

# 시뮬레이션 기반 자율주행자동차 혼입률과 교통량 변화에 따른 도로 네트워크의 성능 분석

도명식\*<sup>ORCID</sup> · 정유미\*\*<sup>ORCID</sup>

Do, Myungsik\*<sup>ORCID</sup>, Jeong, Yumi\*\*<sup>ORCID</sup>

## Performance of the Road Network with Market Penetration Rates and Traffic Volumes of Autonomous Vehicle using Traffic Simulation

### ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the performance of the road network according to the penetration rate of autonomous vehicles (AV) of Level 4 or higher and the change in traffic volume. First, prior studies related to vehicle control variables of AV were reviewed, and future traffic demand in 2040, which is predicted to have a 50 % market share of AVs, was reflected in the simulation analysis. In addition, the change in traffic flow of continuous and intermittent flows was analyzed by increasing the AV market penetration rate and traffic volume of passenger cars, trucks, and buses by 25 % step by step from 0 to 100 %. As a result of the analysis, it was confirmed that the travel time increased as the traffic increased, and the pattern of decreasing the travel time due to the increase in the share of AVs, that is, the development of technology, can also be confirmed. Furthermore, it was also confirmed that the traffic speed showed a trend of increasing as the share of AVs increased. In this study, it was confirmed that the law of diminishing marginal rate of substitution (MRS) was satisfied by calculating the MRS according to the combination of traffic volume and speed while increasing the market penetration rate of AVs. Furthermore, it was confirmed that the convexity of the indifference curve was also satisfied in both intermittent and continuous traffic flow environments.

**Keywords :** Autonomous Vehicle (AV), Penetration rate, Marginal rate of substitution, Convexity of indifference curve

### 초록

본 연구에서는 레벨4 이상의 완전자율주행자동차(autonomous vehicle)의 혼입률과 교통량의 변화에 따른 도로 네트워크의 성능 분석을 목적으로 하였다. 먼저, 자율주행자동차의 차량제어변수 관련 선행연구 검토와 전문가 설문 조사를 통해 자율주행 시장점유율 50 %로 예측되는 시점인 2040년의 장래 교통 수요를 예측해 이를 시뮬레이션 분석에 반영하였다. 또한, 승용차, 화물차, 버스의 자율주행 혼입률 및 교통량을 0~100 %까지 단계별 25 %씩 증가시켜가면서 연속류와 단속류의 교통흐름의 변화를 분석하였다. 분석 결과 교통량이 많아짐에 따라 통행시간이 증가함을 확인하였으며, 자율주행자동차 점유율이 증가 즉, 기술의 발전에 따른 통행시간 감소 패턴도 확인할 수 있다. 나아가, 자율주행자동차 점유율이 증가함에 따라 통행속도는 증가하는 추세를 보임도 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 자율주행자동차 혼입률을 증가시키면서 교통량과 속도의 조합에 따른 한계대체를 산정을 통해 한계대체를 체감(law of diminishing MRS)의 법칙이 성립함을 확인하였다. 나아가 무차별 곡선의 볼록성도 단속류와 연속류 환경에서 모두 성립함을 확인하였다.

**검색어 :** 자율주행자동차, 혼입률, 한계대체율, 무차별곡선의 볼록성

\* 종신회원 · 교신저자 · 국립한밭대학교 도시공학과 교수 (Corresponding Author · Hanbat National University · msdo@hanbat.ac.kr)

\*\* 정회원 · 국립한밭대학교 도시공학과 박사과정 (Hanbat National University · leegagu1@naver.com)

Received October 30, 2023/ revised December 27, 2023/ accepted January 9, 2024

## 1. 서론

정보통신기술 및 인공지능의 발달은 세계 산업 경제의 성장을 주도하고 있으며, 이는 교통 분야와 융·복합하면서 자율주행자동차, UAM(Urban Air Mobility), 공공자동차 등 스마트 모빌리티 서비스로 우리 일상 속에서 밀접하게 경험할 것으로 예상된다. 이에 정부는 「모빌리티의 혁신 로드맵」을 통해 자율주행 모빌리티를 국민의 일상에 구현하기 위해 2027년 레벨4의 완전자율주행자동차 상용화 추진 목표를 발표했으며(MOLIT, 2022a), 자율주행자동차의 도입 및 확산과 안전한 운행을 위해 2021년 「자율주행자동차 상용화 촉진 및 지원에 관한 법률」을 제정해 운행기반조성 및 지원 등에 필요한 사항을 규정하고 있다. 또한, 2020년 5월 자율주행자동차 시범운행지구 지정 이후 2023년엔 전국 15개 시도(24개 지구) 지정해 운영 중이며, 2025년까지 전국 17개 모든 시·도로 확산을 계획 중에 있다.

자율주행자동차와 같은 모빌리티산업의 혁신은 교통의 흐름을 더 자유롭게 하며 도로의 차량 수를 감소함으로써 교통 혼잡과 이에 따른 배기가스 등의 배출량을 크게 줄일 수 있을 것으로 예측한다(Pakusch et al., 2018). 또한, 2025~2030년에는 개인 및 공공 자율주행자동차의 상업화가 이루어질 것으로 전망하고 있으며(PwC, 2019; Calvert et al., 2017). 더불어, 2046년에 이르면 전체 자동차의 판매량 중 50% 이상이 레벨 3 이상의 자율주행 시스템이 탑재된 자동차가 판매될 것으로 전망하며, 고속도로와 도심의 도로에서 공공의 자율주행 자동차와 자율주행 대중교통이 먼저 도입될 것으로 예측하고 있다(Austroroads, 2022).

자율주행자동차는 일반자동차에 비해 외부환경 및 선두 차량의 제동과 가속을 민감하게 감지·예측함으로써 반응시간과 차량추종간격을 단축할 수 있으며 차량 간 실시간 정보 공유를 통해 군집주행이 가능함에 따라 교통의 흐름 개선에 긍정적 영향을 보일 것으로 예상된다(Calvert et al., 2017; Fernandes and Nunes, 2012; Pakusch et al., 2018; Pinjari et al., 2013; Talebpour and Mahmassani, 2016). 또한 자율주행자동차의 보급으로 용량 증가에 따른 도로 네트워크의 성능이 증가할 것이며(Mehr and Horowitz, 2020; Stern et al., 2018; Wang et al., 2017), 자율주행자동차의 혼입률(Market Penetration Rate, MPR)이 증가할수록 도로 성능에 미치는 긍정적 효과는 더 크게 나타날 것으로 기대된다(Lu et al., 2020; Park et al., 2021). 이와 같이 자율주행자동차와 일반자동차 간 운행 특성이 다르므로 도로상에 자율주행자동차와 일반자동차가 혼재되어 있을 경우 미래 교통 시스템 및 흐름에 미치는 파급력이 상이할 것이다(Al-Turki et al., 2023).

따라서, 자율주행자동차의 도입으로 인해 도로 네트워크에서 일반자동차와 자율주행자동차의 혼재 상황이 발생할 것이며, 이로

인한 교통흐름의 변화를 분석해 미래 일어날 도로상의 변화를 파악해 대응할 필요가 있다. 따라서, 자율주행자동차의 도로 네트워크상에 혼재될 경우를 시나리오로 설정하여 자율주행자동차의 혼입률 및 교통량 증가에 따른 도로의 상태 변화를 살펴보고자 한다.

또한, 기존 대부분의 연구가 승용차 기반 연속류 환경에 국한되었다는 한계를 감안하여 실제 가로망을 대상으로 다양한 차종(승용차, 버스, 트럭 등)을 고려한 시뮬레이션 분석을 위해 동일한 대상지를 교차로의 신호체계 등 차량 흐름에 영향을 받는 단속류와 기하구조 변경을 통해 연속류의 상태에서의 평균통행시간, 평균통행속도의 변화 및 속도의 변화에 따른 교통량의 탄력성으로 자율주행자동차의 보급으로 인한 도로 성능 변화의 분석을 목적으로 한다.

