JDCS
디지털콘텐츠학회논문지
Journal of Digital Contents Society
Vol. 25, No. 2, pp. 535-546, Feb. 2024

군집분석을 통한 지하도로 내 교통 혼잡 발생 가능성 판단에 관한 연구

박 수 빈[1] · 양 충 헌[2*] · 김 진 국[3] · 이 진 각[4]
[1]한국건설기술연구원 도로교통연구본부 박사후연구원 [2*]한국건설기술연구원 도로교통연구본부 연구위원
[3]한국건설기술연구원 도로교통연구본부 전임연구원 [4]㈜내일이엔시 도로교통안전연구소 연구소장

Calculating the Possibility of Traffic Congestion in Underground Roads Through Cluster Analysis

Subin Park[1] · Choongheon Yang[2*] · Jinguk Kim[3] · Jinkak Lee[4]

[1]Post-doctoral Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea
[2*]Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea
[3]Research Specialist, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea
[4]Research Director, Department of Highway & Transportation Research, NAEIL E&C, Anyang 14056, Korea

[요 약]

지하도로 내에서 교통 혼잡 발생 가능성을 사전에 판단하고 가능성의 정도에 따라 교통흐름을 적절하게 제어하는 것은 교통운영은 물론 교통안전에도 필요하다. 현재 지하도로는 지상과 동일하게 실시간 통행속도를 기준으로 교통 혼잡 발생 여부를 판단하고 있다. 그러나 이는 지상도로와 지하도로의 차이를 고려하지 않은 것이며 교통류 이론 측면에서도 적절하지 않다. 본 연구에서는 지하도로 내 교통 혼잡 발생 가능성을 정량적인 기준과 함께 체계적으로 구분하여 궁극적으로 관리자가 활용 가능한 교통 혼잡 발생 가능성 판단 방법을 제시하였다. 가능성의 정도는 군집분석에 기반을 두었다. 본 연구에서는 거리와 밀도 기반의 계층적 군집분석, K-means clustering, DBSCAN을 이용하였고, 실루엣 분석을 통해 군집분석결과를 상대적으로 비교하였다. 계층적 군집분석과 K-means clustering 결과 적정 군집의 수는 4개, DBSCAN 결과 군집의 수는 2개로 분석되었다. 실루엣 분석결과, DBSCAN은 계수값이 음의 값이 나타나 군집화가 적절히 수행되지 않은 것으로 나타났다. 군집분석을 통한 지하도로 내 교통 혼잡 발생 가능성 판단은 향후 지하도로 운영 및 관리 전략 수립의 근거 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

[Abstract]

Currently, traffic congestion in underground roads is calculated based on real-time traffic speeds, similar to calculations for the surface. However, this ignores the difference between surface and underground driving conditions and is not appropriate in terms of traffic flow theory. We systematically classified the probability of traffic congestion in underground areas with quantitative criteria and ultimately presented a method for determining the probability of traffic congestion for use by road managers. Distance and density-based hierarchical clustering, K-means clustering, and DBSCAN were used, and silhouette analysis was used to compare the clustering results. Hierarchical clustering and K-means clustering determined the number of appropriate clusters to be four, and DBSCAN determined the number of clusters to be two. Based on the silhouette analysis, DBSCAN showed a negative coefficient value, indicating that clustering was not performed properly. It is expected that cluster analysis can be used as a basis for establishing future underpass operation and management strategies.

색인어 : 지하도로, 교통 혼잡, 군집분석, 실루엣 분석, 교통운영

Keyword : Underground Roads, Traffic Congestion, Clustering Analysis, Silhouette Analysis, Traffic Operation

http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2024.25.2.535

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 07 December 2023; **Revised** 29 January 2024
Accepted 01 February 2024

***Corresponding Author; Choongheon Yang**

Tel: +82-31-910-0184
E-mail: chyang@kict.re.kr

Ⅰ. 서 론

최근 메가시티 등 급속한 도시 집중화로 인해 도심 인구 및 교통량 증가에 따른 교통문제가 지속적으로 발생하고 있다. 교통 혼잡에 따라 발생하는 비용은 2019년까지 지속적으로 증가하는 추세를 보였으나, Coronavirus disease 2019 (COVID19)로 2020년에는 전년 대비 약 3% 감소가 있었다. 그러나 최근 들어 교통 혼잡비용은 COVID19 발생 이전 수준으로 증가할 것으로 전망되고 있다[1]. 이와 같이 교통 혼잡비용이 증가하면 국민이 감당해야할 사회비용도 증가하게 된다.

도시에서의 도로 공급은 공간적 측면에서 포화상태에 이르러 도심 고밀도에 따른 부작용도 심각해지고 있다. 경제 수준이 높아질수록 쾌적한 삶을 위한 환경 조성에 대한 요구도 증가하게 된다. 교통과 환경의 긍정적인 조화를 이루기 위해 지상공간에 대한 물리적인 개발은 현실적으로 불가능해지고 있다. 따라서 정부는 정책적인 측면에서 제한된 국토를 효율적으로 활용하기 위해 지하공간개발을 확대하고 있다[2],[3]. 서울시에서는 이미 서부간선지하도로 및 신월-여의지하도로를 건설·운영하고 있으며, 경인고속도로 지하화, 경부고속도로 지하화, 제1순환고속도로 경기 퇴계원~판교 구간 지하화 등이 추진되고 있다. 서울시뿐만 아니라, 부산광역시에서도 만덕센텀 지하도로가 건설 중에 있다.

지하도로는 지상도로와 달리 폐쇄적인 환경으로 되어 있고, 입·출구가 명확하고 우회도로 및 연계도로가 없는 것이 특징이다. 따라서 지하도로 내에서 발생할 수 있는 다양한 돌발 상황에 대해 대처할 수 있는 방안이 지상도로보다 상대적으로 적은 것이 사실이다. 기존 연구에서 지상도로보다 폐쇄적인 공간에서 부정적인 신체 반응 및 불안한 심리가 더 크게 발생되며, 교통정체로 인해 지하도로에 머무는 시간이 많을수록 운전자가 가지는 불안감은 더 크다고 알려져 있다[4]-[7].

따라서 지하도로 내에서 교통 혼잡 발생 가능성을 사전에 판단하고 가능성의 정도에 따라 교통흐름을 적절하게 제어하는 것은 교통운영은 물론 교통안전에도 필요하다. 이를 위해서는 관리자가 지상 및 지하도로를 지속적으로 모니터링 하여 교통상황을 정확하게 인지하는 것이 필요하다. 현재 지하도로는 지상과 동일하게 실시간 통행속도를 기준으로 교통 혼잡 발생 여부를 판단하고 있다. 그러나 이는 위에 언급한 지상도로와 지하도로의 차이를 고려하지 않고 그대로 적용하는 것은 교통류 이론 측면에서도 적절하지 않다. 다시 말하면, 특정 교통량에 두 가지 속도(소통원활 및 정체)가 나타낼 수 있다는 점이다. 이에 본 연구에서는 지하도로 내 교통 혼잡 발생 가능성을 정량적인 기준과 함께 체계적으로 구분하여 궁극적으로 관리자가 활용 가능한 교통 혼잡발생 가능성 판단 방법을 제시하였다. 이는 향후 지하도로의 안전한 운영은 물론, 지상도로와 연계하여 지하도로를 포함한 전반적인 교통망을 대상으로 한 효율적인 교통운영전략을 수립하는데 필요한 정량적인 근거를 마련해줄 수 있을 것으로 기대된다.

