

■ 論 文 ■

# 도시부 신호교차로 인근 도로점용공사를 고려한 포화교통류율 산정모형 개발에 관한 연구

## Development of Saturation Flow Rate Estimation Models Considering Workzone in the Vicinity of Signalized Intersections

어 효 경

(한국건설기술연구원 첨단교통연구실 연구원)

신 치 현

(경기대학교 도시·교통공학과 교수)

### 목 차

I. 서론	1. 논리모형의 개발 개요
1. 연구의 배경 및 목적	2. 상류부 논리모형 개발
2. 연구의 내용 및 방법	3. 하류부 논리모형 개발
II. 기존문헌고찰	IV. 논리모형의 검증
1. 국내·외 문헌고찰	1. 모의실험 수행
2. 미비점 분석 및 보완방안 제시	2. 모의실험 결과를 이용한 논리모형 검증
III. 신호교차로 포화교통류율 산정 논리모형 개발	V. 결론 및 향후연구과제
	참고문헌

Key Words : 도시부, 신호교차로, 도로점용공사구간, 포화교통류율, 논리모형  
Urban area, Signalized Intersection, Workzone, Saturation Flow Rate, Mathematical model

### 요 약

본 연구는 도로점용공사가 신호교차로의 정지선에 인접하여 시행될 시, 물리적 차로점용으로 인하여 변화하는 포화교통류율을 산정하기 위한 수학적 논리모형 개발을 목적으로 한다. 우선 문헌조사와 사전 모의실험을 통하여 신호교차로에 인접한 도로의 포화교통류율이 도로점용공사의 위치, 차로 수, 신호주기, 유효녹색시간에 의해 민감하게 변화함을 확인하였다. 이러한 포화교통류율 변화요인을 독립변수로 선정하고, 기존 교통류이론을 활용한 수학적 논리모형을 개발하였으며, 개발모형은 도로점용공사의 위치(교차로 상/하류)에 따라 각각 달리 적용하도록 이원화하였다. 개발된 논리모형의 검증을 위하여 다양한 미시적 시뮬레이션을 수행하였으며, 논리모형 적용과 모의실험 수행을 통해 각각 얻어낸 포화교통류율 결과 값을 비교/분석하였다. 검증결과, 각각의 방법으로 얻어낸 포화교통류율의 절대적 차이가 다소 존재하였으나, 독립변수의 영향에 의한 포화교통류율 분포 형태가 통계적으로 유의함을 확인하였다.

This study aims to develop mathematical models for estimating saturation flow rates at the stop line of signalized intersection due to Workzones in the vicinity, since the saturation flow rate is the most critical parameter in capacity analysis for signalized intersections. It was found by reference review that saturation flow rates are sensitively influenced by the location of Workzone, the number of lanes, cycle length and effective green time. Extensive microscopic simulation runs were also performed and compared to the those of mathematical models for model verification. Mathematical models were developed based on traffic flow theory and dualizing them by the location of workzones. And then each result produced by changing important parameter values was carefully examined and analyzed. Small but consistent differences in saturation flow rate values between mathematical models and simulations exist. However, the pattern of changes in saturation flow rates depending on each variable was similar.

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

최근 도로의 원활한 소통흐름 확보와 잦은 공공기반 시설의 유지보수 활동(가스, 수도, 전기, 통신, 상/하수도 등) 및 도시의 이미지 개선 목적 등으로 도로와 연관된 직·간접적인 공사의 시행이 잦아지고 있으며, 이로 인하여 도로 혹은 일부차로를 점용하는 형태의 공사(이하 도로점용공사)가 빈번하게 발생하고 있다. 서울시의 경우 자치조례<sup>1)</sup>를 통해 공사로 인한 지·정체를 최소화할 수 있도록 도로점용공사장 교통소통대책자문회의를 구성 및 운영하도록 규정하고 있으며, 고진영(2005)의 연구<sup>2)</sup>에 따르면 '02년~'04년 동안 '도로점용공사장 교통소통대책자문회의'와 서울특별시 자치구 단위로 운영되는 '도로관리심의회'의 심의를 거친 공사건수가, 연평균 117,365건에 달한다고 한다. 이는 하루 평균 320여건의 도로점용공사가 서울시 내에서 시행되었음을 나타내며, 지금 이 순간에도 많은 수의 점용공사가 시행되고 있음을 나타내는 수치이다. 이렇듯 빈번하게 발생되고 있는 도로점용공사는 특히 신호교차로에 인접하여 시행될 경우 더욱더 심각한 지·정체를 발생시킬 수 있으며, 심한 경우 인접 가로망 전체에 영향을 미치기도 한다.

이처럼 불가피하게 발생하는 지·정체를 최소화하기 위해선 철저하고 현실적인 사전교통관리대책에 대한 수립이 필요하며, 우선적으로 점용공사의 위치 및 유형, 신호여건 등에 따라 변화하는 교통류 특성변화에 관한 분석이 수반되어야 하므로, 관련된 분석 및 산정방법론의 개발이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 신호교차로 인근 도로점용공사로 인하여 변화하는 용량산정에서 가장 중요한 매개변수인 포화교통류율을 대상으로 기존 교통류 및 신호운영 이론을 기반으로 한 논리모형을 개발하고, 미시적 모의실험을 통해 얻어낸 결과 값을 바탕으로 논리모형의 검증을 수행하고자 한다.

### 2. 연구의 내용 및 방법

본 연구는 도시가로의 신호교차로에 도로점용공사가

인접하여 시행될 시 기존차로와 폐쇄차로 수, 공사의 위치(교차로 상류부<sup>3)</sup> 또는 하류부<sup>4)</sup>), 교차로와의 이격거리, 신호주기 및 해당 접근방향의 녹색시간비 등을 고려한 포화교통류율 산정 논리모형을 개발하였으며, 모형 개발을 위하여 충격파 이론(Shockwave theory)을 적용하였다. 논리모형의 검증을 위한 대상 자료는 실제 현장자료의 수집이 어려움에 따라 미시적 시뮬레이션 프로그램을 통해 얻어낸 모의실험 결과 값을 사용하였으며, RMSE(Root Mean Square Error) 분석과 통계패키지를 이용한 분포 검정을 통해 논리모형의 검증을 수행하였다.

## II. 기존문헌고찰

### 1. 국내·외 문헌고찰

도로점용공사로 인하여 변화하는 교통류 특성에 대한 연구사례는 다음과 같다.

박재노(2007)는 고속도로 상에서의 유지보수 활동시 점용되는 차로의 완회구간 길이가 교통류에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고, 시뮬레이션을 이용하여 공사구간에서의 최적 완회구간 길이를 제시하였다.

