

# 유전알고리즘을 이용한 주행행태 최적화 및 자율주행차 도입률별 일반자동차 교통류 안전성 분석

## Driving Behavior Optimization Using Genetic Algorithm and Analysis of Traffic Safety for Non-Autonomous Vehicles by Autonomous Vehicle Penetration Rate

신 소 명\* · 박 신 형\*\* · 김 지 호\*\*\*

\* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 박사수료

\*\* 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

\*\*\* 공저자 : 서울시립대학교 교통공학과 박사과정

Somyoung Shin\* · Shinyoung Park\* · Jiho Kim\*

\* Dept. of Transportation Eng., Univ. of Seoul

† Corresponding author : Shinyoung Park, shinpark@uos.ac.kr

Vol. 22 No.5(2023)  
October, 2023  
pp.30~42

pISSN 1738-0774  
eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.5.30>

Received 28 July 2023  
Revised 18 August 2023  
Accepted 23 August 2023

© 2023. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

### 요 약

자율주행시대에 맞춰 다양한 연구에서 미시교통시뮬레이션(VISSIM)을 활용하여 자율주행차 도입시 교통류 안전성 분석을 수행중이다. 그러나, 일반자동차의 주행행태를 VISSIM 내 파라미터로 반영하여 혼재시의 교통류 안전성을 분석한 연구는 미비하였다. 따라서 본 연구에서는 실제 주행행태와 유사한 주행행태를 구현하기 위하여 일반자동차의 VISSIM 입력변수를 유전알고리즘을 통해 최적화 한 후, 자율주행차 도입률에 따른 교통류 안전성 분석을 수행하는 것을 목적으로 한다. US I-101 고속도로의 640m 구간을 대상으로 후행차량이 일반자동차인 경우에 대해서 상충횟수 분석을 수행한 결과, 전체 상충횟수는 자율주행차 도입률 20%까지 증가하였으며 20%를 초과한 이후부터는 지속적으로 감소하였다. 일반자동차와 자율주행차 사이의 상충횟수는 자율주행차 도입률 60%까지 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나, 자율주행차의 주행행태를 기존 문헌결과를 바탕으로 하여 실제 주행행태를 표현하지 못했다는 한계가 존재한다. 그러므로 보다 정확한 분석을 위해 향후 연구에서는 자율주행차의 실제 주행행태를 반영하여 연구를 수행할 필요가 있다.

핵심어 : 자율주행차, 시장점유율, 유전알고리즘, 안전성, VISSIM

### ABSTRACT

Various studies have been conducted using microtraffic simulation (VISSIM) to analyze the safety of traffic flow when introducing autonomous vehicles. However, no studies have analyzed traffic safety in mixed traffic while considering the driving behavior of general vehicles as a parameter in VISSIM. Therefore, the aim of this study was to optimize the input variables of VISSIM for non-autonomous vehicles through genetic algorithms to obtain realistic behavior. A traffic safety analysis was then performed according to the penetration rate of autonomous vehicles. In a 640 meter section of US highway I-101, the number of conflicts was analyzed when the trailing vehicle was a non-autonomous vehicle. The total number of conflicts increased until the proportion of autonomous vehicles exceeded 20%, and the number of conflicts decreased continuously after exceeding 20%. The

number of conflicts between non-autonomous vehicles and autonomous vehicles increased with proportions of autonomous vehicles of up to 60%. However, there was a limitation in that the driving behavior of autonomous vehicles was based on the results of the literature and did not represent actual driving behavior. Therefore, for a more accurate analysis, future studies should reflect the actual driving behavior of autonomous vehicles.

Key words : Autonomous vehicle, Market penetration rate, Genetic algorithm, Safety, VISSIM

## I. 서 론

### 1. 연구배경 및 목적

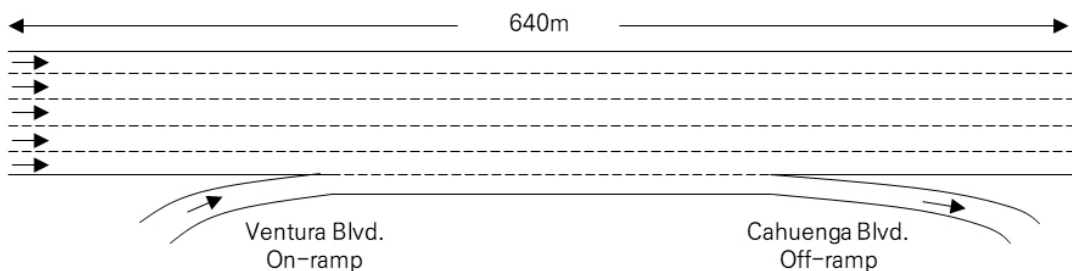
SAE International(Society of Automotive Engineers International, 국제자동차기술자협회)에서는 자율주행차를 단계별로 구분하고 있으며, 2023년 현재 자율주행기술은 Lv.2~3 수준으로 평가되고 있다. 다양한 연구에서 자율주행기술 발달에 대한 연구가 진행중이며, 자율주행차 도입시 운전자의 실수로 발생하는 교통사고가 34~94% 감소할 것으로 예측되고 있다(Navreet et al., 2019; Amolika et al., 2020; Alkis et al., 2019; Kim et al., 2017; Jung, 2015). 우리나라는 자율주행시대에 맞춰 자율주행전용차로, 자율주행전용도로를 계획 중이나, 정확한 도입시기는 알 수 없으며, 도입 전까지는 자율주행차와 일반자동차가 혼재되어 주행할 것으로 판단된다.

