

자율주행자동차 도입률별 운행 시스템 에너지 소모 예측

- 전력 소모량과 탄소배출량을 중심으로

Energy consumption prediction of operational systems based on the adoption rate of
autonomous vehicles

Focusing on power consumption and carbon emissions

최종 보고서

미래모빌리티 F조

도시공학과_2020143514_문찬우

도시공학과_2017143516_이남기

도시공학과_2020143519_한현준

목차

I 서론	1
1. 연구 배경	1
2. 문제 제기	3
3. 연구 질문 및 가설	5
4. 연구 목적 및 의의	8
II 이론적 고찰	11
1. 자율주행자동차의 개념	11
2. 선행연구 분석	12
III 데이터 선정	18
1. 데이터의 범위	18
2. 주요 데이터 소개	19
3. 연구 가정	29
4. 소결	30
IV 연구 방법	34
1. 에너지 모델링 가정	34
2. 에너지 산출 모델	36
3. 자율주행 운행 에너지 소모, 탄소 배출 시뮬레이션 개발	47
V 연구 결과	56
1. 평균 속도	57
2. 전력 소비량	59
3. 탄소 배출량	62
4. 소결	67
VI 결론 및 논의	70
1. 연구 의의	70
2. 연구 한계	72
3. 결론	73
VII 참고문헌	76

초록

자율주행의 도입과 에너지 그리고 환경

본 연구는 서울시를 사례로 자율주행자동차(Autonomous Vehicle, AV) 도입이 도시 교통체계의 효율성, 에너지 소비 구조, 그리고 이에 따른 탄소 배출 특성에 어떤 함의를 갖는지 종합적으로 고찰하고, 이를 정량적으로 분석하였다. 기존 교통 수단 구성비(가솔린 차량, 비자율주행 전기자동차, 그리고 AV)를 바탕으로 AV 도입률을 점진적으로 변화시키는 시나리오를 설정하여, 도입률 증가에 따른 총 에너지 소비량 및 탄소 배출 변화 양상을 시뮬레이션 기반으로 정밀하게 추정하였다. 이 과정에서 본 연구는 AV 도입에 수반되는 주요 에너지 소비 요소—차량 내 컴퓨팅 시스템, 차량-인프라 간(V2X) 통신, 그리고 데이터센터 운영—을 세부적으로 구분하여 각 요소가 전체 에너지 소비 및 탄소 배출에 어떻게 기여하는지 파악하였다.

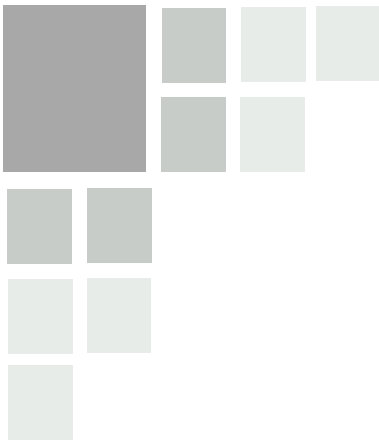
연구 결과, AV 도입률 증가로 인해 교통 운영 효율성 측면에서 유의미한 개선이 확인되었다. 예를 들어, 도입률 0%일 때 약 23km/h였던 서울시 차량 평균 주행 속도는 100% 도입률 시 약 32km/h로 증가하여, AV가 교통 혼잡 완화 및 네트워크 전반의 유동성 향상에 기여함을 보여주었다. 이는 AV의 고도화된 주행 알고리즘과 상호 통신을 통한 정교한 차량 흐름 제어, 그리고 교통 신호체계와의 연계 개선이 궁극적으로 도로 용량 증대 효과를 창출할 수 있음을 의미한다.

그러나 이러한 교통 효율성 개선에도 불구하고, AV 도입은 에너지 수요 측면에서 새로운 도전과제를 제기하였다. 특히 데이터센터 운영 및 차량 내 컴퓨팅 시스템을 통한 막대한 전력 소비가 확인되었으며, V2X 통신으로 인한 에너지 소비는 상대적으로 미미하지만 도입률 증가에 따라 무시할 수 없는 수준으로 확장될 수 있음을 시사한다. 분석 결과, AV 도입률이 상승할수록 총 에너지 소비량은 크게 증가하였으며, 100% 도입률 시 약 23,000GWh의 에너지가 필요할 것으로 전망되었다. 이는 서울시가 2040년까지 목표로 설정한 전력 생산량(16,221GWh)을 훨씬 상회하는 수준으로, 향후 AV 중심의 교통체계 구축을 위해서는 재생에너지 확대, 전력 생산·공급 인프라에 대한 전반적 재검토 및 강화가 반드시 수반되어야 함을 보여준다.

한편, 탄소 배출량 분석에서는 내연기관 차량 비율 감소에 따른 전통적 탄소 저감 효과가 예상되었음에도 불구하고, 실제 결과는 AV 도입으로 인한 추가적인 전력 수요와 컴퓨팅 에너지 사용 증가로 인해 전체 탄소 배출량이 오히려 증가하는 역설적 상황을 관찰하였다. 특히 AV 도입률 60~70% 구간에서 탄소 배출량이 최대값을 기록하는 것으로 나타나, 단순히 AV의 도입을 확대한다고 해서 탄소 저감 목표 달성이 보장되지 않음을 명확히 보여준다. 이는 AV 기술의 확산이 기존 교통 수단을 전기화하고 효율화하는 노력과 더불어, 전력 생산 과정의 탈탄소화 및 데이터센터 에너지 효율 개선, 친환경 냉각 시스템 도입, 컴퓨팅 아키텍처 최적화 등 다각적인 관점에서 접근해야 함을 시사한다.

이상의 결과를 종합하면, 본 연구는 AV 도입이 가져올 수 있는 긍정적 측면(교통 효율성 및 서비스 품질 향상)과 부정적 측면(에너지 소비 급증 및 탄소 배출 증가)을 함께 제시함으로써, 미래 교통체계 및 에너지 정책 수립에 있어 균형 잡힌 시사점을 제공한다. 특히 본 연구는 단순히 차량 단위에서의 변화뿐 아니라, 도시 전력 인프라와 에너지 공급 체계, 그리고 데이터센터 운영 전략과의 연계성을 강조함으로써, AV 시대를 맞아 도시가 직면하게 될 복합적인 문제군에 대한 통합적 대응 전략이 필요함을 부각하였다.

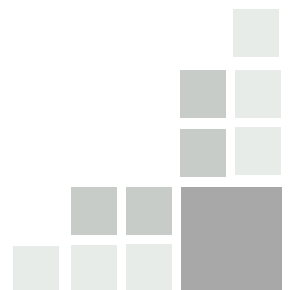
결론적으로, AV 도입으로 인한 긍정적 효과를 극대화하고 동시에 에너지 및 환경적 지속가능성을 확보하기 위해서는, (1) 차량 내 컴퓨팅 시스템 및 데이터센터 에너지 효율 개선, (2) 재생에너지 기반 전력 생산 인프라 강화, (3) 도시 에너지 수급 계획 재검토, (4) 통합적인 교통·에너지·환경 정책 수립, 그리고 (5) 친환경 전력원 및 효율적 데이터센터 운용 기술 개발이 필수적이다. 본 연구는 이러한 복합적인 요구사항을 바탕으로 향후 AV 도입 전략 수립에 유용한 근거를 제시하며, 궁극적으로 지속가능한 도시 교통·에너지 시스템 구현에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.



I 서론



1. 연구 배경
2. 문제 제기
3. 연구 질문 및 가설
4. 연구 목적 및 의의



I

서론

1. 연구 배경

가. 자율주행 기술의 발전과 도입 현황

자율주행 기술은 최근 급속한 발전을 이루며 상용화 단계에 진입하고 있다. 자율주행차는 운전자의 개입 없이 차량 스스로 주변 환경을 인식하고 판단하여 주행하는 기술을 의미하며, 인공지능, 센서 기술, 통신 기술 등 다양한 첨단 기술의 융합으로 구현된다.

특히 자율주행차는 30만 마일당 1건의 사고율을 기록하며, 일반 운전자보다 더 안전한 수준의 주행 능력을 입증했다. 이는 라이다(LiDAR), 레이더, 카메라 등의 첨단 센서를 통해 주변 상황을 360도로 감지하고, GPS와 HD맵을 기반으로 최적 경로를 설정하며, AI를 통한 주행 경로 판단 및 실행이 가능하기 때문이다.

McKinsey & Company의 분석에 따르면, 자율주행 기술의 발전은 센서와 컴퓨팅 기술의 발전을 통해 지속될 것으로 전망된다. 보수적 시나리오에서는 신차의 17%, 기본 시나리오에서는 37%, 가속화 시나리오에서는 57%가 레벨 3 이상의 자율주행 기능을 탑재할 것으로 예측되며, 2040년까지 자율주행차가 전체 도로 주행의 50%를 차지할 것으로 전망된다.¹⁾

서울시는 2030년까지 자율주행 비전을 수립하고 적극적인 도입을 추진하고 있다. 2022년부터 강남에서 로보택시 서비스를 시작했으며, 2023년에는 여의도와 마곡 지역으로 자율주행 심야버스 서비스를 확대했다. 2024년까지 도시-교외 간 자율주행 버스 서비스를 도입하고, 2026년까지는 2차선 이상 모든 도로에 자율주행 인프라를 구축할 계획이다.²⁾

1) Techahead Corp. (2024). Reshaping Cities: How Autonomous Cars Impact Urban Life

2) Seoul Metropolitan Government. (2024). Seoul Autonomous Driving Vision 2030

한국 정부는 2027년까지 레벨 4 수준의 자율주행차 상용화를 목표로 하고 있으며, 2035년까지 신차의 50% 이상이 자율주행차가 되도록 하는 목표를 설정했다. 이를 위해 4조원(28억 달러)을 연구개발에 투자하여 협력형 지능형 교통시스템과 정밀지도를 구축하고 있다.³⁾

McKinsey의 조사에 따르면, 자율주행차의 상용화 시기는 기존 예상보다 2-3년 지연될 것으로 전망된다. 레벨 4 로보택시는 2030년경에 대규모로 상용화될 것으로 예상되며, 완전 자율주행 트럭은 2028년에서 2031년 사이에 실현 가능성이 있다.⁴⁾

나. 에너지 소비와 탄소 배출 문제

자율주행차의 도입은 에너지 소비 구조에 큰 변화를 가져올 것으로 예상된다. 차량 한 대당 컴퓨팅 파워 소비량이 1.2 킬로와트 이상으로, 이는 지속 가능한 운영을 위한 임계값을 초과하는 수준이다.⁵⁾ 특히 자율주행차는 센서, 프로세서, AI 알고리즘 구동에 막대한 에너지를 소비하며, 차량 내 컴퓨팅 장치와 기계 부품이 전체 에너지의 대부분을 차지한다.⁶⁾

MIT 연구진의 분석에 따르면, 840W를 소비하는 컴퓨터가 탑재된 자율주행차 10억 대가 매일 1시간씩 운행할 경우 연간 2억 톤 이상의 이산화탄소를 배출할 수 있다. 이는 전 세계 배출량의 0.3%에 해당하는 양으로, 한국 온실가스 배출량의 4분의 1에 달하는 규모이다.⁷⁾

특히 자율주행차는 360도 전방위 센서와 고성능 컴퓨팅 시스템이 필요하며, 이는 인공지능 알고리즘과 센서 데이터 처리를 위해 상당한 전력을 소비한다. 연구진들은 자율주행차의 배출량을 현재 데이터센터 수준으로 유지하기 위해서는 차량당 전력 소비량을 1.2kW 이하로 제한해야 한다고 분석했다.⁸⁾

3) Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2022). Autonomous Vehicle Commercialization Plan

4) McKinsey & Company. (2023). The autonomous vehicle industry moving forward

5) MIT Technology Review (2024). Carbon Footprint Analysis of Autonomous Vehicles

6) Sony Semiconductor Solutions Technical Report (2024). Energy Consumption in Autonomous Vehicles

7) IEEE Micro Journal (2024). Data Centers on Wheels: Emissions From Computing Onboard Autonomous Vehicles

8) MIT Technology Review (2024). Carbon Footprint Analysis of Autonomous Vehicles