오주삼(1998)은 중부고속도로 일부구간에서의 관측 데이터와 거시적 모형을 활용하여 도로점용공사의 시행 전/중의 교통량, 속도, 밀도를 산정한 후, 도로점용구간 전방에서의 차로변경행위에 대한 분석을 위하여 차로변경 모형을 구축하였다.

신치현(2008)은 미시적 시뮬레이션 수행을 통해, 신호교차로에 인접하여 도로점용공사가 시행될 시, 점용되는 차로 수 및 신호조건 등의 도로 및 교통환경에 따라 포화교통류율의 감소폭이 각각 다르게 나타남을 확인하였다. 도로점용공사로 인해 1개의 차로가 점용되더라도 가용차로가 많을수록 포화교통류율의 감소폭이 적게 나타났으며, 도로점용공사의 위치, 신호주기, 녹색시간비에 따라 각각 상이한 포화교통류율 값이 나타남을 보여 주었다.

국내의 경우 도로점용공사와 관련된 연구가 대부분 정책적인 측면에 국한되어 있는 실정이며, 교통류 특성

1) 도로점용공사장 교통소통대책에 관한 조례, 서울특별시

2) 고진영, "도로점용공사 교통소통대책 허가 및 관리체계 개선방안에 대한 연구", 서울시립대학교 도시과학대학원, 2005.

3) 교차로 상류부 : 교차로 정지선을 기준으로 교차로에 진입하기 위해 통과하여 들어오는 교차로 인접도로

4) 교차로 하류부 : 교차로 안에서 차량들이 빠져나가기 위해 진입하는 교차로 인접도로

변화에 관한 연구 중 도로점용공사로 인하여 감소 혹은 변화하는 용량 내지 포화교통류율에 관한 연구가 부족한 실정이다.

국외의 경우 국내와 다르게 공사구간의 교통류 특성 변화와 관련된 연구 활동이 수행된 바 있으며, 주요 검토 문헌 및 연구사례는 다음과 같다.

Memcott, J. L.(1984) 등은 도로점용공사로 인하여 변화 및 발생하는 용량, 평균통행속도, 발생지체, 대기행렬지체 등의 이용자 비용을 산정할 수 있도록 QUEWZ(Queue and User Cost Evaluation of Work Zone) 프로그램을 개발하였다.

Praveen K. Edara(2007)는 앞서 언급한 QUEWZ와 QuickZone 프로그램을 포함한 Highway Capacity Manual(1994 and 2000), 그리고 그 밖의 미시적 시뮬레이션(Microscopic Simulation) 프로그램의 특징 및 장단점을 분석하여, 도로점용공사 관련 분석 수행 시 활용할 수 있도록 제시하였다.

Taehyung Kim(2001) 등은 실제 4차로 연속류(고속도로)시설을 대상으로 시행되는 도로점용공사구간 12개 사이트에서 공사시행 전/후의 오전, 오후 첨두시 현장자료를 수집하였으며, 수집된 실측데이터를 이용하여 다중회귀분석 수행하고, 새로운 용량산정모형을 제시하였다. 또한 구축된 모형의 검증을 위하여 기존에 제시되었던 모형과의 비교를 통해 모형평가를 수행하고, 산정 모형의 현실성 및 정확성을 비교하였다.

Lily Eleftheriadou(2008) 등은 단속류(도시부 가로) 시설에서 도로점용공사가 시행될 시 차로점용으로 인하여 감소되는 용량의 산정모형을 제시하였다. 그러나 실측 자료 확보의 어려움으로 인해, 오직 미시적 시뮬레이션과 회귀분석만을 통해 용량 산정모형을 제시하였으며, 신호교차로에 대한 고려가 반영되지 않았다.

## 2. 미비점 분석 및 보완방안 제시

국내에 비하여 관련 연구사례가 다수 존재하는 국외의 경우도 대부분 연속류(고속도로) 시설을 대상으로 수행된 연구가 주류를 이루고 있을 뿐, 단속류 시설을 중심으로 수행된 연구는 다소 부족한 실정이다. 단속류 시설에서의 용량변화에 관한 연구사례도 존재하고는 있으나, 미시적 시뮬레이션만을 통해 얻어낸 실험결과 값을 바탕으로 용량산정모형을 제시하고 있으며, 단속류 시설의 특징 중 가장 중요한 변수인 신호교차로에 대한 고려가

전혀 반영되지 않았다. 이에 본 연구에서는 신호교차로가 인접하여 있는 경우를 고려하고, 기존에 널리 알려진 교통류 이론을 활용하여 새로운 포화교통류율 산정모형을 제시하고자 한다.

## III. 신호교차로 포화교통류율 산정 논리모형 개발

### 1. 논리모형의 개발 개요

신호교차로에 인접하여 도로점용공사 시행 시 변화하는 포화교통류율 산정 논리모형의 개발을 위하여 포화교통류율 변화에 영향을 미치는 요인들을 독립변수로 선정하였으며, 충격과 이론 등의 기존 교통류 이론을 활용하여 논리모형을 개발하였다.

#### 1) 논리모형의 개요

본 연구에서 개발하고자 하는 논리모형은 신호교차로에 인접하여 도로점용공사가 시행 시 해당 차로의 감소되는 포화교통류율을 산정하기 위한 것으로써, 포화교통류율의 감소에 영향을 미치는 요인을 <표 1>과 같이 선정하였으며, 본 연구에서 개발하고자 하는 논리모형의 독립변수로 활용하였다.

논리모형에 대한 개념수립 단계에서 도로점용공사구간의 위치(상/하류부)와 상관없이 모두 적용이 가능한 통합 논리모형 개발의 어려움을 인지하고, 공사구간의 위치(상/하류부)에 따라서 달리 적용할 수 있도록 개발 모형을 이원화 하였다.

<표 1> 논리모형 개발을 위하여 선정된 독립변수

	독립변수	설명	활용모형	
			상류	하류
공통 변수	공사구간의 위치	- 공사구간의 위치가 상류부인지 또는 하류부인지의 여부	○	○
	이격거리	- 공사구간과 교차로와의 거리	○	○
	차로 수	- 평상시 차로 수와 폐쇄차로 수	○	○
	녹색시간	- 접근방향의 녹색시간	○	○
	신호주기	- 교차로의 신호주기	○	○
	설계속도	- 분석구간의 설계속도	○	○
선택 변수	Taper 길이	- 공사구간의 Taper 길이	○	○
	교차로 폭	.	X	○

2) 논리모형 개발을 위한 충격파 이론 고찰과 적용

충격파 이론은 통과교통량과 밀도를 이용하여 연속적인 교통흐름의 변화를 설명할 수 있는 교통류 이론으로써, 변화하는 교통류 흐름의 형상은 <그림 1>, <그림 2>에서 나타내는 것처럼 충격파( $w_{ab}$ )의 진행방향과 충격파의 속도를 통해 설명이 가능하다.

