

## 실험적 용량산정 방법 비교 연구

### Comparing Empirical Methods of Highway Capacity Estimation

문재필 Moon, Jaepil  
조원범 Cho, Won Bum

정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 교신저자 (E-mail: jpmoon@kict.re.kr)  
정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (E-mail: worber@kict.re.kr)

#### ABSTRACT

**PURPOSES :** Capacity is a main factor of determining the number of lane in highway design or the level of service in road on operation. Previous studies showed that breakdown may occur before capacity is reached, and then it was concluded that capacity is a stochastic value rather than a deterministic one. In general, estimating capacity is based on average over maximum traffic volume observed for capacity state. This method includes the empirical distribution method(EDM) and would underestimate capacity. This study estimated existing empirical methods of estimating stochastic highway capacity. Among the studied methods are the product limit method(PLM) and the selected method(SM).

**METHODS :** Speed and volume data were collected at three freeway bottleneck sites in Cheonan-Nonsan and West Sea Freeway. The data were grouped into a free-flow state or capacity state with speeds observed in the bottlenecks and the upstream. The data were applied to the empirical methods.

**RESULTS :** The results show that the PLM and SM estimated capacity higher than EDM. The reason is that while the EDM is based on capacity observations only, the PLM and SM are based on free-flow high volumes and capacity observations.

**CONCLUSIONS :** The PLM and SM using both free-flow and capacity observations would be improved to enhance the reliability of the capacity estimation.

#### Keywords

highway capacity, empirical method, breakdown, stochastic, deterministic

Corresponding Author : Moon, Jaepil, Senior Researcher  
Highway & Transportation Research Division, Korea Institute of  
Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu,  
Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea  
Tel : +82.31.9100.168 Fax : +82.31.9100.373  
E-mail : jpmoon@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ijhe.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (Print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received Sep. 13, 2013 Revised Sep. 23, 2013 Accepted Jan. 27, 2014

#### 1. 서론

한국도로용량편람(2013)에서 도로용량은 “주어진 도로 조건에서 15분 동안 최대로 통과할 수 있는 승용차 교통량을 1시간 단위로 환산한 값이다”라고 정의하였다. 도로용량은 도로의 계획, 설계, 운영상태를 분석하는데 중요한 요소이다. 또한 교통혼잡 발생시기, 지점

및 지속시간을 예측하는 데 필요한 기준이다. 일반적으로 용량은 다양한 도로·교통 조건에서 각 도로종류 별로 하나의 값으로 제시되었다.

국외 연구결과에 의하면, 병목현상은 용량에 도달하기 전에 교통와해가 발생하는 것으로 보여주고 있으며, 같은 도로·교통 수준에서도 혼잡이 발생하거나 혹은 발

생하지 않을 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 용량은 확정(deterministic)된 값이 아니라 기상조건을 포함한 도로·교통 여건에 의해 결정되는 확률적(stochastic) 값으로 볼 수 있다.

일반적으로 도로용량을 산정하기 위한 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 하나는 현장 관측자료를 토대로 용량을 산정하는 실험적 접근방법이 있으며, 다른 하나는 도로용량편람을 이용한 비실험적 접근방법이 있다. 실험적 접근방법은 관측자료의 특성에 따라 세분화된다. 각 차량 간 차두시간 또는 거리를 사용하여 용량을 산정하는 방법, 관측된 최대 교통량만을 가지고 확률 밀도함수를 이용하여 용량을 산정하는 방법, 관측된 속도와 교통량 자료를 이용하여 용량을 평가하는 방법, 수학적 모델을 사용하여 속도-교통량-밀도 관계 곡선을 정립한 후 용량을 산정하는 방법 등이 있다.