2050년까지 전 세계 차량의 95%가 자율주행차로 전환되는 시나리오에서, 컴퓨팅 작업량이 3년마다 두 배로 증가하고 현재의 탈탄소화 속도를 유지한다고 가정할 때, 배출량을 제한하기 위해서는 하드웨어 효율이 1.1년마다 두 배로 향상되어야 한다는 결과가 도출되었다.⁹⁾

서울시는 2040년까지 재생에너지 비중을 현재 7-8%에서 30% 이상으로 늘리는 것을 목표로 하고 있다. 이는 지속 가능한 성장과 시민들의 삶의 질 향상을 위한 것으로, 석탄 화력 발전의 비중을 대폭 줄이고 재생에너지를 확대하는 방향으로 나아가고 있다.¹⁰⁾

교통 부문은 전체 탄소 배출의 약 20%를 차지하고 있으며, 이는 자율주행차와 전기차 도입의 필요성을 더욱 강조하는 요인이 되고 있다. 특히 자율주행차의 도입은 탄소 배출 감소에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상되는데, 연구에 따르면 전기 자율주행차가 30% 도입될 경우 배출량이 29% 감소할 수 있다는 분석도 있다.¹¹⁾

2. 문제 제기

가. 전력 수요 증가에 대한 고려 부족

자율주행차는 단순한 이동수단이 아닌 '바퀴 달린 데이터센터'로 불릴 만큼 막대한 전력을 소비한다. 차량 내 컴퓨팅 시스템은 인공지능 알고리즘 구동과 센서 데이터 처리를 위해 차량 한 대당 2.5kW의 전력을 소비하며, 이는 지속 가능한 운영을 위한 임계값을 크게 초과하는 수준이다.¹²⁾

특히 자율주행차의 전력 소비는 세 가지 주요 요소로 구성된다. 첫째, 차량의 센서와 컴퓨팅 장치, 둘째, 인프라 센서와 차량 네트워크 통신, 셋째, 엣지 서버와 중앙 서버 등 백엔드 시스템이다. 5G 통신의 도입으로 인한 데이터 스트림 증가는 이러한 전력 소비를 더욱 가중시킬 것으로 예상된다.¹³⁾

9) MIT News Office. (2023, January 13). Autonomous vehicles could drive up emissions without hardware efficiency gains. Massachusetts Institute of Technology.

10) KOTRA. (2024). Seoul to raise share of renewables in energy sourcing to over 30% by 2040

11) Science Direct. (2023). Environmental impacts of autonomous vehicles: A review

12) Arrow.com (2024). Automotive Power Demands Drive Energy Efficiency Innovation

13) SK증권 (2024). AI, 전력질주하기엔 전력 부족

현재 서울시의 전력 자립률은 2025년 19%, 2040년 35%를 목표로 하고 있으나, 자율주행차 도입에 따른 전력 수요 증가는 이러한 목표 달성을 어렵게 만들 수 있다.¹⁴⁾ 특히 수도권 변전소의 경우 송전 여유 전력을 확보하고 있는 곳이 거의 없어, 충전 인프라 확충에도 제약이 될 수 있다.

특히 자율주행차의 편리성 증가로 인한 이동 거리 증가는 추가적인 전력 수요를 발생시킬 수 있다. 이는 기존의 전력 수요 예측 모델에서 고려되지 않은 요소로, 실제 전력 소비량은 예상보다 더 높을 수 있다는 것을 시사한다.

나. 탄소 배출 영향의 불확실성

자율주행차의 탄소 배출 영향은 매우 불확실하다. 미국 에너지정보청(EIA)의 분석에 따르면, 자율주행차 도입으로 인한 에너지 소비는 현재 대비 60% 감소할 수도, 200% 증가할 수도 있다고 예측된다.¹⁵⁾ 이는 자율주행차가 가진 이중적 특성 때문이다.

자율주행차는 효율적인 주행을 통해 에너지 소비를 줄일 수 있는 반면, 편리성 증가로 인한 통행량 증가는 에너지 소비를 늘릴 수 있다. 미시간 대학의 연구에 따르면, 자율주행 모드에서 6-9%의 순 에너지 감소 효과가 있었지만, 대형 센서 패키지 장착 시 공기저항 증가로 인해 이 효과가 5% 감소했다.¹⁶⁾

특히 5G 통신의 도입으로 인한 데이터 스트림 증가는 차량 내 시스템의 전력 소비를 더욱 증가시킬 것으로 예상된다. 또한 자율주행으로 인한 편리한 통근은 도시 외곽으로의 이주를 촉진하여 이동 거리가 증가할 수 있으며, 이는 결과적으로 에너지 소비와 탄소 배출량 증가로 이어질 수 있다.¹⁷⁾

기존의 자율주행차 연구들은 대부분 차량 대수와 1대당 에너지 소모량을 단순 곱셈하여 산출하는 방식을 택했다. 이러한 접근은 차량 보유 대수와 실제 통행량의 차이를 반영하지 못하며, 데이터도 충분하지 않다는 한계가 있다. 특히 서울시의 경우, 외부 차량의 유입과 서울 등록 차량의 외부 주행으로 인해 실제 주행량을 정확하게 파악하기 어렵다.

14) 서울사랑 (2024). 서울을 달리는 무공해 미래 차를 만나다

15) U.S. Energy Information Administration (2024). Autonomous Vehicles: Uncertainties and Energy Implications

16) The Robot Report (2023). Self-Driving Cars Have a Power Consumption Problem

17) World Economic Forum (2024). The Hidden Downsides of Autonomous Vehicles

자율주행차의 에너지 소비는 크게 세 가지 범주(차량 내 시스템, 인프라 센서와 통신, 백엔드 시스템)로 구분되지만, 기존 연구들은 이러한 요소들을 통합적으로 분석하지 못했다. 특히 자율주행 인프라의 에너지 소비에 대한 구체적인 연구가 부족하며, 센서, 통신 장비, 데이터 처리 시스템 등이 소비하는 전력량에 대한 정량적 수치가 미비하다.

따라서 지속 가능한 자율주행 기술의 발전을 위해서는 총 차량 주행거리(VKT: Vehicle Kilometers Traveled)를 기반으로 한 모델링이 필요하다. 이는 실제 도로에서의 운행량을 더 정확하게 반영할 수 있으며, 에너지 소비와 탄소 배출을 정밀하게 예측할 수 있는 방법이다.

3. 연구 질문 및 가설

본 연구는 자율주행자동차의 도입이 도시의 전력 소비와 탄소 배출에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. 특히 서울시의 전력 인프라와 탄소중립 목표 달성에 자율주행자동차가 미칠 수 있는 잠재적 영향을 종합적으로 평가하는 것을 목적으로 한다. 자율주행자동차는 '바퀴 달린 데이터센터'로 불릴 만큼 막대한 전력을 소비하는 것으로 알려져 있으며, MIT의 최신 연구에 따르면 차량 한 대당 2.5kW의 컴퓨팅 전력을 소비하는 것으로 나타났다. 이는 현재의 지속 가능한 운영을 위한 임계값을 크게 초과하는 수준이다.

자율주행자동차의 전력 소비는 크게 세 가지 주요 범주로 구분된다. 첫째, 차량에 탑재된 센서와 컴퓨팅 장치로, 이는 주행 환경을 인식하고 판단하는 데 필요한 핵심 시스템이다. 둘째, 도로 인프라에 설치된 센서와 차량 네트워크 통신 시스템으로, 이는 자율주행의 안전성과 효율성을 높이는 데 필수적인 요소이다. 셋째, 엣지 서버와 중앙 서버 등 백엔드 시스템으로, 이는 자율주행에 필요한 대규모 데이터 처리와 실시간 의사결정을 지원한다. 이러한 복합적 요인들이 도시 전력 수요에 미치는 영향을 종합적으로 분석하는 것이 필요한 시점이다.

서울시는 2040년까지 전력 자립률을 35%까지 높이는 것을 목표로 하고 있다. 그러나 현재의 계획은 자율주행자동차의 추가 전력 소비를 충분히 반영하지 못하고 있다는 한계가 있다. 특히 수도권 변전소의 경우 송전 여유 전력을 확보하고 있는 곳이 거의 없어, 자율주행자동차의 도입으로 인한 전력 수요 증가는 도시 인프라에 상당한 부담으로 작용할 수 있다. 또한 도시의 전력 공급 안정성과 탄소중립 목표 달성에도 중대한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

이러한 배경에서 본 연구는 다음과 같은 핵심 연구 질문을 제시한다. “자율주행자동차의 도입이 서울시의 전력 공급과 탄소 배출에 어떠한 영향을 미칠 것인가?” 이 질문은 단순히 기술적 측면을 넘어 도시의 지속가능성과 미래 발전 방향을 결정짓는 중요한 함의를 지닌다. 특히 전력 인프라의 용량, 신재생 에너지 확대, 탄소 배출 저감 목표 등 다양한 도시 정책과의 연관성을 고려할 때, 이에 대한 체계적인 분석과 이해가 필수적이다.

본 연구의 가설은 크게 두 가지로 구분된다. 첫째, 자율주행자동차의 도입은 현재 대비 전력 공급량을 유의미하게 증가시킬 것이라는 가설이다. 이는 자율주행자동차의 컴퓨팅 시스템, V2X 통신, 데이터센터 운영 등이 요구하는 추가적인 전력 소비에 기반한다.

이어서, 첫 번째 가설의 구체적인 근거를 살펴보면 다음과 같다. 앞서 언급하였듯이 MIT의 연구에 따르면, 자율주행자동차의 컴퓨팅 시스템은 차량 한 대당 2.5kW의 전력을 소비하는데, 이는 일반 전기차의 기본 동력 시스템이 소비하는 전력량에 추가되는 수치이다. 여기에 V2X 통신을 위한 차량 내 장비(OBU: On-Board Unit)와 도로 인프라 장비(RSU: Road-Side Unit)의 전력 소비, 그리고 자율주행에 필요한 데이터를 처리하고 저장하는 데이터센터의 전력 소비까지 고려하면, 도시 전체의 전력 수요는 현저히 증가할 것으로 예상된다.

특히 자율주행자동차가 생성하는 데이터의 양과 처리 속도를 고려할 때, 데이터센터의 전력 소비는 상당한 수준에 이를 것으로 예측된다. 한 대의 자율주행차가 하루에 생성하는 데이터량은 약 4TB에 달하며, 이러한 대용량 데이터의 실시간 처리와 저장을 위해서는 고성능 컴퓨팅 시스템이 필수적이다. 더욱이 자율주행차의 안전한 운행을 위해서는 차량 간 통신(V2V), 차량과 인프라 간 통신(V2I)이 끊임없이 이루어져야 하며, 이를 위한 통신 인프라의 전력 소비 역시 무시할 수 없는 수준이다.

두 번째 가설은 자율주행자동차의 도입이 단기적으로는 도시의 탄소 배출을 감소시킬 수 있으나, 장기적으로는 오히려 탄소 배출을 증가시킬 수 있다는 것이다. 이는 자율주행자동차의 이중적 특성에 기인한다. 한편으로 자율주행기술은 효율적인 주행을 통해 연료 소비를 줄이고, 교통 흐름을 최적화하여 불필요한 공회전이나 급가속, 급감속을 줄일 수 있다. 또한 기존의 내연기관 차량이 전기차 기반의 자율주행차로 대체되면서 직접적인 탄소 배출이 감소할 것으로 예상된다.

그러나 장기적 관점에서 볼 때, 자율주행자동차로 인한 추가적인 전력 소비는 발전소의 탄소 배출 증가로 이어질 수 있다. 특히 현재 서울시의 전력 공급 구조상 재생에너지의 비중이 낮고, 화력발전에

대한 의존도가 높다는 점을 고려하면, 전력 수요 증가는 곧 탄소 배출 증가로 이어질 가능성이 높다. 더욱이 자율주행차의 편리성 증가로 인한 차량 이용 증가, 주행거리 증가 등은 전반적인 에너지 소비를 증가시키는 요인으로 작용할 수 있다.

이러한 가설들을 검증하기 위해, 본 연구는 자율주행자동차의 도입률에 따른 시나리오별 분석을 실시한다. 각 시나리오는 자율주행차의 도입 비율을 0%에서 100%까지 단계적으로 증가시키면서, 그에 따른 전력 수요와 탄소 배출량의 변화를 정량적으로 평가한다. 이때 고려되는 주요 변수들은 다음과 같다.

