

중차량 비에 따른 편도 2차로 고속도로 공사구간 도로 용량 추정

Estimation of Road Capacity at Two-Lane Freeway Work Zones Considering the Rate of Heavy Vehicles

고 은 정* · 김 형 주** · 박 신 형*** · 장 기 태****

* 주저자 : 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 박사과정
 ** 공저자 : 차세대융합기술연구원 경기도자율주행센터 선임연구원
 *** 공저자 : 계명대학교 도시학부 교통공학전공 조교수
 **** 교신저자 : 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 부교수

Eunjeong Ko* · Hyungjoo Kim** · Shin Hyoung Park*** · Kitae Jang****

* Dept. of The Cho Chun Shik Graduate School for Green Transportation, KAIST
 ** Advanced Institute of Convergence Technology
 *** Dept. of Transportation Engineering, Keimyung University
 **** Dept. of The Cho Chun Shik Graduate School for Green Transportation, KAIST
 † Corresponding author : Kitae Jang, kitae.jang@kaist.ac.kr

Vol.19 No.2(2020)

April, 2020
 pp.48~61

pISSN 1738-0774
 eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2020.19.2.48>

Received 20 January 2020
 Revised 13 February 2020
 Accepted 23 March 2020

© 2020. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

본 연구는 2개 차로 중 1개 차로를 차단하고 공사를 시행하는 고속도로 공사구간의 중차량 비에 따른 도로 용량을 추정하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 영동고속도로와 중부내륙고속도로 공사구간의 CCTV 영상자료를 수집하고, 고속도로 상류부 지점의 정체를 관찰하였다. 상류부 정체 이후 차로차단으로 인해 생성되는 병목구간의 통과 교통량을 측정하는 방법을 활용하여 고속도로 하류부 지점의 통과 교통량을 분석하였다. 공사구간의 도로 용량 추정을 위해 관찰된 차두간격을 활용하여 이론적인 차중별 차두간격의 확률분포를 추정하고 적합성 검정을 통해 도로 용량을 산정하였다. 이를 통해 공사구간을 통과하는 중차량 비에 따라 적합한 용량 값과 추정식을 제시하였다. 추정된 도로 용량은 영동고속도로의 경우 중차량의 비에 따라 1,181~1,422pcphpl, 중부내륙고속도로의 경우 1,475~1,589pcphpl로 산정되었으며 중차량의 비가 증가할수록 도로 용량이 점차 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 편도 2차로 차단 공사를 수행하는 공사구간에 대한 적합한 도로 용량 추정과 효율적인 교통운영 및 관리에 기여할 수 있다.

핵심어 : 도로 용량, 중차량, 편도 2차로, 공사구간, 고속도로

ABSTRACT

The objective of this study is to estimate traffic capacity based on the heavy-vehicle ratio in a two-lane freeway work zone where one lane is blocked by construction. For this, closed circuit television (CCTV) video data of the freeway work zone was collected, and the congestion at an upstream point was observed. The traffic volume at a downstream point was analyzed after a bottleneck was created by the blockage due to the upstream congestion. A distribution model was estimated using observed-time headway, and the road capacity was analyzed using a goodness-of-fit test. Through this process, the general capacity and an equation for capacity based on the

heavy-vehicle ratio passing through the work zone were presented. Capacity was estimated to be 1,181~1,422 passenger cars per hour per lane (pcphpl) at Yeongdong, and 1,475~1,589pcphpl at Jungbu Naeryuk. As the ratio of heavy vehicles increased, capacity gradually decreased. These findings can contribute to the proper capacity estimation and efficient traffic operation and management for two-lane freeway work zones that block one lane due to a work zone.

Key words : Road capacity, Heavy vehicle, Two-lane, Work zone, Freeway

I. 서 론

국내 최초의 고속도로인 경인고속도로가 1968년 12월에 준공된 이후, 주요 거점을 잇는 대다수의 고속도로가 1970~1980년대에 건설되어 시간이 경과함에 따라 시설 노후화로 인한 유지보수의 필요성이 제기되어 왔다. 최근 이러한 인프라 관리의 필요성이 증가함에 따라 고속도로 내 도로점용공사가 빈번하게 진행되고 있다.

Korean Society of Transportation(2013)에서는 도로점용공사를 ‘고속도로의 각종 유지보수 활동에 따라 본선의 차로를 하나 이상 점유하고 공사를 시행하는 것’ 이라고 정의한다. 도로의 공사는 고속도로 운영 조건의 변화를 일으키는 대표적인 상황이다. 특히, 차로차단 공사는 해당 구간을 통행하는 대부분의 운전자가 예상하지 못했던 갑작스러운 병목구간을 형성하여 차량의 불가피한 합류를 유도하고 합류를 위한 급격한 감속과 같은 통행 상황의 변화를 야기한다. 결과적으로 고속도로에서 시행되는 도로점용공사는 국부적인 지점의 현저한 용량 감소를 야기하고 공사구간 상류부에 차량 혼잡을 유발한다.

Road Statistics and Maintenance Information System(2017)에 따르면 개통된 국내 고속도로의 약 75%가 편도 2차로 고속도로로 운영되고 있어 전체 고속도로 중 가장 큰 비율을 차지하고 있다. 편도 2차로 고속도로는 공사로 인하여 1개 차로가 차단될 때 남은 1개 차로로 모든 차량이 주행해야 하기 때문에 주행능력이 떨어지는 차량이 통과하는 경우 도로 운영에 장애를 가져올 수 있다. 또한 교통류에 포함되는 중차량은 차량의 크기가 승용차보다 커서 긴 도로 공간을 차지하고, 차량 운행 능력 측면에서 승용차보다 떨어진다. 이와 같은 원인으로 중차량이 공사구간 교통류에 많이 포함되게 되면 본선 내 전체 차량들의 주행 속도를 감소시키고 차량 간 간격을 증가시켜 일반차량에 비해 큰 용량 감소를 가져올 수 있다.

이렇듯 고속도로 공사구간에서 발생하는 문제를 파악하기 위해 중차량의 영향을 고려한 도로 용량 산정과 이에 따른 체계적인 대책 수립이 필요하다. 본 연구에서는 국내 고속도로의 대부분을 차지하는 편도 2차로 고속도로에서 중차량 비가 증가함에 따른 공사구간의 도로 용량을 산정하였다. 고속도로의 가장 기초적인 운영상태 진단에 활용되는 변수인 도로 용량의 산정을 통해 공사 시 필요한 조치 수립을 위한 근거를 마련하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 1장에서는 연구 배경 및 목적을 설명한다. 2장에서는 국내외 문헌 고찰을 통한 도로 용량의 정의와 공사구간 용량 측정 방법 및 기존 연구에서 산정된 용량 값을 비교해본다. 3장에서는 자료 수집 구간 및 분석 자료의 특성을 설명하며, 4장에서는 도로 용량 산정을 위한 확률분포 추정 모형을 제시하고, 중차량 비에 따른 도로 용량 값과 추정식을 제시한다. 5장에서는 본 연구 결과를 요약하고 연구의 시사점을 제시한다.

