

VISSIM과 VR 시뮬레이터를 활용한 지하도로 주행행태 분석방안 연구

박 상 현¹ · 이 진 각^{2*} · 고 상 운³

^{1,3}(주)내일이엔시 도로교통안전연구소 전임연구원

^{2*}(주)내일이엔시 도로교통안전연구소 연구소장

A Study on the Analysis of Underground Road Behavior Using VISSIM and VR Simulator

Sang Hyun Park¹ · Jin Kak Lee^{2*} · Sang Un Ko³

^{1,3}Researcher, Department of Highway&Transportation Research, NAEIL E&C, Anyang-si, Gyeonggi-do, Korea

^{2*}Research Director, Department of Highway&Transportation Research, NAEIL E&C, Anyang-si, Gyeonggi-do, Korea

[요 약]

본 연구에서는 국내 지하도로 중 기구축되어 관련 데이터 수집이 용이한 신월여의지하도로를 대상으로 가상현실(VR) 시뮬레이터를 활용하여 지하도로 내 운전자의 주행행태 특성분석을 수행하였다. 분석결과 지하도로 내에서는 주행중과 정지시 선행차량과의 차두간격이 지상도로에 비해 좁고, 선행차량이 감속시 운전자의 반응도가 지상도로 보다 현저히 낮은 것으로 분석되었다. 이에 본 연구에서는 해당 분석결과를 미시적 교통 시뮬레이션인 VISSIM(Verkehr In Städten - SIMulationsmodell)에 반영하여 실제 신월여의지하도로 교통량 및 속도에 대한 관측값과 VISSIM을 통해 분석한 분석값의 모사수준을 평가한 결과 실제와 매우 유사한 것으로 분석되었다. 향후에는 본 연구를 기초로 지하도로 운전자의 주행행태를 반영한 설계기준 마련과 더 나아가 법·기준 제정 등을 위한 연구에 도움이 될 수 있도록 관련 연구가 지속적으로 수행되기를 기대한다.

[Abstract]

In this study, the driving behavior characteristics of drivers in the underground road were analyzed by using a virtual reality (VR) simulator targeting the Shinwol-Yeoui Underground Road, which was built among domestic underground roads and easy to collect related data. As a result of the analysis, it was analyzed that the head distance between the preceding vehicle during driving and stopping in the underground road was narrower than that of the ground road, and the driver's response when the preceding vehicle was decelerating was significantly lower than on the ground road. Therefore, in this study, the results of the analysis were reflected in VISSIM (Verkehr In Städten - SIMulationsmodell), a micro-traffic simulation, and the observed values for the actual traffic volume and speed of the Sinwol-Yeoui Underpass and the simulation level of the analysis values analyzed through VISSIM were evaluated. analyzed to be very similar to reality. In the future, based on this study, it is expected that related research will be continuously carried out to help prepare design standards that reflect the driving behavior of underpass drivers and furthermore, research for the establishment of laws and standards.

색인어 : 도심 지하도로, VR시뮬레이터, VISSIM, Driving Behavior, Uc-win/Road

Keyword : Urban Underground Roads, VR Simulator, VISSIM, Driving Behavior, Uc-win/Road

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2022.23.12.2507>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<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 20 October 2022; **Revised** 01 November 2022

Accepted 29 November 2022

***Corresponding Author, Jin Kak Lee**

Tel: +82-70-7595-6811

E-mail: leejinkak@naver.com

1. 서론

최근 도시 도로교통 문제를 해결하기 위한 방안 중 하나로 소유자에 대한 재산권 침해 등에 대해 자유로울 수 있는 도심도와 같은 지하공간을 활용하여 개발하는 사례들이 여러 나라에서 많이 나오고 있다.[1] 국내에서는 2011년 제2차 도로정비기본계획(2011~2020)을 통해 수도권과 같은 대도시 주변 상습 지·정체 구간엔 지하도로 건설 사업 추진을 명시하였으며, 지·정체 문제가 가장 심각하게 발생하는 서울시의 경우 늘어나는 차량과 재개발에 따른 상습정체를 타개하기 위하여 2009년 U-Smartway 계획을 통해 모두 9개 축의 도심 도심도 지하도로 건설에 대한 계획을 제안하였으며, 2014년 제2차 서울특별시 도로정비 기본계획을 통해 지상도로 확충의 한계와 친환경적 개발 그리고 도시공간의 입체적 활용에 대한 지하도로 건설의 필요성을 제시함으로써 기존부터 검토 중이던 9개축에 대한 논의가 지속적으로 필요하다고 강조하였다.

이 중 현재까지 동서 2축에 해당하는 신월여의지하도로와 서부간선축인 서부간선지하도로는 2021년 개통하여 운영중에 있으며 남북3축에 해당하는 동부간선지하도로를 계획·공사중에 있다.[2]

이처럼 중앙정부와 서울시 등 지자체를 중심으로 지하도로에 대한 구체적인 계획이 활발히 수립 및 진행되고 있으나, 그 기능상 터널과 크게 다르지 않으며 현재의 교통운영 기술 수준으로 적용 가능한 범위에서 추진되고 있다는 측면이 있다.[3] 그러나 향후 고규격화된 지하도로의 도입을 위해서는 기존 교통운영방법의 개선을 위해 지하공간의 특성을 반영하는 등 보다 안전하고 효율적으로 지하도로 공간을 운영할 수 있는 교통운영전략과 세부방안이 요구된다.