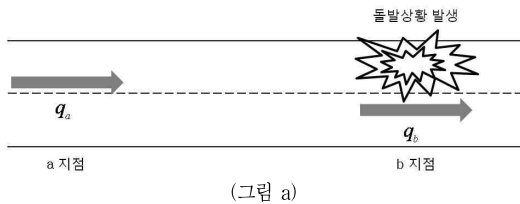
충격파의 속도는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 Greenshield's 모형에 따른 특정지점  $i$ 에서의 속도식을 이용하여 식(2)처럼 나타낼 수 있다.

$$w_{ab} = \frac{q_a - q_b}{k_a - k_b} \tag{1}$$

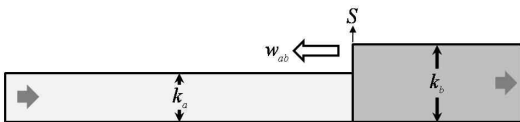
$$w_{ab} = u_f [1 - (\eta_a + \eta_b)] \tag{2}$$

이때, 녹색시간이 시작됨과 동시에 차량의 출발로 인하여 생성되는 충격파는 식(3)과 같고, 상류부 모형개발 과정에 식(3)을 활용하였으며, 이때 속도식에서의 (-)부호는 충격파의 진행방향을 의미하는 것이므로 모형개발 단계에 적용 시 (-)부호는 생략하였다.

$$w_{ab} = -(u_f - u_b) \tag{3}$$

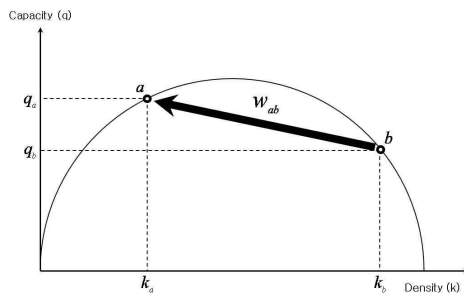


(그림 a)



(그림 b)

<그림 1> 돌발상황 발생 시 생성되는 충격파



<그림 2> 통과교통량, 밀도 차에 의한 충격파의 이동

2. 상류부 논리모형 개발

1) 상류부 논리모형 개발 개념

상류부 논리모형의 근본적인 개념은 녹색시간( $g$ )동안 정지선을 통과할 수 있는 차량의 대수( $V_g$ ) 또는 소거가능 거리( $d_g$ )가 존재한다는 것이다. 녹색시간( $g$ )은 <그림 3>과 같은 원리로 식(4)처럼 나타낼 수 있으며,

$$g = t_1 + t_2 \tag{4}$$

이때 정지선에서 생성된 충격파가 소거가능 거리( $d_g$ )까지 도달하는데 소요되는 시간( $t_1$ )과 소거가능 거리( $d_g$ ) 후미부에 위치한 차량이 정지선을 통과하는데 소요되는 시간( $t_2$ )은 식(5)의 ①, ②와 같으므로, 식(4)에 대입하면, 식(6)처럼 나타낼 수 있다.

$$\textcircled{1} t_1 = \frac{d_g}{u_w}, \quad \textcircled{2} t_2 = \frac{d_g}{u_f} \tag{5}$$

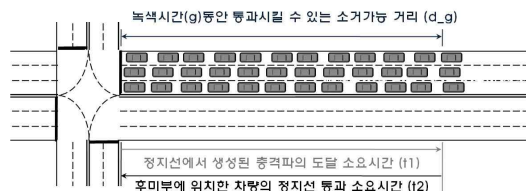
$$g = \frac{d_g}{u_w} + \frac{d_g}{u_f} \tag{6}$$

앞서 도출해낸 식(6)을 초단위로 변환하여 녹색시간 동안 소거가능 거리( $d_g$ )로 전개하면 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

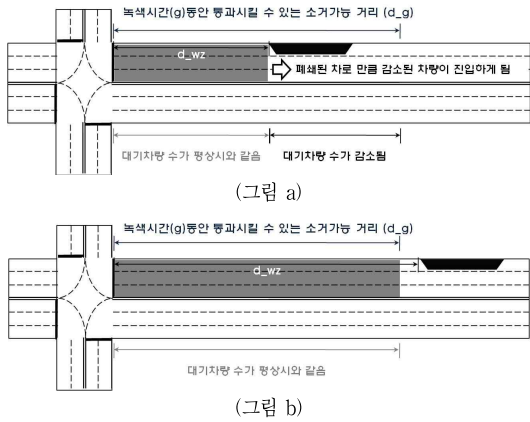
$$d_g = \frac{g \times u_w \times u_f}{3.6 \times (u_f + u_w)} \tag{7}$$

녹색시간( $g$ )동안 소거시킬 수 있는 거리( $d_g$ )와 공사구간 이격거리( $d_{wz}$ )의 상대적인 길이에 의하여 논리모형을 이원화 해야만 하였으며, 그 이유는 다음과 같다.

<그림 4>에서 (그림 a)와 같이 녹색시간( $g$ )동안 통과시킬 수 있는 소거가능 거리( $d_g$ )가 공사구간의 이격거리( $d_{wz}$ )보다 길 경우 녹색시간 중 일부는 도로점용공사가



<그림 3> 녹색시간동안 통과시킬 수 있는 소거가능 거리



<그림 4> 소거가능거리와 이격거리에 따른 논리모형의 이원화

시행되지 않을 경우와 같이 평소 대기차량을 통과시킬 수 있으나, 나머지 시간에는 차로점용에 의하여 감소된 용량만큼 통과시키게 된다. 반면 (그림 b)처럼 소거가능거리( $d_g$ )가 공사구간의 이격거리( $d_{wz}$ )보다 짧을 경우 녹색시간동안 평소와 같은 대기차량을 통과시킬 수 있게 되며, 이때는 공사에 의한 영향을 받지 않기 때문이다.

2) 상류부 논리모형의 개발 과정

교차로 상류부 포화교통류율 산정 논리모형은 <그림 5>와 같은 과정을 거쳐 개발하였으며, 자세한 모형개발 과정은 다음 내용과 같다.

먼저 주어진 녹색시간동안 통과시킬 수 있는 대기차량의 소거가능 거리( $d_g$ )는 앞서, 식(7)과 같이 1차 도출하였다. 그러나 교차로 정지선에서 발생하여 후미로 이동하는 충격파의 속도를 알 수 없기에, 정지선에 멈춰있는 차량들이 출발을 함으로 인하여 발생하는 충격파 속도식(3)을 식(7)에 대입하는 방법으로 소거가능 거리( $d_g$ ) 산정식 식(8)을 정리하였다.