II. 선행연구 고찰

1. 도로 용량 정의에 관한 고찰

도로 용량은 교통운영관리의 기본적인 변수로서 다양한 국내외 문헌들에 의해 정의되고 있다. Doh(2013)는 도로 용량을 ‘도로 또는 차로의 균일 구간이나 지점을 통과할 수 있는 최대 시간 교통량’으로 정의했고, Korean Society of Transportation(2013)은 ‘도로의 한 지점 또는 일정 구간을 일정 시간에 통과할 수 있는 최대 차량의 수’로 정의했다. 국외의 경우 Transportation Research Board(2000)에서는 ‘특정 기간 동안 일반적인 도로, 교통 및 제어 조건 하에서 주어진 지점을 통과할 수 있는 최대 차량의 수’로 정의하고 있다. May(1990)와 Daganzo(1997)는 각각 ‘최대 교통류율(Flow rate is maximum)’ 와 ‘최대 통과가능 교통류(Maximum possible flow)’ 로 도로 용량을 정의하였다. 도로 용량을 정의함에 있어 국내외 문헌고찰을 통해 확인한 가장 중요한 개념은 ‘최대 지속 교통량’이다. 따라서 본 연구에서는 도로 용량을 ‘링크를 통과할 수 있는 최대 지속 교통량’으로 정의한다.

2. 공사구간 도로 용량 측정 방법에 관한 고찰

고속도로 공사구간에서 교통류 이동 형태는 대기행렬을 발생시켜 교통와해를 가져오며, 이는 실질적인 교통 운영에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 공사구간의 교통류 상태에 따라 적절한 도로 용량의 측정 방법을 선택하여 적용하는 것이 필요하다. 기본적인 방법으로 Transportation Research Board(2000)과 Seol et al.(1999)은 분석 구간 내 임의의 위치에서 측정된 15분 동안의 관측 교통량 중 최대값을 1시간 단위로 환산하여 도로 용량으로 정의하는 단순 최대 교통류율 측정 방법을 제안했다. 이 방법은 교통량의 측정 위치와 시간에 관계없이 공사구간 범위 내 어느 위치에서나 측정이 가능하다. 하지만 관측한 시간에 따라 최대 도착 교통량이 큰 차이가 나타나기 때문에 관측된 값이 실제 도로 용량에 도달하지 않은 상태일 가능성이 존재한다(Kim et al., 2003). 특히, 편도 2차로의 도로 공사구간에서 측정하는 교통량은 상류부 병목구간 시점, 병목구간 중간 지점, 하류부 병목구간 종점 등 측정 위치에 따라 교통 상황이 다르기 때문에 추정 용량 값에 큰 차이가 발생할 수 있다. 따라서 측정된 도착 교통량보다 도로 용량이 지나치게 커지거나 작아질 가능성이 있기 때문에 본 연구의 용량 측정 방법으로 적용하기에는 한계가 있다.

Hall and Agyemang-Duah(1991)에서는 분석 구간 내 임의의 위치에서 교통기본도(Fundamental diagram)를 추정 한 후 임계 밀도에서 교통량을 측정하는 방법을 제시하였다. 교통기본도를 활용한 도로 용량 측정의 경우 관측 기간동안 상류부 병목구간에서 제약된 교통흐름으로 인해 용량 상태에 도달하지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 또한 하류부에서는 임계 밀도 이하의 자유속도를 가진 교통류만 관찰될 수 있기 때문에 용량 지점을 확인하기 어려울 수 있다. 따라서 공사구간과 같은 교통와해 구간에서는 정확한 교통기본도 추정에 어려움이 있으며, 임계 밀도에 도달하지 않은 용량 값을 측정하게 될 가능성이 있기 때문에 도로 용량 추정에 어려움을 가진다.

교통와해(Breakdown) 시 도로 용량을 측정하기 위해서는 병목구간을 통과한 하류부 지점에서 용량 감소(Capacity drop) 이후 관찰되는 최대 지속 교통량을 측정하는 방법이 효과적이다. 상류부에서 교통량을 측정하는 경우 초기 대기행렬 발생 시점에서 측정 위치까지 대기행렬의 도착 시간을 추정하고, 충격파의 전달 속도를 고려하여 교통 수요를 측정해야 하므로 도로 용량 산정의 정확도가 떨어질 수 있다. 따라서 교통와해 시 도로 용량은 용량 부족으로 인한 정체 전이(Spill-back) 현상이 없는 하류부에서 측정되어야 한다.

이에 본 연구에서는 공사구간의 정확한 도로 용량을 추정하기 위해 차료가 감소하는 병목구간에서 상류부 정체 및 하류부 자유속도를 관찰한 후에 하류부에서 측정된 최대 지속 교통량을 활용하고자 한다.

3. 공사구간 도로 용량 산정 값에 관한 고찰

공사 시에는 공사구간의 위치 및 유형에 따라 일부 차로 수 감소, 차로변경 유도로 인한 주행행태 변화, 공사구간 내 낮은 제한속도 등 기존 주행에 비해 일부 제약이 발생하여, 이상적인 도로 상황일 때와는 다른 도로 용량 값이 산정될 수 있다. 기존에 수행된 공사구간 도로 용량에 관한 연구는 주로 실제 관측이나 시뮬레이션을 통하여 용량 값을 추정하였다.

