

## 신호교차로 분석도구별 제어지체 산출 성능 비교 연구

### Performance Comparison of Signalized Intersections Analysis Tools in Estimating Control Delays

윤 일 수	Yun, Ilsoo	정회원 · 아주대학교 교통시스템공학과 부교수 (E-mail : ilsooyun@ajou.ac.kr)
오 철	Oh, Cheol	정회원 · 한양대학교 교통·물류공학과 부교수 (E-mail : cheolo@hanyang.ac.k)
안 현 경	Ahn, Hyunkyung	아주대학교 건설교통공학과 석사과정 (E-mail : anhyunkyung@ajou.ac.kr)
김 경 현	Kim, Kyunghyun	아주대학교 건설교통공학과 박사과정 (E-mail : kk6661@ajou.ac.kr)
한 음	Han, Eum	아주대학교 건설교통공학과 박사과정 (E-mail : hano3106@ajou.ac.kr)
강 남 원	Kang, Nam Won	한국도로공사 안동영덕사업단 사업단장 (E-mail : khcknw1@ex.co.kr)
윤 정 은	Yoon, Jung Eun	정회원 · 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 연구원 · 교신저자 (E-mail : yoon22@kict.re.kr)

#### ABSTRACT

**PURPOSES :** The control delay in seconds per vehicle is the most important traffic operational index to evaluate the level of service of signalized intersections. Thus, it is very critical to calculate accurate control delay because it is used as a basic quantitative evidence for decision makings regarding to investments on traffic facilities. The control delay consists of time-in-queue delay, acceleration delay, and deceleration delay so that it is technically difficult to directly measure it from fields. Thus, diverse analysis tools, including CORSIM, SYNCHRO, T7F, VISTRO, etc. have been utilized so far. However, each analysis tool may use a unique methodology in calculating control delays. Therefore, the estimated values of control delays may be different by the selection of an analysis tool, which has provided difficulties to traffic engineers in making solid judgments.

**METHODS :** This study was initiated to verify the feasibility of diverse analysis tools, including HCM methodology, CORSIM, SYNCHRO, T7F, VISTRO, in calculating control delays by comparing estimated control delays with that measured from a field.

**RESULTS :** As a result, the selected tools produced quite different values of control delay. In addition, the control delay value estimated using a calibrated CORSIM model was closest to that measured from the field.

**CONCLUSIONS :** First, through the in-depth experiment, it was explicitly verified that the estimated values of control delay may depend on the selection of an analysis tool. Second, among the diverse tools, the value of control delay estimated using the calibrated microscopic traffic simulation model was most close to that measured from the field. Conclusively, analysts should take into account the variability of control delay values according to the selection of a tool in the case of signalized intersection analysis.

#### Keywords

*traffic operational index, control delay, highway capacity manual, CORSIM, TRANSYT-7F, SYNCHRO, VISTRO*

Corresponding Author : Yoon, Jungeun, Researcher  
(Daehwa-Dong) 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si,  
Gyeonggi-Do, 411-712, Korea  
Tel : +82.31.910.0682 Fax : +82.31.910.0746  
E-mail : yoon22@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received Mar. 10, 2014 Revised Mar. 11, 2014 Accepted Aug. 31, 2014

# 1. 서론

## 1.1. 연구의 배경 및 목적

차량당 평균제어지체(average control delay per vehicle)는 단속류 교통시설인 신호교차로의 서비스 수준을 평가하는 데 사용되는 대표적인 교통운영지표이다. 이는 신호교차로에 접근하는 차량이 속도를 감속하면서부터 교차로를 벗어나기 위해 다시 가속하여 본래의 속도를 낼 때까지 교통신호운영으로 인한 시간손실의 평균값을 말하며 초/대 단위로 산출된다. 이러한 차량당 평균제어지체에 의하여 신호교차로의 서비스 수준을 A, B, C, D, E, F, FF, FFF 총 8단계로 구분한다(국토해양부, 2013). 서비스 수준은 신호교차로의 기하구조 및 신호시간 개선을 위한 중요한 고려사항 중 하나이기 때문에 차량당 평균제어지체는 신호교차로를 평가하는 데 중요한 교통운영지표라고 할 수 있다.

차량당 평균제어지체를 분석하기 위하여 사용하는 방법은 직접 측정하는 방법과 계산식 또는 분석도구(analysis tool)를 사용하는 방법이 있다. 전자의 경우 대상 교차로에서 직접 관측을 하여 차량당 평균제어지체를 산출하며, 후자의 경우 도로용량편람(이하, KHCM)에서 제시된 계산식을 사용하여 산출하는 방법과 분석도구인 SYNCHRO 등을 사용하는 방법이 있다.

본 연구의 목적은 실제 신호교차로에서 관측하여 산출한 차량당 평균제어지체 값과 다양한 분석도구를 사용하여 산출한 값을 비교함으로써 분석도구에서 산출된 제어지체 값들이 얼마나 차이가 나는지 그리고 제어지체를 정확하게 산출할 방법이 무엇인지를 확인하고자 한다.

본 연구에서는 차량당 평균제어지체를 비교하기 위하여 직접 관측 방법 및 KHCM의 제어지체 산출방법을 사용함과 동시에 신호교차로 분석도구 중 거시 결정적 모형(macro deterministic model)으로 SYNCHRO, TRANSYT-7F, VISTRO를 사용하였고 미시교통시뮬레이션모형(microscopic traffic simulation model)으로 CORSIM을 사용하여 분석대상 접근로의 제어지체를 산출 후 비교하였다.