<그림 5> 상류부 포화교통류율 산정 논리모형의 개발 과정

$$d_g = \frac{g \times u_f \times (u_f - u_b)}{3.6 \times (2u_f - u_b)} \tag{8}$$

이때, 출발속도( $u_b$ )를 산정하기 위하여, 시간과 평균 차두시간( $\bar{h}_d$ )을 이용한 포화교통류율( $s$ )을 산정할 수 있는 식(9)를 활용하였다.

$$s = \frac{t}{h_d} \tag{9}$$

식(9)의 시간  $t$ 에 녹색시간  $g$ 를 대입하고, 차두시간( $\bar{h}_d$ )에 1.9초(포화교통류율 1900 pcphpl)를 적용했을 시 통과시킬 수 있는 교통량 대수가 산정된다. 여기에 차두간격( $d_b$ ) 6.5m(평균 차량길이 5m, 차두간격 1.5m)를 곱해줌으로써 길이로 환산할 수 있고, 식(10)과 같이 전개하여 식(8)에서 사용 할 수 있는 출발속도( $u_b$ )를 산정하였다.

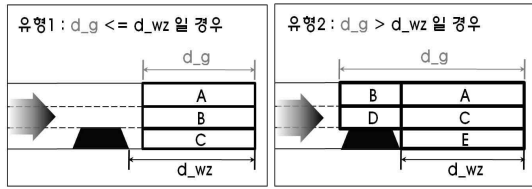
$$\frac{g \times u_f \times (u_f - u_b)}{3.6 \times (2u_f - u_b)} = \frac{g}{h_d} \times 6.5 \tag{10}$$

식(10)의  $u_f$ 에 60kph를 적용하여 출발속도를 산정한 결과, 44.5kph가 추정되었으며, 이는 약 15.5kph의 차이를 나타내는 결과이다. 여기서, 두 속도의 차이인 15.5kph를 이용해 출발속도( $u_b$ )를 ' $u_f - 15.5kph$ '로 가정하고, 식(8)에 대입함으로써 최종 소거가능 거리( $d_g$ ) 산정식 식(11)을 다음과 같이 도출하였다.

$$d_g = \frac{15.5 \times g \times u_f}{3.6 \times (15.5 + u_f)} \tag{11}$$

앞서, 도출된 식(11)을 이용하여 녹색시간동안 통과시킬 수 있는 소거가능 거리를 계산하고, 공사구간 이격거리( $d_{wz}$ )와 비교함으로써, 유형별 산정식에 적용하는 형태로 상류부 모형개발을 진행하였다.

<그림 6>과 같이 소거가능 거리( $d_g$ )가 이격거리( $d_{wz}$ )보다 짧을 경우(유형 1) 녹색시간( $g$ )동안 통과시킬 수 있는 교통량( $V_g$ )은 소거가능 거리( $d_g$ )안의 대기차량 수와 같으므로 (그림 a)  $(A+B+C)/6.5m$ 와 같다. 반면 소거가능 거리( $d_g$ )가 상대적으로 길 경우(유형 2) 녹색시간( $g$ )동안 통과시킬 수 있는 교통량( $V_g$ )은 (그림 b)  $(A+B+C+D+E)/6.5m$ 와 같으며,  $B$ 와  $D$ 는 인접 점용



(그림 a) (그림 b)

<그림 6> 소거가능 거리와 공사구간 이격거리의 비교

차로의 영향으로 인하여 차로용량이 감소되기 때문에 이를 고려하기 위하여 USHCM 2000의 Short-Term Work Zone 영향에 의한 용량감소율<sup>5)</sup>을 사용하였다.

3) 상류부 논리모형 최종 산정식

녹색시간( $g$ )동안 통과가능한 교통량( $V_g$ ) 산정식을 차로별로 환산 후 녹색시간비와 신호주기를 고려하여, 유형별 포화교통류율( $S_{wz}$ ) 산정모형 유형1 식(12)와 유형2 식(13)을 개발하였다.

$$S_{wz} = \frac{(d_g \times N - 6.5 \times N_{wz}) \times 3600}{6.5 \times N \times g} \quad (12)$$

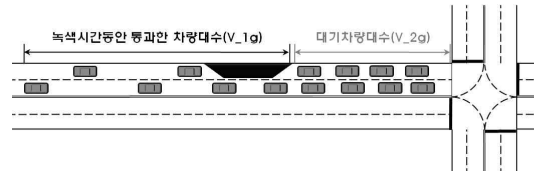
$$S_{wz} = \frac{[(d_{wz} + 0.8 \times (d_g - d_{wz})) \times (N - N_{wz}) + (d_{wz} - 6.5) \times N_{wz}] \times 3600}{6.5 \times g \times N} \quad (13)$$

여기서,

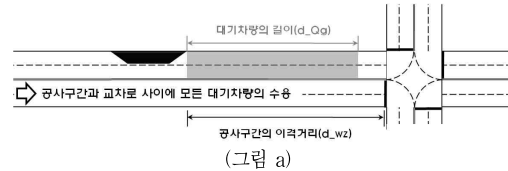
- $S_{wz}$  : 도로점용공사 시행 시 포화교통류율
- $d_g$  : 녹색시간동안 통과시킬 수 있는 소거가능 거리 (m)
- $d_{wz}$  : 교차로와 공사구간의 이격거리 (m)
- $N$  : 평상 시 차로 수
- $N_{wz}$  : 공사에 의하여 점용되는 차로 수
- $g$  : 한 신호주기 당 부여되는 녹색시간 (초)

3. 하류부 논리모형 개발

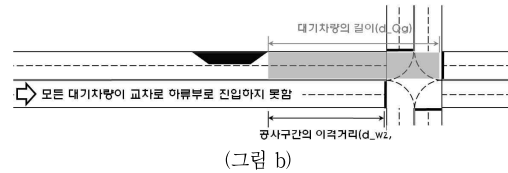
교차로 하류부 논리모형의 근본적인 개념은 녹색시간( $g$ )동안 상류부 정지선을 통과하여 진입하는 차량의 대수( $V_g$ )가 녹색시간동안 공사구간에서 통과시킬 수 있는 교통량( $V_{1g}$ )과 녹색시간 종료 시 대기하고 있는 차량 대수( $V_{2g}$ )의 합과 같다는 것이다. 그림과 수식을 통해 표현하자면, 식(14), <그림 7>과 같다.



<그림 7> 공사구간에서의 통과교통량과 대기차량의 대수



(그림 a)



(그림 b)

<그림 8> 대기차량 길이와 이격거리에 따른 논리모형의 이원화

$$V_g = V_{1g} + V_{2g} \quad (14)$$

상류부 모형을 이원화하여 개발한 것처럼, 녹색시간( $g$ ) 종료 시 교차로 하류부 대기차량 대수( $V_{2g}$ )를 길이로 환산( $d_{Qg}$ )하고, 공사구간 이격거리( $d_{wz}$ )와의 상대적 차이를 비교하는 형태로 모형을 이원화하여 개발하였으며, 그 이유는 다음과 같다.