## 2. 선행연구 고찰

자율주행자동차의 혼입으로 인한 교통 환경 변화에 대한 연구가 최근 활발하게 이루어지고 있다. Stern et al.(2018)의 연구에서는 자율주행차량의 지능형 제어를 통해 대다수 차량이 자율주행 기능을 갖지기 전에도 교통 관리가 개선될 수 있음을 밝혔다. 또한, Talebpour and Mahmassani(2016)와 Al-Turki et al.(2021)의 연구에서는 자율주행자동차와 일반자동차의 비율에 따라 교통류의 특성이 상이함을 밝혔다.

더불어, 도로상에 일반자동차와 자율주행자동차의 혼입률에 따른 도로 용량 변화에 관한 연구는 국내외에서 활발히 이루어지고 있다. Lu et al.(2020)는 단속류를 대상으로 한 실험에서 가상의 격자형과 불규칙한 네트워크 모두 자율주행자동차(AV) 혼입률이 높아짐에 따라 용량이 준선형적으로 증가세를 보였으며, 자율주행자동차의 100% 혼입률에 도달할 경우 최대 교통 흐름은 도로상에 일반자동차만 존재할 때보다 16~23% 증가한다고 밝혔다.

또한, 시뮬레이션을 기반으로 교통량 변화에 따른 자율주행자동차 도입의 효과에 대해서 Park et al.(2021)은 단속류에서 기존 교통량의 2배까지 증가할 때 일반자동차만 존재할 경우 평균 통행시간이 158% 증가했지만, 레벨 4의 자율주행자동차의 혼입률이 100%까지 증가함에 따라 91%의 변화율을 보였으며, 혼입률이 100%에 도달하면 도로망의 40% 증대 효과가 있다는 연구 결과를 제시하였다. 이는 교통량의 증가로 악화하는 상황을 자율주행자동차의 혼입률 증가로 완화시킬 수 있음을 의미한다. Al-Turki et al.(2023)의 연구에서도 도시부에서 자율주행자동차의 혼입률이 50% 수준에 이르렀을 때 효과가 나타났음을 밝혔으며, Jones and Philips(2013)도 연속류의 상태에서 CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control) 기능이 있는 자율주행자동차의 혼입률이 40% 수준 도달 이후에 교통 흐름 개선에 영향이 있음을 주장하였다.

한편, 단속류 및 연속류와 같은 다양한 교통류에서의 도로 성능을 분석하기 위해 자율주행자동차의 신호제어, 차선 변경, 합류제어 및 다양한 운전자의 특성에 대한 매개변수를 이용한 미시적 교통 시뮬레이션 기반으로 분석 사례도 많이 있다. Wang and Wang (2017)은 일반자동차와 자율주행자동차의 성능평가를 위해 미시적 교통 시뮬레이션인 VISSIM 기반으로 한 연구에서 자율주행자동차는 속도 변화의 폭이 작기 때문에 교통량이 많은 상황에서 더 우수한 성능을 보였으며, 녹색 신호 동안 자율주행자동차의 총 유량은 일반자동차보다 더 큰 것으로 도출되었다.

Sukennik et al.(2018)은 자율주행자동차의 혼입에 따른 도로 용량과 효율성 변화에 관한 연구를 위해 자율주행자동차의 행동 패턴을 가정해 운전자가 앞차와의 특정 거리를 유지할 수 없다는 가정을 바탕으로 VISSIM의 Widemann 모델을 활용해 운전 행동 매개변수를 변경하여 1차선 도로를 대상으로 도시부 분석에 적합한 Widemann74 모델을 적용하였으며, 고속도로의 경우 Widemann99 모델을 사용하여 도시부와 고속도로의 자율주행자동차의 보급률 향상에 따른 1차선 링크 용량 변화를 분석하였다. 이 연구에서 도시부의 경우 속도 48~52 km/h 분포이면서 자율주행자동차의 혼입률이 100 %에서 도로 용량은 148.2 % 증가한 반면, 고속도로의 경우 같은 속도 분포일 때 156.7 %까지 증가함을 밝혔다. 즉, 고속 주행환경에서 차간거리와 속도에 따라 도로 용량이 저속 주행을 해야 하는 도시부보다 큰 도입 효과를 나타낼 수 있음을 시사하고 있다. 또한, Kim et al.(2018)는 연속류인 고속도로 공사구간의 동적합류제어 운영은 자율주행차 환경으로 변화하는 만큼 개선됨을 밝혔다.

한편, 자율주행자동차는 일반자동차보다 외부 요인에 대한 반응이 더 빠르며, 차량 간 거리를 더 좁은 간격으로 적절하게 유지할 수 있으므로, 군집주행이 가능하며(Talebpour and Mahmassani, 2016), 이러한 기술은 잠재적 교통 네트워크의 도로 용량을 향상시킬 수 있으며 결과적으로 자율주행자동차의 보급으로 인해 전반적인 도로 네트워크의 이동성이 향상될 것으로 예상된다(Mehr and Horowitz, 2020; Stern et al., 2018; Wang et al., 2017).

한편, Muhammad et al.(2020)의 연구에서는 자율주행자동차, 자율주행버스, 일반자동차, 일반버스 4가지 유형의 차량 혼입률 비교를 통해 자율주행자동차 보급률이 높아질수록 도로 용량과 평균 속도가 증가함을 밝혔으며, Al-Turki et al.(2021)도 자율주행자동차의 혼입률 및 특성, 교통량 수준, 운전자의 운전 행동 등의 요인에 따라 달라질 수 있으며, 자율주행자동차의 도로상의 위치와 분포, 선두 또는 뒤따르는 차량의 유형으로 인해 효과를 극대화할 가능성을 확인하였다.

지금까지 대다수의 자율주행자동차 혼입률의 시뮬레이션을 통한 선행연구의 경우 단독 차종의 자율주행 비율만을 고려한 연구가

주를 이루었으며, 도로 교통류의 종류 중 외부영향이 없는 연속류와 교통 신호와 같은 교통통제시설에 영향을 받는 단속류의 교통흐름 변화에 대한 종합적인 비교 분석한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 차종별 제원과 가 가속 능력의 차이, 공간 점유율 등의 특성을 시뮬레이션에 반영하기 위해 승용차를 포함한 화물차와 버스의 자율주행 혼입률을 함께 고려하여 분석하였으며, 자율주행자동차의 혼입률과 동시에 교통수요의 증가에 따른 단속류 및 연속류의 도로 성능 변화를 비교하고자 한다.

### 3. 도로 네트워크 성능 변화 분석방법론

#### 3.1 무차별곡선과 한계대체율

경제학에서 효용(utility)이란 재화를 소비함으로써 얻게 되는 만족을 말하며, 이는 심리적 만족도를 나타내는 것이기 때문에 효용의 크기만을 순서대로 나타낼 수 있는 서수적 효용(ordinal utility)론을 전제로 한 무차별곡선(indifference curve)을 기반으로 나타낼 수 있다. 여기서, 무차별곡선이란 소비자에게 동일한(무차별한) 정도의 효용을 주는 상품묶음의 집합을 그림으로 나타낸 것으로, 무차별곡선은 우하향하는 기울기를 가지면서 원점에서 더 멀리 떨어질수록 더 높은 효용수준을 가지는 특징(강단조성, strong monotonicity)을 가진다.

Fig. 1에서 A와 B점에서의 효용 사이에는 아무런 차이를 느끼지 못하지만(A~B), Fig. 2에서 A(혹은 B)점의 조합이 D점에서의 조합보다 명백하게 더 선호되는(strictly preferred) 관계를 가지게 되어 Eq. (1)이 성립한다(Mankiw, 2005; Lee, 1994).

$$U(X_A, Y_A) = U(X_B, Y_B) < U(X_C, Y_C) < U(X_D, Y_D) \quad (1)$$

여기서,  $U(x, y)$ 는 재화(x와 y)가 가지는 효용(utility)을 의미한다.