Korean Society of Transportation(2013)은 공사구간의 도로 및 교통상황에서 15분 동안 통과할 수 있는 승용차 교통량을 1시간 단위로 환산하여 설계속도별로 제시하고 있다. 고속도로 공사구간의 기본 도로 용량은 설계속도가 80km/h인 도로에서 1,650pcphpl, 100km/h 도로에서 1,700pcphpl, 120km/h 도로에서 1,750pcphpl이며, 설계속도가 증가함에 따라 조금씩 증가한다. 제시된 도로 용량 값은 모든 차로 감소 유형에 대해 동일하게 적용하였다. Kim and Lee(1998)는 교통량 수집기인 NC-90A를 활용하여 본선 차로가 2차로에서 1차로로 감소하는 구간에 대해 차종별 교통량과 속도를 관측하였다. 최대 교통량 추정을 위해 Greenshields 모형과 Greenberg 모형을 활용하였으며, 구간의 도로 용량 값은 1,500pcphpl로 나타났다. Lim et al.(2002)은 시뮬레이션 모형의 일종인 FRESIM을 사용하여 고속도로 편도 2차로 중 1개 차로를 일부 구간 점유했을 때의 도로 용량을 추정하였다. 시뮬레이션 시 속도, 교통량을 각각 100km/h, 200~2,000pcphpl로 설정하고, 공사구간을 통과하는 차량의 분포를 균일분포(Uniform distribution)로 가정하였다. 도로 용량 추정에는 Underwood 모형을 활용하였으며, 추정된 도로 용량 값은 1,719pcphpl로 나타났다. Park and Kim(2011)은 비디오 카메라를 이용하여 공사구간 시종점에서 오전, 오후 시간 대로 나누어 차종별 교통량을 관측하고, 차두간격 및 속도의 평균을 분석하였다. 집계된 자료에 Greenberg 모형을 이용하여 승용차 환산계수가 적용된 전체 모형을 도출하였으며, 편도 2차로 공사구간의 도로 용량은 1,800pcphpl로 산정되었다. Lee et al.(2013)은 공사를 수행한 75분 동안의 영상 자료를 활용하여 15분 단위 평균 최대 관측 교통류를 분석 및 시뮬레이션 프로그램인 PARAMICS를 통해 도로 용량을 추정하였다. 편도 2차로 공사구간에서 추정된 도로 용량은 1,591pcphpl로 나타났다. Kim(2018)은 비디오 카메라를 통해 촬영한 1시간 자료를 활용하여 공사 시종점 및 가운데 지점을 통과한 차량의 차두간격을 취득하였다. 차두간격 기반 h-n 방법을 활용하여 편도 2차로 공사구간에서 1,286~1,387pbphpl의 용량을 산정하였다.

국외의 경우 Dudek(1984)는 공사 작업 종류에 따라 도로 용량을 추정하였으며, 그 중 본 연구의 범위인 2개 차로 중 1개 차로로 차단한 공사구간의 도로 용량을 1,100~1,500pcphpl 사이로 추정하였다. 이 연구는 Transportation Research Board(2000)에서 제시하는 공사구간 도로 용량 값의 기반이 되었다. Maze et al.(2000)은 비디오 촬영을 통해 편도 2차로 공사구간에서 상·하류부의 교통량을 관측하였으며, 대기행렬 전후의 가장 높은 10개 교통량의 평균을 활용하여 공사구간 도로 용량을 약 1,400~1,600pcphpl 사이로 추정하였다.

4. 선행연구와의 차별성

국내외 문헌 고찰 결과, 편도 2차로 공사구간의 도로 용량은 공사에 따른 영향 요인들로 인해 일반적인 고속도로의 도로 용량보다 약 20% 정도 낮게 추정되었다. 또한 국외 연구에서 추정된 도로 용량이 국내 연구의 추정 도로 용량보다 대체적으로 낮은 경향을 보였다. 공사구간 도로 용량 추정에 관한 여러 연구들이 오래 전부터 수행되어 왔으나 대다수의 연구가 중차량을 고려하지 않고, 지점별 관측 자료를 활용하여 분포 모형을 추정하여 도로 용량을 산정하는 방법을 사용하였다. 이는 교통류에 따른 공사구간의 특성을 반영하기 어렵고, 많은 관측 데이터를 필요로 하기 때문에 일반화된 도로 용량 산정이 어렵다는 한계가 있다. 또한 차로차단 공사의 특성상 주로 차량의 이동이 적은 새벽이나 야간 시간 대에 수행되거나, 단 시간에 작업이

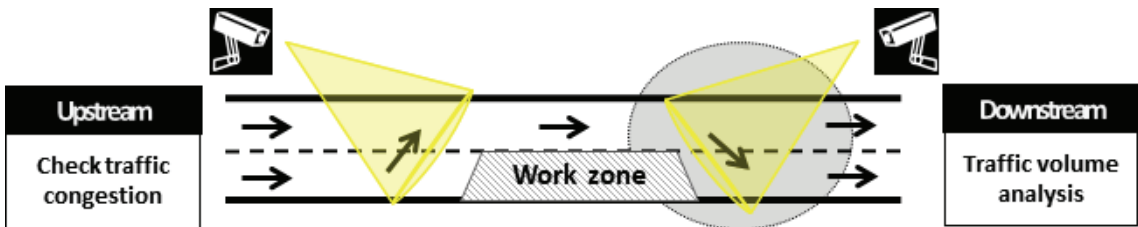
완료되므로 영상 자료 수집이 어려웠다(Kim and Lee, 1998; Lee et al., 2013). 따라서 본 연구에서는 기존 연구의 자료 수집에 대한 한계점을 극복하고 일반화된 도로 용량을 추정하기 위하여 실제 수집된 자료를 기반으로 다수의 난수를 발생시켜 적합한 분포모형을 산정하고, 중차량 비에 따른 도로 용량 변화를 분석한다.

Ⅲ. 분석구간 및 자료수집

1. 분석구간 선정

본 연구에서 조사자료 수집은 전국 고속도로 내 지점 중에서 다음의 전제조건을 만족하는 구간으로 선택하였다.

- 1) 각종 유지보수 활동에 따라 편도 2차로 중 1개 차로를 점유하고 공사를 시행하는 구간
- 2) 자료 수집 시간 동안 공사구간 내 1개 차로 차단 상태가 지속되는 구간
- 3) 공사구간 시점부인 상류부에서 병목구간(Bottleneck)으로 인한 교통정체가 발생하고, 공사구간 종점부인 하류부에서 교통와해로 인한 정체 현상 없이 차량이 자유속도로 주행하는 구간
- 4) 2% 미만의 짧은 종단경사 구간



<Fig. 1> Data collection section on work zone

위의 조건을 만족하는 편도 2차로 도로인 영동고속도로와 중부내륙고속도로에서 자료를 수집하였다. 관측 지점은 영동고속도로 인천 방향 면은 IC(175.8K)에서 둔내 IC(168.8K) 사이 약 7.0km 구간과 중부내륙고속도로 창원 방향 충주 JC(234.7K)에서 충주 IC(226.4K) 사이 약 8.3km 구간이다. 중차량이 기하구조에 큰 영향을 받지 않고 승용차와 비슷하게 주행할 수 있는 조건에서 조사자료를 수집하기 위해 Korean Society of Transportation(2013) 상에서 평지조건으로 분류되는 2% 미만의 짧은 경사구간을 전제조건으로 하였다. 위 수집 구간에서 실 분석지점인 영동고속도로 169.8K 구간의 종단경사는 0%, 중부내륙고속도로 226.4K 지점의 종단경사는 0.5%이다.

