

고속도로 터널부 도로 용량 감소율에 관한 연구

A Study on the Road Capacity Reduction Rate of Freeway Tunnel Section

김 선 훈* · 이 동 민** · 황 순 천***

* 주저자 : Texas A&M University 토목공학과 박사과정
** 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 · 스마트시티학과 교수
*** 공저자 : 서울시립대학교 스마트시티학과 연구교수

Sunhoon Kim* · Dongmin Lee** · Sooncheon Hwang***

* Zachry Dept. of Civil and Environmental Eng., Texas A&M University
** Dept. of Transportation Eng. & Dept. of Smart City, Univ. of Seoul
*** Dept. of Smart City, Univ. of Seoul

† Corresponding author : Dong min Lee, dmlee@uos.ac.kr

Vol. 23 No.3(2024)

June, 2024

pp.17~28

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

[https://doi.org/10.12815/kits.](https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.3.17)

2024.23.3.17

Received 16 June 2024

Revised 24 June 2024

Accepted 24 June 2024

© 2024. The Korean Society of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

본 연구에서는 고속도로 VDS 검지기 데이터를 활용하여 터널 구간과 일반 구간의 도로용량을 산정하여 비교하였으며, 터널 특성 요인에 따라 분류된 터널유형별 터널 진입 전 대비 터널 내부 도로용량 감소율을 분석하였다. 터널 구간과 일반 구간의 도로 용량을 비교하기 위해 5분 단위 VDS 검지기 데이터에 Product Limit Method(PLM)을 적용하였다. PLM으로 도출된 터널 구간 및 일반 구간의 도로 용량을 비교한 결과, 터널 구간은 일반 구간 대비 도로 용량이 약 6.5% 감소하였다. 터널 유형 분류를 위해 터널 연장과 터널 내 차로수를 변수로 활용하였으며, 각 기준에 의해 분류된 터널 집단별 도로 용량 감소율에는 차이가 있었다.

핵심어 : 터널, 도로 용량, Product Limit Method, 터널 특성 요인

ABSTRACT

In this study, the capacity of the tunnel and the general section was calculated and compared using the VDS detector data, and the decrease rate in capacity of the tunnel section was analyzed by tunnel type. To compare the capacity of the tunnel and the general section, the Product Limit Method (PLM) was applied to the VDS detector data. As a result of comparing the capacity of the tunnel and general section, the capacity of the tunnel section decreased by about 6.5% compared to the general section. To classify the tunnel type, the tunnel extension and the number of lanes were used as variables, and there was a difference in the decrease rate of capacity by tunnel group classified by each criterion.

Key words : Tunnel, Road Capacity, Product Limit Method, Tunnel Characteristics

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

우리나라의 지형은 70% 정도가 산지로 이루어져 있기 때문에(National Geography Information Institute, 2020) 지역 간 연결을 위한 고속도로 설계 시 터널 건설이 불가피한 경우가 많다. 그러나 고속도로 터널 구간은 일반 구간과 비교하여 운전자에게 부담이 되며 이는 운전행태의 변화로 이어지게 된다. 대표적으로 터널 진입 전 운전자의 속도감소, 차두간격 조절 현상을 예로 들 수 있다. 이러한 터널 구간 내 운전자의 운전행태 변화는 곧바로 터널 구간의 교통류 변화에 영향을 주며, 이는 정상적인 터널 구간 운영에 악영향을 미치게 된다. 또한 터널 구간은 출입구를 제외하고 외부와 단절되어 일반 구간에 비해 교통류 및 안전관리가 어렵다. 따라서 고속도로 터널 구간의 원활한 교통류와 교통안전을 위해서 일반 구간과 다른 터널구간에 적절한 관리방법이 필요하다.

고속도로 터널 구간에 적절한 관리방법을 마련하기 위해서는 우선적으로 일반 구간 대비 터널 구간의 교통류 특성을 분석이 필요하다. 일반적으로 교통류 특성을 분석하기 위한 변수는 교통량, 속도, 차두간격 등이 있으며, 기존 연구에서는 주로 교통량과 속도를 이용하여 고속도로 터널 구간의 교통류 변화를 분석하였다. 교통량을 분석대상으로 선정하였던 연구는 터널 구간과 일반 구간의 도로 용량을 추정하고 비교하였다. 하지만, 기존 연구는 분석대상 터널의 개소수가 적어 터널 특성요인에 따른 터널유형별 분석이 어려운 점, 연구 기간에 따라 도로 용량 추정값의 차이가 크다는 점 등의 단점이 있다. 본 연구에서는 기존 연구의 한계점을 보완하여 다양한 유형의 터널을 대상으로 실증적 분석기법을 통해 일반 구간과 도로 용량을 비교·분석하고, 터널 구간에 적합한 관리 방안이 필요함을 제시하고자 한다.

2. 연구범위 및 절차

본 연구에서는 터널 구간과 일반 구간의 도로 용량 비교를 위해 한국도로공사의 고속도로 공공데이터 포털에서 제공하는 5분 단위 VDS 검지기 데이터를 활용하였으며, 2020년부터 2022년까지 수집된 3년 간 데이터를 활용하였다. 또한 고속도로에 존재하는 모든 터널 중에 도로 용량 감소율을 산출하기 적절한 터널만을 선정하였다.

본 연구의 수행 절차는 다음과 같다. 먼저 본 연구와 관련된 기존 문헌을 검토하고, 참고할 사항을 정리하였다. 그 다음, 고속도로 터널 구간의 도로 용량 감소율을 산정할 수 있는 터널을 선정하고, 해당 터널에 관련된 교통류 데이터를 수집하였다. 그리고 수집된 교통류 데이터를 활용하여 터널 구간과 일반 구간의 도로 용량을 산정하고 비교하여 도로 용량 감소율을 산출하였다. 또한 터널 특성에 따라 터널 유형을 구분하고, 터널 유형별로 도로 용량 감소율을 구분하여 산출하였다. 마지막으로 본 연구의 결과를 토대로 고속도로 터널 구간 도로 용량과 관련된 시사점을 정리하였다.

