

이때 회귀분석에 적용되는 개별차량의 도착교통류 좌표는 Figure 3에서와 같이 고정된 출발교통류율로부터 좌표의 추정이 가능한 차량, 즉 지체를 경험한 차량 만을 대상으로 하며, 대기행렬 해소 이후 관측되는 차량들의 좌표는 분석대상에서 제외하였다. 출발교통류율은 별도의 추정과정을 수행하지 않으며, 본 연구에서는 상수값을 적용하였다.

개별차량의 지체와 교차로 진출시각 정보로부터 도착교통류율을 추정한 이후 결정적 지체모형을 이용하여 이동류별 총 지체와 차량당 평균 지체, 지체 변화량을 산정하며, 본 연구에서는 지체의 산정과정을 비포화과 포화상태로 구분하여 제시하였다.

첫째, 비포화 상태에서 총 지체는 결정적 지체모형의 균일지체에 해당하며, 지체의 크기는 Figure 4에서 ABC 의 면적에 해당하여 식(4)와 같이 도착 및 출발교통류율과 적색시간의 크기를 이용해 표현할 수 있다. 이때 차량당 평균지체는 식(5)와 같이 총 지체 TD_i 에 총 차량대수 $\lambda_i C$ 를 나누어 산정한다.

$$TD_i = ABC = \frac{\lambda_i r_i^2}{2(1 - \lambda_i / s_i)} \quad (4)$$

$$D_i = TD_i / \lambda_i C = \frac{r_i^2}{2C(1 - \lambda_i / s_i)} \quad (5)$$

비포화 상태에서 지체의 산정방식은 도로용량편람에서의 결정적 지체모형의 면적을 이용한 균일지체의 산정과 동일한 원리가 사용되었다. 이때 적색시간의 변화량 T_i 에 따른 이동류의 총 지체 변화량 ΔTD_i 를 산정하며, ΔTD_i 는 Figure 4에서 AB_1C_1 와 ABC 의 면적차이로서 식(6)과 같이 표현된다. 차량당 평균지체의 변화량 ΔD_i 는 식(7)과 같이 ΔTD_i 에 해당 주기의 도착차량 대수를 의미하는 $\lambda_i C$ 를 나누어 산정한다.

$$\Delta TD_i(T_i) = AB_1C_1 - ABC = \frac{T_i \lambda_i (2r_i + T_i)}{2(1 - \lambda_i/s_i)} \quad (6)$$

$$\Delta D_i(T_i) = \Delta TD_i(T_i) / \lambda_i C = \frac{T_i (2r_i + T_i)}{2C(1 - \lambda_i/s_i)} \quad (7)$$

비포화 상태에서 적색시간 동안 생성된 대기행렬은 녹색시간 내에 모두 해소되며, 이때 대기행렬 해소 이후 여유녹색시간 w_i 는 식(8)과 같이 산정되며, 향후 적색시간 변화량 T_i 의 최대값으로 이용된다.

$$w_i = \frac{\lambda_i r_i}{s_i - \lambda_i} \quad (8)$$

둘째, 과포화 상태에서의 총 지체는 비포화 상태에서와 동일한 방법으로 이동류별 도착교통류를 산정 이후 Figure 5에서 ABC 와 $DEFG$ 면적의 합을 이용하여 계산한다. 이중 ABC 는 비포화 상태와 동일한 도로용량편람의 균일지체에 해당하는 부분이며, $DEFG$ 는 과포화로 인한 추가지체와 증분지체에 해당한다. 도로용량편람에서는 과포화 상태의 추가지체를 초기대기행렬의 크기 변화에 따라 3단계로 구분하고 있으나, 본 연구에서는 지체 산정과정을 간략화 하여 신호제어에 적용이 용이하도록 하였다. 과포화 상태의 총 지체 산정과정은 식(9)와 같이 적색시간 r_i , 녹색시간 g_i , 출발교통류를 s_i 를 이용한 균일 지체 부분과 초기대기행렬의 크기 Q_i , 주기길이 C , 용량 c_i 를 이용한 추가지체 부분으로 구분되며, 결정적 지체모형의 면적변화를 이용하였다.