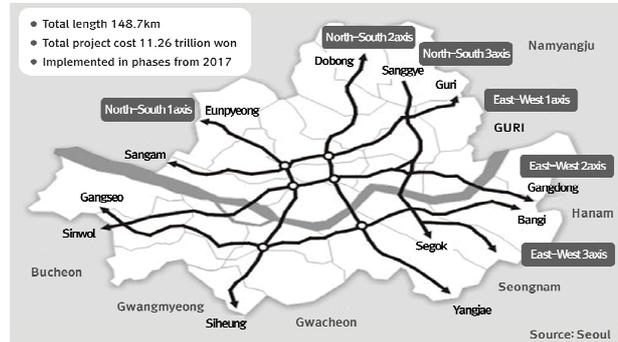


그림 1. 서울시 지하도로망 구축계획

Fig. 1. Underground Road Network Construction Plan of Seoul

특히 지하도로가 향후 지상도로를 대체하거나 보완하여 지상공간의 활용과 도심지 도로 네트워크의 용량증대 기능을 수행하기 위해서는 지상도로와 지하도로가 만나는 나들목과 향후 지하도로 내부에서 지하도로와 지하도로가 연결되는 분기점 등의 접속부 처리와 분·합류 연결로에 대한 설계 및 운영시 기존 고속도로와 다른 운전자 시야의 제한성과 심리적 압박감을 감안하여 어떻게 안전하고 효율적이게 해야 하는지에 대한 연구의 필요성이 높아지고 있다.

이에 본 연구에서는 현재 준공되어 운영중인 신월여의지하도로를 대상으로 가상현실 시뮬레이터를 이용한 지하도로 운전자 주행행태 분석방안을 모색하였으며, 시뮬레이터에 탑재되어 있는 가상현실 소프트웨어 Uc-win/Road의 활용방안과 국내에서 많이 활용되고 있는 마이크로 시뮬레이션 소프트웨어 VISSIM과의 연계를 통한 도심 지하도로 최적화 분석방안을 연구하였다.

표 1. 서울시 지하도로망 구축계획(U-Smartway)

Table 1. Underground Road Network Construction Plan of Seoul (U-Smartway)

Route	Total section	Extension	Characteristics and related routes
North-South 1axis	Siheung-City-Eunpyeon	24.5 km	· Direct connection between the southwest and northwest regions and the city center · Strengthening accessibility to downtown and Yongsan-bu city center
North-South 2axis	Yangjae-Hannam-Dobong	26.3 km	· Directly connected to Gangbuk, downtown and Gyeongbu Expressway · Relief of congestion on Gyeongbu Expressway and Dobong-ro
North-South 3axis	Segok-Seongsu-Sanggye	22.8 km	· Connecting Dongbu Arterial Road and Gangnam · Restoration of Jungnangcheon and Ecological Rivers · Dongbu Arterial Underground Road (Large Vehicle Mixed Road)
East-West 1axis	Sangam-City-Jungnang	22.3 km	· Connection of 2nd Jayu-ro, downtown and northern arterial line · Sharing of traffic on the inner ring road
East-West 2axis	Sinwol-City-Gangdong	22.3 km	· Expansion of east-west arterial road network · Strengthen accessibility to Gyeongin area · Shinwol Yeoui Underground Road (opened in 2021)
East-West 3axis	Gangseo-Seocho-Bangi	30.5 km	· Gimpo Airport, Yeongdong, Jamsil connection · Improving accessibility to Gimpo Airport

II. 연구수행절차

본 연구의 시범 네트워크는 실제 데이터 취득을 위해 현재 준공되어 운영 중인 신월여의지하도로를 선정하였으며 네트워크 구축을 위한 VISSIM 기초자료로 종평면도, 부대시설도와 같은 도로설계자료와 신월여의지하도로 통행패턴을 반영하기 위한 실제 조사된 O/D자료, 그리고 공간적 범위 선정을 위한 영향권 자료를 바탕으로 공간적 범위 등을 설정하여 반영하였으며, 서울시에서 제공한 가장 최근 VDS 데이터를 통해 교통량과 속도를 반영하였다.

지하도로 주행행태 분석을 위한 가상주행환경 구축은 UC-win/Road를 사용하여 구축하였다. UC-win/Road는 토목·교통공학 기반의 연구용 소프트웨어로 도로의 평면/종단선형, 횡단면 등에 사용되는 파라미터가 도로설계에서 사용하는 파라미터를 입력하게 되어있으며, 파라미터만 입력하면 자동으로 도로 선형을 작성하여 정확하고, 효율적으로 분석할 수 있다.

본 연구에서는 도심 지하도로 관련 VISSIM 내 개별차량의 가감속 행태에 영향을 가장 크게 미치는 차량추종모형(Car-following model) 입력변수 중 차량의 종방향 움직임에 가장 큰 영향을 주는 6개 입력변수를 선정하였으며, 가상주행환경 내 3가지의 이벤트를 통해 6개의 VISSIM 입력변수 분석 시나리오를 구성하여 지하도로에서의 주행행태를 분석하고, 마지막으로 분석된 지하도로 가상주행행태를 VISSIM에 적용하여 신월여의지하도로에 대한 분석을 수행하고 이를 실제 지하도로에서 수집된 차량의 속도와 통행량에 대해 모사수준을 평가하였다. 이와 같은 연구수행 절차 및 과정은 아래의 그림 2와 같다.

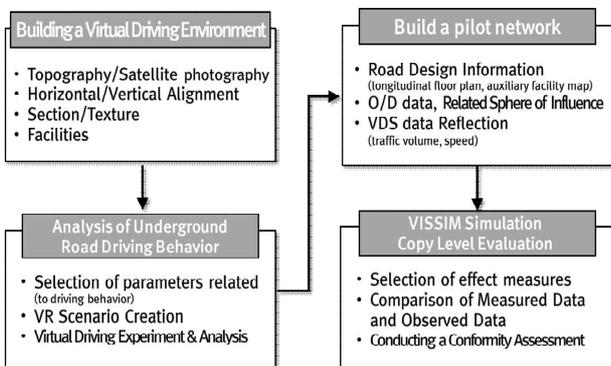


그림 2. 연구수행 흐름도
Fig. 2. Research Conducting Flow chart

III. 도심 지하도로 VR 가상주행 환경 구축

일반적으로 실제현장과 관련 데이터가 있는 경우, 교통운영측면에서 시행하는 접근방법이 시뮬레이션 분석 연구이다. 시뮬레이션은 실제현장과 관련 데이터가 있는 경우, 특정 정책 또는 기술 적용 전·후 분석 (Before and after)을 통해 효