## 1.2. 연구의 방법

본 연구는 신호교차로의 한 접근로를 대상으로 도로용량편람(국토해양부, 2013)에서 제시하는 차량당 평균제어지체 조사방법을 이용하여 현장에서 조사한 후, 조사된 제어지체 값을 다른 분석도구들인 SYNCHRO, TRANSYT-7F, VISTRO, 그리고 CORSIM을 이용하

여 추정된 제어지체 값과 비교하였다. 미시교통시뮬레이션모형인 CORSIM은 현장에서 조사된 통행시간을 이용하여 정산(calibration)함으로써 현실 교통연건을 충분히 반영할 수 있도록 조정하였다.

# 2. 이론적 고찰

## 2.1. 현장 관측 제어지체 산출방법

현장으로부터 관측한 15초 단위의 정지 및 통과차량 대수와 KHCM에서 제시된 Eq. (1)을 이용하여 차량당 평균제어지체를 산출할 수 있다(국토해양부, 2013).

$$D_{control} = \frac{\sum V_s \times I}{V} \times 1.3 \quad (1)$$

여기서,

$D_{control}$  : 차량당 평균제어지체

$\sum V_s$  : 각 시간간격마다 정지해 있던 차량 대수

$I$  : 시간간격(15초)

$V$  : 분석시간 동안의 통과 차량 대수

## 2.2. KHCM의 제어지체 산출방법

KHCM의 제어지체 계산식은 균일지체, 증분지체, 추가지체로 구성되며 Eq. (2)와 같이 산출할 수 있다(국토해양부, 2013).

$$d = d_1 \times PF + d_2 + d_3 \quad (2)$$

여기서,

$d_1$  : 균일지체(uniform delay)

$PF$  : 연동보정계수(progression adjustment factor)

$d_2$  : 증분지체(incremental delay)

$d_3$  : 추가지체(initial queue delay)

## 2.3. 분석도구를 이용한 제어지체 산출방법

### 2.3.1. TRANSYT-7F의 제어지체 산출식

TRANSYT-7F는 기본적으로 미국 HCM 2000(이하, USHCM 2000)에서 제시하는 제어지체 산출식을 준용한다. USHCM 2000의 차량당 평균제어지체 산출방식은 KHCM의 방식과 유사하며 Eq. (2)와 같이 표현

할 수 있다(McTrans, 2009).

Eq. (2)에서 제시된 균일지체는 TRANSYT-7F에 포함된 Uniform queue profile에 해당하며 Eq. (3)과 같이 산출된다.

$$D_u = \frac{\sum_t^N m_t}{N} \quad (3)$$

여기서,

$D_u$ : Uniform Delay in veh-hour/hour

$N$ : 주기당 step의 수

$m_t$ : step t 동안 대기행렬의 차량 대수

TRANSYT-7F에서 연동보정계수와 추가지체는 자동적으로 균일지체에 반영되고, 증분지체는 USHCM 2000에 나온 식을 준용하여 산출한다(McTrans, 2009).

### 2.3.2. SYNCHRO의 제어지체 산출식

SYNCHRO는 퍼센타일 지체(percentile delay) 개념을 이용하여 신호교차로의 차량당 평균제어지체를 산출한다. 퍼센타일 지체는 포아송분포를 활용해 다양한 교통량을 가정하여 차량당 평균제어지체를 산출하는 방법이다. 차량의 도착률은 포아송분포에 따라 변한다는 가정을 토대로 총 5개의 교통량 시나리오 즉, 교통량이 10th, 30th, 50th, 70th, 90th 퍼센타일에 해당할 때의 교통량(percentile volume)을 산출하는데 이는 Eq. (4)와 같이 산정할 수 있다(Husch 등, 2006).

$$V_{pct} = (m + z \times s.d.) \times \frac{3600}{C} \quad (4)$$

여기서,

$V_{pct}$ : 퍼센타일 교통량

$m$ : 주기당 평균 도착률  $\left(m = V \times \frac{C}{3600}\right)$

$V$ : 시간당 차량 도착률

$C$ : 주기

$z$ : 퍼센타일별 계수값  $\begin{bmatrix} 10th: -1.28 \\ 30th: -0.52 \\ 50th: 0 \\ 70th: 0.52 \\ 90th: 1.28 \end{bmatrix}$

$s.d.$ : 표준편차, 포아송분포의 경우  $\sqrt{m}$  과 같음

산출된 퍼센타일 교통량과 Eq. (5)을 이용하여 퍼센타일 지체를 계산한다.

$$VD = \frac{V_{pct}}{\left(1 - \frac{V_{pct}}{s}\right) \times 3600} \times \frac{R^2}{2C} \quad (5)$$

여기서,

$VD$ : 주기당 지체

$V_{pct}$ : 퍼센타일 교통량(대/시)

$s$ : 포화교통류율

$R$ : 적색신호시간

### 2.3.3. VISTRO의 제어지체 산정방식

VISTRO는 USHCM 2000, USHCM 2010, Kimber(Roundabout의 경우), Critical Movement 등 다양한 방법론을 이용하여 교차로를 평가할 수 있다(Bill, 2013). 참고로, 본 연구에서는 KHCM에서 제시하는 제어지체 산출방법론과 USHCM 2000의 제어지체 산출방법론이 가장 유사하기 때문에 VISTRO에서 USHCM 2000을 이용하여 신호교차로의 제어지체를 산출하였다.

## 2.4. 관련 연구

김영찬 등(1991)은 정지지체를 접근지체로 환산할 때 사용하는 지체도 전환비인 1.3 대신에 사용할 수 있는 지표의 가이드라인을 제시하였다. 서울특별시 전자교통 신호 운영자료를 무작위로 추출하여 신호주기를 80초 이하, 80초 초과 100초 미만, 100초 이상 등 3가지로 분류하였고 주기가 길어질수록 지체도 전환비가 감소하는 것을 발견하였다. 지체도 전환비는 유효적색시간과 반비례하여 감소하는데 신호주기가 증가할수록 유효적색시간이 함께 증가하기 때문에 1.38에서 1.25까지 감소함을 보였다. 하지만 서울특별시의 경우 지체도 전환비가 평균 1.29로 산출되어 USHCM에서 제시하는 값과 매우 유사함을 발견하였다.