첫째, 자율주행차의 기본 전력 소비량으로, 여기에는 주행을 위한 기본 동력 시스템의 전력 소비와 자율주행을 위한 추가적인 컴퓨팅 시스템의 전력 소비가 포함된다. 특히 자율주행 시스템의 경우, 라이다(LiDAR), 레이더, 카메라 등 각종 센서의 작동과 인공지능 알고리즘의 실시간 연산에 상당한 전력이 소요될 것으로 예상된다.

둘째, 자율주행 인프라의 전력 소비량이다. 도로변에 설치되는 RSU, 교통관제 시스템, 통신 기지국 등의 인프라 설비는 24시간 지속적으로 운영되어야 하며, 이는 도시 전체의 상시 전력 부하를 증가시키는 요인이 된다. 더욱이 자율주행차의 안전한 운행을 위해서는 이러한 인프라의 중단 없는 운영이 필수적이므로, 백업 전력 시스템까지 고려하면 실제 전력 소비량은 더욱 증가할 수 있다.

셋째, 데이터센터와 클라우드 시스템의 전력 소비량이다. 자율주행차가 생성하는 막대한 양의 데이터를 처리하고 저장하기 위해서는 대규모 데이터센터의 구축이 필요하다. 이러한 데이터센터는 서버 운영, 냉각 시스템 가동, 네트워크 장비 운영 등에 지속적인 전력을 소비하게 되며, 자율주행차의 도입이 확대될수록 데이터센터의 규모와 전력 소비량도 비례하여 증가할 것으로 예상된다.

본 연구의 가설들은 단순히 기술적 측면의 예측을 넘어, 도시의 지속가능성과 미래 발전 방향에 대한 중요한 함의를 지닌다. 만약 첫 번째 가설이 입증된다면, 이는 도시의 전력 인프라 확충과 에너지 공급 정책의 재검토가 시급함을 시사한다. 특히 서울시의 경우, 현재 계획된 전력 자립률 목표가 자율주행차 시대의 전력 수요를 감당하기에 충분한지에 대한 면밀한 검토가 필요할 것이다.

두 번째 가설의 검증 결과는 도시의 탄소중립 정책에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 만약 자율주행차의 도입이 장기적으로 탄소 배출을 증가시키는 것으로 확인된다면, 이는 재생에너지 발전 비중의 확대, 에너지 효율 개선, 수요 관리 등 보다 적극적인 탄소 저감 정책의 필요성을 제기하게 될

것이다. 또한 자율주행 기술 자체의 에너지 효율성 향상과 친환경적 설계의 중요성도 더욱 부각될 것이다.

이러한 연구 질문과 가설의 검증을 통해, 본 연구는 자율주행차 시대를 대비한 도시 인프라 계획과 환경 정책 수립에 실질적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 기술 발전과 환경 보호라는 두 가지 목표를 조화롭게 달성하기 위한 정책적 방향성을 제시할 수 있을 것이다.

4. 연구 목적 및 의의

본 연구의 주된 목적은 자율주행차량 도입이 서울시의 전력 수요와 탄소 배출에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것이다. MIT의 최신 연구에 따르면, 자율주행차는 '바퀴 달린 데이터센터'로 불릴 만큼 막대한 전력을 소비하며, 차량 한 대당 2.5kW의 컴퓨팅 전력을 소비한다. 특히 자율주행차의 전력 소비는 크게 세 가지 범주(차량 내 시스템, 인프라 센서와 통신, 백엔드 시스템)로 구분되며, 이러한 복합적 요인들이 도시 전력 수요에 미치는 영향을 종합적으로 분석할 필요가 있다.

서울시는 2040년까지 전력 자립률을 35%까지 높이는 것을 목표로 하고 있으나, 이는 자율주행차의 추가 전력 소비를 충분히 반영하지 못하고 있다. 특히 수도권 변전소의 경우 송전 여유 전력을 확보하고 있는 곳이 거의 없어, 충전 인프라 확충에도 제약이 될 수 있다는 점에서 정확한 수요 예측이 시급하다.

서울시는 2050년까지 탄소중립 달성을 목표로 하고 있으며, 교통 부문은 전체 온실가스 배출의 약 20%를 차지한다¹⁸⁾. 따라서 자율주행차 도입이 이러한 목표 달성에 어떤 영향을 미칠지 분석하고, 이에 따른 정책적 시사점을 도출하는 것이 중요하다.

특히 자율주행차량의 탄소 배출량 변화를 정량적으로 분석하는 것이 중요하다. Nature의 최신 연구에 따르면, 자율주행 전기차는 비자율주행 전기차와 비교했을 때 평균 8% 더 많은 온실가스를 배출할 수 있다.¹⁹⁾ 이는 제조 단계에서의 배터리와 전자 부품 생산으로 인한 배출량이 최대 40%까지 증가할 수

18) 서울에너지드림센터. (2020). 서울시 2050 온실가스 감축전략. 서울특별시.

19) Lee, J. H., Choi, Y. S., Choi, S. H., Lee, S. H., Kim, H. J., Kang, J. H., ... & Choi, J. W. (2023). Atomic-scale observation of the initial oxidation of Cu(111) at room temperature. Nature Communications, 14(1), 6289.

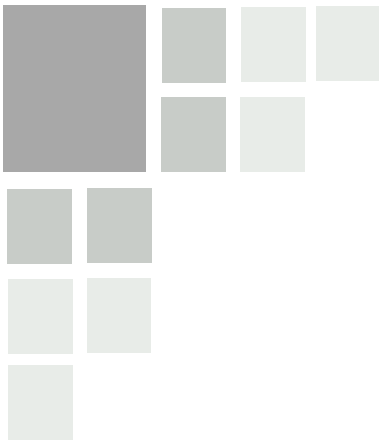
있기 때문이다. 반면 재활용을 통해 차량당 6.65톤의 이산화탄소 배출량을 상쇄할 수 있다는 분석도 있다.

서울시는 2033년까지 2005년 대비 온실가스 배출량을 50% 감축하는 목표를 설정했다. 이를 위해서는 교통 부문의 배출량 감축이 필수적이며, 자율주행차의 도입이 이러한 목표 달성에 어떤 영향을 미칠지 분석이 시급하다. 특히 자율주행차는 주차 공간 탐색 시간을 줄이고 효율적인 경로 선택을 통해 연료 소비를 감소시킬 수 있지만, 편리성 증가로 인한 통행량 증가는 오히려 배출량을 증가시킬 수 있다.

MIT의 연구진들은 자율주행차의 컴퓨팅 파워가 전 세계 데이터센터의 전력 소비량과 맞먹는 수준의 온실가스를 배출할 수 있다고 경고한다. 따라서 자율주행차의 도입이 서울시의 탄소중립 목표 달성에 미치는 영향을 종합적으로 분석하고, 이에 따른 정책적 시사점을 도출하는 것이 본 연구의 핵심 목적이다.

특히 본 연구는 자율주행차량의 에너지 소비를 개별 요소(컴퓨팅 부하, V2X 통신, 데이터센터 운영 등)로 나누어 분석하는 기존 연구와 달리, 모든 관련 요인을 통합적으로 분석하여 총체적인 전력 소비량을 제시한다는 점에서 의의가 있다.

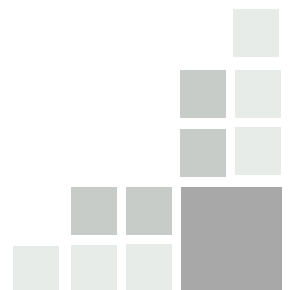
본 연구의 결과는 도시 에너지 정책과 전력망 설계에 필요한 실질적 데이터를 제공할 것이다. 특히 자율주행차의 전력 소비가 전력 인프라와 탄소중립 목표에 미칠 영향을 예측함으로써, 정책 수립 및 기술 개발 방향 설정에 기여할 수 있다.



II 이론적 고찰



1. 자율주행자동차의 개념
2. 선행연구 분석



II

이론적 고찰

1. 자율주행자동차의 개념

자율주행자동차는 운전자의 개입 없이 차량 스스로 주변 환경을 인식하고 판단하여 주행하는 기술을 의미한다. 이는 단순히 차량을 움직이는 것을 넘어서, 복잡한 도로 환경에서 안전하고 효율적으로 주행할 수 있는 능력을 포함한다

자율주행자동차의 주요 기능은 다음과 같은 핵심 요소들로 구성된다.

■ 환경 인식 시스템

- 라이다(LiDAR), 레이더, 카메라 등을 통한 주변 상황 감지
- 실시간 도로 환경 및 장애물 식별

■ 경로 계획 시스템

- GPS와 HD맵 기반의 최적 경로 설정
- 실시간 교통 상황을 반영한 동적 경로 조정

■ 제어 시스템

- 인공지능을 통한 주행 경로 판단 및 실행
- 차량의 속도, 방향, 제동 등 세부 제어

■ V2X 통신 시스템

- 차량-차량, 차량-인프라 간 정보 교환
- 실시간 교통 정보 및 안전 관련 데이터 공유
- 이러한 기술적 요소들은 인공지능, 센서 기술, 통신 기술 등 다양한 첨단 기술의 융합을 통해 구현된다.

자율주행자동차의 기술적 수준은 SAE(Society of Automotive Engineers) International에서 제정한 6단계 분류 체계를 통해 구분된다. 이는 레벨 0(완전 수동주행)부터 레벨 5(완전자율주행)까지로 세분화되어 있다.

■ 자율주행 레벨별 특징

- Level 0: 운전자가 모든 주행 기능을 직접 수행
- Level 1: 조향 또는 가감속 중 한 가지 기능 자동화
- Level 2: 조향과 가감속을 동시에 자동화하나 운전자의 지속적 감시 필요
- Level 3: 특정 조건에서 시스템이 주행을 담당하나 비상시 운전자 개입 필요
- Level 4: 정해진 구간에서 완전 자율주행 가능
- Level 5: 모든 도로 환경에서 완전 자율주행 가능

현재 기술 발전 동향을 보면, 레벨 4 기술은 제한적 성장을 보이고 있으며, 신차의 대부분이 레벨 3 이상의 자율주행 기능을 탑재할 것으로 전망된다. 보수적 시나리오에서는 신차의 17%, 기본 시나리오에서는 37%, 가속화 시나리오에서는 57%가 레벨 3 이상의 자율주행 기능을 탑재할 것으로 예측된다.

2. 선행연구 분석

자율주행차량의 에너지 소비와 환경 영향에 관한 연구는 크게 세 가지 주요 영역에서 진행되어 왔다.

자율주행차량의 에너지 소비 최적화는 지속적인 연구 주제로 다뤄져 왔다. 특히 교차로 관리 시스템(Autonomous Intersection Management, AIM)을 통한 에너지 효율화 연구가 주목받고 있다. 차량의 도착 시간을 예측하고 통신하여 충돌을 방지하고 교차로 통과 시간을 할당하는 방식으로, 이를 통해 교차로에서의 가속으로 인한 에너지 소비를 최대 80%까지 절감할 수 있다는 연구 결과가 있다.²⁰⁾

20) Niels, T., & Bogenberger, K. (2023). Optimized Trajectory Planning to Reduce Electric Vehicle Energy Consumption in Urban Areas. Semantic Scholar.

전력 소비 구조 분석에서도 연구가 진행이 되었다. 자율주행차량은 '바퀴 달린 데이터센터'라고 불릴 만큼 높은 전력 소비를 보인다. 차량 내 컴퓨팅 시스템이 도로 상황 이미지를 처리하는 과정에서 상당한 에너지를 소비하며, AI 알고리즘 구동과 센서 데이터 처리에도 많은 전력이 필요하다¹⁾. 이러한 전력 소비는 크게 세 가지 요소로 구성된다:²⁾

- 차량 내 컴퓨팅 부하
- V2X(Vehicle-to-Everything) 통신
- 데이터센터 운영

지속가능성과 인프라에 대한 검토도 있었다. 자율주행차량의 도입은 도시 에너지 인프라에 상당한 영향을 미칠 것으로 예측된다. 5G 통신으로 인한 데이터 스트림 증가와 온보드 시스템의 전력 소비 증가는 도시 전력 수요를 크게 증가시킬 것으로 전망된다¹⁾. 특히 전기 및 하이브리드 차량 생산에 필요한 희토류 원소의 해외 의존도 문제도 중요한 연구 주제로 다뤄지고 있다.