과를 평가하는데 자주 활용된다. 하지만, 이런 시뮬레이션은 실제와 차이가 있는 한계점은 존재 할 수 밖에 없는데 이런 차이를 줄이고자 실제 주행 운전자의 인적요인이 반영된 실험방법인 가상현실(VR) 모의주행 시뮬레이터(Driving Simulator)가 활용되고 있다.[4]

가상현실 시뮬레이터는 실제 사람이 탑승하므로, 생체반응 측정장비를 이용하여 운전자의 뇌파(졸음, 각성, 불안 등), 시선주적(주시횟수, 주시시간, 시선이동) 등 인적요인과 관련된 데이터와 시뮬레이션 주행기록 데이터를 통해 주행시간, 주행속도, 주행거리, 가감속도, 브레이크 파워, 핸들 회전 각도 등에 대한 데이터를 추출할 수 있어 이를 시뮬레이션 분석과 연계·반영하여 보다 정밀하고 현실성 있는 교통운영 연구를 수행할 수 있다.

3-1 가상주행실험 구축순서

VR환경 모델링은 현실과 최대한 유사하게 모사 되어야 하며, 이를 위해서 정확한 설계자료와 VR환경 구현 소프트웨어가 필요하다. 본 연구에서는 지하도로 관련 실증 데이터를 얻을 수 있도록 현재 운영중인 신월여의지하도로를 대상으로 수행하였으며, VR환경 구축은 UC-win/Road를 사용하여 구축하였다.

UC-win/Road는 3D VR 환경을 구현하고, 각종 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 개발된 연구용 VR 소프트웨어로 도로·교통·토목공학을 기반으로 하여 개발된 소프트웨어로써 가상현실에서 도로를 실제도로와 유사하게 작성하는데 최적화되어 있는 프로그램이다.

도로의 평면선형, 종단선형, 횡단면 등에 사용되는 파라미터가 도로설계에서 사용하는 파라미터를 입력하게 되어 있으며, 파라미터만 입력하면 자동으로 도로 선형을 작성하여 도로를 정확하고, 효율적으로 작성할 수 있다. 이에 지하차도 및 터널 작성 시 터널 단면 작성에 대한 자유도가 높으며, 3D 모델링 된 터널 시설물을 원하는 위치에 배치할 수 있어 실제와 같은 터널을 모사할 수 있다.

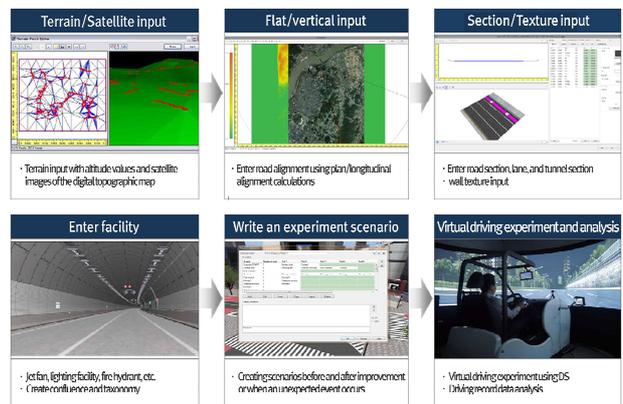


그림 3. VR Data 구축 순서
Fig. 3. VR Data Construction Sequence

또한, 시설물의 설치 전·후, 선형의 개선 전·후, 타차량의 움직임 제어를 통한 돌발 이벤트 등 원하는 도로·교통 환경을 시나리오 기능을 통해 구현할 수 있어 실험 설계에 맞는 실험 환경을 구축할 수 있고, 차량 시뮬레이터와 연동하여 실제 차량과 유사한 환경에서 가상 주행실험이 가능하다. 특히 가상 주행 시 주행시간, 현재 주행위치, 주행거리, 주행속도, 차로 편측, 페달 답력 등의 주행기록데이터가 자동으로 기록, EXCEL 형태로 저장되어 분석에 용이하다. 본 연구에서의 가상현실 맵(VR Map)의 구축순서는 그림 3과 같다.

3-2 가상주행실험 환경 구축

1) 지형 및 위성지도 작성

UC-win/Road는 지형데이터를 XML, Shape file, DWG, DXF 등의 파일 형태로 불러올 수 있다. 일반적으로는 국토지리정보원에서 제공하는 수치지형도를 받은 후 Elevation관련 정보가 있는 레이어만 추출하여 XML 형태로 변환하는데 위성사진은 AutoCAD를 통하여 수치지형도와 스케일과 위치를 동기화한다. 이후 각각의 파일을 불러오기 하여 지형 및 위성 지도를 입력하였다.

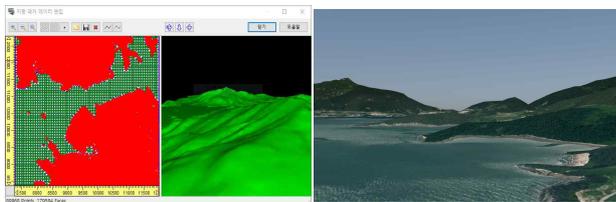


그림 4. 지형 및 위성지도
Fig. 4. Topographic and Satellite Maps

2) 평면선형 작성

UC-win/Road 평면도 상에서 도로작성을 한 후 도로설계와 같은 평면선형의 BP, IP, EP 각각의 위치좌표와 곡선유형, 곡선반경 등과 같은 파라미터들을 입력하여 도로의 평면선형 작성하였다.