$$TD_i = \frac{1}{2} r_i s_i g_i + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{c_i} (Q_i + \lambda_i C)^2 - \lambda_i C - \frac{1}{c_i} Q_i \right] \quad (9)$$

$$D_i = TD_i / \lambda_i C \quad (10)$$

과포화 상태에서 적색시간 변화량 T_i 에 따른 총 지체의 변화량 ΔTD_i 는 Figure 5에서 균일지체의 면적변화량에

해당하는 AB_1C_1 와 ABC 의 면적차이와 추가지체의 변화량에 해당하는 $DEFG$ 와 DE_1F_1G 의 면적차이의 총 합에 해당하며, 식(11)과 같이 표현된다. 차량당 평균지체의 변화량은 식(12)와 같이 비포화 상태와 동일한 방법으로 총 지체의 변화량에 해당 주기 총 도착차량 대수를 나누어 산정한다.

$$\Delta TD_i(T_i) = \frac{1}{2} \frac{CT_i}{s_i g_i (g_i + T_i)} [(Q_i + \lambda_i C)^2 - Q_i] - \frac{1}{2} s_i T_i (C - 2g_i - T_i^2) \quad (11)$$

$$\Delta D_i(T_i) = \Delta TD_i(T_i) / \lambda_i C \quad (12)$$

본 연구에서는 출발교통류율과 자유속도 통행시간을 상수로 가정하고, 개별차량의 통행시간 정보로부터 지체를 산정하여 도착교통류율을 추정하는 방법을 제시하였다. 이후 결정적 지체모형의 면적산정을 통해 평균지체, 적색시간 변화에 따른 지체 변화량을 산정하기 위한 모형을 제시하였다.

이동류별 지체 및 지체 변화량 산정 이후 주기 길이 결정 및 현시 분할이 이루어지며, 주기는 식(13)과 같이 p 주기와 $p-1$ 주기의 교차로 총 지체 변화에 따라 증감여부가 결정된다. 총 지체의 변화량이 지체 변화의 임계치 δ 를 초과하는 경우 단위주기 길이 ΔC 의 크기로 주기 증가가 이루어지며, 반대로 지체가 감소하는 상황에서는 ΔC 크기로 주기 감소가 이루어진다. 또한 지체 변화량의 절대값이 임계치 이내에 존재하는 경우 현재 주기 길이를 유지한다. 지체변화량의 임계치 δ 와 단위주기길이 변화량 ΔC 는 교차로 및 교통상황의 조건에 따라 결정한다.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n TD_i^{p-1} - \sum_{i=1}^n TD_i^p > \delta, & C^{p+1} = C^p - \Delta C \\ \sum_{i=1}^n TD_i^{p-1} - \sum_{i=1}^n TD_i^p < \delta, & C^{p+1} = C^p + \Delta C \\ \left| \sum_{i=1}^n TD_i^{p-1} - \sum_{i=1}^n TD_i^p \right| \leq \delta, & C^{p+1} = C^p \end{cases} \quad (13)$$

주기길이의 결정 이후 교차로 지체 최소화를 위한 현시 분할 과정이 이루어지며, 이때 차량당 평균 지체를 최소화하기 위한 현시별 적색시간의 변화량 T_i 를 결정할 수 있는 선형계획모형을 제시하였다.

현시분할 과정에서는 현시별 다음 주기의 차량당 평균 지체 ND_i 를 이용하며, ND_i 는 현재 주기의 차량당 평균지체 D_i 에 적색시간 변화량 T_i 에 따른 평균 지체 변화량을 적용하여 산정한다. 적색시간 변화를 통해 다음 주기 차량

