

지하도로에서의 분·합류 시의 교통운영 및 안전 영향 분석을 위한 시뮬레이션 연구

양 충 현^{1*} · 김 진 국² · 박 상 현³ · 이 진 각⁴

^{1*}한국건설기술연구원 도로교통연구본부 연구위원

²한국건설기술연구원 도로교통연구본부 전임연구원

³(주)내일이엔시 도로교통안전연구소 전임연구원

⁴(주)내일이엔시 도로교통안전연구소 연구소장

Simulation for Traffic Operation and Safety Impact Analysis on Merge/Diverge of Underground Road

Choongheon Yang^{1*} · Jingung Kim² · Sang Hyun Park³ · Jinkak Lee⁴

^{1*}Research Fellow, Department of Highway&Transportation Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

²Researcher, Highway Traffic Safety Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

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

⁴Research Director, Department of Highway&Transportation Research, NAEIL E&C, Anyang-si, Gyeonggi-do, Korea

[요 약]

본 연구에서는 대표적인 미시적 교통 시뮬레이션 모형인 VISSIM을 사용하여 지하도로 합류부 및 분류부에 대한 가상 실험네트워크(toy network)를 구축하였다. 이를 통해 교통 지·정체 판단을 위한 다양한 교통운영 및 안전 효과척도를 선정하여 분석을 수행하였다. VISSIM 모형을 통해 지하도로에서 분류 또는 합류가 있을 때 지하 내에서의 교통 지·정체 발생 전까지의 적정 교통량 수준(Throughput)을 산정하였다. 또한, Time-To-Collision(TTC)와 같은 검증된 상충지표를 활용하여, 동일한 교통량 조건에서 합류 또는 분류 시의 차량 간 상충확률을 도출하였다. 본 연구의 결과가 실제 환경에서 발생할 수 있는 다양한 조건들을 반영하지 못하기 때문에 동일할 순 없지만, 향후 도심지 지하도로가 활성화 될 경우, 지하에서의 교통 지·정체 최소화를 위한 교통제어 적용에 대한 기준 마련의 기초 자료 및 보다 정교한 분석을 위한 접근 방법을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

[Abstract]

This study is to analyze the traffic and safety impact across the entire underground road when there is either merging or diverging roadway sections. Also, important implications will be drawn for minimizing potential traffic congestion on the underground roads. VISSIM, a representative micro traffic simulation, was employed to establish two types of toy networks and their specific analysis scenarios. In addition, it was analyzed that the Time-To-Collision(TTC) measure also increased in both cases. However, there was little difference in statistical significance in their mean and standard deviation. The results of this study may not be identical to the actual conditions. However, if the urban underground road is activated in the near future, it will be possible to provide fundamental insight as well as traffic control approaches to minimize traffic congestion in the underground.

색인어 : 지하도로, 미시적 교통시뮬레이션, 처리량, 안전, 운영

Keyword : Underground Roads, Microscopic simulation, Throughput, Safety, Operation

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2021.22.10.1733>



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 06 September 2021; Revised 17 September 2021

Accepted 25 October 2021

***Corresponding Author; Choongheon Yang**

Tel: +82-31-910-0184

E-mail: chyang@kict.re.kr

I. 서론

우리나라는 1960년 이후 국가산업구조가 공업화로 전환되면서 기존 대도시에 입지해 있는 경제여건을 활용하는 방향으로 산업개발이 진행되었다. 그 결과 서울, 부산, 대구, 인천 등으로 인구가 빠르게 증가하였다. 또한, 같은 시기에 남북으로 이어진 종관형의 교통체계에서 동서를 연결하는 횡단형 교통체계로 국가교통망이 확장되었다. 경제발달 및 교통체계 구축으로 인해 수도권에 인구가 집중되었고, 도시 공간 분포 측면에서도 위성도시의 발달과 함께 거대 도시화 현상이 나타났다. 이에 대한 부작용으로 대도시권의 교통 혼잡은 더욱 심해졌다. 대표적으로 서울시 전체 평균통행속도는 '13년 26.4km/hr에서 '19년 23.8km/hr로 매년 감소하고 있다 [1]. 전반적인 통행속도 향상을 위한 도로용량증대 정책은 도심지에서 부가적인 도로용지 확보에 대한 제약으로 점점 불가능해지고 있다. 최근 들어, 대심도(GTX)를 비롯한 수도권 지하철 교통망 확대 계획 등이 활발하게 진행되고 있다. 그러나 이러한 인프라를 확대해도 정차역 인근에 도로가 통과하는 경우 그로 인해 접근성이 단절되어 도로의 상부 연결 등을 통한 생활권 연계 필요성은 남게 된다. 서울 외곽에서 도심으로의 진입·진출부와 도심지 내의 상습 정체구간에 대한 도로 인프라만으로는 개선에 따른 효과의 한계가 뚜렷하다. 해외에서는 이미 오래 전부터 도심지 도로망 개선을 위한 도로건설 시 환경·문화재 보존, 커뮤니티 단절 방지, 토지보상비용 절감, 최단거리 연결 등의 목적으로 지하도로를 건설하고 있다 [2]. 프랑스 A86 터널의 경우, 지난 2011년에 개통되었으며, 파리 외곽순환도로 완성을 위해 주거지 및 베르사유궁 유적지 주변을 통과하는 구간에 10km 연장의 복층 터널형태로 건설되었다. 일본 도쿄 외곽순환도로 및 중앙환상선 지하구간은 도쿄 도시권의 3환상 9방사 도로망 계획 완성을 위해 개발된 지역을 터널로 통과하여 환경과 커뮤니티를 보존하기 위해 건설되었다. 이 밖에도 스페인, 말레이시아, 미국, 스웨덴, 싱가포르의 대도시권에 지하도로를 건설하여, 도심지 교통단절점 해소 및 교통량 분산을 통한 도로용량 증대 등 이동성과 접근성을 향상하기 위한 노력이 진행되었다 [3]. 국내에서도 이와 유사한 지하교통인프라가 건설 또는 계획되고 있다. 서울시 신월~여의 지하도로의 경우, 신월 IC~양평동 구간의 구경인고속도로 구간 왕복 4차로를 지하화하였다. 또한, 서부간선 지하도로의 경우 현재의 서부간선도로를 지하화 사업이다. 지방 대도시인 부산시 만덕-센텀 지하 고속화도로는 기존 만덕로의 상습정체를 해소하고자 추진 중인 대심도 사업이다.

