

통행시간 자료를 이용한 신호시간계획의 결정 방법

Determination Method of Signal Timing Plan Using Travel Time Data

정영제

도로교통공단 교통과학연구원

Young-Je Jeong(sleep108@koroad.or.kr)

요약

본 연구에서는 구간통행시간 정보를 기반으로 하는 신호교차로의 신호시간 산정모형을 개발하였다. 도시교통정보시스템 UTIS와 같이 구간통행시간 정보를 수집할 수 있는 검지체계를 적용하였으며, 결정적 지체모형을 이용하여 통행시간 정보로 부터 포화도 및 수요교통량을 산정하기 위한 모형을 정립하였다. 또한 본 모형은 수요교통량을 이용하여 Webster 모형 기반의 신호최적화를 수행함으로써 교차로 지체를 최소화시키는 신호시간을 산정할 수 있다. 알고리즘의 효과평가를 위해 VISSIM과 API 도구인 ComInterface를 적용한 미시적 시뮬레이션 분석을 시행하였으며, 이동류의 포화상태를 확인하여 지체 최소화를 위한 신호시간이 산정됨을 확인하였다. 최근 국내 교통관리분야에서는 도시교통정보시스템 UTIS, 첨단교통관리시스템 ATMS와 같이 구간통행시간을 수집할 수 있는 검지체계가 급격히 확산되고 있으며, 본 연구에서는 교통신호운영 분야에서 교통정보시스템을 적용하였다는데 의의가 있겠다.

■ 중심어 : | TOD Plan | 신호운영 | 통행시간 | 수요교통량 | 시뮬레이션 |

Abstract

This research suggested the traffic signal timing calculation model for signal intersections based on sectional travel time. A detection system that collects sectional travel time data such as Urban Transport Information System(UTIS) is applied. This research developed the model to calculate saturation flow rate and demand volume from travel time information using a deterministic delay model. Moreover, this model could determine the traffic signal timings to minimize a delay based on Webster model using traffic demand volume. In micro simulation analysis using VISSIM and its API ComInterface, it checked the saturation conditions and determined the traffic signal timings to minimize the intersection delay. Recently, sectional vehicle detection systems are being installed in various projects, such as Urban Transportation Information System(UTIS) and Advanced Transportation Management System(ATMS) in Korea. This research has important contribution to apply the traffic information system to traffic signal operation sector.

■ keyword : | TOD Plan | Signal Operation | Travel Time | Demand Volume | Simulation |

* 본 논문은 과학기술정보통신부 재원으로 경찰청과 치안과학기술연구개발사업단의 지원을 받아 수행된 차안과학기술연구개발사업임.(PA-A000001)

접수일자 : 2017년 12월 13일

수정일자 : 2018년 03월 05일

심사완료일 : 2018년 03월 15일

교신저자 : 정영제, e-mail : sleep108@koroad.or.kr

I. 서론

도로교통에서 교차로의 신호운영방법은 하나의 신호시간을 고정으로 적용하는 고정식 신호운영, 시간대별로 최적화된 신호시간을 차등 적용하는 시각제어(TOD: Time-Of-Day Control), 차량의 도착유무에 따라 신호시간을 연장 또는 조기에 종결하는 방식의 감응제어(Actuation Control), 실시간으로 교통류 패턴을 파악하여 신호시간을 갱신하는 형태의 대응제어(Traffic Responsive Control) 등 다양하다[1-3].

실시간 신호제어시스템은 호주의 SCATS(Sydney Coordinated Adaptive Traffic System), 영국의 SCOOT(Split Cycle Offset Optimization Technique), 한국의 COSMOS(Cycle, Offset, Split model of Seoul) 등 다양한 시스템들이 제시된바 있으나, 국내외의 많은 도시에서는 여전히 시간대별로 최적 신호시간을 고정해 적용하는 TOD 방식이 일반적이다. 특히 교통패턴이 일정하며, 교차로간 간격이 좁아 연동운영만으로도 신호운영 효과가 확실한 도심구간에서는 TOD 방식이 낮은 유지관리 비용과 우수한 편의성으로 세계적으로 가장 일반적인 신호운영방식에 해당한다[1]. 국내에서도 ITS 인프라 확대와 함께 COSMOS가 널리 적용되어왔으나, 매설식 루프검지기의 유지관리에 어려움을 겪는 문제로 전국적으로 TOD 운영이 주류를 이루고 있다. TOD 방식의 신호운영이 효율성을 확보하기 위해서는 신호시간에 현장의 교통패턴을 효과적으로 반영하기 위한 정기적인 신호시간 갱신은 필수이다. 신호시간의 갱신 주기에 대한 명확한 기준은 없으나, 교통

량이 10~15% 이상 변동이 있는 경우, 공사 등 특별상황이 있는 경우 신호시간 재작성이 필요한 것으로 보고 있다[2]. 신호시간 갱신을 위한 교통조사에 따른 비용과 시간이 소요되어 정기적인 조사가 이뤄지지 못하는 실정이며, 신호운영계획 갱신주기가 길어져 신호시간이 현장 교통상황을 합리적으로 반영하지 못하는 상황이다.