Ⅱ. 교통제어 및 운영 관련 국내·외 현황

본 장에서는 현재 사용 중인 교통 혼잡 발생 판단 기준을 검토하였다. 공공 및 민간교통정보제공기관에서 사용하고 있는 교통 혼잡 판단 기준은 표 1과 같다. 지상도로에서 정체는 속도가 20kph 이하, 지하도로에서 정체는 30kph보다 낮은 상황을 의미한다. 도심 터널의 경우, 실시간 통행속도가 15kph 미만일 때를 정체로 규정하고 있다. 이와 같이 도로의 종류에 따라 교통 혼잡 판단 기준은 다르지만 공통적으로 속도 값만을 혼잡 판단 기준으로 사용하고 있다.

지하도로 설계지침(2023)에서는 지하도로의 폐쇄적인 공간적 특성으로 인해 운전자의 심리적 압박감을 고려한 설계속도, 평면선형, 감속차로 등 도로 기하구조 요소에 관하여 명시되어 있다. 하지만 관리자에게 필수적인 지하도로 운영에 관한 내용은 여전히 미흡하다[8].

앞서 언급한 것과 같이, 지하도로 내에서 장시간 운전의 지양, 지하도로 진입 시 우회도로 확보의 어려움, 지하도로와 연결된 지상도로의 교통 혼잡 시 발생 가능한 차량 혼잡(Spill-back) 문제 등을 최소화하기 위해서는 교통소통 상황에 대한 모니터링이 매우 중요하다. 실시간 지하도로 교통소통 모니터링을 통해 지하도로 내 교통 혼잡 발생 전에 관리자가 적절한 대처를 할 수 있도록 하는 것이 필요하다.

지하도로에서의 교통 혼잡, 운전자행태, 시공, 화재 및 배기 등과 관련한 학술적인 연구가 다수 수행되었다[9]-[19]. 그러나 현재까지는 실제 운영 중인 지하도로가 많지 않고, 운영 중인 지하도로는 운영 기간이 비교적 짧기 때문에 활용 가능한 데이터, 실제 운영 사례 등이 부족한 실정이다.

반면에 터널과 관련된 연구가 다수 수행되었으며, 터널 내 교통 혼잡과 병목 현상에 대한 개선 연구가 많이 진행되었다[20]-[23]. 특히, Tympakianaki 등은 터널을 대상으로 반

표 1. 교통 혼잡 판단 기준
Table 1. Traffic congestion judgement criteria

<table>
<tr><th rowspan="2">Road Type</th><th rowspan="2">Division</th><th colspan="10">Speed (kph)</th></tr>
<tr><th>5</th><th>10</th><th>15</th><th>20</th><th>25</th><th>30</th><th>35</th><th>40</th><th>45</th><th>50</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Ground Roads</td><td>Central Government</td><td colspan="2">Congested</td><td colspan="2">Going slow</td><td colspan="6">Smooth</td></tr>
<tr><td>Police</td><td colspan="2">Retard</td><td colspan="2">Going slow</td><td colspan="6">Smooth</td></tr>
<tr><td>Local Government</td><td colspan="2">Congested</td><td colspan="4">Going slow</td><td colspan="4">Smooth</td></tr>
<tr><td>Seoul</td><td colspan="2">Congested</td><td colspan="2">Going slow</td><td colspan="6">Smooth</td></tr>
<tr><td>Underground Roads</td><td>Sinwol-Yeoui Underground</td><td colspan="6">Congested</td><td colspan="3">Going slow</td><td>Smooth</td></tr>
<tr><td>Tunnel</td><td>Namsan Tunnel</td><td colspan="3">Congested</td><td colspan="3">Going slow</td><td colspan="4">Smooth</td></tr>
</table>

복되는 정체구간의 원인을 파악하기 위해 속도 정보를 이용하였다. 이를 근거로 군집분석을 적용하여 교통 혼잡 패턴을 구분한 기존 연구가 수행된 사례가 있다[24].

일반적으로 터널은 별도의 접속부 없이 지상도로와 연결된다. 반면에 지하도로는 지하공간을 통행해야하기 때문에 입·출입부와 램프구간에 종단경사가 존재한다. 이러한 기하구조 적인 특성 또한, 지하도로 내 교통 혼잡 발생 가능성에 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 지하도로의 속도, 구간 교통량 정보 그리고 지상도로 교통정보를 고려하여 판단 기준을 정립하였다.

III. 지하도로 내 교통 혼잡 발생 가능성 판단을 위한 군집분석

3-1 방법론 개요

지하도로 내 교통 혼잡 발생 가능성 판단을 위해 군집분석을 수행하는 이유는 정량적 기준을 근거로 교통 혼잡 발생 가능성 수준을 구분하기 위한 것이다. 앞장에서 언급한 것과 같이 지상도로는 실시간 통행 속도만을 기준으로 교통 혼잡을 판단하고 있다. 그러나 지하도로는 도로 기하구조 및 운전자 행태 특성이 상이하므로 지상도로와 동일한 기준을 그대로 적용하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 교통류 이론에서 속도와 교통량 관계를 고려하여 두 가지 정량적인 기준(구간속도와 구간교통처리량)을 다음 그림 1과 같이 제시하였다. 구간별 교통처리량 비율을 90%이하로, 설계속도와 주행속도의 허용 속도차이를 20kph로 정립하였다[25],[26].

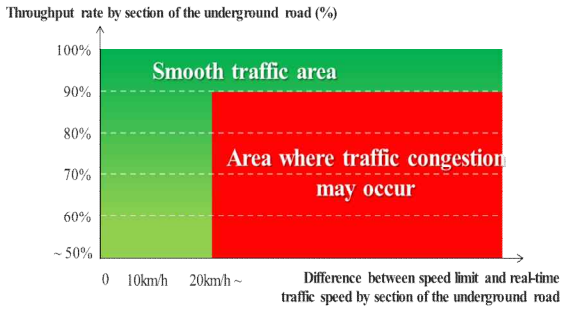


그림 1. 지하도로내 교통 혼잡 발생 가능성 판단을 위한 정량적 기준
Fig. 1. Quantitative standards for determining the possibility of traffic congestion occurring in underpasses

정량적 기준을 근거로 지하도로 내 교통 혼잡 발생 가능성을 판단하기 위한 절차와 지표(Traffic congestion Judgment Criteria And its Process, TJCAP)를 개발하였다[9]. 지하도로내 교통 혼잡 발생 가능성 수준을 파악하기 위한 공간적 범위는 현재 운영되고 있는 신월여의 지하도로로 선정하였다. 미시적 교통류 시뮬레이션 모형인 VISSIM을 이용하여 공간적 범위에 해당하는 네트워크를 구축하고 정산하였다. 전체적인 연구 흐름도는 다음 그림 2와 같다. 그림 2와 같이 군집분석으로 3가지 방법을 수행하였으며 각각의 군집분석 결과를 상대적으로 비교하기 위해 군집화 평가 지표인 실루엣 분석(Silhouette analysis)을 수행하였다.