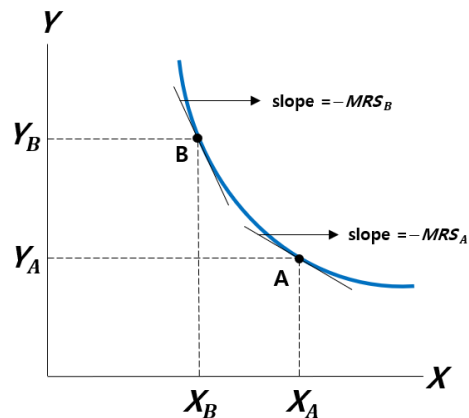


Fig. 1. Indifference Curve and MRS

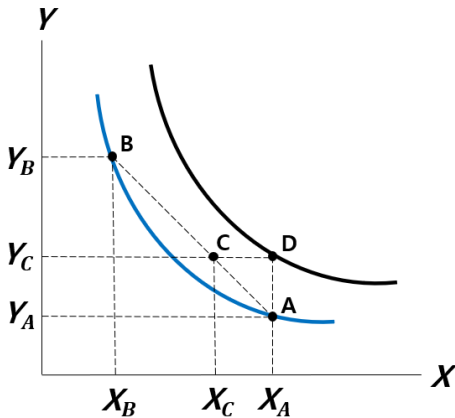


Fig. 2. Convexity of Indifference Curve

또한 무차별곡선은 원점에 대해 볼록한 모양(볼록성, convexity)을 가지며(Fig. 2 참조), 무차별곡선의 기울기는 한계대체율(MRS, Marginal rate of Substitution)을 통해 표현되며, Eq. (2)와 같다.

$$MRS_{x,y} = -\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{MU_x}{MU_y} \quad (2)$$

이때,  $\Delta y / \Delta x$ 는  $x$ 재화 한 단위 변화량에 따른  $y$ 재화의 변화량을 의미하며, Fig. 1에서 A(혹은 B)점에서의 무차별곡선의 기울기라고 할 수 있다. 한편, 한계대체율은 두 재화 사이의 한계효용(MU, marginal utility)의 비율이라 표현할 수 있으며,  $y$ 재화가  $\Delta y$  만큼 변함으로써 생기는 효용의 변화는  $MU_y \Delta y$  로 나타낼 수 있으며, 마찬가지로  $x$ 재화의 양이  $\Delta x$  만큼 변함으로써 생기는 효용의 변화는  $MU_x \Delta x$  로 나타낼 수 있다(Lee, 1994).

교통 분야에서는 주어진 도로 환경(차로 수, 신호 체계, 기술 수준 등)에서 효율적인 운영을 위해 성능 분석(performance analysis)이 필요하며, 자율주행자동차 기술수준의 발달로 인한 단속류 및 연속류에서의 도로 네트워크에서의 성능 변화 분석을 목적으로 한다. 여기서 본 연구에서는 논의를 간단하게 하기 위해, 자율자동차 기술의 발달로 인한 영향을 반영하기 위해 자율주행자동차 혼입률(MPR)을 증가시키면서 교통량과 속도의 조합에 따른 한계대체율의 차이를 통해 한계대체를 체감(law of diminishing MRS)의 성립 여부를 확인하고 무차별곡선의 볼록성의 특징을 통해 단속류와 연속류 환경에서의 성능을 비교하기로 한다.

### 3.2 설문조사 설계 및 분석대상지 개요

MOLIT(2022a)는 일상 속에서 스마트 모빌리티의 혁신 서비스 구현을 목표로 「모빌리티 혁신 로드맵」을 발표하였으며, 로드맵을 통해 자율주행자동차를 2027년도에 운전자가 필요 없는 레벨 4의 자율주행 실현과 함께 2035년까지 완전 자율주행자동차의

신차기준 출고율 50 %를 목표를 달성하기 위해 선제적 법·제도 정비 및 인프라 구축, 서비스 상용화 연구 등 종합적인 정책을 추진하고 있다. 이러한 국가의 정책 목표시기를 참고하여 자율주행자동차 관련 전문가들에게 레벨4의 자율주행자동차 시장점유율 50 % 시점을 개방형(주관식)으로 응답하도록 설문 조사를 시행하였으며, 응답 결과를 기반으로 시간적 범위를 설정하였다.

자율주행자동차와 연관된 건설 환경, 공간정보, 도시교통, 정보통신 분야의 전문가 36명에게 오프라인으로 3일간 실시하였으며, 도시·교통 분야의 전문가의 응답률이 전체의 44 %로 가장 높은 비율로 조사되었다. 또한, 연령은 30대와 50대의 응답자가 25 %로 가장 높은 비율을 차지했으며, 자율주행자동차와 관련된 연구 수행 경험이 ‘있음’이 56 %로 ‘없음’보다 상대적으로 높은 비율로 나타났다. 더불어, 설문 조사에 응답한 전문가들은 도로상에 전체 자동차 중 자율주행자동차가 차지하는 비율이 50 %가 되는 시점은 현시점으로부터 10년 후인 2033년, 2035년, 2040년, 2050년의 4종류로 응답하였으며, 이 중 2040년이 전체의 48 %로 가장 높은 비율로 응답되었다.

선정된 분석대상지는 실제 대전광역시 내에서 자율주행자동차의 혼재 상황을 적절히 반영하기 위해 다양한 차로를 포함하며, 향후 대전광역시의 교통 흐름을 대표적으로 반영할 수 있는 구간으로 지정하였다. 선정된 구간은 대전광역시 유성구 도안동과 가수원동 일대로 편도 1차로부터 5차로까지 다양하게 혼재되어 있으며, 편도 1차로의 구간은 대부분 아파트단지와 인접해 있으며, 편도 5차로의 구간은 유성구 도안동과 서구 가수원동을 동서를 가로지르고 있다. 분석대상지의 남북으로 큰 축을 이루고 있는 도안동로는 유성구 봉명동과 서구 가수원동을 연결하며, 도안신도시를 관통하고 있다. 또한, 도안동로 양방향 모두 중앙버스전용차로제 24시간 운영되고 있다(Fig. 3 참조).

분석 대상 구간의 신호 현시 자료는 대전광역시의 신호 현시 자료를 활용하였으며, 12곳의 삼거리 및 사거리에 신호 교차로가 설치되어 있다. 대상 구간 중 가장 짧은 주기인 서구 원도안로에 위치한 대전도안초등학교 삼거리의 100초를 제외하고, 대부분의

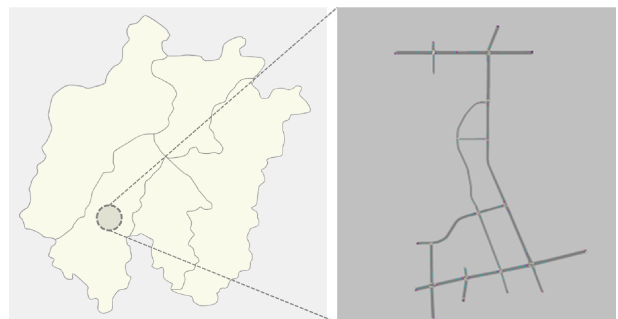


Fig. 3. Analysis Target Site

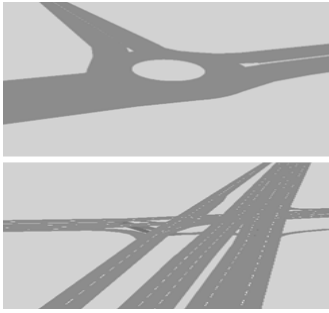


Fig. 4. Example of Geometric Changes

대상 구간의 신호 주기는 140초부터 190초까지 다양하게 구성되어 있다.

해당 구간의 차로 구성의 경우 삼거리 및 사거리로 구성되어 있으며, 편도 차로 수의 구성 비율은 1차로 17%(8구간), 2차로 33%(15구간), 3차로 26%(12구간), 4차로 15%(7구간), 5차로 9%(4구간)로 구성되어 있다. 분석대상지 기존의 신호 교차로가 있는 단속류와 동일 대상지의 편도 3차로 이상(10곳)은 고가도로로 및 편도 2차로 이하(2곳)는 회전교차로 설치를 통해 연속류의 상태로 기하구조 변경을 통해 동일 대상지의 단속류 및 연속류의 분석을 진행하였다(Fig. 4 참조).