이로 인해 다양한 연구에서 VISSIM 등의 미시교통시뮬레이션을 활용하여 자율주행차 도입시 교통류 안전성 연구를 수행 중이다. 그러나 일반자동차의 주행행태를 반영하여 혼재시의 교통류 안전성을 분석한 연구는 미비하였다.

따라서 본 연구에서는 고속도로 분합류부가 포함된 구간을 대상으로, 실제 데이터를 기반으로 분석한 일반자동차의 주행행태와 기존 연구에서 사용된 자율주행차의 주행행태 입력변수를 활용하여 자율주행차의 도입률 변화에 따른 교통류 안전성을 분석하였다.

### 2. 연구범위

본 연구에서는 U.S. Department of Transportation에서 공개한 데이터인 미국 US-101 고속도로의 데이터를 사용하였다. 해당 데이터는 Next Generation Simulation(NGSIM) 데이터로 구간 길이는 640m이며, 5개의 본선 차로와 1개의 부가차로로 구성되어 있다. 시간적 범위는 2005년 6월 15일 오전 7시 50분부터 8시 35분까지



<Fig. 1> Spatial scope

15분 단위로 구성되어 있다.

해당 데이터는 0.1초 단위로 자동차의 속도, 가속도, 위치 등의 주행궤적을 제공하고 있어 데이터 양이 방대하며, 일반자동차의 주행궤적예측 모형 개발 등 다양한 연구에서 사용하고 있는 데이터로 본 연구에서 사용하기에 적합하다고 판단하였다.

### 3. 연구방법

본 연구는 선행연구고찰, 실험설계, 교통류 안전성 분석, 결론 및 향후 연구과제로 구성된다. 선행연구고찰에서는 자율주행차 도입률별 교통류 안전성 등의 문헌을 검토하였다. 실험의 설계는 자율주행차 주행행태 모델 등을 검토하여 일반자동차 및 자율주행차의 주행행태를 구현하였으며, VISSIM을 활용하여 자율주행차 도입률에 따른 교통류 안전성을 분석하였다.

## II. 선행연구 고찰

### 1. 자율주행차와 일반자동차 혼재시 교통안전성 분석 연구

Ko et al.(2021)은 IDM으로 자율주행차의 주행행태를 구현하여, VISSIM으로 자율주행차의 도입률에 따른 이동성 및 안전성을 분석한 결과, 자율주행차의 도입률이 증가할수록 네트워크의 이동성은 향상되나, 혼재되었을 때는 교통류가 불안정해지므로 안전관리의 필요성을 제시하였다.

Jin et al.(2022)는 기상적인 악의환경이나 인프라의 상태에 따라 차량의 센서나 통신기능에 문제가 발생할 수 있으므로, 해당 경우들이 발생하였을 때 도로 구간의 교통류 안전성에 미치는 영향을 분석하고자 자율주행차의 센서 인지 및 통신 지연 범위의 변화에 따른 도심로의 교통류 안전성을 분석하였다. VISSIM을 활용해서 분석한 결과, 센서 인지 범위가 감소하면 급감속과 차량간의 상충 횟수가 모두 증가하는 것으로 나타났으며, 센서의 인지범위가 낮고 자율주행차 도입률이 증가할수록 위험상황 발생횟수가 증가하는 것으로 나타났다.

Lee et al.(2019)는 VISSIM을 활용하여 자율주행차 도입시 도로교통시스템의 성능을 최적화하기 위해 사고 유무, 서비스수준, 자율주행차 도입률별로의 교통운영관리 전략인 자율주행적극성 개념을 제시하였다.

Amolika et al.(2020)는 호주 빅토리아의 M1 Geelong Ring Road를 대상으로 VISSIM을 사용하여 자율주행차가 교통사고 심각도 및 건수에 미치는 영향을 분석한 결과, 자율주행차의 장점은 자율주행차 도입률에 비례하지 않으며 전체적인 이점은 100%일 때만 가능하다고 분석하였다.

Garg and Bouroche(2023)은 SUMO를 사용하여 자율주행차의 불안정한 통신 및 긴 반응시간이 미치는 교통 안전성 및 효율성을 분석한 결과, 패킷 드롭이 70%이고 반응시간이 0.5초인 경우 자율주행차 비율이 70%에서 충돌을 최대 66.67%까지 줄일 수 있으나 주행시간이 2.6% 증가하는 것으로 분석하였다.

Zhu and Tasic(2021)은 다양한 충돌 요인들을 실제와 유사하게 구현하기 위하여 MATLAB 버전 R2020a 소프트웨어를 사용하여 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 고속도로 엇갈림구간에서 자율주행차의 잠재적인 안전성 영향을 평가한 결과, 자율주행차가 도입되었을 때 사고의 빈도 및 심각도가 낮아지는 것으로 나타났다.

## 2. 유전알고리즘을 활용한 교통정산 연구

Park and Hongtu(2006)은 Convignton시에 위치한 고속도로 내 공사구간을 대상으로 유전알고리즘을 활용해서 입력변수를 보정하였으며, 유전알고리즘을 활용하여 보정한 질차가 네트워크의 보정 및 검증에 매우 효과적인 것을 입증하였다.