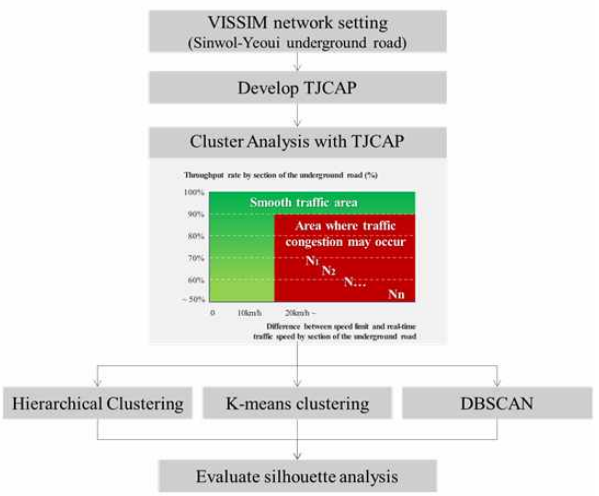


그림 2. 전체적인 연구 흐름도
Fig. 2. Overall study flow

3-2 TJCAP

지하도로는 지상과 지하를 연결하는 접속부 구간이 존재하며 지하도로와 연결된 지상도로와 접속부 구간에 영향을 미치는 혼잡(Spill-back)을 고려할 필요가 있다. TJCAP의 핵심은 교통처리비율과 제한속도와 통행속도간의 차이를 분석하는 것이다. 또한 지하도로 내 램프 구간이 제한속도 (예: 60kph)보다 낮을수록, 지하도로 구간별 속도차이가 발생할수록 교통 혼잡 상황이 발생한 가능성이 크다. 따라서 지하도로 분석구간별 처리 교통량 비율, 분석 구간별 속도차이, 지하도로 상류부 혼잡(Spill-back)을 지하도로 교통 혼잡 발생 가능성 판단 지표로 정의하였다. 신월여의 지하도로와 같이 지하내 분류부(신월 IC→여의대로 방향)가 있는 경우의 TJCAP 산출을 위한 도식화는 그림 3과 같다.

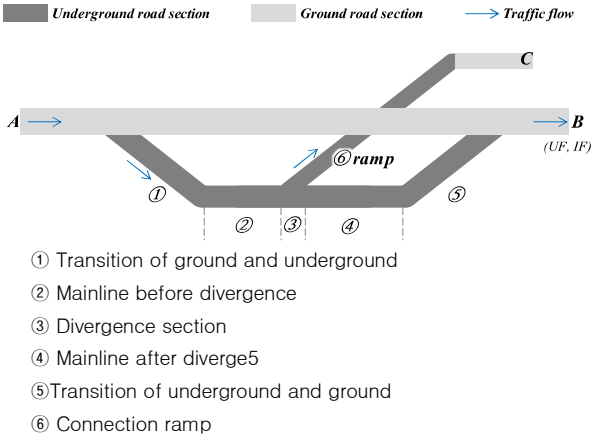


그림 3. 지하 내 분류 시 TJCAP 산정 절차
Fig. 3. TJCAP calculation procedure for diverge

그림 3과 같이 도식화 되었을 때 최종적인 TJCAP 산정을 위한 절차는 총 6개 단계로 구분된다.

Step 1) 램프 진출 교통량 비율 = $\frac{⑥}{②} \times 100$,

직진 교통량 비율 = $\frac{④}{②} \times 100$

Step 2) 진출부 Spill-back = $\frac{⑤}{④} \times 100$

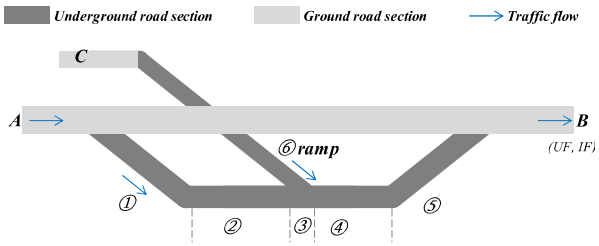
Step 3) 진출부 속도차이= ④-⑤

Step 4) 진입부 Spill-back = $\frac{②}{①} \times 100$

Step 5) 진입부 속도차이 = ①-②

Step 6) 램프 속도 차이 = 60kph-⑥

반대 방향(여의대로→신월 IC 방향)의 경우 지하내 합류부가 존재하는데, 이때의 TJCAP 산출을 위한 도식화는 그림 4와 같다.



① Transition of ground and underground
② Mainline before merge
③ Merge section
④ Mainline after merge
⑤Transition of underground and ground
⑥ Connection ramp

그림 4. 지하 내 합류 시 TJCAP 산정 절차
Fig. 4. TJCAP calculation procedure for merge

마찬가지로 그림 4와 같이 도식화 되었을 때 최종적인 TJCAP 산정을 위한 절차는 총 6개 단계로 구분된다.

Step 1) 램프 진입 교통량 비율 = $\frac{⑥}{④} \times 100$,

진입 교통량 비율 = $\frac{②}{④} \times 100$

Stpe 2) 진입부 Spill-back = $\frac{②}{①} \times 100$

Step 3) 진입부 속도차이 = ①-②,
접속부 속도차이 = ③-⑥

Step 4) 진출부 Spill-back = $\frac{⑤}{④} \times 100$

Step 5) 진출부 속도 차이 = ④-⑤

Step 6) 램프 속도 차이 = 60kph-⑥

3-3 군집분석

지하도로 내 교통 혼잡 발생 가능성 판단을 위한 정량적인 기준을 바탕으로 그림 1과 같이 지하도로내 교통 혼잡 발생 가능성 영역을 보다 세부적으로 구분한다. 이를 위한 군집분석은 1) 계층적 군집분석, 2) K-means clustering, 3) DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise)을 이용하였다. 최종적으로 각각의 군집분석 결과는 평가지표를 이용하여 정량적으로 비교하여 지하도로에 적용 가능한 가장 적절한 군집분석 방안을 제시하였다.

