

신호영향권 하 도로공사구간에서의 용량산정모형 개발과 실증

신치현*

경기대학교 도시·교통공학과

Capacity Estimation Models for Work-zones Under Traffic Signal Influence and the Empirical Validation

SHIN, Chi-Hyun*

Department of Urban & Transportation Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

Abstract

This paper focuses on the development of analytical models for estimating the changes in saturation flow rates (SFR) at the stop-lines of a signalized intersection due to the existence of nearby work-zones, and thereby calculating the prevailing capacity values for specific lane groups. Major changes were incorporated in the logics of previous models and significant revisions have been made to secure the accuracy and simplicity. Furthermore, much attention was paid to model validation by making comparisons to both extensive simulation results and empirical data from various sites. It was found that SFRs are highly sensitive to the location of work-zones, the distance to each work-zone from the stop-line of a concerned approach, the number of lanes open and closed, and the effective green time. Using such geometric and operating conditions that constitute work-zone environment, the proposed models successfully estimated SFR values with a miniscule margin of error.

본 고는 신호교차로 영향권에서 수행되는 도로점용공사가 유발하는 신호교차로의 정지선에서의 유출 가능량, 다시 말해 포화교통류율의 변화를 산정하여 해당 접근 차로군의 용량을 계산할 수 있는 해석적 모형의 개발에 초점을 맞추고 있다. 해석적 모형이 가진 설명력의 간결함과 산정 정확도를 제고하기 위하여 선행연구의 모형논리를 크게 바꾸고 상당한 수정을 가하였다. 또 모형의 검증을 위해서 많은 노력이 보태졌는데, 다양한 미시 모의실험 결과와의 비교 뿐만 아니라 실제 공사현장에서 수집된 많은 자료를 바탕으로 하는 현장 대표 값들과의 비교 등이 수행되었다. 포화교통류율은 도로점용공사의 위치, 정지선과 공사구간과 이격거리, 개방 및 폐쇄 차로 수, 유효녹색시간 등에 상당히 민감하게 변화한다는 것이 확인되었으며, 공사현장의 특성을 구성하는 그와 같은 기하구조 및 신호운영관련 조건 등을 변수로 하는 제안 모형들은 아주 적은 오차 범위 내에서 성공적으로 포화교통류율을 산정해 낼 수 있음을 보여 주었다.

Key Words

Analytical Models, Capacity, Signalized Intersection, S.F.R., Work-zone
해석적 모형, 용량, 신호교차로, 포화교통류율, 공사구간

* : Corresponding Author
chshin@kgu.ac.kr, Phone: +82-31-249-9779, Fax: +82-31-244-6300

Received 19 November 2012, Accepted 11 February 2013

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

도로를 점용하여 시행하는 각종 공사(도로 유지보수, 수도, 가스, 전기, 통신, 경관개선 및 각종 개발 사업)가 2005년 서울시를 기준으로 연평균 117,365건에 달한 지 이미 오래 이고¹⁾ 도로점용공사가 소통과 안전에 미치는 영향분석을 교통소통대책 보고서 형태로 제출을 요구하고 이를 심의/자문하는 제도가 2000년 서울에서 시작된 후, 대구, 인천, 부천, 광주 등으로 전파되었고, 계속해서 확산이 기대되는 것이 최근의 상황이다.

이 같은 중대도시의 도로에서 점용이 이루어지는 공사의 대부분은 보통의 예상대로 도시가로, 그것도 대부분 교통신호의 영향권 범위 내의 지점과 구간에서 시행되고 있다. 다만 아쉬운 것은 MOCT (2001)을 포함하여 현재 국내외의 어떤 기술 기준이나 편람 등도 그 같은 상황에 대비하여 교통영향을 오롯이 분석해 낼 수 있는 방법론을 제시하지 못하고 있다는 점이다.

이상에 대한 인식과 반성으로 이미 수행되었거나 수행 중인 연구노력이 없진 않으나 아직 보완하여야 할 부분이 있으며 현장자료를 기반으로 한 실증적(empirical) 검증이 무엇보다 필요한 때이다. 본 연구는 이와 같은 배경으로 신호교차로의 영향권 내에서 실시되어 차로를 하나에서 수 개까지 점용하는 공사가 신호교차로 정지선의 포화교통류율(SFR), 나아가서 용량에 미치는 (감소)영향을 산정해 낼 수 있도록 해석적 모형들을 개발하고 이를 실질적으로 검증하는 데에 주안점을 두고 있다.

2. 연구의 내용 및 방법

본 연구는 신호교차로 영향권 내(교차로 신호주기 및 당해 접근로 녹색시간)에서 차로를 점용하는 공사의 주요 특성 요건(원 차로 수, 점용차로 수, 공사 위치, 정지선과의 이격거리)이 신호교차로 특정 접근로의 정지선에서 SFR과 용량을 산정하는 해석적 모형의 (수정) 개발과 검증을 주 내용으로 하며, 원 차로수의 감소를 유발하지 않는 차로 폭 축소, 측방이동(lane-shift), 복공판과 같은 노면조건이 유발하는 영향도 추가하여 분석, 제시하였다.

먼저 해석적 모형은 일차적으로 미시적 모의실험 결과와 비교되었고, 최종적으로는 제한적이지만 현장에서 취득한 포화교통류율 자료와 비교, 검증되었으며 기타 차로 수 감소를 유발하지 않는 공사 유형은 되도록 많은 현장 자료를 정리, 분석하여 결과를 제시하는 것으로 미래 사용자의 요구를 맞추고자 하였다.

II. 기존 문헌 고찰

1. 국내외 문헌고찰

도로점용공사와 관련된 연구의 주류는 Kim and Lee (1998), Oh and Ko (1998), Jung and Lee (2006), Krammes et al. (1994), Kim et al. (2001), Rahim et al. (2003) 등의 연구와 구미에서의 유사 연구를 망라한 HCM (TRB, 2000 & 2010)에서 볼 수 있듯이 공사구간의 교통류 특성 분석이나 현장자료 기반의 용량 산정 또는 모형개발을 다루며, 모두 고속도로 시설을 대상으로 한 기초 연구의 성격을 지니고 있다.