II. 관련 연구 고찰

1. 고속도로 터널구간 교통류 변화에 관한 연구

Hong et al.(2006)은 고속도로 터널 진입부에서 운전자의 반응을 분석하였으며, 실차주행실험을 통해 운전자의 뇌파, 운전행태, 시각적 행태 데이터를 얻었다. 그 결과 터널 진입 시 암순응에 의한 운전자 시각능력

저하 현상은 터널 진입 후 400m까지 지속되는 것으로 분석되었다. Kim and Hong(2012)은 고속도로 터널 내 차로변경에 따른 교통류 특성을 분석하였다. 그 결과 차로변경을 허용할 경우 통행속도가 증가하며, 중차량이 포함된 혼합교통류일 때 더 큰 효과를 보이는 것으로 분석되었다.

Jang and Jang(1998)은 터널구간의 교통류 특성을 제시하고 용량을 산정하는 연구를 진행하였으며, 터널구간의 일반적 교통류 특성을 제시하였다. 먼저 터널 진입 전 운전자들은 일반적으로 감속하여 주행하며, 이에 따라 후행차량은 선행차량의 저속주행에 반응하여 감속도가 크게 나타난다. 또한 터널 내부에서는 선행차량이 감속하지 않아도 차량 간의 거리를 길게 잡기 위해서 감속이 생기게 된다.

Lee(2002)는 일반터널과 장대터널의 일반구간 대비 속도 변화폭을 비교분석하였으며, 장대터널인 둔내터널과 일반터널 간 속도 변화폭 비교 결과 장대터널의 속도 변화가 크게 나타났다. 한편 Jeong et al.(2002)은 연속된 터널의 설치 간격에 따른 운전자의 주행속도변화를 분석하였다. 분석결과, 이격거리가 길 경우 운전자의 상류부터널 진출 속도가 증가하고 이격거리가 짧은 경우 상류부터널 진출 속도가 감소하였다.

Lee(2006)는 회귀분석을 활용하여 운전자의 주행속도 감소에 영향을 미치는 터널특성요인을 분석하였으며, 분석결과 터널구간 차로수, 측방여유폭, 터널의 높이와 같은 터널 규모 요인들이 운전자의 주행속도 감소에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. Lee and Kim(2010)은 설문조사를 통해 고속도로 터널부 속도 감소에 관한 심리적 요인을 분석하였으며, 그 결과 운전자들은 터널구간 진입 시 출구 보임 여부가 운전 중 심리상태에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Park and Park(2006)은 터널구간 LED램프 설치에 따른 운전자 운전행태를 분석하였으며, 시험차량을 이용한 실차주행 실험을 통해 데이터를 얻었다. 또한 실차주행 실험 후 주관적 설문조사를 통해 운전자의 의견을 조사하였다. 터널 내 LED 램프 설치 여부에 따라 운전자 주시영역 분포를 분석한 결과, LED 램프 설치 전후에 따른 운전자 주시영역 분포는 큰 차이가 없었으나 주관적 설문조사 결과 터널 내부 운전자에게 심리적 안정감을 주는 것으로 분석되었다.

고속도로 일반 구간 대비 터널 구간의 교통류 변화에 관한 연구 검토 결과 기존 연구에서는 터널 구간의 교통류 변화 양상을 파악하기 위해 운전자의 주행속도를 분석하였으며, 일반적으로 고속도로 터널 진입 전 운전자는 감속하여 주행하는 것으로 나타났다. 감속에 영향을 미치는 요인은 복합적이며, 심리적 요인과 외부환경적 요인이 미치는 영향이 큰 것으로 보인다. 또한 장대터널의 경우와 하류부 터널과의 이격거리가 짧은 경우 감속정도가 더 큰 것으로 확인하였다.

2. 고속도로 터널구간 도로용량 변화에 관한 연구

고속도로 터널 구간은 일반적으로 교통류 변화에 의해 일반 구간과 비교하여 도로 용량이 감소하는 것으로 알려져 있으며, 이에 대한 연구도 다수 진행되었다. 터널 구간의 도로 용량 감소와 관련된 연구 사례는 다음과 같다.

Chin and May(1992)은 Caldecott 터널을 대상으로 속도-교통량 관계를 분석하였으며, Highway Capacity Manual(HCM)에서 제시하는 속도-교통량 관계그래프와 실제 관측된 교통류 데이터를 이용하여 도출된 속도-교통량 관계그래프를 비교하였다. 그 결과, HCM에서 명시한 속도-교통량 관계는 터널부 특성을 제대로 반영하지 못한다는 결론을 도출하였으며, 용량 또한 터널부 특성을 제대로 반영하지 못한다고 분석하였다.

Jang and Jang(1998)은 터널 구간의 교통류 특성을 제시하고 영상처리기법을 통하여 교통류 특성을 분석하였다. 터널 구간의 도로 용량 산정을 위해 영상처리기법으로부터 교통류 데이터를 수집하고, 교통량-속도, 교통량-밀도 그래프를 분석하여 변곡점으로 판단되는 지점의 교통량을 해당 터널의 도로 용량 값으로 추정하

였다. 그 결과 터널 구간의 도로 용량은 일반구간에 비해 8%정도 감소하는 것으로 분석되었다.