이러한 지하도로의 특징은 지하 내에서의 합류 또는 분류가 이루어지는 형태로 계획되고 있는 것이 특징이다. 향후 지하도로건설이 활발해질 경우, 지하에서의 교차(JC형태)까지도 가능할 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 지하에서 분류 또는 합류구간이 있을 때 지하도로 전 구간에 대한 교통 및 안전 영향을 미시적 교통시물레이션을 통해 분석하는 것이다. 시물레이션 결과를 바탕으로 향후 지하도로에서의 교통

지·정체를 예방하기 위한 기본 교통조건 및 시물레이션 분석의 신뢰성 향상을 위해 고려해야 할 요소 등 추가 연구를 위한 시사점 도출을 목적으로 한다.

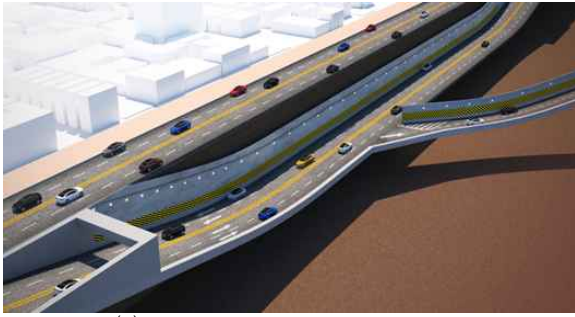
II. 시물레이션 네트워크 및 시나리오 구축

일반적으로 실제 현장과 관련 데이터가 없는 경우, 교통운영 측면에서 시행하는 접근방법이 시물레이션 분석 연구이다. 다만, 시물레이션 결과는 특정 조건에서의 대표적인 예이기 때문에, 현실에서 일어날 수 있는 모든 상황을 정확히 모사할 수 없는 단점이 있다. 반대로 시물레이션은 실제 현장과 관련 데이터가 있는 경우, 특정 정책 또는 기술 적용 전·후 분석(Before and after)을 통해 효과를 평가하는데 자주 활용된다 [4]. 교통 분야에서 시물레이션 연구는 매우 다양한 목적과 방법을 통해 수행되어 왔으며, 최근 들어 신규 교통유발시설 설치 및 확장, 신규도로 개통, 대규모 단지 조성 등에 따른 교통영향평가 시에도 사용되고 있다. 일반적으로 시물레이션은 실제 문제를 안전하고 효율적으로 해결할 수 있는 특징이 있는데, 분석자나 정책입안자들이 발생 가능한 문제를 쉽게 인지하고 그것을 해결할 수 있는 대안 솔루션을 제공하여 그 효과를 논리적으로 전달하고 이해하는데 매우 중요한 분석 방법을 제공한다. 시물레이션은 잠재적 위험이 없고 무제한 수행을 통해 새로운 지식을 탐구하고 실험하고 반복적으로 적용 할 수 있는 기능을 가지고 있다는 측면에서 본 연구의 목적과 부합한다 [5].