Oh et al.(2018)은 고속충돌기 수집 자료로 유전알고리즘을 활용하여 차종별 주행특성을 반영하였으며, 영업소 진입부 축중차로에서의 현행 과적단속 방안과 시범과적단속 방안 간의 교통류 특성을 안전성, 운영효율성 및 환경성 측면에서 비교분석하였다.

Lee et al.(2023)은 유전알고리즘을 활용하여 엇갈림유형별로 주행행태를 나타내었으며, 다양한 교통조건에 대해 VISSIM을 활용하여 고속도로 기본구간에서의 밀도-기반 서비스수준이 엇갈림구간에서 지속될 수 있는 엇갈림유형별 길이 설계기준을 제시하였다.

## 3. 자율주행차 주행행태 모델

자율주행차의 주행행태를 구현할 수 있는 모델로는 Wiedemann Model, Intelligent Driving Model(IDM) 및 Optimal Velocity Model(OVM) 등이 있다.

Wiedemann Model은 VISSIM에서 기본적으로 사용되는 운전자 행태모형으로 자유흐름, 접근, 추종, 브레이크의 4가지 운전행태에 기초하고 있으며, 연속류에서는 Wiedemann 99 Model을 사용한다. 특히, Wiedemann 99는 많은 매개변수를 변경할 수 있으며 속도와 후속 거리 사이에 선형 관계를 가정한다. 또한, Wiedemann 74와 달리 앞차가 그들의 행동에 영향을 미치지 않을 때 차량은 정확한 원하는 속도를 유지하여 자율주행차를 시뮬레이션하는 데 더 적합하다(Zeidler et al., 2019).

IDM은 개별차량의 인지반응시간과 가속도에 따라 안전한 차간거리를 유지하며 주행할 수 있도록 설계된 모형이다. IDM은 인지반응시간의 차이를 잘 보여줄 수 있으나, 특정 차량의 속도가 특정 시간에는 음수가 될 수 있다는 한계가 있다(Albeaik et al., 2022).

OVM은 정체를 유발하는 교통류의 불안정성을 모델링한 것으로 각 운전자는 선행차량의 움직임에 반응하며 안전속도를 유지하기 위하여 가감속을 제어하고, 반응지연시간이 고려되지 않는다(Bando et al., 1995). 그러나, 일부 상황에서는 비현실적인 큰 가속값을 띤다는 한계가 있다(Lazar et al., 2016).

## 4. 연구의 차별성

선행연구를 고찰한 결과, 미시교통시뮬레이션인 VISSIM을 활용하여 자율주행차와 일반자동차 혼재시 자율주행차의 도입률별로 교통류 안전성을 분석한 많은 연구가 수행되었으며, 자율주행차의 주행행태를 구현시 Wiedemann 99 Model, IDM, OVM 등과 같은 다양한 모형들이 활용되었다. 그러나, 대부분의 선행 연구들에서는 일반자동차의 주행행태를 구현할 때 분석구간을 주행하는 차량들의 움직임을 반영되어 있지 않음을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 운전자의 인식, 안전, 주의력 등을 반영하여 다양한 수준의 자율주행차 레벨을 적용할 수 있고 종방향 제어에 실패한 차량의 충돌을 허용하여 다양한 시나리오에서 다양한 수준의 자율주행차가 안전에 미치는 영향을 분석할 수 있는(Arvin et al., 2018) Wiedemann 99 Model을 활용하여 일반자동차와 자율주행차 주행행태를 구현하였으며, 유전알고리즘을 활용하여 일반자동차의 주행행태를 파라미터를 분석구간의 일반주행차 주행행태와 유사하게 구현한 후 자율주행차 도입시의 안전성을 분석한 것에 차별성이 존재한다.

### Ⅲ. 실험설계

실험설계에서는 분석 시뮬레이션 환경과 분석 시나리오를 제시하였으며, 일반자동차 및 자율주행차의 주행행태에 대한 입력변수를 설정하는 방법을 서술하였다.

#### 1. 시뮬레이션 환경 및 시나리오

본 연구의 시뮬레이션 환경은 NGSIM 데이터의 상황과 동일하게 구축하였다. 분석네트워크는 총 640m의 5차로의 본선구간 및 유출입 연결로 사이에 위치한 1차로의 부가차로로 이루어진 연속류 직선도로이다.

속도 및 가속도 값의 이상치 제거 등의 기본적인 데이터 전처리 후 교통량 및 공간평균속도를 산출한 결과 분석시간 동안 4,824대의 차량이 주행하였으며, 공간평균속도는 34.24km/h로 분석되었다. 분석된 결과를 바탕으로 도로의 교통류 상황을 고려하여 네트워크의 Desired Speed는 30~50km/h로 설정하였으며, 주행속도는 교통류 상황에 따라 변경되도록 하였다. 그리고 예곡된 분석결과가 도출될 수 있으므로 총 3,300초의 시뮬레이션 시간 동안 수집된 자료 중에서 초기 600초의 자료는 분석에 포함하지 않았으며, 이후 2,700초의 자료만 분석하였다.

분석 시나리오는 자율주행차의 도입률인 Market Penetration Rate(MPR) 10~90% 범위에서 10% 단위로 구분하여 총 9개의 시나리오로 구성하였으며, 각 시나리오별로 30회의 시뮬레이션을 수행하였다.