본 연구에서는 TOD 갱신을 위해 ITS 인프라에서 수집되는 통행시간정보를 신호최적화에 활용하여 신호시간 계획방법을 제시하였으며, 공공 및 민간에서 수집되고 있는 다양한 교통정보시스템의 통행시간 정보를 신호운영 부문에 활용하기 위한 방법에 해당한다. 본 연구에서는 통행시간으로부터 TOD의 갱신을 위한 신호시간을 계획하는 방법론 제시와 함께 VISSIM을 이용한 미시적 시뮬레이션 분석을 통해 통행시간 기반 신호시간 산정 모형의 검증 및 효과평가를 수행하였다.

II. 선행연구 고찰

본 연구에서는 기존 실시간 신호제어시스템과 통행시간 등 소통정보를 기반으로 하는 실시간 신호운영 방법론에 대한 선행연구를 고찰하였다.

실시간 신호제어시스템 중 세계적으로 상업화에 성공한 모형에는 [표 1]과 같이 SCATS, SCOOT, ACS-Lite 등이 있다. 이들 시스템에서 검지기의 설치 위치는 정지선과 링크 중간지점 등으로 다양하나 루프, 영상과 같은 지점검지체계가 공통적으로 적용되고 있으며, 통과교통량, 점유율 등의 지점정보를 기반으로 신

표 1. 대표적인 신호시스템의 목표 및 검지기체계

| 시스템 | 신호운영 목표 | 검지기 타입 | 검지기 설치위치 |
|----------|--|------------------|---|
| SCOOT | Minimize Performance Index | Loop/Video | Upstream (300 ft upstream from stop bar) |
| SCATS | Minimize Delay and Stops or Maximize Throughput | Loop/Video | Stop bar |
| ACS-Lite | Maximize Total Amount of Captured Flow | Loop/Video/Radar | Upstream & Stop bar (400-600 ft upstream from stop bar) |
| COSMOS | Minimize and Equalize Degree of Saturation | Loop | Upstream & Stop bar (150-300 meter upstream from stop bar) |

(Source: Seoul Metropolitan Police Agency, 2001; Stevanovic, 2010; Zhao and Tian, 2012)

호제어가 수행되고 있다. 한국의 COSMOS에서도 대표적 지점검지체계인 루프검지기를 이용해 정지선의 점유율을 기반으로 신호제어를 수행한다. 과포화 제어를 위해 대기행렬 정보를 생성하지만, 지점속도를 이용해 추정한 대기행렬로 구간소통정보의 직접적인 활용에는 해당하지 않는다[4-6]. 전통적인 지점검지체계 기반의 신호시스템에서는 지점교통정보 기반의 신호제어로 ITS 인프라의 구간소통정보를 직접적으로 활용하는 신호운영에는 제약이 있다.

통행시간, 지체와 같은 구간교통정보 기반의 실시간 신호제어에 관련한 연구는 지진의 영향으로 교통정보 수집에서 비컨과 같은 비매설식 검지체계가 활발히 적용되고 있는 일본에서 일부 연구결과들이 제시된바 있다. 또한 국내에서는 하이패스 차량을 정보수집원으로 하는 신호시스템 개발이 수행된바 있다. 일본의 통행시간 기반 신호제어와 관련한 연구로 Massart(1995)는 비컨 방식의 무선통신장치로부터 통행시간을 수집하고, 교차로 지체로부터 교통류율을 추정해 전통적인 Webster 모형을 이용해 실시간 신호제어를 수행하는 모형을 제시한바 있으나, 비포화상태에만 적용이 가능한 모형으로 한계가 있다. 또한 Asano(2003, 2004)는 Massart 연구를 발전시킨 형태로 통행시간으로부터 교통류율을 추정하고, 지체 변화 매트릭스를 작성하여 녹색시간 증감량을 결정하는 신호제어 프로세스를 제시한 바 있다. 소통정보 기반의 신호운영과 관련한 국내 연구로서 DSRC와 같은 구간검지체계로부터 수집되는 통행시간을 결정적 지체모형을 이용하여 이동류별 대기행렬을 산정하며, 이동류별 대기행렬을 균등화하는 실시간 신호제어 알고리즘을 제시한바 있다[7-12]. 또한 구간검지체계 기반의 실시간 신호제어시스템을 개발하기 위한 ‘차세대 무선통신 신호제어시스템 개발’ 연구에서는 DSRC(Dedicated Short Range Communication)를 이용해 이동류별 통행시간을 수집하고, 이동류별 지체를 균등화 시키는 신호제어방법을 제시하였다[11].

기존 실시간 신호시스템 및 통행시간의 기반 신호제어 방법론에 대한 고찰 결과를 기반으로 본 연구에서는 통행시간을 이용한 TOD 갱신을 위한 신호시간 산정모형을 개발하였으며, 지체모형 기반의 신호 최적화 방법

을 개량하여 지체모형을 이용해 수요교통량을 추정하고, Webster 방식의 신호시간 산정방법론을 제시하였다. 기존 Massart(1995), Asano(2004)의 연구에서는 공통적으로 비포화 만을 대상으로 하거나, 과포화에 대한 신호운영 방법을 제시하지 못하고 있다. 본 연구에서는 결정적 지체모형을 비포화 및 과포화로 구분해 교통수요를 추정할 수 있도록 하였다.