본 연구에서는 대표적인 미시적 교통 시물레이션 모형인 VISSIM를 사용하여 네트워크를 구축하고 관련 시나리오를 분석하였다. VISSIM은 독일 PTV사에서 개발되었으며, 도시 교통과 대중교통 운영을 모형화한 것이다. 교통류 이론 관련 모형이 내재적으로 포함되어, 교통운영 분석 및 교통공학계획에 따른 효과 측정 등 다양한 대안 평가에 유용한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 2가지 형태(지하에서의 합류 및 분류)의 가상 실험네트워크(toy network)를 구성하였다. 또한, 교통지·정체 판단을 위한 다양한 교통운영 및 안전 효과척도를 선정하여 분석을 수행하였다. 분석결과를 토대로 결론 및 향후 논의해야 할 시사점을 도출하였다. 본 연구는 지하도로 내 도로 기하구조 조건과 교통수요 조건만을 고려해서 처리 가능한 최대 교통처리량과 안전영향을 추정한 것으로, 국내에서는 처음 수행된 것이다.

그림 1은 본 연구에서 활용한 2가지 가상 실험네트워크(지하 내 분류, 지하 내 합류)를 나타낸다. 그림 1에서 (a)는 지하에서 1개의 연결로(분류)로 구성되며, 현재 도심 지하도로에서 실제 반영되는 형태이다. 그림 1에서 (b)는 (a)와 달리 지하에서 합류가 1개의 연결로를 통해 구성되는 형태로 이 또한, 현재 도심 지하도로에서 실제 반영되고 있다.



(a) Diverge in the Underground Road



(b) Merge in the Underground Road

그림 1. 가상 실험네트워크 (합류부·분류부)
Fig. 1. Two Types of Toy Networks

표 1. 시뮬레이션 환경 설정

Table 1. Simulation Environment Setting

Components	Contents
Number of lanes	· Basic section : One-way 2-lane · Ramp : 1-lane
Vehicle type	· Small cars only (Domestic car)
Total length	· 10km
Design speed	· Basic section : 80km/hr · Ramp : 60km/hr
Ground↔Underground transition grade	· Basic section : ± 8% · Ramp : ± 10%
Lane width	· Basic section : 3.5m · Ramp : 3.5m
Deceleration/Acceleration lane	· Deceleration : 205m · Ramp : 180m
Depth of Underground	· Basic section : under 40m
Length of ground↔underground transition section	· Basic section : 500m · Ramp : 300m

표 2. 시뮬레이션 효과 척도

Table 2. Simulation Measure of Effectiveness

	Measure of Effectiveness	Time interval
Traffic Operation	Average travel speed	1-5 min Aggregation
	Occupancy	
	Throughput	
	V/C(Volume to capacity) ratio	
Traffic Safety	Time to Collisions	Individual vehicle data

이와 같이 지하에 분류 또는 합류부가 있을 때 지하에서의 교통 지·정체가 발생하지 않도록 하기 위한 교통조건과 안전 영향을 다양한 지표를 통해 분석하였다.

시뮬레이션 수행을 위해서는 기본적인 환경에 대한 정립이 반드시 필요하다. 표 1은 VISSIM 시뮬레이션 수행을 위한 다양한 설정요소들을 요약한 것이다. 표 1의 설정요소들에 대한 정의는 본 연구의 테스트베드인 부산시 만덕-센텀구간의 설계된 도로기하구조 특성과 도로용량편람(2013) [6], 도로의 구조·시설에 관한 규칙(2020) [7], 도시지역 지하도로 설계지침(2016) [8]을 참고한 것이다. 각 형태별 교통운영과 안전 측면에서의 영향을 알아보기 위해 다음 표 2와 같이 효과척도를 정립하고 시뮬레이션에 따른 결과를 정리하였다.

특히, 안전척도의 경우, VISSIM의 개별차량 주행레직 자료는 SSAM(Surrogate Safety Assessment Model, FHWA: Federal Highway Administration) 소프트웨어를 통해 차량 간 상충(후미추돌, 교차상충, 차로변경) 건수 산출하여 활용하였다. SSAM은 미국 FHWA에서 상충이론을 기반으로 교통사고 분석과 관련된 사고관련 변수를 고려하여 자동적으로 상충분석 작업을 수행하며, 이를 통해 다양한 시나리오 또는 설계 대안에 대한 안전성을 검증하기 위한 도구로써 개발되었다 [9]. SSAM은 미시적 교통시뮬레이션 모형에서 시뮬레이션된 차량들의 개별 경로자료를 입력 자료로 하여 자동화된 상충분석기법을 적용시킬 수 있다. 이 경로자료는 네트워크에 생성된 개별 차량의 위치, 속도, 및 가속도와 시뮬레이션 시간 등을 포함한다.

지하의 도로기하구조 특성상 오르막구배가 존재하지 않는다. 또한, 소형차 전용으로의 운영 특성 때문에 증차량보정계수는 1.0이 되고, 차로폭과 측방여유폭 보정계수도 이상적인 조건으로 가정한다.