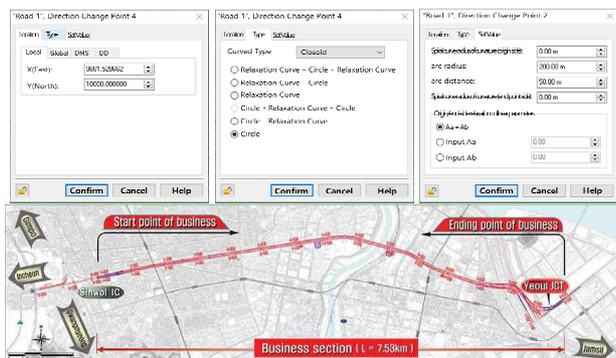


그림 5. 평면선형 관련 파라미터 입력
Fig. 5. Input of Horizontal Alignment Parameter

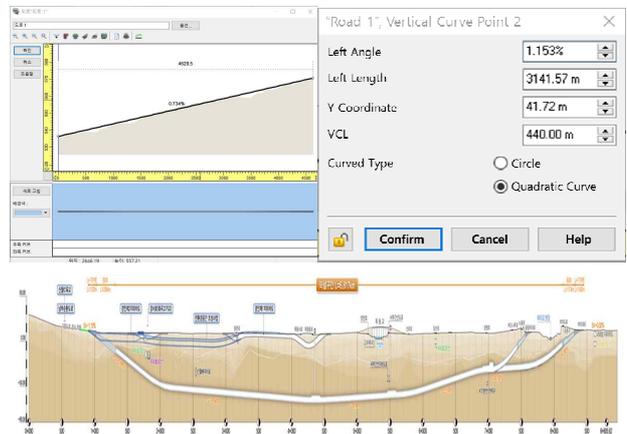


그림 6. 종단선형 관련 파라미터 입력
Fig. 6. Input of Vertical Alignment Parameter

3) 종단선형 작성

평면선형이 작성된 후 신월여의지하도로의 종단선형을 입력하는데, 종단선형 또한 도로설계에서 사용하는 BP와 EP, VIP의 Elevation과 각 VIP의 STA., VCL 등 관련 파라미터를 UC-win/Road 입력하여 종단선형을 작성하였다.

4) 횡단면/터널단면 작성

이후 도로의 횡단구성 요소 및 제원 등을 신월여의지하도로 설계에 맞게 작성한다. 차로수, 가드레일 유무, 중분대 유무, 차로폭, 길어깨 폭, 보도 유무, 보도폭, 식수대 유무, 식수대 폭, 절·성토면 기울기, 터널 및 교량의 단면 등을 작성하며, 터널의 높이, 터널 단면의 반경, 공동구 높이 등 터널단면 또한 작성한다.

5) 시설물 배치

신월여의지하도로의 시설물 배치는 UC-win/Road의 3D 모델 라이브러리와 서버에서 다운로드 받아 각 설계 위치에 배치하였다. UC-win/Road의 기능을 이용해 존재하지 않는 시설물 모델을 3ds, pk3, bmp, avi, mp4, jpg, DXF, DWG, 3D CAD, fbx 등 다양한 형태로 불러왔으며, 노면표시의 텍스트는 UC-win/Road 자체 기본 기능인 3D 텍스트 추가 기능을 활용하여 직접 문구를 작성·입력하였다.

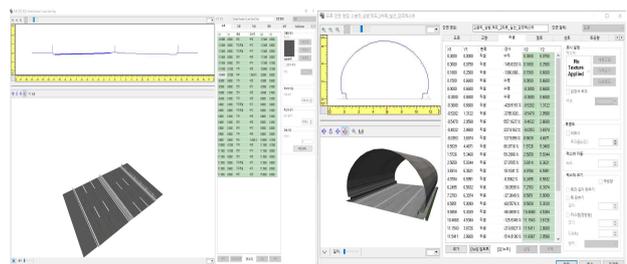


그림 7. 횡단면/터널단면 입력화면
Fig. 7. Cross/Tunnel Section Input Screen

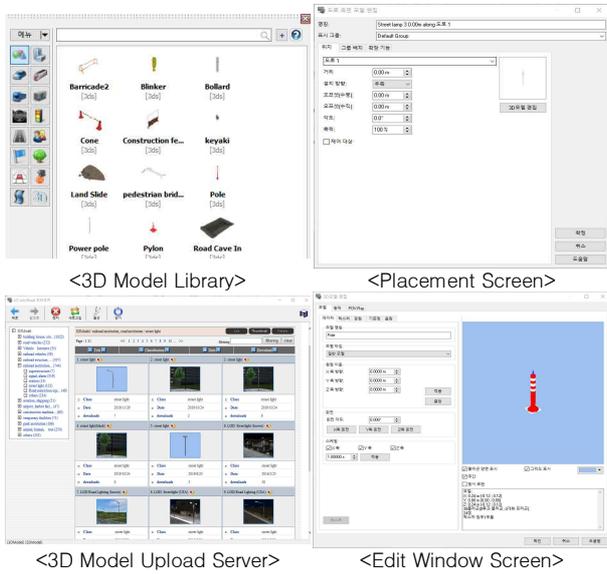


그림 8. 3D 모델 배치 관련 화면
 Fig. 8. 3D Model Placement Screen

3-3 가상주행 실험데이터 및 분석방법

1) 지하도로 주행기록데이터

주행 시뮬레이터를 이용한 지하도로 가상주행 시 UC-win/Road의 DS log data를 사용하여 주행 데이터를 기록할 수 있다. DS log data는 주행시간, 주행속도, 주행거리, 가·감속도, 브레이크 파워, RPM, 핸들 회전 각도, 차로편측위치 등을 0.01초마다 자동으로 기록할 수 있으며 분석에 용이할 수 있도록 파일의 형태를 변환할 수 있다.

2) 뇌파측정 장비 데이터

본 실험 주행시 운전자의 뇌파분석을 위해 머리에 단자를 부착하고, 신경세포들의 정보 전달·처리하는 과정에서 발생하는 전자기파의 강도를 측정함으로써 사람이 느끼고 있는 심적상태를 기록하였다. 주로 졸음 및 집중력 감소에 대한 분석은 α 파(4~8Hz), 불안, 스트레스 등과 같은 주행 쾌적성 분석은 β 파(13~30Hz)를 활용하여 분석한다. 뇌파를 측정하는 장비로는 Laxtha의 QEEG-64FX 또는 EMOTIV의 EPOC X 등을 활용하였다.