일반적으로 군집분석은 데이터 간 거리 또는 유사성을 측정하여 동질적인 그룹으로 구분하는 통계기법이다. 초기 군집생성 방법에 따라 계층적 군집분석(Hierarchical Clustering)과 비계층적 군집분석(Non-hierarchical Clustering)으로 구분된다. 계층적 군집분석에서 군집간의 거리를 측정은 유클리드 거리(Euclidean distance)가 사용되는데, 아래 식 1과 같다. 그러나 계층적 군집분석은 노이즈와 이상치에 취약하기 때문에 복잡한 형태의 군집을 형성하는데 어려움이 있는 것이 단점이다.

$$d(A,B) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_{Ai} - X_{Bi})^2} \quad (1)$$

$d(A,B)$ = A와 B 사이의 거리
A, B = 지역별 도로 교통안전 변수
X_{ji} = 지역 j에서 지역별 도로 교통안전 변수 I 좌표
n = 측정변수의 수

비계층적 군집분석은 군집 분할 방법에 따라 프로토타입(Prototype-based Clustering), 밀도(Density-based clustering) 기반 등으로 구분된다. 전자는 군집의 프로토타입에 각 데이터의 유사함을 기준으로 군집을 형성하는 기법이다. 일반적으로 많이 사용되는 방법으로는 K-means clustering이 있다. 이는 군집개수(k)를 미리 정해줘야 하며 초기 중심점에 따라 군집의 결과가 달라진다[27]-[34]. 후자는 단위 면적당 데이터의 밀도가 높은 부분을 군집화 하는 기법으로 대표적으로 DBSCAN이 있다. 이는 개수(k)를 미리 정의할 필요가 없으며 군집개수 보다 군집의 반지름(epsilon)과 이러한 군집의 반지름에 포함되는 최소 데이터 개수(min point)를 사전에 정의해야 한다. DBSCAN은 불특정한 형태와 다양한 모양의 군집 형성이 가능하나 반지름과 최소 데이터 개수에 민감하게 반응하는 특징이 있다[35]-[39].

실루엣 분석(Silhouette Analysis)은 군집간의 거리가 효율적으로 분리 되었는지를 나타내는 평가지표이다. 실루엣 분석결과인 실루엣 계수의 산출 식은 식 2와 같다[40].

$$S_i = \frac{b_i - a_i}{\max(a_i - b_i)} \quad (-1 < S_i < 1) \quad (2)$$

여기서,
a_i = i 번째 데이터가 속한 군집의 데이터간 거리의 평균

b_i = i 번째 데이터와 가까운 이웃 군집에 속한 데이터 간 거리의 평균

실루엣 계수 값이 1에 가까워질수록 다른 군집과 거리가 멀리 있는 것을 의미하며 군집화가 잘 되었다는 의미를 가진다. 따라서 실루엣 계수와 같이 정량적인 수치로 군집분석 결과를 판단할 수 있는 실루엣 분석을 이용하여 1) 계층적 군집분석, 2)K-means clustering, 3) DBSCAN 군집분석의 군집화 결과를 상대적으로 비교하였다.

Ⅳ. 군집분석 결과

4-1 방향별 TJCAP 분석결과

지하도로 교통 혼잡 발생 가능성을 분석하기 위해 지하도로 내에서 발생할 수 있는 다양한 교통상황을 고려할 필요가 있다. 신월여의 지하도로의 실제 수집된 첨두시 교통량을 기준으로 발생 가능한 교통수준을 고려하여 시나리오를 구축하였다. 신월여의 지하도로 21년 9월 29일 교통량 데이터를 기준으로 방향별 첨두시 교통량을 도출하였다. 이를 근거로 가정한 지하도로 방향별 시뮬레이션 시나리오는 다음 표 2와 같다.

표 2. 교통시뮬레이션 시나리오
Table 2. Scenarios for simulation

Network	Peak time	Peak volume (veh/hr)	Scenarios (veh/hr)
a) undeground with diverge	8-9	2,000	1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000
b) underground with merge	17-18	820	320, 820, 1320, 1820, 2320, 2820

교통량 시뮬레이션 시나리오별 평균속도와 서비스 수준 분석결과는 표 3과 같다. 분석결과 각 방향별로 진입 교통량이 시뮬레이션 분석 시간동안 통과하지 못한 상황이 발생하였다. 평균 처리 교통량 결과를 바탕으로 신월IC에서 여의대로 방향의 최대 교통처리량은 3,500대/시, 여의대로에서 신월IC방향 최대 교통처리량은 1,820대/시로 나타났다. 지하도로 교통 혼잡 발생 가능성 기준에 따르면 교통 혼잡이 발생 할 수 있는 상황까지를 의미한다. 따라서 서비스 수준 F는 이미 교통 혼잡이 발생하여 도로의 기능이 거의 상실된 상황으로 본 연구의 범위와 맞지 않기 때문에 TJCAP분석에서 제외하였다.

최종적으로 지하도로 방향별로 서비스 수준 F를 제외한 교통량 시나리오를 TJCAP 적용 시나리오로 선정하였다. 평균 TJCAP 분석결과는 표 4와 같다. 궁극적으로, 각 시나리오별 TJCAP을 이용하여 군집분석을 진행하였다.

4-2 군집분석결과

4-1 절에서 언급한대로, 지하도로 교통 혼잡 발생 가능성을 판단하기 위하여 3가지 군집분석을 수행하였다. 각각 군집분석 후 실루엣 분석을 통해 군집화가 가장 적절하게 된 모형을 도출하였다. 분석 네트워크는 방향별로 지하 내 분·합류의 유무에 따라 도로 기하구조가 상이하기 때문에 이를 구분하여 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 R 프로그램을 활용하여 계층적 군집분석을 수행하였고, 그 결과는 다음 그림 5와 같이 최적 군집 수가 4개로 도출되었다.

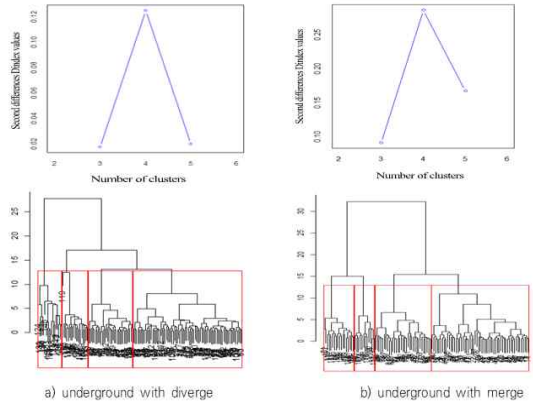


그림 5. 계층적 군집분석 결과
Fig. 5. Results of hierarchical clustering analysis

표 3. 시뮬레이션 분석 결과
Table 3. Results of traffic simulation

a) undeground with diverge				b) underground with merge			
Volume	Throughput	Speed	Level of Service	Volume	Throughput	Speed	Level of Service
1,500	1,504	64.1	B	320	326	58.8	B
2,000	2,052	63.1	C	820	841	57.8	C
2,500	2,539	62.5	D	1,320	1,180	54.5	D
3,000	3,027	60.3	E	1,820	1,594	44.4	E
3,500	3,520	52.1	E	2,320	1,767	22.7	F*(exclude)
4,000	3,553	43.9	F* (exclude)	2,820	1,489	12.1	F*(exclude)