본 연구에서는 표 3과 같이 도시지역 지하도로 설계지침에서 제시하고 있는 “다차로 도로 유형 I의 서비스수준 E” 일 때의 교통량을 진입교통량으로 설정하였다. 이는 현재 지하도로만을 위한 용량산정 방법이 아직 정립되지 않았기 때문이다. 지하 본선 구간의 최대 처리량이 서비스수준 D~E 상태를 유지하기 위한 지상↔지하 연결로를 통한 유출·유입비율을 설정하였다. 연결로 구간의 용량은 표 4와 같이 도로용량편람에서 제시하고 있는 설계속도 60kph일 때, 그리고 1차로 운영 시 최대값을 활용하였다.

지하도로 내 변속차로(감·가속차로) 길이는 기본적으로 “도로의 구조·시설기준에 관한 규칙”을 참고하되, 지하공간 특성을 반영하기 위해 운전자의 암순응과 명순응 반응을 고려하였다. 설계속도 80kph 기준일 때 이격 거리 산출계산식에 의해 제시된 조도순응시간은 3초를 적용하여 조도순응거리는 65m를 적용하였다. 또한, 감속차로의 최소길이 80m, 가속차로의 최소길이 55m, 설계속도별 최소변이구간 길이 60m로 각각 설정하였다. 또한, 지하공간에서의 운전자 형태를 반영하기 위하여 평균차두시간을 조정하였다. VISSIM의

차량추종이론은 Wiedemann 모형을 채택하고 있는데, 74 모형과 99 모형으로 구분된다. 전자의 경우, 안전이격거리가 속도의 제곱근으로 증가되도록 하며, 후자는 안전이격거리가 속도에 따라 선형적으로 증가하도록 되어 있다. 두 모형의 차이점은 80kph 미만에서의 안전이격거리가 74 모형이 99 모형보다 크다는 것이다. 결과적으로 단속류 구간에서는 74 모형이 적합하고, 연속류 구간에서는 99 모형이 적합하다. 본 연구의 테스트베드인 만덕~센텀구간은 연속류 구간이므로 Wiedemann 99 모형을 적용하였다. 지하와 지상공간에서 운전자의 운전행태 차이점을 고려하기 위한 또 하나의 변수로 한국도로공사에서 수행한 터널부의 선행·후행 차종별 평균차두시간 분석 결과를 참조하였다 [10]. 연구보고서에 따르면, 평균차두시간이 터널부에서의 평균차두시간이 일반부보다 약 101.78% 길다고 제시하였다.

본 연구에서는 승용차 전용도로임을 가정했기 때문에 선행·후행 차종이 모두 승용차일 때의 평균차두시간을 고려하였다. VISSIM은 해외에서 개발된 상용모형이기 때문에 차종은 독일, 일본, 미국 등 해외 차량으로 구성되어 있다. 따라서 분석의 신뢰성을 높이기 위해 국내 소형차(소형차, 소형 SUV, 중형차) 제원으로 수정·반영하였다.

표 3. 서비스 수준 (다차로 도로 유형 I)

Table 3. Level of Service (Basic Section)

LOS	Design Speed (80kph)		
	V/C	Service Volume	Speed
A	≤ 0.25	≤ 500	≥ 86
B	≤ 0.40	≤ 800	≥ 85
C	≤ 0.58	≤ 1,150	≥ 84
D	≤ 0.75	≤ 1,500	≥ 79
E	≤ 1.00	≤ 2,000	≥ 67

표 4. 서비스 수준 (지하도로 연결로)

Table 4. Level of Service (Ramp)

LOS	Free flow speed	Capacity(pcpp)
A	> 70	≤ 2,000
B	≤ 70	≤ 1,900
C	≤ 60	≤ 1,800
D	≤ 50	≤ 1,700
E	≤ 40	≤ 1,600

총 시뮬레이션 시간은 네트워크에 차량이 고르게 분포할 때까지의 시간을 고려하여, 총 1시간 30분으로 설정하고, 전 반부 30분을 제외한 1시간을 실제 분석에 사용하였다.

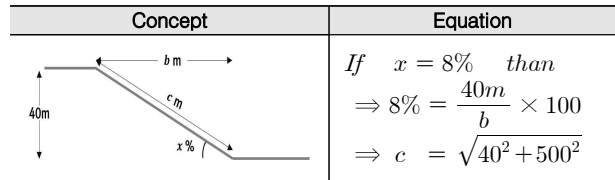
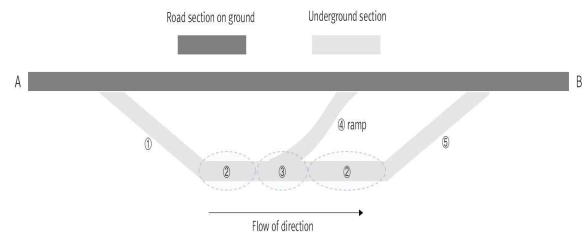
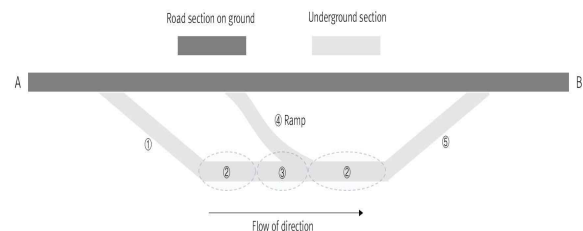


