

공사구간이 있는 신호교차로의 지체산정을 위한 새로운 접근

신치현*

Shin, Chi-Hyun*

Modified Approaches to Delay Estimation for the Work Zones in the Proximity of the Signalized Intersections

ABSTRACT

Unlike its archetype predecessor such as the Highway Capacity Manual of the United States, the Korean Highway Capacity Manual of 2013 provides the analytical models for estimating the saturation flow rates for the lane-occupying work-zones in the proximity of the signalized intersections. Direct application of the revised saturation flow rates into the classic control delay models, however, appears to produce unreasonable delay amount as traffic demand approaches lane-group capacities and surpasses them, which is common phenomena in the work-zones. Complex interaction among vehicles, lane-dropping work-zone geometry and signal operations were never accounted in the traditional control delay models, and considerable differences between the delay model outcomes and field observations are repeatedly experienced. This paper proposes the modified approaches to the delay models in the manual, exerted on all three elements of control delay, and particularly focuses on the temporal and spatial boundary expansion in comparing the simulated results to the estimated ones. Extensive microscopic simulation work and calibration effort supports the modified approaches well enough to use them in the work-zone planning and evaluation.

Key words : Control delay, Highway capacity manual, Microscopic simulation, Signalized intersection, Work zones

초 록

2013년 한국 도로용량편람은 그 원형이나 다름없는 미국 편람과는 달리 특수상황의 하나로 신호교차로 주변에서의 공사구간으로 인한 포화교통류율 변화를 산정하는 방법론과 모형을 특별히 제시하고 있다. 보정된 포화교통류율을 바로 제어지체의 산정모형에 적용한 결과 값들이 실제 빈번하게 발생하는 교통수요가 접근부의 용량에 근접하거나 초과하는 상황에서는 현장의 지체경험과 크게 차이난다는 것이 주지의 사실이 되고 있다. 이는 차량과 공사구간의 형태와 기하구조, 신호운영조건 등이 복잡하게 상호작용하는 것을 기존 제어지체 산정모형이 제대로 반영하지 못하기 때문이라 사료된다. 본 연구는 신호교차로 부근에서 시행되는 공사구간 때문에 야기되는 지체의 변화를 보다 잘 수용하는 제어지체 산정의 수정모형을 제시하고 있다. 도로용량편람의 제어지체를 구성하는 세 가지 지체 요소별로 수정 방법을 제시하고 있으며 현 편람의 지체산출과 시뮬레이션 결과를 비교, 평가하는데 시공간적 범위를 확장해야 하는 초점을 간과하지 않았다. 많은 시행착오를 거친 매개변수의 정산 노력과 많은 수의 미시모의실험 실행 결과를 종합해 보면 제안하는 수정모형과 방법론이 도시 및 교외 간선도로 상 도로점용 공사구간의 계획과 평가에 하자 없이 활용될 수 있는 가능성을 보여주었다.

검색어 : 제어지체, 도로용량편람, 미시모의실험, 신호교차로, 공사구간

* 종신회원 · 교신저자 · 경기대학교 도시·교통공학과 교수 (Corresponding Author · Kyonggi University · chshin@kgu.ac.kr)

Received November 27, 2017/ revised December 8, 2017/ accepted January 8, 2018

1. 서론

Seoul Metropolitan Government(2014)에 따르면 2013년 기준으로 도로를 점용, 굴착이 수반된 공사가 41,761건 진행되었고, 비굴착 점용공사를 포함하면 연평균 11만 건을 초과하는 양상을 보여 왔다고 이미 집계된 바 있다(Ko, 2005). 특별히 서울시 도로 1개 차로 이상을 1시간 이상 점용하면서 진행되는 공사의 기간이 20일(자동차전용도로 경우 10일)을 초과하는 경우, 도로점용공사장 교통소통대책자문위원회에 상정하여야 하는데, 2014년부터 2016년까지 총 341건, 연평균 114건이 심의의 대상이 되었으며 1년 미만의 공사인 경우 점용기간이 평균 134일, 1년 이상 장기공사인 경우에는 평균 3년을 초과하는 것으로 나타났다. 차로 점용 규모도 1개 차로에서부터 7개 차로까지 다양하나 평균 1.56 차로를 점용하는 것으로 집계되고 있다(Traffic Operation Division, 2017). 뿐만 아니라 도로점용공사에 따른 교통소통대책 보고서 제출을 요구하고 이를 심의/자문하는 제도가 2000년 서울에서 시작된 후, 대구, 인천, 부천, 광주 등으로 전파되었고 여전히 확산일로에 있기도 하다. 이에 국토교통부는 도로용량편람 개정을 통해 자동차전용도로를 포함, 신호영향권 하 도시가로 상의 공사구간에 대한 교통영향 평가가 가능하도록 공사구간의 용량 산정 또는 영향 받는 신호교차로의 포화교통류를 보정 방법론을 2013년 도로용량편람 특수상황 편에 제공하여 산·학계의 필요에 부응한 바도 있다(MOLIT, 2013).

자동차전용도로의 공사구간 경우에는 용량이 합리적으로 산정되면 공사 시 평균 밀도와 속도, v/c비 등이 즉각 산출되어 그 영향을 가늠하는데 무리가 없다. 그러나 도시가로의 경우 먼저 포화교통류를 재산정하고 이후 용량계산과 제어지체의 도출에 이르는, 도로용량편람 절차에 의거한 분석결과가 실제 공사구간의 이행상태 점검 등을 통해 비교된 현장지체와 간극이 상당히 크다는 경험을 오랫동안 축적하여 왔다. 이 같은 배경에서 본 연구는 현 편람에 의해 제시된 포화교통류를 보정 단계를 넘어서 지체의 산정에 이르는 과정에서 간과되거나 제대로 반영되지 못한 세세한 부분들을 찾아내고 신호교차로 분석 평가척도인 평균제어지체의 세부 개념 별로 구분, 이론적 근간의 수정 필요성을 지적하고 실질적인 현장 고려사항을 바탕으로 지체 부문별 보완 모형을 제시하였으며 많은 노력을 들인 미시 시뮬레이션을 통한 비교, 검증 결과를 제시하고자 한다.

2. 선행 연구 및 문헌고찰

2.1 신호교차로 인근 공사로 인한 포화교통율과 용량의 변화 산정에 관한 연구

신호교차로 영향권에서 일부 차로를 점용하고 계획, 시행되는

공사에 대한 교통영향산정 방법론에 대한 관심은, 특별히 도로용량편람 방법론과 평가척도를 근간으로 하는, 국내외에서 극히 적은 편에 속하는 것으로 파악된다. 그러나 적은 신호교차로 인근 공사구간의 영향산정을 위한 연구노력은 크게 두 종류로 나뉠 수 있다. 먼저 기존 지체 산정식에 대입할 포화교통류를 또는 용량의 변화를 산정해내는 방법론과 모형에 관한 것, 그리고 신호교차로 운영분석의 최종 결과인 (제어)지체 값을 산출해 내려는데 초점을 맞춘 연구로 양분된다.

먼저 2013년 도로용량편람과 그 기반 연구 몇몇이 그나마 선제적으로 신호교차로 인근 공사구간 운영으로 인해 변화되는 포화교통류를 산정하는(차로그룹의 용량산정과 동일시해도 무방함) 해석적 모형을 제안하였는데(Eo and Shin, 2008; KST, 2012; Shin, 2013; Shin et al., 2012), 그 변화된 값을 기존 편람의 신호교차로 평균제어지체 산정공식에 대입함으로써 지체 값을 즉각 산출할 수 있게 하는 길을 텃다할 수 있다. Elefteriadou et al.(2008)도 포화교통류율과 용량산정 산정에 관심을 가지고 수많은 CORSIM 모의실험 결과와 공사를 구성하는 제 변수 간 관계를 회귀모형으로 제시한 바 있으며, 현장 관측 차두간격의 변화를 회귀모형으로 구축하고 포화차두간격 보정식을 제안한 Hajbabaie et al.(2017)의 최근 연구 등 극소수의 해외 연구가 있으나 교차로 인근에서의 다양한 공사 위치와 신호와의 상호작용을 모형에 반영하고 있지는 못하다.

2.2 신호교차로 인근 공사로 인한 제체 산정에 관한 연구

국내의 주요 도로용량편람이 채택하고 있는 제어지체 산정 모형과 그 전제들은 차로수와 감소와 복원이 신호교차로 정지선 상류부 또는 하류부에서 존재하는 상황이 아닌 정상상황을 대상으로 한다. 공사구간에서 비록 보정된 포화교통류율을 사용하여 지체를 도출 하여도 잘 맞지 않는 경우가 적지 않은데, 이 같은 이해를 바탕으로 했거나 달리 독립적으로 지체산정을 도모한 연구는 거의 없는 것으로 파악되고 있다. Joseph et al.(1988)이 유일하게 신호교차로 구간 내에서 차로수가 감소되는 공사구간 전후로 차량의 추종행태와 합분류 거동을 semi-simulation 기법으로 모사하고 이를 이후 하류의 교차로에서 누적 용량-수요 기반 지체 모형과 결합한 IBM-PC/AT 기반 프로그램 개발 관련 연구를 오래 전에 수행하였으나 근포화 및 과포화 상태에서의 제약, 현행 국내의 주요 도로용량편람에서의 지체 개념과 근본적인 차이 등 때문에 실용적 가치는 높아 보이지 않는 것으로 평가된다.