### 3.3 분석대상지의 2040년 장래 교통수요 예측

본 연구에서는 현재 교통량이 아닌 전문가들에 의해 조사된 자율주행자동차의 시장점유율 50%가 될 것으로 예측되는 2040년의 장래 교통량을 반영하기 위해 장래 교통 수요를 예측하였다. 2040년 장래 교통수요 예측을 위해 한국교통연구원의 국가교통 DB의 대전세종충청권 O/D 및 네트워크 자료를 기반으로 하였으며, 통행 배정모형의 원단위 및 파라미터값은 도로철도지침(5판) 및 KTDB 자료를 적용하였다.

KTDB의 대전세종충청권의 대전 지역 대상으로 장래 2040년의 여객 O/D 교통량을 추정할 때, 통행배정 기본 시간은 전일 O/D를 활용해 교통시설 투자평가지침에서 제시하는 지역별 침두·비침두 지속시간과 집중률 원단위를 적용하여 침두시 교통량을 산출하였다. 이 같은 과정을 통해 도출된 장래 교통 수요를 VISSIM 시물레이

Table 1. Duration and Average Concentration Rate of Peak by Region (MOLIT, 2022b)

			Unit: hours, %
Sortation		Duration	Concentration rate
Daejeon area	peak time	6	8.98
	non-head time	12	3.74
	late at night	-	-

션 분석을 위해 MOLIT(2022b)의 「교통시설 투자평가지침(제7차)」에서 제시하고 있는 지역별 침두·비침두 집중률 중 대전권의 집중률이 8.98을 적용하여 해당 구간의 침두시 교통량으로 환산하여 시물레이션 분석을 진행하였다(Table 1 참조).

본 연구의 장래 교통량 예측을 위해 통행 배정모형은 도로 이용자들이 통행비용은 통행료의 의미로 운행요금과 시간 비용의 합으로 이를 통행 지체함수로 표현하면 Eq. (3)과 같다.

$$T = T_0[1 + \alpha(V/C)^\beta] + \text{구간거리} \times \text{가중치} \quad (3)$$

여기서,  $T$  : 링크 통행시간(일반화 비용, 분)

$T_0$  : 링크 자유통행시간(시간비용, 분)

$V$  : 링크 교통량(PCU/시)

$C$  : 링크 용량(PCU/시)

$\alpha, \beta$  = 파라미터 가중치 : (통행요금/km)[차종별 시간가치]

다음으로 본 분석의 2040년 장래 교통 수요 예측을 위해 기준년의 도의 캘리브레이션을 수행하며, 도로·철도 부문 표준지침에 의해 도로등급별로 주요 도로 구간의 관측교통량과 배정교통량의 차이를 나타내는 오차율을 정의하며, 이런 오차가 허용 범위보다 작아야 한다(Korea Development Institute, 2008).

따라서 본 분석의 오차율은 대상지의 인접도로는 15%, 기타 주요 도로는 30% 이하의 기준을 적용하였으며, 오차율 산정 공식은 Eq. (4)와 같다.

$$\epsilon(\%) = 100 \times \frac{f_1^{est} - f_1^{obs}}{f_1^{obs}} \quad (4)$$

여기서,  $\epsilon$  : 오차율(%)

$f_1^{est}$  : 통행배정 분석 결과에 의한 링크의 추정교통량(PCU/시)

$f_1^{obs}$  : 링크의 관측교통량(PCU/시)

### 3.4 자율주행자동차의 차량추종모형

교통 네트워크 및 교통 관리 시스템의 복잡성이 증가함에 따라 미시적 교통 시물레이션은 다양한 교통 관리나 제어 시스템을 평가하고 최적화하는 주요 분석 도구 중 하나이다(Lu et al., 2016). 미시적 시물레이션은 현실적인 지역 교통 상황을 반영하기 위해 분석하고자 하는 목적에 맞는 적절한 차량 제어변수의 설정이 중요하다.

분석에 활용된 미시적 시물레이션 프로그램 VISSIM의 차량추종 모델은 Wiedemann이 개발한 운전자 행태 모형을 기반으로,

이 모형은 자유흐름(Free flow), 접근(Approaching), 추종(Following), 브레이크의 4가지 운전상태를 반영하고 있으며, 자율주행자동차의 추종 및 차선변경에 대한 매개변수는 운전 자동화 기능이 없는 운전자가 운전했을 때 보다 더 공격적이고 민감한 행동을 반영하도록 설정되어 있다(Park et al., 2021).

VISSIM은 Wiedemann 74 및 Wiedemann 99의 두 종류의 운전자의 심리 및 물리적 환경을 반영한 차량 추종 모델의 구현이 가능하다(PTV Group, 2020). Wiedemann 99 자동차 추종 모델은 Wiedemann 74 모델과 매우 유사하며, Wiedemann 99에서는 핵심 실행 논리가 동일하게 유지된다. 그러나 일부 임계값은 Wiedemann 74 모델과는 다르게 계산되며, 약천후 및 기상상태와 같은 외부 환경에 대한 반응이 가능하며, Wiedemann 99 보정 매개변수는 다음 Eq. (5)~(10)과 같이 설명된다(Motamedidehkordi et al., 2016).

$$AX = CC0 + L_{n-1} \quad (5)$$

$$ABX = AX + CC1 \cdot v_{slower} \quad (6)$$

여기서,  $AX$  : 선행차량과 후행차량 사이의 평균정지거리(m)

$CC0$  : 정지거리(m)

$L_{n-1}$  : 선행차량의 길이(m)

$ABX$  : 최소 안전거리(m)

$CC1$  : 선행차량과 후행차량 간 차두시간(s)

$v_{slower}$  : 선행차량과 후행차량간 최소 속도(m/s)

Eq. (5)의  $CC0$ (standstill distance)은 정지된 차량 사이의 원하는 후미 범퍼에서 전방 범퍼 거리이며, 또한, 이 매개변수는 운전자가 충돌을 피하기 위해 유지하는 심리적 안전거리와 관련이 있어 변동하지 않는다. Eq. (6)의  $CC1$ (headway time)은 추종 운전자가 유지하려는 시간(초)을 의미한다.

$$SDX = ABX + CC2 \quad (7)$$

$$SDV : \Delta X = CC3 \cdot \Delta v + CC3 \cdot (-CC4) \quad (8)$$

$$CLDV = -CC4 \quad (9)$$

$$OPDV = -CC5 \quad (10)$$

여기서,  $SDX$  : 추종 체제의 상한으로서 최대 추종거리(m)

$ABX$  : 최소안전거리(m)

$CC2$  : 추가적으로 안전거리에 부여하는 거리(m)

$SDV$  : 장거리에서 운전자가 느린 차량에 접근하고 있다고 인식하는 지점

$CC3$  : 돌발상황을 감지해 후행차량의 감속하는 시점

$CC4$  : 후행차량이 선행차량보다 속도가 느릴 경우, 최대 허용속도차이(kps)

$CC5$  : 후행차량이 선행차량보다 속도가 빠를 경우, 최대 허용속도차이(kps)

$CLDV$  : 운전자가 자신의 속도가 선행 차량 속도보다 높다고 인식하는 지점

$OPDV$  : 운전자가 선행차량보다 느리게 이동하고 있다고 인식하는 지점

Eq. (7)의  $CC2$ (following variation)는 추종 상태에서 종방향 진동을 제한하며, 의도적으로 선행 차량으로 이동하기 전에 원하는 안전거리( $ABX$ )보다 얼마나 더 거리를 유지해야 하는지를 나타내며, Eq. (8)의  $CC3$ (threshold for entering “following”)은 감속 과정의 시작을 초 단위로 정의한다. Eq. (9)와 (10)의  $CC4$ (negative “following” threshold) 및  $CC5$ (positive “following” threshold)는 추종 과정에서 속도 차이(m/s)를 정의하며,  $CC4$ 는 접근 과정에서의 속도 차이를 제어하고,  $CC5$ 는 개방 과정에서의 속도 차이를 제어한다(Motamedidehkordi et al., 2016).