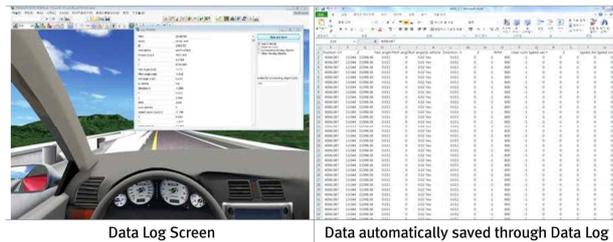


그림 9. 주행기록 데이터
 Fig. 9. Driving Record Data

표 2. 뇌파의 주파수별 심리 상태

Table 2. Psychological state by frequency of brain waves

Div	Frequency	Mental/Physical State
δ	0~4 Hz	· Suspicion of brain tumor, encephalitis, etc. when activated in sleep or non-sleep state
θ	4~8 Hz	· Occurs during sleepiness or deep nouns, most active in the early REM state of sleep
α	8~13 Hz	· Most active in the basic state, relaxed, relaxed state.
β	13~30 Hz	· Most active in states of arousal, attention, concentration, or anxiety, tension

3) 분석방법

위와 같이 UC-win/Road 프로그램을 통해 지하도로 운전자 주행행태 관련 분석을 수행하고 또 이를 VISSIM에 적용하기 위해서는 두 프로그램에서 운전자 주행행태 관련 입력 변수를 서로 매칭하여 분석하여야 한다.

그러나 VISSIM의 40개 이상의 주행행태 입력변수에 대한 조정이 필요한데, 각 입력변수는 실수단위로 모든 변수의 최적값을 도출하기 위해서는 그 범위가 무한하고 시간적 어려움이 있어 대부분의 연구에서는 입력변수를 선별하고 변수값을 최적화 하는 방법을 활용하였다.[3] 이에 본 연구에서는 VISSIM 내 개별차량의 가·감속 행태에 영향을 가장 크게 미치는 차량추종모형)의 주요 파라미터와 이와 관련된 UC-win/Road DS log를 매칭하여 도심 지하도로 관련 VISSIM 내 6개의 주요 입력변수를 아래 표 3과 같이 선별하였다.

표 3. VISSIM과 UC-win/Road 주행행태 관련 입력변수 매칭

Table 3. Matching of input variables related to the driving behavior of VISSIM and UC-win/Road

Input Variables	UC-win/Road DS log	Explanation	default
CC0	-Position X, Y	Distance from preceding vehicle when stopped	1.50m
CC1	-Time -Distance Along Road	Leading time of the following vehicle	0.90s
CC2	-Distance Along Road	Difference in distance from the vehicle in front	4.00m
CC4	-Speed in kph -Distance Along Road	Driver response to acceleration	-0.35
CC5	-Speed in kph -Distance Along Road	Driver response to deceleration	0.35
CC8	-Time -Speed in kph	Acceleration at start	3.50

CC0(stand still distance)은 선행차량이 정차하였을 때 후행차량과의 간격을 의미하며, CC1(headway time)은 후행차량이 이동 중에 선행차량과 유지하려는 차두시간을 나타낸다. VISSIM에서의 안전유지거리는 CC0 및 CC1과 관련성이 있다. CC2(following variation)는 통행에서 발생하는 교통진동(traffic oscillation)의 크기를 나타낸다. 이는 차간 최소거리를 나타내는 안전유지거리에 추가되는 여유거리를 의미한다. CC4(Negative speed difference)와 CC5(Positive speed difference)는 각각 선행차량의 가속과 감속에 따른 운전자의 반응도를 나타내며, 해당 값이 낮을수록 선행차량의 가속과 감속에 대한 민감도가 높아진다고 할 수 있다. 기타 최적화 모형에 포함되지 않은 나머지 입력변수에는 기본값을 적용시켜 분석을 진행하였다.

IV. 지하도로 운전자 주행행태 분석

4-1 운전자 주행행태 입력변수 분석 시나리오

1) 시나리오 개요

본 연구의 공간적 범위인 신월여의 지하도로의 시점부는 신월IC이며, 구간 중간에 분·합류부인 여의JCT에 따라 중점부인 올림픽대로와 여의대로로 이어진다. 이처럼 구간 내에 분·합류부가 존재함에 따라 차량의 가·감속 및 차로변경 행태가 발생할 수 있어, 지상과 지하도로에서의 운전자 주행행태를 분석하기 위한 최적의 구간이라고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 아래와 같이 3개의 이벤트를 통해 6개의 VISSIM 입력변수 분석 시나리오를 구성하였다.

- ① 지하도로 직선구간에서 전방 주행차량을 급정지시킴으로써 선행차량과 후행차량의 간격과, 정지상태에서 다시 가속할 때의 가속도를 분석함
- ② 분류부 구간에서의 선행차량 가·감속을 통해 후행차량 운전자의 반응 민감도를 분석함
- ③ 전체 구간에서 운전자의 차두시간과, 전방차량과의 간격에 대한 편차를 지속적으로 수집함

표 4. 분석 시나리오별 VISSIM 입력변수
Table 4. VISSIM Input Variable Analysis Scenario

Num	Point/Section	Event	Analysis Items
1	STA.3+000	vehicle stop	CC0, CC8
2	STA.4+500	Acc/dec of vehicle	CC4, CC5
3	All Section		CC1, CC2

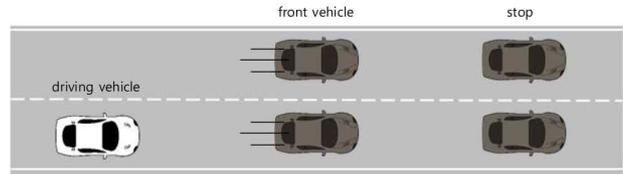


그림 10. ① 선행차량 정지 시나리오
Fig. 10. ① Preceding Vehicle Stop Scenario

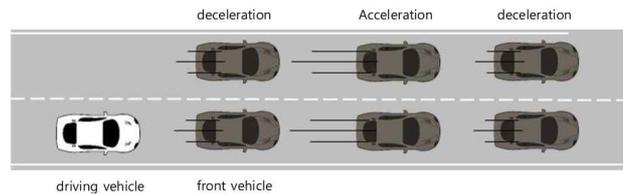


그림 11. ② 선행차량 가·감속 시나리오
Fig. 11. ② Preceding Vehicle Acc/Dec Scenario

2) 시나리오 세부내용

① 선행차량 정지

첫 번째 이벤트인 선행차량 정지의 시나리오는 1, 2차로 모두 선행차량을 이벤트 모델로 발생하고 구분이 가능하도록 각각의 Custom ID를 지정하고, 주행차량은 전방차량을 추종하도록 하는 것을 기본 사항으로 지정하며, 실험 지점인 STA. 3+000에서 전방차량이 정지하였다가 일정 시간 후 다시 속도를 회복하는 것을 프로그래밍하여 이 과정에서 기록된 주행데이터를 통해 VISSIM 입력변수 중 CC0와 CC8 항목에 대한 분석을 수행한다.