<그림 8>에서 (그림 a)와 같이 녹색시간( $g$ )동안 발생하는 대기차량의 길이( $d_{Qg}$ )가 공사구간의 이격거리( $d_{wz}$ )보다 짧을 경우 대기행렬이 발생하더라도 공사구간과 교차로사이 구간에서 모든 대기차량의 수용이 가능하다. 그러나 (그림 b)처럼 녹색시간( $g$ )동안 발생하는 대기차량의 길이( $d_{Qg}$ )가 공사구간의 이격거리( $d_{wz}$ )보다 길 경우, 주어진 녹색시간( $g$ )동안 교차로를 통과하여 진입하는 교통량을 모두 수용할 수 없으며, 공사구간과 교차로사이의 이격구간( $d_{wz}$ ) 내에 대기할 수 있는 차량만 통과시킬 수 있기 때문이다.

2) 하류부 논리모형의 개발 과정

교차로 하류부 포화교통류율 산정 논리모형은 <그림 9>와 같은 과정을 거쳐 개발하였다.



<그림 9> 하류부 포화교통류를 산정 논리모형의 개발 과정

주어진 녹색시간( $g$ )동안 하류부의 차로감소로 인하여 발생하는 대기차량의 대수( $V_{Qg}$ )는 식(15)처럼 교차로 상류부 정지선을 통과하여 진입하는 차량대수( $V_{1g}$ )와 하류부 공사구간에서 통과시킬 수 있는 차량대수( $V_{2g}$ )의 차이만큼 발생한다.

$$V_{Qg} = V_{2g} - V_{1g} \tag{15}$$

하류부에서 발생하는 대기차량의 대수( $V_{Qg}$ )를 산정하기 위하여 먼저, 공사구간에서 녹색시간( $g$ )동안 통과시킬 수 있는 차량의 대수( $V_{1g}$ )를 알아야 한다.  $V_{1g}$ 는 녹색시간( $g$ ) 중 차량이 상류부 정지선을 통과하여 공사구간에 도달(교차로 폭( $d_{IW}$ ), 이격거리( $d_{wz}$ ), 공사구간의 테이퍼 길이( $d_{TAPER}$ )를 통과하는 시간)하는 시간을 제외한, 나머지 시간동안 감소된 용량만큼 통과시킬 수 있는 차량의 대수와 같으며, 산정식은 식(16)과 같다. 이때 도로점용공사의 시행으로 인하여 감소되는 인접차로의 용량은 상류부 모형 개발과정에서 활용한 감소율을 적용하였다.

$$V_{1g} = \frac{1600 \times (N - N_{wz}) \times (g - (d_{TAPER} + d_{wz} + d_{IW}) \times (3.6 / U_f))}{3600} \tag{16}$$

주어진 녹색시간( $g$ )동안 하류부에서 발생하는 대기차량의 수( $V_{Qg}$ )를 산정하기 위하여 하류부 공사구간에서 통과시킬 수 있는 차량의 대수( $V_{1g}$ )와 함께 교차로 상류부 정지선을 통과하여 진입하는 차량의 대수( $V_{2g}$ )를 알아야 한다. 하류부로 진입하는  $V_{2g}$ 는 녹색시간( $g$ )동안 상류부 정지선을 통과하여 진입하는 차량의 대수와 같으므로, 식(11)을 이용해  $V_{2g}$  산정식을 다음과 같이 정리하였다.

$$V_{2g} = \frac{15.5 \times g \times u_f}{3.6 \times (15.5 + u_f)} \times \left( \frac{N}{6.5} \right) \tag{17}$$

주어진 녹색시간( $g$ )동안 하류부의 용량감소로 인해 발생하는 대기차량의 대수( $V_{Qg}$ )를 산정하기 위하여 하류부 공사구간에서 통과시킬 수 있는 차량의 대수( $V_{1g}$ ) 산정식과 교차로 상류부 정지선을 통과하여 하류부로 진입하는 차량의 대수( $V_{2g}$ ) 산정식을 도출하였다. 본 과정에서 구하고자 하는  $V_{Qg}$ 는 차로별 대기행렬 대수이므로,  $V_{2g}$ 에서  $V_{1g}$ 을 뺀 후 차로별로 환산함으로써, 식(18)처럼 하류부에서 발생하는 차로별 대기행렬 대수( $V_{Qg}$ )의 산정식이 완성되며,

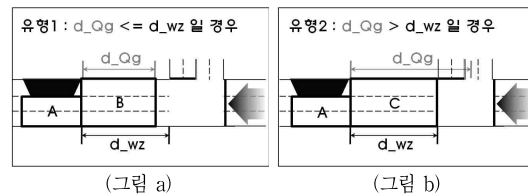
$$V_{Qg} = (V_{2g} - V_{1g}) / N \tag{18}$$

front bumper to front bumper 거리( $d_{fb}$ )를 고려할 경우 식(19)와 같이 하류부에서 발생하는 차로별 대기행렬 길이( $d_{Qg}$ )도 함께 산정할 수 있다.

$$d_{Qg} = V_{Qg} \times 6.5 \tag{19}$$

위의 과정을 거쳐 녹색시간( $g$ )동안 교차로 하류부 공사구간지점에서 발생하는 차로별 대기차량의 대수( $V_{Qg}$ )와 차로별 대기행렬의 길이( $d_{Qg}$ ) 산정식, 식(18)과 식(19)를 도출하였다. 이를 이용하여 주어진 녹색시간동안 발생하는 차로별 대기행렬 길이( $d_{Qg}$ )를 계산하고, 정지선으로부터의 공사구간 이격거리( $d_{wz}$ )와 비교함으로써, 각자 서로 다른 모형식에 적용되도록 모형개발을 수행하였다.

<그림 10>과 같이 하류부에서 발생하는 대기행렬의 길이( $d_{Qg}$ )가 이격거리( $d_{wz}$ )보다 짧을 경우(유형 1) 주어진 녹색시간( $g$ )동안 교차로를 통과하여 진입하는 모든 차량의 수용이 가능하므로, 도로점용공사에 의한 영향을 받지 않는다고 할 수 있으며, 이때 통과시킬 수 있는 교통량( $V_g$ )은 녹색시간( $g$ )동안 진입할 수 있는 차량의 대



<그림 10> 발생하는 대기행렬 길이와 공사구간 이격거리의 비교

수(식 17)와 같다. 반면 대기행렬의 길이( $d_{Qg}$ )가 공사구간의 이격거리( $d_{wz}$ )보다 길 경우(유형 2)는 대기행렬로 인하여 일부차량에 대한 진입이 불가능하므로, 녹색시간( $g$ )동안 통과시킬 수 있는 교통량( $V_g$ )은 (그림 b)의  $(A + C)/6.5m$ 와 같다.