Cho and Chang(1998)은 터널이 포함된 도로 구간의 차로수를 계획하고 효율적으로 이용할 수 있도록 개선 방안을 마련하기 위한 연구를 진행하였다. 연속된 터널의 도로 용량 추정을 위해 터널 전·후에 검지기를 설치하여 15분 단위 교통량을 수집하고, 단위시간별 검지기 간 교통량 관계를 이용해 단순 회귀식을 도출하였다. 도출된 회귀식의 회귀계수로부터 터널 구간 도로 용량 감소비율을 산출하였으며, 독립 터널은 5%, 연속 터널은 10%정도 용량이 감소하는 것으로 분석되었다. 한편 Kim and Hong(2011)은 장대터널의 교통류 특성 및 도로 용량을 분석하는 연구를 수행하였다. 수암터널, 둔내터널, 죽령터널을 대상으로 터널부 용량을 추정하였으며, 도로 용량 분석 결과 일반 구간과 비교하여 12%정도 감소하는 것으로 분석되었다.

고속도로 터널부 도로 용량 감소에 관한 연구 검토 결과 다음과 같은 시사점을 도출하였다. 첫째, 터널부 도로 용량 감소에 대한 기존 국내 연구가 존재하지만 관측 교통류율을 용량으로 추정하거나 교통량-속도 관계그래프에서 용량으로 추정되는 지점의 교통량을 도로 용량으로 추정하는 등 직관적 분석방법을 활용하였다. 하지만 관측 및 검지기를 통해 얻어진 교통류 데이터는 시기 및 외부요인에 따라 변화하기 때문에 직관적 추론방법으로 도로 용량을 추정하기에는 설명력이 부족하다. 둘째, 적은 수의 터널(3개 이하)을 대상으로 분석을 실시하여 터널 유형 분류별 용량을 추정하지 않았다. 그러나 터널은 각각 특성이 다르기 때문에 터널 유형별 도로용량 감소량 산출이 필요하다.

3. 도로용량 추정 방법론에 관한 연구

본 연구에서 터널 내부, 진입 전 및 진출 후의 교통량을 대표할 수 있는 값을 도출하기 위해 도로 용량 산출방법을 활용하였으며, 기존 연구에서 활용한 도로 용량 추정 방법론을 검토하여 그 방법들 중 적절한 방법을 본 연구에 활용하였다. 기존 도로 용량 추정 방법론에 관한 연구는 다음과 같다.

Minderhoud et al.(1997)은 기존 도로 용량 추정방법을 비교하는 연구를 진행하였으며, 용량추정 방법론을 크게 direct empirical 추정방법과 indirect empirical 추정방법으로 구분하였다. Direct empirical 추정방법은 실제 관측된 교통류 데이터(차두간격, 교통량, 속도, 밀도)를 활용하여 특정 지점의 용량을 구하는 방법이며, indirect empirical 추정방법은 HCM에서 제공하는 용량 값을 활용하는 방법이다. 해당 연구는 direct empirical 추정방법에 중점을 맞춰 소개하였으며, 여러 가지 용량 추정방법의 장단점을 고려해 볼 때 Empirical Distribution Method, Product Limit Method, Fundamental Diagram Method의 이용을 권장하였다.

Errampalli and Velmurugan(2011)는 도시고속도로 용량 추정을 위해 자유교통류 상태와 정체교통류 상태 시 교통량-속도 관계 그래프의 교점에 해당하는 교통량을 용량으로 추정하였다. 한편 Jang and Jang(1998)은 터널부 도로용량 추정을 위해 교통량-속도, 교통량-밀도 관계그래프에서 도로용량으로 추정되는 변곡점의 교통량을 도로 용량으로 추정하였다.

Li and Laurence(2015)는 도로 용량 추정 분석 방법론을 비교분석하는 연구를 진행하였으며, Maximum Capacity Methodology, Van Aerde Capacity Methodology, Breakdown Capacity Methodology, Product limit Method에 대해 소개하였다.

Kim and Hong(2011)는 Maximum Capacity Methodology를 이용하여 고속도로 장대터널의 용량을 추정하였으며, Park and Yeo(2013)는 병목구간 용량 추정을 위해 속도급락지점의 교통량을 용량으로 정의하고 산출하였다. 한편 Lee et al.(2013)은 도시고속도로 공사구간 용량분석을 위해 평균 최대 관측 교통류율 분석법, Headway Method, 회귀분석법, Parameter Inspection 분석법을 이용하였다. Kim and Lee(2015)는 교통와해 현상이 발생하는 교통류율 중 최대 교통류율에 해당하는 값을 용량으로 추정하였다.

Moon and Cho(2014)는 도로용량 추정방법 중 관측된 교통류 데이터로부터 용량을 추정하는 실험적 접근 방법을 비교하는 연구를 진행하였다. 다양한 실험적 용량추정 방법론 중 차두간격 분석법, 최대 교통량 분석법, 수학적 모델 분석방법, 속도 및 교통량 데이터를 활용한 분석법(Empirical Distribution Method, Product Limit Method, Selection Method)을 비교분석하였으며, 각 분석 방법론별 장단점을 다음과 같이 기술하였다. 차두간격 분석방법은 관측된 교통량이 도로 용량에 도달하지 않아도 차두간격을 통해 용량을 추정할 수 있으나, 용량을 과대평가하는 단점이 있다. 최대 교통량 분석방법은 관측된 교통량 데이터를 활용하여 쉽게 용량 값을 도출할 수 있지만, 관측기간이 확률밀도함수에 상당한 영향을 미치기 때문에 신뢰성 측면에서 유용하지 않다. 수학적 모델 분석방법은 교통량이 용량상태에 도달하지 않는 조건에서도 용량을 추정할 수 있으나, 교통류 데이터(교통량, 속도, 밀도) 간 관계 규명을 위해서 특정한 수학적 모델이 필요하고 각 분석지점별 모델이 다를 수 있기 때문에 실용적이지 않다. 반면, 속도 및 교통량 데이터를 활용한 분석방법은 관측된 속도 데이터와 교통량 데이터를 함께 고려한 교통량 확률분포함수를 활용할 수 있다는 장점이 있으나, Selection Method는 저평가된 용량 값을 산출하는 경향이 있고 Empirical Distribution Method는 자유 교통류 상태를 반영하지 않는 단점이 있다.