조준한 등(2005)은 제어지체를 분석하는데 있어서 거시 결정적 모형과 미시 확률적 모형을 비교·분석하였다. 거시 결정적 모형은 차량군 분산(platoon dispersion)을 토대로 교통 패턴을 계산하는데 반해 미시 확률적 모형은 개별 차량 간의 추종(car-following), 차로변경(lane-changing), 간격수락(gap-acceptance) 등에 의해 교통상황이 묘사됨을 발견하였다. 또한 정산이 비교

적 정확하게 수행되었다고 하더라도 대부분의 모형 알고리즘이 비공개되어 있기 때문에 일반적으로 거시 결정적 모형보다 미시 확률적 모형이 현실을 더 잘 반영할 수 있음을 밝혔다.

Olszewski(1993)는 일반적으로 접근지체(approach delay)와 정지지체(stopped delay)의 전환비는 1.3에 가까우나 신호주기가 짧은 경우와 녹색현시가 긴 경우에는 전환비가 1.3보다 더 커질 수 있음을 발견하였다.

Francois 등(2004)은 1차로 접근로를 가진 교차로(single-lane intersection approach)에서  $v/c$  비를 변화시키며 다양한 지체(delay) 산출모형을 비교하였다. 1981 Australian Capacity Guide, 1995 Canadian Capacity Guide, 1997 USHCM, INTEGRATION microscopic traffic simulation model 등이 비교되었으며 다양한 포화도 조건에서 사용된 모형들의 지체 값은 유사하게 산출되었고 산출된 지체는  $v/c$  비 0.6 이하에서 타당함을 확인하였다.

Park 외(2004)는 미시교통시물레이션모형인 CORSIM, VISSIM, SIMTRAFFIC, PARAMICS를 이용하여 연동 신호교차로군에 대한 시물레이션을 수행한 후 각 모형의 성능을 자료입력 용이성, 네트워크 구축 용이성, 시물레이션 용이성, 시물레이션 결과 유용성 등을 비교하였다(Park 외, 2004).

## 2.5. 기존 연구와의 차별성

신호교차로 교통운영지표 중 하나인 차량당 평균제어지체의 정확한 산출은 교통운영 측면에서 매우 중요하다. 하지만 기존에 개발되어 있는 다양한 제어지체 산출 모형들은 각각의 특성을 지니고 있기 때문에 선택된 모형 또는 도구에 따라 각각 산출된 차량당 평균제어지체 값이 상이한 경우가 발생할 수 있다. 실제 교차로 현장에서 실측한 제어지체 값을 참값으로 판단할 수 있지만, 방대한 조사비용과 노력이 필요하기 때문에 직접조사를 대체하기 위한 다양한 분석 방법론을 비교·분석하여 현실을 가장 잘 반영할 수 있는 방법론을 찾아낼 필요가 있다. 본 연구는 다양한 교통 시물레이션 소프트웨어에 초점을 맞추어 분석을 진행하였으며 반복적인 기법으로 최적값 탐색에 탁월한 성능을 보이는 유전자알고리즘과 다양한 정산 파라미터들을 통해 시물레이션 네트워크가 현실을 잘 반영할 수 있도록 하였다. 특히 신호교차로의 차량당 평균제어지체 산출에 빈번하게 사용되는 기존 소프트웨어들과 최근 출시된 PTV Group의 Vistro를 다루어 더욱 다양한 소프트웨어들의 교통운영지표 산출

성능을 비교한 것이 특징이다. 또한 신호교차로의 차량당 평균제어지체 산출을 위해 기존 소프트웨어를 사용할 경우 입력하여야 하는 속도 값에 대한 민감도 분석을 실시하여 적절한 입력값에 대한 이해를 돕고자 한다.

## 3. 시물레이션 모형 네트워크 구축

### 3.1. 분석대상구간 및 범위 선정

본 연구의 분석대상구간은 대전광역시 서구 둔산 1동에 위치한 한마루네거리 NB 접근로로 설정하였다. 한마루네거리가 위치한 문예로는 왕복 6차로로 구성되어 있기 때문에 분석대상구간인 한마루네거리 NB 접근로의 정지지체를 관측하는데 있어 접근로의 규모가 적합하다고 판단하였다. 또한 진·출입교통량, 노상주차대수 등의 영향이 교차로 전체에 없거나 적은 구간이므로 조사된 차량당 평균제어지체의 정확도를 확보하는 데 용이하다고 판단되어 상기 구간을 분석대상구간으로 선정하였다.

본 연구의 공간적 범위인 네트워크 구축 범위는 한마루네거리와 인접한 네 개의 교차로(모정네거리, 햇님네거리, 크로바네거리, 목련네거리)를 포함한다. 이는 연동화된 신호교차로에서 발생할 수 있는 미터링 효과를 고려하기 위함이다.

본 연구의 시간적 범위는 오전 첨두시간이 조금 지난 시간인 평일 오전 9시부터 오전 10시까지이다. 이 시간대를 시간적 범위로 선택한 이유는 오전 첨두시간에 발생하는 혼잡을 피함으로써 현장에서 제어지체를 정확히 측정하기 위해서이다. 본 연구에서는 도로용량편람(국토해양부, 2013) <부록 H>에서 제시하고 있는 신호교차로 지체조사 방법을 사용하여 현장에서 제어지체를 조사하였고, 조사된 제어지체 값을 다른 분석도구를 통해서 추정된 제어지체 값과 비교하였습니다. 도로용량편람 396쪽 <부록 H> 신호교차로의 지체조사 방법에서는 통행시간을 조사하여 제어지체를 구하는 방법과 정지지체만 조사한 후 제어지체를 구하는 방법, 두 가지를 제시하고 있습니다. 이 경우 어떤 방법을 선택하든 두 방법 모두 “분석기간 이전에 남아 있는 대기차량에 의한 추가지체는 고려하지 않는다”라고 전제하고 있다. 따라서 도로용량편람에서 제시하는 제어지체 조사방법을 사용하기 위해서는 분석기간 이전에 남아 있는 대기차량이 없는 상황을 대상으로 할 수밖에 없다. 따라서 비교적 교통량이 적어 분석기간 이전에 대기차량이 남아 있는 경우가 거의 발생하지 않는 오전 첨두시간을 조

금 지난 시간대를 선택하게 되었다.