#### 2. 시뮬레이션 정산

미시적 시뮬레이션은 도로 네트워크 내 차량들의 개별적인 움직임을 현실과 유사하게 구현하며, 이를 통하여 교통류의 평가 등의 목적으로 활용되어왔다. 미시적 시뮬레이션을 활용한 선행연구들에서 차량들의 움직임을 정교하게 구현하기 위하여 다양한 연구를 수행해 왔으며, 그 중 가장 중요한 단계 중 하나가 미시적 시뮬레이션 모형의 정산이다. 정산이란, 미시적 시뮬레이션의 정밀도 및 신뢰성을 높이기 위하여 시뮬레이션 Software의 입력변수들을 보정하는 과정을 의미한다. 본 연구에서는 미시적 시뮬레이션으로 VISSIM을 활용하며, 시뮬레이션의 신뢰도를 높이기 위하여 모형 정산을 두 단계를 통하여 수행하였다. 첫 번째, VISSIM 내 일반자동차 입력변수 도출을 위하여 일반자동차 입력변수를 추정하였다. 선행연구 검토를 통하여 입력변수 및 범위값을 설정하였으며, 유전알고리즘을 통해 입력변수를 최적화하였다. 두 번째, 자율주행차의 입력변수를 구성하였다. 이러한 정산 과정을 통해 일반자동차의 주행행태를 최대한 정밀하게 구현하였다.

#### 3. 일반자동차 입력변수 추정

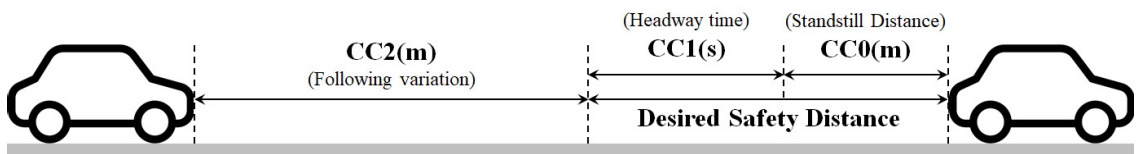
##### 1) VISSIM 입력변수 및 범위값 설정

자동차의 주행행태를 모사하려면 다양한 입력변수에 대한 조정이 필요하나, 실수로 이루어진 모든 변수의 최적값을 도출하기란 어렵다. 이에, 본 연구에서는 VISSIM을 활용하여 일반자동차의 입력변수를 보정한 연구를 고찰한 결과, 기존 연구의 분석 결과를 반영하여 차량의 주행행태에 영향을 가장 크게 미치는 주요 입력변수와 각 입력변수의 최소값과 최대값을 <Table 1>과 같이 선정하였다. 입력변수의 범위값은 고찰한 기존 연구의 입력변수별 최소값과 최대값 범위 내에서 선정하였다.

<Table 1> Driving behavior parameter range for VISSIM calibration

Variation	Park et al.(2006)	Oh et al. (2018)	Lee et al. (2023)	Seelam et al.(2017)	M. Sc. (2022)	This Study
CC0, Standstill distance(m)	1.0~2.0	2.23~6.07	0.0~3.0	0.5~1.5	0.0~20.0	0.0~3.0
CC1, Headway time(s)	0.5~3.0	0.0~16.9	0.0~2.0	0.5~1.5	0.0~5.0	0.0~5.0
CC2, car-following distance(m)	0.0~15.0	2.23~20.94	0.0~40.0	2.0~10.0	0.0~10.0	0.0~40.0
CC3, Threshold for entering following(s)	-30.0~0.0	-	-	-	-20.0~0.0	-
CC4, Negative following threshold(m/s)	-1.0~0.0	-	-	-	-5.0~0.0	-
CC5, Positive following threshold(m/s)	0.0~1.0	-	-	-	0.1~5.0	-
CC6, Speed dependency of oscillation(1/(m/s))	0.0~20.0	-	-	-	0.1~20.0	-
CC7, Oscillation during acceleration( $m/s^2$ )	0.0~1.0	-	-	-	-1.0~1.0	-
CC8, Standstill acceleration( $m/s^2$ )	1.0~8.0	-	-	-	0.0~8.0	-
CC9, Acceleration at 80km/h( $m/s^2$ )	0.5~3.0	-	-	-	0.0~8.0	-
Look-ahead distance	200~300	-	-	-	72~108	-
Observed vehicles	1~5	-	-	-	-	-
Accepted deceleration( $m/s^2$ )	-3.0~0.2	-	-	-	-	-
LC4, Minimum headway(m)	0.1~0.9	-	-	-	-	-
Maximum deceleration for cooperative braking( $m/s^2$ )	-5.0~-1.0	-	-9.0~0.0	-	-	-5.0~0.0
Safety distance reduction factor	-	-	0.0~1.0	-	-	0.0~1.0

차량추종모형 입력변수 중 종방향 움직임에 영향을 많이 주는 입력변수로는 CC0, CC1, CC2를 선정하였다. CC0(Standstill distance)은 차량이 다른 차량과 안전한 거리를 유지하기 위해 정지할 때 유지해야하는 최소 거리를 의미한다. CC1(Headway time)은 차량이 선행차량과 유지하려는 차두시간을 의미한다. CC2(Car-following distance)는 선행차량과의 안전거리(CC0 + CC1 × 차량속도)에 추가적인 여유거리를 포함한 거리를 의미한다.