교통류 특성이나 용량연구로부터 관심을 달리한 응용 연구도 있는데, Memmott and Dudek (1984)이나 Praveen (2007), Park and Oh (2007)의 연구로 특징되듯 공사구간의 합리적 사전 계획과 영향 평가를 위한 시뮬레이션 모형의 비교와 개발에 초점을 두거나 공사구간 주변의 운영/설계 요건 도출을 목적으로 하고 있지만 이들 역시 연속류 시설에만 집중되어 있는 것으로 파악된다.

그리고 Ko (2005)의 연구처럼 점용공사의 계획, 허가 등 절차요소와 정책적인 차원에서 제도를 분석한 연구가 있으나 본 연구의 의도와 필요에 부합하지 않는다.

본 연구가 신호교차로 영향권 내에서의 점용공사가 가지는 주요 특성변화 도출과 실증적 검증을 목표로 하는 만큼, 깊이 있는 관심과 분석의 대상이 된 연구는 Elefteriadou et al. (2008)과 Eo and Shin (2010)의 연구로 축약된다. 전자는 도시부 가로에서 공사가 시행될 시 점용으로 인해 감소되는 용량의 산정모형을 미시 모의실험 결과를 회귀분석 함으로써 제시하였고, 후자는 신호교차로 영향권에서의 차로점용 공사로 인한 포화교통류율 변화 산정을 위한 해석적 모형을 개발하고 모의실험 결과와 비교, 검증한 바 있다.

1) 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.

2. 선행 연구의 미비점 및 개선 방향

먼저 주요 연구의 미비점을 논하기에 앞서 도로시설과 공사유형에 맞게 상용 모의실험 프로그램의 활용으로 영향 분석을 수행할 수 있지 않느냐는 지적이 있을 수 있는데, 잘 만들어진 거시적 해석적 모형이 가지는 시간과 비용의 경제성, 합리적인 산정 정확도가 가지는 가치는 많은 전문가들이 공감하고 있고 인정하고 있기 때문에 이에 대한 논의는 미루고자 한다.

신호교차로 영향권 내에서의 도로점용공사가 가지는 교통류 특성 변화에 관한 연구 사례가 전술한 두 사례처럼 존재하고 있으나, 미시적 시뮬레이션만을 통해 얻어낸 결과 값을 기반한 용량산정 회귀모형이 가지는 근본적인 한계점에 대한 지적을 극복하기 어렵고 해석적인 모형이 제시되긴 하였으나 상류 및 하류부 모형에서 충격과 모형의 적용이 전도되어 주류 신호운영이론의 간결함을 지키지 못하였을 뿐만 아니라 이 역시 실증적인 자료의 뒷받침이 없다는 약점을 가지고 있었다.

본 연구는 선행 연구 모형의 취약점을 극복하기 위해서 차로 수 감소를 수반하는 해석적 모형은 이해도를 높이고 간결함을 키우는 방향으로 상·하류부 모형을 개편, 수정하였으며 현장에서 수집된 교통류 특성 자료와 직접 비교, 평가함으로써 현장 적용 시 모형 값과 실제간 괴리를 축소하고자 노력하였다. 또 차로 수는 유지되나 교차로 접근부와 내부에서 노면조건변화(복공판)나 차로군 이동(lane-shift)과 같은 타 공사 유형에 대해서도

용량관련 특성 변수의 값과 범위를 현장자료의 수집과 분석을 통해 제시함으로써 적용성 보완에 집중하였다.

III. 정지선 포화교통류를 산정 모형 개발

1. 해석적 모형의 구분 및 개선 사항

신호교차로의 도로점용공사는 Figure 1과 같이 공사구간의 위치 및 공사유형, 정지선과의 이격거리, 교차로길이, g/C 등의 상호작용으로 인하여 기본 포화교통류율이 감소하게 된다. 신호교차로 인근에서 시행하는 공사 유형은 공사구간의 위치 별로 차로 수 감소 유형과 차로 수 유지(차로 폭 축소, 차로 측방 이동, 복공판 설치) 형태 등으로 추가 구분할 수 있다. 이러한 도로점용공사는 해당 접근로의 정지선 포화교통류율을 감소시키며 기본적인 신호운영조건에 더해 용량감소지점(병목형성지점) 공사유형에 따라 서로 다르게 용량감소율을 적용하여야 한다.

본 연구에서는 신호교차로 인근에서 수행되는 도로점용공사를 먼저 분석 대상이 되는 접근부 정지선을 기준으로 상류부에서 수행되는 공사와 하류부에서 수행되는 공사로 양분하였으며, 이어서 Table 1에 정리된 것과 같이 공사를 규정하는(동시에 포화교통류율 변화를 유발하는) 여러 기하구조 및 신호운영 관련 변수들을 독립변수로 선정하고 이를 기반으로 해석적 논리모형을 개발하였다.