도로 용량의 분석은 비디오 영상자료를 기반으로 하였으며, 자료를 수집하는 데 적절한 침투 시간대를 선정하기 위해 CCTV 영상자료를 활용하여 사전 교통량 조사를 수행하였다. 최종적으로 조사자료를 수집한 일시는 영동고속도로 구간의 경우 2017년 5월 25일 17:10~18:10이며, 중부내륙고속도로는 2017년 7월 18일 17:00~18:00이다. 영상자료는 공사구간 시점부인 상류부와 종점부인 하류부에서 각각 취득하였다. 상류부 영상은 교통정체로 인한 병목구간을 판단하는데 사용하였고, 하류부 영상은 실제 분석에 활용되었다. 영상을 통해 추출된 교통분석 정보는 차종별 차두간격, 차종별 교통량, 개별 차량의 통과시간이다.

2. 조사자료 특성

고속도로 공사구간 하류부에서 조사된 차량들의 1시간 자료를 활용하여 공사구간 통과차량의 특성 분석을 수행하였다. 수집된 자료의 차종은 Korean Society of Transportation(2013)과 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2008)의 승용차 및 중차량 분류 기준에 기반하여 분류하였다. 본 연구에서 차량 분류 기준으로 활용한 차량의 축 수, 단위 및 제원을 포함한 세부적인 기준은 <Table 1>에서 제시하였다. 국내 고속도로에서 차종의 구분은 아래와 같으며, 일반적인 도로 조건에서 주행하는 승용차 및 중차량의 속성은 유사하다.

<Table 1> Classification of vehicle type

Vehicle Classification	Specification		Definition
	Number of Axes	Number of Units	
Passenger Car	2	1	Passenger Cars less than 16 Passengers
Heavy Vehicle	2	1	Buses more than 16 Passengers
	2	1	Small Trucks less than 8.5 tons
	3~5	1	3~5-axis Heavy Truck
	4~6	2	4~6-axes Semi-Trailer
	4~6	2	4~6-axes Full-Trailer

편도 2차로로 주행하는 공사구간 내에서는 한 차량이 통과한 이후 다음 차량이 통과할 때까지 시간 간격이 긴 경우에 과하게 긴 차두간격이 관찰될 수 있으며, 이 경우 공사구간의 추정 도로 용량을 과하게 감소시켜 부적절한 용량을 추정할 수 있다. 따라서 조사된 자료의 이상점(Outlier)을 제거하기 위해 95% 신뢰구간을 사용하였다(Chang and Kim, 2000).

<Table 2> Characteristics of aggregated traffic data

Freeway	Classification	Car -Car	Car -Heavy Vehicle	Heavy Vehicle -Car	Heavy Vehicle -Heavy Vehicle
Yeongdong	Number of Sample	496	184	184	78
	Average Headway(s)	2.56	4.16	3.20	5.20
	Standard Deviation	2.26	5.53	3.19	5.80
Jungbu Naeryuk	Number of Sample	372	250	250	148
	Average Headway(s)	2.23	2.98	2.94	3.19
	Standard Deviation	3.27	4.05	6.16	3.40

<Table 2>와 같이 관찰 시간 동안 영동고속도로에서 총 942대가 관찰되어 선·후행 차량이 승용차-승용차, 승용차-중차량, 중차량-승용차, 중차량-중차량으로 구성된 비율이 각각 53%, 20%, 20%, 8%로 분석되었다. 중부내륙고속도로의 경우 총 1,020대의 차량이 1시간 동안 관찰되었고, 차종별 구성 비율은 각각 36.5%, 24.5%, 24.5%, 14.5%로 분석되었다. 평균 차두간격 분석 결과, 두 고속도로 모두 중차량-중차량 간 차두간격이 가장 길었고, 승용차-중차량, 중차량-승용차, 승용차-승용차 간 차두간격 순으로 차두간격이 짧아지는 것을 확인하였다. 이는 중차량 주행 시 일반차량에 비해 더 긴 차두간격을 가지기 때문에 차로차단 공사를 시행하는 편도 2차로 고속도로 내에서 중차량의 주행이 전체 차량의 주행에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

IV. 중차량 비에 따른 도로 용량 추정

1. 분석 방법론

영상자료에서 취득한 차두간격 자료를 활용하여 중차량 비에 따른 도로 용량 추정을 수행하였다. 용량 추정을 위해 1) 차두간격 확률분포 모형 추정 및 유의수준 분석을 통한 정규성 검증, 2) 무작위 추출(Random sampling) 기반 차두간격 자료를 활용한 중차량 비에 따른 도로 용량 추정 절차로 나누어 순차적인 분석을 실시하였다.

1) 차두간격 분포 모형

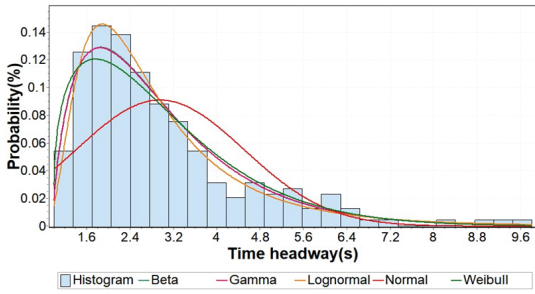
공사구간에서 측정된 차두간격은 공사구간의 도로 용량을 추정할 수 있는 효과적인 변수로서, Equation 1 과 같이 평균차두간격은 평균용량 값과 역수 관계가 성립한다. Equation 1을 활용한 분석의 경우 도로 용량의 평균값 도출은 가능하나 용량 추정에 있어 중차량의 영향을 효과적으로 반영하기 어렵다.

$$\bar{q} = \frac{3600}{\bar{h}} \dots\dots\dots (1)$$

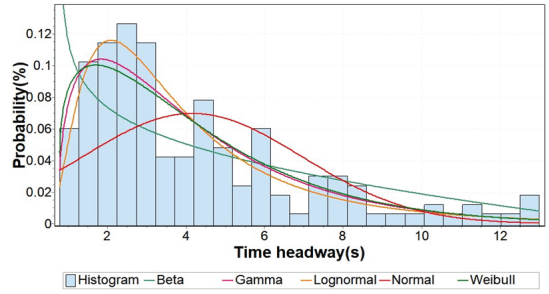
여기서,
 \bar{q} = Average Road Capacity
 \bar{h} = Average Headway

따라서 승용차와 중차량의 주행위치에 따라 차종조합을 나누어 차두간격을 추출하고 각각의 확률분포를 추정하는 방법을 활용하여 중차량의 주행이 공사구간에 미치는 영향을 판단하고자 하였다. 또한 도출된 확률분포 추정 결과는 중차량 비에 따른 도로 용량 추정 및 용량 추정식 산정 과정에 활용하였다. 차종조합 별 차두간격은 승용차와 중차량 사이 총 네 가지 경우(승용차-승용차, 승용차-중차량, 중차량-승용차, 중차량-중차량)에서 각각 추출하였다. 그리고 네 가지의 차두간격 확률분포를 그래프화한 분포 적합도 판단(Distribution fitting)을 통해 각 차종 조합에서 유의미한 확률분포를 추정하였다.