III. 통행시간을 이용한 신호시간 산정방법

통행시간 정보로부터 TOD Plan 작성을 위한 신호시간이 산정되는 과정은 [그림 1]과 같이 통행시간에서 지체를 산정하여 지체로부터 해당 이동류의 수요교통량 및 포화도를 산정한다. 수요교통량을 기반으로 Webster 모형을 이용한 신호최적화를 수행하는 과정으로 최적의 주기 길이 및 현시 배분을 결정한다. 본 연구에서는 전체 신호시간 산정프로세스 중 통행시간으로부터 수요교통량의 산정과 주기길이 및 현시배분의 과정을 제시하였다. 본 연구에서의 신호시간 산정방식은 통행시간을 결정적 지체모형에 적용하는 방식의 모형으로 평균 지체로부터 수요교통량을 추정하여 교통량 기반의 신호최적화를 수행한다. 이는 기존 일본의 Massart(1995), Asano(2003, 2004), 박순용(2016)의 연구와는 포화상태의 구분, 연동교차로의 고려, 수요교통량의 추정방식, 신호시간 계획의 목표에서 차이가 있다.

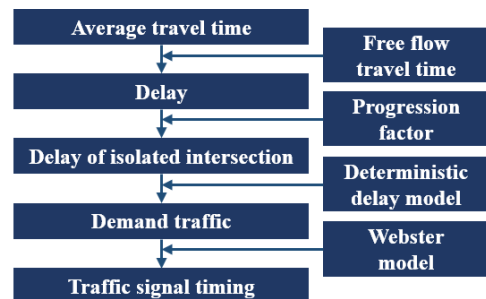


그림 1. 본 연구의 신호시간계획 수립과정

본 연구에서 제시하는 통행시간 기반 신호시간 산정 방법론의 경우 UTIS와 같은 도시교통정보시스템의 이

동류별 통행시간 정보를 교통신호시스템에 연계하여 누적된 통행시간 패턴데이터를 TOD의 신호시간 갱신 및 평가기능에 활용하는데 목적이 있다.

통행시간 지체의 산정은 수식 (1)과 같이 소통정보의 통행시간과 자유속도 주행하는 통행시간과의 차이로부터 산정하며, 접근지체(Approach Delay)에 해당한다. 본 연구에서는 결정적 지체모형을 신호운영에 적용하는데 의의를 두어 균일지체(Uniform Delay) 만을 고려하였다. 통행시간 지체를 의미하는 TD 는 구간정보 수집 인프라로부터 수집되는 통행시간 TT 와 해당 링크의 자유속도 통행시간 $FFTT$ 의 차이로부터 산정한다.

$$TD = TT - FFTT \quad (1)$$

여기에서,

TD = 통행시간으로부터 추정된 지체(sec)

TT = 구간통행시간(sec)

$FFTT$ = 자유속도 통행시간(sec)

통행시간으로부터 수요교통량을 추정하는 과정은 포화상태에 따라 구분되며, 첫번째 단계로 비포화 상태의 수요교통량 산정과정은 통행시간으로부터 산정된 지체와 결정적 지체 모형을 이용한다.

지체모형에 통행시간으로부터 추정된 통행시간 지체를 적용하여 포화도를 역산함으로써 수요교통량을 산정한다. 비포화 상태에서 집계된 균일지체(Aggregated Uniform Delay) UD_a 는 총 지체를 의미하며 [그림 2]의

①에서와 같이 도착 및 출발교통류율 직선으로 생성되는 면적의 크기로 산정되며, 주기길이 C , 유효녹색시간 g , 도착교통류율 v , 출발교통류율 s 를 이용하여 수식 (2)와 같이 표현된다.

통행시간으로부터 수요교통량을 추정하는 과정은 포화상태에 따라 구분되며, 첫번째 단계로 비포화 상태의 수요교통량 산정과정은 통행시간으로부터 산정된 지체와 결정적 지체 모형을 이용하며, 지체모형에 통행시간으로부터 추정된 통행시간 지체를 적용하여 포화도를 역산함으로써 수요교통량을 산정한다. 비포화 상태에서 집계된 균일지체(Aggregated Uniform Delay) UD_a 는 총 지체를 의미하며 [그림 2]의 ①에서와 같이 도착 및 출발교통류율 직선으로 생성되는 면적의 크기로 산정되며, 주기길이 C , 유효녹색시간 g , 도착교통류율 v , 출발교통류율 s 를 이용하여 수식 (2)와 같이 표현된다.

$$UD_a = \frac{1}{2} C^2 \left[1 - \frac{g}{C} \right]^2 \left[\frac{vs}{s-v} \right] \quad (2)$$

여기에서,

UD_a = 집계된 균일지체(sec)

C = 주기길이(sec)

g = 녹색시간(sec)

v = 도착교통류율(veh/h)

s = 출발교통류율(veh/h)