### 3.2. 자료수집

2013년 4월 5일 금요일 오전 9시부터 오전 10시까지 해당 교차로에서의 관측을 통해 교통량, 신호현시 등을 수집하였다. 그리고 같은 시간 목련네거리부터 모정네거리까지의 구간을 통과하는 차량들의 양방향 통행시간과 한마루네거리 NB(northbound, 북향) 접근로의 정지지체를 관측하였다. 교통량의 경우 각각의 교차로에서 비디오영상 촬영으로 차량의 회전방향과 차종을 고려하여 기록하였다. 교통량 조사 시 도류화되지 않은 공용 우회전 차로에서 적색신호에 우회전하는 Right Turn On Red(RTOR) 차량은 기록에서 제외하였다. 이는 신호교차로 분석이 녹색신호를 소모하는 차량만 취급하기 때문이다. 신호현시 및 연동 옵셋의 경우 도로교통공단 대전·충남지부에서 제공 받았다. CORSIM 네트워크 정산 시 기준지표로 활용하기 위하여 통행시간을 측정하였으며 이때 시험차량 방법을 사용하였다. 시험차량을 운전하는 운전자는 교통류의 평균적인 속도로 주행하는 평균속도 방법으로 차량을 주행함으로써 자료를 수집하였다. GPS 단말기를 탑재한 두 대의 차량을 사용하였으며 총 11회의 왕복통행시간 데이터를 수집하였다. GPS 데이터는 수집 후 교차로의 정지선을 기준으로 가공하였는데 이때 초당 1회씩 기록된 위도·경도



Fig. 1 GPS Plots Example

좌표를 사용하였으며 정지선이 두 좌표 사이에 있을 경우 보간법을 통해 보정하였다.

분석대상구간의 통행시간을 산출하기 위하여 GPS를 사용하는 경우 GPS의 정확도 확인이 필요하다. 특히, 도심지에서 GPS를 사용할 경우 난청 및 전파간섭 등으로 인한 GPS 정확도 저하 문제가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 GPS의 정확도를 평가하기 위해 수집된 GPS 좌표를 지도상에 표기하여 이상치(outlier)가 존재하는지 확인하였다. 매초 GPS를 장착한 차량의 위치를 표시한 결과 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 특별한 이상치가 발견되지 않아, 현장에서 수집된 GPS 자료의 정확도가 연구에 활용할 수 있을 만큼 충분하다고 판단하였다.

SB(southbound, 남향) 통행시간의 경우도 동일한 방법으로 측정하였다. 그 결과 한마루네거리 NB 통행시간의 평균은 177.45초, SB 통행시간의 평균은 129.36초로 산출되었다. 또한 한마루네거리 NB 접근로를 영상 촬영한 후 15초 단위의 정지차량대수를 수집하여 정지지체로 산정하였고, 일반적으로 사용하는 정지지체에 1.3배하여 신호교차로의 접근지체로 간주하는 방법을 따랐다(Robertson 등, 1994).

### 3.3. 네트워크 구축

본 연구에서는 차량당 평균제어지체를 산출하기 위하여 직접관측 및 KHCM의 방법과 신호교차로 분석도구의 거시 결정적 모형인 SYNCHRO, TRANSYT-7F, VISTRO를 사용하였고, 미시 확률 모형인 CORSIM을 사용하였다. 각각 분석도구의 버전은 SYNCHRO 6, VISTRO 2.0, CORSIM 6.2 그리고 TRANSYT-7F 11.31을 사용하였다. 네트워크를 구축하는 과정은 다음과 같다. 첫 번째, 도로조건으로 사용하기 위하여 포털 사이트 다음(<http://map.daum.net>)에서 제공하는 위성사진 Fig. 2를 참고하였다. 실제 분석구간의 기하구조를 유사하게 묘사하기 위해 접근로의 길이와 차로노면표시 등을 참고하였다. 두 번째, 관측한 교통량으로부터 산출한 첨두시간계수(peak hour factor, PHF)와 중차량 혼입률을 교통조건으로 사용하였다. 이 때 보행자 횡단자수는 관측의 어려움으로 고려대상에서 제외하였다. 세 번째, 신호조건으로 주어진 현시표의 신호현시와 연동 옵셋(offset)을 사용하였다. 마지막으로 SYNCHRO의 CORSIM Analysis 기능을 이용하여 SYNCHRO 네트워크를 CORSIM 네트워크로 변환시킨 후, CORSIM 네트워크 정산을 진행하였다.