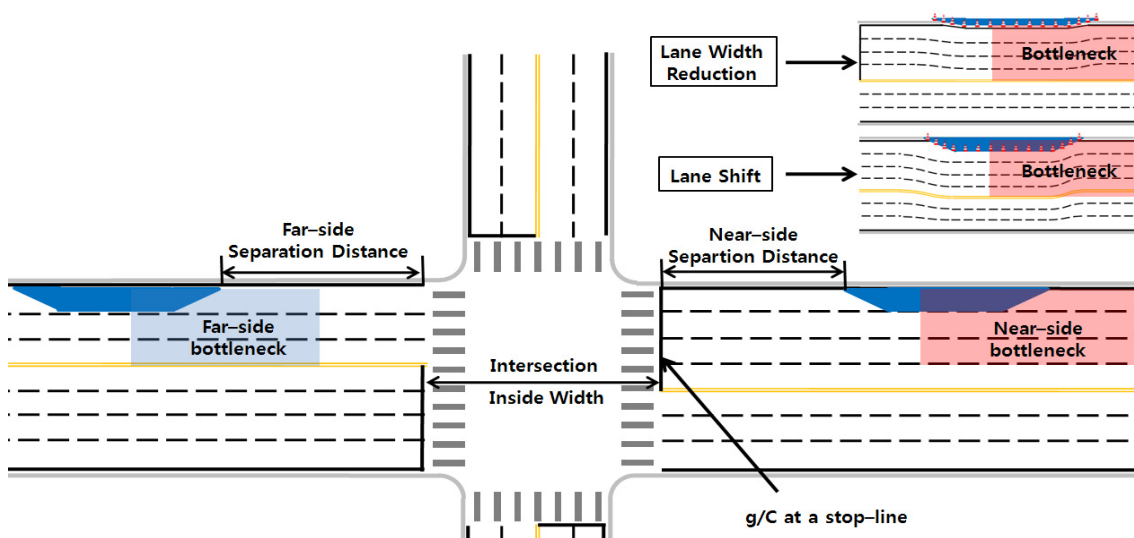


Figure 1. Work-zone types with various fixed and operational conditions

Table 1. Constituting variables for model building

	variables	description	models	
			Near side	Far side
separation distance	distance	distance from stop-lines to work-zones (m)	○	○
	# lanes	no. of lanes open and closed	○	○
	G	green phase time (s)	○	○
	C	cycle length (s)	○	○
	taper length	transition taper length (m)	○	○
intersection width	width	intersection inside width (m)	X	○
	work-zone type	lane-drop, lane-width reduction, lane-shift etc	○	○
	CRF	capacity reduction factor	○	○

실제 Eo and Shin (2010)의 모형과는 달라진 점이 상당히 많은데, 우선 공사의 차로 수 감소 형태만을 대상으로 하던 이전 모형과는 달리 차로 수 유지의 공사유형도 모형에 산입시켰으며 기본적인 교통류이론 적용과 방법론, 철학도 크게 바꾸었다. 과거 모형과 달라진 점을 정리하면 다음과 같다.

우선 과거 상류부 모형은 공사구간 종료지점 쪽으로 출발로 인한 역진 충격파(back propagation)가 도달하고 이후 정지선에 당해 차량이 통과하는 시간과 유효녹색시간을 비교하여 판정했던 것에 반해 본 연구에서는 이해가 쉬운 정지선 포화차두간격을 이용하여 특정 위치(공사구간 종점) 대기차량의 정지선 통과와 유효녹색시간을 비교하게 하였다. 이 방법은 충격파 이론보다 정확하며, 많은 실증적 자료를 기반한 것이면서 계산도 훨씬 용이하다는 이점이 있다.

하류부 모형은 유출 용량차를 기반한 미유출 잔여 교통량의 대기행렬 형성과 그 행렬 후미의 상류 정지선 침범 여부를 시간적으로 계산하였지만, 이번엔 정지선 하류부 공사구간 시점에 출발(선두)차량이 도달 후 발생하는 충격파를 산정하는 방식으로 대체하였다. 이는 계산 과정이 논리적으로 안정되는 결과를 낳고 이전 모형의 경우 대기행렬 내 차두간격 크기가 stand-still 상태 하나 값으로 정해져 과소평가되었던 문제점을 해결하였다.

또 충격파 산정에 기본 q-k 관계식으로 Greenshields의 것을 본 연구에서는 two-regime simple linear 공식으로 대체하였다. 충격파를 계산함에 q-k 관계식을 기반하되 실제 현장에서 관측될만한 최대교통류율(q_{max}) 및 임계밀도(k_{opt}) 값 등이 사용되어야 하며 동시에 신속

한 계산을 위해 선택한 모형의 형태가 간결하고도 일반해를 쉽게 도출할 수 있는 것이어야 했기 때문이다.

다음 절 부터는 지금까지 기술한 여러 개선 사항들을 기초로 하여 만들어진 해석적 논리모형의 개발 과정을 설명하고 도출된 결과를 제시하고자 한다.

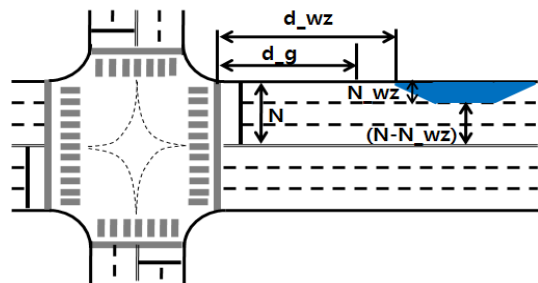
2. 상류부 모형 개발 과정과 결과

상류부 모형은 정지선과 그 상류부에 형성된 차로를 점용하는 공사구간의 종료 지점 사이에 형성될 수 있는 정지선 대기행렬 차량군이 주어진 녹색시간(유효녹색시간) 동안에 어느 정도 대기차량 위치까지 정지선 앞 교차부를 빠져 나아가게 할 수 있는가에 대한 핵심적인 계산 과정을 기초로 한다.

그 개념은 유효녹색시간(g)동안 한 차로를 기준으로 정지선을 통과할 수 있는 차량의 대수(V_g) 또는 소거가능거리(d_g)가 존재한다는 것인데, 만약 유효녹색시간 동안 소거 가능한 대기행렬의 최후방 차량의 위치가 공사구간 종료 지점에 미치지 못한다면(다른 말로 공사구간이 정지선으로부터 충분히 멀다면) 반복적으로 현시되는 그 방향에 적용되어야 할 기본 또는 실제 포화교통류율은 상류부 공사로 인한 차로점용 여부를 떠나 그대로 손실 없이 유지된다는 걸 의미하게 된다.