본 연구의 연속류 분석을 위해 자율주행자동차에 적용한 Wiedemann 99의 차량속성변수는 정지거리  $CC0$ (standstill distance)은 차량이 정지할 때 차량 간 간격으로 자율주행자동차는 0.5 m를 적용하였으며, 차두시간  $CC1$ (headway time)는 0.6s로 설정하였다. 안전거리  $CC2$ (following variation)는 0s를 적용하였으며, 가감속도  $CC7$ (oscillation acceleration),  $CC8$ (standstill acceleration),  $CC9$ (acceleration with 80 km/h)의 경우 각각 0.4, 3.8, 1.8 m/s<sup>2</sup>를 적용하였으며, Wiedemann 74의 모델은 운전자가 임계값에 도달하면 감속하고 이 임계값은 선행 차량과의 상대 속도 및 거리에 따라 달라진다. 그렇지 않으면 운전자는 원하는 속도로 이동하거나 가속한다(Wiedemann, 1974).

본 분석에 활용된 Wiedemann 74의 최소 안전거리는 Eq. (11)과 같이 나타낼 수 있으며, 차량의 최소 원하는 거리는 더 느린 차량의 속도의 제곱근에 비례한다. 여기서 더 느린 차량은 선행 차량 또는 추종 차량이 될 수 있다(Motamedidehkordi et al., 2016).

$$ABX = AX + (bx_{add} + bx_{ult} \cdot z) \cdot \sqrt{v} \quad (11)$$

여기서,  $ABX$  : 최소안전거리(m)

$v$  : 상대적으로 더 느린 차량의 속도(m/s)



$z$  : (0,1) 범위 내의 값이며, 평균이 0.5이고 표준편차가 0.15인 정규분포

$AX$  : 두 차량 사이의 원하는 평균거리를 정의하는 평균정지거리(m)

$bx_{add}$  : 추종거리의 추가 통행시간으로 조정할 수 있는 요소

$bx_{\mu t}$  : 추종거리의 비례하는 통행시간으로 조정할 수 있는 요소

본 연구의 연속류 분석을 위해 자율주행자동차에 적용한 Wiedemann 74의 차량속성변수는 평균차두거리 0.5 m, 평균차두시간 0.5초를 적용하였으며, 일반차량의 평균차두거리(1.5 m) 및 평균차두시간(0.9초) 보다 차량 간 간격을 좁게 설정해 차량의 흐름을 더 빠르고 도로 효율을 증가할 수 있도록 설정하였다(Land and Housing Institute, 2022). Wiedemann 74는 도시의 교통 환경과 합류부를 모델링하는 데 일반적이며, Wiedemann 99는 합류부가 없는 고속도로와 같은 연속류에서의 교통을 모델링 하는데 더 적합하다(Lu et al., 2016).

따라서 본 연구의 단속류의 분석에서는 Wiedemann 74를 적용하였으며, 연속류의 분석에서는 Wiedemann 99를 적용하였다. 또한, 목표 속도는 자율주행자동차의 경우 Wiedemann 74과 Wiedemann 99 모두 50 km/h에 고정해 설정하였으며, 일반차량은 48~58 km/h의 범위로 설정하였다. 분석 목적 달성을 위해 분석구간의 운행 차종은 「대전광역시 교통량조사보고서」의 중차량비(%)를 반영하였으며(Daejeon Traffic Information Center, 2023), 자율주행과 일반 차량의 비율을 승용차에만 적용하지 않고, 화물차와 버스에 모두 적용하여 시나리오를 설정하였다.

또한, 연속류와 단속류의 교통량 및 혼입률 증가를 0~100 %까지 25 %씩 증가시키면서 세분화하여 시나리오를 구성하였으며, 교통량은 미래 교통수요 변화에 따른 상황을 반영하기 위해 2040년 추정된 장래 교통 수요(교통량 0 %)를 기반으로 25 %, 50 %, 75 % 및 100 % 증가시키면서 시나리오 분석하였다. 시뮬레이션은 한 시나리오당 10회의 반복 수행을 통해 도출된 평균값을 도출하였다. 시뮬레이션의 총 Run Time은 5,400초로 설정하였으며, 네트워크에 적용한 모든 차량이 교루 진입하는 시간인 1,800초를 제외하고 1,800~5,400초에 해당하는 1시간(3,600초)의 평균값을 분석에 사용하였다.

#### 4. 자율주행자동차 혼입률과 도로의 성능 비교

##### 4.1 평균통행시간 및 평균통행속도 분석

본 절에서는 동일한 교통 환경(차로 수 등) 하에서 MPR(자율주행자동차 혼입률)과 교통량의 변화가 평균통행시간과 통행속도에 미치는 영향에 대해 살펴보기로 한다.

먼저 Table 2에서 알 수 있는 바와 같이, 단속류와 연속류 모두 교통량의 크기가 증가함에 따라 통행시간이 증가함을 확인할 수 있었으며, MPR이 증가 즉, 기술의 발전에 따라 통행시간은 감소하는 패턴을 확인할 수 있다.

먼저, 단속류의 경우, Fig. 5(a)에서 알 수 있는 바와 같이 교통량과 MPR의 변화에 따른 통행시간 변화를 살펴보면, 현재 교통량 수준을 기준으로 MPR이 증가함에 따라 각각 1%(MPR 25%), 2%(MPR 50%), 14.6%(MPR 75%), 15.4%(MPR 100%) 순으로 통행시간 감소 효과는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 한편,

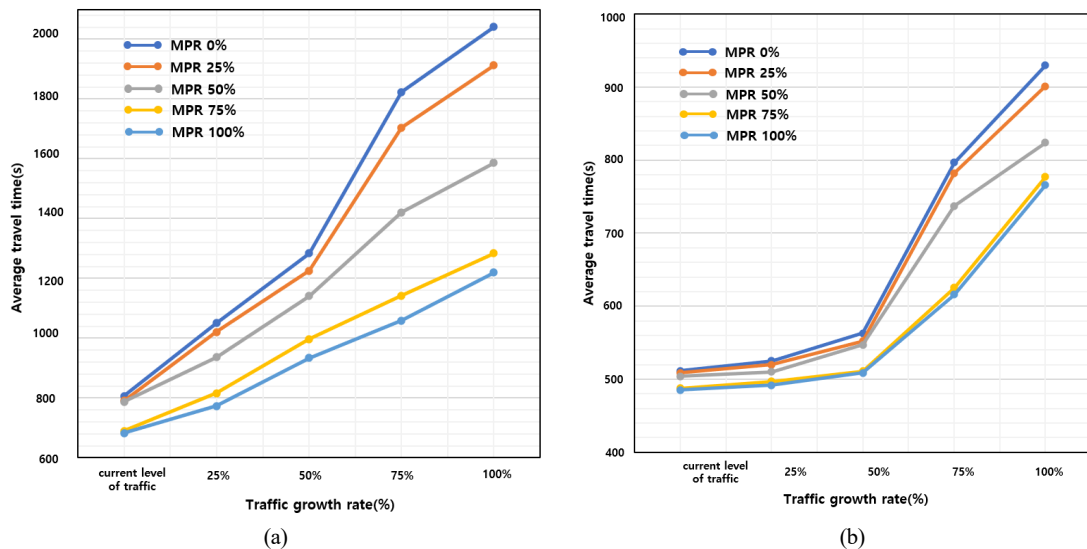


Fig. 5. Changes in Average Travel Time according to Traffic Volumes & Penetration Rates: (a) Intermittent Flow, (b) Continuous Flow

**Table 2.** Changes in Average Travel Time according to Traffic Volumes & Penetration Rates

Traffic volume		AV MPR				
		0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
Intermittent flow	Current level of traffic	806.17	791.45	787.14	689.18	682.29
	25 % increase in traffic	1050.01	1021.22	935.76	815.84	772.64
	50 % increase in traffic	1283.80	1225.75	1141.47	997.32	933.74
	75 % increase in traffic	1693.39	1574.15	1421.30	1142.01	1058.73
	100 % increase in traffic	2041.44	1913.04	1586.49	1283.93	1219.51
Continuous flow	Current level of traffic	511.46	508.71	503.66	487.28	485.03
	25 % increase in traffic	525.11	519.80	509.94	496.72	491.58
	50 % increase in traffic	562.99	552.33	547.13	510.72	508.75
	75 % increase in traffic	796.85	782.48	737.16	625.01	615.76
	100 % increase in traffic	929.78	901.30	823.92	776.90	765.92