2.3 연구 과소의 이유와 수정 모형의 필요성

공사구간과 관련한 연구의 거의 대부분은 고속도로와 같은 연속류 시설을 대상으로 하고 있는데(Jung and Lee, 2006; Kim and

Lee, 1998; Kim et al., 2001; Krammes and Lopez, 1994; Oh and Ko, 1998; Praveen, 2007; Rahim et al., 2003), 여기에는 이유가 있는 것으로 보인다. 신호교차로 경우 정지선 전후로 공사구간의 다양한 유형과 위치, 신호운영조건 등이 복잡하게 상호작용하기 때문에 현 편람의 신호교차로 분석방법론과 절차를 보완하여 활용하기 보다는 상업용 미시 시뮬레이션 툴을 사용하는 것이 더 용이하기 때문인 것으로 추론된다. 하지만 후자에 소요되는 시간과 비용, 정산 등 기술 노력이 상당하다는 점을 인정한다면 신속하고 합리적 범위에서 정확한 결과를 도출하는 거시 교통류 해석모형의 필요성은 더 강조할 필요 없을 것으로 사료된다. 그밖에 거시적인 접근으로 충격과 이론을 접목하는 시도를 해 볼 수 있겠으나 이 또한 정상적인 접근부와 신호시간에 따른 병목의 존재, 여기에 더해 정지선 전후에서 공사구간이 형성하는 또 다른 병목의 존재 등을 반영한 해석방법론 또는 산정모형 도출이 쉽지 않기 때문인 것으로 판단된다.

3. 현 편람 지체 산정식 관련 이슈와 추구 방법론의 주요 전제 및 고려 사항

3.1 현 편람의 평균제어지체 산정식의 미비점

우리나라 도로용량편람(MoLIT, 2013)의 평균제어지체 식은 2001년도 편람의 식을 그대로 유지한 것인데, 효과적도를 평균정지 지체 개념에서 평균제어지체로 바꾼 미국의 1997년 Highway Capacity Manual (HCM) 산식 변경을 따른 것으로 통상 알려져 있다. 하지만 Dion et al.(2004)의 1997년 HCM, 1981년 Australian Capacity Guide, 1995년 Canadian Capacity Guide 간 신호교차로 지체 비교 연구가 보여주듯 1985년 HCM 이후 축적된 전문가간

교류와(Akcelik, 1988) 수정의 결과라는 데서 그 원류를 찾는 것이 더 합당해 보인다. 미국, 호주, 캐나다 방법론의 포화도에 따른 지체의 변화 추세를 비교하면 거의 일치한다 할 수 있는데, 특수한 상황 보다는 정상적인 교차로 기하조건과 신호운영조건에, 그리고 과포화보다는 신호용량을 초과하지 않는 수요 상황에 실질적인 관심이 있다고 해야 할 것이다.

도로용량편람과 그 원형들이 첨두시간계수(peak hour factor, PHF)를 사용하여 한 시간 교통량을 상향 보정하고 이를 용량에 대비시키어 포화도에 따른 지체를 산정하되 15분간의 분석결과를 사용하도록 하는 것은 과포화상황에 대해 상대적으로 관심이 적다는 증거이기도 한데, 이는 사실 편람의 기본적인 성격과 지향으로 볼 수 있다. 구체적인 이유로 PHF를 활용한 수요의 상향 보정이 결국 증분지체를 늘리는 결과를 초래, 근포화나 과포화 조건에서 기대되는 지체 량 과소평가에 선제적으로 대응하는 것이라고 여기는 것 때문으로 보는 것이 무리가 없어 보인다. 하지만 신호교차로 인근 공사구간과 같이 시공간에 따라 교차로 기하구조가 임시로 변경되는 특수 조건에서의 지체 산정은 앞서 기술했듯 빈번한 용량초과 현상이 발생하므로 근포화서부터 과포화의 특정 범위까지, 예를 들어 포화도 0.85부터 1.20까지, 깊은 관심을 가지고 납득할만한 (제어)지체 값이 산정되는지 검증해야 할 필요가 매우 크다.

Fig. 1은 정상상황에서는 접근부가 3개 차로이나 신호교차로 특정 접근부 정지선의 상류부(near-side) 지점 30m부터 80m까지 구간 길이 50m, 점용 폭을 1개 차로(병목구간 개방차로 2차로)로 하는 공사 상황에서 발생하는 제어지체를 도로용량편람의 방법론으로 산정한 결과와 다양한 CORSIM 시뮬레이션으로 도출한 결과를 비교한 것이다. 교차로의 신호주기 C는 100초, 유효녹색시간

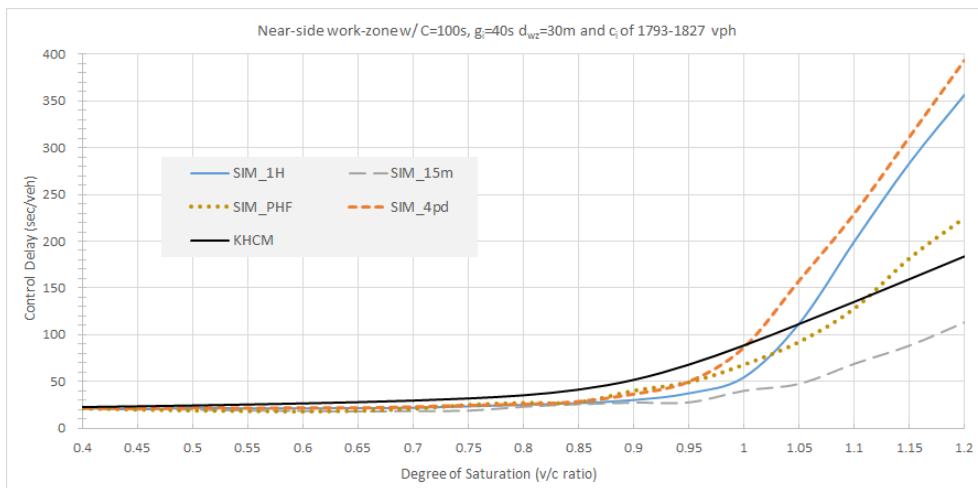


Fig. 1. Comparison of Various Control Delay Estimates for Work-zone Situation

g_s 는 40초, 전술한대로 공사구간과 정지선 이격거리 d_{wz} 는 30미터이다. 먼저 검은색 실선이 편람의 제어지체 산정식에 의한 결과를 대표하고, 청색 실선(SIM_1H)과 오렌지색 실선(SIM_4pd)은 미시 시뮬레이션을 전자는 기본 60분 동안, 후자는 60분을 4개의 15분으로 나누고 PHF 0.9에 맞게 입력 교통량 프로파일을 조정하여 수행한 결과이다. 점선 중 황색점선(SIM_PHF)은 PHF를 적용, 링크 입력 교통량을 상향 조정하고 기본 시뮬레이션 기간을 15분으로 제한한 결과를 나타내며, 회색 점선(SIM_15m)은 PHF 적용 없이 15분 동안만 수행한 결과를 나타낸 것이다. 비록 문제 제기를 위한 preliminary simulation 성격이 짝으나 도로용량편람 2010 (TRB, 2010)이 chapter 7에서 상세하게 지적하고 있는 사공간 경계의 확장 문제(temporal and spatial boundary issue)에 대처하기 위한 방법에 충실히 부응한 것이며 정지선 용량을 조절하기 위한 다양한 정산 노력도 병행하였다.

제어지체 추세를 비교, 분석해 보면 편람의 산정식(이 역시 PHF를 적용하고 지체산정에서 15분으로 분석기간을 제한)은 v/c 비 0.6부터 1.0까지는 실제를 대체로 잘 묘사한다고 평가되는 미시 시뮬레이션의 결과를 항상 상회하고, 그 이후 1.20까지는 차이가 일부 있으나 제어지체를 과소평가하는 경향이 크다는 것을 알 수 있다. 특히 한 시간 전체를 대상으로 한 SIM_1H 및 SIM_4pd의 지체 추세를 비교되면 그 특성상 시행시점에 임박하거나 시간적 여유 없이 계획·시행되는, 그래서 용량초과 현상이 빈발하는, 도시가로 상의 각종 점용공사가 발생시키는 지체의 실제와 편람의 예측 산정치가 크게 어긋남을 의미하고, 이에 대한 대처 방법론을 모색하지 않을 수 없다.