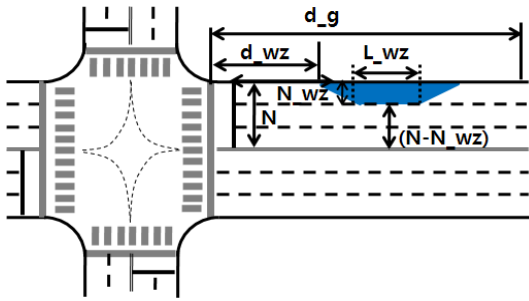
소거가능거리(d_g)의 근본적인 개념을 Figure 2에서 표현된 변수를 활용하여 수식으로 표현하면, 소거가능거리는 녹색시간동안 상류부 정지선을 통과할 수 있는 길이로써 포화차두시간과 정지 시 차두(공간)간격을 이용하여 산정 가능하며 식(1)과 같게 된다.

$$d_g = \frac{g_i}{h_d} \times d_{fb} \tag{1}$$



when $d_g \leq d_{wz} \Rightarrow$ type 1

Figure 2. Type 1 for near-side case



when $d_g > d_{wz} \Rightarrow$ type 2:

Figure 3. Type 2 for near-side case

- 여기서, d_g : 녹색시간 소거가능거리(m)
- d_{fb} : 차량의 정지 시 차간간격(m)
- g_i : 차로군 i 의 유효녹색시간(s)
- \bar{h}_d : 현장에서의 포화차두시간(s)

이상과 같은 유효녹색시간동안의 소거가능거리를 기초로 유형을 구분할 수 있는데, 녹색시간 내 소거가능거리가 공사구간에 미치지 않는 경우를 유형 1이라고 하고, 이러한 경우에는 반복되는 포화교통류율의 손실이 거의 없는 형태의 식 (2)로 표현된다 할 수 있다.

$$S_{i_{wz}} = \frac{g_i \times d_{fb} \times N - d_{fb} \times N_{wz}}{\bar{h}_d} \times \frac{3,600}{g_i \times N}$$

$$= \frac{3,600}{\bar{h}_d} - \frac{3,600 \times N_{wz}}{g_i \times N} \quad (2)$$

- 여기서, N : 차로 수(좌회전 포켓 제외)
- N_{wz} : 공사로 인한 폐쇄 차로 수

다만 최종 식(2)의 두 번째 항은 일종의 조정 항으로 공사로 인해 정지선까지 불완전 차로로 운영되는 차로의 길이 전체가 충분히 활용되기 보다는 약간의 비효율을 수반한다는 의미이며 실제 이러한 차령거동이 많이 관측되기도 하였다.

또 녹색시간 내 소거가능거리가 공사구간에 다다르거나 초월하는 경우(다른 말로는 녹색시간이 충분히 길거나 공사구간과 정지선 이격거리가 짧은 경우)에는 특정 녹색시간 이후에는 공사구간 초입부에 형성된 병목구간에서 공급하는 교통량 이상을 정지선에서 방출시키지 못하는 상황이 발생하게 되고, 이를 유형 2라고 하기로 한다.

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

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

- 여기서, d_g : 녹색시간 상류부 소거가능거리(m)
- d_{wz} : 공사구간 이격거리(m)
- L_{wz} : 폐쇄된 공사구간 종단 길이(m)
- CRF : 용량감소지수 (1.0 이하의 수)

유형 2의 경우 산정되는 포화교통류율은 두 개항의 합으로 표현된다. 전술한 바와 같이 전항은 유효 녹색시간보다는 적은 특정 녹색시간까지 정지선에서 공사구간에 형성된 공간의 대기행렬을 반복적으로 방출시킬 때의 량이고, 후항은 특정 녹색시간 이후 공사구간 초입부에 형성된 병목구간에서 공급하는 교통량 이상을 정지선에서 방출시키지 못하는 상황에서 산정될 수 있는 녹색시간 한 시간 환산 포화교통량이다.

다만 공사구간이 물리적으로 길고 이격거리도 있는 경우, 유효 녹색시간의 종료시점에 정지선을 통과할거라 예상되는 차량의 위치, 즉 d_g 가 공사구간 구간 내에 위치하게 되는 경우가 빈번할 수 있는데, 이 경우에는 CRF 적용이 필요 없게 된다. 이 상황에선 차로 수가 감소된 형태로 병목구간에 대기행렬의 상태로 있다가 차량이 방출되게 되는데 이러한 흐름 상황을 합리적으로 수용하기 위하여 L_{wz} 과 관련된 항이 만들어 졌다. 그 과정은 식 (3)의 이전에 표현된 중간과정 식에 잘 나타나 있다.

3. 하류부 모형 개발 과정과 결과

하류부 모형은 정지선에 대기했다 출발한 포화교통류의 선단이 교차부나 그 하류부에 형성된 공사구간의 시점에 도달하고, 이후 차로 수 감소(또는 차로 수는 유지되나 용량 감소가 발생하는 경우)로 인한 충격파가 발생하여 역진하면서 원래의 분석 대상 접근로의 정지선 가까이 까지 도달하는데 소요되는 시간의 합과 가용한 유효녹색시간을 비교하여 유형을 추가로 구분한다.