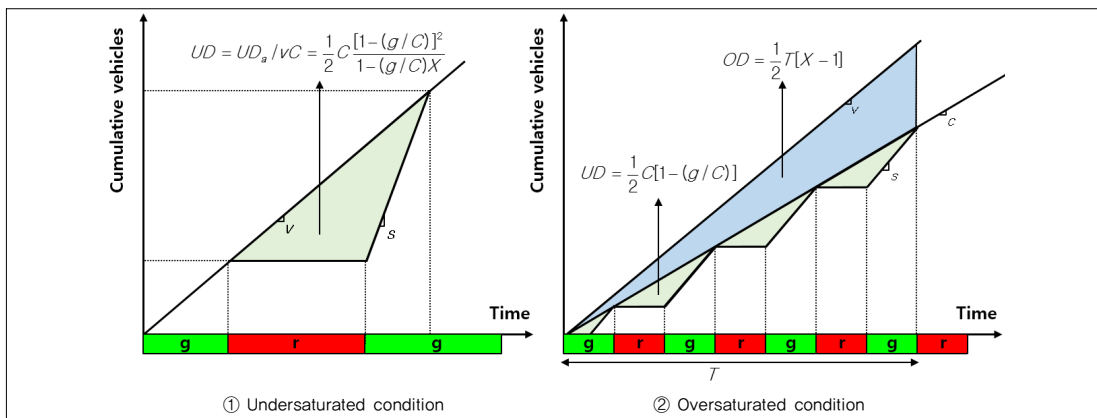


그림 2. 결정적 지체모형을 이용한 포화상태별 지체 추정

차량 당 평균 균일지체(Uniform Delay) UD 는 도로 용량편람과 동일한 방식으로 포화도 $X(=v/s)$ 를 적용하여 수식 (3)과 같이 균일지체 UD_a 에 한 주기 도착 차량 대수를 의미하는 vC 를 나누어 산정한다.

$$UD = UD_a / vC = \frac{0.5C[1-g/C]^2}{1-(g/C)X} \quad (3)$$

여기에서,

UD = 차량당 평균 균일지체(sec/veh)

X = 포화도(v/c)

결정적 지체 모형을 이용해 포화도를 산정하기 위한 과정은 수식 (4)와 같이 통행시간으로부터 산정되는 지체로 적용하여 산정이 가능하며, 평균 지체 UD 에 연동계수 PF 를 적용하여 산정한다.

$$TD = UD * PF \quad (4)$$

여기에서,

TD = 이동류의 총 지체(sec)

PF = 연동계수

지체모형에 통행시간으로부터 산정된 지체를 적용해 포화도 X 를 산정하기 위한 과정은 수식 (5)에서와 같이 결정적 지체모형에서 균일지체를 산정하기 위한 방식에 해당하며, 지체를 포화도로 역산하여 적용하였다. 이때 포화도 X 는 용량 대비 교통량의 비율 v/c 로 표현되며, 용량 c 를 상수로 적용시 수요교통량 v 추정이 가능하다.

$$X = v/c = \frac{TD - 0.5C[1-g/C]^2}{TD(g/C)} \quad (5)$$

연동계수 PF 는 수식 (6)와 같이 HCM 2000에서 제시된 녹색시간 도착차량의 비율에 따른 방식을 적용한다. 연동 비율 P 는 수식 (7), (8)과 같이 연동차량군 비율 R_p 를 이용해 산정한다.

$$PF = \frac{(1-P)f_{PA}}{1-g/C} \quad (6)$$

$$P = R_p \frac{g}{C} \quad (7)$$

$$R_p = 2 \left(\frac{\text{progressed vehicle}}{\text{all vehicle}} \right) \quad (8)$$

여기에서,

P = 녹색시간에 도착하는 차량의 비율

f_{PA} = P 의 조정계수

R_p = 차량군 비율

둘째, 과포화 상태에서의 수요교통량 산정은 또한 비포화 상태와 동일한 원리로 [그림 2]의 ②에서와 같이 결정적 지체모형에서 도착 및 출발교통류율의 도식으로 부터 생성되는 지체 면적의 크기에서 산정이 가능하다. 이때 과포화 상태의 판정은 평균 지체가 적색시간을 초과하는 경우를 기준으로 하여 고포화 모형을 적용한다.

과포화 상태에서 지체는 수식 (9)에서와 같이 포화도 X 가 1.0인 상태에 해당하는 균일지체 $UD_{X=1.0}$ 과 식 (10)에서와 같이 분석시간 길이 T 기간 동안의 과포화 지체 OD 를 합산하여 산정한다. 과포화 상태에서는 포화도 1.0 조건의 균일지체와 과포화 지체만을 합산하여 차량당 평균 지체를 산정하였다.

$$UD_{X=1.0} = \frac{1}{2} C[1-g/C] \quad (9)$$

$$OD = \frac{1}{2} T[X-1] \quad (10)$$

여기에서,

$UD_{X=1.0}$ = 포화도 1.0 상태의 균일지체(sec/veh)

OD = 과포화 지체(sec/veh)

T = 분석시간 길이(hour)

과포화 상태에서 수요교통량 또한 비포화에서와 동일한 방법으로 지체산정 모형에 통행시간으로부터 산정된 통행시간 지체를 적용하여 식 (11)과 같이 산정한다. 결정적 지체모형에 통행시간 지체를 적용하여 포화도 X 를 추정하며, 포화도를 용량 c 대비 교통량 v 의 비율로 표현하여 용량을 상수로 적용함으로써 교통량을 추정하였다.

$$X = v/c = 1 + \frac{2}{T} [TD - 0.5C(1 - g/C)] \quad (11)$$

비포화상태 및 과포화상태 모두 동일한 원리로 지체 시간을 결정적 지체모형을 적용해 포화도를 역산하는 과정으로 수요교통량을 추정한다.