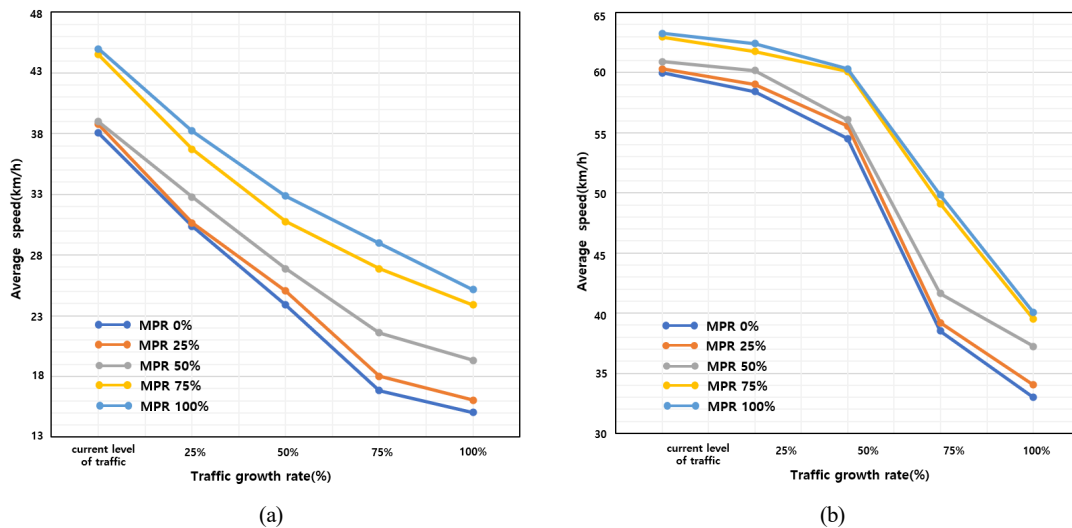
Unit: Seconds

MPR이 0 %일 때, 통행시간은 현재의 교통량 수준을 기준으로 1.3배(25 % 증가), 1.59배(50 % 증가), 2.1배(75 % 증가), 2.53배(100 % 증가)로 교통량이 증가함에 따라 통행시간은 크게 증가함을 확인할 수 있다. 상대적으로 MPR이 100 %일 때, 통행시간은 1.13배(25 % 증가), 1.45배(50 % 증가), 1.55배(75 % 증가), 1.79배(100 % 증가)로 동일한 교통량 증가에 따른 통행시간 증가 비율이 MPR 0 % 보다 감소하여 자율주행자동차의 도입으로 인한 효과를 확인할 수 있다.

한편, 연속류의 경우, Fig. 5(b)에서 알 수 있는 바와 같이 교통량과 MPR의 변화에 따른 통행시간 변화를 살펴보면, 현재 교통량 수준을 기준으로 MPR이 증가함에 따라 각각 1 %(MPR 25 %), 2 %(MPR 50 %), 4.7 %(MPR 75 %), 5.2 %(MPR 100 %)

순으로 통행시간 감소 효과는 약간 증가하는 것을 확인할 수 있다. 한편, MPR이 0 %일 때, 통행시간은 현재의 교통량 수준을 기준으로 1.03배(25 % 증가), 1.10배(50 % 증가), 1.56배(75 % 증가), 1.82배(100 % 증가)로 교통량이 증가함에 따라 통행시간은 증가하지만 단속류에 비해 상대적으로 적은 비율로 증가함을 확인할 수 있다. 나아가 MPR이 100 %일 때, 통행시간은 1.01배(25 % 증가), 1.05배(50 % 증가), 1.27배(75 % 증가), 1.58배(100 % 증가)로 동일한 교통량 증가에 따른 통행시간 증가 비율이 MPR 0 % 보다 감소하여 자율주행자동차의 도입으로 인한 효과를 확인할 수 있으며, 단속류의 경우와 비교하여도 교통량 증가에 따른 통행시간 감소 효과는 크다는 것을 확인할 수 있다.

요약하면, 현재의 교통량 수준을 기준으로 단속류에 비해 연속류



**Fig. 6.** Changes in Average Speed according to Traffic Volumes & Penetration Rates: (a) Intermittent Flow, (b) Continuous Flow



**Table 3.** Changes in Average Speed according to Traffic Volumes & Market Penetration Rates

		Unit: km/h					
Traffic volume		AV MPR	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
Intermittent flow	Current level of traffic		38.06	38.77	38.98	44.52	44.97
	25 % increase in traffic		30.38	30.65	32.79	36.71	38.23
	50 % increase in traffic		23.90	25.03	26.88	30.77	32.86
	75 % increase in traffic		16.83	18.00	21.59	26.87	28.98
	100 % increase in traffic		15.03	16.04	19.34	23.90	25.16
Continuous flow	Current level of traffic		59.99	60.31	60.92	62.97	63.26
	25 % increase in traffic		58.43	59.03	60.17	61.77	62.42
	50 % increase in traffic		54.50	55.55	56.08	60.08	60.31
	75 % increase in traffic		38.50	39.21	41.62	49.09	49.83
	100 % increase in traffic		33.00	34.04	37.24	39.49	40.06

에서 교통량의 증가에 따른 네트워크에서의 부하는 상대적으로 적음을 알 수 있다. 즉, 동일한 교통량의 증가에 따른 통행시간 증가 폭과 비율이 상대적으로 연속류가 단속류에 비해 적음을 확인하였다. 다만, MPR의 비율이 증가함에 따라 통행시간 감소 효과는 단속류가 크다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 단속류의 경우 현재의 교통량을 기준으로 MPR의 증가(0 %에서 100 %)에 따른 통행시간 감소 효과는 15.4 %에서 40.3 %로 증가하지만, 연속류의 경우에는 MPR의 증가(0 %에서 100 %)에 따른 통행시간 감소 효과는 5.2 %에서 17.6 %로 증가함을 확인하였다.

한편, 통행속도의 경우, Fig. 6과 Table 3에서 알 수 있는 바와 같이 교통량의 증가에 따라 감소하지만, MPR이 증가함에 따라 통행속도는 증가하는 추세를 보이고 있다.

먼저, 단속류의 경우 현재의 교통량을 기준으로 MPR이 0 %일 때, 교통량 100 % 증가에 따른 통행속도 감소 비율이 60.5 %로 MPR 100 %일 때의 44.1 % 보다 감소하여 자율주행자동차의 도입으로 인한 효과를 확인할 수 있으며, 연속류의 경우에는 동일한 조건에서 각각 45.0 %와 36.7 % 감소하는 것으로 나타나 단속류의 속도 감소 폭보다는 상대적으로 적음을 확인할 수 있다.

나아가, 현재의 교통량 수준을 기준으로 단속류의 경우 MPR 0 %와 MPR 100 %의 평균 통행속도 증가율을 비교해 보면 18.1 % 증가한 것에 비해, 연속류의 경우에는 5.5 % 증가한 것으로 나타났다. 이는 시뮬레이션 설정 단계에서 도심지 통행속도 상한 제약으로 인한 것으로 판단된다.

#### 4.2 통행속도와 교통량의 한계대체율

본 절에서는 3.1절에서 언급한 자율자동차 기술의 발달로 인한 영향을 살펴보기 위해 자율주행자동차 혼입률을 증가시키면서 교통량과 속도의 조합으로 무차별곡선을 나타내고 무차별곡선의 기

울기인 한계대체율의 차이를 통해 한계대체를 체감(law of diminishing MRS)의 성립 여부를 확인해 보기로 한다. 나아가 무차별곡선의 볼록성의 특징을 통해 단속류와 연속류 환경에서의 네트워크의 성능을 비교하기로 한다.