한편, 자율주행차량의 도입은 주행 효율성 측면에서 주목할 만한 개선을 보여준다. 인간 운전자 대비 자율주행 시스템은 가속과 감속에서 23.5% 더 효율적인 에너지 사용을 보이며, 특히 종방향 및 횡방향 가속도 신호에서 70.2% 더 나은 성능을 보인다.²⁾ 이는 자율주행 시스템이 더 부드러운 속도 프로파일과 최적화된 회전 속도를 구현할 수 있기 때문이다.

자율주행차량은 사물인터넷(IoT) 기술과의 통합을 통해 스마트시티 환경에서 더욱 효과적으로 작동한다. IoT 기술은 다음과 같은 이점을 제공한다:³⁾

- 승객과 보행자의 안전성 향상
- 교통 혼잡 회피를 통한 효율성 증대
- 연료 소비 감소를 통한 지속가능성 확보

21) Zawodny, M., & Kruszyna, M. (2022). Proposals for Using the Advanced Tools of Communication between Autonomous Vehicles and Infrastructure in Selected Cases. *Energies*

22) Zheng, Y. (2023). Comfort-oriented driving: performance comparison between human drivers and motion planners. *arXiv:2301.10538*

23) Bautista, C., & Mester, G. (2023). Internet of Things in Self-driving Cars Environment. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*.

스마트 내비게이션과 에너지 관리또한 다루어졌는데, 자율주행차량의 에너지 효율성은 스마트 내비게이션 시스템을 통해 더욱 향상될 수 있다. 복잡한 도시 환경에서 최적의 경로를 선택하고 충전 일정을 관리함으로써 27% 더 높은 성공률과 37% 더 높은 에너지 효율성을 달성할 수 있다.

한편, 딥러닝 기반 환경 인식을 통한 효과도 기술적 검토가 있었다. 자율주행차량의 장면 분류 및 객체 탐지 능력은 딥러닝 기술의 발전으로 크게 향상되었다. 개선된 Faster RCNN 네트워크와 Inception 모듈을 통해 지역적 특징과 전역적 특징을 모두 고려한 환경 인식이 가능해졌다.²⁴⁾ 이러한 기술적 진보는 자율주행의 안전성과 신뢰성을 높이는 데 기여하고 있다.

탄소 배출 관련된 연구도 진행되었다. 자율주행차량의 탄소 배출은 긍정적 측면과 부정적 측면이 공존한다. 전기 기반 자율주행차량은 기존 내연기관 차량 대비 40% 정도의 탄소 배출 감소 효과를 보인다.²⁵⁾ 하지만 자율주행 시스템의 편의성으로 인한 이동 거리 증가는 새로운 환경 부담으로 작용할 수 있다.²⁶⁾

자율 주행이 효율적인지 그리고 얼마나 최적화가 가능한지도 연구가 된 바 있다. 선행 연구에 따르면, 자율주행차량의 에너지 효율성은 다음과 같은 요소들에 의해 결정된다:

- 주행 패턴 최적화: 인간 운전자 대비 23.5% 더 효율적인 에너지 사용²⁷⁾
- 가속 및 감속 제어: 주행 중 진동과 불필요한 가속을 70.2% 감소²⁸⁾
- 군집 주행 효과: 공기 저항 감소로 인한 연비 향상²⁹⁾

24) Ni, J., Shen, K., Chen, Y., Cao, W., & Yang, S. X. (2022). An Improved Deep Network-Based Scene Classification Method for Self-Driving Cars. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-14.

25) Ivanchev, J., Fonseca, J. A., & Knoll, A. (2020). Electrification and Automation of Road Transport: Impact Analysis of Heat and Carbon Emissions for Singapore. 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 1-8.

26) Wang, T., & Hu, X. (2022). The Impact of Autonomous Vehicles on People's Use of Vehicles and the Possible Environmental Pollution. *Highlights in Science, Engineering and Technology*.

27) Zheng, Y. (2023). Comfort-oriented driving: performance comparison between human drivers and motion planners. *arXiv:2301.10538*.

28) Zheng, Y. (2023). Comfort-oriented driving: performance comparison between human drivers and motion planners. *arXiv:2301.10538*.

29) McCarthy, J. (2017). Sustainability of Self-Driving Mobility: An Analysis of Carbon Emissions Between Autonomous Vehicles and Conventional Modes of Transportation. *Semantic Scholar*.

자율주행차량의 도입은 도시 에너지 시스템에 상당한 변화를 가져올 것으로 예측된다. 특히 전기 기반 자율주행차량의 경우, 도시 전력망에 대한 부하가 증가할 것으로 예상된다³⁰⁾. 이는 다음과 같은 요인들 때문이다:

- 컴퓨팅 시스템 전력 소비
- V2X 통신 인프라 운영
- 데이터 센터 에너지 수요

자율주행차량의 지속가능한 운영을 위해서는 에너지 효율성 개선이 필수적이다. 특히 차량 1대당 1.2 킬로와트 이하의 전력 소비를 달성해야 하며, 이는 하드웨어 효율 개선과 에너지 관리 시스템 고도화를 통해 가능할 것으로 전망된다.

자율주행차량의 도입이 전력 수요에 미치는 영향에 대한 정량적 예측은 상당한 불확실성을 내포하고 있다. 특히 자율주행 시스템의 컴퓨팅 파워 요구량이 증가함에 따라, 전력 소비량이 기하급수적으로 증가할 것으로 전망된다. 현재의 예측 모델에 따르면, 자율주행차량의 보급률에 따라 전력 수요가 최대 200%까지 증가할 수 있는 것으로 분석되었다.

자율주행차량의 전력 수요 예측은 여러 복잡한 요인들로 인해 정확한 산정이 어렵다. 특히 차량 내 컴퓨팅 시스템의 전력 소비, V2X 통신, 데이터 센터 운영 등 다양한 요소들이 복합적으로 작용한다. 도시 전체의 전력망 구조와 에너지 인프라에 미치는 영향을 정확히 예측하기 위해서는 더 많은 실증적 데이터가 필요한 상황이다.

자율주행차량의 탄소 배출 영향은 도입률에 따라 상이한 패턴을 보인다. 초기에는 운행 효율성 증가로 배출량이 감소할 수 있으나, 도입률이 증가할수록 전력 소비 증가로 인해 오히려 탄소 배출이 증가할 수 있다.³¹⁾ 특히 전력 생산 과정에서의 탄소 집약도가 중요한 변수로 작용하며, 도시별 에너지 믹스에 따라 그 영향이 달라질 수 있다.³²⁾

30) Luo, Z. (2023). The Impact of Autonomous Vehicles on Cities. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*.

31) Conlon, J., & Lin, J. (2019). Greenhouse Gas Emission Impact of Autonomous Vehicles in an Urban Environment. *Semantic Scholar*.

32) Conlon, J., & Lin, J. (2019). Greenhouse Gas Emission Impact of Autonomous Vehicles in an Urban Environment. *Semantic Scholar*.

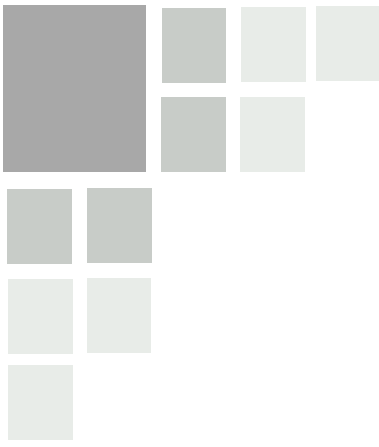
현재까지 서울시와 같은 특정 행정구역을 대상으로 한 실증적 연구가 부재했다는 점은 중요한 한계로 지적된다. 도시별로 상이한 교통 패턴, 에너지 인프라, 도시 구조 등을 고려한 맞춤형 연구가 필요하다.³³⁾ 또한 실제 기술 발전 속도와 방향성을 고려하지 않은 도시계획은 다음과 같은 한계를 가진다:

- 에너지 인프라 확충 계획의 부정확성
- 충전 인프라 배치의 비효율성
- 전력망 용량 산정의 어려움

이러한 한계에도 불구하고, 본 연구는 도시계획 수립 시 다음과 같은 도움을 제공한다:

- 자율주행차량 도입에 따른 에너지 수요 변화 예측
- 도시 인프라 투자 우선순위 설정을 위한 기초자료 제공
- 탄소중립 목표 달성을 위한 정책적 방향성 제시

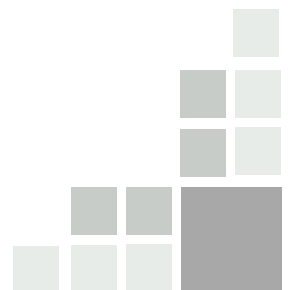
33) Silva, C. A., & Melo, S. (2022). A Submodel as a Plug-in for the Assessment of Autonomous Vehicles and Their Impact on Urban Mobility. Semantic Scholar.



III 데이터 선정



1. 데이터의 범위
2. 주요 데이터
3. 연구 가정
4. 소결



III

데이터 선정

1. 데이터의 범위

가. 공간적 범위

본 연구는 자율주행자동차의 전력 소모량을 분석하기 위해 서울시를 연구의 공간적 범위로 설정하였다. 서울시는 고밀도 도시환경, 높은 교통량, 자율주행 기술 도입가능성이 높은 지역으로 평가되며, 데이터의 가용성과 신뢰성이 높아 연구의 공간적 범위로 설정하였다. 서울시 교통정보센터(TOPIS), 서울시공공데이터포털, 한국교통안전공단, 국가 교통 통계등의 데이터를 사용하여 서울시의 데이터를 수집하였다.

나. 시간적 범위

본 연구의 시간적 범위는 2022년부터 2023년까지로 한정하였다. 시간적 범위 설정은 다음과 같은 이유에 기반한다.

우선 2022년과 2023년은 자율주행차량 기술이 상용화 초기 단계에 접어들어, 실제 도로 환경에서의 테스트와 운행 사례가 증가한 시기이다. 이 기간의 자율주행자동차들에 대한 연구데이터가 증가하였기 때문에 적절한 시간적 구간이라고 판단하였다. 특히, 공간적 범위인 서울시는 이 기간동안 일부 구간에서 자율주행차량을 활용한 시범사업이 운영되었다.

또한 2022년과 2023년의 최신 데이터를 기반으로하여 연구의 현실성을 높이는데 기여하였다. 자율주행차량 기술과 인프라는 급속히 발전하고 있어, 비교적 최근 데이터를 활용하여 현재와 유사한 조건에서의 연구 결과를 도출해야 한다. 이 기간동안 수집된 데이터는 차량의 주행거리, 에너지소비, 데이터센터의 전력 소모량 등 다양한 변수에 적용되었다.

이러한 이유로 본 연구는 시간적 범위를 2022년과 2023년으로 설정하였으며, 이를 통해 자율 주행 차량의 도입 초기 단계에서 발생하는 에너지 소비 특성을 분석하고, 향후 자율주행자동차 도입 확산에 따른 에너지 소비 증가를 예측하려고 한다.

2. 주요 데이터 소개

가. 주행 및 차량정보 데이터

■ 서울시 차량 연간 총 주행거리

본 연구에서는 서울시 전체 차량의 연간 총 주행거리를 운행시간 산출의 기초 자료로 활용하였다. 주행거리 데이터는 차량 이동 규모와 밀도를 나타내는 주요 지표로, 운행시간을 계산하여 에너지 소비 및 전력 소모량을 분석하는 데 중요한 역할을 한다.

서울시 전체 차량의 연간 총 주행거리(VKT) 약 38,603,400,000km로 추산되었다. 이때 VKT는 차량 총주행거리를 나타내는 교통공학에서 나오는 지표로 특정시간 동안 특정 지역내에서 모든차량이 총 주행한 총 거리를 합산한 값이다. 이는 서울시 교통 환경에서 차량 이동의 규모를 정량적으로 나타낸다. 해당 데이터는 차량 대수와 평균 주행거리를 기반으로 산출되었으며, 도로 네트워크를 통해 발생하는 차량 이동량을 집계한 결과이다. 주행거리는 차량 이동 패턴과 도로 이용수준을 평가하는 데 유용한 자료일 뿐만 아니라, 운행시간 산출에 중요한 기초 자료를 제공한다.