유효녹색시간이 전부 소진되는 동안 차량선단이 공사

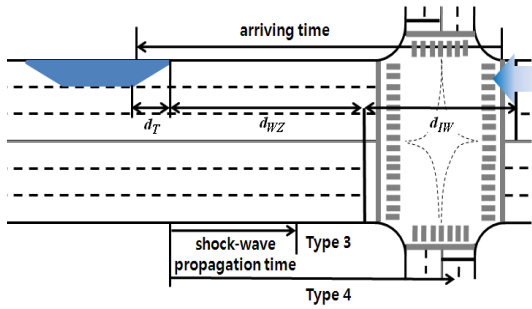


Figure 4. Type 3 and 4 for far-side case

구간 시점에 다다르고, 이후 그 충격파가 역진하여 도달한 거리가 여전히 하류부에 위치하고 있다면(그림에서 유형 3) 유효녹색시간은 아무런 방해 없이 정상적인 SFR을 반복적으로 구가할 수 있을 것이며, 유효녹색시간이 길어서 (또는 하류부 공사구간까지 거리가 짧아서) 역진 충격파가 정지선까지 도달하고도 여전히 잔여 녹색시간이 있다면, 그 잔여시간 동안에는 하류부 병목지점의 영향 탓에 원활한 정지선 유출량을 기대할 수 없게 되고 이를 포화교통류율에 손실량으로 반영하여야 한다는 뜻이기도 하다.

정해진 지점에, 즉 교차로 중앙 지점에, 도달하는데 소요되는 총 시간을 g_T 라고 정하고 이를 유효녹색시간과 비교하면 유형이 간단하게 구분되며, 그 산식과 결정방법은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g_T = \frac{(d_T + d_{WZ} + d_{TW})}{u_o} + \frac{(d_{WZ} + \frac{d_{TW}}{2})}{w} + 1.0 \quad (4)$$

when $g_T > g_i \Rightarrow$ type 3, $g_T < g_i \Rightarrow$ type 4

- 여기서, d_T : 공사구간 테이퍼 길이(m)
- u_o : 평균이동속도 (m/s)
- d_{WZ} : 공사구간 이격거리(m)
- w : 충격파 속도(m/s)
- d_{TW} : 교차로 폭(m)

위의 총 도달소요시간을 계산하기 위해서는 먼저 평균이동속도와 충격파의 속도를 선택해야 하며, 이 값들이 중요하게 작용할 수 있다. 우선 평균이동속도는 정지선 앞에 정지해 있던 차량의 실질적 가속도량을 초당 4.0 km/h로 정하고, 정해진 이동거리(공사구간 초입까지)를 주행하는데 소요되는 시간을 구함으로써 해결될

수 있다. 다만 제곱근이 수반되는 일반 공식을 사용하기 보다는 편의를 위해 거리 구간별로 대표 평균이동속도를 정하여 사용하도록 하였는데, 내부에 해당하는 처음 20m까지는 2.84 m/s, 이후 50m까진 4.69 m/s, 100m까진 6.64 m/s, 150m까진 8.49 m/s, 그 이상은 초속 10.0 m/s를 사용하였다.(KST, 2012)

그 다음이 역진하는 충격파의 량을 산정하여야 하는데, 계산의 편의성을 추구하고 동시에 Greenshields의 q-k 관계식이 가지는 비현실적인 주요 매개변수 값과 결과의 왜곡을 극복하기 위해서 two-regime simple linear 모형을 사용하여 병목에서의 밀도를 일반화로 하는 공식을 산출하였다. 하지만 신호교차로 정지선에서 정지하여 있다 출발하는 차량들은 포화상태나 다름없으므로 q_{max} 비율로 병목으로 쇄도한다고 볼 수 있으며, 이 경우에 충격파의 크기는 Figure 5에서 같이 일반적으로 구하는 u_w 가 아니라 삼각형 우측 변의 기울기를 그대로 사용할 수 있는 훨씬 단순해진 해 값을 선택할 수 있게 된다.

본 연구에서는 도시가로임을 고려하여 q_{max} 에는 2,000 vphpl, k_{opt} 는 30 vpk, k_j 는 130 vpk를 사용하였으며, 결과적으로 병목의 종류에 상관없이 평균 20.0 km/h, 다시 말해 5.56 m/s의 충격파 산출량을 사용하였다.

여기서 주의할 것으로 g_T 를 계산할 때, 하류부 공사지만 이격거리를 보면 교차로 내부에 해당하는 경우가 있다. 이 경우는 정지선과 정지선 사이로 정의된 교차로 폭의 내부 쪽으로 하류부 공사 시점인 테이퍼 부가 침투하는 만큼 음수($-d_{wz}$)로 처리해 계산하면 된다.

이렇게 함으로써 일차 하류부의 유형을 3 및 4로 구분하고, 다음 단계에서는 바로 포화교통류율의 산정모형

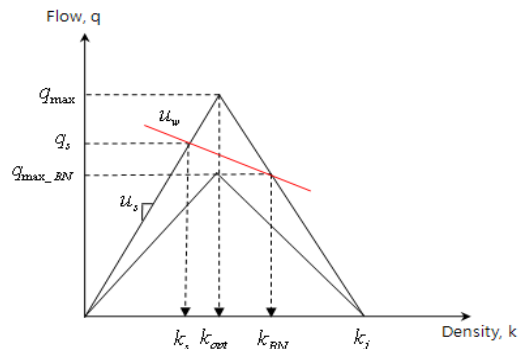


Figure 5. Two-regime simple linear q-k polygon

을 달리 선택하여 사용하면 되도록 하였다. 유형 3인 경우에는 식(5), 유형 4인 경우에는 식(6)을 사용하면 된다.

$$S_{i_{wz}} = \frac{3,600}{h_d} \tag{5}$$

$$S_{i_{wz}} = \frac{3,600}{g_i \times N} \times \left\{ \frac{g_T}{h_d} \times N + \left(\frac{g_i - g_T}{h_d} \right) \times CRF \times (N - N_{wz}) \right\} \tag{6}$$

식(5)는 정지선 방출에 지장 받지 않아 공사 전 상황과 같은 포화교통류율이 유지된다는 것을 나타내는 것이고, 식(6)은 역진 충격과가 도달하는 g_T 까지는 정상 포화교통류를 유지하다가 잔여시간인 $g_i - g_T$ 동안은 하류 병목의 용량에 상응하는 방출량을 유지할 수밖에 없음을 나타내고 있다.