상기 과정을 통해 추정된 수요교통량을 이용해 Webster Model 기반의 주기길이 결정 및 현시 배분을 수행한다. 이후 교통량 v , 용량 c , 포화교통류율 s , 주기길이 C , 녹색시간 g 의 관계를 이용하여 수식 (12)와 같이 포화도 X 로부터 수요교통량 v 및 임계차로 교통류율 y 를 결정한다. 상기 과정으로 산정된 포화도 및 수요교통량으로부터 수식 (13)에서와 같이 Webster 모형 기반의 지체 최소화를 위한 주기 길이 결정이 이뤄지며, 식 (14)와 같이 임계차로 교통류율의 비율에 따른 현시 배분을 수행하여 최적 신호시간을 결정한다.

$$X = \frac{v}{c} = \frac{v}{s \cdot g} = \frac{v/s}{g/C} = \frac{y}{g/C} \quad (12)$$

$$C_{opt} = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum y} \quad (13)$$

$$g = C_{opt} * \frac{y}{\sum y} \quad (14)$$

여기에서,

y = 교통량비(v/s)

C_{opt} = 최적 주기길이(sec)

L = 손실시간(sec)

본 연구에서는 통행시간으로부터 산정된 지체를 결정적 지체모형에 적용함으로써 포화도를 산정하기 위한 과정을 제시하였으며, 지체모형을 이용하여 통행시간으로부터 수요교통량을 산정하여 신호시간 산정에 사용할 수 있도록 하였다. 이때 비포화 상태와 과포화 상태로 구분하여 결정적 지체 모형에서 교통량, 포화교통류율, 용량의 관계로부터 지체 면적의 크기를 산정하는 방식을 적용하였으며, 비포화 상태에서는 연동에 따른 지체 변화를 고려하기 위해 US HCM 2000에서와 동일한 방법으로 녹색시간의 차량군 도착 비율을 적용하여 독립교차로에서의 지체로 환산한 이후 수요교통량을 산정하였다.

IV. 사례분석

통행시간 기반 TOD 신호시간 산정모형에 대한 사례 분석을 위해 미시적 시뮬레이션 분석을 수행하였으며, 독일 PTV사의 VISSIM(Verkehr In Städten SIMulationsmodell) 5.0과 Visual Basic 기반의 ComInterface를 이용하여 [그림 3]과 같이 교차로의 상류부 700m 구간에 대한 통행시간 정보를 수집하여 신호시간을 산정하였다. 분석대상은 4차로의 독립교차로에 해당하며, 직진 2차로, 좌회전 1차로, 우회전 1차로의 전형적인 간선도로 신호교차로의 형태에 중첩이 없는 4현시 신호체계를 적용하였다. 링크시작 지점과 교차로 진출부상에 검지기를 설치하여 VISSIM의 ComInterface

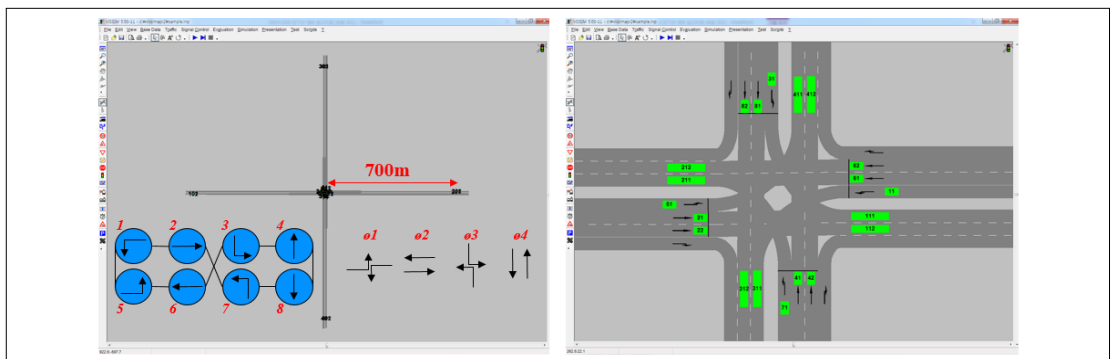


그림 3. 시뮬레이션 분석을 위한 교차로 기하구조 및 신호운영 조건

를 기반으로 교차로 통과차량의 ID와 검지기 통과시각 정보를 수집하였으며, 신호대기를 포함하는 개별차량의 통행시간 정보를 생성하였다. 이때 검지체계의 경우 일반적인 루프검지기와 유사한 가로세로 1.8 meter 크기의 검지체계를 적용하였으며, 차량 점유 시 해당 차량의 ID와 검지시각 정보를 수집하는 API를 적용하였다. 이후 상하류부 검지기 간의 차량 ID 수집정보를 매칭하여 개별차량 단위로 통행시간 정보를 생성하였으며, 이후 15분 단위로 개별차량 통행시간을 평균하여 직진과 좌회전으로 구분한 8개 이동류의 15분 주기 평균 통행시간 정보를 생성하여 신호시간 산정에 적용하였다.

분석 시나리오는 [표 2]과 같이 교차로 포화상태에 따라 S1, S2, S3로 구분하였다. S1은 총 6시간의 시뮬레이션에서 비포화 상태가 유지되며, 시뮬레이션 후반부터 포화도가 50% 증가하는 조건을 적용하였다. S2는 과포화 상태가 유지되는 조건으로 시뮬레이션 후반부터 교통량을 50% 증가시켜 적용하였다.

마지막 S3의 경우 6시간의 시뮬레이션에서 일시적 과포화가 발생하는 조건에 해당한다. 이들 시나리오는 포화상태에 따른 통행시간 차이를 수요교통량 및 신호시간으로 확인하는데 목적이 있다. 총 6시간의 시뮬레이션을 수행하여 통행시간을 기반으로 신호시간을 작성하였으며, 지체 정보의 수집결과를 [그림 4]와 같이 제시하였다.