그림 2. 지하도로 접속부 길이 산정

Fig. 2. Length Calculation Method



(a) Diverging case in underground



(b) Merging case in underground

그림 3. 가상 실험네트워크 분석 범위 (합류부·분류부)

Fig. 3. Analysis sections for underground

또한, 시뮬레이션의 무작위성(Randomness)을 보장하기 위해서, 서로 다른 발생변수(random number) 설정을 통해 복수의 시뮬레이션을 수행하고 이들의 평균을 분석을 위한 최종값으로 활용하였다. 분석 대상구간에 대한 구간별 분석을 수행하기 위해서는 지하도로 상의 기본구간, 연결램프, 연결로 접속부, 지상-지하 접속부 등의 정의가 명확해야하나, 현재 지하도로의 특성을 반영한 규정이 없기 때문에, 도로기하 구조 조건만을 기준으로 ① 지상→지하 접속부, ② 지하본선, ③ 분류 또는 합류부 ④ 연결램프, ⑤ 지하→지상 접속부로 구분하였다. 이 중 ①과 ⑤에서는 그림 2와 같은 방법을 통해 길이를 산정하였다.

결과적으로 총 10km 구간 중 ① 0.5km ② 9.7km ③ 0.3km ④ 1km ⑤ 0.5km로 구분하였다. 그림 1 (a)의 분석 구간은 그림 3과 같다.

III. 시뮬레이션 시나리오 분석결과

그림 3 (a)는 지하에서의 분류를 묘사하기 위한 것으로 A 지점에서의 진입교통량은 표 3, 표 4에서와 같이 다차로 도로 유형 I의 기본구간의 서비스수준 E 수준인 4,000pcph로 하고 연결로 용량은 1,800pcph로 설정하였다. 표 5와 같이 연

결로 유출 교통량 비율을 유입교통량 대비 20%에서 5%씩 증가하여 분석하였다. 분석결과, 연결로 구간의 용량을 초과하여 서비스수준 F가 되는 구간은 45% 이상일 때 나타났다. 이와 같은 경우, 지하도로 전 구간의 설계 서비스수준이 D~E 수준을 유지하기 위해서는 진입교통량이 4,000pcph일 때 연결로를 통해 지하에서 지상도로로 유출되는 교통량이 진입교통량 대비 30%~40% 범위 내에서 제어될 필요가 있다고 추정할 수 있다. 반면에, 그림 3 (b)는 지하에서 합류를 묘사하기 위한 것으로 A지점을 통해 유입되는 진입교통량은 서비스수준 D의 최소값인 2,300pcph로 설정하였다. 마찬가지로, 연결로의 용량은 1,800pcph로 하여 용량 대비 연결로 유입교통량을 최소 35%에서 5%씩 증가시켜 분석하였다. 표 6과 같이, 1,800pcph의 60% 수준에서 지하본선 ②와 지하 합류부 ③이 용량상태(서비스수준 E)에 근접하는 것으로 나타났다. 이와 같은 경우, 지하도로 전 구간의 서비스수준이 최소 D와 E 수준으로 유지되려면, 진입교통량이 2,300pcph (서비스수준 D) 일 때 연결로 유입교통량은 연결로 용량 (서비스수준 E) 대비 60% 이하로 제어될 필요가 있다고 추정할 수 있다.

두 가지 가상 실험네트워크에 대해 안전척도를 가지고 분석을 수행하였다. 앞서 언급한 SSAM Analysis 분석을 위해 시뮬레이션 결과로 도출된 개별차량의 이동경로(Trajectory)를 입력 자료로 활용하였다. VISSIM과 SSAM간의 호환관계는 그림 4와 같다.

SSAM은 기본적으로 교통류 상에서의 차량 간 상충(Collision)상황을 묘사하는데, Crossing, Rear-end, Lane change 3가지로 구분하여 상충형태별 발생횟수를 추정한다. 다만, 본 분석에서는 대상구간이 연속류이므로, 교차로에서 회전교통류 간 발생하는 상충을 묘사하는 Crossing은 분석에서 배제하였다. Rear-end는 동일한 방향의 교통류 안에서 발생하는 상충을 묘사할 수 있고, Lane change는 차량들이 차선변경을 하는 상황에서의 상충을 묘사할 수 있다. 이러한 개별차량의 경로자료 분석을 통해 SSAM은 안전성 효과를 대리(Surrogate)할 수 있는 척도인 상충횟수, Time To Collision (TTC), Post Encroachment Time (PET), Maximum Speed (MaxS), 및 Delta Speed (DeltaS)등을 산출할 수 있다. 본 연구에서는 이 중 두 차량이 현재 속도로 동일한 경로로 주행할 때 상충까지 예상되는 시간을 나타내는 TTC 결과를 도출하였다. 기본적으로 TTC는 두 차량의 상충까지 걸리는 시간을 의미하므로, TTC 값이 낮을수록 상충(추돌) 확률이 높다고 이해할 수 있다. 다음 표 7은 지하 연결로를 통해 지상으로 유출되는 분류형태일 때의 분석 결과를 나타낸다. 분석결과, 연결로 유출 교통량 비율이 30%에서 상충 증가율이 대폭 증가한 것을 알 수 있다.