Minderhoud 외(1995) 연구에서 각 방법에 대한 장·단점을 평가하였다. 비교·평가에 의하면, 차두시간 분포 접근방법은 도로용량 상태에 도달할 필요 없이 각 차량 별 차두시간 분포를 토대로 용량을 평가할 수 있는 것이 장점이지만, 용량을 과대평가할 수 있다는 것이 단점이다. 확률밀도함수를 이용하는 접근방법(Bimodal Distribution, Selected Maxima Method, Extreme Value Estimation)은 쉽게 적용할 수 있지만, 용량 상태의 관측기간에 따라 가정된 분포형태에 상당한 영향을 미칠 수 있기 때문에 신뢰성 측면에서 유용하지 않다고 주장하였다. 속도-교통량 자료를 사용하는 실험적 용량 산정방법은 용량상태에서 관측하지 못한 최대 교통량을 자유상태에서 관측한 최대 교통량을 반영하여 용량분포도를 유도하여 용량을 산정하는 것이다. 수학적 모델을 바탕으로 속도-교통량-밀도 관계도를 정립하여 용량을 산정하는 방법의 장점은 용량상태에 도달하지 않는 조건에서도 용량을 산정할 수 있다. 이 방법의 단점은 속도-교통량-밀도 관계를 규명하기 위해서 특정한 모델이 필요하다는 것이다. 이러한 비교·평가를 토대로 그들은 실험적 용량 산정방법이 실용적 측면에서 적절한 방법이라고 주장하였다.

따라서 본 연구에서는 확률적 용량 값을 산정하기 위한 방법을 소개하고 비교·분석에 초점을 두었다. 확률적 용량 산정방법 이외에 일반적으로 교통공학에서 가장 많이 사용하고 있는 직접적 용량 평가방법인 용량 상태에서 관측된 최대 교통량에 대한 평균 방법과 비교·분석도 하였다.

## 2. 이론고찰

현장에서 관측된 교통량-속도 자료를 이용하여 확률적 용량을 산정하는 방법은 대표적으로 Product Limit Method(PLM), Selection Method(SM), Empirical Distribution Method(EDM)가 해당된다. 여기서 EDM은 용량상태에서 관측한 시간대 별 최대 교통량에 대해서 평균하여 용량을 산정하는 방법으로 현재까지 교통공학분야에서 용량 산정 시 자주 사용하는 방법 중 하나이다. EDM과 나머지 두 가지 방법과 다른 점은 PLM과 SM은 용량상태뿐만 아니라 자유상태에서 관측된 최대 교통량을 용량분포도 정립할 때 고려하는 것이다. 이것은 용량에 도달하기 전 교통혼잡이 발생하는 상태에서 용량을 적절하게 산정할 수 없는 문제점을 보완하기 위한 것이다. 각각 방법론에 대한 기본이론은 다음과 같다.

### 2.1. Empirical Distribution Method(EDM)

EDM 방법의 원리는 용량상태에서 시간대 별 관측된 최대 교통량을 토대로 정립된 용량분포도로부터 도로용량을 산정하는 것이다. 시간대 별 관측된 교통량은 관측 지점의 속도를 토대로 자유상태와 혼잡상태로 구분하여 Eq. (1)과 같은 이산형 분포함수를 용량상태의 시간대 별 교통량에 적용한다.

$$F(q) = \text{Prob}(q_i < q), q_i \in \{C\} \tag{1}$$

$$F(q) = N_c / N$$

여기서,

- $F(q)$  = 누적용량 분포함수
- $q_i$  =  $i$  시간대 관측된 교통량
- $C$  = 용량상태에서 관측된 시간대별 교통량
- $N_c$  = 용량상태에서  $q_i < q$ 인 관측 수
- $N$  = 용량상태에서 총 관측 수

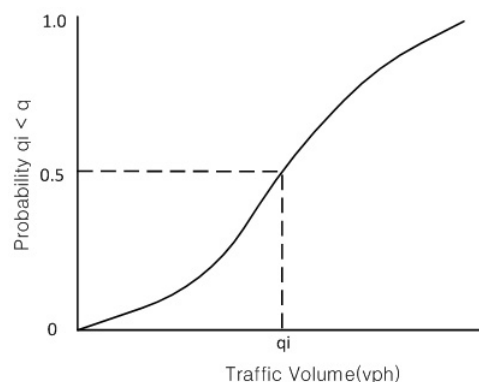


Fig. 1 Cumulative Maximum Traffic Volume Distribution

## 2.2. Product Limit Method(PLM)

PLM 방법은 앞에서 설명한 Empirical Distribution 방법과 유사하지만, 용량상태의 교통류 이외에 자유상태의 교통량도 반영한다는 점이 다르다. 도로용량은 자유상태와 용량상태에서 관측된 시간대 별 최대 교통량 자료를 사용하여 유도된 용량분포도로부터 산정된다. PLM의 일반적인 함수는 Eq. (2)와 같다.