<Fig. 2> Example of parameter set for Wiedemann 99 model

횡방향 움직임에 영향을 많이 주는 입력변수로는 Maximum deceleration for cooperative braking과 Safety distance reduction factor를 선정하였다. Maximum deceleration for cooperative braking은 차로변경시 차량의 최대 감속도를 의미하며, Safety distance reduction factor는 차로변경 중 감소하는 안전거리의 비율을 의미한다. 분석을 수행할 시 5개의 입력변수를 제외한 나머지 입력변수는 VISSIM 내의 기본값을 적용하여 분석을 진행하였다.

## 2) 유전알고리즘을 활용한 VISSIM 입력변수 최적화

유전알고리즘(Genetic Algorithm)이란 목적함수에 부합하는 보다 적합한 변수들의 조합을 찾아가는 알고리

즘으로, 많은 경우의 수 중 최적값을 찾는 목적으로 많이 이용되고 있다.

본 연구에서 유전알고리즘을 활용하여 VISSIM 입력변수의 최적값을 찾아가는 수행과정은 <Fig. 3>과 같다. 먼저, VISSIM 2023으로 NGSIM 데이터와 동일하게 네트워크를 구축하고 차량 등을 입력하였다. 두 번째로는 Python으로 입력변수별 변수값을 랜덤하게 설정하고 VISSIM에 입력 후, 효과적인 MAPE(Mean Absolute Percentage Error), RMSPE(Root Mean Square Percentage Error) 및 GEH를 산출한다. Equation 1,2,3은 3가지 효과 척도에 대한 수식을 나타낸 것이다. 세 번째로는 효과척도의 수렴 조건을 검토 후, 효과척도의 값이 가장 우수한 입력변수의 조합을 선정한다. 효과척도의 수렴 조건은 MAPE와 RMSPE의 경우 값이 0.05 이하, 교통분석모형에 사용되는 GEH는 값이 5 이하의 값으로, 조건이 수렴하면 모사수준이 합리적인 것으로 판단한다(Lee et al., 2023). 만약 수렴조건이 부합하지 않는다면 새로운 조합을 생성하여 두 번째 단계로 돌아가 수렴조건을 만족할 때까지 수행한다.

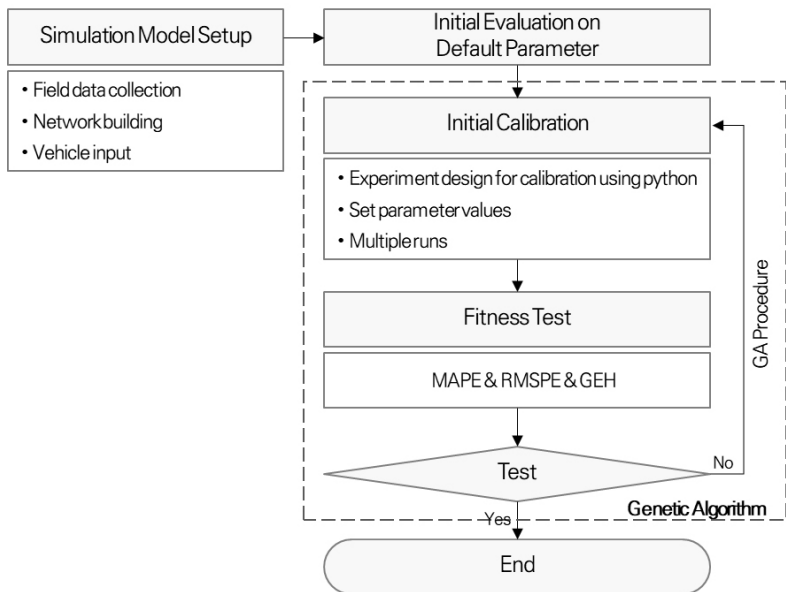
유전알고리즘 분석시에는 최적해를 찾아가는 값 단위가 0.01로 변경되도록 하여 다양한 경우의 수가 발생하므로, 10세대 20개체군, 해 돌연변이 확률은 10%, 유전자 돌연변이 확률은 50%로 설정하였다.

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

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

$$GEH = \sqrt{\frac{2(\hat{v} - v)^2}{\hat{t} + t}} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $\hat{v}$  : NGSIM 데이터로 도출된 평균통행속도       $v$  : 시뮬레이션에서 도출된 평균통행속도  
 $\hat{t}$  : NGSIM 데이터로 도출된 통행량                       $t$  : 시뮬레이션에서 도출된 통행량



<Fig. 3> VISSIM input variable optimization process using Genetic Algorithm

5개의 입력변수에 대해 유전알고리즘을 활용하여 최적값을 분석한 결과는 <Table 2>와 같으며, CC0은 2.75, CC1은 3.28, CC2은 13.07, Maximum deceleration for cooperative braking은 -3.18, Safety distance reduction factor 은 0.46이 도출되었다. 해당 입력변수를 사용하여 효과적도를 분석한 결과, MAPE 및 RMSPE 값은 0.002, GEH 은 0.130으로 실제 주행행태인 NGSIM 데이터와 통행량과 평균통행속도와의 매우 유사하다고 판단할 수 있다.