국내외 도로 용량 추정 방법 관련 연구 검토 결과, 각 연구별 도로 용량 추정방법이 상이하였다. 도로 용량 추정에는 주로 Maximum Capacity Methodology, Empirical Distribution Method, Headway Method, Product Limit Method, 회귀분석법과 같이 관측된 교통류 데이터를 활용한 실험적 용량 추정 방법이 활용되며, 각각 장단점을 가지고 있다. 기존 연구에서 각 실험적 용량 추정 방법론을 비교분석한 결과, 데이터가 수집된 지점의 특성을 반영하여 도로 용량을 산출할 수 있는 Empirical Distribution Method, Product Limit Method의 활용 이점이 가장 큰 것으로 보인다.

III. 연구 수행 방법

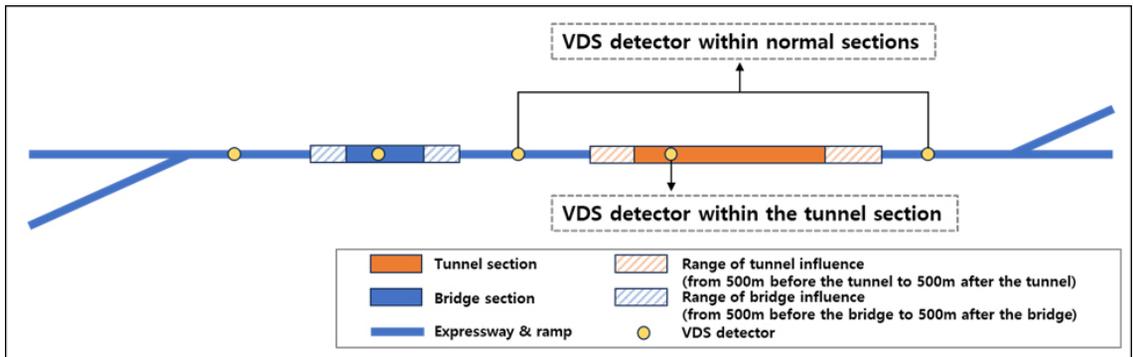
1. 분석자료 수집

본 연구에서는 고속도로 터널 구간과 일반 구간의 도로 용량을 비교분석하기 위해 고속도로 VDS 검지기 데이터를 사용하였다. VDS 검지기 데이터는 한국도로공사에서 관리하는 고속도로 공공데이터 포털에서 제공하고 있으며, 구간 및 지점에 대한 교통량, 속도, 점유율 등 교통류 정보를 제공한다. 데이터의 단위 시간은 5분, 15분, 1시간, 1일 단위로 제공하며, 분석에 활용된 VDS 검지기 데이터 구조는 <Table 1>과 같다. 본 연구에서는 2020년부터 2022년까지 3년간 수집된 5분 단위 집계 데이터를 분석에 사용하였다.

<Table 1> Structure of VDS data

Variable	Description
Time	Time when the data were collected
VDS ID	VDS identification
VDS position	VDS coordinates (latitude, longitude, °)
Speed	Average speed of the vehicles detected by the VDS(km/h)
Volume	Aggregated volume of the vehicles detected by the VDS(veh/h)
Occupancy	Occupancy of the VDS for each time period (veh/km)

터널 구간의 도로용량 감소율을 분석하기 위해서는 도로용량을 비교할 수 있는 일반 구간을 정의해야 한다. 본 연구에서는 일반 구간을 분석 대상 터널과 같은 기본구간에 존재하며, 유입로 및 유출로와 교량의 영향을 받지 않는 구간으로 정의하였다. 터널 구간과 일반 구간의 개념도는 <Fig. 1>과 같다. 터널, 교량, 유출로 및 유입로의 영향권은 500m로 설정하였다. 터널 구간과 일반 구간의 도로 용량을 산출하기 위해 터널 구간과 일반 구간에 위치한 VDS를 구분하였다. 각 구간에 존재하는 VDS 검지기 데이터를 활용하여 일반 구간과 터널 구간의 도로 용량을 계산하였고, 동일 기본구간 내에 존재하는 일반 구간과 터널 구간의 도로 용량을 비교하여 터널 구간의 도로 용량 감소율을 계산하였다. 도로용량 계산 시 각 구간에 존재하는 VDS 검지기별 산출된 도로 용량을 평균하여 활용하였다.



<Fig. 1> Conceptual diagram of the tunnel section and general section

한국도로공사의 고속도로 공공데이터에서 제공하는 VDS 검지기 데이터는 VDS 검지기 고장 등의 이유로 오류값을 다수 포함하고 있다. 따라서 분석을 위해 VDS 데이터의 오류값을 정제해야 할 필요가 있으며, 다음의 특성을 갖는 데이터는 분석에서 제외하였다. 첫째, 교통량 값이 -1 값을 갖는 경우 오류값으로 판단하여 모두 분석에서 제외하였다. 둘째, 교통량 값이 0이지만 속도값이 0보다 큰 데이터는 분석에서 제외하였다. 또한 교통량과 속도가 모두 0인 데이터는 분석에서 제외하였다.