4. 용량감소지수(CRF)의 조사와 선정

상류부, 내부를 포함하는 하류부 모형 등이 제시되었으나 두 모형 모두에서, 특히 유형 2와 4에서, 작용하는 주요 매개변수 값이 바로 병목에서의 차로당 용량 값인데, 통상 일반차로가 가지는 용량 값보다는 훨씬 적으며 그것도 개방 차로 수와 폐쇄 차로 수의 다양한 조합에 따라 그 값이 다양하게 나타난다. 본 연구는 HCM (TRB, 2010)의 단(중)기 공사구간에서 사용하는 차로당 용량 값을 참고하고, 진행 중인 KST (2012) 도로용량편람 개정 연구의 결과 값을 수용하였는데, 그 값은 다음과 같다.

용량감소지수의 적용은 차로 수 감소가 일어나는 공사유형에만 적용할 수 있는 것이 아니라 타 공사 유형에도 적용 가능하다. 차로 폭만 감소시키거나 특정 구간에 복공판을 설치하는 공사, 진행 동선이 측방으로 한 차로 이상 중앙선을 넘어 짧게 이동했다 복귀되는 lane-shift 등과 같이 차로 수 감소가 수반되지 않는 공사도 마찬가지로 적용 대상이 될 수 있다. 적용 대상이 된다는 말은 유형 2와 4에 해당하는 산식을 그대로 사용하면 된다는

Table 2. Capacity reduction factors for use

work-zone types		capacity reduction rate (%)	CRF
Lane-drop types	2 to 1*	17	0.83
	3 to 2	15	0.85
	4 to 3	13	0.87

* the latter no. is for the lanes open

의미이고, g_T 산정에 주의하면서 N_{wz} 값으로는 0.0을, 변수 L_{wz} 는 사용하지 않으면 된다. 이와 관련한 CRF에는 각각의 현장에서 조사, 정리된 용량감소지수(총 7개 쌍을 비교한 0.882-0.911 사이의 값으로 평균값은 0.90)를 선택하면 되는데, 구체적인 내용은 전술한 KST (2012)의 개정 및 보완연구를 참고하면 된다.

IV. 모형의 검증

개발된 해석적 논리모형의 유효성 검증을 위하여 다양한 조건을 기반으로 하는 미시 모의실험 결과와의 비교를 우선적으로 수행하고, 상류부, 하류부, 내부 등 실제 도로점용공사 현장에서 직접 촬영, 조사, 분석된 자료를 바탕으로 도출된 포화교통류율과의 비교 및 검증을 후속적으로 수행하였다.

1. 미시 모의실험을 통한 검증

1) 네트워크 및 시나리오 구성

미시 모의실험을 수행하기 위한 기본적인 네트워크 구성 및 도로와 교통 환경은 Table 3에 나타나 있으며, 신호조건(유효녹색시간), 공사의 위치 및 이격거리, 폐쇄차로 수 등을 다양하게 변화시키는데 유의하며 반복적으로 수행하였다.

녹색시간은 20-90초까지 하였고, 공사위치를 상류부, 하류부, 내부 등으로 구분하고 정지선으로부터 30m씩 아래, 위로 이격시켜가면서 변화하는 포화교통류율을 추출하였다. 상류 및 하류부 모의실험에는 차량추종이나 차로변경 미세 거동을 매 초 계산하는 CORSIM을 사용하였고, 교차로 내부에서 진행되는 공사는 앞의 톨로 구현하기가 불가능하여 VISSIM을 사용하였다.

Table 3. Road and traffic conditions for simulation

items	description
speed limit	60 kph
lane-drop type	2-1, 3-2, 4-2, 4-3*
S.F.R.	calibrated to be around 2,000 vphpl
lane width	3.0 meters
traffic mix	passenger cars only
flow condition	saturated conditions made to observe SFR
lane occupation	basically out-most lane(s) is(are) occupied

* the latter is for the # lanes open under road works

결과의 객관적 동질성 추구를 위한 calibration 노력으로 CORSIM에선 차량길이, 제한속도, 포화차두시간, 출발손실시간, 차로폭 등을 조절하였고, VISSIM에선 추가로 안전거리(additive 및 multiplicative)와 look ahead distance를 조절하였으며, 두 경우 모두 정상 시정지선 SFR이 2,000 vphgpl에 근접하도록 하였다.

2) 모의실험 결과 분석 및 비교

변수에 따라 상이해질 것으로 예상되는 포화교통류의 값의 양자 비교를 위해 모의실험 수행을 통해 얻어진 결과 값과 본 연구를 통해 개발된 해석적 모형을 사용하여 산정한 포화교통류 값을 공사위치 및 이격거리 등 다양한 조건 하에서 비교하였다.

Table 4와 Figure 6은 전형적인 사례로써 3차로⇒2차로(공사시)의 한 개 차로 감소가 수반되는 상류부 공사(구간길이 100m) 및 하류부(내부 포함) 공사를 대상으로 한 비교인 유효녹색시간은 27초, CRF는 0.85를 적용하였다. 상류부의 경우는 최대 7%의 차이를 보였으며, 하류부는 거의 차이를 보이지 않았다. 다만 하류부 중 실

제 내부인(이격거리 0 및 30m) 경우에는 다소 큰 15%까지의 차이를 보이는 경우도 있었다. 내부의 경우는 정지선 지나 병목 앞에서 생기는 용량감소현상(CRF)을 모의실험이 잘 구현하지 못해서라고 판단하고 있으며, 전체적으로는 모형이 산정한 포화교통류를 값과 미시 시뮬레이션의 결과 값 사이에는 차이가 크지 않음을 확인하였다.

이미 동일한 조건을 가지고 수행한 선행 연구(Eo and SHIN, 2010)에서 RMSE 분석과 Wilcoxon Rank test 등을 통하여 각 시나리오별 모형 값들이 모의실험 집단의 분포와 동일함을 증명한 바 있으며, 통계적인 검증보다 중요한 것은 위치에 따라 감소하는 경향을 보여 주느냐가 관건인데, Figure 6은 그 결과를 여실히 보여 주고 있다.