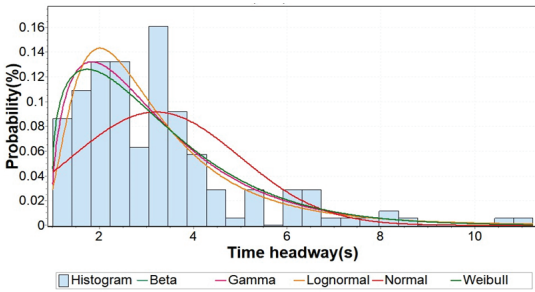
<Fig. 2-9>와 <Table 3>는 각 차종별 조합에서 확률분포 추정 결과를 보여준다. 분석 결과, 영동고속도로의 경우 네 가지 차종 조합에서 로그 정규 분포(Lognormal distribution)가 가장 적합한 분포로 선정되었다. 중부내륙고속도로의 경우 중차량-중차량 간 차두간격은 와이블 분포(Weibull distribution), 나머지 차종 조합에서는 감마 분포(Gamma distribution)가 가장 적합한 분포로 선정되었다. 또한 추정된 분포모형과 이론적인 분포모형 사이의 적합성 검정(Goodness-of-fit test)을 위해 Kolmogorov-Smirnov 검정을 사용한 유의수준과 정규성 분석을 수행하였다. Kolmogorov-Smirnov 검정은 표본 데이터의 경험적 분포함수(Empirical distribution function)와 누적분포함수(Cumulative distribution function) 사이의 최대거리를 통계적으로 정량화하여 가설 검정하는 방법이다. 이 방법은 경험적 분포함수로 추정되고, 실제 분포와 추정 모형 사이 함수의 위치와 모양 차이에 민감하게 반응하기 때문에 두 표본을 비교하는 데 있어 유용하게 사용된다. 비교분석을 위해 귀무가설은 추정된 분포모형과 이론적인 분포모형이 차이가 없다고 설정하였고, 유의수준은 0.05로 설정하였다. 분석 결과, p-value가 0.05보다 크게 도출되어 귀무가설을 기각할 수 없다. 따라서 추정된 분포모형과 이론적인 분포모형은 유사하다고 할 수 있다.



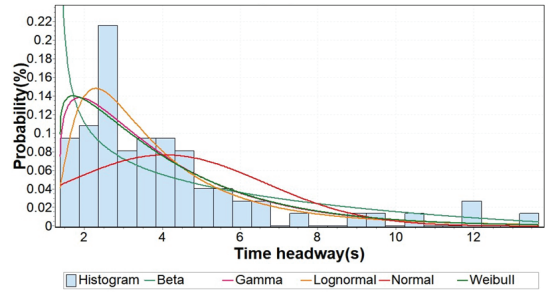
<Fig. 2> Estimation of probability distribution model of Yeongdong (C-C)



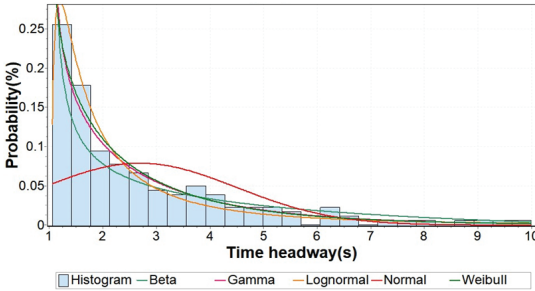
<Fig. 3> Estimation of probability distribution model of Yeongdong (C-H)



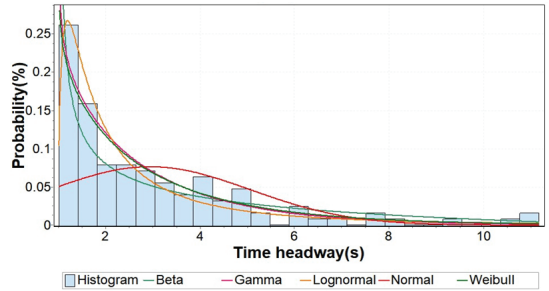
<Fig. 4> Estimation of probability distribution model of Yeongdong (H-C)



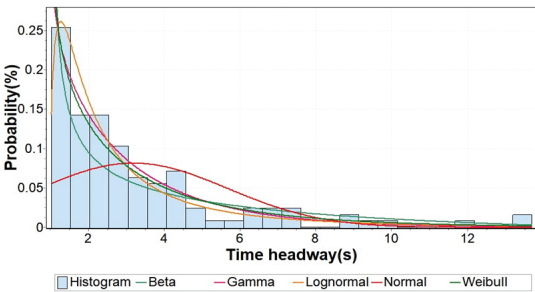
<Fig. 5> Estimation of probability distribution model of Yeongdong (H-H)



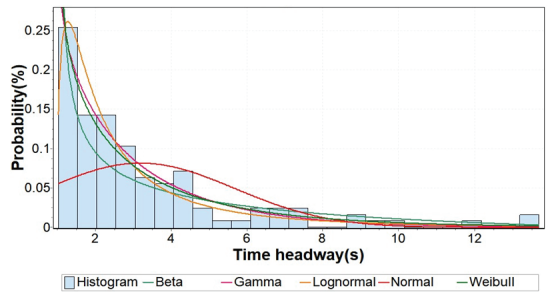
<Fig. 6> Estimation of probability distribution model of Jungbu Naeryuk (C-C)



<Fig. 7> Estimation of probability distribution model of Jungbu Naeryuk (C-H)



<Fig. 8> Estimation of probability distribution model of Jungbu Naeryuk (H-C)



<Fig. 9> Estimation of probability distribution model of Jungbu Naeryuk (H-H)

<Table 3> Goodness-of-fit test of estimation result

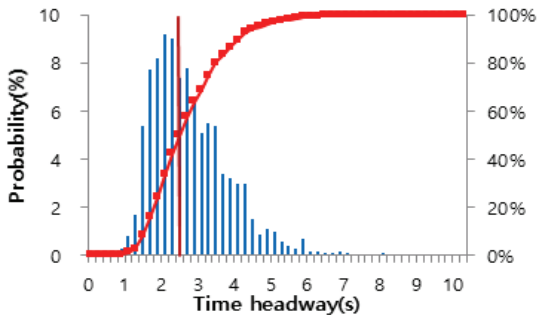
Freeway	Kolmogorov -Smirnov	Car -Car	Car -Heavy Vehicle	Heavy Vehicle -Car	Heavy Vehicle -Heavy Vehicle
Yeongdong	Test Statistic	0.026	0.053	0.045	0.052
	p-value	0.891	0.703	0.857	0.981
	Probability Distribution	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal
Jungbu Naeryuk	Test Statistic	0.038	0.060	0.043	0.056
	p-value	0.946	0.731	0.965	0.922
	Probability Distribution	Gamma	Gamma	Gamma	Weibull