3) 하류부 논리모형 최종 산정식

녹색시간( $g$ )동안 통과시킬 수 있는 교통량( $V_g$ ) 산정식을 차로별로 환산 후 녹색시간비와 신호주기를 고려하여, 유형별 포화교통류율( $S_{wz}$ ) 산정모형 유형1 식(20)과 유형2 식(21)을 개발하였다.

$$S_{wz} = \frac{15.5 \times u_f \times 1000}{(15.5 + u_f) \times 6.5} \tag{20}$$

$$S_{wz} = \left[ \frac{1600 \times (N - N_{wz}) \times (g - \frac{3.6 \times (d_{TAPER} + d_{wz} + d_{TW})}{U_f})}{3600} + \frac{d_{wz} \times N}{6.5} \right] \times \frac{3600}{N \times g} \tag{21}$$

- 여기서,  $S_{wz}$  : 도로점용공사 시행 시 포화교통류율
- $u_f$  : 해당도로의 설계속도 (kph)
- $d_{wz}$  : 교차로와 공사구간의 이격거리 (m)
- $N$  : 평상 시 차로 수
- $N_{wz}$  : 공사에 의하여 점용되는 차로 수
- $g$  : 한 신호주기 당 부여되는 녹색시간 (초)
- $d_{TW}$  : 교차로 폭 (m)
- $d_{TAPER}$  : 공사구간의 Taper 길이 (m)

IV. 논리모형의 검증

개발된 논리모형의 실효성 검증을 위하여 현장에서 직접 조사된 실측값이 필요하다. 그러나 비교/검증을 위한 방대한 현장자료의 수집에 많은 시간과 비용이 소요되는 등 현실적인 어려움이 존재하기에, 미시적 시뮬레이션 분석이 가능한 CORSIM을 활용하여 모의실험을 수행하고, 비교/검증 자료를 확보하였다.

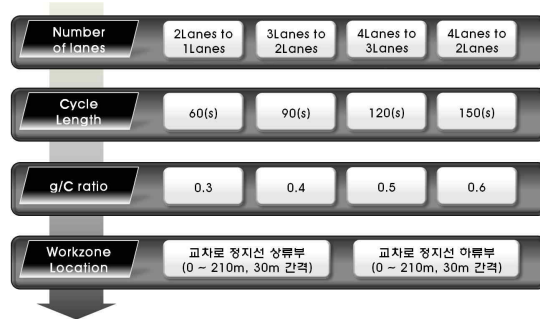
1. 모의실험 수행

1) 네트워크 및 시나리오 구성

모의실험을 수행하기에 앞서, 모의실험 네트워크를 구성하였으며, 모의실험의 수행상황 가정을 위한 시나리

<표 2> 모의실험 네트워크 및 교통환경

구분	설명
제한속도	60kph
차로수	시나리오 구성에 따라 다름
포화교통류율	1,900pcphpl이 되도록 Calibration 수행
차로폭	3.0m
차량구성	승용차만으로 구성
교통류 상태	포화교통류율 관측을 위해 과포화 상태 구현
점용차로 구분	도로의 가장 우측차로를 기본으로 설정



<그림 11> 모의실험 시나리오 구성

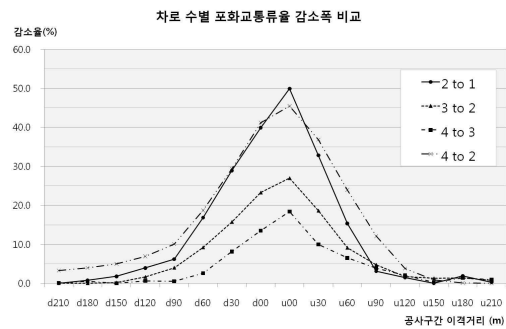
오를 구성하였다. 모의실험의 네트워크 및 교통환경은 <표 2>, 수행 시나리오는 <그림 11>과 같다.

<그림 11>에서 알 수 있듯이 차로 수와 신호주기, 녹색시간비, 공사구간의 위치의 변화를 변수로 선정하였으며, 각 변수의 변화에 따라 달라지는 포화교통류율 값을 산정하여 분석해 보았다.

2) 모의실험 결과분석

변수의 변화에 따라 상이하게 달라지는 포화교통류율 감소폭을 확인하고자 모의실험 수행을 통해 얻어낸 결과값을 사용하여 각 변수별로 정리하고 그래프로 나타내었다.

차로 수의 변화에 따른 이격거리별 포화교통류율 값을 정리한 결과, 2to1(2개 차로 중 1개 차로 가용)과



<그림 12> 모의실험 결과 값 - 차로 수별 비교



4t2(4개 차로 중 2개 차로 가용)가 최대 50%의 가장 높은 감소율을 보였으며, 3t2(3개 차로 중 2개 차로 가용)가 최대 27%, 4t3(4개 차로 중 3개 차로 가용)이 최대 18%의 포화교통류율 감소율을 나타내었다.

신호주기와 녹색시간비 변화에 따른 포화교통류율 산정 값은 변수의 변화에 따라 최대 감소율이 비교적 동일하게 산정되었으나, 포화교통류율(평상시)을 회복하기 시작하는 공사구간의 위치(이격거리)가 상이하게 관측되었다. 신호주기와 녹색시간비가 작아질수록 포화교통류율이 회복되기 시작하는 이격거리가 짧으며, 신호주기와 녹색시간비가 커질수록 상대되는 결과를 나타내고 있다. 이러한 결과는 신호주기와 녹색시간비가 작아질수록 현시 당 부여되는 녹색시간이 짧아짐과 동시에 녹색시간 동안의 소거가능 거리가 함께 짧아짐으로써, 도로점용의 영향을 받지 않는 공사구간의 이격거리가 짧아지기 때문이라 해석된다.

모든 그래프에서 공통적으로 해석되는 부분으로는, 공사구간이 교차로 상류부 또는 하류부에 가까이 위치할수록 감소폭이 커진다는 것이다. u00(공사구간이 교차로 상류부에 인접)일 때 포화교통류율의 감소율이 약 50%로 가장 크게 나타났으며, 교차로 정지선에서 멀어

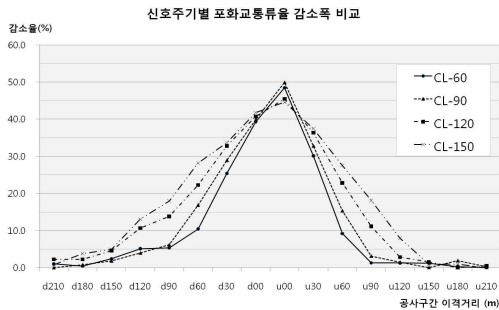
질수록 감소폭이 작아지고 평상 시 포화교통류율을 회복하는 모습을 나타내고 있다.