표 4. TJCAP Results
Table 4. TJCAP 결과

a) Underground with diverge							
Volume	Step 1		Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6
	Ramp exit rate	Through traffic rate	Spill-back of exit	Speed difference at exit	Spill-back of entry	Speed difference of entry	Speed difference of ramp
1,500	40.87%	58.69%	97.07%	0.70	100.63%	-2.20	-0.14
2,000	40.82%	58.49%	96.89%	1.08	100.32%	-2.09	0.69
2,500	40.12%	58.82%	96.18%	1.78	100.28%	-1.11	2.65
3,000	39.75%	58.05%	96.17%	2.72	100.02%	0.39	21.67
3,500	36.88%	55.17%	96.31%	4.40	95.74%	14.11	40.63

b) Underground with merge								
Volume	Step 1		Step 2	Step 3		Step 4	Step 5	Step 6
	Entry traffic rate	Ramp traffic rate	Spill-back of entry	Speed difference of entry	Speed difference of merge	Spill-back of exit	Speed difference at exit	Speed difference of ramp
320	27.72%	71.60%	99.06%	-0.99	10.15	99.99%	15.71	-2.00
820	26.97%	72.30%	98.87%	-0.97	10.21	100.08%	15.67	-2.00
1,320	59.72%	40.18%	105.34%	-1.25	6.40	162.97%	32.55	3.22
1,820	64.75%	34.99%	111.32%	-1.13	10.01	99.11%	31.72	-2.34

K-means clustering은 적정 군집의 수를 사전에 정의해야한다. 이를 위해 실루엣 계수를 기반을 적정 군집의 수를 도출하였다. 다음 그림 6에서 가로는 군집의 개수(k), 세로는 실루엣 평균값을 의미한다. 군집의 수를 최소 2에서 최대 6까지 실루엣 계수 평균값을 분석한 결과, 실루엣 계수 평균값이 가장 높은 값을 기준으로 군집의 수가 2, 4개가 가장 적절한 것으로 나타났다.

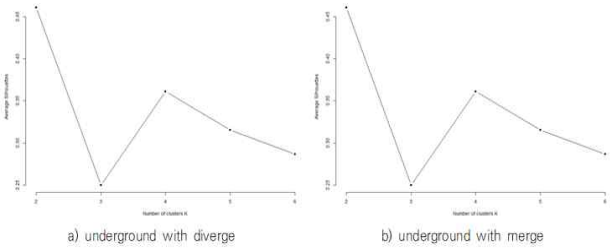
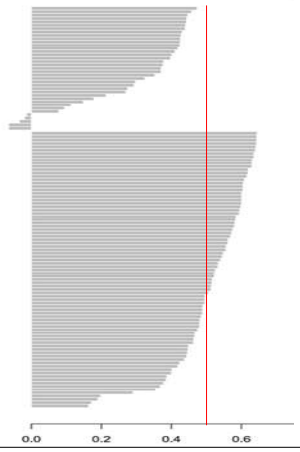
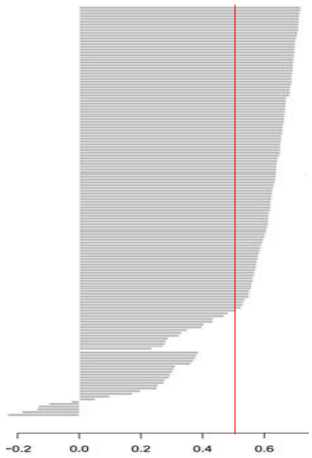
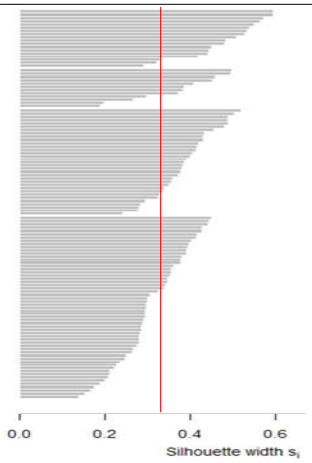
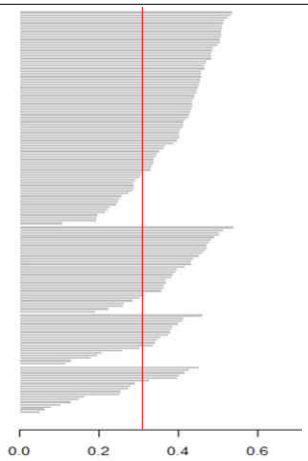


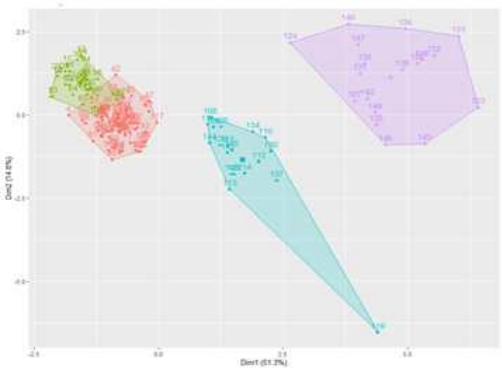
그림 6. 클러스터 수(k)에 대한 실루엣 분석 결과
Fig. 6. Silhouette analysis results for number of cluster(k)

군집개수가 2개 또는 4개인 경우의 실루엣 분석결과를 표 5에 요약하였다. 군집개수가 2개인 경우, 군집의 개수가 4개인 경우보다 실루엣 계수 평균은 높으나 음수 값이 나타났다. 이는 실루엣 계수는 다른 군집으로 할당된 데이터가 있음을 의미한다. 또한 군집의 개수가 4개인 경우, 각 군집별 실루엣 계수가 실루엣 평균값(붉은선)과의 편차가 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 K-means clustering 분석결과 군집이 4개일 때 군집의 수가 가장 적절한 것으로 해석된다. 지상도로에서의 교통 혼잡은 최소 3개 (예: 정체, 서행, 원활)의 기준으로 구분되어 있으며 지하도로 또한 지하도로 관리자와 이용자가 교통 혼잡 수준을 파악할 수 있도록 이와 유사한 혼잡도 기준으로 구분하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

계층적 군집분석과 K-means clustering은 적정 군집개수를 선정하는 과정이 필요하였으나 DBSCAN은 앞서 군집분석과 다르게 사전에 군집의 개수를 정하지 않고 군집화를 수행하는 방법이다. 군집분석 결과, 계층적 군집분석과 K-means clustering은 4개, DBSCAN은 2개의 군집으로 구분되었다. 군집분석에 따른 실루엣 분석 평균결과는 Table 6과 같다. 계층적 군집분석과 K-means clustering의 실루엣 계수 평균값은 유사하며 개별 군집의 실루엣 평균값이 전체 실루엣 계수의 평균값(붉은색)의 편차가 DBSCAN 보다 낮은 것으로 나타났다. DBSCAN 결과 군집의 평균 실루엣 계수가 음수 값이 나타났으며, 이는 군집형성 과정에서 다른 군집으로 분류된 데이터가 존재하는 것으로 해석된다. 또한 군집에 포함된 데이터의 개수를 비교하였을 때 하나의 군집에 치중되어 있는 것으로 나타났기 때문에 DBSCAN의 경우 군집화가 적절하게 수행되었다고 판단하기 어렵다. 최종적으로 군집분석 중에서 군집화 평가 결과가 가장 우수한 것은 K-means clustering 분석이었으며, 지하도로 교통 혼잡 발생 가능성은 4개의 수준으로 구분하는 것이 가장 적절하다고 판단할 수 있다. K-means clustering 군집분석 결과는 그림 7과 같다.