2) 중차량 비에 따른 도로 용량 추정

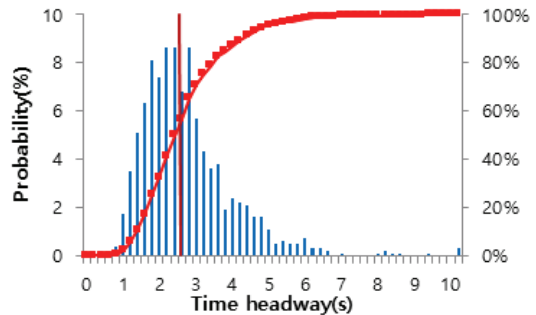
중차량 영향에 따른 도로 용량을 비교하기 위해 기존 데이터에서 추정된 차두간격 분포모형과 차종 조합별 차두간격의 평균 및 분산을 활용하여 각 조합별 무작위 추출 기반으로 난수를 생성하였다. 총 1,000대 차량의 차두간격을 표본으로 선정하고 0~40%까지 중차량 비를 10%씩 증가시켜가며 중차량의 영향에 따른 차두간격의 변화를 분석하였다. 이 방법을 통해 공사구간 내에 중차량이 존재하지 않는 상황부터 중차량이 포화상태에 이르는 상황까지 순차적으로 분석할 수 있다.

<Fig. 10~19>는 무작위 추출 기반으로 난수를 생성하여 발생된 중차량 비에 따른 차두간격 변화에 대한 시뮬레이션 결과이다. 분석 결과, <Fig. 10~19>과 같이 영동고속도로와 중부내륙고속도로에서 중차량 비가 10%씩 증가함에 따라 평균 차두간격이 약 1.3~6.3%까지 증가하는 것으로 분석되었다. 이에 따라 편도 2차로 공사구간 내 중차량 통행 비율의 증가가 도로 용량 감소에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

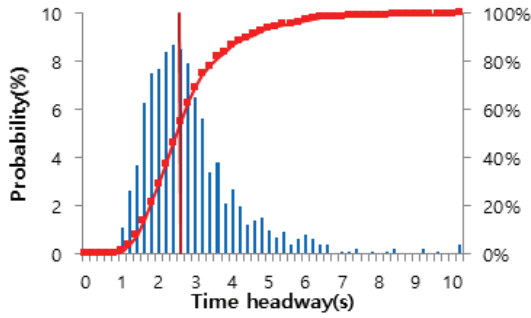
중차량 비에 따른 평균 차두간격을 이용해서 용량 추정식 도출이 가능하다. 차두간격 분포모형에 기반하여 중차량 비에 따라 산출된 차두간격의 평균 값이 산출되며, 최종 도로 용량 값은 차두간격의 역수로 계산된다. 분석 결과, 영동고속도로의 경우 도로 용량은 1,181~1,422pcphpl로 산정되었고, 중부내륙고속도로의 경우 1,475~1,589pcphpl로 산정되었다. 영동고속도로와 중부내륙고속도로의 도로 용량 값이 차이가 나는 이유는 두 구간의 최고 제한속도가 각각 100km/h, 110km/h로 다르게 설정되어 있기 때문으로 판단된다. 특히, 중차량 비가 30% 이상으로 증가되었을 때 도로 용량은 기존 감소율 대비 약 1~2% 정도의 더 큰 감소율을 보였다. 이는 중차량-중차량 간 차두간격이 승용차-승용차 간 차두간격보다 크고 중차량 비가 일정 수준 이상으로 증가하게 되면, 중차량 통과 이후 다음 통과 차량이 중차량이 될 가능성이 증가하기 때문에 용량 감소 현상이 심화되는 것으로 판단된다.



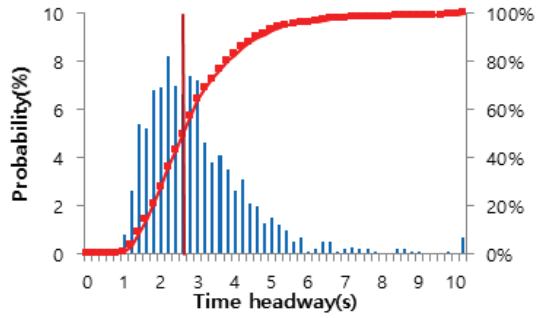
<Fig. 10> Headway distribution - Yeongdong (0%)



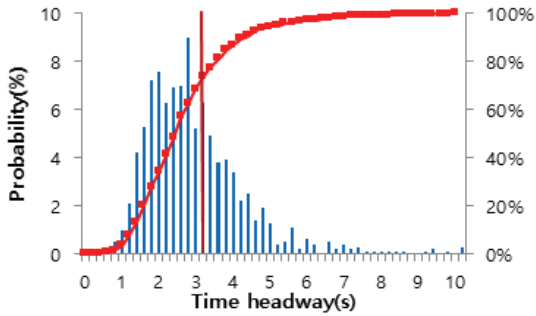
<Fig. 11> Headway distribution - Yeongdong (10%)



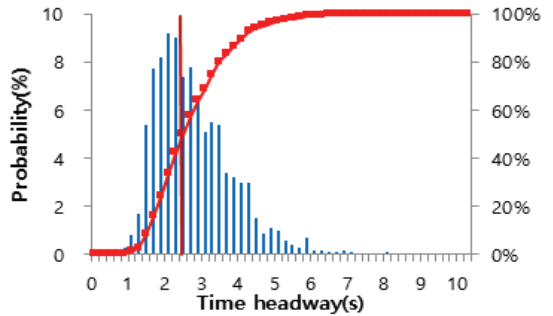
<Fig. 12> Headway distribution - Yeongdong (20%)



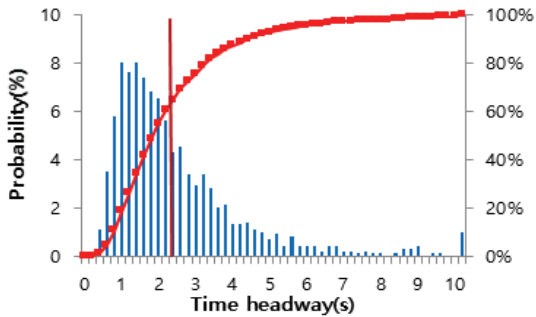
<Fig. 13> Headway distribution - Yeongdong (30%)