특히, 연간 총 주행거리는 도로 유형 및 지역에 따라 세분화할 수 있어, 자율주행차량 도입 시 운행시간과 에너지 소비 특성을 분석하는 데 유용하다. 본 연구에서는 이러한 주행거리 데이터를 활용하여 운행시간을 추정하고, 자율주행차량의 도입을 변화에 따른 에너지 소비와 전력 소모량을 비교하였다.

결과적으로, 서울시 전체 차량의 연간 총 주행거리는 운행시간 산출과 에너지 소비 분석의 기초 자료로 활용되었으며, 자율주행차량 도입에 따른 에너지 소비 변화와 시뮬레이션 결과의 정확성을 높이는 데 기여하였다.

■ 평균 속도

본 연구에서는 서울시 차량의 유형별 평균 운행 속도를 주행 시간을 추정하기 위한 핵심 데이터로 활용하였다. 차량의 평균 운행 속도는 자율주행차량의 도입이 도로 교통 흐름 및 에너지 소비에 미치는 영향을 평가하기 위해 간접적으로 활용되며, 서울시 차량의 평균 운행 속도는 약 23km/h로 설정되었다.

해당 데이터는 교통안전공단(KTDB)에서 제공하는 자료를 기반으로 하며, 이는 서울시를 포함한 전국 주요 도시의 차량 속도 데이터를 포함하고 있다. 해당 자료는 차량 유형별 속도 데이터를 제공하여, 주행 시간을 계산하고 이를 기반으로 에너지 소비량을 분석하는 데 중요한 기준을 제공한다.

평균 운행 속도는 총 차량 주행거리(VKT)를 기반으로 차량의 총 주행 시간(H)을 추정하는 데 활용되며, 이는 자율주행차량 도입 시나리오에서 각 차량 유형의 에너지 소비량을 추정하는 기초 자료로 사용된다. 예를 들어, 평균 속도를 기준으로 차량의 주행 시간(운행 거리/속도)을 계산하고, 이를 통해 서울시내 전체 자율주행차량의 에너지 소비 및 온보드 컴퓨팅 시간(W)등 에너지 소모의 변화를 분석할 수 있다.

$$\text{주행시간} = \frac{\text{주행거리}}{\text{평균속도}}$$

이 데이터는 자율주행차량의 도입률 변화에 따라 주행 시간이 증가하거나 감소하는 양상을 추정하고, 에너지 소비량 및 도로 효율성을 평가하는 데 기초 자료로 활용된다. 특히, 자율주행차량의 도입이 평균 속도 안정화에 미치는 영향을 반영하여 에너지 소비 모델링의 신뢰성을 높이는 데 기여한다.

따라서, 서울시 차량의 평균 운행 속도 데이터는 주행 시간을 추정하여 자율주행차량 도입에 따른 에너지 소비 변화를 분석하는 데 필수적인 자료로 활용되었으며, 연구 결과의 정량적 근거를 제공하는 중요한 역할을 수행한다.

나. 에너지 및 전력소비 데이터

본 연구에서는 자율주행자동차의 에너지 소비와 관련된 데이터를 선정하기 위해 Data Centers on Wheels: Emissions From Computing Onboard Autonomous Vehicles 을 주요 참고 자료로 활용하였다. 이 논문은 자율주행차량의 컴퓨팅 부하, V2X 통신, 데이터센터와 같은 다양한 구성 요소가 에너지 소비와 탄소 배출에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구이다. 자율주행차량이 요구하는 전력 소모량을 구체적으로 평가하고, 이를 통해 데이터센터와 통신 인프라 간의 상호작용을 설명하며, 미래 교통 시스템의 에너지 및 환경적 영향을 제시하였다.

논문에서 자율주행차량의 온보드 컴퓨팅 부하는 차량 1대당 평균 2.5kW로 설정되었으며, 이는 차량 내 딥 뉴럴 네트워크(DNN) 기반 작업(객체 인식, 경로 계획 등)을 처리하는 데 필요한 전력을 나타낸다. 또한, V2X 통신 전력 소모는 RSU(Road-Side Unit) 및 차량 간 데이터 교환을 포함한 통신 과정에서 소모되는 에너지를 포함하며, 논문은 RSU 1대당 약 10W 이하의 전력 소모를 제시하였다. 마지막으로, 데이터센터의 소비량은 차량에서 생성된 데이터를 저장하고 학습 모델을 훈련하는 데 필요한 에너지로, 서버 및 스토리지 전력을 포함하여 자율주행차 1대당 평균 9.2kW로 설정되었다.

이 논문은 각 구성 요소가 개별적으로 발생시키는 전력 소모뿐만 아니라, 자율주행차량과 통신 및 데이터센터 간의 연계된 에너지 소모 체계를 설명한다. 특히, 자율주행차량의 보급률 증가에 따른 전체 에너지 소비량과 탄소 배출량의 변화를 다루며, 각 데이터의 현실성과 적합성을 뒷받침하는 실험적 근거를 제공한다.

따라서, 본 논문은 자율주행차량의 컴퓨팅 부하뿐만 아니라, V2X 통신 및 데이터센터와 같은 관련 데이터의 선정 과정에서도 신뢰할 수 있는 기준을 제공하며, 본 연구에서 다양한 에너지 소비 모델링과 시뮬레이션의 기반 자료로 활용되었다.

■ 자율주행 컴퓨팅 부하

본 연구에서는 자율주행자동차의 에너지 소비 분석을 위해 차량 내 컴퓨팅 부하 데이터를 주요 변수로 선정하였다. 자율주행차량은 딥 뉴럴 네트워크(DNN) 기반의 복잡한 연산 작업(예: 객체 인식, 경로 계획, 차량 제어 등)을 수행하며, 이러한 작업을 처리하기 위해 차량 내 컴퓨팅 장치가 소비하는 전력이 에너지 분석의 핵심 요소로 작용한다.

자율주행차량의 컴퓨팅 부하와 관련하여, 본 연구는 Data Centers on Wheels: Emissions From Computing Onboard Autonomous Vehicles 의 결과를 바탕으로 차량 1대당 평균 컴퓨팅 전력을 2.5kW로 설정하였다. 이는 자율주행차량이 온보드(Onboard) 컴퓨팅을 통해 자율주행 스택을 실행하는 데 필요한 전력을 반영한 값이다. 해당 논문은 차량의 연산 부하가 기존 데이터센터와 유사한 수준의 전력을 요구할 수 있음을 강조하며, 자율주행차량의 에너지 소비 특성을 이해하는 데 중요한 근거를 제공하였다.

본 연구는 자율주행차량의 컴퓨팅 전력을 2.5kW로 설정하고, 이를 차량의 평균 주행 시간 및 차량 대수와 결합하여 자율주행차량 도입에 따른 총 에너지 소비량을 산출하였다. 이 데이터는 자율주행차량의 도입률 변화와 차량 대수 증가에 따른 에너지 소비량을 정량적으로 평가하는 데 필수적인 기초 자료로 활용되었다.

■ V2X 통신 전력 소모(OBU)³⁴⁾

본 연구에서는 자율주행자동차의 에너지 소비 분석에 있어 차량 간 및 차량-인프라 간 통신을 담당하는 V2X 통신 전력 소모를 중요한 변수로 설정하였다. V2X 통신은 자율주행차량이 안전하고 효율적으로 운행하기 위해 필수적으로 요구되는 기술로, 차량에 탑재된 차량용 통신 장치(OBU, On-Board Unit)가 실시간 데이터를 송수신하며 주요 역할을 수행한다.

본 연구는 V2X 통신 장치의 전력 소모를 5W로 설정하였다. 이 값은 Data Centers on Wheels: Emissions From Computing Onboard Autonomous Vehicles 에서 제시된 결과를 기반으로 하며, 차량-차량 및 차량-인프라 간의 데이터 송수신 과정에서 발생하는 에너지 소비를 반영한 값이다. 해당 논문은 OBU의 전력 소모가 상대적으로 작지만, 자율주행차량의 도입률이 증가할 경우 전체 에너지 소비량에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 시사하였다.

34) Soumya Sudhakar 외 2명, 「Data Centers on Wheels: Emissions from Computing Onboard Autonomous Vehicles」, MIT, 2022.10

본 연구에서는 OBU의 전력 소모 데이터를 차량 대수 및 평균 주행 시간과 결합하여, 자율주행차량이 운영되는 동안 발생하는 총 통신 에너지 소비량을 산출하였다. 이 데이터는 자율주행차량 도입률 증가에 따라 통신 인프라와 결합된 에너지 소비 패턴을 정량적으로 평가하는 데 활용되었다.

■ 데이터 센터 소비량

본 연구에서는 자율주행자동차의 에너지 소비 분석에 있어 차량이 생성하는 데이터를 처리하고 저장하는 데이터센터의 전력 소모를 중요한 변수로 설정하였다. 데이터센터는 자율주행차량의 온보드(Onboard) 컴퓨팅과 통신을 통해 전송된 대규모 데이터를 처리하고, 추론 모델 학습 및 데이터 저장을 담당하는 핵심 인프라이다.

본 연구는 자율주행차량 1대당 데이터센터 전력 소모를 9.2kW로 설정하였다. 이 값은 Data Centers on Wheels: Emissions From Computing Onboard Autonomous Vehicles 에서 제시된 결과를 기반으로 하며, 데이터센터의 서버, 스토리지, 네트워크 장비가 차량 데이터 처리 및 저장에 필요한 전력을 정량적으로 반영한 값이다. 해당 논문은 자율주행차량의 보급이 증가할 경우 데이터센터 전력 소모량이 도시 에너지 소비에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 시사하였다.

본 연구에서는 데이터센터 전력 소모 데이터를 차량 대수와 평균 주행 시간에 결합하여, 자율주행차량 도입률 변화에 따른 데이터센터의 에너지 소비량을 정량적으로 산출하였다. 이를 통해 자율주행차량과 데이터센터 간 상호작용에 의한 에너지 소모 및 탄소 배출량 증가를 평가하였다.

■ 통신 전력 소모(RSU)전력 소모량

본 연구에서는 자율주행자동차의 에너지 소비 분석에 있어 V2X 통신의 핵심 구성 요소인 RSU(Road-Side Unit) 전력 소모를 주요 변수로 설정하였다. RSU는 자율주행차량과 도로 인프라 간 데이터를 송수신하며, 자율주행차량이 실시간으로 주변 환경 정보를 교환하고 안전한 주행을 보장할 수 있도록 돕는 핵심 장치이다. 특히, RSU는 차량의 위치 정보, 신호 상태, 도로 상황, 그리고 기타 교통 데이터를 통합 관리하여 차량과의 원활한 데이터 교환을 가능하게 한다.

본 연구에서 RSU의 전력 소모는 1대당 8W³⁵⁾로 설정되었으며, 이 값은 V2X Priority의 기술 문서에서 제시된 데이터를 바탕으로 도출되었다. RSU는 일반적으로 도로 네트워크 내 일정 간격으로 설치되며, 설치 밀도와 네트워크 활용도에 따라 전력 소모량이 크게 달라질 수 있다. 특히, RSU는 지속적으로

35) <https://www.v2x-priority.com/en/rsu/>

데이터를 송수신해야 하므로 전력 소모가 고정적이며, 자율주행차량 도입률 증가와 통신 요구량 증가에 따라 네트워크 전력 소모량이 급격히 상승할 가능성이 있다.

본 연구에서는 RSU 전력 소모 데이터를 주요 도로망 내 RSU 설치 밀도와 결합하여 전체 RSU 네트워크의 전력 소모량을 계산하였다. 예를 들어, RSU 설치 밀도를 50m 간격으로 가정한 경우, 해당 구간 내 RSU의 전력 소모량을 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\text{총 RSU 전력 소모량} = \text{RSU 설치 대수} \times 1\text{대당 전력 소모량}(8W)$$

따라서 RSU 전력 소모량은 자율주행차량의 운행과 통신 네트워크가 도로 에너지 시스템에 미치는 영향을 분석하는 데 핵심적인 역할을 한다. RSU는 자율주행차량의 안전성과 효율성을 지원하기 위한 필수적인 인프라이며, 본 연구에서는 자율주행차량 도입률 증가와 도로 네트워크 확장에 따라 RSU의 전력 소모량이 전체 에너지 소비 모델에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

■ 전기차 전비

본 연구에서는 자율주행자동차의 에너지 소비 분석을 위해 전기차 전비(연비) 데이터를 주요 변수로 설정하였다. 자율주행자동차는 대부분 전기차 기반으로 설계되며, 이는 차량 운영 중 전력 소모와 주행 거리 간의 상관관계를 정량적으로 분석하기 위한 필수적인 데이터이다.