3.2 추구 방법론의 주요 전제 및 고려 사항

본 연구는 차로를 점용하는 공사구간이 인근 신호교차로의 운영에 미치는 영향을 제어지체의 변화로 좀 더 잘 나타내는데 필요한 방법론과 주요 해석모형을 정립하는 것을 목표로 하고 있으며 다음과 같은 전제를 가진다. (1) 분석 방법론에 있어 2013 도로용량 편람 방법론과 절차의 근간을 유지하고 활용한다. (2) 또 현 편람의 공사구간 유형별 포화교통류를 산정(보정)모형은 그대로 사용한다. (3) 도로점용공사는 운영차로 수의 감소로 인해 많은 분석 시간대에 걸쳐 용량초과가 빈번히 예상되므로 과포화 상황에 대한 분석 결과가 합리적이어야 한다. (4) 이론과 논리에 의해 수정·보완된 편람의 해석 모형이 산출하는 결과를 비교, 검증하는 방법으로 잘 설계되어 합리적으로 실행한 미시 시뮬레이션 프로그램 결과에 타당성을 부여한다는 점이다. (5) 그리고 현 제도와 많은 DB 상에서 임의의 한 시간에 대한 교통량 수집과 그 내용에 추가 부담을 주지 않도록 하자는 것 등이다.

이상의 고려 사항과 전제에는 여러 가지 이슈가 뒤 따르는데,

(1) 편람의 거시모형과 미시 시뮬레이션 결과 사이에서 제어지체의 구체적인 개념과 정의가 정합하는가 하는 문제, (2) 과포화 상황 분석의 결과가 신뢰할만한 것이라야 하는데 PHF와 분석기간 (analysis period) 15분 사용에 변화를 도모해야 하는 것이 아닌지의 문제, (3) 도로용량편람의 제어지체 개념에 충실하게 미시 시뮬레이션 결과를 맞추기 위해서는 전술한 사공간 경계의 확장이 반드시 필요하다는 점 등이 대표적인 것이라 할 수 있다.

본 연구에서는 현 편람의 지체모형을 수정함에 있어 세부 보완책들이 제어지체의 세 가지 요소와 긴밀히 연계되도록 하였으며 다시 한 번 제어지체의 개념을 명확하게 묘사하는 한 편, 정상상황에서는 통상 존재 가능성이 적지만 차로점용 공사 중에는 높은 초기대기행렬의 영향을 반영하는 방법도 모색하기로 한다. 본 연구의 의도는 도로용량편람의 제어지체 산정모형을 대체하지는 것이 아니라 도시가로의 공사구간 계획과 평가라는 특수상황에서 활용할 수 있는 제어지체 산정 모형을 모색, 수립하자는 것으로 현 편람 방법론의 확장이자 개선이라는 의의를 가진다고 사료된다.

4. 신호교차로 평균제어지체 요소별 모형의 보정 및 수정

4.1 균일지체(d_1) 부문에서의 문제점과 보정 방안

3.1에서 전술한대로 포화도가 1.0에 도달하기 전까지는 지체의 소량 과대평가가, 그 이후에는 상당한 과소평가가 나타나는데, 이에 대한 대처 방안은 현 편람의 평균제어지체를 요소 별로 구분하여 분석해 보면 한 층 수월하게 찾을 수 있다. 본 장에서는 균일지체 (uniform delay, d_1), 증분지체(incremental delay, d_2), 추가지체 (initial queue delay, d_3) 별로 공사구간과 같이 사공간적으로 특수한 상황에 대한 지체산정 결과 도출의 정교함을 높이기 위한 이론적 접근방법과 해결책을 모색한다. 동시에 계획 공사구간에서의 자료수집과 초기대기행렬 측정 등 현실적 문제를 수용하는 방법도 검토하기로 한다.

현 도로용량편람 신호교차로 부문 특수상황 편에 소개되어 사용되고 있는 포화교통류를 보정/수정 공식 네 가지 중, d_{wz} 및 g_s 측면에서 정지선-공사구간 거리가 아주 멀거나 유효녹색시간이 길지 않은 경우 그리고 이 둘의 조합으로 포화교통류에 변화가 거의 일어나지 않는 상황에 대한 공식 둘을 제외하면 상류부 공사와 하류부 공사에 대한 포화교통류를 보정식 두 개로 압축되며 그 형태를 약간 변형해서 표현하면 상류부 포화교통류를 보정식은 Eq. (1), 하류부 보정식은 Eq. (2)와 같다.

$$S_{1wz} = \left[\frac{d_{wz} \times N - d_{fb} \times N_{wz} + (N - N_{wz}) \times \{L_{wz} + (d_g - d_{wz} + L_{wz}) \times CRF\}}{d_{fb}} \right] \times \frac{3,600}{g_i \times N} \quad (1)$$

$$S_{1wz} = \left[\left(\frac{g_T}{\bar{h}} \times N \right) + \frac{(g_i - g_T)}{\bar{h}} \times CRF \times (N - N_{wz}) \right] \times \frac{3,600}{g_i \times N} \quad (2)$$

Where, N : number of lanes

N_{wz} : number of lanes occupied for the road work

d_{wz} : distance from a stop-line to a work-zone (m)

L_{wz} : longitudinal distance of a work-zone (m)

CRF : capacity reduction factor

(less than or equal to 1.0)

d_g : distance clearable for effective green time (m)

d_{fb} : bumper-to-bumper distance under stand-still condition at a stop-line (m)

g_T : elapsed time from the green initiation to the moment that a shock-wave created at a far-side bottle neck propagates back and reaches to a upstream stop-line (s)

\bar{h} : saturation headway under prevailing conditions (s)

Eqs. (1) and (2)는 의도적으로, 비록 공사구간이지만 정상상황 대비 포화교통류에 영향을 거의 받지 않는 유효녹색시간 부분(g_A)과 포화교통류의 변화가 발생하는 부분(g_B)으로 구분해 포화교통류를 표현하였으며, 보정식 내에서 연산자 +를 좌우로 넓은 공간을 두어 구분하도록 하였다. 연산자 좌측은 정상상황과 거의 차이 없는 포화교통류를, 우측은 그 변화를 의미하며, 두 개의 합이 최종 포화교통류(한 개 차로 기준) 결과 값을 표현한다.

정지선 상류부 실시 공사구간에 해당하는 Eq. (1)을 예로 설명하면, + 좌측에 해당하는 포화교통류 부분은 차로수가 정상상황과 같이 유지되는 가운데 정지선 상류부 d_{wz} 공간에 채워진 차량들의

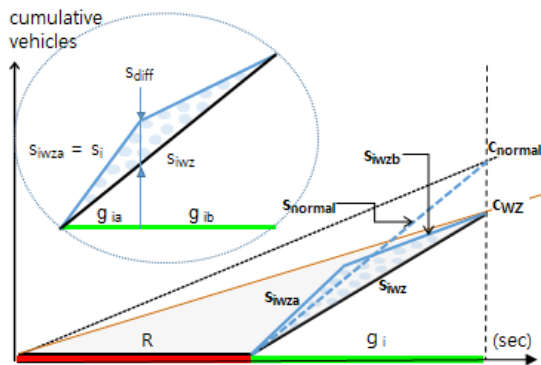


Fig. 2. Illustration of Saturation Flow Rates Change in Uniform Delay Estimation

후미까지 소거되는 시간(g_{ib}) 동안 보이는 포화교통류(s_{i_wza})이며, 우측은 병목자체와 병목지점 상류부에 형성된 수요들이 차로 수 감소 구간을 지나 정지선을 통과하면서 나머지 시간(g_{ib}) 동안 보일 수 있는 포화교통류(s_{i_wzb})이다.

Fig. 2가 그 현상을 명확하게 설명하고 있는데, 실제 보정해서 쓰이는 포화교통류는 두 개의 부분 포화교통류를 합친 값(s_{iwz})으로서 공사구간 정지선에서 겪는 포화교통류의 변화과정이 지체산정에 반영되지 않기 때문에 공사구간 진입 수요가 용량에 다다르면 그림의 원 내에 표현된 삼각형 면적만큼 균일지체를 과대평가하는 결과를 초래하게 된다. 이 지체 량은 크지는 않으나 공사 중 차로 차단수가 많고 녹색시간이 긴 경우 심 수 초를 초과하기도 하며, 소량이 되더라도 부도로의 입장에서처럼 적색시간이 긴 경우에는 서비스수준을 한 단계 좌지우지하는 결과를 만들어 낼 수 있다. 다만 그 량의 정확한 산정을 위해서는 상류 수요에 따른 수요와 공사구간용량과의 관계를 따져 계산할 필요가 있는데, Fig. 3(a)는 상류수요의 도착율이 공사구간에서의 선행 포화교통류(s_{i_wza})과 같은 경우이며 도착율이 더 작은 경우와 더 큰 경우는 순서대로 표현하였다.