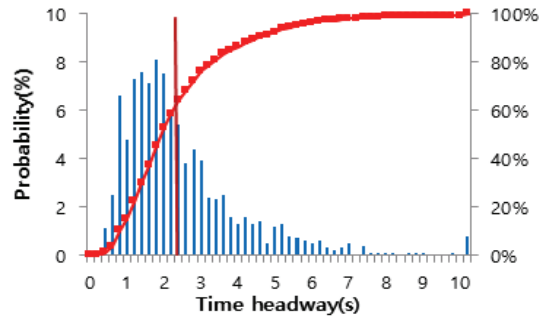
<Fig. 14> Headway distribution - Yeongdong (40%)



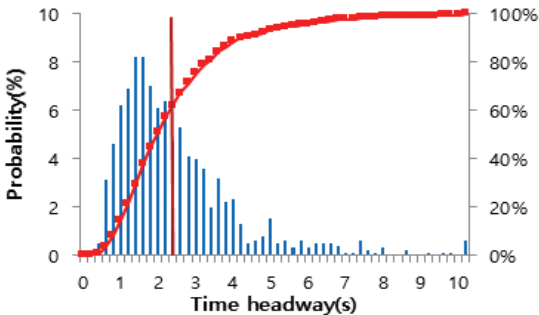
<Fig. 15> Headway distribution - Jungbu Naeryuk (0%)



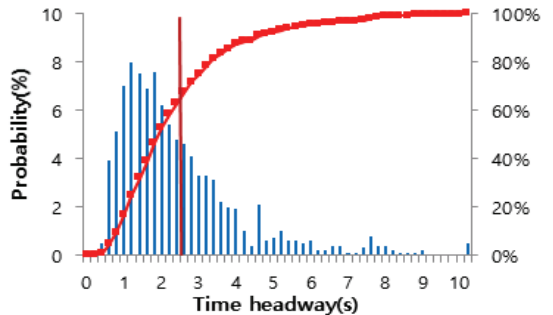
<Fig. 16> Headway distribution - Jungbu Naeryuk (10%)



<Fig. 17> Headway distribution - Jungbu Naeryuk (20%)



<Fig. 18> Headway distribution - Jungbu Naeryuk (30%)

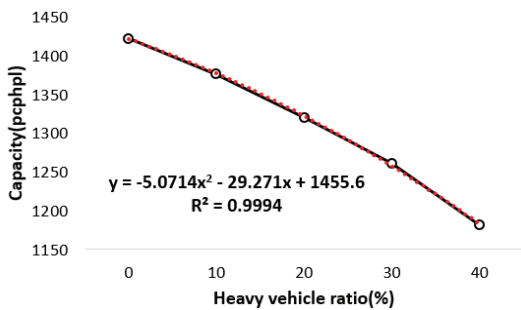


<Fig. 19> Headway distribution - Jungbu Naeryuk (40%)

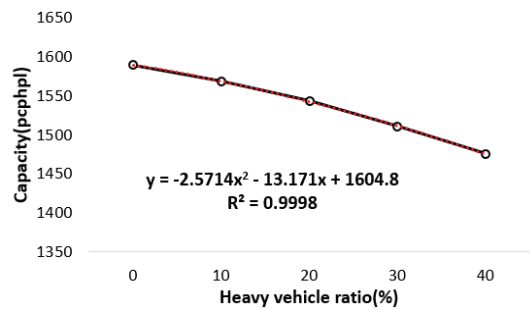
<Table 4> Work zone capacity by heavy vehicle ratio

Freeway	Heavy Vehicle Ratio(%)	Car Ratio(%)	Headway(s)	Capacity(pchphpl)
Yeongdong	0	100	2.53	1,422
	10	90	2.62	1,376
	20	80	2.73	1,320
	30	70	2.85	1,261
	40	60	3.05	1,181
Jungbu Naeryuk	0	100	2.27	1,589
	10	90	2.30	1,566
	20	80	2.33	1,543
	30	70	2.38	1,510
	40	60	2.44	1,475

산정된 용량과 중차량 비 간의 관계 그래프를 통해 편도 2차로 공사구간 내 도로 용량 추정식이 <Fig. 20, 21>과 Equation 2, 3에서 제시되었다. 제시된 결과에서 편도 2차로 차로차단 공사를 수행하는 고속도로 공사구간 내에서는 중차량 비가 증가함에 따라 도로 용량은 더 크게 감소되는 것으로 산출되었다.



<Fig. 20> Estimation of capacity equation - Yeongdong



<Fig. 21> Estimation of capacity equation - Jungbu Naeryuk

$$y = -5.0714x^2 - 29.271x + 1455.6 \dots\dots\dots (2)$$

$$y = -2.5714x^2 - 13.171x + 1604.8 \dots\dots\dots (3)$$

<Table 5> Significance test of estimated road capacity

Freeway	Multiple Correlation	Coefficient of Determination	Standard Error	f-value	p-value
Yeongdong	0.9994	0.9894	11.27	0.0004	0.0004
Jungbu Naeryuk	0.9998	0.9886	5.61	0.0005	0.0005

마지막으로 추정식에 대한 추가적인 신뢰성 검증을 위해 <Table 5>와 같이 신뢰수준 95%에 대한 유의성 검정을 수행하였다. f-검정을 통해 본 추정식의 적합성을 검정하고, t-검정을 통해 개별 변수의 영향을 판단하였다. 분석 결과, 두 고속도로의 용량 추정식에서 f-value와 p-value가 모두 0.05보다 작게 도출되었고, 1에 가까운 높은 결정계수를 가지므로 추정된 식은 유의미하다고 할 수 있다.

V. 결 론

국내 고속도로 중 70% 이상을 차지하는 편도 2차로 고속도로의 경우, 노후화에 따른 유지보수를 위해 지속적인 도로점용공사가 진행되고 있다. 보수공사가 증가함에 따라 공사구간 내 차량의 효율적인 운영 관리가 요구되고 있다. 따라서, 본 연구는 편도 2차로 고속도로에서 차로차단 공사를 수행하는 경우에 교통 운영 관리의 효율성을 높이고 체계적인 관리 전략 마련에 기여하기 위한 방안으로 중차량 비에 따라 적합한 도로 용량과 용량 추정식을 제시하였다. 기존 국내외 문헌 검토 결과, 차로 차단 공사구간의 도로 용량 추정에 관한 연구가 부족하여 공사 시 효율적인 교통운영을 위한 적절한 용량 값을 제시하기 어려웠다. 특히, 공사구간 내에서 중차량 통행과 도로 용량 간의 상관성을 분석한 연구가 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 차종 분류를 통하여 중차량의 영향을 고려하고 각각의 경우에서 공사구간의 적정 용량 값을 도출했다는 데 의의가 있다.