전기차의 평균 전비는 5km/kWh로 설정되었으며, 이 값은 Autopilot Review에서 제시된 데이터를 기반으로 선정되었다. 해당 자료는 최신 전기자동차(특히, 자율주행기술이 적용된 전기차)의 실제 전비 성능을 측정한 결과를 바탕으로 하며, 자율주행차량의 에너지 효율을 모델링하는 데 적합하다. 전기차의 전비는 차량의 주행 거리와 전력 소모량을 직접적으로 연결하여, 자율주행차량의 에너지 소비량을 계산하는 데 필수적인 변수로 활용된다.

■ 휘발유차 연비

본 연구에서는 자율주행자동차의 에너지 소비 분석을 위해 기존 차량, 특히 휘발유차의 평균 연비 데이터를 비교 기준으로 활용하였다. 자율주행차량의 도입 효과를 평가하기 위해 기존 휘발유차의

에너지 소비와 비교하는 것은 매우 중요하며, 이를 통해 자율주행차량이 기존 내연기관차량 대비 에너지 효율성과 환경적 영향을 어떻게 변화시키는지 정량적으로 분석할 수 있다.

휘발유차의 평균 연비는 13.6km/L로 설정되었으며, 이 값은 공공데이터포털에서 제공된 자료를 기반으로 선정되었다. 해당 데이터는 국내에서 사용되는 휘발유 차량의 평균적인 연료 효율을 반영하고 있으며, 서울시와 같은 대도시 환경에서 차량 주행 특성과 에너지 소비를 모델링하는 데 적합하다.

다. 환경 및 도로 인프라 데이터

자율주행자동차의 에너지 소비와 운행 효율성을 분석하기 위해 환경 및 도로 인프라 데이터는 필수적인 역할을 한다. 자율주행차량은 차량 자체의 성능뿐만 아니라 주행 환경과 도로 인프라 상태에 따라 에너지 소비와 주행 특성이 크게 달라지기 때문에, 이를 반영한 데이터는 정확한 에너지 소비 분석과 모델링을 위해 반드시 필요하다.

먼저, 환경 데이터는 자율주행차량의 운행 조건과 에너지 소비 최적화 방안을 평가하는 데 중요한 역할을 한다. 교통 혼잡 데이터는 차량의 주행 패턴과 연료 및 전력 소모를 분석하는 데 활용되며, 혼잡도가 높은 구간에서는 차량의 에너지 소비가 크게 증가할 수 있다. 또한, 기상 조건 역시 자율주행차량의 에너지 효율에 영향을 미치는 중요한 요소로, 비, 눈, 강풍과 같은 악천후는 타이어 마찰과 센서 작동 부하를 증가시켜 추가적인 에너지를 소모하게 한다. 이러한 환경적 요인들을 고려하면 자율주행차량의 에너지 소비량을 보다 현실적으로 평가할 수 있다.

또한, 도로 인프라 데이터는 자율주행차량의 운행 효율성과 통신 에너지 소모를 분석하는 데 필수적이다. 자율주행차량은 도로 인프라와의 실시간 통신을 통해 안전성을 확보하고, 주행 경로를 최적화하는 데 의존한다. 예를 들어, V2X 통신에서 사용되는 RSU(Road-Side Unit)의 설치 밀도와 네트워크 품질은 자율주행차량의 통신 에너지 소비와 밀접하게 관련되며, RSU가 촘촘히 설치된 도로 구간은 더 많은 통신 에너지를 요구할 수 있다. 이와 함께, 도로의 상태와 품질, 도로 유형(고속도로, 간선도로, 이면도로 등)은 차량의 주행 효율성과 에너지 소비량에 중요한 영향을 미친다. 고속도로와 같이 직선 도로에서 자율주행차량은 상대적으로 에너지 소비가 낮은 반면, 복잡한 도심 도로에서는 더 많은 에너지가 필요하다.

환경 및 도로 인프라 데이터는 자율주행차량의 에너지 소비 분석뿐만 아니라, 도로 네트워크 설계와 교통 정책 결정에 중요한 정보를 제공한다. 이러한 데이터는 자율주행차량과 도로 인프라 간의 상호작용을 평가하고, 교통 시스템의 지속 가능성을 확보하기 위한 도로 설계 및 에너지 효율성 향상 방안을 도출하는 데 활용될 수 있다.

따라서, 환경 및 도로 인프라 데이터는 자율주행차량의 에너지 소비를 정밀하게 모델링하고, 도로 네트워크의 효율성과 지속 가능성을 평가하기 위한 핵심 자료로, 연구의 기초가 되는 중요한 요소이다. 이를 통해 자율주행차량이 도로와 상호작용하는 방식과 그로 인한 에너지 소비의 변화 양상을 체계적으로 분석할 수 있다.

■ 도로 총 연장

본 연구에서는 자율주행자동차의 에너지 소비와 운행 특성을 분석하기 위해 서울시 도로 총 연장 데이터를 활용하였다. 도로 총 연장은 한 지역 내에 존재하는 모든 도로의 길이를 합산한 값으로, 도로 네트워크의 규모와 구성을 파악할 수 있는 중요한 지표이다. 이는 자율주행차량이 주행하는 물리적 환경을 나타내며, 차량의 주행 거리, 통신 요구량, 그리고 도로 유형별 에너지 소비 특성을 분석하는 데 필수적인 자료로 활용된다.

서울시의 4차로 이상 도로 총 연장은 약 2,092km로 설정되었으며, 이는 서울시 교통정보 자료와 IT뉴스에서 제공된 데이터를 기반으로 선정되었다. 해당 값은 서울시 내 고속도로, 간선도로, 이면도로 등 다양한 도로 유형을 포함한 총 도로 길이를 나타낸다. 도로 총 연장 데이터는 자율주행차량이 운행하게 될 주요 도로 네트워크의 크기와 구조를 반영하며, 연구에서 서울시의 교통 특성과 도로 인프라의 에너지 소비 모델링에 중요한 역할을 한다.

도로 총 연장은 자율주행차량의 도로 점유율과 주행 경로 분석에 활용되며, 도로 유형별 에너지 소비를 세분화하는 데 기초 자료로 사용된다. 예를 들어, 고속도로와 간선도로에서는 주행 속도가 높고 교통 흐름이 원활한 반면, 도심 이면도로에서는 신호 대기나 혼잡도가 높아 추가적인 에너지가 소모될 가능성이 크다. 도로 총 연장 데이터를 통해 도로망의 분포와 자율주행차량이 주요하게 운행할 구간을 분석함으로써, 자율주행차량의 에너지 소비 패턴을 지역별로 구체적으로 평가할 수 있다.

결론적으로, 서울시 도로 총 연장 데이터는 자율주행차량의 주행 환경을 파악하고, 도로 네트워크의 규모와 유형에 따른 에너지 소비를 분석하는 데 중요한 기초 자료로 활용된다. 이를 통해 자율주행차량 도입이 도시 도로망과 에너지 시스템에 미치는 영향을 종합적으로 평가할 수 있다.

■ 자동차 탄소 집약도 - 전기차량 소모 에너지당 탄소 집약도

본 연구에서는 자율주행자동차의 환경적 영향을 분석하기 위해 자동차 탄소 집약도 데이터를 주요 변수로 선정하였다. 탄소 집약도는 차량이 소비하는 에너지가 배출하는 이산화탄소의 양을 나타내며, 이는 자율주행차량 도입이 환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 데 필수적인 자료이다.

자동차 탄소 집약도의 필요 데이터로는 전기차 1kWh당 탄소 배출량이 설정되었으며, 본 연구에서는 0.4kg CO₂ /kWh로 정의하였다. 이 값은 한국에너지공단에서 제공한 자료(전력의 탄소 집약도 및 한국의 전력망)를 기반으로 하였으며, 한국의 전력 생산에서 사용하는 주요 에너지원과 탄소 배출 강도를 반영한 값이다.

■ 자동차 탄소 집약도 - 휘발유 차량 소모 에너지당 탄소 집약도(휘발유 · 에너지 환산)³⁶⁾

본 연구에서는 자율주행자동차의 에너지 소비와 환경적 영향을 비교하기 위해 휘발유 차량의 탄소 집약도 데이터를 활용하였다. 탄소 집약도는 연료가 소비되는 과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 나타내며, 이는 자율주행차량 도입이 기존 내연기관 차량 대비 환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 필수적인 데이터이다.

휘발유 차량의 에너지당 탄소 집약도는 2.3kg CO₂ /L로 설정되었으며, 이 값은 한국자동차공학회에서 발표된 국내 자동차 LCA 온실가스 배출량 분석 연구 결과를 기반으로 도출되었다. 해당 연구는 휘발유의 생산, 정제, 수송, 소비 등 전 과정을 포함하는 Well-to-Wheel(WTW) 분석을 통해 연료 사용에 따른 온실가스 배출량을 평가하였다. 특히, 한국의 휘발유 연료 시스템과 관련된 데이터를 기반으로 국내 상황에 맞는 탄소 집약도를 제시하였다는 점에서 연구의 신뢰성과 적합성이 보장된다.

36)송한호, 「국내 자동차 LCA 온실가스 배출량 분석」,Auto Journal,서울대학교,2021.5

3. 연구 가정

자율주행자동차의 에너지 소비와 환경적 영향을 분석하는 데 있어 모든 변수를 현실적으로 반영하는 것은 제한이 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 분석의 명확성과 효율성을 높이고, 변수 간 상호작용에서 발생할 수 있는 불확실성을 최소화하기 위해 몇 가지 가정을 설정하였다. 이러한 가정은 자율주행차량 도입 시나리오를 체계적으로 구성하고, 모델링의 일관성을 유지하기 위해 필수적인 역할을 한다.

■ 지역별 통행량의 불변 가정

먼저, 지역별 통행량의 불변 가정을 적용하였다. 이는 자율주행차량 도입 여부와 관계없이, 미래에도 현재의 지역별 통행량이 그대로 유지된다는 가정이다. 통행량은 다양한 외부 요인(인구 변화, 교통 정책 등)에 따라 달라질 수 있으나, 이를 정확히 예측하는 데 한계가 있기 때문에, 고정된 통행량을 통해 자율주행차량 도입의 직접적인 영향을 분석하였다.

■ 자율주행차 도입률의 단계적 증가

자율주행차 도입률의 단계적 증가를 설정하였다. 자율주행차량 도입률은 0%에서 100%까지 10% 단위로 점진적으로 증가한다고 가정하였으며, 이는 자율주행차량 도입이 즉각적으로 이루어지지 않고 점진적인 과정으로 진행될 것이라는 현실적 전제를 반영한 것이다. 이를 통해 도입률 변화에 따른 에너지 소비와 환경적 영향을 단계적으로 평가할 수 있었다.

■ 로지스틱 성장모형

로지스틱 성장모형을 적용하여 평균 속도와 총 주행거리 변화를 모델링하였다. 자율주행차량 도입 초기와 대량 보급기에 나타나는 교통 흐름의 비선형적인 변화를 반영하기 위해 로지스틱 성장모형을 활용하였으며, 이는 도입 시점에 따른 교통 특성 변화를 효과적으로 설명할 수 있다.

■ 전력 생산의 탄소 집약도

전력 생산의 탄소 집약도는 일정하게 유지되도록 설정하였으며, 이를 $0.5\text{kg CO}_2 / \text{kWh}$ 로 가정하였다. 전력망의 탄소 집약도는 시간이 지남에 따라 에너지 믹스의 변화에 따라 달라질 수 있으나, 특정 시점의 고정된 값을 활용함으로써 자율주행차량의 에너지 소비와 탄소 배출량을 명확히 비교하고 분석하였다.