Figs. 3(a) and 3(b)의 경우는 선행 포화교통류와 수요에 따라 편람의 기존 산정식을 그대로 사용하면 되지만 Fig. 3(c)의 경우에

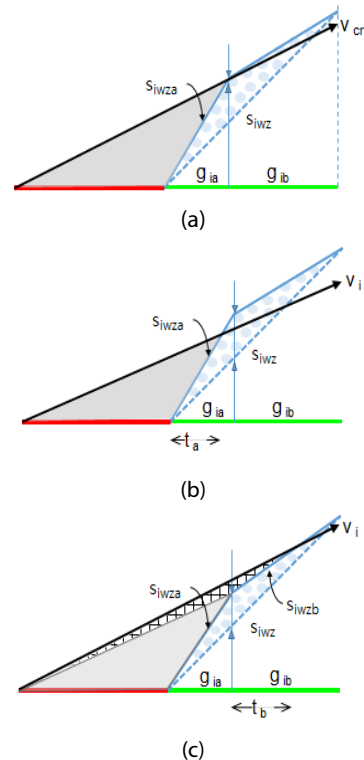


Fig. 3. Cases for Demand to Saturation Flow Rate Profile in UD Estimation

는 체크(격자)무늬로 표현된 삼각형의 면적을 구해 Fig. 3(a)의 경우에 더해 주어야 한다. 그 과정은 다소 복잡하나 설명하자면, 먼저 수요 v_i 선과 g_{ia} 이 지나고 형성되는 후행 포화교통류($s_{i,wz}$) 선이 만나는 시간 t_b 를 구하고 격자무늬 삼각형의 면적을 구한다음, 음영으로 표현된 삼각형 면적에 더하면 Eq. (4)와 같아진다.

$$t_b = \{v_i(R + g_{ia}) - s_{i,wz} * g_{ia}\} / (s_{i,wz} - v_i) \quad (3)$$

$$area\ tot. = 0.5 * [v_i(R + g_{ia})^2 - s_{i,wz} * g_{ia}^2 + \{v_i(R + g_{ia}) - s_{i,wz} * g_{ia}\}^2 / (s_{i,wz} - v_i)] \quad (4)$$

위 삼각형 면적의 합을 주기 당 총 수요 $v_i * C$ 로 나누어 주면 최종의 차량 한 대 당 균일지체가 산정될 수 있다. 상류부 공사는 Eq. (1), 하류부 공사는 Eq. (2)의 연산자 +의 좌우측을 각각 해체하면 g_a 와 $g_b (= g - g_a)$ 구할 수 있으며 그에 따른 포화교통류 값을 $s_{i,wza}$ 와 $s_{i,wzb}$ 도 어렵지 않게 구해질 수 있다.

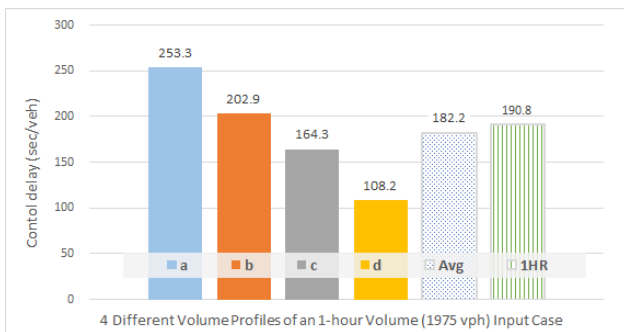
4.2 증분지체(d2) 부문에서의 문제점과 보정 방안

상류 수요가 신호교차로 접근부의 용량에 다다르거나 넘어서는 상황에서는 증분지체가 지체의 산정 결과에 가장 크게 영향을 끼친다는 것은 주지의 사실이며, 앞서 주요 이슈와 전체에서 기술했던 내용과 문제점을 극복하는 방향으로 산정 모형의 보정/수정 방법을 강구하였다. 우리나라 편람에는 직접적인 언급은 없으나 미국 HCM (TRB, 2000; TRB, 2010) 경우는 study period와 analysis period를 구별하여 설명하고 있다. 마땅한 단어 선정과 구별이 어려우나 편의상 연구/탐구/고려(대상) 기간을 (통상 1시간) study period, 산정모형을 적용하여 실제 분석결과를 내는 15분의 기간이 analysis period이다. 이 내용에 관해 HCM 2010 18장에 기술된 접근법 A, B, C 중 A가 현재 도로용량편람이 채택하고 있는 방식이며, PHF 없이 한 시간 전체를 분석기간으로 하는

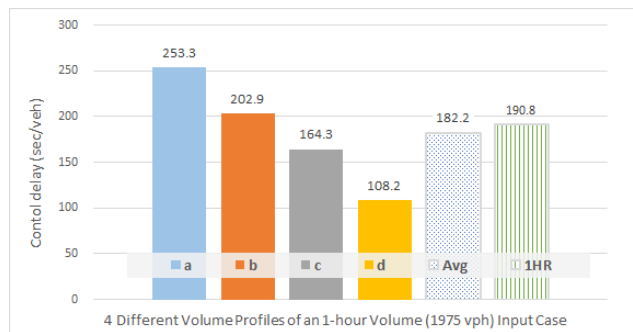
것이 B, 다른 수요를 가진 네 개의 15분을 합하여 분석에 사용하는 것이 C이다. C처럼 수요의 변화에 대응하는 산정식과 방법론적 절차는 편람에서 제시되지 못하고 있으나 미시 시뮬레이션을 이용하면 각각의 접근법에 의해 결과 되는 지체의 량이 비교될 수 있다. 이미 접근법 A는 공사구간의 영향을 받는 신호교차로 분석에 뚜렷한 해결책이 되지 못함을 Fig. 1을 통해 공감한 바 있을 것이다. Fig. 1에서의 공사구간 조건과 신호운영조건은 그대로 두고, 과포화가 되는 두 가지 수준의 교통량 조건 하에서 접근법 B와 C로 각각 시뮬레이션을 실행했을 때 발생하는 제어지체를 다양하게 비교해 보면 Figs. 4(a) and 4(b) 그래프와 같다.

먼저 위 그래프는 v/c ratio 1.1에, 아래는 거의 1.2에 해당하는 수요 상황과 공사구간 및 신호조건에 해당하는데, 최우측 녹색으로 표현된 1HR은 접근법 B를 사용한 것이고, 좌측 네 개는 접근법 C를 사용한 것이며, 그 다음 청색의 Avg는 네 가지 값의 평균을 표현한 것이다. 여기서 접근법 A, B, C와 혼돈을 피하기 위해서 C 접근법도 한 시간 내에서 네 개 15분 교통량이 어떤 프로파일을 갖느냐에 따라 a, b, c, d 상황으로 추가 구분하였다. 예를 들어 a 상황은 첫 15분에 가장 큰 교통량을, 뒤 따르는 두 개 15분 동안은 중간 수준의, 마지막 15분은 상대적으로 낮은 수준의 교통량을 보이는 것으로 이해하면 된다. 그 다음의 b 상황은 첫 15분과 두 번째 15분 교통량 수준을 바꾼 것이며, d 상황은 a의 역순으로 교통량 수준이 설정된 것이다. 교통량 세분화에 사용된 PHF는 0.90이며 Fig. 1에 sim_4pd로 나타낸 오렌지색 선이 b 상황을 대표한다.

도로용량편람에 따라 과포화 상태인 상황에 대한 지체량을 산정할 때 그 구성비가 압도적인 증분지체, 그중에서도 overflow delay를 제대로 반영하려면 분석기간을 한 시간으로 해야 한다는 것이 자명한데, 모형의 보정을 위해 비교의 대상이 될 미시 시뮬레이션 상에서의 1.0HR 방식을 사용할 것인가 또는 a, b, c, d를 고려해야 하는가라는 문제에 봉착하게 된다. 필자의 의견은 네 가지 방법의 평균과 유사하거나 그보다 조금 높은 결과를 도출하는 1.0HR 방식을 고수하는 것에 문제의 소지가 없다고 판단하고 있다. 그



(a) Input Volume of 1975 vph Case



(b) Input Volume of 2015 vph Case

Fig. 4. Control Delay Variation by Multi-period Volume Profiles in CORSIM Runs

이유는 첫째, 네 개의 15분 동안 구성할 수 있는 실제 교통량 프로파일은 a, b, c, d 네 가지가 최소 경우의 수가 되며 너무 많은 경우로부터 크게 구별되는 결과를 도출하지 못할 것으로 예상되기 때문이다. 둘째로는 공사의 점유시간 중 교통량이 가장 많아 분석 대상이 되는 공사 중 피크시간이 24시간 중 어느 시간도 될 수 있기 때문이고 15분 교통량과 PHF 확보가 어려운 상황이 많을 것이기 때문이다.