본 연구에서 도출한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서는 공사구간의 도로 용량을 정확하게 측정하는 방법을 제안하였다. 공사구간에서는 교통와해 현상이 자주 발생하기 때문에 교통와해 시 도로 용량 측정을 위해 상류부 정체를 보이는 병목구간을 확인하고, 하류부 지점에서 자유속도를 가지는 최대 지속 교통량을 측정하는 방법을 제안하였다. 본 연구의 측정 방법은 상류부의 대기행렬 도착 시간을 추정하거나, 충격파의 전달 속도 등을 계산할 필요가 없기 때문에 불필요한 계산 과정을 줄이고 도로 용량 산정의 정확도를 높일 수 있다. 또한 하류부 관측의 경우 교통와해 시 용량 부족으로 인한 정체 전이 현상이 관찰되지 않아 효과적인 측정이 가능하다는 장점이 있다. 둘째, 중차량 비에 따라 영동고속도로의 도로 용량은 1,181~1,422pcphpl, 중부고속도로는 1,475~1,589pcphpl로 추정되었으며, 공사구간 내 중차량의 통행이 증가할수록 도로 용량 감소폭이 커지는 것을 확인하였다. 중차량 비가 30%를 넘게 되면 기존 감소율 대비 도로 용량이 더 급격하게 감소하였다. 이는 중차량 비가 증가하게 되면 도로 내에서 중차량 통과 이후 다음 중차량이 통과하게 될 확률이 커지기 때문으로 설명되며, 이 상태에서 중차량 비율이 포화 상태에 거의 도달했다고 판단된다. 셋째, 공사구간 내 중차량이 존재하지 않을 때, 영동고속도로의 도로 용량은 1,422pcphpl, 중부내륙고속도로는 1,589pcphpl로 각각 다르게 분석되었다. 초기 용량 값에 차이가 발생하는 이유는 영동고속도로와 중부내륙고속도로의 최고 제한 속도가 각각 100km/h, 110km/h로 다르게 설정되어 있기 때문으로 판단된다. 두 고속도로의 속도 차이로 인하여 초기 값의 차이가 발생하며, 차로 차단 공사 시 남은 1개 차로로 모든 차량이 주행해야 하는 편도 2차로 도로의 특성 상 중차량의 영향에 따라 도로 용량은 더 급격하게 감소하게 된다. 이로 인해 영동고속도로와 중부내륙고속도로에서 중차량 비가 Korean Society of Transportation(2013) 기준 최대 수준인 40%까지 증가할 경우 용량 값의 감소 폭이 다르게 나타날 수 있다.

마지막으로 본 연구는 단기간 조사자료에 기반하여 무작위 추출을 통해 샘플 수를 늘리고 용량을 추정하는 방법론을 제안하였다는 것에 의의가 있으나, 데이터 수집의 한계로 인해 분석 구간이 영동고속도로와 중부내륙고속도로의 차로 차단 공사 구간에 한정되었다는 한계점이 있다. 따라서 추후 연구의 첫 번째로, 고속도로 내 차로 차단 공사를 수행하는 공사구간의 추가적인 표본 수집 및 분석을 통해 공사구간의 도로 용량 값을 산정하는 연구가 수행될 필요가 있다. 두 번째로, 본 연구에서는 기하구조의 특성을 고려하지 않았으나, 중차량의 속도가 일반차량의 속도보다 감소할 수 있는 구간인 종단경사구간을 고려하여 종단경사별 중차량의 영향 분석 연구가 수행될 수 있다. 세 번째로, 속도에 따라 통과 교통량이 달라지므로 고속도로별 제한속도를 고려한 공사구간 용량 추정 연구도 필요할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 한국도로공사 장기 교통통제에 따른 교통관리계획(Ex-TMP) 시스템 개발 연구 용역(2017) 결과를 토대로 작성되었습니다.

REFERENCES

- Chang M. and Kim Y.(2000), "Development of Capacity Estimation Method from Statistical Distribution of Observed Traffic Flow," *Transportation Research Board, Transportation Research Circular*, vol. 18, pp.299-309.
- Daganzo C. F.(1997), *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations*, Elsevier Science Inc, New York.
- Doh C. W.(2013), *Transportation Engineering Theory*, Cheongmungak, pp.209-210.
- Dudek C.(1984), "Notes on Work Zone Capacity and Level of Service," *Transportation Research Board, Transportation Research Record*, no. 869, pp.14-18.
- Hall F. L. and Agyemang-Duah K.(1991), "Freeway Capacity Drop and the Definition of Capacity," *Transportation Research Board, Transportation Research Record*, no. 1320, pp.91-98.
- Kim D. H.(2018), *Analysis of Traffic Flow Characteristics and Estimation of Capacity in Long-Term Two-Lane Freeway Work-Zones*, Keimyung University, p.31.
- Kim D. N. and Lee S. H.(1998), "Traffic Characteristics on Lane Drop Areas around Highway Work Zones," *Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 4, pp.445-452.
- Kim J. S., Hwang Z. H., Rhee S. M. and Park C. H.(2003), "A Study on Dynamic Road Capacity under Variable Traffic Conditions," *Korea Planning Association*, vol. 38, no. 2, pp.145-155.
- Korean Society of Transportation(2013), *Highway Capacity Manual*, Ministry of Construction & Transportation (in Korean), p.18.
- Lee M. R., Kim D. G., Kim H. S. and Lee C. W.(2013), "Capacity of Urban Freeway Work Zone," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 33, no. 3, pp.1123-1130.
- Lim C. M., Lee J. H. and Lee Y. W.(2002), "A Study on the Traffic Flow Characteristic Analysis and Applicability of Work Zones," *KSIA Journal of Korea Society of Industrials Application, The Korea Society of Industrials Application*, vol. 5, no. 4, pp.329-337.
- May A. D.(1990), *Traffic Flow Fundamentals*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Maze T. H.(2000), "Capacity of Freeway Work Zone Lane Closures," *Mid-Continent Transportation Symposium 2000 Proceedings*, pp.178-183.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2008), *Road Traffic Survey Guide*, pp.5-6.
- Park Y. J. and Kim J. S.(2011), "Estimation of Capacity at Two-lane Freeway Work Zone using Traffic Flow Models of Each Vehicle-Type," *Korea Society of Road Engineers*, vol. 13, no. 3, pp.195-202.
- Road Statistics and Maintenance Information System, http://www.rsis.kr/statistics_road_highway_lane.htm. 2017.
- Seol J. H. et al.(1999), *Study on the Improvement of Highway Capacity Manual the Final Report*,

Korea Institute of Construction Technology (in Korean), p.13.

Transportation Research Board(2000), "Highway Capacity Manual 2000," *Transportation Research Board*, p.24.