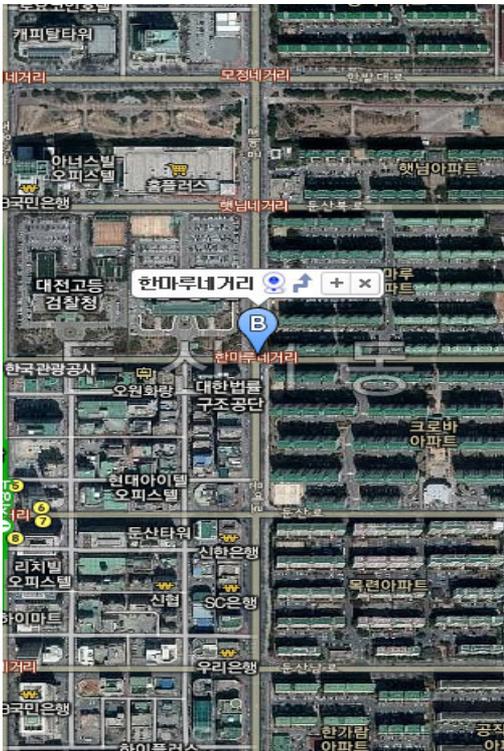


Fig. 2 Analysis Network

### 3.4. 네트워크 정산

본 연구에서는 미시교통시물레이션모형으로서 CORSIM을 사용하였다. 미국에서 개발된 CORSIM은 제어지체를 산출할 수 있으며 국내에서도 빈번히 사용되어온 분석도구이다. 미시교통시물레이션모형을 사용할 경우 구축된 모형에서 산출된 효과지표(measures of effectiveness, MOE) 값이 현장의 MOE 값과 유사하게 나타나는 정도가 분석의 신뢰성 확보에 영향을 미친다. 이러한 이유로 미시교통시물레이션모형 구축 시 사용한 파라미터의 일부를 조정하여 현실을 잘 반영하도록 하는데 이를 정산(calibration)이라 한다. 본 연구에서는 Table 1과 같은 파라미터를 정산대상으로 선정하였고, 유전자알고리즘을 사용하여 정산을 실시하였다 (Park 외, 2006). 참고로 Park 외(2006)은 미시교통시물레이션모형의 정산을 위해서 “초기평가”, “실험실습법을 통한 적절성 평가” 그리고 “유전자알고리즘을 통한 정산” 과정을 거치도록 제시하고 있다. 하지만, “초기평가” 결과 실측된 목적함수 값과 시물레이션을 통해 추정된 목적함수 값(본 논문에서는 통행시간)의 차이가 충분히 적을 경우(본 연구에서는 관측된 NB 통행시간이 177.45초, 정산하지 않은 미시교통시물레이션모형을 이용하여 추정된 통행시간이 180.77초임) “실험실습법을 통한 적절성 평가”를 생략할 수 있다고 하였다. 본

연구에서 선정한 정산 변수는 CORSIM 매뉴얼과 관련 문헌을 참고하여 선정하였다. 정산과정을 통해서 선정된 값을 Table 1에 제시하였다(McTrans, 2009; Yun 외, 2006).

Table 1. Parameters for Calibration

No.	Names of Parameters	Values of Parameters
1	Link mean free flow speed	37
2	Mean queue discharge headway	18
3	Mean start-up lost time	15
4	Left-turn jumper probability	20
5	Left turn speed	31
6	Right turn speed	25
7	Left-turn lagging within 2 seconds	50
8	Left-turn lagging for 2-4 seconds	15
9	Amber interval response	25 22 19 16 13 11 10 9 8 8
10	Gap distribution for left turns	0 68 56 50 44 38 35 32 29 26 17
11	Gap distribution for right turns	1 100 88 80 72 64 60 56 52 48 36
12	Distribution of free flow speed by driver type	75 81 91 94 97 100 107 111 117 127
13	Start-up lost time distribution	1 0 218 140 125 118 102 86 78 63 47 23
14	Discharge headway distribution	1 1 184 124 124 112 100 100 88 64 64 40
15	Duration of a lane-change maneuver	1
16	Mean time for a driver to react to a sudden deceleration of the lead vehicle	25
17	Minimum deceleration for lane change	9
18	Difference in max and min acceptable deceleration for a mandatory lane change	15
19	Difference in max and min acceptable deceleration for a discretionary lane change	5
20	Deceleration rate of lead vehicle	13
21	Deceleration rate of following vehicle	13
22	Driver type factor used to compute driver aggressiveness	40
23	Urgency threshold	2
24	Safety factor	8
25	Percentage of drivers who cooperate with a lane change	100
26	Headway below which all drivers will attempt to change lanes	20
27	Headway above which no drivers will attempt to change lanes	30
28	Mean longitudinal distance over which drivers decide to perform one lane change	2447

CORSIM 네트워크를 정산하기 위하여 목련네거리 정지선부터 모정네거리 정지선까지의 NB의 통행시간을 정산지표로 선정하였으며, 반대방향인 SB의 통행시간을 추가적으로 고려하여 정산을 진행하였다. 정산 전 CORSIM 네트워크를 30번 반복수행(iteration)하여 산출한 평균 통행시간 값과 정산 후 통행시간을 비교한 결과는 Table 2와 같다. 정산이 통계적으로 의미가 있는 지 확인하기 위하여 독립표본 t-test를 실시하였고, 그 결과 유의확률이 0.002로 두 집단의 통행시간의 평균이 차이가 있음을 확인하였다. 또한 시뮬레이션의 애니메이션을 확인한 결과, 통행에 이상이 있는 차량은 발견되지 않았다. 따라서 정산과정이 통행시간에 영향을 주었다고 판단되며, 정산 후 NB 통행시간이 통계적으로 실측값과 가까워진 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Travel Time Comparison before and after Calibration

(unit : seconds)

Types	Surveyed Travel Time	Un-Calibrated Network		Calibrated Network	
		Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation
NB	177.45	180.77	7.22	179.58	12.59
SB	129.36	134.55	3.54	125.40	4.28

정산 전·후 평균절대백분율오차(mean absolute percent error, MAPE)는 Table 3과 같다. 이 때 MAPE는 기준 값과 관측 값의 오차를 나타내는 지표로 n회의 분석 동안 오차백분율의 평균을 나타내며 Eq. (6)과 같이 표현된다.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - X_i|}{Y_i}}{n} \times 100 \quad (6)$$

여기서,

MAPE : 평균절대백분율 오차

n : 분석 횟수

Y<sub>i</sub> : 기준 값

X<sub>i</sub> : 관측 값

NB의 MAPE는 정산 전 3.0675에서 정산 후 1.2003으로 감소하였고, SB의 MAPE는 정산 전 4.1806에서 정산 후 3.0612로 감소하였다. 양방향의 MAPE로 알

수 있듯이 정산 전보다 정산 후가 실제 네트워크를 더 잘 반영하는 것으로 나타났다.