<Table 2> Calibration analysis results of VISSIM parameters for non-autonomous vehicles

Variation	Value	MAPE	RMSPE	GEH
CC0, Standstill distance(m)	2.75	0.002	0.002	0.130
CC1, Headway time(s)	3.28			
CC2, car-following distance(m)	13.07			
Maximum deceleration for cooperative braking( $m/s^2$ )	-3.18			
Safety distance reduction factor	0.46			

#### 4. 자율주행차 입력변수 구성

VISSIM으로 자율주행차의 주행행태를 구현한 연구들을 검토한 결과, Atkins(2016) 연구에서 제시한 입력 변수를 다수의 논문(Lee et al., 2019; Jung et al., 2020; Morando et al., 2018; Ahmed et al., 2021)에서 사용하였다. 본 연구에서 자율주행차는 Lv.4이상을 대상으로 하고 있기에, 본 연구에서도 <Table 3>과 같이 Atkins(2016)의 연구에서 제시한 자율주행차 Lv.4의 입력변수를 사용하였으며, 사람행태가 반영된 CC2, CC4, CC5, CC6은 0으로 설정하였다.

<Table 3> Driving behavior parameter value of autonomous vehicle

Variation	Value
CC0, Standstill distance(m)	0.5
CC1, Headway time(s)	0.6
CC2, Car-following distance(m)	0
CC4, Negative following threshold(m/s)	0
CC5, Positive following threshold(m/s)	0
CC6, Speed dependency of oscillation(1/(m/s))	0
CC7, Oscillation during acceleration( $m/s^2$ )	0.4
CC8, Standstill acceleration( $m/s^2$ )	3.8
CC9, Acceleration at 80km/h( $m/s^2$ )	1.8
LC4, Minimum headway(m)	0.2
LC5, Safety distance reduction factor	0.3
MG1, Minimum time gap(s)	2.4
MG2, Minimum headway(m)	3.5



## IV. 교통류 안전성 분석

### 1. 평가지표 선정

교통류 안전성 분석을 위한 평가지표로는 대리안전척도 중 하나인 TTC(Time To Collision)을 활용하였다. TTC는 Equation 4와 같으며, 두 차량이 현재 지점에서 현재 속도로 진행할 경우 후행 차량과 선행 차량의 충돌이 발생하는 최소시간으로 해당 값이 작을수록 위험도가 높다.

$$TTC_i = \frac{x_j(t) - x_i(t)}{v_j(t) - v_i(t)} \dots\dots\dots (4)$$

여기서,  $x_j(t)$  : t초일 때 j차량의 위치좌표(x,y)                       $v_j(t)$  : t초일 때 j차량의 속도  
 $x_i(t)$  : t초일 때 i차량(j차량과 가장 인접한 동일차로 또는 차로변경하는 차로의 후행차량)의 위치  
 좌표(x,y)  
 $v_i(t)$  : t초일 때 i차량(j차량과 가장 인접한 동일차로 또는 차로변경하는 차로의 후행차량)의 속도

본 연구에서는 사고위험도가 높아 교통류 안전성에 영향을 미칠 수 있다고 판단되는 기준으로  $TTC_i$  값을 0.9초 이내(Choi et al., 2017)로 설정하였으며, 분석을 위해 SSAM(Surrogate Safety Assessment Model) 프로그램을 사용하였다. 또한, 자율주행차는 위험상황을 회피할 수 있다고 가정하여 분석대상에서는 일반자동차가 후행차량인 경우만을 고려하였다.

### 2. 교통류 안전성 분석 결과

본 연구에서는 MPR 10~90%범위에서 10% 단위로 구분하여 총 9개의 시나리오에 대해서 분석을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

TTC에 따른 상충횟수를 분석하기에 앞서, MPR별로 통과교통량과 평균통행속도를 분석하였다. 자율주행차의 MPR이 증가할수록 통과교통량이 많아지며 이로 인하여 평균통행속도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는, 자율주행차가 일반자동차에 비하여 안전거리, 차간거리 등이 짧아 더 많은 차량이 주행하였기 때문으로 판단된다.

<Table 4> Average speed and traffic volume by MPR

MPR	Average speed(km/h)	Average traffic volume(veh)
10%	41.98	4,633
20%	41.48	4,966
30%	40.99	5,326
40%	40.48	5,542
50%	39.98	5,781
60%	39.49	6,125
70%	39.00	6,397
80%	38.50	6,408
90%	38.00	6,411

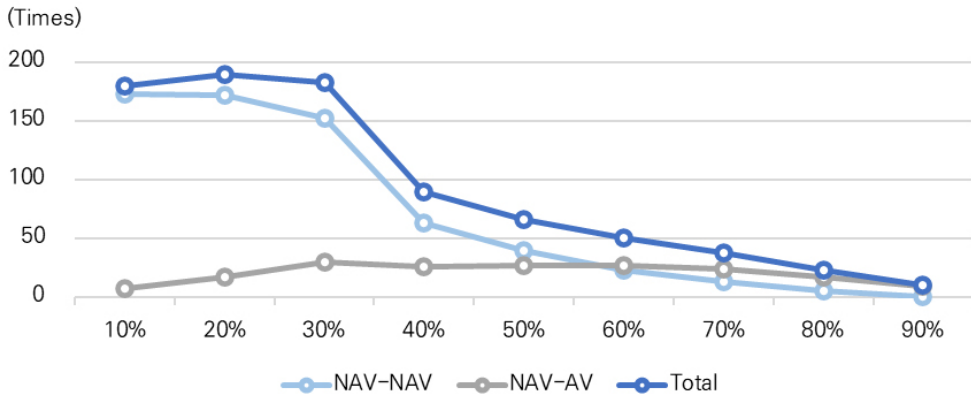
후행차량이 일반자동차인 경우 MPR이 10~20%까지는 상충이 증가하였으나 30% 이상인 경우에는 자율주행차의 비율이 증가할수록 상충횟수가 감소하는 양상을 보였다. 선행차량과 후행차량 모두 일반자동차인 경우에는 MPR이 증가할수록 상충횟수가 지속적으로 감소하였으며, 선행차량이 자율주행차인 경우에는 MPR이 10~60%까지 상충횟수가 증가하고 70% 이상인 경우에는 MPR이 증가할수록 상충횟수가 감소하였다.