Figure 4. Delay estimation for an undersaturated condition

Figure 5. Delay estimation for an oversaturated condition

당 평균 지체를 최소화하기 위한 현시 변화의 크기를 결정할 수 있다. 이때 이동류별 적색시간 변화의 합 $\sum T_i$ 는 주기변화량과 동일하여야 하며, 주기 길이가 현재와 동일하게 유지되는 경우 적색시간 변화량의 합은 0이 되어야만 한다. 현시 변화량의 크기는 급격한 현시변화를 방지하기 위해 최소 현시변화량 u_i 와 최대 현시변화량 w_i 의 범위 내에서 이루어지며, 여기에서 최대 현시변화량 w_i 는 비포화 상태에서 대기행렬 해소 이후 여유녹색시간의 크기를 이용한다. 대기행렬 해소 이후 녹색시간의 범위 내에서 현시 변화가 이루어지게 함으로써 해당 이동류를 비포화 상태로 유지함과 동시에 교차로 지체를 최소화하기 위한 최적 신호시간을 산정할 수 있다. 또한 보행자 녹색시간을 고려하기 위한 방법으로 최소녹색시간 mg_i 의 범위 내에서 현시변화가 이루어질 수 있도록 하였다.

$$FIND T_i$$

$$Mn z = \sum_{i=1}^n ND_i$$

$$ND_i = D_i + \Delta D_i(T_i)$$

$$\begin{cases} |\Delta C| > 0, \sum_{i=1}^n T_i = \Delta C \\ \Delta C = 0, \sum_{i=1}^n T_i = 0 \end{cases}$$

$$u_i \leq T_i \leq w_i$$

$$g_i - T_i \geq mg_i$$

본 연구에서는 개별차량의 통행시간 정보를 이용한 실시간 신호제어를 위해 개별차량의 지체와 교차로 진출시각을 이용하여 도착교통량을 추정하고, 결정적 지체모형을 기반으로 지체를 산정하기 위한 방법론을 제시하였다. 적색시간 변화에 따른 지체 변화량을 산정하여 교차로 지체를 최소화할 수 있는 현시결정 선형계획 모형을 제시하였다.

IV. 사례 분석

본 연구에서 제시하는 통행시간 기반 신호제어 모형의 효과분석을 위해 미시적 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 CORSIM을 이용하였으며, CORSIM의 API 모듈에 해당하는 Run Time Extension을 이용하여 개별차량의 정보수집과 신호시간의 산정과정을 구현하였다. 실험대상 교차로는 Figure 2와 같이 좌회전 1차로, 직진 2차로로 구성되는 4지교차로를 대상으로 하였으며, 중첩이 없는 선행좌회전의 4현시 체계를 적용하였다. 효과측도는 본 신호제어모형이 지체 최소화를 목표로 함에 따라 차량당 평균 지체와 통과교통량을 이용하였으며, 시나리오의 구성은 Table 1과 같이 비포화 및 과포화 상태를 구분하여 구성하였다. 시나리오 1의 경우 전체 접근로가 비포화인 상태, 시나리오 2는 동서측 접근로가 일시적인 과포화 상태, 시나리오 3은 전체 접근로가 과포화 상태가 구성되도록 도착교통량을 지정하여 포화상태에 따른 신호시간의 변화를 확인할 수 있도록 시나리오를 구

Table 1. Simulation scenarios for case studies

(unit: veh/hr)

Scenario	Time Period (minute)	Eastbound & Westbound		Southbound & Northbound		Time Period for Pre-Timed Control	Condition
		Left Turn	Through & Right	Left Turn	Through & Right		
Scenario 1	0~60	288	864	288	864	●	Undersaturation
	0~15	288	864	288	864	●	Undersaturation
Scenario 2	15~30	648	1,296	288	864		Oversaturation
	30~60	288	864	288	864		Undersaturation
Scenario 3	0~20	360	720	648	1,296	●	Oversaturation
	20~60	648	1,296	360	720		Oversaturation

(a) average delay per vehicle

(b) change of average delay per vehicle

Figure 6. Result of sensitivity analysis

(a) undersaturated condition

($\lambda_i = 0.20$ veh/sec, 720 veh/hr)

(b) oversaturated condition

($\lambda_i = 0.40$ veh/sec, 1,440 veh/hr)

Figure 7. Change of average delay according to red time

(a) undersaturated condition

(b) oversaturated condition

Figure 8. Estimation result of arrival traffic flow rate (eastbound of scenario II)

(a) left turn movement

(b) through and right turn movement

Figure 9. Estimation result of average delay (eastbound of scenario II)

성하였다. 포화상태를 구분한 3개의 시나리오에 대해 Transyt-7F를 이용해 산출한 최적 고정식 신호시간을 적용하여 실시간 신호제어와의 비교분석을 수행하였다.