또한, 유출비율별 TTC 평균값과 표준편차는 연결로 유출 교통량 비율일 25%일 때 가장 낮았으나, 평균과 표준편차의 변화폭이 크지 않아 통계적 의미에서 차이는 거의 없는 것으로 분석되었다. 다음 표 8은 지하의 연결로를 통해 지상에서 지하로 유입되는 합류형태일 때의 분석 결과를 나타낸다. 분

석결과, 연결로 유입 교통량 비율이 60%에서 상충 증가율이 대폭 증가한 것을 알 수 있다.

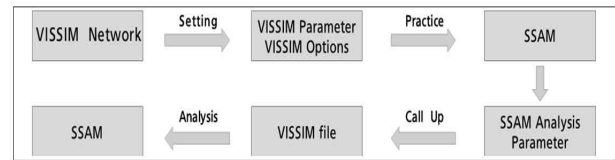


그림 4. VISSIM 및 SSAM 분석 과정
Fig. 4. VISSIM and SSAM Process Flow Chart

표 7. TTC 분석 결과 (지하-지상 유출)
Table 7. TTC Results by Outflow Percentage

Outflow Percentage	Rear-end	Lang change	Total conflict	Cumulative increase rate
20%	7	7	14	0.00%
25%	8	7	15	7.14%
30%	21	13	34	133.81%
35%	23	14	37	142.63%
40%	53	25	78	253.44%
45%	79	38	116	302.16%

표 8. TTC 분석 결과 (지하-지상 유입)
Table 8. TTC Results by Inflow Percentage

Inflow Percentage	Rear-end	Lang change	Total conflict	Cumulative increase rate
35%	60	6	66	0.00%
40%	65	7	72	9.09%
45%	76	10	86	28.54%
50%	95	13	108	54.12%
55%	120	15	135	79.12%
60%	215	29	244	159.86%

마찬가지로, 지하 유입교통량 비율별 TTC 평균값과 표준편차는 연결로 유입 교통량 비율이 증가할수록 TTC값도 증가하는 것으로 분석되었다. 유입 비율이 35%일 때 가장 낮았으나, 평균과 표준편차의 변화폭이 크지 않아 통계적 의미에서 차이는 거의 없는 것으로 분석되었다. 이러한 분석결과를 TTC의 적용성에서 찾을 수 있는데, 본 연구의 시뮬레이션 시나리오 상에서 교통류의 변동(Fluctuation)을 별도로 가정하지 않고, 교통량만을 변수로 하였기 때문에, 가다서기현상(Stop and Go)이 많이 관측되지 않았다. 결론적으로 향후 지하도로 진출부(지하→지상)가 단속류일 때 보다 의미 있는 값을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

표 5. 분석 결과 (유출 교통량)

Table 5. Analysis results (Outflow)

Outflow Percentage	Analysis section	Average traffic speed (kph)	Occupancy	Throughput (pcph)	V/C ratio	LOS
20% (800pcph)	①	81.36	19.1%	4,000	1.00	E
	②	80.86	17.4%	3,636	0.91	E
	③	81.09	18.7%	4,000	1.00	E
	④	61.34	5.4%	803	0.45	C
	⑤	80.60	15.5%	3,222	0.81	E
25% (1,000pcph)	①	81.36	19.1%	4,000	1.00	E
	②	81.01	16.9%	3,537	0.89	E
	③	80.39	18.8%	4,000	1.00	E
	④	60.94	6.8%	1,008	0.56	C
	⑤	81.00	14.5%	3,018	0.76	E
30% (1,200pcph)	①	81.36	19.1%	4,000	1.00	E
	②	81.11	16.4%	3,437	0.86	E
	③	79.50	19.0%	4,000	1.00	E
	④	60.56	8.2%	1,214	0.68	D
	⑤	81.37	13.5%	2,813	0.71	D
35% (1,400pcph)	①	81.36	19.1%	4,000	1.00	E
	②	81.22	16.0%	3,341	0.84	E
	③	77.24	19.7%	4,000	1.00	E
	④	60.18	9.6%	1,412	0.79	E
	⑤	81.75	12.5%	2,614	0.66	D
40% (1,600pcph)	①	81.36	19.10%	4,000	1.00	E
	②	81.26	15.60%	3,244	0.82	E
	③	73.37	21.00%	4,000	1.00	E
	④	59.7	11.10%	1,613	0.90	E
	⑤	82.09	11.50%	2,415	0.61	D
45% (1,800pcph)	①	81.36	19.10%	4,000	1.00	E
	②	81.3	15.10%	3,146	0.79	E
	③	69.86	22.80%	4,000	1.00	E
	④	59.11	12.60%	1,812	1.01	F
	⑤	82.5	10.50%	2,216	0.56	C