지금까지 모의실험의 수행을 통해 얻어낸 포화교통류율 값을 분석해 보았으며, 분석된 모의실험 결과를 바탕으로 논리모형의 실효성 검증을 수행하였다.

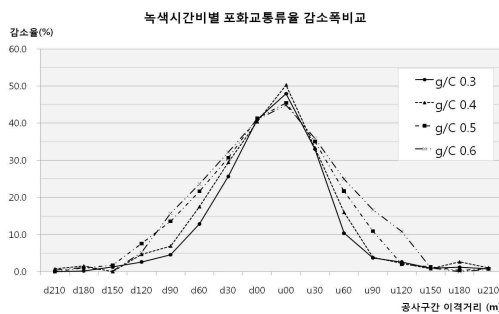
## 2. 모의실험 결과를 이용한 논리모형 검증

### 1) 평균제곱오차의 제공근(RMSE)

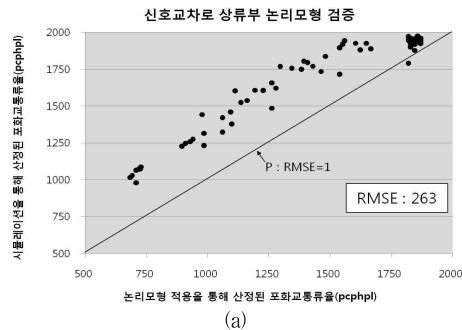
본 연구에서 개발된 논리모형 적용 값과 모의실험 수행 결과 값의 비교를 위하여 모의실험 수행 시나리오와 동일한 차로 수, 신호주기, 녹색시간비, 공사구간의 위치 변수를 논리모형에 적용 및 포화교통류율 값을 산정하였다.



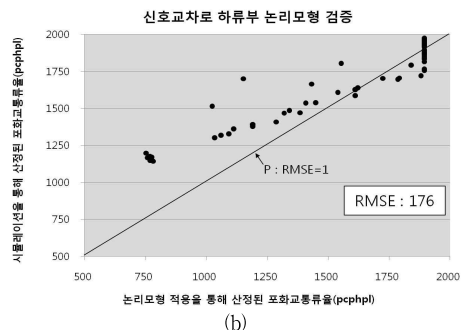
<그림 13> 모의실험 결과 값 - 신호주기별 비교



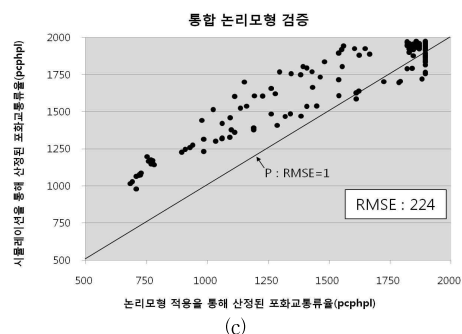
<그림 14> 모의실험 결과 값 - 녹색시간비별 비교



(a)



(b)



(c)

<그림 15> 논리모형 검증

으며, RMSE(Root Mean Square Error: 평균제곱오차의 제곱근)를 기준으로 논리모형 검증을 수행하였다. 모형을 상류부, 하류부로 이원화하여 개발하였기에 상류부 모형과 하류부 모형을 나누어 검증하였고, <그림 15>와 같이 산점도와 함께 표현하였다.

RMSE를 이용한 논리모형의 검증결과, 산점형태가 가상선 P와 유사한 기울기를 나타내었다. RMSE 분석결과가 150~250사이 값을 나타내고 있으나 모의실험 결과 값을 현실적 참값이라 할 수 없으므로 비교된 두 집단의 절대적 포화교통류율 값 비교에는 큰 의미가 없을 것으로 분석된다. 반면, 그래프의 산점형태와 가상선 P의 기울기 비교를 통해 두 집단의 포화교통류율 분포형태가 서로 유사함을 나타낸다.

그러나 산점형태만을 비교함으로써, 두 집단 간의 통계적 유의성을 검증할 수는 없기에 통계패키지를 이용한 추가적인 논리모형 검증을 수행하였다.

2) Wilcoxon Rank-Sum Test 검정

개발된 논리모형은 적용 시나리오별 세부검증을 위해 상류부와 하류부를 구분한 후 공사구간의 위치(이격거

리)별 포화교통류율 값을 차로 수와 신호주기, 녹색시간비 변수에 따라 분류하였다. 종속변수인 포화교통류율 값이 연속형 자료에 포함되고, 각 시나리오 별로 검증하고자 하는 자료의 수가 16개(공사구간의 위치에 따라 모의실험 8개, 논리모형 8개)로 30개를 넘지 않으므로, 비모수검정(분포비교) 방법을 택하였다. 그 중 독립적인 두 집단 간의 '순위 합' 검정을 통해 분포의 차이가 존재하는지 확인할 수 있는 Wilcoxon Rank-Sum Test 검정을 수행하였다. 이때, 집단구분은 논리모형을 '1', 모의실험을 '2'로 정의하여, 다음과 같이 가설을 설정하고, 검정을 수행하였으며, 검정결과는 <표 3>, <표 4>와 같다.

$$H_0 : \text{집단 1과 집단 2는 분포는 동일하다.}$$

$$H_1 : \text{집단 1과 집단 2는 분포는 동일하지 않다.}$$

논리모형 적용 값(집단 1)과 모의실험 결과(집단 2) 값에 대한 Wilcoxon Rank-Sum Test 검정결과, <표 3>과 <표 4>에서 나타내는 것처럼 모든 시나리오의 유의확률이 0.05보다 크게 나타났다.

논리모형과 모의실험 집단의 분포를 검정하는 각 시나리오별 유의확률 'P'가 0.05보다 크게 나타났으므로,

<표 3> 상류부 모형 Wilcoxon Rank-Sum Test 검정결과

			차로 수				신호주기				녹색시간비			
			2to1	3to2	4to3	4to2	60	90	120	150	0.3	0.4	0.5	0.6
순위 검정	N	집단 1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
		집단 2	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	평균순위	집단 1	6.50	6.25	6.13	7.13	6.88	6.50	6.75	6.50	6.75	6.50	6.75	7.00
		집단 2	10.50	10.75	10.88	9.88	10.13	10.50	10.25	10.50	10.25	10.50	10.25	10.00
	순위합	집단 1	52.00	50.00	49.00	57.00	55.00	52.00	54.00	52.00	54.00	52.00	54.00	56.00
		집단 2	84.00	86.00	87.00	79.00	81.00	84.00	82.00	84.00	82.00	84.00	82.00	80.00
검정 통계량	Wilcoxon의 W		52.00	50.00	49.00	57.00	55.00	52.00	54.00	52.00	54.00	52.00	54.00	56.00
	Z		-1.693	-1.904	-2.010	-1.164	-1.402	-1.693	-1.475	-1.682	-1.492	-1.693	-1.475	-1.261
	유의확률(P)		0.090*	0.057*	0.054*	0.244*	0.161*	0.090*	0.140*	0.093*	0.136*	0.090*	0.140*	0.207*