표 2. 시뮬레이션 분석을 위한 교통량 입력조건

| 시나리오 | 시간(초) | 동측접근로 입력교통량(vph) | 서측접근로 입력교통량(vph) | 북측접근로 입력교통량(vph) | 남측접근로 입력교통량(vph) | 교차로 입력교통량(vph) | 비고 |
|------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|----------------|
| S1 | 0-10,800 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 4,000 | 비포화 상황 |
| | 10,801-21,600 | 1,500 | 1,500 | 1,500 | 1,500 | 6,000 | |
| S2 | 0-10,800 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 8,000 | 과포화 상황 |
| | 10,801-21,600 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 12,000 | |
| S3 | 0-7,200 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 4,000 | 일시적인 과포화 상황 |
| | 7,200-14,400 | 2,000 | 2,000 | 1,500 | 1,500 | 7,000 | |
| | 14,400-21,600 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 4,000 | |

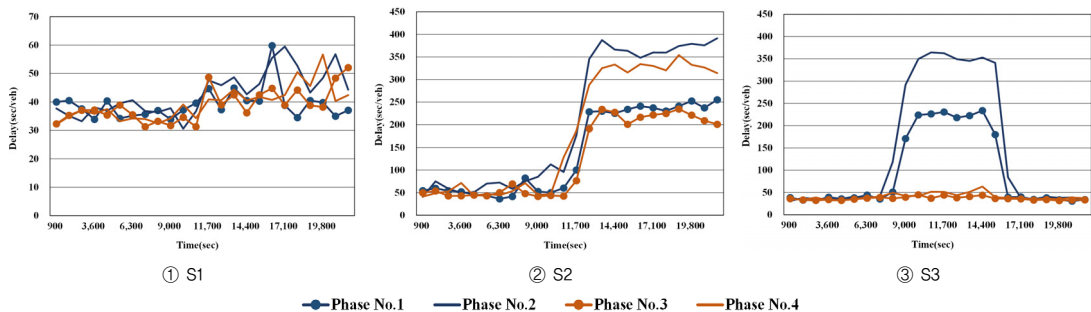


그림 4. 시나리오별 지체 분석 결과

S1 시나리오에서는 비포화 상태로 차량당 평균 40초 수준의 지체를 나타내었으며, 시뮬레이션 후반에 근포화 상태로 지체가 60초 까지 증가하였다. S2에서는 근포화 상태에서 시뮬레이션 후반부터 과포화 상태가 발생하여 최대 390초의 지체를 나타내었다.

또한 S3에서는 동서측 접근로가 일시적인 과포화상태에 해당하며, 직진 이동류에서 차량당 최대 360초, 좌회전 이동류에서는 차량당 최대 240초 수준의 지체를 나타내었다.