먼저 단속류를 대상으로 한 시뮬레이션에서 교통량과 통행속도의 조합으로 구성된 무차별곡선은 Fig. 7(a)에서 알 수 있는 바와 같이 모든 자율주행자동차 혼입률 수준(0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %)에서 무차별곡선은 우하향하는 것을 확인할 수 있다. 또한 연속류의 경우에도 Fig. 7(b)에서와 같이 무차별곡선은 우하향하며, 단속류와 연속류 모두에서 무차별곡선의 기울기를 나타내는 한계대체율이 감소하는 한계대체를 체감의 법칙이 성립함을 확인할 수 있다.

이는 교통량이 많을 때는 많은 교통량을 줄여야 속도가 조금 증가하지만, 교통량이 적을 때는 조금의 교통량을 줄여도 동일한 속도 증가의 효과를 볼 수 있음을 의미한다. 특히 Fig. 7(b)의 자율주행자동차 혼입률이 100 %인 경우에는 무차별곡선이 거의 직선에 가까우며, 이는 속도 증가를 위해 포기해야 하는 교통량의 감소가 거의 없음을 의미한다.

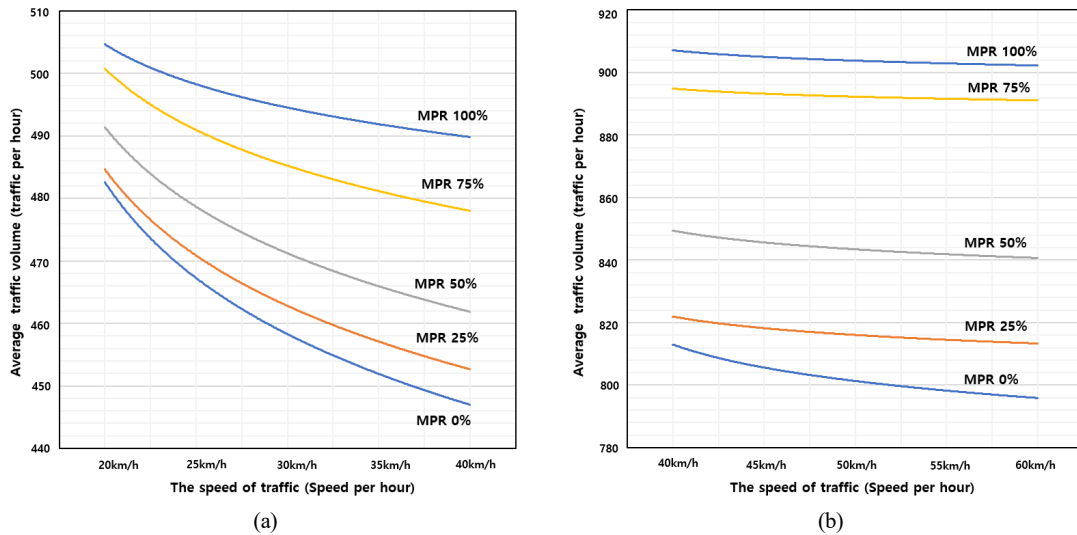
Table 4에서 알 수 있는 바와 같이, 동일한 속도인 40 km/h을 대상으로 살펴보면, 모든 자율주행자동차 혼입률에서 단속류가 연속류보다 한계대체율이 큰 값을 알 수 있다. 다시 말하면, 단속류 환경에서 통행속도의 한계효용(MU)이 교통량의 한계효용보다 상대적으로 크음을 의미한다.

동시에 자율주행자동차 혼입률이 증가할수록 동일한 효용수준을 나타내는 무차별곡선은 원점에서 멀어지게 되어 기술의 발달로 인한 효용수준은 증가함을 확인할 수 있다.

마지막으로 Fig. 7에서 무차별곡선은 원점에 대해 볼록한(convex to the origin) 형태를 가짐을 알 수 있는데, 이러한 선호체

**Table 4.** Changes in MRS according to Traffic Volumes, Speeds & Market Penetration Rates

Speed		AV MPR	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
Intermittent flow	$\Delta y / \Delta x$ at 20 k/h		-2.56	-2.33	-2.08	-1.32	-1.04
	$\Delta y / \Delta x$ at 30 k/h		-1.72	-1.64	-1.40	-0.92	-0.70
	$\Delta y / \Delta x$ at 40 k/h		-1.30	-1.18	-1.05	-0.65	-0.53
Continuous flow	$\Delta y / \Delta x$ at 40 k/h		-1.02	-0.95	-0.59	-0.38	-0.30
	$\Delta y / \Delta x$ at 50 k/h		-0.82	-0.73	-0.48	-0.27	-0.24
	$\Delta y / \Delta x$ at 60 k/h		-0.69	-0.60	-0.40	-0.26	-0.20



**Fig. 7.** Indifference Curves according to Speed and Traffic Volume: (a) Intermittent Flow, (b) Continuous Flow

계의 볼록성(convexity) 현상은 단속류와 연속류 모두 성립하며 이것은 느린 속도 & 많은 교통량 혹은 빠른 속도 & 적은 교통량 등 극단적인 구성의 조합보다는 합리적인 수준에서의 조합을 더 선호한다는 의미와 동일하다.

### 5. 결론 및 향후연구

본 연구는 레벨4 이상의 완전자율주행자동차의 혼입률과 교통량의 변화에 따른 연속류와 단속류를 대상으로 한 도로 네트워크의 성능을 분석하였다. 이를 위해 자율주행자동차의 차량제어변수 관련 선행연구를 검토해 이를 분석에 반영하였으며, 전문가 설문 조사를 통해 자율주행 시장점유율 50 %로 예측되는 시점인 2040년의 장래 교통 수요를 예측해 이를 시뮬레이션 분석에 반영하였다.

또한, 승용차, 화물차, 버스의 자율주행 혼입률 및 교통량을 0~100 %까지 25 %씩 증가시켜가면서 실제 도로망을 대상으로 연속류와 단속류의 교통흐름의 변화를 분석하여, 현실 활용 가능성을 제고하려고 노력하였다.

먼저 연속류와 단속류를 대상으로 한 시뮬레이션에서 교통량의 크기가 증가함에 따라 통행시간이 증가함을 확인하였으며, 자율주행자동차 점유율이 증가 즉, 기술의 발전에 따라 통행시간은 감소하는 패턴도 확인할 수 있다. 한편, 통행속도의 경우, 교통량의 증가에 따라 감소하며, 자율주행자동차 점유율이 증가함에 따라 통행속도는 증가하는 추세를 보임도 확인할 수 있었다. 이는 자율주행자동차의 혼입률 증가로 도로의 네트워크 성능이 개선됨에 따라 기존 도로의 용량 증가를 의미하며, 현 수준과 동일한 교통용량 수준에서는 자율주행자동차의 혼입률 증가로 인해 잉여차로(road surplus)의 발생 가능성을 의미한다. 이와 같은 잉여차로는 향후 교통약자 및 보행자, 개인 이동수단(Personal Mobility, PM)의 통행을 위한 공간으로 활용할 수 있음을 시사한다.


나아가, 현재의 교통량 수준을 기준으로 단속류에 비해 연속류에서 교통량의 증가에 따른 네트워크에서의 부하는 상대적으로 적음을 알 수 있다. 즉, 동일한 교통량의 증가에 따른 통행시간 증가 폭과 비율이 상대적으로 연속류가 단속류에 비해 적음을 확인하였다. 또한 단속류의 경우 현재의 교통량을 기준으로 MPR이 0 %일


때, 교통량 100 % 증가에 따른 통행속도 감소 비율이 60.5 %로 MPR 100 %일 때의 44.1 % 보다 감소하여 자율주행자동차의 도입으로 인한 효과를 확인할 수 있으며, 연속류의 경우에는 동일한 조건에서 각각 45.0 %와 36.7 % 감소하는 것으로 나타나 단속류의 속도 감소 폭보다는 상대적으로 적음을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 자율주행자동차 기술수준의 발달로 인한 단속류 및 연속류에서의 도로 네트워크에서의 성능 변화 분석을 목적으로 하였으며, 자율주행자동차 혼입률을 증가시키면서 교통량과 속도의 조합에 따른 한계대체율의 차이를 통해 한계대체율 체감(law of diminishing MRS)의 법칙이 성립함을 확인하였다. 나아가 무차별곡선의 볼록성도 단속류와 연속류 환경에서 모두 성립함을 확인하였다.