표 5. 실루엣 분석 결과(k=2,4)
Table 5. Results of silhouette analysis (k=2,4)

Clustering		a) underground with diverging	b) underground with merge
k=2	silhouette		
	Average	0.45	0.54
	Average Silhouette of cluster group	0.29	0.61, 0.17
k=4	silhouette		
	Average	0.37	0.36
	Average Silhouette of cluster group	0.39, 0.40, 0.31, 0.25	0.48, 0.37, 0.39, 0.31


a) underground with diverge

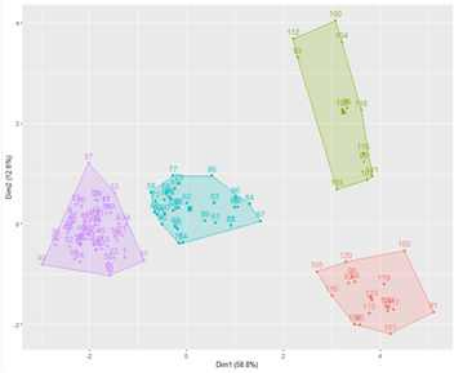
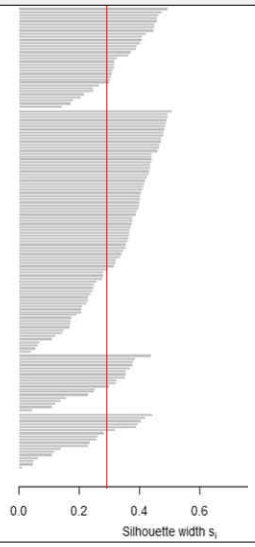
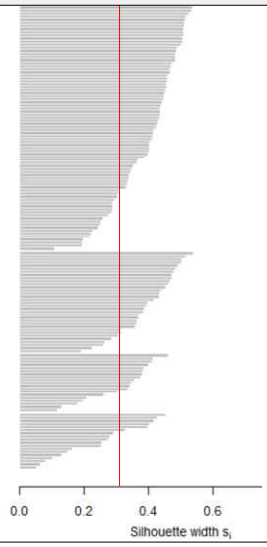
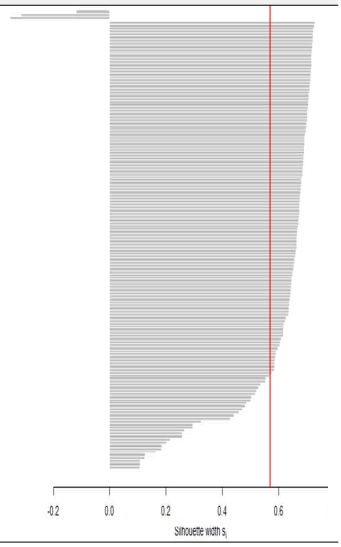
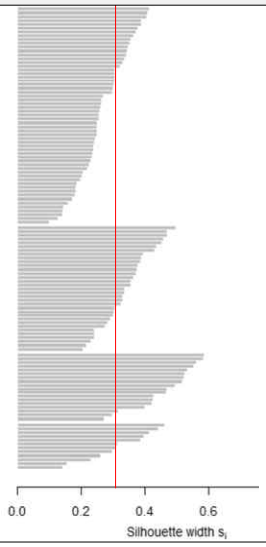
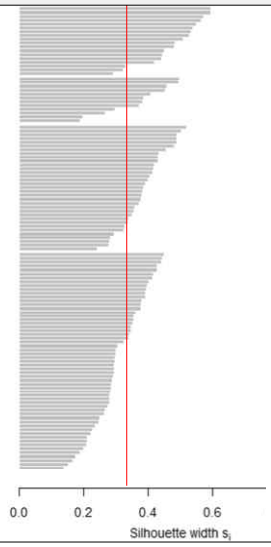
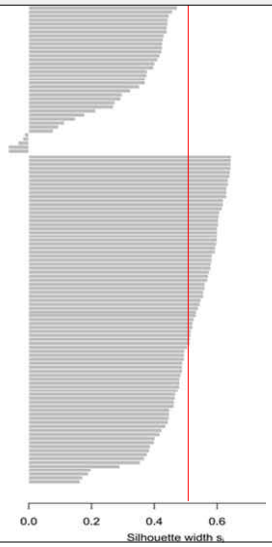

b) underground with merge

그림 7. 클러스터일 플롯 결과
Fig. 7. Results of clustering plot

표 6. 군집분석 실루엣 분석 결과
Table 6. Silhouette analysis results of clustering

a) underground with diverging			
Clustering	Hierarchical Clustering	K-means clustering	DBSCAN
silhouette			
Average	0.32	0.37	0.59
Average Silhouette of cluster group	0.34, 0.33, 0.28, 0.23	0.39, 0.40, 0.31, 0.25	−0.26, 0.60
b) underground with merge			
silhouette	Hierarchical Clustering	K-means clustering	DBSCAN
silhouette			
Average	0.32	0.36	0.45
Average Silhouette of cluster group	0.27, 0.347, 0.49, 0.32	0.48, 0.37, 0.39, 0.31	0.29, 0.51

V. 결 론

도심 고밀도로 인해 지상공간은 이미 포화상태일 뿐만 아니라 이로 인해 도심 교통 혼잡비용도 지속적으로 증가되고 있다. 지상도로와 상호 보완 또는 대체할 수 있는 인프라로 지하도로가 확장되고 있는 추세이다.

지하도로는 운전자 폐쇄감 유발, 지하도로 내부 우회 및 연계도로 부재, 사고 위험성 등을 고려할 필요가 있어 지상도로와 다른 지하도로만의 교통운영이 요구된다. 운전자들이 지하공간에 머무르는 시간이 길어질수록 부정적인 영향을 미치고 돌발 상황에 대한 대처가 지상도로보다는 어렵기 때문에 지상도로보다 엄격한 관리를 통해 교통흐름이 원활하도록 해야

한다.

지하도로 교통운영에 가장 우선적으로 지하도로의 기하구조 및 특성을 고려하여 지하도로를 대상으로 교통 혼잡 발생이 가능한 상황을 판단하기 위한 기준과 방안이 필요하다. 이에 본 연구에서는 지하도로 교통 혼잡 발생 가능성을 판단할 수 있는 정량적 기준을 이용하여 교통 혼잡 발생 가능성을 판단할 수 있는 방안을 제시하였다.