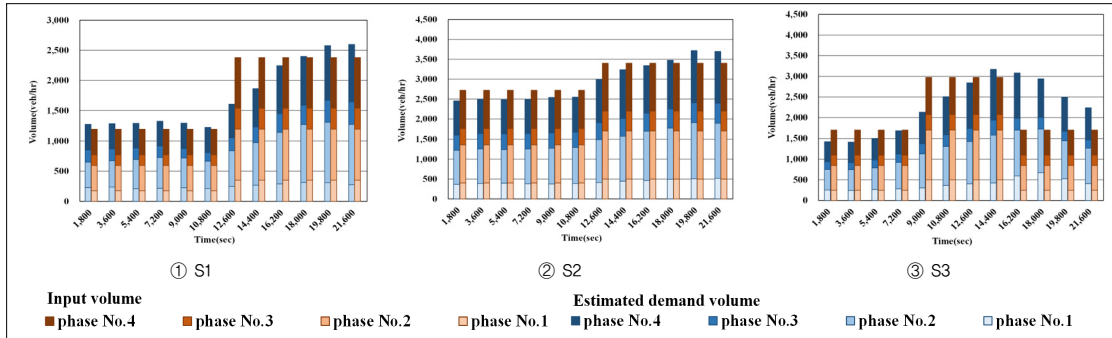


그림 5. 시나리오별 수요교통량 추정 결과

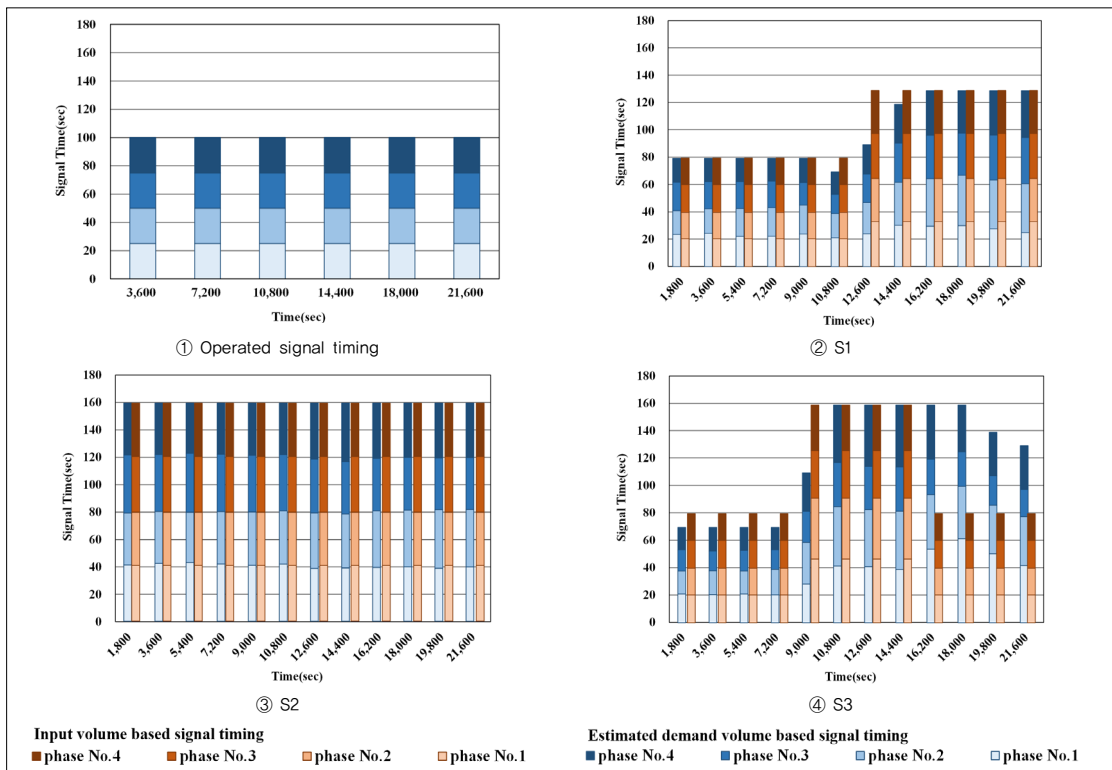


그림 6. 시나리오별 신호시간계획 수립 결과

통행시간으로부터 추정된 30분 단위로 수요교통량은 [그림 5]와 같다. 비포화 상태를 분석한 S1에서는 교차로 전체의 입력 교통량이 [그림 5]의 ①에서와 같이 전반부 3시간 동안 시간당 평균 1,190대, 후반부 3시간 동안 시간당 평균 2,380대를 나타내었다. 이때, 이동류 별

로 30분 단위의 수요교통량은 시뮬레이션 시작 3시간 동안의 전반부에는 1,276대, 후반부 3시간 동안은 2,286대로 입력교통량과는 평균 6% 수준의 오차를 나타내었다. 과포화 상태를 나타내는 S2에서는 [그림 5]의 ②과 같이 입력교통량이 전반 3시간 동안 시간당 평균 2,720

대, 후반 3시간 동안 3,400대를 나타내었다. 이때 수요교통량은 전반부 평균 2,515대, 후반부 평균 3,423대로 입력교통량과 평균 4% 오차를 나타내었다. 또한, 일시적 과포화 상태의 S3에서는 7,200초 이후 2시간 동안 입력교통량이 시간당 평균 2,975대에 해당한다. 일시적인 과포화 이후 비포화 상황으로 복귀하는 과정을 평가하기 위한 목적의 시나리오에 해당한다. 이때 과포화 발생까지 소요시간으로 인해 동일 시간대 수요교통량은 2,508대로 15% 이상의 오차를 나타내었으며, 정체가 해소되는 18,000초 이후에는 잔여대기행렬이 반영되어 교통량은 2,589대로 분석되었다.

통행시간을 이용하여 [그림 6]과 같이 30분 단위로 신호시간을 산정하였으며, 최대 주기 160초를 기준으로 Webster 모형을 적용하여 최적 주기길이 및 현시배분을 수행하였다. 시뮬레이션에 적용된 신호시간은 [그림 6]의 ①과 같이 주기길이 100초에 전체 현시를 25초이며, 시나리오 및 시간대에 구분 없이 동일한 신호시간이 적용되었다. 입력교통량 및 수요교통량을 기준으로 신호시간을 [그림 6]의 ②~④와 같이 작성하였다. 비포화 상태의 S1에서는 전반부에 주기 80초, 후반부에 주기 150초가 산정되었으며, 과포화 상태의 S2에서는 전체 시간대에서 최대 주기인 160초가 적용되었다. 또한 일시적 과포화의 S3에서는 주기길이가 7,200초 까지 70초로 산정되었으며, 14,400초 이후에는 입력교통량은 감소하나 잔여 대기행렬의 해소를 위한 소요시간이 반영되어 18,000초 까지는 160초, 21,600초 까지 130초가 산정되었다. 통행시간을 기반으로 수요교통량 추정하여 정체상태의 발생 및 해소가 반영된 신호시간 산정이 가능함을 확인하였다.

V. 결론

본 연구에서는 교통정보시스템과 같은 지능형교통체계 인프라에서 수집되는 통행시간 정보를 신호운영에 활용하기 위한 방법으로 통행시간을 결정적 지체모형에 적용하여 포화도 및 수요교통량을 추정하고, 이를 이용하여 Webster 모형을 기반으로 신호시간을 산정하

는 방법을 제시하였다. 전통적으로 교통량과 신호운영 조건을 이용하여 지체를 산정하고, 신호교차로의 운영 상태를 평가하는 기준으로 적용해왔다. 그러나 통행시간을 지체로 변환하고 지체모형의 결과에 해당하는 지체에 적용하여 해당 신호운영 조건에서 포화도를 추정함으로써 수요교통량을 산정하였다. 결정적 지체모형을 비포화와 과포화 상태로 구분하여 수요교통량을 추정하기 위한 모형을 제시하였다.