즉, 자율주행차의 도입 비율이 증가할수록 사고위험도가 낮아지나, MPR이 60%까지는 일반자동차와 자율주행차간의 사고위험이 높다. 따라서 자율주행차와 일반자동차가 혼재된 교통상황에서는 교통류의 안전성을 향상시킬 방안이 필요한 것으로 판단된다.

<Table 5> Conflict count analysis result by MPR(Average of 30 times) (unit : times)

MPR	NAV-NAV (Preceding vehicle : NAV)			NAV-AV (Preceding vehicle : AV)			Total		
	lane change	rear end	total	lane change	rear end	total	lane change	rear end	total
10%	52.0	120.5	172.5	2.1	5.4	7.5	54.1	125.9	180.0
20%	67.0	104.8	171.9	5.4	12.0	17.4	72.5	116.8	189.3
30%	63.9	88.6	152.5	8.5	22.0	30.6	72.4	110.7	183.1
40%	18.1	45.2	63.3	2.1	24.4	26.5	20.2	69.6	89.8
50%	8.1	31.7	39.8	1.5	25.4	26.9	9.6	57.1	66.7
60%	3.6	20.0	23.6	0.9	26.0	26.9	4.4	46.0	50.5
70%	1.5	12.6	14.0	0.3	23.8	24.1	1.8	36.4	38.1
80%	0.3	5.4	5.6	0.1	17.2	17.3	0.3	22.6	22.9
90%	0.0	1.3	1.3	0.0	9.2	9.2	0.0	10.5	10.5

\* NAV : Non-autonomous vehicle, AV : Autonomous vehicle



<Fig. 4> Conflict count analysis result by MPR(Average of 30 times)

## V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 US I-101 Highway 640m 구간을 대상으로 미시교통시물레이션을 활용해 자율주행차 도입률에 따른 교통류 안전성 분석을 수행하였다. VISSIM 구현 시 일반자동차의 입력변수는 유전알고리즘을 활용

하여 실제 주행행태와 유사한 주행행태를 구현하였으며, 자율주행차는 선행 연구 검토를 통해 입력변수 값을 도출하여 주행행태를 구현하였다. 자율주행차 도입률인 MPR 변화에 따라 총 9개의 시나리오에 대해 30 회씩 반복수행하여 분석하였다. 후행차량이 일반자동차일 때 총 상충횟수를 분석한 결과, MPR 20%까지는 MPR이 증가함에 따라 전체 상충횟수가 증가하였으나, 30% 이상부터는 MPR이 증가할수록 상충횟수는 지속적으로 감소하였다. 본 연구에서 자율주행차는 위험상황을 회피할 수 있다고 가정하여 분석대상에서는 일반 자동차가 후행차량인 경우만을 고려하였기 때문에 자율주행차 교통량이 증가할수록 일반자동차가 후행차량 인 비율이 감소하여 발생한 결과로 판단된다. 일반자동차가 선행차량일 때의 상충횟수를 분석한 결과, MPR 20%까지는 MPR이 증가함에 따라 전체 상충횟수가 증가하였으나, 30% 이상부터는 MPR이 증가할수록 상충 횟수는 지속적으로 감소하였다. 그러나, 선행차량이 자율주행차인 경우 MPR 10~60%의 시나리오에서는 MPR이 증가할수록 상충횟수가 증가하여 사고발생 위험이 있는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 일반자동차 에 비해 자율주행차는 빠른 가속과 대기상태에서 빠른 가속도를 허용하고 있어 이러한 자율주행차의 빠른 동작 변화는 후행하는 일반자동차의 상충에 영향을 미칠 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 자율주행 차 도입률이 10%~60%까지는 일반자동차와 자율주행차를 분리하는 자율주행 전용차로의 도입을 검토할 필 요가 있다고 판단된다.

본 연구에는 다음과 같은 연구의 한계가 존재한다. 첫 번째로, 자율주행차의 주행행태를 기존 문헌결과를 바탕으로 하여 실제 주행행태를 표현하지 못했다는 한계가 존재한다. 그러므로 보다 정확한 분석을 위해 향 후 연구에서는 자율주행차의 실제 주행행태를 반영하여 연구를 수행할 필요가 있다. 두 번째로, 본 연구의 공간적 범위가 US I-101 Highway로 제한되어 다양한 도로유형의 일반자동차의 주행행태, 교통량 등을 모사 하였다는 한계가 존재한다. 향후에는 다양한 도로유형의 주행궤적 데이터를 제공하는 levelXdata 등의 데이 터를 활용해 다양한 도로 유형 등에서의 주행행태를 반영하여 연구를 수행할 필요가 있다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호 23AMDP-C162353-03)의 지원으로 수행하였습니다.