그리고 현 증분지체 공식이 가지고 있는 근원적인 문제에 어떻게 대처할 것인가도 남아 있다. Eq. (5)는 d_2 의 산정식인데, 정주기식 개별 교차로에서는 한미가 동일한 식이 된다. 지면상 간단한 사례로 문제점을 노정시켜 보자. 예를 들어 두 개의 독립된 접근부가 신호조건이 동일하고 차로별 교통량도 같은데, 단지 1차로 및 2차로로 차로 수만 다르다 하자. 이 경우 개별 접근부에서 다양한 교통량 수준에 따라 증분지체를 산정해 보면 Eq. (5)의 c 가 결과를 좌우하게 되며, Fig. 4의 실선이 나타내는 것처럼 차로 수가 많은 경우에 더 적은 증분지체가 산출된다.

$$d_2 = 900 T \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{4X}{cT}} \right] \quad (5)$$

Where, T : analysis period (h=1.0)

X : degree of saturation or volume-to-capacity ratio

c : subject lane-group capacity (vph)

이 같은 결과에 대해서는 다양한 의견이 있을 수 있다. 미국 HCM이 과거 Akcelik이 제안한 증분지체 산정식을 현장자료와 비교, 검증하면서 과대산정 경향을 발견하고 다소 변형된 형태의 식을 채택하였다고 설명하고 있는데(Roess et al., 2013), 이 과정에서 제공근 밖에서 변수 c 를 별로로 작동하게 했던 Akcelik 제안식의 기능을 배제하였기 때문이라고 믿어진다. 차로이용계수(F_U)의 사

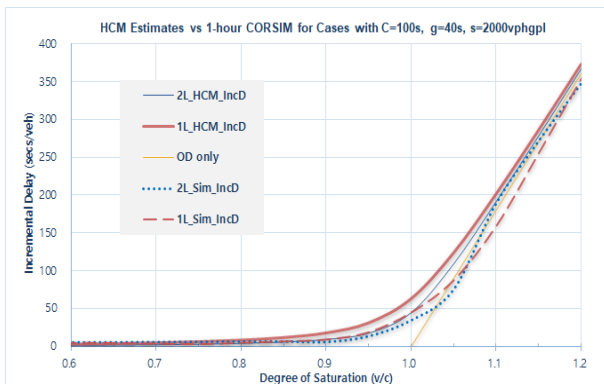


Fig. 5. Incremental Delay Comparison According to the Number of Lanes

용으로 수요를 배가시켜 다차로 차로그룹의 지체를 상승시키는 효과가 있다고 주장할 수 있으나 오히려 포화도의 미량 증가에 민감하게 반응하는 근포화 및 과포화 영역에서 지나친 과대평가를 촉발하게 된다. Fig. 5에서 점선으로 표시한 것은 차로별로 다른 이용률이 나타나는 시뮬레이션 결과로 편람의 산정식이 만드는 현상을 뒷받침하지 않는 것으로 보인다. 포화도 0.70에서 1.10 범위에서 시뮬레이션 결과보다 큰 값을 보이는 영향을 기본적으로 줄이고 v/c 비의 영향과 용량이라는 절대 값 자체의 독자 영향은 살리면서 차로 수 민감도를 반영하는 방향으로 다음과 같은 수정을 가할 수 있다.

$$d_2 = 900 T \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{4X (0.5 L_n)^{0.5}}{cT}} \right] \\ = 900 T \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{X (L_n)^{0.5}}{cT}} \right] \quad (6)$$

4.3 추가지체(d3) 부문에서의 문제점과 보정 방안

그리고 무시할 수 없는 지체 량이 바로 초기대기행렬로 인한 추가지체인데, 통상 정상상황에서는 존재하지 않던 초기대기행렬이나 차로 수 감소가 수반되는 공사시작 시간에 임해서는 초기대기행렬이 발생할 가능성은 매우 높아지며 이를 추정해서 사용할 필요가 대두되기 때문이다. 정상상황에서 이미 존재하던 초기대기행렬도 같은 맥락에서 공사가 시행되는 상황에서는 대기행렬 크기가 추가로 확대될 것이므로 이에 대한 고려가 필요하게 된다.

참고로 편람과 비교 목적으로 수행하는 시뮬레이션에서 초기대기행렬의 영향이 없는지도 확인하여 보았다. Fig. 6은 공사구간을 표현한 모의실험 실행에서 입력한 한 시간 교통량을 5분 단위로 구분하여 출력토록 한 것인데 통상 초기 fill-time은 100~150초로 설정, 예비/가 모의실험 교통량이 1.2~1.5km 구간을 주행하는데 필요한 시간을 충분히 배려토록 하였다. 결과를 보면 시뮬레이터 자체가 원활 및 용량 수준에서도 초기에는 상대적으로 낮은 교통량을 유입시키는 것으로 드러났으며 그 결과 초기대기행렬의 영향은 거의 배제되었다고 할 수 있다. 이 두 가지 교통량 프로파일로 계산해 본 바에 의하면 PHF가 0.99와 0.98에 각각 해당한다.

분석의 대상이 되는 시간대 정상상황이고 분석기간 초에 대기행렬이 있을 때 그 초기대기행렬은 Q_b 라고 그대로 표기하도록 하고, 본 연구의 관심인 초기대기행렬이 통상 발생하지 않으나 차로 수 감소로 공사시행 초기에 용량초과가 자명해서 발생하는 대기행렬의 크기($Q_{b, wz}$)를 추정할 필요가 있게 된다. 이는 상대적으로 쉽게 해결될 수 있다. 우선 수요는 공사시행 여부를 떠나 변동이 없다고 가정하며, 공사시행으로 인한 접근부 차로그룹의 용량(c_{wz})은 이미 편람에서 제시된 포화교통류율(s_{wz})을 사용한다. 공사구간

용량을 초과할 때만 작동되도록 논리연산자를 사용하면, $MAX[0, (v_i - c_{iwz})]$ 는 한 시간 기준 공사구간 용량 초과량을, MAX 를 3600초로 나누면 초당 초과량으로 환산하게 되므로 공사를 시작하고 몇 주기($n \cdot C$) 뒤를 공사로 인한 발생 초기대기행렬 산정 기준으로 선택하느냐에 따라 Q_{bwz} 와 그로 인한 추가지체(d_3)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q_{bwz} = MAX[0, (v_i - c_{iwz})] * \frac{nC}{3600}, \quad (7)$$

$$d_3 = (3600 * Q_{bwz}) / c_{iwz} = MAX[0, (v_i - c_{iwz})] * \frac{nC}{c_{iwz}}$$

Eq. (7)에서 n 은 최소 한 주기에서 세 주기를 선택하는 것이 합당해 보이는데, 그 이유는 공사를 위한 도로점용현장을 전개할 때라도 아주 짧은 시간에도 도로횡단의 축소가 실행되며 곧 대기행렬의 형성에 영향을 주기 때문이다. 실제 공사구간은 주변 홍보와 일부 우회가능성이 상존하기 때문에 초기대기행렬의 과잉 추산의 가능성을 줄이기 위해서 본 연구에서는 $n=1$ 을 사용하였다.

4.4 하류부 공사구간 상황에서의 제어지체 기중 현상 고려

하류부 공사구간 지점이 정지선에서 출발하는 차량들의 시거범위에 있고 d_w 이 짧은 경우 그 차량들이 충분하고 지속적으로 가속하기 어렵고 그 수준의 상류 교통수요에서 나타나는 주행속도를 정지선 하류부에서 회복하기 어렵게 된다. 이 같은 현상은 예비 시뮬레이션에서 상류부 공사구간과는 달리 하류부에서 반복적으로 나타났는데, 이는 제어지체의 구체적인 정의와도 밀접한 관계가 있다.

KHCM 2013은 제어지체의 개념에 대해 구체적으로 ‘차량당 평균제어지체는 분석기간에 도착하는 차량들이 교차로에 진입하면서부터 교차로를 벗어나 제 속도를 낼 때까지 걸린 추가 시간의 평균값을 말한다.’ 라고 적시하고 있으며, HCM 2010도 chapter 7의 예시 그래프가 다소 혼선을 야기할 수 있으나 사실은 같은 정의를 말하고 있다. 이를 가장 잘 표현한 도식이 CORSIM 사용자 매뉴얼에 표현된 그래프인데 Fig. 7과 같다. 도로용량편람의 기술처럼 교차로 정지선을 지나 하류부 어느 지점(t_3)에서 교차로의 접근속도를 회복했을 때까지를 교차로의 제어지체 인정 범위라는 것이다. 제어지체에 대한 혼한 오해처럼 지체의 산정 범위를 정지선 출발 시점으로 제한하는 경우 제어지체를 소량 과소평가하게 되며, 하류부 공사구간이 정지선과 가까운 경우 속도 회복의 문제로 상류부 공사구간과는 달리 지체가 증가하는 결과를 보인다는 것이 더 합리적인 추론이며 시뮬레이션이 이를 잘 뒷받침하는 것으로 사료된다.