Table 3. MAPE Comparison before and after Calibration

(unit : %)

Name of Approach	Un-calibrated Network	Calibrated Network
NB	3.0675	1.2003
SB	4.1806	3.0612

## 4. 제어지체 산출결과 비교분석

### 4.1. 현장조사를 통한 관측값

현장에서 관측한 자료를 활용하여 각 차로별 제어지체 값을 산출하였다. 또한 KHCM의 방법론에서 제시한 차로군 분류 방법에 따라 해당 접근로의 차로군이 하나의 통합차로군으로 분류되었기 때문에 각 차로의 제어지체 값을 차로별 교통량으로 가중 평균하여 접근로의 차량당 평균제어지체를 산출할 수 있었다. 산출한 제어지체 값은 Table 4와 같이 16.6초/대로 서비스 수준 B로 나타났다.

Table 4. Average Control Delay per Vehicle Measured from Field

(unit : s/veh)

# of lane	1	2	3
per lane	17.1	17.6	10.6
NB	16.6		

### 4.2. KHCM 산출값

KHCM은 교차로의 도로조건, 교통조건 그리고 신호조건을 입력함으로써 차로군별, 접근로별, 교차로 전체의 서비스 수준을 산출할 수 있는 방법을 제시한다. 이 때 각 접근로에 입력 값으로 사용되는 순행속도는 정산된 CORSIM 네트워크의 링크속도 값을 사용했다. 물론 CORSIM 입력 값으로 사용되는 자유교통류속도(free flow speed)와 도로용량편람의 순행속도는 다른 개념이지만 교차로 조사시간대가 첨두시간대가 아니었기 때문에 링크내부마찰이 크지 않다고 판단을 하였다. 또한 본 연구에서 제어지체 산정을 위하여 사용하는 순행속도 값은 지체를 계산하는 데 크게 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 정산된 CORSIM 네트워크를 참고하여 한마루네거리 NB와 SB의 순행속도는 76kph, EB와 WB의 순행속도는 66kph으로 설정하였다.

한마루네거리의 주방향(NB 및 SB)은 직진 좌회전 공

용 차로, 직진 전용차로, 직진 우회전 공용 차로로 구성된 편도 3차로인 도로이다. NB의 차로군은 하나의 통합차로군이며 산출된 차량당 평균제어지체 값은 Table 5와 같다.

Table 5. Average Control Delay per Vehicle from KHCM

Approach	NB
Control Delay	26.1 s/veh

KHCM에서 산출된 제어지체는 26초/대를 보이며 서비스 수준 B를 만족하였지만, 현장 관측 값과 차량당 9.5초의 차이가 발생하였다.

### 4.3. CORSIM 산출값

정산된 CORSIM 네트워크에서 산출된 한마루네거리 NB의 차량당 평균제어지체는 Table 6과 같다.

Table 6. Average Control Delay per Vehicle from Calibrated CORSIM

Approach	NB
Control Delay	18.5 s/veh

정산된 CORSIM에서 산출된 값은 18.5초/대의 차량당 평균제어지체를 보이는 것으로 나타났고 서비스 수준은 B를 만족하고 있다. 또한 현장 관측 값과 1.9초/대의 비교적 적은 차이를 보이고 있다.

### 4.4. TRANSYT-7F 산출 값

TRANSYT-7F에서는 CORSIM(\*.trf) 파일을 연계하여 분석을 수행할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 정산된 CORSIM 네트워크를 이용하여 TRANSYT-7F로 분석하였고, 그 결과는 Table 7과 같다.

Table 7. Average Control Delay per Vehicle from TRANSYT-7F

Approach	NB
Control Delay	18.5 s/veh

TRANSYT-7F 분석을 토대로 차량당 평균제어지체는 18.5초/대로 산출되었다. 한마루네거리 NB의 값뿐만 아니라 네트워크 전체의 차량당 평균제어지체가 CORSIM 산출 값과 동일함을 볼 수 있다.

### 4.5. SYNCHRO 산출 값

SYNCHRO 6는 Lane, Volume, Timing 그리고 Phasing window 등으로 구성되어 있는데 입력하는 값은 최대한 KHCM에서 사용되는 기본 값(default)을 사용하였다. 차량당 평균제어지체에 해당하는 접근지체는 접근로별로 산출되며 그 결과는 Table 8과 같다.

Table 8. Average Control Delay per Vehicle from SYNCHRO

Approach	NB
Control Delay	24.1 s/veh

SYNCHRO가 산출한 값은 24초/대의 차량당 평균제어지체를 보이는 것으로 나타났고 서비스 수준은 B를 만족하고 있지만, 현장 관측 값과 7.5초의 차이가 발생하였다.

### 4.6. VISTRO 산출 값

VISTRO는 USHCM 2010, USHCM 2000 등 다양한 분석방법론을 이용하여 네트워크를 분석할 수 있는데 본 연구에서는 USHCM 2000의 방법론을 사용하였고 산출된 값은 Table 9와 같다.

Table 9. Average Control Delay per Vehicle from VISTRO

Approach	NB
Control Delay	26.8 s/veh

VISTRO가 산출한 값은 26.8초/대의 차량당 평균제어지체를 보이는 것으로 나타나 실제 관측 값과 10.2초의 차이가 발생하여 다른 분석도구들에 비해 상대적으로 차량당 평균제어지체가 높은 것으로 나타났다.

### 4.7. 제어지체 분석결과 비교

실제 관측 값과 KHCM, 신호교차로 분석도구인 SYNCHRO, TRANSYT-7F, VISTRO를 사용하여 분석대상 접근로인 한마루네거리 NB 접근로의 차량당 평균제어지체를 산출한 결과는 Table 10과 같다.