시뮬레이션 분석결과에 앞서 신호제어를 위해 산정되

는 차량당 평균지체와 평균지체 변화량의 민감도를 확인 하였다. 도착교통류율과 녹색시간 변화에 따른 v/c 를 Table 2와 같이 구분하여 차량당 평균 지체 및 지체 변화량을 산정하였다. 출발교통류율을 초당 0.5대, 주기길

Table 2. Change of v/c ratio

v/c ration		Green Time (sec)						
		20	30	40	50	60	70	80
Arrival	0.1	1.00	0.67	0.50	0.40	0.33	0.29	0.25
Traffic	0.2	2.00	1.33	1.00	0.80	0.67	0.57	0.50
Flow	0.3	3.00	2.00	1.50	1.20	1.00	0.86	0.75
Rate	0.4	4.00	2.67	2.00	1.60	1.33	1.14	1.00

이를 100초로 고정하여 도착교통류율과 녹색시간의 크기에 따른 포화도는 0.25-4.00 까지 구분하였으며, 이때 v/c 가 1.0을 초과하는 경우 과포화 상태로 구분하였다. 이때 차량당 평균지체는 Figure 6에서 a)와 같이 녹색시간 및 도착교통류율에 따라 최대 160초/대 까지 분포한다. 적색시간 변화량 T_i 가 1.0초 일 때 지체변화량은 Figure 6의 b)와 같이 도착교통류율이 감소함에 따라 최대 9.2초에서부터 최소 0.3초 까지 점진적으로 감소하는 결과를 나타내었다. 적색시간 변화량 T_i 의 크

기변화에 따른 지체 변화량의 분포를 Figure 7에서와 같이 포화 상태에 따라 구분하여 제시하였다.

적색시간 변경에 따른 지체변화량을 확인하기 위해 도착교통류율 및 주기길이를 고정하여 녹색시간 변화만으로 v/c 를 조정하였으며, 먼저 비포화 상태에서 차량당 평균지체는 v/c 가 0.5인 경우 적색시간이 최대 10초까지 증가함에 따라 지체 또한 대당 5초의 변화량을 나타내었다. 또한 과포화 상태에서는 적색시간의 변화의 크기에 따라 대당 44초까지의 분포를 나타내었다.

미시적 시뮬레이션 결과를 이용하여 개별차량 도착좌표에 따른 도착교통류율과 주기단위로 차량당 평균지체를 추정하였다. 일시적인 과포화 상태가 발생하는 시나리오 2를 기준으로 Figure 8과 같이 직진 이동류의 도착교통류율 추정 결과를 확인하였다. 비포화 상태에서는 도착교통류율이 초당 0.09대로 시간당 324대의 교통량을 나타내었으며,

(a) delay of scenario I

(b) traffic signal timings of scenario I

(c) delay of scenario II

(d) traffic signal timings of scenario II

(e) delay of scenario III

(f) traffic signal timings of scenario III

Figure 10. Result of delay and signal timings

Figure 11. Result of delay estimation according to probe ratio (eastbound of scenario II)

과포화 상태에서는 초당 0.13대로 시간당 936대에 해당하여 시나리오에서 설정한 교통량에 상응하는 결과를 나타내었다. 도착교통량을 이용하여 지체를 추정한 결과 Figure 9와 같이 좌회전과 직진 모두 해당 주기의 지체 규모와 포화 상태를 명확히 나타내었다. 본 연구에서는 과거 3주기 동안의 도착 좌표를 이용하여 도착교통량을 추정함에 따라 현재 주기의 지체를 추정함에 있어 이력 2주기와 현재 주기의 차량 도착패턴이 반영된 결과를 나타내었다.

특히 과포화 상태가 발생된 이후 지체가 감소하는 단계에서 이전 주기 도착 좌표의 영향으로 인해 지체감소의 크기 및 시간이 1-2 주기 이후에 실측지체에 대응되는 경향이 관측되었다.