현재 운영되고 있는 서울시 신월-여의 지하도로를 분석대상으로 선정하였으며 실제 첨두시 교통량을 기준으로 교통류 시뮬레이션을 구축하였다. 본 연구에서는 기존 연구에서 제시한 지하도로의 구간별 교통처리량 및 속도를 기반의 교통 혼잡 발생 여부 및 정도를 파악할 수 있는 지하도로 교통 혼잡 발생 가능성 판단 기준 및 프로세스(TJCAP)를 이용하였다. 이는 교통 혼잡이 이미 발생한 상황이 아닌 이전의 교통상황으로, 교통 혼잡이 발생 가능한 상황을 기준으로 진행된다. 이에 첨두시 교통량을 기준으로 교통량을 조절하여 신월-여의 지하도로에서 발생 가능한 시뮬레이션 시나리오를 정립하였다. 교통 시뮬레이션 시나리오 분석결과를 바탕으로 TJCAP을 적용하였다. 시나리오별 TJCAP은 군집분석을 통해 교통 혼잡 발생 가능성 영역을 세분화하였다. 본 연구에서는 거리와 밀도 기반의 계층적 군집분석, K-means clustering, DBSCAN을 수행하였고 실루엣 분석을 이용하여 군집분석 결과를 상대적으로 비교하였다. 계층적 군집분석과 K-means clustering 결과 적정 군집의 수는 4개, DBSCAN 결과 군집의 수는 2개로 분석되었다. 실루엣 분석결과, DBSCAN은 실루엣 계수값이 음의 값이 나타났으며 군집화가 적절히 수행되지 않은 것으로 나타났다.

최종적으로 지하도로 교통 혼잡 발생 가능성 수준은 4단계로 K-means clustering이 교통 혼잡 발생 가능성을 잘 분류하는 것으로 나타났다. 분석결과를 라벨링하여 Level 1(교통 혼잡 발생 가능성 매우 낮음) ~ level 4(교통 혼잡 발생 가능성 매우 높음) 수준으로 정의할 수 있으며, 이러한 분석결과는 향후 지하도로 교통운영 및 관리 전략 수립의 근거 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 RS-2020-KA157786 도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구).

참고문헌

[1] Korea Transport Institute. 2021 National Transportration Cost Forecast [Internet]. Available: https://www.koti.re.kr/user/bbs/anytmRsrchReprtView.do?bbs_no=1145.

[2] The Government of the Republic of Korea, The 5th National Land Comprehensive Plan, Author, Presidential Notice No. 295, December 2019.

[3] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, The 2nd National Road Network Comprehensive Plan, Author, Sejong, MOLIT Notice No. 2021-1109, September 2021.

[4] Z. Feng, M. Yang, W. Zhang, Y. Du, and H. Bai, "Effect of Longitudinal Slope of Urban Underpass Tunnels on Drivers' Heart Rate and Speed: A Study Based on a Real Vehicle Experiment," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 81, pp. 525-533, November 2018. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.032

[5] F. Jiao, Z. Du, S. Wang, L. Yang, and Y. Ni, "Research on Drivers' Visual Characteristics in Different Curvatures and Turning Conditions of the Extra-Long Urban Underwater Tunnels," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 99, 103360, May 2020. https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103360

[6] A. Peña-García, "The Impact of Lighting on Drivers Well-Being and Safety in Very Long Underground Roads: New Challenges for New Infrastructures," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 80, pp. 38-43, October 2018. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.005

[7] G. Yan, M. Wang, P. Qin, T. Yan, Y. Bao, and X. Wang, "Comparative Study on Drivers' Eye Movement Characteristics and Psycho-Physiological Reactions at Tunnel Entrances in Plain and High-Altitude Areas: A Pilot Study," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 122, 104370, April 2022. https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104370

[8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Design Guidelines for Underground Roads in Urban Areas, Author, Sejong, 2016.

[9] S. B. Park, J. P. Moon, J. G. Kim, and C. H. Yang, "Determining Possibility of the Occurrence of Traffic Congestion on Underground Roads," *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 55-65, August 2022. https://doi.org/10.7855/ijhe.2022.24.4.055

[10] S. H. Park, J. K. Lee, C. H. Yang, and J. G. Kim, "Preliminary Study for Risk Assessment Estimation of Urban Underground Connect Section Using VISSIM: Comparison of Characteristics Based on Diverge/Merge," *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 20, No. 5, pp. 59-74, October 2021. https://doi.org/10.12815/kits.2021.20.5.59

[11] S. H. Park, J. K. Lee, C. H. Yang, J. Lee, and Y. K. Kang, "Derivation of Design Elements for Connection through

Urban Underground Using FGI Method," *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 129-136, April 2021. https://doi.org/10.7855/IJHE.2021.23.2.129

[12] J. G. Kim, G. W. Lee, and C. H. Yang, "Prioritizing Efficient Traffic Control Strategies in the On-Off Ramp Junction of Urban Deep Underground Tunnels," *International Journal of Highway Engineering,* Vol. 23, No. 4, pp. 125-132, August 2021. https://doi.org/10.7855/IJHE.2021.23.4.125

[13] C. Yang, J. Kim, S. H. Park, and J. Lee, "Simulation for Traffic Operation and Safety Impact Analysis on Merge/Diverge of Underground Road," *Journal of Digital Contents Society,* Vol. 22, No. 10, pp. 1733-1741, October 2021. http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2021.22.10.1733

[14] S. Jeong, S. Kim, D. Lee, and G. Jung, "An Investigation for Driving Behavior on the On-Ramp Merging Section in Urban Underground Roads Using a Driving Simulator," *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 21, No. 6, pp. 97-114, December 2022. https://doi.org/10.12815/kits.2022.21.6.97

[15] S. Jeong, M. Song, S. Hwang, D. Lee, and W. Kwon, "An Investigation for Driving Behavior on the Exit-ramp Terminal in Urban Underground Roads Using a Driving Simulator," *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 21, No. 1, pp. 123-140, February 2022. https://doi.org/10.12815/kits.2022.21.1.123

[16] D. Kang, S.-W. Cho, H. Kim, H.-I. You, and I. Yun, "Establishment of the Fire Response Guideline for Electric Vehicleson Underground Roads," *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 22, No. 5, pp. 92-107, October 2023. https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.5.92

[17] N.-Y. Kim, J.-B. Jo, and H. Han, "Ventilation Characteristics by Traffic Piston Effect in Underground Network-type Road Junction," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering,* Vol. 27, No. 7, pp. 337-343, July 2015. https://doi.org/10.6110/kjacr.2015.27.7.337

[18] Y. Z. Li and H. Ingason, "Overview of Research on Fire Safety in Underground Road and Railway Tunnels," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 81, pp. 568-589, November 2018. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.013

[19] P. Ntzeremes and K. Kirytopoulos, "Applying a Stochastic-Based Approach for Developing a Quantitative Risk Assessment Method on the Fire Safety of Underground Road Tunnels," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 81, pp. 619-631, November 2018. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.020