2. 분석 방법

고속도로 터널 내부와 일반구간의 도로 용량 비교를 위해 교통량을 비교수단으로 활용하였으며, 도로 용량 추정 방법론을 활용하여 교통량을 대표하는 도로 용량을 산출하였다. 본 연구에서는 도로 용량 추정 방법론 중에서 VDS 검지기 데이터를 활용할 수 있고, 교통류 상태를 대변하는 교통량과 속도를 함께 반영할 수 있는 방법론을 채택하고자 하였다. 그에 따라 본 연구에서는 관측지점으로부터 저장된 데이터에 기반한 통계적 분석 기법인 Product Limit Method(PLM)을 이용하여 도로용량을 추정하였다. PLM은 통계학 분야 중 생존분석을 활용하여 특정 현상이 발생할 때까지 변수의 조건부 누적생존확률의 분포를 이용하여 임계값을 도출하는 방법으로, 본 연구에서는 누적 생존분포함수의 99%에 해당하는 값을 도로용량으로 산출하였다. PLM 식은 (1)과 같으며, 혼잡상태와 자유교통류 상태를 나누는 속도 기준은 80km/h로 선정하였다.

$$G(q) = \text{Prob}(q_i > q) = \prod_{q_i < q} \frac{k_{q_i} - 1}{k_{q_i}}, q_i \in \{C\} \dots\dots\dots (1)$$

$$F(q) = 1 - G(q)$$

where,

$F(q)$: cumulative distribution function of capacity values

q : intensity

q_i : observed intensity at interval i

$\{Q\}$: set of observed free-flow intensities

$\{C\}$: set of observed congested flow intensities

$\{S\} = \{Q\} \cup \{C\}$

k_q : number of observation elements l in set S with intensity q_i larger than or equal

터널은 특성에 따라 다양한 유형이 존재하며, 유형별 도로 용량 감소율이 다를 것으로 예상된다. 그에 따라 본 연구에서는 터널 특성에 따라 유형을 분류하고, 분류된 집단별 터널의 도로 용량 감소율을 분석하였다. 터널 분류를 위한 기준으로는 터널 연장, 시설 한계, 그리고 터널 내 차로수를 선정하였으며, 변수별 상관관계를 통해 터널 유형 분류를 위해 적절한 변수를 재선정하였다.

IV. 분석 결과

1. 터널 구간과 일반 구간의 도로용량 비교 분석

도로 교량 및 터널 현황조사에 따르면 2022년 기준 고속도로에 총 1,238개의 터널이 존재하였다. 그 중 동일한 기본 구간 내에 터널 구간과 일반 구간에 VDS 검지기가 모두 설치된 경우를 분류하였다. 또한, 비교 대상이 되는 일반 구간과 터널 구간의 차로수가 상이한 경우에는 분석에서 제외하였다. 그 결과, 23개 노선의 186개의 터널이 분석 대상으로 분류되었으며, 해당 터널은 <Table 2>에 나열된 바와 같다.

<Table 2> List of tunnels used for the analysis

Freeway name	Name of tunnels used for the analysis(direction of progress)	Count
Kyeongbu	Okcheon 4(Seoul), Okcheon 3(Seoul), Daejeon(Seoul), Okcheon 4(Busan), Okcheon 3(Busan), Jeungyak(Busan)	6
Gwangju-Daegu	Namwon(Daegu), Namwon(Gwangju), Bunam 1(Gwangju), Gaya 3(Gwangju)	4
Namhae	Sanin(Busan), Haman 2(Busan), Sanin(Suncheon), Changwon 1(Suncheon), Gangjin 3(Suncheon), Goheung(Suncheon), Byeollyang 2(Suncheon), Byeollyang 3(Suncheon), Goheung(Yeongam), Josung 1(Yeongam), Choamsan(Yeongam), Bosung(Yeongam), Jangdong 1(Yeongam), Gangjin 4(Yeongam)	14
Dangjin-Daejeon	Chadong(Daejeon), Hogye(Daejeon), Hogye(Dangjin), Sinyeong(Dangjin), Chadong(Dangjin)	5
Daegu-Pohang	Wachon(Pohang), Daljeon(Pohang), Limgo 1(Pohang), Limgo 3(Pohang), Limgo 1(Daegu), Limgo 4(Daegu), Wachon(Daegu)	7
Donghae	Beomseo 4(Pohang), Munjudaewang 5(Busan), Ohcheon 4(Busan), Ohcheon 5(Busan), Ohcheon 7(Busan), Geundeok(Sokcho), Jeokno(Sokcho), Donghae(Sokcho), Cheongdae(Sokcho), Yangyang 2(Sokcho), Yangyang 2(Samcheok), Hyunbuk(Samcheok)	12
Muan - Gwangju	Noan(Gwangju), Noan(Muan), Hampyeongnabi(Muan)	3