$$G(q) = \text{Prob}(q_i > q)$$

$$G(q) = \prod_{q_i \in \{C\}} \frac{K_{q_i} - 1}{K_{q_i}} \quad (2)$$

여기서,

- $K_q = \{S\}$ 에서  $q_i < q$ 인 관측 수
- $\{Q\} =$  자유상태
- $\{C\} =$  용량상태
- $\{S\} = \{Q\} \cup \{C\}$

누적함수  $F(q)$ 는  $1-G(q)$ 에 의해 정의된다.

## 2.3. Selection Method(SM)

SM 방법은 PLM 방법 적용 시 충분한 용량상태의 최대 교통량을 수집 못했을 경우에 적용하는 기법이다. 이 방법은 용량상태에서 관측된 교통량에 대한 평균값보다 큰 자유상태에서 관측된 교통량을 추가로 용량상태의 교통량 집단에 포함시켜 이에 대한 평균 최대 교통량을 유출하는 것이다. 이에 대한 이론은 다음과 같다.

- ① 용량상태  $\{C\}$ 에서 관측된 교통량에 대한 평균 값 계산

$$q_{set\{C\},m} = \sum_i q_i / N, \quad q_i \in \{C\}$$

- ② 자유상태에서 관측된 교통량 자료 중 평균 용량상태의 교통량( $q_{set\{C\},m}$ )보다 큰 교통량 자료를 용량상태의 교통량에 포함

$$\{A\} = \{C\} \cup \{Q \mid q_i > q_{set\{C\},m}, q_i \in \{Q\}\}$$

- ③  $\{A\}$ 로부터 용량산정

$$q_c = \sum_i q_i / N_A$$

여기서,

$N =$  집합  $\{C\}$ 에서  $i$  관측한 요소의 수

$N_A =$  집합  $\{A\}$ 에서  $i$  관측한 요소의 수

$q_i =$  요소  $i$ 에 대한 교통량

$q_{set\{C\},m} =$  평균 최대 교통량

$q_c =$  용량

SM 방법으로부터 평가된 용량 값은 용량분포도의 하한경계점에 해당되는 하나의 값이기 때문에 관측된 용량 자료 수가 용량 값 산정에 상당히 영향을 미칠 수 있다.

## 3. 실험적 도로용량 산정방법론 비교·분석

### 3.1. 자료수집 및 분석방법

조사 대상지점은 자유상태뿐만 아니라 병목현상이 발생하는 다양한 교통수요가 보이는 고속도로의 연결로 접속부의 합류지점이다. 또한 이웃 연결로 접속부에서 발생하는 교통혼잡으로 인한 파급효과가 미치지 않을 만큼 이격거리가 있는 지점이다. 이러한 조건을 바탕으로 본 연구에서는 서해고속도로의 비봉IC(서울방면), 천안-논산 고속도로의 공주JC(천안방면), 정안IC(천안방면) 등 세 개의 연결로 합류부를 선정하였다. 모든 조사지점의 제한속도는 110km/h이며 비봉IC의 본선 차로 수는 3차로, 공주JC와 정안IC의 본선 차로 수는 2차로이다. 연결로 접속부의 합류지점과 상류부에 설치된 루프 검지기를 통해 2011년 4월과 2012년 3월에 5분 단위로 관측된 속도-교통량 자료를 사용하였다. 수집된 자료 중 기상청 자료를 토대로 강우 등 악천후 기상조건 및 야간 시간대(18:30~06:30)에 해당되는 자료는 분석 시 제외시켰다.