특별히 하류부 공사와 정지선과의 이격거리가 짧은 경우 추가로 발생하는 지체량을 간략히 추정하기 위해서 본 연구에서는 도로용량편람의 방법론을 차용하여 해결하는 방안을 강구하였다. 먼저

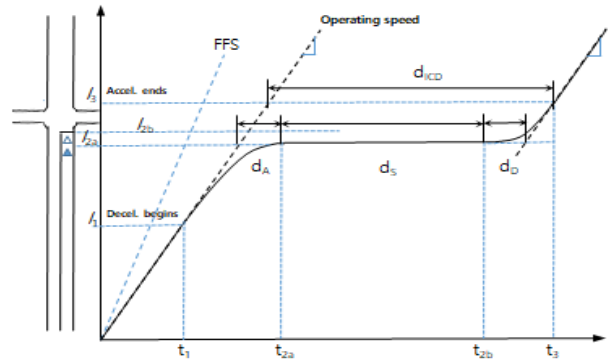


Fig. 7. Control Delay Concept Description Using T-S Diagram

자유속도를 기본으로 하고 통행 교통량에 따라 변화하는 구간 주행속도를 산정하는 데는 Eq. (8)과 같이 다차로도로의 방법론을 차용하였으며, 제어지체 정의에 충실하도록 정지선을 출발한 차량들이 전술한 속도까지 회복하면서 경험하는 지체량은 Eq. (9)와 같이 도달해야 하는 주행속도, 공사구간까지의 거리, 그리고 도로용량편람 2013에서 기술하고 있는 충격파로 인해 정지선 포화교통류율이 급격히 떨어지는 시점인 g_{IA} 와 유효녹색시간 잔량인 g_{IB} 등 여러 변수의 상호관계로부터 단순하지만 일관성 있는 추정 산식을 정립하였다. Y축 절편이 없는 비선형 회귀식의 형태를 띠게 하였으며 β 값으로는 0.7이 상대적으로 높은 상관성을 보여 주었다. 이는 하류부 공사구간 상황으로 S.F.R.의 변화(감소)가 발생하는 경우에만 사용하도록 한다.

$$S_{p1} = 60.0 \text{ kph } (\approx 16.7 \text{ mps}), \quad S_{p2} = 60 - F_S - F_V \text{ (kph)} \quad (8)$$

$$d_{ADD} = \beta * \left(\frac{s_{iwz a} - s_{iwz b}}{s_{iwz a}} \right) \left[\frac{S_{p2} - d_{WZ}/10}{(g_{IA} / g_{IB})} \right] \text{ (sec)} \quad (9)$$

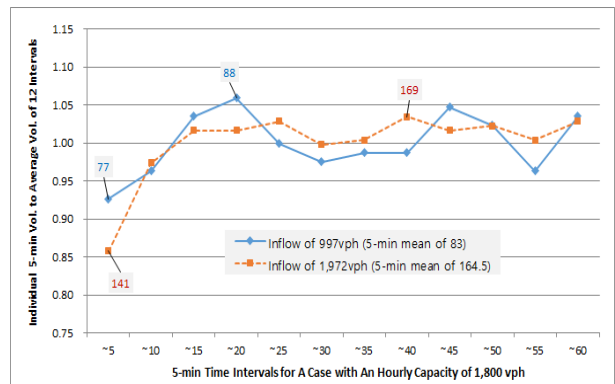


Fig. 6. Simulation Input Volume Profile using 5-min Volume Investigation

5. 평균제어지체 보정모형의 수정과 검증

5.1 CORSIM 시뮬레이터 주요 모수의 정산

지금까지 기술한 평균제어지체의 요소지체별 보정방안이 도출하는 결과를 실제와 가장 가깝다고 인정될 수 있는 미시 시뮬레이션의 결과와 체계적으로 비교, 검증하여 보았다. 먼저 개별 미시 시뮬레이션 시행에서 지체라는 평가척도를 좌우할 주요 교통류, 차량, 운전자, 기하구조 특성 측면에서의 모수 정산에 관한 구체 내용을 설명하고, 신호교차로 상류부, 하류부 공사 별로 보정모형과 시뮬레이션의 결과를 비교, 검증하여 보았다.

본 연구에서 사용한 CORSIM 시뮬레이터 중 특히 NETSIM

부분은 미국의 FHWA를 통해 오랫동안 지원, 개발된 터라 주요 용어나 논리, 효과척도의 정의 등에서 HCM의 그것들과 거의 같은 개념을 사용하는 것으로 인정되고 있다(ITT Industries Inc., 2006). 다만 거시 해석모형의 형태의 평균지체모형이 산출하는 결과와 미시 시뮬레이션 실행 결과와의 비교·분석이므로 여러 부분의 모수 측면에서 주도면밀한 준비와 그에 필요한 정산 노력이 뒤따라야 한다. 이를 위해서 Dowling et al.(2004)과 Holm et al.(2007)의 가이드라인, 그리고 이를 종합한 HCM 2010 (TRB, 2010)의 제 7장이 강조하는 내용도 충실하게 이행하였다.

특히 HCM 방법론과 같은 거시모형에서 지체의 산정에 가장 중요한 입력 값은 바로 포화도이고, 이는 해당 접근부 차로그룹의

Table 1. List of Parameters for CORSIM Simulation Runs

Variable	Description
Simulation time	3600 + 3 * 300 sec (temporal boundary extension)
Initialization period	10 minutes
Random number seeds	3 seeds for entry headway & response to traffic choice
Vehicle entry headway distribution	Erlang distribution with a parameter of 2
Mean discharge headway	1.8 seconds (equals to 2,000 vphgpl)
Mean start-up delay	1.0 ~ 3.0 seconds
Time for lane-change maneuver	3.0 seconds
% drivers cooperating w/ lane-changer	80%
Typical vehicle length	16 feet with 120% headway factor
Stand-still gap size	3.3 feet
Heavy vehicle mix	0 ~ 5%
Link (of interest) length	4000 ~ 6000 feet (spatial boundary extension)
Lane width	10 feet
Free flow speed	38 mph (30 mph at bottle-neck proper)

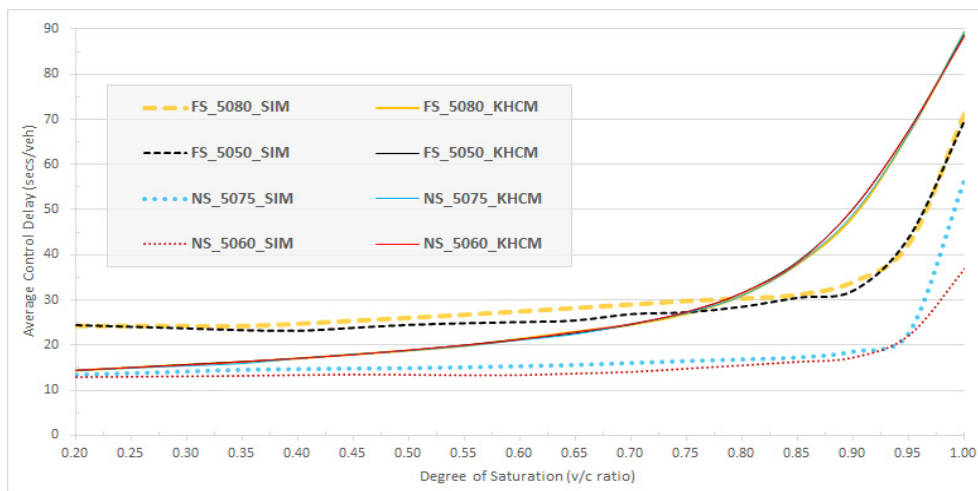


Fig. 8. Control Delay Disparity by Work-zone Location (Near-side vs. Far-side)

정확한 용량산정으로부터 나온다. 이 같은 모형은 주어진 도로, 교통, 신호 조건에서 하나의 값을 사용하나 미시 시뮬레이션에서는 미지의(다소 가변적인) 용량 값(더 근본적으로는 포화교통류율)을 찾기 위해 다양한 교통량에 따른 실행을 통해 대기행렬과 지체량이 증가하는 특정 범위의 값으로 좁히면서 찾아야 했기 때문에 많은 시행착오를 거쳤다. 공사구간이 없는 정상의 도로 조건이라면 상대적으로 그 과정이 쉬우나 신호교차로 상류부 또는 하류부에 기하구조가 변화되는 공사구간을 설정하고 시뮬레이션을 막상 실행하면 거시모형에서 산출되는 용량 값에 합리적으로 견줄만한 결과가 좀처럼 산출되기 어렵다. CORSIM에서 조절 가능한 관련 모수의 조합은 수 천 가지가 될 수 있겠으나 Zhang et al.(2004)의 지적처럼 실제 용량의 변화나 조절 결과를 얻기 어렵거나 효과가 없다는 것을 본 연구 과정에서도 공감하였다. Table 1은 신호교차로 인근에서 공사구간이 운영되는 조건 하에서 도로용량편람의 거시 모형이 산출하는 용량 값에($s_{wz} \times g/C$)에 가장 근접하는 용량 값을 도출하는 미시 시뮬레이터의 모수 관련 정산 결과이다.

5.2 상류부 공사구간 평균제어지체 보정모형과의 비교 및 검증

상류부 보정모형의 검증을 위한 공사 상황은 두 개로 하였는데 C와 g는 공히 100초 및 50초이고 정지선 상류 측으로 이격거리 d_{wz} 가 각각 60m, 75m인 경우를 선택하였다. HCM 방법론에 따라 PHF 0.9를 적용, 상승된 교통수요를 바탕으로 포화도에 따라 15분 분석기간에 근거한 산출 지체가 황색 실선, 본 연구를 통해 요소 지체별로 수정한 모형을 적용하여 한 시간 기준으로 산출된 지체가 청색 실선, CORSIM의 한 시간 단일(single) 시뮬레이션 실행 결과를 세 번 달리 도출하여 그 추세를 나타낸 것이 적색 점선이다. 정지선과 공사구간의 이격거리가 상대적으로 짧은 상황에 대한 결과가 Fig. 9에 잘 나타나 있으며, 이격거리 증가로 인한 결과는 지면상 Table 2에 제어지체량을 비교할 수 있도록 제시하였다.