KHCM과 분석도구를 이용할 경우 추정된 차량당 평균제어지체 값은 실제 관측 값보다 큰 것으로 나타났다. MAPE를 산출한 결과 최대 61.45%를 보이고 있다. CORSIM을 이용하여 산출한 차량당 평균제어지체 값이 1.9초/대의 차이를 보이며 참값으로 가정한 관측 값

Table 10. Summary of Control Delays

(unit : s/veh)

Methods		Control Delays	Difference	MAPE (%)
Surveyed Data		16.6	-	-
KHCM		26.1	9.5	57.23
Micro	CORSIM	18.5	1.9	11.45
	TRANSYT-7F	18.5	1.9	11.45
Macro	SYNCHRO	24.1	7.5	45.18
	VISTRO	26.8	10.2	61.45

에 가장 근접하게 나타났다. 하지만 분석기간 내 한마루네거리 NB의 교통량이 691대/시 입을 고려할 때 전체 접근로의 총 제어지체의 오차는 1,312.9초/대이며, MAPE 값은 10%를 초과한다.

특히 KHCM을 이용하여 산출한 차량당 평균제어지체 값이 9.5초/대의 차이를 보이며 상당히 큰 MAPE 값을 보이고 있다. 즉, KHCM에서 제시하고 있는 분석방법이 다른 분석도구보다 현실을 잘 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 다른 방법과는 달리 KHCM의 경우 개별 교차로를 대상으로 분석을 수행하는데, 이는 연동화 되어있는 신호에 의해 차량군(platoon) 형태로 차량이 도착하는 점을 적절히 반영하지 못하는 것으로 판단된다.

VISTRO의 경우 USHCM 2000의 분석방법을 따르는 형태로 분석하였기 때문에 KHCM의 산출 값과 유사한 값을 보였으며 두 방법론의 유사점을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

TRANSYT-7F는 정산된 CORSIM의 네트워크를 이용하였기 때문에 거시 결정적 모형 중에서 가장 우수한 성능을 보여 주고 있다. 따라서 철저한 차량당 평균제어지체의 분석이 필요한 경우는 본 연구에서 수행한 방법과 같이 미시 확률적 모형인 CORSIM을 이용하여 네트워크를 구축하고 정산한 후 이를 CORSIM 네트워크를 TRANSYT-7F 네트워크로 변환하는 것이 가장 적절한 것으로 판단된다.

## 5. 속도별 차량당 평균제어지체 비교

신호교차로 분석도구를 사용할 때에는 순행속도 또는 자유속도를 입력하여야 한다. 하지만 교차로 분석 시 순행속도 또는 자유속도로 어떠한 값을 넣는 것이 적절한지에 대한 기준이 분명하게 제시되지 않아 혼란을 초래하는 경우가 발생하고 있다. 관련 매뉴얼에 따르면, KHCM은 순행속도를 사용하고, SYNCHRO와 CORSIM은 자유속도를 사용하는 것을 확인할 수 있다.

자유속도는 도로의 기하구조에 의해서만 영향을 받는 속도로 교통량이 매우 적어 교통류 내부마찰에 영향을 미치지 않고 교통통제설비가 없다고 가정할 때 제한속도 안에서 선택할 수 있는 최고속도이다. 그에 반해 순행속도는 자유속도에 차량 흐름에 따른 내부마찰을 고려한 속도이다(도철웅, 2007). 즉, 순행속도와 자유속도가 같은 개념이 아니므로 분석도구들이 속도에 얼마만큼 민감한지 분석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 민감도분석(sensitivity analysis)을 실시하여 속도 값의 변화가 산출된 제어지체 값에 미치는 영향을 살펴보았다. KHCM, SYNCHRO, CORSIM에 대하여 입력속도를 20kph부터 100kph까지 변경하면서 시뮬레이션을 진행하였고 차량당 평균제어지체를 산출했다. 그 결과는 Fig. 3와 같은 추세로 나타났다.

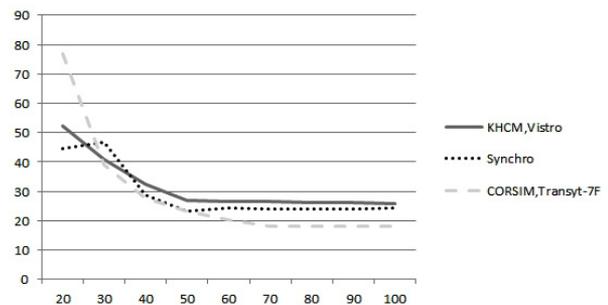


Fig. 3 Control Delays by Speeds

(row unit : kph, column unit : s/veh)

속도가 30kph 이하일 때는 세 가지 방법 모두 상당히 높은 차량당 평균제어지체를 보인다. 하지만 속도가 50kph 이상부터 차량당 평균제어지체 값이 일정한 수준으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 교통통제설비가 없다는 가정에서 첨두시가 아닐 때 운전자가 30kph 이하의 속도로 차량을 운행하는 것은 자유속도 또는 순행속도의 의미에 맞지 않는다고 판단된다. 따라서 속도가 50kph 이상인 조건에서 차량당 평균제어지체는 속도에 민감하지 않은 것으로 판단된다.

## 6. 결론 및 향후 연구과제

### 6.1. 결론

본 연구는 해당 교차로 자료의 실제 관측 값과 다양한 신호교차로 분석도구를 사용하여 신호교차로의 서비스 수준 평가척도인 차량당 평균제어지체를 산출 및 비교하는 것이 목적이다. 현장조사를 토대로 SYNCHRO 네

트위크를 구축하였고 CORSIM Analysis 메뉴를 사용해 CORSIM 네트워크로 변환하였다. GPS 단말기와 시험차량 방법을 사용해 관측한 통행시간을 기준으로 CORSIM 네트워크를 정산하여 실제 네트워크를 잘 묘사할 수 있도록 하였다.