각 지점별 합류지점과 그 상류부에서 관측된 자료는 한국도로용량편람(2013)의 고속도로 기본구간에서 제시한 용량상태의 속도 85km/h(설계속도 120km/h와 100km/h 사이)를 기준으로 자유상태와 용량상태로 구분하였다. Table 1은 합류지점과 상류부에서 관측된 속도를 토대로 자유상태와 용량상태로 구분하는 예시를

Table 1. Assigning Observations to Set {Free-flow state, C} or {Capacity state, Q}

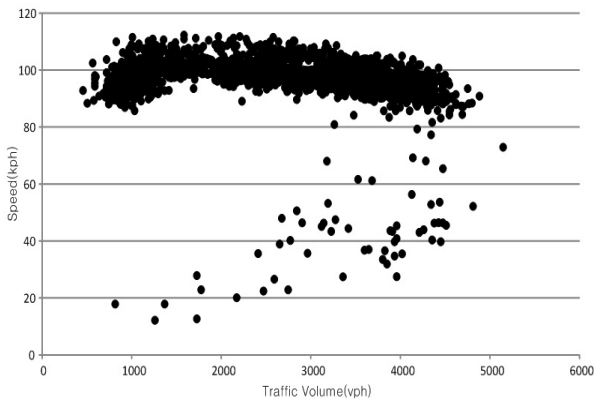
Interval	Upstream speed(km/h)	Volume (vph)	Downstream speed(km/h)	Conclusion
15:00-15:05	93	4080	86	{Q}
15:05-15:10	<b>80</b>	4200	72	{C}
15:10-15:15	<b>75</b>	4250	73	{C}
15:15-15:20	<b>51</b>	4350	<b>43</b>	Breakdown

보여주고 있다. 이렇게 가공된 자료를 토대로 세 가지 실험적 용량 산정방법론에 적용하였다.

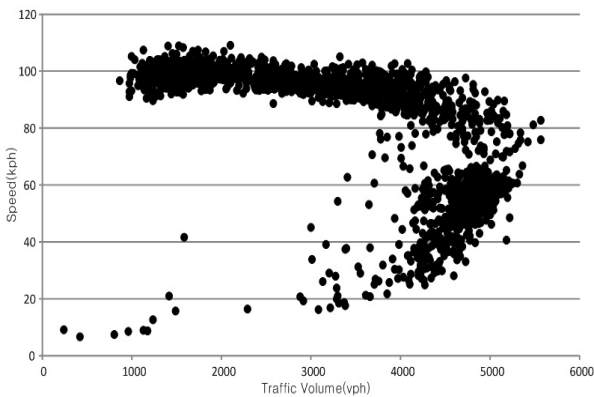
### 3.2. 교통류 특성 분석

세 가지 실험적 용량 산정 방법론 적용에 앞서서 Fig. 2~4와 같이, 각 지점별로 합류지점과 그 상류부에서 수집된 속도-교통량 자료를 토대로 기본적인 속도-교통량 패턴을 분석하였다. 각 지점별 속도-교통량 관계에 의하면, 한국도로용량편람(2013)에서 정립한 관계와 유사한 형태로, 어느 교통량 수준까지는 일정한 속도를 유지하며 용량에 접근할수록 속도는 민감하게 감소하는 것으로 보여주고 있다. 모든 지점에 대한 자유속도는 110~120km/h로 분포하는 것으로 나타났다.

그 밖에 각 지점별 합류지점과 그 상류부에서 관측된 최대 교통량 수준은 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 이것은 합류지점에서 발생한 교통혼잡의 파급효과가 상류부에 도달하여 급작스러운 속도 감소와 함께 용량에 도달하기 전 교통와해현상이 발생한 것으로 판단된다. 이러한 현상은 기존 연구결과와 유사하다.