미시 시뮬레이션의 결과가 현실과 가깝다고 전제 또는 인정할 때, 본 연구의 수정 모형이 보여주는 결과는 포화도 0.90까지는 비교적 정확한 것이라고 볼 수 있으며 이후의 1.20까지는 추세로는

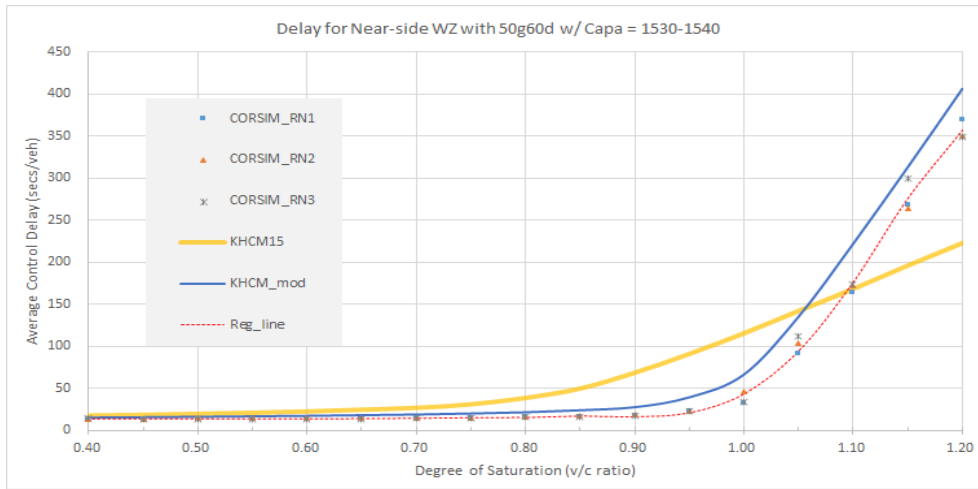


Fig. 9. Comparison of Control Delays for a Near-side Work-zone (Case 1)

Table 2. Delay Estimates of Modified KHCM Model vs. CORSIM Simulation Runs

Degree of Saturation	Near-side Work-zone Case 1 & 2				Far-side Work-zone Case 3 & 4			
	Mod_1	COR_1	Mod_2	COR_2	Mod_3	COR_3	Mod_4	COR_4
0.20	13.6	12.9	14.5	13.5	21.2	24.3	26.5	24.4
0.25	14.0	13.0	14.8	13.9	21.6	24.2	27.0	24.0
0.30	14.3	13.1	15.0	14.2	22.0	24.2	27.4	23.6
0.35	14.7	13.2	15.3	14.6	22.5	24.2	27.8	23.3
0.40	15.1	13.3	15.2	14.8	23.0	24.7	28.3	23.1
0.45	15.5	13.5	15.6	14.9	23.6	25.4	28.8	23.8
0.50	16.0	13.4	16.1	15.0	24.2	26.0	29.4	24.4
0.55	16.6	13.3	16.6	15.1	24.8	26.7	30.0	24.8

Table 2. Delay Estimates of Modified KHCM Model vs. CORSIM Simulation Runs (Continued)

Degree of Saturation	Near-side Work-zone Case 1 & 2				Far-side Work-zone Case 3 & 4			
	Mod_1	COR_1	Mod_2	COR_2	Mod_3	COR_3	Mod_4	COR_4
0.60	17.2	13.3	17.3	15.4	25.7	27.5	30.8	25.0
0.65	18.0	13.7	17.9	15.7	26.6	28.2	31.5	25.4
0.70	18.8	14.1	18.9	16.1	27.5	29.0	32.3	26.8
0.75	19.9	14.8	19.9	16.5	28.6	29.8	33.6	27.2
0.80	21.5	15.5	21.3	16.9	30.2	30.3	35.1	28.5
0.85	23.7	16.3	23.6	17.3	32.6	31.2	37.5	30.5
0.90	27.6	17.3	27.6	18.6	36.0	34.0	41.2	32.1
0.95	39.2	22.2	37.2	22.9	45.7	42.6	51.8	43.9
1.00	66.3	37.1	64.1	56.8	78.0	71.5	86.9	69.8
1.05	135.2	102.4	133.3	107.0	144.8	134.2	150.0	125.9
1.10	221.9	170.0	220.8	184.6	230.0	211.1	234.8	208.2
1.15	313.2	277.6	312.3	264.5	321.2	289.8	325.9	290.6
1.20	406.5	356.1	405.6	347.4	414.3	367.1	419.0	383.4
gi & dwz	50g 60d		50g 75d		50g 80d		50g 50d	

*: COR_# values represent the average of 3 CORSIM runs w/ different random No. seeds

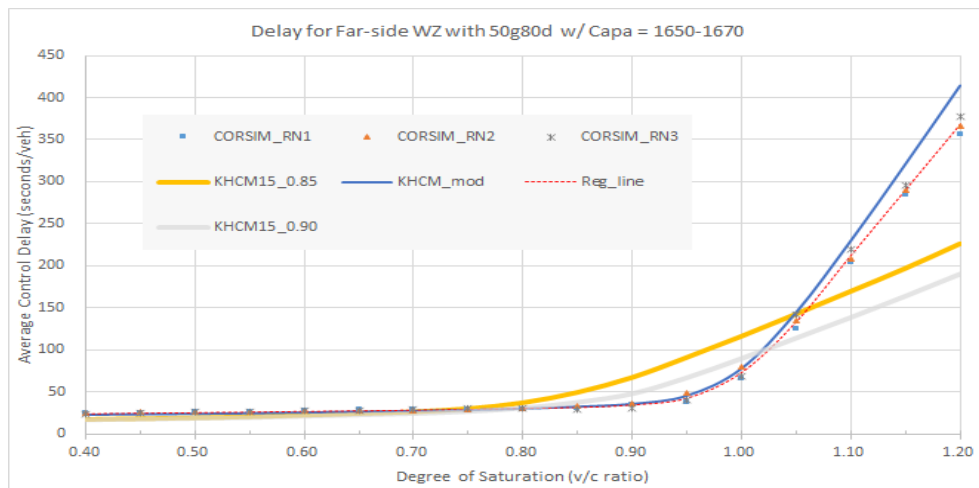


Fig. 10. Comparison of Control Delays for a Far-side Work-zone (Case 3)

의미를 부여할 수 있으나 20~40초대의 과대평가 경향을 꾸준히 보여준다. 이는 수요 교통량 프로파일의 평균 상황을 대표하는 것으로 분석기간 초기에 교통량이 집중되는 과포화 교통량 프로파일의 경우에는 지체가 훨씬 커지는 현상을 이해한다면 오히려 어느 정도 안전율을 보유한 것으로 인식되어도 괜찮을 것이다. 한편 기존 도로용량편람의 방법론인 황색 실선은 0.85~1.05 구간에서는 심한 경우 90초/대까지 과대평가를, 1.10 이후는 과소평가를 하는데 최대 130초/대 이상의 차가 나기도 한다.

CORSIM 결과가 포화도 0.90 이후 수정 모형과 비교하여 과소

산정하는 경향은 부분적으로 다음과 같은 이유가 있는 것으로 추론된다. 편람과 같은 해석모형에서는 공사구간을 포함하는 정지선 상류의 링크를 하나로 묶어 보는 반면, CORSIM 시뮬레이션 상에서는 공사구간을 표현하고자 정지선 상류로 세 개의 소 링크가 설정되어야 하고 그 중 병목구간의 자유속도는 소량 낮추었기 때문이다. 추가로 그 짧은 병목구간을 지나는 교통량 중 일부분의 차량은 녹색시간이 일정하게 경과하면 정지선 유출이 원활하게 됨에 따라 상대적으로 신속한 원활한 이동하게 되고 이 경우 제어지체를 기록하지 않는 메커니즘이 있지 않나 의구심이 들기도 한다.

5.3 하류부 공사구간 평균제어지체 보정모형과의 비교 및 검증

하류부 보정모형의 검증을 위한 공사상황 역시 두 개의 사례로 하였는데 C와 gi는 공히 100초 및 50초이고 정지선 하류 측으로 d_{wz} 가 각각 80m, 50m인 경우를 선택하였다. Table 2가 상류부를 포함, 모형검증 대상으로 삼은 공사 상황 네 가지 사례에 대한 수정모형의 산출 결과와 CORSIM 시뮬레이션 결과 비교를 나타내 주고 있다. 하류부의 경우, Fig. 8에서 보인 하류부만의 독특한 지체증가 현상 문제를 Eqs. (8) and (9)을 사용하여 보정하여 Fig. 10에 나타내었는데 비교적 모의실험 결과에 잘 부응하는 경향을 보여주고 있다.

하류부 보정모형은 포화도 1.00까지 시뮬레이션 결과와 거의 합치에 가까운 추세를 보여 주고 있으며, 이후에는 CORSIM 결과 대비 과대산정 경향이 여전히 나타난다. 여기에서도 전장에서 전술 한대로 시뮬레이션은 한 시간 교통량을 사용한 것으로 (실제 PHF 0.99~0.98의 profile 존재) volume profile에 따른 여러 결과 값의 평균에 해당하는 경우이다. 그러므로 특정 수요의 프로파일이지체 상승을 유발하는 형태일 수도 있으므로 수정 모형의 산출 값이 평균상황의 시뮬레이션 결과 값보다 다소 높은 것은 오히려 문제의 소지를 줄이는 것이라고 보는 시각이 다시 한 번 유효하다고 판단된다.