2. 현장자료와의 비교 및 검증

개발된 모형이 산출해내는 값이 미시 시뮬레이션 값과 유사하거나 위치별 SFR 값 변화 트렌드를 잘 반영한다는 결론은 비록 모의실험에 정산 노력을 세심히 기울였다 할지라도 모의실험 툴 자체가 가진 함정이나 약점을 벗어나지 못하는 경우가 종종 있다. 따라서 실제 현장에서 여러 공사 유형을 대상으로 현장자료를 수집하고 이를 측정, 분석하여 비교하고자 하는 노력을 기울였다.

1) 현장 조사 및 자료의 정리

총 9개의 신호교차로에서 자료를 수집, 정리, 분석하였다. 다양한 공사 위치와 조건에서 수행되는 현장에서 한 시간 정도 촬영한 다음, 포화상태를 보이는(또는 대기행렬 10대 이상인) 주기만을 10주기 이상 추출하고, 출발손실시간을 고려하여 유효녹색시간을 보정한 다음, 한 시간 교통류율로 환산하였다. 현장자료 수집은 현장의 가변성 때문에 상당히 수집하기가 어려웠는데, 최소

Table 4. Model estimation values vs simulation results

Far Side	Separation Distance (m)						
	180	150	120	90	60	30	00
simulations	1,978	1,994	1,992	1,973	1,962	1,746	1,503
models	2000	2000	2000	2000	1956	1477	1338
Diff.(%)	1.1	0.3	0.4	1.3	▽1.3	▽15	▽11

Near Side	Separation Distance (m)						
	00	30	60	90	120	150	180
simulations	1,412	1,664	1,863	1,963	1,969	1,989	1,986
models	1313	1,605	1,897	1,956	1,956	1,956	1,956
Diff.(%)	▽7.0	▽3.5	3.3	▽0.3	▽0.6	▽1.6	▽1.5

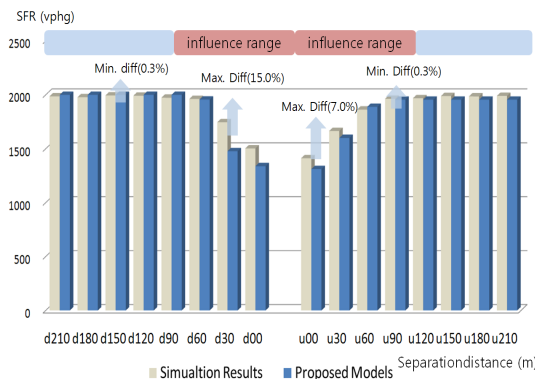


Figure 6. Change of SFR according to WZ location

Table 5. Description of work-zones at fields

class.	intersection	types	s. distance	G
Near Side	Arirang-Gogae 3	3 to 2	40 m	50 s
	Bupwon 4	4 to 3	0 m	50 s
	East-suwon-IC 4	3 to 2	0 m	95 s
Far Side	Suwon-city-hall 4	2 to 1	65 m	55 s
	Baemyung 4	2 to 1	75 m	35 s
	Pajangchon 4	3 to 2	125 m	90 s
Inside	Bangyi 4	3 to 2	30 m	38 s
	Bangyi 4 (2)	2 to 1	26 m	35 s
	Baemyung 4	2 to 1	30 m	35 s

한의 현장 수는 갖추어진 것으로 판단하고 있다.

상류부, 내부, 하류부에서 수행되는 공사들이 각각 3건씩 구성되어 있는데 구체적인 공사위치, 폐쇄조건, 신호조건, 이격거리 등은 Table 5와 같다

2) 현장 자료와 모형 도출 값의 비교 분석

반복되나 현장자료와의 비교는 무엇보다 중요한데,

Table 6. Comparison of estimated SFRs to field data

class. \ items		Sep. Dist.	Field Values	Proposed Models	Diff. (%)
Near	Arirang-gogae 3	40 m	1,580	1,637	3.50
	Bupwon 4	0 m	1,461	1,427	▽2.40
	East-suwon-IC 4	0 m	1,194	1,154	▽3.35
Far	Suwon-city-hall 4	65 m	1,424	1,439	1.07
	Baemyung 4	75 m	1,499	1,463	▽2.40
	Pajangchon 4	125 m	1,471	1,455	▽1.08
Ins.	Bangyi 4	30 m	1,291	1,354	4.87
	Bangyi 4(2)	26 m	1,076	1,122	4.28
	Baemyung 4	30 m	1,124	1,197	6.50

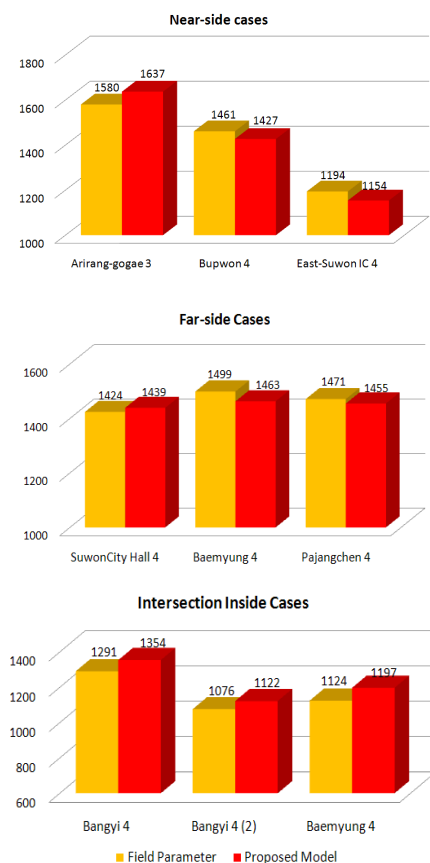


Figure 7. SFRs Produced by models vs. field data

각각의 유형이나 사례 별로 모형이 산출해 낸 포화교통류율 값이 실제 현장에서 얻어진 값에 비해 평균 3% 초반의 차이를 보이는 등, 거시적 해석 모형임에도 상당한 산정 정확도를 보여주었다고 자평한다.