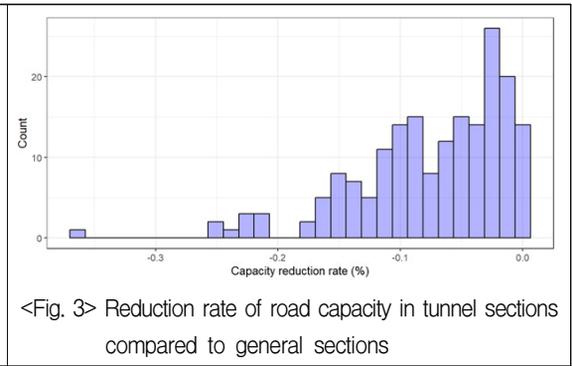
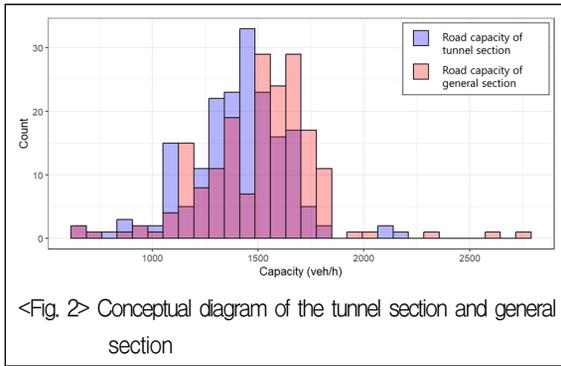
Freeway name	Name of tunnels used for the analysis(direction of progress)	Count
Seoul-Yangyang	Naecheon 5(Yangyang), Sangnam 4(Yangyang), Seoseok(Yangyang), Hangchiryeong(Yangyang), Naecheon 1(Yangyang), Hwachon 8(Yangyang), Hwachon 9(Yangyang), Seomyeon 6(Yangyang), Cheonan(Yangyang), Dongsan 2(Yangyang), Hwachon 8(Seoul), Hwachon 9(Seoul), Bukbang 1(Seoul), Bukbang 3(Seoul), Cheonan(Seoul), Seomyeon 6(Seoul), Sangnam 3(Seoul), Sangnam 4(Seoul), Sangnam 5(Seoul), Sangnam 6(Seoul), Seoseok(Seoul)	21
Seohaean	Daemyeong(Seoul), Yongdam(Seoul), Sunsang(Seoul), Daemyeong(Mokpo)	4
Capital region first ring	Suri(Pangyo), Suam(Pangyo), Gwangam(Pangyo2)	3
Suncheon-Wanju	Samae 1(Wanju), Osu 1(Wanju), Juklim 1(Wanju), Gurye 1(Wanju), Gurye 1(Suncheon), Gurye 2(Suncheon), Deojin 1(Suncheon), Wansan(Suncheon), Yongam 2(Suncheon), Juklim 1(Suncheon), Cheonma(Suncheon), Samae 1(Suncheon), Samae 4(Suncheon), Osu 1(Suncheon)	14
Yeongdong	Daegwanryung 1(Gangrueng), Daegwanryung 4(Gangrueng), Daegwanryung 5(Gangrueng), Dunnae(Gangrueng), Bongpyeong(Gangrueng), Jinbu 1(Gangrueng), Jinbu 2(Gangrueng), Jinbu 3(Gangrueng), Yangji(Gangrueng), Dumnae(Incheon), Jinbu 1(Incheon), Jinbu 2(Incheon), Jinbu 3(Incheon), Bongpyeong(Incheon)	14
Iksan-Jangsu	Sangwan 2(Jangsu)	1
2nd Kyeongin	Gwangmyeong(Seongnam), Gwangmyeong(Incheon)	2
Jungbu	Jungbu 3(Hanam)	1
Jungbunaeryuk	Maehyeon 2(Yangpyeong), Gimcheon 2(Yangpyeong), Gimcheon 3(Yangpyeong), Sungju(Yangpyeong), Mungyeong 2(Yangpyeong), Mungyeongsaejae(Yangpyeong), Gangsang 1(Yangpyeong), Gonggum(Yangpyeong), Sangju(Yangpyeong), Yeonpung(Yangpyeong), Jangyeon(Yangpyeong), Yeonpung(Changwon), Jangyeon(Changwon), Gangsang 1(Changwon), Gangsang 2(Changwon), Geumsa 1(Changwon), Geumsa 4(Changwon), Geumsa 5(Changwon), Jinnam(Changwon), Sungju(Changwon), Mungyeong 2(Changwon), Mungyeongsaejae(Changwon), Maehyeon 2(Changwon), Jokok(Changwon)	24
Jungbunaeryuk (branch line)	Dalseong 1(Daegu), Dalseong 2(Daegu), Dalseong 1(Changwon), Dalseong 2(Changwon)	4
Jungang	Danyang(Chooncheon), Dabu(Chooncheon), Jecheon(Chooncheon), Chiak 2(Chooncheon), Chiak 4(Chooncheon), Wonmu 2(Chooncheon), Chiak 2(Busan), Chiak 4(Busan), Jecheon(Busan), Dabu(Busan), Wonmu 2(Busan), Sammachi(Busan)	12
Jungang(branch line)	Daedong 1(Gimhae)	1
Cheongju-Yeongdeok	Munui 2(Yeongdeok), Pibanryeong(Yeongdeok), Danchon 4(Yeongdeok), Ansa 2(Yeongdeok), Anpyeong 3(Yeongdeok), Naeseo 4(Cheongju), Ansa 2(Sangju), Anpyeong 1(Sangju), Anpyeong 3(Sangju), Dalsan 2(Sangju), Dalsan 3(Sangju), Yeongdeok(Sangju), Jipum 3(Sangju), Sailsan(Sangju)	14
Tongyeong-Daejeon	Tongyeong 2(Hanam), Yuksipryeong(Hanam), Hamyang(Hanam), Sinyul(Hanam), Odojae(Tongyeong), Hamyang(Tongyeong), Gosung 1(Tongyeong), Yuksipryeong(Tongyeong)	8
Pyeongtaek-Jecheon	Guemseong(Jecheon), Sancheok 3(Jecheon), Sancheok 4(Jecheon), Surisan(Jecheon), Surisan(Pyeongtaek), Guemseong(Pyeongtaek), Sancheok 3(Pyeongtaek), Sancheok 4(Pyeongtaek)	8
Honam	Seokgok(Cheonan), Seokgok(Suncheon), Daedeok(Suncheon), Suncheon 2(Suncheon)	4

본 연구에서는 동일한 기본 구간에 존재하는 터널 구간 및 일반 구간의 도로 용량을 비교하였다. 각 일반 구간 및 터널 구간에 존재하는 VDS 검지기별로 수집된 데이터를 활용하여 도로 용량을 산출하였으며, 일반 구간 및 터널 구간의 도로 용량은 해당 구간에 존재하는 VDS 검지기별로 산출된 도로 용량을 평균한 값을 활용하였다. 분석 대상으로 분류된 터널을 대상으로 수행한 분석 결과는 <Table 3>과 같다. 분석 대상 터널

구간과 일반 구간의 도로용량 평균값은 각각 1,402vphpl, 1,506vphpl이었으며, 중앙값은 1,425vphpl, 1,546vphpl, 최빈값은 1,530vphpl, 1,584vphpl이었다. 각 터널별 일반 구간 대비 도로 용량 감소율을 평균한 결과, 터널 구간에서 일반 구간 대비 도로 용량이 평균 6.5% 감소한 것으로 분석되었으며, 터널 구간과 일반 구간의 도로용량 분포는 <Fig. 2>와 같다. 또한 일반 구간 대비 터널 구간의 도로용량 감소율 분포는 <Fig. 3>과 같다.