실제 관측 값과 KHCM, 그리고 분석 도구인 SYNCHRO, TRANSYT-7F, VISTRO를 사용하여 분석대상 접근로인 한마루네거리 NB 접근로의 차량당 평균제어지체를 산출하였고 현장 조사 값과 비교하였다.

분석결과, 실제 관측 값과 분석도구를 이용한 산출 값은 선택한 분석도구의 유형과 종류에 따라 제어지체 값이 다를 수 있다는 것이 계량적으로 증명되었다. 따라서 다양한 모형을 사용할 경우 분석도구에 따라 제어지체 값이 다르게 도출될 수 있음을 인지하고 분석 결과를 이해하여야 할 필요가 있다. 분석가가 어떤 분석도구를 선택하였는가에 의하여 분석 결과가 달라질 수 있다는 점에서 신중한 판단이 필요하다.

또한 다양한 분석도구 중 미시교통시뮬레이션모형을 사용하는 방법이 관측된 제어지체 값과 상대적으로 유사함을 확인하였다. 따라서 정밀한 제어지체 산출을 위해서는 미시교통시뮬레이션모형을 적용하는 것이 바람직하며, 미시교통시뮬레이션모형을 사용할 때에는 현장의 교통여건을 충분히 반영하기 위해 정산과정이 필요하다.

## 6.2. 연구의 한계 및 향후 연구과제

본 연구는 다양한 경우의 도로조건, 교통조건, 신호조건 등을 폭넓게 다루지 못하고 특정한 교차로에 대하여 분석을 수행하였기 때문에 일반적이며 보편적이기 보다는 어느 특정 경우에 대하여 국한되는 한계가 있다. 따라서 본 연구의 결과를 다양한 형태의 신호교차로로 일반화시키기에는 제약이 있다. 하지만, 본 연구의 결과는 향후 연구과제의 하나로 다양한 조건을 가진 교차로에 대하여 분석을 하는 계기로 활용할 수 있을 것이다.

본 연구의 시간적 범위로서 오전 첨두시간이 지난 다소 교통량이 적은 시간대를 선택함으로써 제어지체의 중요도가 훨씬 높은 과포화(oversaturation) 상황을 고려하지 못하는 한계가 분명히 있다. 이러한 선택은 본 연구에서 중요한 비교기준으로 사용된 제어지체 값을 현장에서 조사하기 위해서 부득이하게 사정이 있지만, 또한 oversaturation 상황을 고려하는 것이 필요하기 때문에 향후 현장에서 과포화 상황의 제어지체 값을 조사할 수 있는 여건이 된다면, 과포화 상황을 대상으로

하는 연구가 진행될 필요가 있다. 이러한 과포화 상황에서의 제어지체 값은 현재 도심부에 설치되어 있는 UTIS(Urban Traffic Information System)에서 수집된 프로부 차량의 GPS 궤적정보를 이용하여 산출할 수 있을 것으로 판단된다. 현재로서는 UTIS에서 수집되는 프로부 차량의 수가 부족한 관계로 당장 분석될 수는 없으나, 향후 프로부 차량의 수가 증가할 경우 분석이 가능할 것으로 사료된다.

또한 신호교차로의 대표적인 교통운영지표인 제어지체 산출을 위한 분석도구 선정 및 평가를 위하여 신호교차로 기하구조 유형별(접근로 차로수, 3지 또는 4지 교차로 등), V/C비 규모별, 신호주기 길이별(cycle length)로 비교·분석이 추가적으로 수행될 필요가 있다고 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2010-0029448)입니다. 또한 한국건설기술연구원 주요사업(2014 차로(lane)를 고려한 도로망 분석 기술 개발)의 연구비 지원에 감사드립니다.

### References

- Bill Cisco, 2013. PTV VISTRO: ADVANCES IN TRAFFIC ENGINEERING ANALYSIS SOFTWARE, PTV GROUP, p.19.
- Cho, J. et al., 2005. Comparison of Delay Estimates for Signalized Intersection, Journal of Korean Society of Transportation, Vol. 23, No. 1, pp.67-80.
- Doh, T., 2007. Principle of Transportation Engineering, Cheongmoongak Publishing, pp.54-55.
- Francois, D. et al., 2004. Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 38, No. 12, pp.99-122.
- Husch, D. and Albeck, J., 2006. Traffic Signal Software-User Guide Synchro Studio 7, Trafficware.
- Kim, Y. et al., 1991. Singnalized Intersection Delay Model, Journal of Korean Society of Transportation, Vol. 15, No. 2, pp.27-40.
- McTrans, 2009. TRANSYT-7F Users Guide, McTrans, pp.225-230.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013. Korea Highway Capacity Manual 2013, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, pp.209-417.
- Olszewski, P., 1993. Overall Delay, Stopped Delay, and Stops at Signalized Intersections, Journal of Transportation Engineering, Vol. 119, No. 6, pp.835-852.
- Park, B., Won, J., and Yun, I., 2006. Application of Microscopic Simulation Model Calibration and Validation Procedure: A

- Case Study of Coordinated Actuated Signal System, Transportation Research Board, Transportation Research Record, Vol. 1978, pp.113-122.
- Park, B., Yun, I. and Choi, K., 2004. Evaluation of Microscopic Simulation Tools for Coordinated Signal System Deployment, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 8, No. 2, pp.1-10.
- Robertson, H. et al., 1994. Manual of Transportation Engineering Studies, Prentice-Hall, pp.70-73.
- Yun, I. and Park, B., 2006. Application of Stochastic Optimization Method for an Urban Corridor, Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference L. F. Perrone, F. P. Wieland, J. Liu, B. G. Lawson, D. M. Nicol, and R. M. Fujimoto, eds.