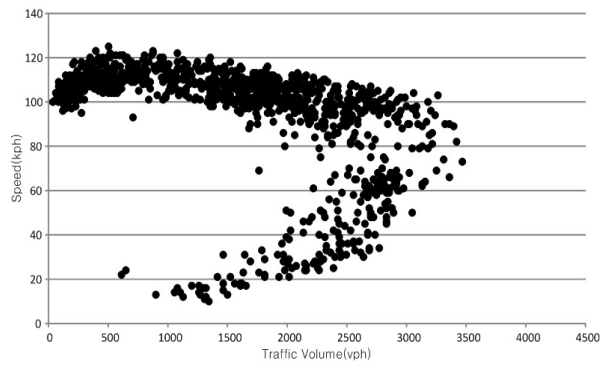


(a) Upstream

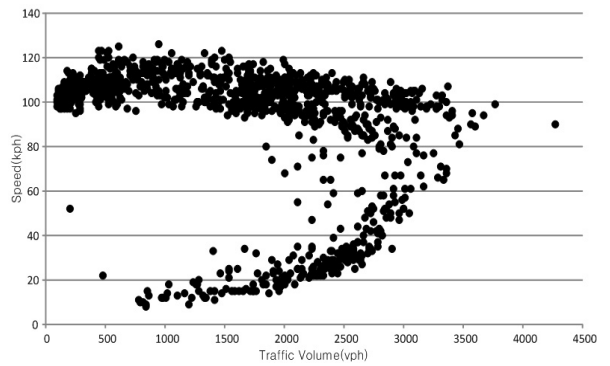


(b) Downstream

Fig. 2 Speed-Volume Relationship (Bibong IC)

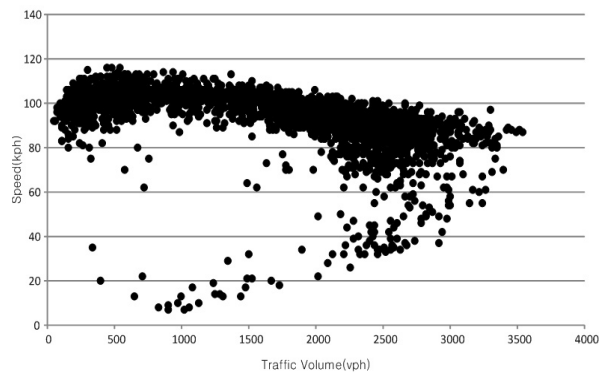


(a) Upstream

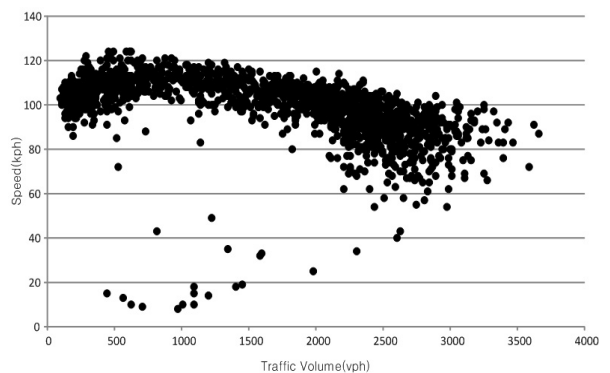


(b) Downstream

Fig. 3 Speed-Volume Relationship (Gongju JC)



(a) Upstream



(b) Downstream

Fig. 4 Speed-Volume Relationship (Jeongan IC)

### 3.3. 용량산정 및 비교

각 지점별로 5분 단위 자료는 합류지점과 상류부의 속도기준에 의해 교통류 상태를 자유상태와 혼잡상태로 분류하였으며, 이렇게 가공된 교통량을 가지고 세 가지 실험적 용량 산정방법론에 적용하였다. 각 지점 별 비교 분석 결과는 다음과 같다.

#### 3.3.1. 비봉IC

Fig. 5는 EDM과 PLM 방법에 의한 누적 최대 교통량분포도를 보여주고 있으며, Table 2에서는 SM 방법에서 산출된 용량과 각 누적 최대 교통량분포도로부터 확률 50%에 해당되는 용량을 비교한 것이다. 그 결과, 용량상태와 자유상태에서 관측된 최대 교통량을 고려한 PLM과 SM 방법에 의한 용량이 합류지점에서 관측된 용량상태의 최대 교통량만 고려한 EDM 방법에 의한 용량보다 높게 산정되었다. 이것은 용량상태의 교통량 토대로 용량을 산정할 경우 갑작스러운 교통와해현상으로 인해 관측하지 못한 최대 교통량이 존재할 확률이 높으며, 이로 인해 용량 값을 과소평가할 수 있다는 것이다.