<Table 3> Results of analysis

Road capacity of tunnel sections (veh./hour)			Road capacity of general sections(veh./hour)			Road capacity reduction rate in tunnel sections(%)
Average	Mode	S.D.	Average	Mode	S.D.	
1,402	1,530	238.9	1,506	1,584	271.9	6.5



2. 터널 분류별 도로용량 감소율 분석

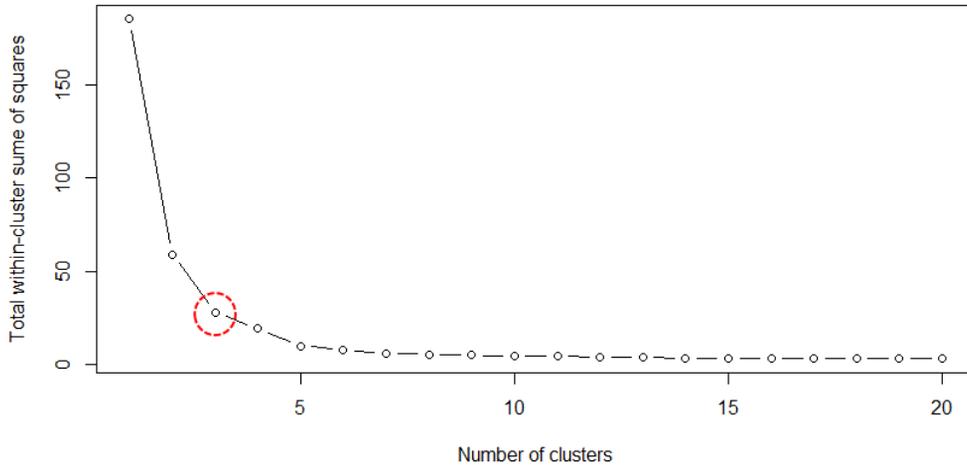
터널 유형별 도로 용량 감소율을 산출하기 위해 터널 연장, 터널 내 차로수, 그리고 시설 한계를 터널 분류 기준으로 선정하였다. 선정된 분류 변수를 활용하여 터널 구간 도로 용량 감소율과 상관관계를 분석하였으며, 그 결과는 <Table 4>와 같다. 상관관계 분석 결과, 터널 내 차로수와 시설 한계 간 상관관계가 0.8로 높고, 터널 구간 도로 용량 감소율이 시설 한계보다 차로수와 상관관계가 높으므로(각각 -0.06, -0.04) 터널 연장과 터널 내 차로수를 터널의 유형을 구분하기 위한 기준으로 최종 선정하였다.

<Table 4> Correlation between road capacity reduction rate and tunnel characteristic variables

Variables	Capacity reduction rate in tunnel sections	Tunnel length	Tunnel height	Number of lanes in tunnel section
Capacity reduction rate in tunnel sections	-	0.05	-0.06	-0.04
Tunnel length	-	-	-0.03	-0.13
Tunnel height	-	-	-	0.80
Number of lanes in tunnel section	-	-	-	-

분석 대상 터널의 연장과 차로수를 기준으로 K-means 클러스터링 기법을 적용하였으며, 적정 군집 개수를 선정하기 위해 The Elbow Method를 활용하였다. The Elbow Method는 K-means 클러스터링 기법에서 적정 군

집의 개수를 선정할 수 있는 방법 중 하나이며, 군집 개수에 따른 군집 내 총 제곱합의 추세를 검토하고 변곡점에 해당하는 군집 개수를 적정 군집 개수로 선정하는 방법이다. K-means 클러스터링과 The Elbow Method를 적용하기 위해 프로그래밍 언어 R을 활용하였다. 터널 구간 도로 용량 감소율을 대상으로 적정 군집 개수를 분석한 결과 군집 개수가 3개일 때 변곡점인 것으로 판단하였으며, 그 결과는 <Fig. 4>와 같다.



<Fig. 4> Elbow curve for K-means clustering

도로 연장에 따라 터널 유형을 구분한 결과, 147~1,022m, 1,041~2,213m, 그리고 2,292~4,465m의 연장을 갖는 터널이 분류되었다. 또한 차로수를 기준으로 터널 유형을 구분한 결과, 터널 내 차로수가 2개, 3개, 그리고 4개인 터널로 분류되었다. 분류된 터널 집단별 도로 용량 감소율은 <Table 5>와 같다. 터널 연장에 따른 집단별 도로 용량 감소율은 각각 6.0%, 6.8%, 그리고 6.9%였으며, 터널 내 차로수에 따른 집단별 도로 용량 감소율은 6.5%, 7.0%, 그리고 4.2%였다. 터널 내 차로수가 많을수록 도로 용량 감소율이 더 클 것으로 예상되었으나 터널 내 차로수가 4개인 경우 2개 및 3개인 경우보다 도로 용량 감소율이 낮았으며, 이는 차로수가 4개인 터널의 개소수가 적음에 따른 결과로 판단된다. 터널 연장을 1,000m 단위로 적용하여 터널 유형을 분류한 결과, 각 집단별 도로 용량 감소율은 각각 6.0%, 6.7%, 그리고 6.8%였다.