6. 결론

제어지체는 교차로와 같은 결절점에서 교통표지나 신호등의 운영이 차량흐름에 주기적 단속과 간섭을 유발하기 때문에 발생하는 지체이고 그에 충실하게 정의되어 사용되고 있으나, 신호교차로의 인근에서 차로를 점유하고 시행되는 공사는 차로 수의 소 구간별 변화로 기하 병목이 형성되고 이것이 신호운영과 맞물려 작동하기 때문에 정상 상황과는 다른 한 단계 더 복잡한 지체 양상을 만들어낸다. 현 도로용량편람은 공사구간으로 인한 포화교통류율 변화 산정 모형은 제시하고 있으나 이후 서비스수준 판단에 사용되는 제어지체 산정에는 그에 걸 맞는 절차와 모형 없이 정상적인 차로운영의 가정 하에 만들어진 지체 산정 절차와 모형을 따르게 하고 있다. 본 연구는 도로용량편람 절차에 의거한 분석 결과가 실제 도로점용 공사구간의 이행상태 점검 등을 통해 비교된 현장지체와 간극이 상당히 크다는 누적된 경험을 바탕으로 좀 더 실제에 가까운 제어지체를 산정하기 위한 모형을 도출하기 위하여 수행되었다. 기존 모형과 분석 절차에서 간과되거나 제대로 반영되지 못한 부분들을 찾아내고 분석기간의 확장에 대한 필요성 역할합과 더불어 제어지체 부문별 보완 모형을 제시하였으며, 시공간 경계의 확장 문제에 충실히 대응해서 설계된 미시 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해

모형의 합리성과 정확성에 대한 검증을 이행하였다.

구체적으로는 먼저 정지선에서 유효녹색시간의 경과에 따라 포화교통류율이 일시 변화하고 그로 인해 균일지체가 과대평가되는 경향을 보정하였다. 또 분석기간을 1.0시간으로 확장하고 PHF 및 교통량 프로파일에 따른 지체산정의 합리성을 증분지체 산정 영역에서 담당하도록 하였으며 특별히 차로 수만의 가감에(그에 비례하는 수요 가정) 따른 제어지체 산정 결과를 합리적으로 조정할 수 있도록 하였다. 그리고 정상 상황에서는 관측할 수 없으나 계획된 공사시작 시간에는 차로수의 감소와 수요 관계에서 그 발생 가능성이 명료한 초기대기행렬의 추정방법도 제안하였다. 마지막으로 제어지체의 개념에 충실히 부합하면서도 특별히 하류부 공사구간에서만 추가 발생하는 지체를 반영하는 방법도 제시하였다. 많은 시행착오를 거친 매개변수의 정산에 이어 많은 수의 미시 모의실험 실행 결과를 수정 제안 모형의 산출 결과와 비교해 보면 기존 모형의 예측력 문제를 크게 보완하는 견조한 부합 추세가 나타나 도시 및 교외 간선도로 상 공사구간의 계획과 평가에 하자 없이 사용될 수 있음을 보여주었다고 사료된다. 이는 도시 가로 구간에서 시행되는 공사구간의 좀 더 정확한 평가를 위해 고 비용의 상용 미시 시뮬레이션 S/W를 선택하고 많은 정산 노력을 기울여 실행하여야 하며 결과의 해석도 편람의 개념 및 정의 체계에 맞추어야 하는 제 부담을 상당 부분 해소할 수 있다는 의미도 된다. 다만 Highway Capacity Software와도 연동되는 등 HCM 방법론에 가장 친화적인 CORSIM 프로그램을 이용, 검증하였기 때문에 타 전문가 S/W를 활용했을 때의 결과와 비교도 관심의 대상이 될 수 있을 것이며 복수의 분석기간 사용 필요에 따른 방법론 강구도 좋은 후속 연구가 될 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2016학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었습니다.

References

- Akcelik, R. (1988). "The highway capacity manual delay formula for signalized intersections." *ITE Journal March*, Institute of Transportation Engineers, pp. 23-27.
- Dion, F., Rakha, H. and Kang, Y. (2004). "Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections." *Transportation Research Part B*, Vol. 38, pp. 99-122.
- Dowling, R., Skabardonis, A. and Alexiadis, V. (2004). *Traffic analysis toolbox volume III : Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software*, Report FHWA-HRT-04-040, Federal Highway Administration, Washington D.C.

- Eleftheriadou, L., Jain, M. and Heaslip, K. (2008). *Impact of lane closures on roadway capacity : Part B - Arterial work zone capacity*, FDOT Contract BD-545, RPWO #61, The Univ. of Florida.
- Eo, H. and Shin, C. (2010). "Development of SFR estimation models considering work-zones in the vicinity of signalized intersections." *Journal Korean Soc. Transp.*, Korean Society of Transportation, Vol. 28, No. 6, pp. 109-120 (in Korean).
- Hajbabaie, A., Kim, S., Schroeder, B., Aghadashi, S., Roupail, N. and Tabrizi, K. (2017). "Saturation headway estimation on urban street work zone." *TRR 2615*, Transportation Research Board Washington D.C., pp. 26-34.
- Holm, P., Tomich, D., Sloboden, J. and Lawrance, C. (2007). *Traffic analysis toolbox volume IV : Guidelines for applying CORSIM microsimulation modeling software*, Report FHWA-HOP-07- 079, FHWA, Washington D.C., pp. 130-137.
- ITT Industries, Inc. (2006). *CORSIM User's Guide ver. 6.0*, Prepared for Federal Highway Administration under contract number; DTFH61-01-C-0005, Washington D.C.
- Joseph, T., Radwan, E. and Roupail, N. (1988). "Work zone analysis model for the signalized arterial." *TRR 1194*, Transportation Research Board Washington D.C., pp. 112-119.
- Jung, H. and Lee, C. (2006). "Capacity drop due to various incidents on freeways." *Proc. of 53rd Conf. of Korean Soc. Transp.*, Korean Society of Transportation, pp. 401-410 (in Korean).
- Kim, D. and Lee, S. (1998). "Traffic characteristics on lane drop areas around highway work zones." *Journal Korean Soc. Civil Eng.*, KSCE, Vol. 18, No. III-4, pp. 445-462 (in Korean).
- Kim, T., Lovell, D. and Paracha, J. (2001). *A new methodology to estimate capacity for freeway work zones*, TRB Annual Meeting.
- Ko, J. (2005). *The study on permission and management system improvement of traffic control system on road works*, Master Thesis, Graduate School of Urban Science, University of Seoul (in Korean).
- Krammes, R. A. and Lopez, G. O. (1994). "Updated capacity values for short-term freeway work zone lane closures." *TRR 1442*, Transportation Research Board Washington D.C.
- KST (2012). *Highway capacities under special situations including roundabouts, work-zones and inclement weather conditions: Final draft report*, Korea Society of Transportation (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2013). *Highway capacity manual of 2013*, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation of R.O.K. (in Korean).
- Oh, J. and Ko, D. (1998). "Analysis of traffic flow on the lane closure due to road construction." *Proc. of 34th Conf. of Korean Soc. Transp.*, Korean Society of Transportation, pp. 116-125 (in Korean).
- Praveen, K. E. (2007). *Estimation of traffic mobility impacts at work zones : State of the practice*, TRB Annual Meeting.
- Rahim, F. B. et al. (2003). *Evaluation of construction work zone operational issue : Capacity, queue, and delay*, project IVA-H1, report no. ITRC FR 00/01-4 Illinois Transportation Research Center.
- Roess, R., Prassas, E. and McShane, W. (2013). *Traffic engineering : Fourth edition*, Pearson, Upper Saddle River, NJ.
- Seoul Metropolitan Government (2014). *Seoul street works process guide*, Seoul Metropolitan Government, Available at: <http://safe.seoul.go.kr/> (Accessed: July 7, 2017).
- Shin, C. (2013). "Capacity estimation models for work-zones under traffic signal influence and the empirical validation." *Journal Korean Soc. Transp.*, Korean Society of Transportation, Vol. 31, No. 1, pp. 77-86 (in Korean).
- Shin, C. et al. (2012). *Development of traffic flow characteristics models and making of traffic management plan evaluation tools: Project report phase II*, Korea Society of Transportation (in Korean).
- Traffic Operation Division (2017). *Internally prepared statistics for traffic impact deliberation committee on road occupying work zones of 2014-2016 in the streets of Seoul*, Seoul Metropolitan City (in Korean).
- TRB (2000). *Highway capacity manual 2000*, National Research Council, TRB Washington D.C.
- TRB (2010). *Highway capacity manual 2010*, National Research Council, TRB Washington D.C.
- Zhang, L., Holm, P. and Colyar, J. (2004). *Identifying and assessing key weather-related parameters and their impacts on traffic operation using simulation*, Federal Highway Administration, Pub. No. FHWA-HRT-04-131, Washington D.C.