표 6. 분석 결과 (유입 교통량)

Table 6. Analysis results (Inflow)

Inflow Percentage	Analysis section	Average traffic speed (kph)	Occupancy	Throughput (pcph)	V/C ratio	LOS
20% (360pcph)	①	84.64	7.52%	1,600	0.40	C
	②	83.44	8.44%	1,782	0.45	C
	③	81.49	9.19%	1,901	0.48	C
	④	63.63	2.31%	360	0.20	A
	⑤	82.56	9.34%	1,959	0.49	C
30% (540pcph)	①	84.64	7.52%	1,600	0.40	C
	②	83.35	8.88%	1,874	0.47	C
	③	80.62	10.03%	2,058	0.52	C
	④	63.08	3.54%	540	0.30	B
	⑤	82.30	10.18%	2,140	0.54	C
40% (720pcph)	①	84.64	7.5%	1,600	0.40	C
	②	83.27	9.3%	1,967	0.50	C
	③	79.64	10.9%	2,207	0.56	C
	④	62.60	4.7%	720	0.40	C
	⑤	82.08	11.1%	2,327	0.59	D
50% (900pcph)	①	84.64	7.52%	1,600	0.40	C
	②	83.20	9.73%	2,053	0.52	C
	③	78.53	11.70%	2,350	0.59	D
	④	62.19	5.90%	900	0.50	C
	⑤	81.89	11.91%	2,496	0.63	D
60% (1,080pcph)	①	84.64	7.52%	1,600	0.40	C
	②	83.11	10.15%	2,323	0.59	D
	③	77.34	12.59%	2,498	0.63	D
	④	61.77	7.13%	1,080	0.60	D
	⑤	81.70	12.74%	2,672	0.67	D

IV. 결 론

본 연구에서는 VISSIM 모형을 통해 지하도로에서 분류 또는 합류가 있을 때 지하 내에서의 교통 지·정체 발생 전까지의 적정 교통량 수준(Throughput)을 분석하였다. 또한, TTC와 같은 검증된 상충지표를 활용하여, 동일한 교통량 조건에서 합류 또는 분류 시의 차량 간 상충확률을 분석하였다.

시뮬레이션 결과, 지하에서의 합류·분류 형태에 따라 교통 지·정체 발생을 예방에 활용될 수 있는 지표인 교통처리량이 서로 상이하고, 형태에 따른 안전 지표도 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 지하도로에 대한 교통제어전략 수립에 다양한 시사점을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 지하도로는 도심지를 통과하는 것을 가정했기 때문에 도로용량편람에서 제시하고 있는 “다차로도로”의 서비스수준을 참조하여 교통량을 설정하였다. 또한, 지하공간의 특수성을 고려하여, 운전자 형태에 대한 지상구간의 차이점을 최대한 반영하기 위해, ① 차량추종모형, ② 조도순응거리, ③ 평균차두시간 변수를 활용하였다. 정해진 시뮬레이션 환경 하에서, 지하도로 전 구간의 서비스수준을 D와 E 사이로 유지하기 위한 연결로 유출·유입 교통량 비율을 추정하였다.

본 연구의 결과가 실제 환경에서 발생 할 수 있는 다양한 조건들을 반영하지 못하기 때문에 동일할 순 없지만, 향후 도심지 지하도로가 활성화 될 경우, 지하에서의 교통 지·정체 최소화를 위한 교통제어 적용에 대한 기준 마련의 기초 자료 및 보다 정교한 분석을 위한 접근 방법을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 시사점 도출

교통시뮬레이션을 활용한 연구는 도로교통분야에 무수히 많이 있다. 그러한 연구의 공통적인 특징은 현실세계에서 직접적인 테스트가 어려운 경우와 특정 교통운영 및 교통안전 전략을 시행하기 전 그 효과를 어느 정도 가능해보기 위한 목적이 많다. 본 연구에서도 마찬가지로, 지하도로의 도로기하 구조조건과 교통수요 조건을 고려한 교통운영과 안전 효과는 매우 논리적으로 도출될 수 있음을 나타내었다.

지하도로의 시작과 끝부분, 즉(지상과 지하가 만나는 진입 또는 진출 구간)은 단속류 또는 연속류 형태가 있을 수 있다. 이러한 형태에 따라 지하도로 전 구간에서의 교통행태는 많이 달라질 수 있다. 본 연구에서 분석한 2가지 가상 실험네트워크에서 지상과 지하 또는 지하와 지상이 만나는 접속부의 형태에 대해서는 별도로 가정하지 않았는데, 이는 단순히 지하 내에서의 도로기하구조 조건과 교통 조건만을 고려했을 때 지하 전 구간에서 용량을 초과하지 않도록 하는 임계값을 추정하기 위한 것이다.