특히 교차로 내부공사 경우, 현장 통행의 실체가 상하류부 공사에서의 차로와는 달리 측방이동이 다소 자유로웠다는 점을 상기하면 이 역시 정확도가 상당한 것이라 할 수 있다.

또 상류부 공사와의 비교에서 최대 3.5%의 차이, 평균 3%의 차이를 보이고 있으나 실제 아리랑교개 현장에서 구해진 포화교통류율이 경사 보정을 하지 않은 점을 고려한다면 이 또한 가까운 값이라 평가할 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 신호교차로에 인접하여 도로점용공사가 계획, 시행될 때 그 공사구간의 위치, 이격거리, 신호조건 등에 따라 다양하게 변화하는 포화교통류율의 산정모형을 개발하였다. 공사구간을 구성하는 다양한 조건별로 모형이 산출하는 포화교통류율 값과 미시 시뮬레이션이 도출하는 값을 비교하였고, 실효성을 증대시키기 위해 실제 공사가 진행되고 있는 현장들의 상황을 조사, 측정, 비교함으로써 제안하는 모형의 타당성과 유효성을 높이고자 노력하였다.

다양한 미시 모의실험 결과와 비교했을 때 평균 2.0%를 약간 초과하는 결과를 보였고, 실제 현장자료와의 비교에서도 3.0% 초반의 차이만을 보이는 등 모형의 정확성을 입증할 수 있었다. 본 연구가 제안하는 모형들은 신호교차로의 영향권 내에서 계획되거나 이행되는 점용공사의 사전적 영향평거나 사후적 계량화를 가능하게 하며, 공사가 가진 교통영향에 따라 위치나 유형, 수행시간대 등을 합리적으로 결정하는데 기술적인 도움을 줄 수 있다고 판단한다. 제안된 해석적 모형들은 특정 지자체의 공사구간 교통개선대책을 마련하는 심의/자문 제도에서 현재 시범적으로 사용되고 있는 등, 활용의 경험을 축적하고 있기도 하다.

본 연구에서 개발된 모형은 실제 대부분의 공사 유형에서 적용 가능할 정도로 다양한 조건별로 포화교통류율 값을 산정해 내는 기능이 탁월하나 lane-shift나 복공판과 같은 차로 수 감소가 수반되지 않는 공사들이 가지는 정상 상황 대비 포화교통류율의 감소, 다시 말해 CRF의

선정과 관련해서는 더 풍부한 현장 자료의 확보와 분석을 바탕으로 더 정확하고 다양한 지수를 도출해야 하는 과제가 남아 있다. 또 점용차로의 횡단면상 위치에 따라서도 SFR이 차이가 남을 몇 개 현장과 모의실험에서 목격할 수 있었는데, 모형의 정밀함 제고를 위해서는 이에 대한 충분한 실증적 뒷받침도 필요할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Kyonggi University Research Grant of 2012.

REFERENCES

- Elefteriadou L. et al. (2008), Impact of Lane Closures on Roadway Capacity : Project Report, Florida Department of Transportation.
- EO H., Shin C. (2010), Development of SFR Estimation Models Considering Workzones in the Vicinity of Signalized Intersections, J. Korean Soc. Transp., Vol.28, No.6, Korean Society of Transportation, pp.109-120.
- Jung H., Lee C. (2006), Capacity Drop Due to Various Incidents on Freeways, The 53rd Conference of Korean Society of Transportation, Korean Society of Transportation, pp.401-410.
- Kim D., Lee S. (1998), Traffic Characteristics on Lane Drop Areas around Highway Work Zones, J. Korean Soc. Civil Eng., Vol.18, No.III-4, KSCE, pp.445-462.
- Kim T., Lovell D., 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.
- Krammes R. A., Lopez G. O. (1994), Updated Capacity Values for Short-term Freeway Work Zone Lane Closures, TRR 1442, TRB Washington D.C.
- KST (2012), Highway Capacities under Special Situations including Roundabouts, Workzones and Inclement Weather Conditions: Final Draft Report, Korea Society of Transportation.
- May A. (1990), Traffic Flow Fundamentals, Prentice Hall, New Jersey.
- Memmott J. L., Dudek C. L. (1984), Queue and User Cost Evaluation of Work Zones (QUEWZ), TRR 979, TRB Washington D.C.
- MOCT (2001), Korean Highway Capacity Manual, Ministry of Construction and Transportation.
- Oh J., Ko D. (1998), Analysis of Traffic Flow on the Lane Closure due to Road Construction, The 34th Conference of Korean Society of Transportation, Korean Society of Transportation, pp.116-125.
- Park J. N., Oh Y. T. (2007), The Method to Estimate the Length of Transition Area at the Construction Area in the Freeway, The 55th Conference of Korean Society of Transportation, Korean Society of Transportation, pp.393-401.
- 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, Illinois Transportation Research Center.
- TRB (2000), Highway Capacity Manual, National Research Council, TRB Washington D.C.
- TRB (2010), Highway Capacity Manual, National Research Council, TRB Washington D.C.

- ✉ 주 작성자 : 신치현
- ✉ 교신저자 : 신치현
- ✉ 논문투고일 : 2012. 11. 19
- ✉ 논문심사일 : 2013. 1. 23 (1차)
2013. 2. 11 (2차)
- ✉ 심사판정일 : 2013. 2. 11
- ✉ 반론접수기한 : 2013. 6. 30
- ✉ 3인 익명 심사필
- ✉ 1인 abstract 교정필