[20] T.-Y. Liao, T.-Y. Hu, and W.-M. Ho, "Simulation Studies of Traffic Management Strategies for a Long Tunnel," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 27, No. 1, pp. 123-132, January 2012. https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.08.004

[21] Z. Tan and H. O. Gao, "Traffic Control for Air Quality Management and Congestion Mitigation in Complex Urban Vehicular Tunnels," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 58, Part A, pp. 13-28, September 2015. https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.06.004

[22] D. Xue and Z. Dong, "An Intelligent Contraflow Control Method for Real-Time Optimal Traffic Scheduling Using Artificial Neural Network, Fuzzy Pattern Recognition, and Optimization," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 183-191, January 2020. https://doi.org/10.1109/87.817703

[23] J. Sun, T. Li, M. Yu, and H. M. Zhang, "Exploring the Congestion Pattern at Long-Queued Tunnel Sag and Increasing the Efficiency by Control," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 19, No. 12, pp. 3765-3774, December 2018. https://doi.org/10.1109/tits.2017.2780103

[24] A. Tympakianaki, H. N. Koutsopoulos, and E. Jenelius, "Anatomy of Tunnel Congestion: Causes and Implications for Tunnel Traffic Management," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 83, pp. 498-508, January 2019. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.10.015

[25] S. Baek, D. Han, Y. Choi, J. Kang, J. Park, N. Kim, and H. Lee, A Study on Planning and Operation for Underground Expressway, Expressway & Transportation Research Institute, Hwaseong, EXTRI-2012-26-534.9607, December 2011.

[26] R. Lamm, B. Psarianos, and T. Mailaender, *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*, New York, NY: McGraw-Hill, 1999.

[27] J. Choi, M. Kang, J. Song, and K. Y. Hwang, "A Study on Introduction of Demand Responsive Transport (DRT) in Rural-Urban Mixed Area," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 40, No. 3, pp. 289-304, June 2022. https://doi.org/10.7470/jkst.2022.40.3.289

[28] H. Han, K. Hong, T. Kim, J. Whang, Y. S. Hong, and J. R. Cho, "A Methodology for Estimating Large Scale Dynamic O/D of Commuter Working Trip," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 36, No. 3, pp. 203-215, June 2018. https://doi.org/10.7470/jkst.2018.36.3.203

[29] S. Hwang, D. Lee, S. Kim, and D. Kim, "Driving

Performance Evaluation Based on Cognitive Abilities Using a Driving Simulator," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 38, No. 5, pp. 375-389, October 2020. https://doi.org/10.7470/jkst.2020.38.5.375

[30] S. Jeong, K. Han, J. So, and C. Lee, "A Study of Classification Analysis about Traffic Conditions Using Factor Analysis and Cluster Analysis," *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 22, No. 1, pp. 65-80, February 2023. https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.1.65

[31] J. Kong, E. Lee, J.-H. Chung, and J. Kim, "A Study on the Categorization of Worker's Activity Behaviors and the Relationship between Land Use and Transportation Infrastructure Level in Seoul," *Journal of Korean Society of Transportation,* Vol. 39, No. 4, pp. 430-446, August 2021. https://doi.org/10.7470/jkst.2021.39.4.430

[32] J. Lee and J. Byun, "Development of Representative Driving Cycle for Delivery Truck Using Digital Tachograph," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 38, No. 4, pp. 324-333, August 2020. https://doi.org/10.7470/jkst.2020.38.4.324

[33] S. Lee, E. Cho, C. Oh, S. Kang, and B. Choe, "Pattern Classification of Taxi Drivers Based on Work and Living Conditions for Commercial Vehicle Safety Management System," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 38, No. 3, pp. 218-231, June 2020. https://doi.org/10.7470/jkst.2020.38.3.218

[34] S. Y. Lee, S. Joo, S. M. Youn, and C. Oh, "Spatio-Temporal Analysis of Freeway Emissions for Establishing Public Health Policies Based on Transportation," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 34, No. 5, pp. 377-393, October 2016. https://doi.org/10.7470/jkst.2016.34.5.377

[35] Y. Song, I. Kim, H. Nam, and S. Park, "Exploring Temporal Traffic Variation Patterns with Navigation Data," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 39, No. 3, pp. 221-239, June 2021. https://doi.org/10.7470/jkst.2021.39.3.221

[36] M. Kang, S. Eom, and K. Hwang, "Development of Autonomous Vehicle Critical Situation Scenarios in Urban Areas Based on Kinetic 3D-LiDAR PCD with Triggered Vehicle Detection," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 41, No. 3, pp. 353-374, June 2023. https://doi.org/10.7470/jkst.2023.41.3.353

[37] J. Kim, J. Kim, and B. Park, "A Research on Improving the Shape of Korean Road Signs to Enhance LiDAR Detection Performance," *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 160-174, June 2023. https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.3.160

[38] S. H. Lee, J. H. Lee, Y. T. Kim, and J. H. Jeong, "Correlation Analysis of PMS Data of Incheon Using DBSCAN Clustering," *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 181-188, December 2022. https://doi.org/10.7855/ijhe.2022.24.6.181

[39] S. Moon, D.-K. Kim, S.-Y. Kho, and S.-H. Cho, "Performance Measurement and Determination of Introduction Criteria for Peak Demand Responsive Transit Service," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 39, No. 1, pp. 100-114, February 2021. https://doi.org/10.7470/jkst.2021.39.1.100

[40] J. Tak, J. Hong, and D. Park, "Vulnerability Evaluation by Road Link Based on Clustering Analysis for Disaster Situation," *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 22, No. 2, pp. 29-43, April 2023. https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.2.29

박수빈(Subin Park)

2016년 : 한양대학교 교통·물류공학 학사
2022년 : 한양대학교 교통·물류공학 박사
2022년～현 재: 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 박사후연구원
※관심분야 : 도로안전, 지하도로, 교통운영, 스마트모빌리티

양충헌(Choongheon Yang)

2000년 : 명지대학교 교통공학 학사
2002년 : 명지대학교 교통공학 석사
2008년 : Ph.D. in Civil Engineering at Univ. of California, Irvine
2009년～현 재: 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 연구위원
※관심분야 : 도로안전, 도로관리, 지하도로

김진국(Jinguk Kim)

2006년 : 관동대학교 교통공학 석사
2004년 : 강릉대학교 컴퓨터 공학 학사
2021년 : 한양대학교 교통·물류공학 박사수료
2015년～현 재: 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 전임연구원
※관심분야 : 도로안전, 도로관리, 도로정보, 지하도로

이진각(Jinkak Lee)

1992년 : 명지대학교 교통공학 학사
2001년 : 명지대학교 교통공학 석사
2010년 : 명지대학교 교통공학 박사
2019년～현 재: ㈜내일이엔시 연구소장
※관심분야 : 도로안전, 지하도로, 교통운영, 스마트모빌리티