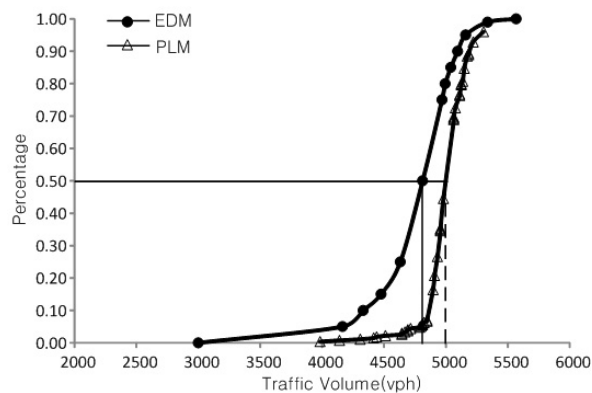


Fig. 5 Comparing Cumulative Distribution by EDM and PLM (Bibong IC)

Table 2. Estimating Capacity (Bibong IC)

Method	EDM	PLM	SM
Capacity(vph)	4,812	4,990	4,996

#### 3.3.2. 공주JC

천안-논산 고속도로의 공주JC의 가공된 교통류 자료를 토대로 세 가지 방법론에 의해 산정된 용량은 Fig. 6과 Table 3에서 비교하였다. 서해고속도로 비봉IC의 결과와 같이, PLM과 SM 방법에 의해 산정된 용량 값

이 용량상태에서 관측된 최대 교통량을 토대로 산정하는 EDM 방법보다 높은 것으로 나타났다.

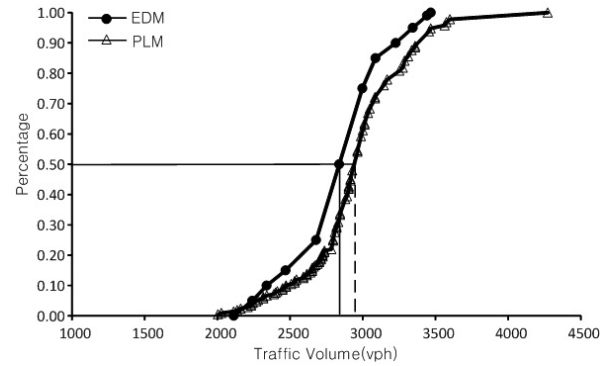


Fig. 6 Comparing Cumulative Distribution by EDM and PLM (Gongju JC)

Table 3. Estimating Capacity (Gongju JC)

Method	EDM	PLM	SM
Capacity(vph)	2,838	2,950	2,945

#### 3.3.3. 정안IC

Fig. 7과 Table 4는 천안-논산 고속도로의 정안IC에서 관측된 속도-교통량 자료를 토대로 세 가지 방법에 의해 산정된 용량 값을 보여주고 있다. 다른 두 개 지점과 달리 세 가지 방법에 의해 산정된 용량이 비슷하게 나타났다. 또한 정안IC의 합류지점에서 산정된 용량과 공주JC 합류지점의 용량과 거의 비슷한 것으로 분석되었다.

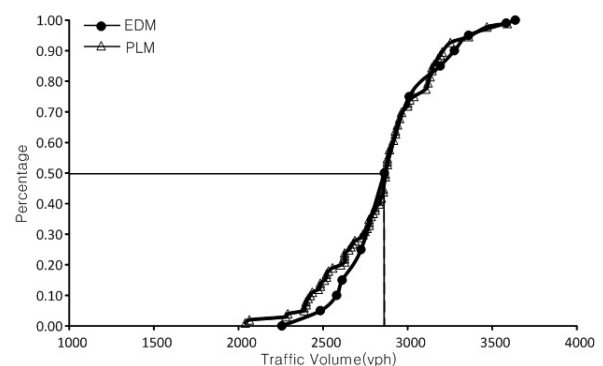


Fig. 7 Comparing Cumulative Distribution by EDM and PLM (Jeongan IC)

Table 4. Estimating Capacity (Jeongan IC)

Method	EDM	PLM	SM
Capacity(vph)	2,862	2,860	2,850

#### 4. 결론 및 향후 연구과제

도로용량은 도로의 계획, 설계, 운영상태를 분석하는데 중요한 척도이며, 교통상황을 예측하는데 필요한 기준이다. 도로용량을 산정하기 위한 여러 가지 방법이 있으며, 일반적으로 적용하는 방법 중 하나가 한국도로용량편람(2013)에서 제시한 도로종류 별 도로용량을 적용한다. 기존 연구결과에 의하면, 교통혼잡은 도로용량에 도달하기 전 발생하기 때문에 같은 지점과 교통량 수준에서도 특정한 시간동안 통과할 수 있는 최대 교통량이 다르다는 것을 보여주고 있다. 따라서 용량은 확정된 값이 아닌 확률적 값으로 가정할 수 있기 때문에 확률적 용량 산정뿐만 아니라 분석이 용이한 접근방법이 필요할 수 있다.