■ RSU 설치 간격과 전력 소모량

RSU 설치 간격과 전력 소모량도 고정된 값으로 설정하였다. RSU 설치 간격은 50m로, 서울시 내 4차로 이상의 도로에 설치한다고 가정했다. RSU 1대당 전력 소모량은 0.008kW로 설정하였다. RSU는 도로 인프라와 통신을 통해 자율주행차량의 운행을 지원하는 중요한 구성 요소로, 이를 일정한 값으로 설정함으로써 통신 인프라가 에너지 소비에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있었다.

■ 에너지 절감 효과의 비율

해당 연구에서는 에너지 절감 효과의 일정 비율을 적용하였다. 군집주행(Platooning)에 따른 에너지 절감 효과는 20%로, 최적 경로 선택 시 추가적인 에너지 절감 효과는 7%로 설정되었다. 이는 자율주행차량 도입 시 예상되는 주요 이점으로, 이를 정량화하여 모델링에 반영하였다.

■ 확률적 모델링

확률적 모델링을 통한 불확실성 반영을 수행하였다. 일부 변수에 확률 분포를 적용하여 실제 교통 환경에서 발생할 수 있는 변동성을 포함하였으며, 이를 통해 모델 결과의 신뢰성을 높였다.

이러한 연구 가정은 자율주행차량 도입 시나리오를 체계적으로 구성하고, 분석의 타당성을 확보하기 위해 설정되었다. 이를 바탕으로 자율주행차량 도입이 에너지 소비와 환경적 영향을 어떻게 변화시키는지 구체적으로 평가할 수 있었다.

4. 소결

본 연구는 자율주행자동차 운행 시스템의 전력 소모량과 에너지 소비 분석을 위해 다양한 데이터를 선정하고 이를 바탕으로 분석을 진행하였다. 선정된 데이터는 차량 주행 및 에너지 소비, 데이터센터 전력 소모, 도로 인프라 에너지 요구 사항 등을 포함하며, 각 데이터는 신뢰성과 가용성을 기반으로 선택되었다. 이를 통해 자율주행차량 도입이 도시 에너지 시스템과 환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 에너지 소비 최적화 방안을 제시하려 하였다.

■ 주행 및 차량 정보 데이터

항목	필요 데이터	세부 데이터	출처
연간 총 주행거리	서울시 차량 총 주행거리	38,603,400,000 km	서울시 교통정보센터, 국가교통통계
차량 대수	서울시 등록 차량 대수	3,300,000 대	서울시 행정동별 자동차등록대수 현황, 공공데이터포털
평균 주행거리	차량 1대당 연간 주행거리	11,698 km/년	한국교통안전공단
평균 속도	차량 유형별 평균 운행 속도	23 km/h	한국교통안전공단, 교통안전 데이터

<표 1> 주행 및 차량 정보 데이터

■ 에너지 및 전력 소비 데이터

항목	필요 데이터	세부 데이터	출처
자율주행 컴퓨팅 부하	자율주행차 1대당 컴퓨팅 전력	2.5kW	Data Centers on Wheels
V2X 통신 전력 소모(OBU)	차량 내 통신 전력 소모	5W	Data Centers on Wheels
데이터센터 소비량	데이터센터 1대당 전력 소모량	9.2kW	Data Centers on Wheels
통신 전력 소모(RSU)	RSU 1대당 전력 소모량	8W	V2X Priority 기술문서
전기차 전비	전기차 1kWh당 주행거리	5km/kWh	Autopilot Review
휘발유차 연비	휘발유차 1L당 주행거리	13.6km/L	공공데이터포털

<표 2> 에너지 및 전력 소비 데이터

■ 환경 및 도로 인프라 데이터

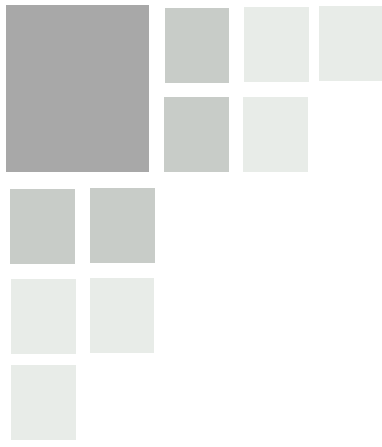
항목	필요 데이터	세부 데이터	출처
도로 총 연장	서울시 도로 총 길이 (4차로 이상)	2,092km	서울시 교통정보센터, IT뉴스
탄소 집약도(전기차)	전기차 1kWh당 탄소 배출량	0.4kg CO ₂ /kWh	한국에너지공단
탄소 집약도(휘발유 차)	휘발유 1kWh당 탄소 배출량	2.3kg CO ₂ /L	한국자동차공학회, LCA 온실가스 배출량 분석 연구

〈표 3〉 환경 및 도로 인프라 데이터

■ 연구 가정

항목	가정 내용
지역별 통행량	미래에도 현재의 지역별 통행량이 그대로 유지된다고 가정
자율주행차 도입률	0%에서 100%까지 10% 단위로 점진적으로 증가
로지스틱 성장모형 적용	평균 속도와 총 주행거리 변화를 로지스틱 성장모형으로 모델링
전력 생산 탄소 집약도	전력 생산의 탄소 집약도를 0.5kg CO ₂ /kWh로 고정
RSU 설치 간격	RSU 설치 간격은 50m로 고정, 1대당 전력 소모량 0.008kW로 가정
최대 에너지 절감 효과	군집주행 20%, 최적 경로 선택 7%의 에너지 절감 효과 적용
확률적 모델링	모델 내 일부 변수를 확률 분포로 작성하여 불확실성을 반영

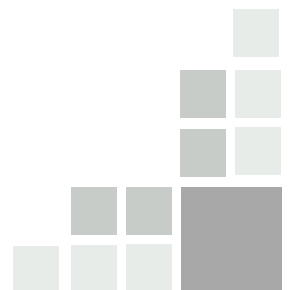
〈표 4〉 연구 가정



IV 연구 방법



1. 에너지 모델링 가정
2. 에너지 산출 모델
3. 시뮬레이션



IV

연구 방법

1. 에너지 모델링 가정

가. 로지스틱 성장함수로 평균 속도($V(x)$)와 총 주행거리($D(x)$) 산출

자율주행차 도입률 x 가 증가함에 따라 평균 속도 증가량 Δv 와 총 주행거리 증가율을 로지스틱 함수를 통해 정의한다.

$$V(x) = V_0 + \frac{K_{speed}}{1 + e^{-r_{speed}(x - x_{0,speed})}}$$

- $V(x)$: 평균속도
- V_0 : 기본 평균 속도 (자율주행차 도입 전, 예: 23 km/h)
- K_{speed} : 최대 속도 증가량(예: 9.2 km/h)
- $r_{speed}, x_{0,speed}$: 로지스틱 성장률, 중간점(도입률 60% 지점)

자율주행차 도입률이 매우 낮을 때는 큰 변화 없지만, 일정 도입률(약 60%) 근처에서 도로 효율성이 급상승하며 속도가 비약적으로 증가(비선형)할 수 있다는 선행연구 및 추론(유사 연구 자료)에 기반한 것이다.

$$D(x) = D_0 \times \left(1 + \frac{K_{distance}}{1 + e^{-r_{distance}(x - x_{0,distance})}}\right)$$

- $D(x)$: 총 주행거리
- D_0 : 기준 연간 총 주행거리(예: 38,603,400,000 km)
- $K_{distance}$: 최대 교통량 증가율(20%)
- $r_{distance}, x_{0,distance}$: 로지스틱 함수 파라미터

자율주행차 도입으로 인해 일부 차량은 더 많은 이동(공유 서비스 증가, 편리성 증가) 발생 가능. 초기에는 완만, 특정 도입률 이후 급격히 증가하는 패턴을 반영. 이로써 단순 선형 증가 대신 기술 도입 확산에 따른 비선형적 교통 수요 변화를 모사

나. 총 운행 시간 T_{total} 계산

총 운행 시간은 단순히 총 주행거리 $D(x)$ 를 평균 속도 $V(x)$ 로 나누어 구한다.

$$T_{total} = \frac{D(x)}{V(x)}$$

여기서 T_{total} 은 전체 차량이 1년 동안 도로상에서 운행하는 총 시간(시간 단위)이다. 이 값은 차량 유형별 에너지 소비량 계산의 기초가 된다.

다. 도입률에 따른 자율주행 군집주행, 최적 경로 효과증대로 인한 에너지 절감율 $k(x)$

$$k(x) = k_{\max} \times \frac{1}{1 + e^{-r_k(x-x_0)}}$$

- $k(x)$: 도입률 x 에 따른 에너지 절감율 (%)
- k_{\max} : 최대 에너지 절감율 (27%)
- r_k : 로지스틱 성장률 (군집 주행 및 최적 경로 효과가 급격히 증가하는 속도) r_k 값이 클수록 $k(x)$ 가 x_0 주변에서 급격히 증가하고, 작을수록 완만하게 증가한다..
- x_0 : 도입률에서 에너지 절감 효과가 가장 빠르게 나타나는 중간점 (ex): $x_0 = 50\%$, 사용자 설정)
- x : 자율주행차 도입률 (0~1)
- $k(x)$ 에 로지스틱 함수 도입 이유: 군집 주행 및 최적 경로 효과는 자율주행차 비율이 낮을 때는 미미하지만, 일정 도입률 이상에서는 급격히 나타납니다. 이를 반영하기 위해 S자형 증가를 나타내는 로지스틱 함수를 사용한다.

2. 에너지 산출 모델

가. 총 차량 주행거리(VKT: Vehicle Kilometers Traveled)를 기반 모델링

■ 차량 에너지 소비 및 탄소 배출 모델링을 VKT 총차량 주행거리를 기반으로 모델링해야하는 이유:

서울 내 차량의 에너지 소비와 탄소 배출을 정확히 모델링하기 위해서는 단순히 서울에 등록된 차량 대수와 대수당 에너지 사용량만을 기반으로 계산해서는 안 된다.

- 서울 외부 차량의 유입: 서울로 통근하거나 방문하는 차량 중에는 서울 외부에 등록된 차량도 다수 포함되어 있다.
- 서울 등록 차량의 외부 주행: 반대로, 서울에 등록된 차량 중 일부는 서울 외부에서 주행하는 경우도 많다.

이로 인해, 서울 시내에서 실제로 발생하는 주행량을 정확히 파악하기가 어렵다. 이를 고려할 때, 선행 연구들은 대체로 차량 대수와 대수당 에너지 소모량을 곱해 에너지 소비와 탄소 배출을 산출해 왔습니다. 그러나 이러한 접근법은 차량 대수를 보유 대수로 할 것인지, 통행량으로 할 것인지 명확히 통일되지 않았고, 사용 가능한 데이터 역시 제한적이라는 문제가 있다. 따라서 특정 시간 동안 특정 지역 내에서 모든 차량이 주행한 총 거리를 합산한 값인 총 차량 주행거리(VKT: Vehicle Kilometers Traveled) 기반의 모델링이 더 합리적인 대안으로 제안된다.

주어진 VKT를 차량별 평균 속도로 나누면 1년간 총 운행 시간을 계산할 수 있고 나아가 이를 1년간 총 시간으로 나누면 차량별 한시간 동안 도로에서 차량들이 운행한 총 시간을 의미하게 된다.

$T_{type} = T_{total} \times R_{type}$ 우리는 이식을 추후에도 계속 이용하여 에너지 소모량 산출 모형을 설계할 것. 세부 식은 다음과 같다.

1. 총 운행 시간 계산

$$T_{total} = \frac{D}{V}$$

- T_{total} : 전체 차량의 총 운행 시간 (단위: 시간, h)
- D : 전체 차량의 총 주행거리 (VKT: Vehicle Kilometers Traveled, 단위: km)

- V : 차량의 평균 속도 (단위: km/h)

설명:

- 이 공식은 전체 주행거리와 평균 속도를 이용하여 차량의 총 운행 시간을 계산합니다.
- 주행거리를 평균 속도로 나누면 이동 시간(운행 시간)을 얻을 수 있다.