② 선행차량 가·감속

두 번째 이벤트인 선행차량 가·감속의 시나리오는 앞서 ① 선행차량 정지 이벤트에서 발생된 Custom ID가 부여되어 있는 선행차량을 계속해서 추종하는 것을 기본 사항으로 지정하며, 실험 구간인 STA.4+500~6+500 구간동안 전방차량의 속도를 ±20km/h 이내로 가·감속(속도제한 80km/h 일 때 60km/h~90km/h 정도로 변속)을 수행하여 기록된 주행데이터를 통해 VISSIM 입력변수 중 CC4와 CC5에 대한 데이터 분석을 수행한다.

③ 전체구간

마지막 네 번째 이벤트인 전체구간의 경우 전체 구간에서의 운전자의 주행데이터 중 차두시간을 통해 VISSIM 입력변수인 CC1와 CC2를 분석한다. CC1 (Gap time Distribution), CC2 (‘Following’ distance oscillation)는 특정 이벤트가 아닌 주행 전체 구간에서 취득할 수 있기 때문에 전체 구간의 평균값으로 분석한다.

3) 실험자 구성 및 실험 진행방법

실험자는 통계적 유의성을 확보할 수 있는 총 37명을 대상으로 실험을 수행하였으며, 실험자는 운전면허를 소지하고 운

전 기간 2년 이상의 평소에 운전을 하는 사람들로 모집하였다. 또한 일반 운전자를 대상으로 하는 실험이라는 점에 한해 운수업 종사자는 실험자 모집에서 제외하였다.

실험자의 연령대별 구성과 성별 비율은 20대 7명(남성 4명 / 여성 3명), 30대 10명(남성 8명 / 여성 2명), 40대 10명(남성 5명 / 여성 5명), 50대 10명(남성 7명 / 여성 3명)으로 아래 표 5와 같다.

표 5. 참가 인원 구성

Table 5. Composition of Expeent Participants

Age	20's	30's	40's	50's	Total
Male	4	8	5	7	24
Female	3	2	5	3	13
Total	7	10	10	10	37

가상주행실험은 본 실험 이전에 실험자가 시뮬레이터 실험 장비에 적용할 수 있도록 약 5분 가량의 예비주행을 경험하고 그 이후, 25분 가량의 본 실험을 진행하였다. 주행실험의 모든 과정은 실험자 및 장비 관리자의 통제하에 이루어졌고, 실험자에게는 본선 설계속도(80km/h)와 연결로 설계속도(50km/h), 차로변경허용구간에 대한 정보를 안내하여 개별 운전경험을 바탕으로 도로상의 이정표지, 속도표지 등을 준수하여 주행하도록 하였다.[5]

4-2 지상·지하 운전자 주행행태 분석결과

1) 운전자 지하도로 주행행태 특성 분석

표 6. 운전자 일반 주행행태 분석

Table 6. Driver's General Driving Behavior Analysis

Div	Road Type	Min	Max	Age	Average Difference
Headway (m)	Ground	0.34	77.06	38.20	-1.29 (-3.38%)
	Under ground	0.30	85.45	36.91	
Speed (km/h)	Ground	2.27	89.32	70.15	0.20 (0.28%)
	Under ground	1.60	92.91	70.34	
Acceleration Responsiveness	Ground	0.47	2.03	1.51	-0.01 (-0.58%)
	Under ground	0.48	2.10	1.50	
Deceleration Responsiveness	Ground	-2.78	-0.41	-1.45	0.59 (-40.69%)
	Under ground	-1.45	-0.40	-0.86	

본 연구에서는 앞서 시나리오 분석을 통해 지상도로와 지하도로에서의 운전자 일반적인 주행행태 특성분석으로 차두간격, 속도, 감·가속 정도에 대한 분석을 수행하였다.

분석결과, 지상도로 대비 지하도로의 차두간격은 평균적으로 3.38% 좁은 것으로 나타났으며, 선행차량이 감속시 이에 대한 반응도가 약 40.69% 정도 늦게 나타나는 것으로 분석되었다. 이에 비하여 속도와 가속도 반응도의 차이는 크게 나타나지 않아 주행시 특정 상황에 따른 감속을 제외한 선행차량의 추종 변화량이 적은 것으로 분석되었다.

2) VISSIM 입력변수 시나리오 분석

앞서 분석한 지상·지하에서 동일 구간의 운전자의 주행행태에 대한 분석결과를 VISSIM 입력변수로 선정된 CC0, CC1, CC2, CC4, CC5, CC8에 맞추어 아래 표 7에 제시하였다. 본 연구에서 차두간격은 주행 시뮬레이터 수집 자료를 바탕으로 동일 시간일 때 선행차량과의 간격으로 정의하였다. 시뮬레이션 분석결과 정지시 선행차량과의 평균거리(CC0)는 지상 26.37m, 지하 25.15m로 지하에서 약 4.62% 낮은 거리를 유지하는 것으로 분석되었으며 정지 후 차량의 가속 반응도(CC8) 또한 지하에서 약 5.28% 정도 낮게 분석되어 지상보다 지하에서 선행차량의 정지에 대한 반응이 대체적으로 낮은 것으로 분석되었다.