교차로의 포화상태에 따른 시나리오별 분석결과를 Figure 10과 같이 제어방식별 주기단위의 차량당 평균지체와 통행시간 기반 신호제어의 신호시간 산정결과로 제시하였다. 비포화 상태의 교통상황이 균일하게 지속되는 시나리오 1에서는 고정식 신호제어와 통행시간기반 제어 모두 지체가 차량당 50초 이내의 범위에서 일정하게 유지되었으며, 신호시간의 경우 주기길이가 80초에 수렴되는 결과를 나타내었다. 비포화 상태에서도 앞서 이동류별 지체 추정 결과와 동일한 경향으로 이전주기의 도착교통량을 좌표가 적용되어 보다 점진적인 지체변화가 관측되었다.

시나리오 2의 경우 동서측 접근로에서 15-30분 동안 일시적인 과포화 상태가 유발되는 상황에 해당된다. 고정식 신호운영은 신호시간이 비포화 상태를 기반으로 작성되어 일시적 교통량 증가로 인해 최대 298초에 이르는 지체를 나타내었으나, 통행시간 기반 신호제어는 최대 164초로 55% 이상 감소한 결과를 나타내었다. 신호시간은 일시적 과포화 상태에 대응하기 위해 주기길이가 최대 140초 까지 증가하는 결과를 나타내었으며, 과포화 해소 이후 시나리오 1에서와 동일한 경향으로 80초의 주기길이에 수렴하는 경향을 나타내었다.

시나리오 3에서는 전체 접근로가 분석시간 동안 과포화 상태가 지속되며, 시뮬레이션 시작 이후 20분까지는 동서측 접근로, 20분 부터 90분까지는 남북측 접근로에서 더 높은 포화상태를 유지하도록 하였다. 시간대에 따라 포화 상태의 심각도만 달리하는 상황을 위해 교통량을 결정하였다.

시나리오 3에서는 시뮬레이션 시작 이후 20분까지 남북측 접근로에서 과포화상태를 유지하며, 이후 70분 동안 동서측 접근로가 과포화상태에 해당한다. 이외 접근로의 경우 근포화 상태를 유지하도록 교통량을 설정하여 통행시간 기반 신호제어가 과포화 상태의 방향 변화의 대응여부를 확인하였다. 차량당 평균지체의 경우 고정식 신호제어가 차량당 평균 232초를 나타내었으며, 통행시간 기반 신호제어가 217초로 약 9% 이상의 감소효과를 나타내었다. 신호시간은 전체 분석시간대가 과포화 상태로 고정식 신호제어와 통행시간 기반 신호제어 모두 최대 주기길이에 해당하는 160초를 균일하게 유지하였으며, 20분 이후 동서측 접근로의 과포화 상황에 대응하기 위해 1, 2현시의 증가 경향을 나타내었다.

본 연구는 개별차량의 통행시간 정보를 이용한 실시간 신호제어 방법을 다루고 있으며, 개별차량의 정보 수집율에 따라 알고리즘 성능이 결정된다. 따라서 정보수집 대상차량의 비율에 따른 지체 산정결과를 Figure 11과 같이 제시하였으며, 시나리오 2의 직진 이동류에 대해 고정식 신호운영이 적용되는 상황에서 주기 단위의 차량당 평균지체의 추정결과를 확인하였다. 정보수집 차량이 40%인 경우 평균절대상대오차(Mean Absolute Relative Error)가 0.223으로서 60-100%의 분석과 유사한 결과를 나타내었으며, 정보수집 대상 차량이 20%인 경우 Figure 11의 a)와 같이 과포화 상태의 표현에 한계를 나타내었다. 통행시간기반 신호제어 알고리즘의 효과평가를 위해 시뮬레이션 분석을 시행하였으며, 이동류의 포화상태를 확인하여 지체를 최소화시키기 위한 실시간 신호제어가 수행됨을 확인하였다.