<표 4> 하류부 모형 Wilcoxon Rank-Sum Test 검정결과

			차로 수				신호주기				녹색시간비			
			2to1	3to2	4to3	4to2	60	90	120	150	0.3	0.4	0.5	0.6
순위 검정	N	집단 1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
		집단 2	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	평균순위	집단 1	8.00	6.75	6.00	10.00	8.38	8.00	8.25	8.25	7.50	8.00	7.75	7.63
		집단 2	9.00	10.25	11.00	7.00	8.63	9.00	8.75	8.75	9.50	9.00	9.25	9.38
	순위합	집단 1	64.00	54.00	48.00	80.00	67.00	64.00	66.00	66.00	60.00	64.00	62.00	61.00
		집단 2	72.00	82.00	88.00	56.00	69.00	72.00	70.00	70.00	76.00	72.00	74.00	75.00
검정 통계량	Wilcoxon의 W		64.00	54.00	48.00	56.00	67.00	64.00	66.00	66.00	60.00	64.00	62.00	61.00
	Z		-0.426	-1.492	-2.158	-1.279	-0.108	-0.426	-0.212	-0.211	-0.853	-0.426	-0.635	-0.741
	유의확률(P)		0.670*	0.136*	0.051*	0.201*	0.914*	0.670*	0.832*	0.833*	0.394*	0.670*	0.526*	0.459*

통계검정을 위해 설정한 귀무가설을 기각할 수 없고, 이는 곧 각 시나리오별 논리모형 집단과 모의실험 집단의 분포가 동일함을 나타낸다.

### V. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 교차로에 인접하여 도로점용공사가 시행될 시 감소되는 포화교통류의 산정 논리모형을 개발하였다. 논리모형의 비교/검증 대상 자료의 확보를 위해 모의실험을 수행하였고, 차로 수, 신호주기, 녹색시간비, 공사구간의 위치(이격거리)에 따라 달라지는 포화교통류를 값에 획득하여 RMSE 산정 및 Wilcoxon Rank-Sum Test 검정을 통해 모의실험 결과와 논리모형 적용 값 비교 및 통계적 유의성 검정을 수행하였다.

RMSE 산정 및 그래프 분석 결과, 두 집단 간의 절대적 포화교통류 값 차이가 존재하였으나, 변수에 따른 포화교통류의 분포형태가 유사한 것으로 나타났다. 분포형태의 통계적 유의성 검정을 위해 Wilcoxon Rank-Sum Test 검정을 수행하였고 통계검정 결과, 논리모형 집단과 모의실험 집단의 분포형태가 서로 유의함을 확인하였다.

논리모형과 모의실험 결과 값에 절대적 차이가 존재하기는 하나, 모의실험 결과 값은 현실성이 완벽하게 반영된 참값이라 단정할 수 없기에 논리모형 적용 값과의 절대적인 비교는 어려움이 있을 것이라 사료된다. 반면, 두 집단 간의 포화교통류를 분포형태가 통계적으로 유의함을 검정하였기에 개발된 논리모형의 실효성과 가치를 일부 확인하였다.

본 개발모형은 실효성의 추가 함양 및 일반화를 위하여 실제 현장자료를 이용한 모형의 검증 및 보완개발이 이루어져야 하며, 회전교통량, 점용차로의 구분(1차로인지, 2차로인지 등에 대한 구분) 등 논리모형 개발 시 반영되지 않은 변수들에 대한 고려가 이루어져야 한다. 또한 본 연구에서는 속도변수 값에 설계속도만을 사용하였기에 모형의 적용 값이 과대 또는 과소 추정 될 수 있는 문제점 보완을 위하여 접근속도 및 자유속도 등 현실적 속도 값의 고려가 필요하며, 도시부 교차로간의 영향을 배제할 수 없는 교차로 과포화 상태에서 논리모형을 적용할 수 있도록 분석교차로와 인접교차로의 상호영향을

반영할 수 있는 보완연구가 함께 수반되어야 한다.

### 참고문헌

1. 고진영(2005), “도로점용공사 교통소통대책 허가 및 관리체계 개선방안에 대한 연구”, 서울시립대학교 도시과학대학원.
2. 박재노·오영태(2007), “고속도로 공사구간 완화구간 길이 산정 방안”, 제55회 학술발표회논문집, 대한교통학회, pp.476~485.
3. 신치현·어효경(2008), “도로점용공사에 의한 신호교차로 포화교통류를 변화에 관한 연구”, 『산업기술종합연구소 논문집』, 제33집, pp.234~252.
4. 오주삼·고동석(1998), “도로공사로 인한 차선폐쇄시 교통류 특성에 관한 연구”, 제34회 학술발표회 논문집, 대한교통학회, pp.116~125.
5. 서울특별시, 도로점용공사장 교통소통대책에 관한 조례.
6. Adolf D. May(1990), “Traffic Flow Fundamentals”, Prentice Hall, pp.321~337.
7. Lily Elefteriadou, Mayank Jain, Kevin Heaslip (2008), “Impact of Lane Closures on Roadway Capacity”, Florida Department of Transportation.
8. Memmott, J. L., and C. L. Dudek.(1984), “Queue and User Cost Evaluation of Work Zones (QUEWZ)”, 『Transportation Research Record 979』, TRB Washington D.C.
9. McTrans, QuickZone, <http://mctrans.ce.ufl.edu/feat-ured/QZone/>.
10. McTrans, CORSIM, <http://mctrans.ce.ufl.edu/feat-ured/TSIS/>.
11. Praveen K. Edara(2007), “Estimation of Traffic Mobility Impacts at Work Zones State of The Practice”, TRB Annual Meeting.
12. Rahim F. Benekohal, Ahmed-Zameem Kaja-Mohideen, Madhav V. Chitturi(2003), “Evaluation of Construction Work Zone Operational Issue: Capacity, Queue, and

- Delay”, Illinois Transportation Research Center.
13. Taehyung Kim(2001), David J. Lovell and Jawad Paracha, “A New Methodology to Estimate Capacity for Freeway Work Zones”, TRB Annual Meeting.
14. TRB(2000), “Highway Capacity Manual”, National Research Council, TRB Washington D.C.

☞ 주 작 성 자 : 어효경

☞ 교 신 저 자 : 신치현

☞ 논문투고일 : 2010. 7. 13

☞ 논문심사일 : 2010. 10. 13 (1차)

2010. 12. 15 (2차)

☞ 심사판정일 : 2010. 12. 15

☞ 반론접수기한 : 2011. 4. 30

☞ 3인 익명 심사필

☞ 1인 abstract 교정필