<Table 5> Rate of reduction in road capacity in tunnel section by classification based on length and number of lanes

Classification criteria		Classification range	Number of tunnels	Capacity reduction in tunnel section
Tunnel length	Classification results from the K-means clustering	147m ~ 1,022m	69	6.0%
		1,041m ~ 2,213m	87	6.8%
		2,292m ~ 4,465m	30	6.9%
	1,000m unit classification	< 1,000m	76	6.1%
		1,000m ~ 2,000m	79	6.7%
		2,000m	31	6.8%
Number of lanes		2	164	6.5%
		3	17	7.0%
		4	5	4.2%

V. 결 론

본 연구는 터널 내부와 일반 구간의 도로용량을 산출하여 비교하고, 터널 특성 요인에 따른 터널 유형별 도로용량 감소율을 산출하는 데 중점을 두었다. 이를 위해 고속도로 VDS 검지기를 통해 저장된 5분 단위 교통류 데이터를 활용하였으며, 한국도로공사가 관리하는 전체 고속도로 노선 중 동일 기본 구간 내 터널 구간과 일반 구간에 VDS 검지기가 설치되어 있는 터널을 선정하였다. 또한, 비교 대상 일반 구간과 차로수가 같은 터널만을 활용하였다. 그 결과, 총 23개 노선의 186개 터널이 선정되었으며, VDS 검지기 데이터에 PLM을 적용하여 터널 구간과 일반 구간의 도로 용량을 산출하였다. 산출된 도로 용량을 활용하여 분석한 결과는 다음과 같다. 첫째, 고속도로 터널 구간에서 일반 구간에 비해 도로 용량이 감소하는 것으로 분석되었으며, 도로 용량 감소율은 6.5%였다. 둘째, 터널 연장과 차로수에 따른 집단 간 도로 용량 감소율이 상이하였다. 터널 연장이 길어질수록 도로 용량 감소율이 컸으며, 차로수가 3개인 터널이 2개 및 4개인 터널보다 감소율이 컸다.

본 연구를 통해 터널 구간이 일반 구간에 비해 용량이 감소하는 현상이 확인되었으며, 터널 특성 요인에 의해 분류된 터널 유형별 도로용량 감소율이 서로 다른 것으로 분석되었다. 따라서 터널구간의 원활한 교통류를 위해 고속도로 터널부 서비스수준 산정 시 다양한 터널 특성에 따른 보정계수 도입 등의 특별한 교통운영 전략이 필요할 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 2023년도 서울시립대학교 연구년 교수 연구비 지원을 받아 수행하였습니다.

REFERENCES

- Chin, H. C. and May, A. D.(1992), "Examination of the speed-flow relationship at the Caldecott tunnel," *Transportation Research Record*, vol. 1320, pp.75-82.
- Cho, H. W. and Chang, M. S.(1998), "Estimation of tunnel factor from capacity reduction of successive tunnels," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 16, no. 3, pp.7-14.
- Errampalli, M. and Velmurugan, S.(2011), "Estimation of roadway capacity of eight-lane divided urban expressways under heterogeneous traffic through microscopic simulation models," *International Journal of Science and Technology Education Research*, vol. 1, no. 6.
- Hong, S. P., Chang, M. S. and Kim, J. Y.(2006), "Analyzing drivers' physiological reaction in highway tunnel entrances," *The 53rd Conference of Korean Society of Transportation*, pp.694-700.
- Jang, H. B. and Jang, D. H.(1998), "Analyzing traffic characteristics and estimating capacities for typical tunnel sections," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 16, no. 3, pp.15-24.
- Jeong, C. G., Seo, S. H. and Won, J. M.(2002), "A study on the speed variation characteristics according to tunnel intervals in the continuous tunnel conditions," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 20, no. 2, pp.47-58.
- Kim, S. G. and Hong, G. S.(2011), "Traffic flow and capacity analysis at long tunnels on

- expressways,” *The 64th Conference of Korean Society of Transportation*, pp.318-323.
- Kim, S. G. and Hong, G. S.(2012), “Analysis of traffic characteristics by lane changes in freeway tunnels,” *Journal of Transport Research*, vol. 19, no. 1, pp.167-183.
- Kim, Y. S. and Lee, S. S.(2015), “Development of adjustment factors under day and night conditions for freeway capacity to improve traffic safety,” *International Journal of Highway Engineering*, vol. 17, no. 4, pp.107-115.
- Lee, K. Y. and Kim, T. H.(2010), “Factor analysis on psychological cause of speed reduction in expressway tunnel section utilizing Importance-Performance Analysis (IPA),” *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, vol. 30, no. 2, pp.127-134.
- Lee, M. R., Kim, D. G., Kim, H. S. and Lee, C. W.(2013), “Capacity of urban freeway work zones,” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 33, no. 3, pp.1123-1130.
- Lee, H. S.(2002), *A Study on the Speed Variation Characteristics in Tunnel Section of the Expressway*, Master's Thesis, Catholic Kwandong Graduate University.
- Lee, Y. M.(2006), *A study about psychological cause of speed reduction on highway tunnel section*, Master's Thesis, Myongji University Graduate School.
- Li, Z. and Laurence, R.(2015), “An analysis of four methodologies for estimating highway capacity from ITS Data,” *Journal of Modern Transportation*, vol. 23, pp.107-118.
- Minderhoud, M. M., Botma, H. and Bovy, P. H. L.(1997), “Assessment of roadway capacity estimation methods,” *Transportation Research Record*, vol. 1572, no. 1, pp.59-67.
- Moon, J. P. and Cho, W. B.(2014), “Comparing empirical methods of highway capacity estimation,” *International Journal of Highway Engineering*, vol. 16, no. 1, pp.57-62.
- National Geography Information Institute(2020), *The National Atlas of Korea*, vol. 2.
- Park, H. J. and Park, J. B.(2006), “A Study on Driver Behavior in LED Lamp Install Tunnel Section,” *Conference of Ergonomics Society of Korea*, pp.516-519.
- Park, M. J. and Yeo, H. S.(2013), “Highway Bottleneck Identification and Capacity Estimation,” *The 68th Conference of Korean Society of Transportation*, pp.361-365.