마지막으로, 본 연구에서는 다양한 차종을 분석에 포함시켰으나, 차종별 제어변수에 대한 검증된 연구 결과가 미흡하여 다양한 자율주행의 제어변수를 도입해보지 못했다는 한계가 있으며, 단속류에서 자율주행기술의 도입 한계를 극복하기 위한 기하구조 변경 및 감응식 신호 상황의 준연속류의 가상 상황을 도입해 자율주행자동차에 보다 효율적인 신호체계를 반영한 추가적인 연구도 필요하다.

## ORCID

Myungsik Do  <https://orcid.org/0000-0002-8738-0442>

Yumi Jeong  <https://orcid.org/0009-0003-1962-0672>

## References

- Al-Turki, M., Ratrou, N. T. and Al-Sghan, I. (2023). "Impact of Autonomous vehicles on the performance of a signalized intersection under different mixed traffic conditions: a simulation-based investigation." *Journal of Applied Engineering Science*, Institute for research and design in industry, Vol. 21, No. 1, pp. 224-240, <https://doi.org/10.5937/jaes0-39994>.
- Al-Turki, M., Ratrou, N. T., Rahman, S. M. and Reza, I. (2021). "Impacts of autonomous vehicles on traffic flow characteristics under mixed traffic environment: Future perspectives." *Sustainability*, MDPI, Vol. 13, No. 19, 11052, <https://doi.org/10.3390/su131911052>.
- Austroads (2022). *Minimum Physical Infrastructure Standard for the Operation of Automated Driving Part B: Scenarios for Potential Availability and Usage of Different Levels and Types of Automated Driving*, AP-R665B-22, Sydney, New South Wales.
- Calvert, S. C., Schakel, W. J. and van Lint, J. W. C. (2017). "Will automated vehicles negatively impact traffic flow?." *Journal of Advanced Transportation*, Hindawi, Vol. 2017, 3082781, <https://doi.org/10.1155/2017/3082781>.
- Daejeon Traffic Information Center (2023). Available at: <http://traffic.daejeon.go.kr> (Accessed: November 20, 2023) (in Korean).
- Fernandes, P. and Nunes, U. (2012). "Platooning with IVC-enabled autonomous vehicles: Strategies to mitigate communication delays, improve safety and traffic flow." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, Vol. 13, No. 1, pp. 91-106, <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2179936>.
- Jones, S. R. and Philips, B. H. (2013). "Cooperative adaptive cruise control: critical human factors issues and research questions." *Proceedings of the 7th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design*, University of Iowa, Iowa, <https://pubs.lib.uiowa.edu/driving/article/id/28532/>.
- Kim, S. H., Lee, J. H., Kim, Y. J. and Lee, C. W. (2018). "Simulation-based analysis on dynamic merge control at freeway work zones in automated vehicle environment." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol. 38, No. 6, pp. 867-878, <https://doi.org/10.12652/Ksce.2018.38.6.0867> (in Korean).
- Korea Development Institute (2008). *A study on standard guidelines for pre-feasibility study on road and railway projects*, 5th Edition (in Korean).
- Land and Housing Institute (2022). *A Final Report on the Simulation of Self-Driving Shuttle and DRT Operation in Geumto District, Seongnam City* (in Korean).
- Lee, J. G. (1994). *Microeconomics*, 2nd Edition, Beopmunsa, (in Korean).
- Lu, Z., Fu, T., Fu, L., Shiravi, S. and Jiang, C. (2016). "A video-based approach to calibrating car-following parameters in VISSIM for urban traffic." *International Journal of Transportation Science and Technology*, Tongji University, Vol. 5, No. 1, pp. 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2016.06.001>.
- Lu, Q., Tettamanti, T., Hörcher, D. and Varga, I. (2020). "The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation." *Transportation Letters*, Informa UK Limited, Vol. 12, No. 8, pp. 540-549, <https://doi.org/10.1080/19427867.2019.1662561>.
- Mankiw, N. G. (2005). *Principles of Economics*, 3rd edition, Kim, K. H. and Kim, J. S., Kyobomungo (in Korean).
- Mehr, N. and Horowitz, R. (2020). "How will the presence of autonomous vehicles affect the equilibrium state of traffic networks?." *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, IEEE, Vol. 7, No. 1, pp. 96-105, <https://doi.org/10.1109/TCNS.2019.2918682>.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2022a). *Non-stop innovation toward the future Mobility innovation roadmap* (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2022b). *Appraisal Guidelines for Transport Facilities Investment (7th Edition)* (in Korean).
- Motamedidehkordi, N., Margreiter, M. and Benz, T. (2016).

- “Shockwave suppression by vehicle-to-vehicle communication.” *Transportation Research Procedia*, Elsevier, Vol. 15, pp. 471-482, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.040>.
- Muhammad, T., Kashmiri, F. A., Naeem, H., Qi, X., Chia-Chun, H. and Lu, H. (2020). “Simulation study of autonomous vehicles’ effect on traffic flow characteristics including autonomous buses.” *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 2020, Hindawi, 4318652, <https://doi.org/10.1155/2020/4318652>.
- Pakusch, C., Stevens, G., Boden, A. and Bossauer, P. (2018). “Unintended effects of autonomous driving: A study on mobility preferences in the future.” *Sustainability*, MDPI, Vol. 10, No. 7, 2404, <https://doi.org/10.3390/su10072404>.
- Park, J. E., Byun, W. H., Kim, Y. C., Ahn, H. J. and Shin, D. K. (2021). “The impact of automated vehicles on traffic flow and road capacity on urban road networks.” *Journal of Advanced Transportation*, Hindawi, Vol. 2021, 8404951, <https://doi.org/10.1155/2021/8404951>.
- Pinjari, A. R., Augustin, B. and Menon, N. (2013). “Highway capacity impacts of autonomous vehicles: An assessment.” *Center for Urban Transportation Research*, University of South Florida, Tampa, [https://abdulpinjari.weebly.com/uploads/9/6/7/8/9678119/abdul\\_pinjari\\_autonomous\\_vehicles\\_whitepaper\\_recent.pdf](https://abdulpinjari.weebly.com/uploads/9/6/7/8/9678119/abdul_pinjari_autonomous_vehicles_whitepaper_recent.pdf).
- PTV GROUP (2020). *CoExist Automation-Ready Modeling with PTV VISSIM*, <http://www.ptvgroup.com/> (Accessed: December 15, 2023).
- PwC (2019). *The 2019 Strategy & Digital Auto Report*.
- Stern, R. E., Cuib, S., Monachec, M. L. D., Bhadanid, R., Buntingd, M., Churchilla, M., Hamilton, N., Haulcy, R., Pohlmann, H., Wu, F., Piccolih, B., Seiboldb, B., Sprinkled, J. and Work, D. B. (2018). “Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles: Field experiments.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier, Vol. 89, pp. 205-221, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.005>.
- Sukennik, P., Lohmiller, J. and Schlaich, J. (2018). “Simulation-based forecasting the impacts of autonomous driving.” *Proceedings of the International Symposium of Transport Simulation (ISTS'18) and the International Workshop on Traffic Data Collection and its Standardization (IWTDCS'18)*, Elsevier, Matsuyama, Japan.
- Talebpour, A. and Mahmassani, H. S. (2016). “Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier, Vol. 71, pp. 143-163, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.07.007>.
- Wang, Q., Li, B., Li, Z. and Li, L. (2017). “Effect of connected automated driving on traffic capacity.” *Proceedings of 2017 Chinese Automation Congress, IEEE*, Jinhan, China, pp. 633-637, <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8242845>.
- Wang, Y. and Wang, L. (2017). “Autonomous vehicles’ performance on single lane road: A simulation under VISSIM environment.” *Proceedings of 2017 10th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, IEEE, Shanghai, China, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/CISP-BMEI.2017.8302162>.
- Wiedemann, R. (1974). *Simulation des Strassenverkehrsflusses*, Schriftenreihe des Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8 (in German).