또한 미시적 시뮬레이션 분석을 수행하여 통행시간으로부터 수요교통량의 추정이 가능하며, 정체수준을 고려한 보다 효율적인 신호시간의 산정이 가능함을 확인하였다. 본 연구는 범용의 교통정보를 신호운영에 적용함으로써 현장의 정체상황을 반영한 신호시간을 작성하는데 기여할 수 있을 것이며, 특히 TOD 운영이 주로 이뤄지는 도시부 신호교차로에서 신호시간의 갱신 주기를 단축시켜 신호운영 상태의 모니터링 및 합리적 신호시간의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 교통정보 인프라의 활용도를 높이며, 교차로 운영상태 모니터링 등 신호운영과 관련한 응용서비스 개발이 가능할 것이다.

본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 모든 정체상황을 신호교차로 정체로 가정하였다. 단속류에서는 노변 주정차, 버스정류장, 링크내 진출입차량 등 다양한 정체요인이 있으나, 본 연구에서는 모든 정체를 신호운영에서 발생한다는 가정을 적용하였다. 둘째, 제어지체를 현실적으로 반영하기 위한 지체모형 적용이 필요하다. 도로용량편람에서는 균일지체, 증분지체, 추가지체로 구분하고 있으나, 본 연구에서는 지체모형 적용을 용이하게 하기 위해 균일지체와 개략화된 과포화 지체만을 반영하였다. 수요교통량 추정의 정확도를 높이고, 지체모형 적용과정의 설명력을 높이기 위한 추가 연구가 필요하다. 셋째, 수요교통량 추정 및 신호운영 결과에 대한 통계적 검증이 필요하다. 본 연구에서는 시뮬레이션 데이터를 기반으로 분석함에 따라 이상적인 신호교차로 정체상황만을 고려하는 한계가 있었으며, 시뮬레이션 분석결과에 대한 통계적 검증을 위한 추가 연구가 필요하다.

향후 연구사항은 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서는

시뮬레이션을 기반으로 독립교차로의 통행시간을 수집하여 모형의 검증을 수행하였다. 향후 지능형교통정보시스템에서 수집되는 24시간 통행시간 자료를 이용한 실제 교차로를 대상으로 하는 모형의 평가가 필요하다. 또한 통행시간 정보를 이용해 모형의 현실 적용 가능성을 확인하기 위한 통계적 검증과 관련한 후속연구가 필요하다. 둘째, 포화도를 추정하기 위해 용량을 상수로 적용하였으며, 용량차이에 따른 지체변화를 고려하기 위해서는 현실적인 출발교통류율의 적용방안에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 셋째, 본 연구에서는 TOD 방식의 신호운영에서 신호시간의 갱신을 위한 방법을 제시하였으며, Probe 비율 증가에 따라 정확한 미시적 구간통행시간의 수집이 가능한 상황에서 실시간 신호 제어를 위한 신호시간 갱신 주기 단축에 관한 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

[1] R. P. Roess, S. E. Prassas, and R. W. McShane, *Traffic Engineering*, Prentice Hall, 2011.

[2] P. Koonce, R. Lee, K. Lee, S. Quayle, S. Beaird, C. Braud, J. Bonneson, and T. Urbanik, *Traffic Signal Timing Manual*, FHWA, 2008.

[3] 박순용, 정영제, “통행시간과 점유율 기반의 실시간 신호운영 알고리즘,” 한국콘텐츠학회논문지, 제16권, 제8호, pp.671-680, 2016.

[4] Y. Zhao and Z. Tian, “An overview of the usage of adaptive signal control system in the United States of America,” *Applied Mechanics and Materials*, Vol.178-181, pp.2591-2598, 2012.

[5] A. Stevanovic, *Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice*, NCHRP Synthesis 403, Transportation Research Board, 2010.

[6] 서울지방경찰청, *실시간 신호운영시스템 실무 편람*, 2001.

[7] M. Asano, A. Nakajima, R. Horiguchi, H.

Oneyama, and M. Kuwahara, “Traffic Signal Control Algorithm based on Queuing Model ITS Sensing Technologies,” Presented at 10th ITS World Congress, Madrid, Spain, 2003.

[8] M. Asano, R. Horiguchi, and M. Kuwahara, “Adaptive Traffic Signal Control Using Real-time Delay Measurement-Consideration of Stochastic Delay,” Presented at 11th ITS World Congress, Nagoya, Japan, 2004.

[9] M. Massart, M. Koshi, and M. Kuwahara, “Traffic Signal Control based on Travel Time Information from Beacons,” Presented at the Second World Congress on Intelligent Transportation Systems, Yokohama, Japan, 1995.

[10] 정영제, 김영찬, 백현수, “구간검지체계의 통행시간정보를 이용한 신호 제어 알고리즘 개발,” 대한교통학회지, 제23권, 제8호, pp.181-191, 2005.

[11] 정영제, 김영찬, “연동교차로를 위한 통행시간 기반 신호제어알고리즘의 현장적용 및 평가,” 대한교통학회지, 제27권, 제5호, pp.179-187, 2009.

[12] 정영제, 박상섭, 김영찬, “독립교차로의 통행시간 기반 신호제어 알고리즘,” 대한교통학회지, 제30권, 제6호, pp.71-80, 2012.

저 자 소 개

정 영 제(Young-Je Jeong)

정회원



- 2011년 2월 : 서울시립대학교 교통공학과(공학박사)
- 2011년 3월 ~ 2013년 12월 : 서울시립대학교 교통공학과 연구교수
- 2013년 12월 ~ 현재 : 도로교통

공단 교통과학연구원 선임연구원

<관심분야> : 교통운영 및 ITS