차두시간(CC1)은 물리수식을 이용해 차두간격(CC2)의 분석결과에 주행속도를 나누어 환산하여 산출하였다. 분석결과 주행 중 선행차량과의 차두시간과 차두간격은 지하가 지상보다 각각 약 1.89%(차두시간), 3.38%(차두간격) 낮은 것으로 나타나 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다. 감속반응도(CC5)와 가속반응도(CC4)의 경우 앞서 운전자 주행행태 분석결과와 동일한 값으로 적용하였다.

표 7. 운전자 일반 주행행태 분석

Table 7. VISSIM Input Variable Scenario Analysis Result

Div	Road Type	Min	Max	Age	Average Difference
CC0 (Dist Front Vehicle)	Ground	10.67	37.91	26.37	-1.22 (-4.62%)
	Underground	11.07	36.85	25.15	
CC1 (Time Headway)	Ground	1.52	1.66	1.59	-0.03 (-1.89%)
	Underground	1.46	1.60	1.56	
CC2 (Headway)	Ground	0.34	77.06	38.20	-1.29 (-3.38%)
	Underground	0.30	85.45	36.91	
CC4 (Acc Respons)	Ground	0.47	2.03	1.51	-0.01 (-0.58%)
	Underground	0.48	2.10	1.50	
CC5 (Decel Respons)	Ground	-2.78	-0.41	-1.45	0.59 (-40.69%)
	Underground	-1.45	-0.40	-0.86	
CC8 (Acc After Stop)	Ground	0.09	8.96	2.84	-0.15 (-5.28%)
	Underground	0.18	8.67	2.69	

본 연구에서는 VISSIM 내 개별차량의 가·감속 행태에 영향을 가장 크게 미치는 차량추종모형(Car-following model) 6개 입력변수에 대해 시나리오별로 분석한 결과를 제시하였다. 그러나 가상 주행실험은 실제 주행이 아니기 때문에 실험자의 평소 주행행태와 상이한 점이 나타날 수 있다. 또한 운전자의 주행행태를 시뮬레이션이 구현하는데 실험환경에 한계가 있기 때문에 주행 시뮬레이션 결과값은 실제 환경보다 상이한 수치가 나타나게 된다. 이에 따라 본 연구에서는 시뮬레이션 값을 파라미터에 바로 적용하는 것이 아닌 지상과 지하 운전행태의 비율 값을 적용함으로써 지하도로의 특성을 반영하고자 한다.[6]

V. 지하도로 주행행태 모사수준 평가

5-1 모사수준 평가 효과척도

본 연구에서는 앞서 분석한 지상과 지하도로에서 운전자 주행행태 비율 값을 VISSIM의 Driving Behaviors에 적용 후, 신월여의지하도로 지하도로에서 수집된 차량의 속도와 통행량에 대한 모사수준을 평가하였다.

모사수준을 평가하는 효과척도에는 평균절대비율오차(Mean Absolute percentage Error, MAPE), 평균제곱근백분율오차(Root Mean Squared Percentage Error, RMSPE)를 적용하였다.

MAPE와 RMSPE는 일반적으로 평균통행속도 및 통행량에 대한 효과척도로 활용된다. MAPE는 오차가 예측값에서 차지하는 정도를 나타내는 지표로 본 연구에서는 Equation 1와 같이 관측된 평균통행속도 \bar{v} 와 통행량 \bar{q} 에 대하여, 시뮬레이션에서 도출된 평균통행속도 v 와 통행량 q 의 평균절대비율오차로 산정하였으며, RMSPE는 Equation 2와 같이 평균통행속도와 통행량의 평균제곱근백분율오차로 산정하였다. MAPE와 RMSPE는 일반적으로 효과척도가 0.05 이하로 도출되면 모사수준이 합리적인 것으로 판단한다.[3]

$$MAPE = \frac{1}{2} \left(\left| \frac{\hat{v}-v}{\hat{v}} \right| + \left| \frac{\hat{q}-q}{\hat{q}} \right| \right) \tag{1}$$

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\hat{v}-v}{\hat{v}} \right)^2 + \left(\frac{\hat{q}-q}{\hat{q}} \right)^2 \right]} \tag{2}$$

여기서, \hat{v} : 관측된 평균통행속도 v : 분석된 평균통행속도
 \hat{q} : 관측된 통행량 q : 분석된 통행량

5-2 지하도로 주행특성 반영

앞서 분석한 운전자의 지하도로 주행특성을 반영하기 위하여 VISSIM 프로그램의 Driving Behaviors 입력변수 중 개

별차량의 차량추종모형(Car-Following model)의 주요 입력변수 6개의 기본값에 지하도로 주행특성 비율값을 반영하여 도심 지하도로 운전의 거동을 구현하였다. 지하도로 주행특성의 반영 전 값과 반영 후 값은 아래 표 8과 같다.

표 8. 지하도로 주행특성을 반영한 VISSIM Driving Behaviors
 Table 8. VISSIM Driving Behaviors Reflecting Underground Characteristics

Input Variable	Before Reflection	After Reflecting	Unit
CC0 (Dist Front Vehicle)	1.500	1.4307	m
CC1 (Time Headway)	0.90	0.8830	s
CC2 (Headway)	4.00	3.8648	m
CC4 (Acc Respons)	-0.35	-0.3480	-
CC5 (Decel Respons)	0.35	0.2076	-
CC8 (Acc After Stop)	3.50	3.3152	m/s ²

5-3 모사수준 평가

아래 표 9는 관측된 통행량 및 통행속도와 VISSIM으로 분석한 지점별 분석값에 대해 모사수준평가를 수행하여 나타낸 것이다. 각 지점별 모사수준평가 결과 관측값에 대한 모사수준은 적합한 것으로 도출되었다.