## REFERENCES

- Ahmed, H. U., Huang, Y. and Lu, P.(2021), “A Review of Car-Following Models and Modeling Tools for Human and Autonomous-Ready Driving Behaviors in Micro-Simulation”, *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, pp.314-335.
- Albeaik, S., Bayen, A., Chiri, M. T., Gong, X., Hayat, A., Kardous, N., Keimer, A., McQuade, S. T., Piccoli, B. and You, Y.(2022), “Limitations and Improvements of the Intelligent Driver Model (IDM)”, *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Applied Dynamical Systems*, vol. 21, no. 3, pp.1-32.
- Alkis, P., Mohammed, Q. and Marianna, I.(2019), “Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways”, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 124, pp.12-22.
- Amolika, S., Sai, C., Kasun, P. W., Navreet, V. and Vinayak, D.(2020), “Crash Severity and Rate

- Evaluation of Conventional Vehicles in Mixed Fleets with Connected and Automated Vehicles”, *Procedia Computer Science*, vol. 170, pp.688-695.
- Arvin, R., Kamrani, M., Khattak, A. J. and Rios-Torres, J.(2018), “Safety Impacts of Automated Vehicles in Mixed Traffic”, *Transportation Research Board 97th Annual Meeting*.
- Atkins(2016), Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow, *Stage 2: Traffic Modelling and Analysis Technical Report*, Department for Transport.
- Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A. and Sugiyama, Y.(1995), “Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation”, *PHYSICAL REVIEW E*, vol. 51, no. 2, pp.1035-1042.
- Choi, H., Cho, S. H., Cho, Y. J. and Kim, W. K.(2017), “A Study of Driver Cognitive Reaction Time for Traffic Crash Interpretation”, *77th Presentation of the Korean Society of Transportation*, pp.196-201.
- Garg, M. and Bouroche, M.(2023), “Can Connected Autonomous Vehicles Improve Mixed Traffic Safety Without Compromising Efficiency in Realistic Scenarios?”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 6, pp.6674-6689.
- Jin, H. R., Kim, S. H. and Kim, T. H.(2022), “A Study on Safety of Urban Road Traffic Flow of Autonomous Vehicles in Adverse Conditions”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 40, no. 2, pp.161-177.
- Jung, E. B.(2015), *Methodology for Designing Traffic Information and Control Systems based on Vehicle Cooperations*, Doctoral Dissertation, Dept. Transportation Eng., Univ. Hanyang, Korea.
- Jung, J. H., Park, J. Y. and Oh, C.(2020), “Assessing the Safety Effects of Expressway Managed Lane for Autonomous Bus Using Traffic Simulation”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 38, no. 1, pp.58-67.
- Kim, B., Pourrahmani, E. and Fagnant, D. J.(2017), “The Potential Benefits and Cost of Connected and Automated Vehicles: A Texas Case Study”, *Transportation Research Board 96th Annual Meeting Transportation Research Board*.
- Ko, W. R., Park, S. M., So, J. H. and Yun, I. S.(2021), “Analysis of Effects of Autonomous Vehicle Market Share Changes on Expressway Traffic Flow Using IDM”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 4, pp.13-27.
- Lazar, H., Rhoulami, K. and Rahmani, D.(2016), “A Review Analysis of Optimal Velocity Models”, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, vol. 44, no. 2, pp.123-131.
- Lee, J. Y., Lee, E. T., Lee, S. J., Kim, T. W. and Son, B. S.(2023), “Estimating the Effects of Freeway Weaving Section Length on Level of Service Based on Microsimulation”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp.1-14.
- Lee, S. Y., Jeong, E. B., Oh, M. S. and Oh, C.(2019), “Driving aggressiveness management policy to enhance the performance of mixed traffic conditions in automated driving environments”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 121, pp.136-146.
- M. Sc. Qinglong, L.(2022), *Calibration of Cal Following Model with Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization methods*, Department of Mobility Systems Engineering TUM School of Engineering and Design Technical University of Munich.
- Morando, M. M., Tian, Q., Truong, L. T. and Vu, H. L.(2018), “Studying the Safety Impact of

- Autonomous Vehicles Using Simulation-Based Surrogate Safety Measures”, *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, pp.1-11.
- Navreet, V., Hanna, G. S., Travis, W. and Vinayak, D.(2019), “A safety assessment of mixed fleets with Connected and Autonomous Vehicles using the Surrogate Safety Assessment Module”, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 131, pp.95-111.
- Oh, M. S., Kown, S. M. and Oh, C.(2018), “Analyzing the Impact of Weigh-in-Motion(WIM)-based Overloading Enforcement Systems on Freeway Traffic Stream”, *International Journal of Highway Engineering*, vol. 20, no. 6, pp.129-140.
- Park, B. K. and Qi, H.(2006), “Microscopic Simulation Model Calibration and Validation for Freeway Work Zone Network-A Case Study of VISSIM”, *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pp.1471-1476.
- Seelam, S., Arpan, M. and Asish, P.(2017), “Calibration of Vissim Model For Multilane Highways Using Speed Flow Curves”, *The Civil Engineering Journal*, vol. 26, no. 3, pp.303-314.
- Zeidelr, V., Buck, S. H., Kautzsch, L. and Vortisch, P.(2019), “Simulation of Autonomous Vehicles Based on Wiedemann’s Car Following Model in PTV Vissim”, *98th Annual Meeting of the Transportation Research Board(TRB)*, pp.1-12.
- Zhu, J. and Tasic, I.(2021), “Safety analysis of freeway on-ramp merging with the presence of autonomous vehicles”, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 152, no. 105966, pp.1-15.