이러한 확률적 용량 산정을 위해서 본 연구에서는 세 가지 실험적 용량 산정방법론을 소개 및 비교·평가하였다. 첫 번째 방법론은 병목지점에서 발생하는 용량상태에서 관측된 최대 교통량을 토대로 누적분포도를 정립하여 용량 값을 산정하는 것이다. 이 방법은 일반적으로 용량 산정 시 사용했던 방법들 중 하나이다. 두 번째 방법론은 병목지점과 상류부에서 관측된 속도를 토대로 각 시간대 별 교통량 자료를 자유상태와 용량상태로 분류한다. 분류된 자료를 토대로 교통량에 따라 순위를 정한 다음, 용량상태의 최대 교통량 누적분포도를 유도하여 용량을 산정하는 것이다. 세 번째 방법론은 용량상태에서 관측된 평균 최대 교통량보다 높게 관측된 자유상태의 교통량을 추가로 용량상태의 교통량 집단에 포함시킨 다음, 이에 대한 평균 최대 교통량을 산정한다.

각 방법론에 대한 비교·분석을 하기 위해서 서해고속도로와 천안-논산 고속도로를 대상으로 합류지점과 그 상류부에 설치된 검지기에서 관측된 자료를 사용하였다. 각 방법론 간 비교·분석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용량상태의 관측 수가 용량 산정에 상당히 영향을 미친다고 판단된다. EDM 방법과 같이 병목지점의 용량을 산정 시 용량상태의 경우만 고려할 경우 그 병목지점의 용량을 과소평가할 수 있는 것으로 판단된다.
2. 용량상태 이외에 자유상태에서 관측된 최대 교통량

을 용량 산정 시 고려할 경우 관측기간 동안 관측하지 못한 최대 교통량 경향을 반영할 수 있어 병목지점의 용량을 보다 더 정확하게 산정할 수 있다. 기존 연구결과와 같이, 본 연구에서도 EDM 방법보다 확률적 용량 산정방법론을 추천한다.

3. 비록 SM 방법도 확률기반 용량을 산정하지만, 하나의 용량으로 산정되기 때문에 PLM 방법보다 용량상태의 자료 수에 따라 영향을 많이 미친다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 용량 산정의 신뢰성을 높이기 위해서 간단한 확률 이론을 기반으로 하는 실험적 용량 산정방법론을 검토하였다. 이러한 비교·분석을 통해 교통공학 측면에서 분석 및 적용 용이성 등도 평가하였다. 더 정확한 용량을 산정하기 위한 몇 가지 향후 연구가 요구된다. 첫 번째, 용량 산정을 위한 확률적 접근방법론의 적용 타당성을 이해하기 전 병목지점에서 발생하는 혼잡 현상을 미시적으로 분석할 필요가 있다. 두 번째, Extreme Value Distribution(EVD) 방법 등 새로운 확률적 용량 산정방법론에 대한 소개 및 적용에 대한 연구도 필요하다.

#### References

Korea Highway Capacity Manual, 2013. Ministry of Construction & Transportation.

Michiel M. Minderhoud, Hein Botma, and Piet H. L. Bovy(1997), Assessment of Roadway Capacity Estimation Methods, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1572, pp. 59-67.

Matt R. Lorenz and Lily Elefteriadou(2001), Defining Freeway Capacity as Function of Breakdown Probability, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1776, pp. 43-51.

Lily Elefteriadou, Roger P. Roess, and William R. McShane(1995), Probabilistic Nature of Breakdown at Freeway Merge Junctions, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1484, pp. 80-89.

Zhe Sun and Chao Yang(2011), Development of Extreme Value Distribution Method for Estimation of Expressway Capacity, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2260, pp. 133-139.