표 9. 신월여의지하도로 모사수준 평가
 Table 9. Simulation Level Evaluation of Sinwol Yeoui Underground Road

Traffic (pcph)					
	Section	Observed	Estimated	MAPE	RMSPE
①	Startpoint - 2km	2,117	2,075	0.020	0.020
②	2km - 4km	2,261	2,081	0.037	0.037
③	4km - Yeoui JCT	2,203	2,071	0.015	0.015
④	Yeoui JCT - Yeuido	1,203	1,208	0.004	0.004
⑤	Yeoui JCT - Olympic	813	852	0.034	0.034
Travel speed (km/h)					
	Section	Observed	Estimated	MAPE	RMSPE
①	Startpoint - 2km	64.58	62.01	0.041	0.041
②	2km - 4km	69.78	70.05	0.004	0.004
③	4km - Yeoui JCT	60.07	60.81	0.012	0.012
④	Yeoui JCT - Yeuido	70.40	65.27	0.047	0.047
⑤	Yeoui JCT - Olympic	60.42	58.21	0.038	0.038

(22UUTI-C157786-03, 도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구)

V. 결 론

한정된 도시공간에서 증가하는 교통량에 따라 도로의 중요성은 점점 커지고 있으며 이미 과포화된 지상도로를 대체할 수단으로 지하도로가 점차 증가되고 있다. 그러나 지하도로는 현재까지 운전자가 일반 고속도로, 장대터널 등에서 겪어보지 못한 도로환경과 지하 분·합류부, 진·출입시설 등의 주행환경을 겪음으로써 인적요인에 따른 도로 주행 상의 특이점이 발생할 수 있고, 이는 주행행태의 변화까지 이어질 수 있다. 하지만 현재까지 지하도로 내 운전자의 주행행태 변화에 대한 고려와 연구가 수행되지 않았으며, 운전자의 보다 쾌적한 지하도로 주행환경을 위해 지하도로 설계·시공·운영상에 반영할 수 있도록 선제적인 대응책 마련이 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 신월여의지하도로를 대상으로 가상현실(VR) 시뮬레이터를 활용하여 지상도로와 지하도로 내 운전자의 주행행태를 각각 분석하였다.

VR 분석의 목적은 지상도로와 지하도로의 시나리오별 이벤트를 통해 VISSIM에 반영되어 있는 기존 지상도로 차량추종모형 입력변수를 지하도로에 적합하게 적용하는 것이다. 시나리오 분석은 ①선행차량 정지를 통해 후행차량과의 정지거리와 정지 후 출발 시 가속도에 대한 분석과, ②선행차량의 가·감속을 통한 후행차량 운전자의 반응 민감도 분석, 그리고 ③지하도로 전체구간에서의 주행 데이터를 토대로 평균적인 차두시간과 차두간격 편차에 대한 분석을 수행하였다.

분석결과 지하도로에서 주행시 지상도로보다 감속에 더 예민하고, 앞 차량과의 간격이 지상보다 더 짧아지는 것으로 분석되었다. 이에 해당 결과값을 VISSIM Driving Behaviors 입력변수 6가지(CC0, CC1, CC2, CC4, CC5, CC8)별로 주행행태 특성 비율값을 도출하여 기존 입력변수에 반영하여 실제 조사값과 분석값의 모사수준을 평가하였다. 모사수준은 평균절대비율오차(MAPE)와 평균제곱근백분율오차(RMSPE)를 통해 평가하였으며 평가 결과 모사수준이 적합한 것으로 나타났다.

본 연구는 현재 국내 지하도로 현황상 다양한 지하도로를 대상으로 주행행태 분석이 불가능하다는 점에 현재 기구축되어 운영중인 신월여의지하도로를 대상으로 한 지하도로 주행행태 분석연구로서, 향후에는 본 연구를 기초로 다양한 지하도로 운전자의 주행행태 분석을 통해 지하도로 관련 설계기준 마련과 더 나아가 법·기준 제정 등을 위한 연구에 도움이 될 수 있도록 관련 연구가 지속적으로 수행되기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 정부(국토교통부) 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] S. H. Park, J. K. Lee, C. H. Yang, J. Lee, Y. K. Kang, "A Case Study on Design Element of Urban Underground Connect Section Using Focus Group Interview Method." *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 125-132, 2021
- [2] The Seoul Institute, Road Maintenance Basic Plan for Seoul (2011~2020), 2014
- [3] T. W. Kim, S. J. Lee, D. Y. Kim, S. S. Reem, Y. J. Kim, E. T. Lee, B. S. Son, "An Evaluation of Design Standard for Freeway Weaving Section Length for Operational Efficiency." *Korean Society of Transportation*, Vol. 39, No. 1, pp. 62-77, 2021
- [4] D. H. Kim, S. K. Ju, S. H. Lee, J. Y. Seo, "Utilization of Traffic and Virtual Reality Simulation: Real-time Interworking Plug-in between VISSIM and UC-win/Road." *Transportation Technology and Policy*, Vol. 18, No. 4, pp. 63-69, 2021
- [5] S. W. Jeong, M. S. Song, S. C. Hwang, D. M. Lee, W. T. Kwon, "An Investigation for Driving Behavior on the Exit-ramp Termina lin Urban Underground Roads Using a Driving Simulator." *Journal of Korean Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 21, No. 1, pp. 123-140, 2022
- [6] S. B. Park, C. Oh, Y. J. Kim, S. R. N. Choi, S. R. Park, "Understanding impacts of aggressive driving on freeway safety and mobility: A multi-agent driving simulation approach", *Korean Society of Transportation*, Vol. 36, No. 3, pp. 169-183, 2019



박상현(Sang Hyun Park)

2019년 : 명지대학교 교통공학 석사
2017년 : 명지대학교 교통공학 학사

2019년~현 재 : (주)내일이엔시 전임연구원

※ 관심분야 : 시뮬레이션, 도로안전, 지하도로, 교통운영



이진각(Jin Kak Lee)

2010년 : 명지대학교 교통공학 박사
2001년 : 명지대학교 교통공학 석사
1992년 : 명지대학교 교통공학 학사

2019년~현 재 : (주)내일이엔시 연구소장

※ 관심분야 : 도로안전, 지하도로, 교통운영, 스마트모빌리티



고상운(Sang Un Ko)

2020년 : 명지대학교 교통공학 학사

2020년~현 재: (주)내일이엔시 도로교통안전연구소 연구원

※ 관심분야 : 교통안전, 교통 빅데이터, 교통 시뮬레이션