또한, 본 연구에서 시뮬레이션 환경을 설정할 때에 지상도로와의 차이점을 반영하기 위한 노력을 하였으나, 여전히 지하본선구간과 지하연결로에서의 평균차두시간의 차이, 차량 추종모형에서의 운전자 변수 추가, 지상진출부의 지체로 지하 내부까지 영향 받는 Spill-back 현상 규명 등의 연구가 추가로 필요하다. 가상 실험네트워크에 대한 시뮬레이션 분석 방법과 결과를 참조하여, 실제 지하도로를 대상으로 시범 시뮬레이션 네트워크 구축을 통해 지상과 지하 또는 지하와 지상이 만나는 접속부의 형태에 따른 교통변화를 분석하는 것이 매우 중요하다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 정부(국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다. (21UUTI- B157824-02, 지하교통인프라 연결접속부 교통 운영기술 개발)

참고문헌

- [1] Seoul Metropolitan Government, “Seoul Metropolitan City Vehicle Speed Report”, [Internet]. Available: <https://news.seoul.go.kr/traffic/archives/417>
- [2] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, “Planning Research of Advanced Technology for Construction and Operation of Underground Transportation Infrastructure Final Report”, [Internet]. Available: <https://www.ntis.go.kr/rndgate/eg/un/ra/view.do?roRndUid=836261&flag=rndList>
- [3] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, “Research of Advanced Technology for Construction and Operation of Underground Transportation Infrastructure Final Report 1st year”, 2019.
- [4] W. C. Kim, “A Case Study of Traffic Research using VISSIM.” Chung Nam Open Journal, Chung Nam Institute, Spring Vol 82, pp. 29-39, 2018.
- [5] D. S. Sin and S. H. Lee, “A Study on Traffic Impact Assessment Method using Microscopic Simulation Model.” Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, vol. 8, No.1, pp. 31-37, 2008.
- [6] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, “Korean Highway Capacity Manual”, [Internet]. Available: <https://www.codil.or.kr/viewDtlMocRoadGuide.do?scCode=MT1&pageIndex=1&sType=RefTypeAll&pMetaCode=CIKCLS122032>

- [7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “Rules about the Road Structure & Facilities Standards”, [Internet]. Available: <https://www.codil.or.kr/viewDtlConWrkDtlSch.do?gubun=tch&pMetaCode=CIGCEI510257>
- [8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “Urban Underground Road Design Guideline”, [Internet]. Available: <https://www.codil.or.kr/viewDtlConRpt.do?gubun=rpt&pMetaCode=OTKCMA160167>
- [9] Federal Highway Administration (FHWA), “Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report”, [Internet]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/08051/08051.pdf>
- [10] Korea Expressway Corporation, “A study on line marking at tunnel and bridge of expressway Final Report”, [Internet]. Available: <https://www.codil.or.kr/viewDtlConRpt.do?gubun=rpt&pMetaCode=OTKCRK180281>
- [11] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, “A Study on the Establishment of Design Guidelines for Deep Underground Roads Final Report”, [Internet]. Available: <https://www.codil.or.kr/viewDtlConRpt.do?gubun=rpt&pMetaCode=OTKCRK180219>
- [12] Korea Expressway Corporation, “A Study on Planning and Operation for Underground Expressway Final Report”, [Internet]. Available: <https://www.codil.or.kr/viewDtlConRpt.do?gubun=rpt&pMetaCode=OTKCRK150032>



양충헌(Choongheon Yang)

2008년 : Ph.D. in Civil Engineering at Univ. of California, Irvine
 2002년 : 명지대학교 교통공학 석사
 2000년 : 명지대학교 교통공학 학사

2009년 ~ 현 재: 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 연구위원

※ 관심분야 : 도로안전, 도로관리, 지하도로



김진국(Jinguk Kim)

2006년 : 관동대학교 교통공학 석사
 2004년 : 강릉대학교 컴퓨터공학 학사

2015 ~ 현 재: 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 전임연구원

※ 관심분야 : 도로안전, 도로관리, 도로정보, 지하도로

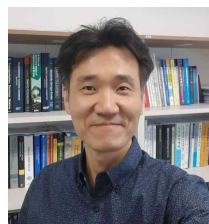


박상현(Sang Hyun Park)

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

2009년 ~ 현 재: (주)내일이엔시 전임연구원

※ 관심분야 : 시뮬레이션, 도로안전, 지하도로, 교통운영



이진각(Jinkak Lee)

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

2009년 ~ 현 재: (주)내일이엔시 연구소장

※ 관심분야 : 도로안전, 지하도로, 교통운영, 스마트모빌리티