V. 결론

본 연구에서는 개별차량 통행시간으로부터 이동류의 도착교통류율과 지체를 추정하고, 적색시간 변경에 따른 지체 변화량을 산정하여 교차로 지체를 최소화하기 위한 실시간 신호제어 알고리즘을 제시하였다. 결정적 지체모형에서 총 지체의 면적변화를 이용하여 적색시간 변화에 따른 지체 변화량을 모형화 하였으며, 교차로 지체를 최소화시키기 위한 목표로 최적의 적색시간 길이 변화를 결정하는 선형계획모형을 제시하였다. CORSIM과 RUN TIME EXTENSION을 이용한 시뮬레이션 효과분석 결과 이동류의 포화상태에 따라 지체 최소화를 위한 신호시간이 산정됨을 확인하였다. 또한 특정 시나리오에 한정된 결과이나 40% 이상 Probe 차량이 확보되는 경우 전수의 교통정보수집에 필적하는 지체 추정이 가능함을 확인하였다.

최근 국내 교통관리 환경은 하이패스, 첨단교통관리 시스템(ATMS) 등 개별차량의 구간통행시간을 수집할 수 있는 감지체계로 변화하고 있으며, 본 연구는 실시간 신호제어 분야에서 감지체계의 변화를 수용하기 위한 새로운 방법론 개발로서 의의가 있겠다. 향후 연구과제로는 간선도로 축 및 네트워크에 대한 실시간 신호제어를 위해 연동을 고려한 통행시간 기반 신호제어를 연구 중에 있으며, 타 실시간 신호제어 모형과의 비교를 통해 통행시간 기반의 신호제어와 전통적인 점유율 기반 신호제어 간의 성능비교가 필요하다.

REFERENCES

- Asano M., Horiguchi R., Kuwahara M. (2004), Adaptive Traffic Signal Control Using Real-time Delay Measurement - Consideration of Stochastic Delay, Presented at 11th World Congress on Intelligent Transportation Systems, Nagoya, Japan.
- Asano M., Nakajima A., Horiguchi R., Oneyama H., Kuwahara M. (2003), Traffic Signal Control Algorithm based on Queuing Model ITS Sensing Technologies, Presented at 10th World Congress on Intelligent Transportation Systems, Madrid, Spain.
- Bonneson J., Sunkari S., Pratt M. (2009), Traffic Signal Operations Handbook, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, USA.
- CONSTRUCTION TIMES (2011), Six Million South

- Korea Vehicles Use Hi-pass, Available at <<http://www.constimes.co.kr/news/articleView.html?idxno=55448>>[Accessed 1 October 2011].
- Jeong Y. J. and Kim Y. C. (2005), Development of Signal Control Algorithm Using Travel Time Informations of Sectional Detection Systems, J. Korean Soc. Transp., Vol.23, No.8, Korean Society of Transportation, pp.181-191.
- Jeong Y. J. and Kim Y. C. (2009), Application and Evaluation of Traffic Signal Control Algorithm based on Travel Time Informations for Coordinated Arterial, J. Korean Soc. Transp., Vol.27, No.5, Korean Society of Transportation, pp.179-187.
- Kim B. K. (2007), Signal Control Algorithm Based on Travel Time, Master's Dissertation, University of Seoul, Seoul, Korea.
- Kim Y. C. (2007), Development of Signal Control Algorithm Using Travel Time, University of Seoul, Seoul, Korea.
- Massart M., Koshi M., Kuwahara M. (1995), Traffic Signal Control based on Travel Time Information from Beacons, Presented at the Second World Congress on Intelligent Transportation Systems, Yokohama, Japan.
- Seoul Metropolitan Police Agency (2001), Real-time Traffic Signal Control System Handbook.

알림 : 본 논문은 한국ITS학회 2011 추계학술대회(2011. 11.05)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

- ✉ 주 작 성 자 : 정영제
 ✉ 교 신 저 자 : 김영찬
 ✉ 논문투고일 : 2012. 1. 30
 ✉ 논문심사일 : 2012. 3. 21 (1차)
 2012. 12. 11 (2차)
 ✉ 심사판정일 : 2012. 12. 11
 ✉ 반론접수기한 : 2013. 4. 30
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필