2. 시간당 총 운행 시간 계산

$$T_{per\ hour} = \frac{T_{total}}{H}$$

- $T_{per\ hour}$: 시간당 총 운행 시간 (단위: 시간, h)
- T_{total} : 전체 차량의 총 운행 시간 (단위: h)
- H : 총 연간 운영 시간 (단위: 시간, $H=365 \times 24=8760$ h/year)

설명:

- 차량의 연간 총 운행 시간을 기준으로 시간당 평균 운행 시간을 계산한다.
- 연간 총 시간을 8760시간으로 가정하여 나누는 방식으로 모델링됨.
- 이는 연간 단위의 데이터를 시간 단위로 세분화하기 위해 필요하다.

3. 차량 유형별 운행 시간 계산

$$T_{type} = T_{total} \times R_{type}$$

- T_{type} : 특정 차량 유형별 총 운행 시간 (단위: 시간, h)
- T_{total} : 전체 차량의 총 운행 시간 (단위: h)
- R_{type} : 특정 차량 유형의 비율 (비율 값, 예: 0.4)

설명:

- 차량의 종류(휘발유, 전기, 자율주행차 등)에 따라 총 운행 시간을 분리하여 계산합니다.
- 특정 차량 유형의 비율 R_{type} 을 총 운행 시간에 곱하여 계산됩니다.
- 이는 다양한 차량 유형의 에너지 소비 및 탄소 배출 모델링에 필요한 기초 데이터를 제공

■ 향후 활용방향

- 유형별 에너지 소비 분석: 휘발유 차량, 전기차, 자율주행차 등의 운행 시간에 따른 에너지 소비를 계산.
- 탄소 배출 모델링: 각 차량 유형별 탄소 배출량을 구체적으로 추정 가능.
- 교통 효율성 평가: 시간당 운행 시간 데이터를 바탕으로 교통 정체 문제 해결 방안 도출.
- 향후 확장: V, D, Rtype 등 변수의 변화 시나리오를 적용하여 다양한 도입률 및
- 기술 변화에 따른 결과를 시뮬레이션.

나. 차량 유형별 에너지 소비량 계산

1. 휘발유 차량 에너지 소비

$$E_{gasoline} = \frac{v \times T_{gasoline}}{\eta_{gasoline}}$$

- v : 평균 속도 (km/h)
- $T_{gasoline}$: 휘발유 차량의 연간 총 운행 시간 (시간)
- $\eta_{gasoline}$: 휘발유 차량의 연비 (km/L)

설명: 휘발유 차량의 에너지 소비량은 운행 시간과 평균 속도를 곱하여 총 주행거리를 구하고, 이를 연비로 나누어 리터 단위로 환산합니다.

2. 전기차 에너지 소비

$$E_{electric} = \frac{v \times T_{electric}}{\eta_{electric}}$$

- v : 평균 속도 (km/h)
- $T_{electric}$: 전기차의 연간 총 운행 시간 (시간)
- $\eta_{electric}$: 전기차의 전비 (km/kWh)

설명: 전기차의 에너지 소비량은 휘발유 차량과 동일한 방식으로 계산하되, 연비 대신 전비(km/kWh)를 사용하여 전기 소모량(kWh)을 구한다. 이때 전기차란 레벨 4~5자율주행이 적용이 되지 않는 레벨3이하 자율주행을 다 포괄한다.

3. 자율주행차 주행 에너지 소비

$$E_{drive}^{av} = \frac{v \times T_{av}}{\eta_{electric}} \times (1 - k)$$

- T_{av} : 자율주행차의 연간 총 운행 시간 (시간)
- $\eta_{electric}$: 전기차의 전비 (km/kWh)
- k : 에너지 절감율 (자율주행차의 군집 주행 및 최적 경로 선택 효과, 도입률에 따라 달라짐)

상세설명:

- 자율주행차는 군집 주행과 최적 경로 선택 기술로 기존 전기차 대비 에너지 소비량이 줄어든다.
- 절감율 k 를 반영하여 최종 에너지 소비량을 계산.
- k 값은 자율주행차 도입률에 따라 동적으로 변화하며, 도입률이 높아질수록 에너지 절감 효과가 증가

4. 최대 에너지 절감율 k_{\max} ³⁷⁾

$$k_{\max} = \text{군집주행효과}(50\%) + \text{최적경로효과}(7\%) = 27\%$$

○ 군집 주행 효과:

- 자율주행차 간 간격 축소로 공기 저항이 감소하여 연비 또는 전비가 개선됩니다.
- 최대 25%의 에너지 효율성을 달성할 수 있습니다.

○ 최적 경로 효과:³⁸⁾

- 실시간 교통 상황에 따른 경로 최적화 불필요한 주행 거리를 감소시킵니다.

도입률 $x(\%)$ 가 높을 수록 에너지 절감률 k 는 증가 자율주행차 도입률이 50% 이상일 때, 연비 또는 전비가 약 5~7% 향상된다. (혼잡 구간에서 더 향상 높은 효율성)또한 군집 주행은 차량 1대당 연료 소비를 약 8~16% 줄일 수 있다. 이 두 효과가 극대화 된경우 k_{\max} 는 27%에 도달 가능하다고 한다.

다. 자율주행차 추가 에너지 소비량 계산

자율주행차의 추가 에너지 소비량은 아래의 세 가지 주요 요소로 구성됩니다.

- 컴퓨팅 부하 에너지 소비량 E_{compute}
- V2X 통신 에너지 소비량 E_{v2x}
- 데이터센터 에너지 소비량 E_{data}

37) 김남욱, [국가R&D연구보고서] [보고서]자율주행 및 군집주행 기반의 차세대 차량 기술이 교통 흐름 및 에너지 소모에 미치는 영향도를 분석하기 위한 교통 시뮬레이션 해석 플랫폼 개발, 2018, 국토교통부, 한양대학교

38) 한경석, [국가R&D연구보고서] [보고서]자율 주행 자동차의 에너지 소모 최소화를 위한 최적 제어 전략 개발, 2018, 과학기술정보통신부, 경북대학교

1. 컴퓨팅 부하 에너지

$$E_{compute} = P_{compute} \times T_{av}$$

- $E_{compute}$: 자율주행차의 컴퓨팅 부하로 인한 에너지 소비량(kWh)
- $P_{compute}$: 자율주행차 한 대당 컴퓨팅 시스템의 전력 소비량(kW)
- T_{av} : 자율주행차의 총 운행 시간(시간)

설명 : 자율주행차는 고성능 컴퓨팅 시스템이 필요하며, 이는 인공지능 알고리즘, 센서 데이터 처리 등을 수행한다. 컴퓨팅 시스템의 전력 소비량과 운영 시간을 곱하여 전체 에너지 소비량을 계산한다.

2. 차량 내부 V2X 통신 에너지 소비량

$$E_{v2x} = P_{v2x} \times T_{av}$$

- E_{v2x} : V2X 통신으로 인한 에너지 소비량(kWh)
- P_{v2x} : 자율주행차 한 대당 V2X 통신 시스템의 전력 소비량(kW)

설명 : 차량 내부 통신 시스템, 즉 V2X(Vehicle-to-Everything) 통신으로 인해 에너지를 소모하게 되는데 즉 OBU(On-Board Unit)와 같은 통신 시스템의 전력 소비량과 운영 시간을 곱하여 에너지 소비량을 산출하게 된다. 이때 RSU는 차량 외부 도로에 설치되어 있기 때문에 산출식에서 제외한다.

3. 데이터센터 에너지 소비량

$$E_{data} = P_{data} \times T_{av}$$

- E_{data} : 자율주행차의 데이터 처리로 인한 데이터센터 에너지 소비량(kWh)
- P_{data} : 자율주행차 한 대 당 데이터센터의 전력 소비량(kW)

설명: 자율주행차는 클라우드 기반 데이터 처리 및 저장 시스템에 의존하며, 이는 데이터센터의 에너지 소비로 이어진다. 데이터센터에서 차량 데이터를 처리하기 위해 소비되는 에너지를 계산

4. 자율주행차 추가 에너지 소비량 합계

$$E_{additional}^{av} = E_{compute} + E_{V2X} + E_{data}$$

설명: 자율주행차의 컴퓨팅 부하, V2X 통신, 데이터센터 사용으로 인해 발생하는 모든 추가 에너지를 합산하여 추가적인 에너지 소비량을 구합니다. 이는 차량 내 시스템과 외부 인프라로 인해 발생하는 에너지 소비를 모두 포함

시사점: 자율주행차의 추가 에너지 소비는 고성능 AI와 실시간 데이터 처리에 따른 컴퓨팅 시스템의 전력 효율성, 자율주행차 간 실시간 통신을 지원하는 V2X 통신 시스템의 효율성, 그리고 클라우드 및 데이터 처리 인프라의 최적화 여부에 따라 크게 좌우됩니다. 이러한 에너지 소비는 차량 내부 시스템뿐 아니라 외부 인프라와 밀접하게 연관되어 있으므로, 통합적인 에너지 관리 전략과 데이터 최적화 기술의 개발이 필수적이다.

라. RSU(Road Side Unit)에너지 소비량 계산

$$E_{RSU} = P_{RSU} \times N_{RSU} \times H$$

- E_{RSU} : RSU의 총 에너지 소비량 (kWh)
- P_{RSU} : RSU 한 대당 전력 소비량 (kW)
- N_{RSU} : RSU의 총 설치 대수
- H : 연간 총 시간 (시간), (보통 8760시간(365일 × 24시간))

RSU란 무엇인가: RSU는 자율주행차 및 V2X 통신을 지원하기 위해 도로변에 설치되는 통신 장치이다. 차량과 차량, 또는 차량과 인프라 간 데이터를 교환하며 자율주행 생태계의 핵심 역할을 맡음

■ RSU 운영 환경:

- RSU는 자율주행 및 V2X 통신을 실현하기 위한 필수 인프라로, 도시 및 고속도로 등 다양한 환경에서 설치됩니다.

○ 실시간 데이터 전송과 통신 요구가 많아 고성능 하드웨어 및 안정적인 에너지 공급이 필요합니다.

에너지 소비량 계산 방식: RSU의 총 에너지 소비량은 각 RSU의 전력 소비량에 설치된 RSU의 총 대수와 연간 운영 시간을 곱하여 계산합니다. 또한 RSU는 24시간 지속적으로 운영되며, 연간 총 시간은 8760시간으로 설정해야 한다.

RSU의 특징: RSU의 에너지 소비량은 설치 대수 및 운영 시간에 따라 달라지며, 차량 대수와는 직접적인 상관관계가 없기에 자율주행 추가 에너지 산출 식에는 포함하면 안된다.

마. 총 자율주행 운행 소모 에너지 산출 모형 도출

$$E_{total} = \alpha \times (E_{electric} + E_{drive}^{av} + E_{additional}^{av} + E_{RSU}) + \epsilon$$

- E_{total} : 전체 시스템(자율주행 운행)의 총 에너지 소모량 (kWh)
 - α : 효율성 증대 계수 ($0 < \alpha \leq 10$)
 - $E_{electric}$: 전기차의 주행 에너지 총 소비량 (kWh)
 - E_{drive}^{av} : 자율주행차의 주행 총 에너지 소비량 (kWh)
 - $E_{additional}^{av}$: 자율주행차의 추가 에너지 소비량 (kWh)
 - E_{RSU} : RSU(Road Side Unit)의 총 에너지 소비량 (kWh)
 - ϵ : 오차항 (kWh) $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$: 평균 0, 분산 σ^2 인 정규분포를 따름. 모델의 불확실성과 잡음을 고려하는 부분.
- 효율성 증대 계수 α , 오차항 ϵ 를 도입해서 에너지 소비량 변화, 불확실성을 모형 설계에 반영

■ <효율성 증대 계수 α >

효율성 증대 계수 α 는 기술 발전과 시스템 최적화를 반영하여 자율주행차 시스템의 에너지 소비량 변화를 나타내는 변수이다. α 는 시스템 내 모든 구성 요소의 효율성을 종합적으로 반영하며, 각 요소(전기차, 자율주행차, 추가 에너지 소비, RSU 등)에서의 기술 발전 효과와 부하 증가를 통합적으로

포함한다. 이 연구에서는 모든 시스템 구성 요소에서의 효율성 증대와 부하 증가를 통합적으로 고려하여 단일 계수 α 로 표현한다.

- ex1) $\alpha=1$: 효율성 변화 없음.
- ex2) $\alpha=0.8$: 에너지 소비량이 20% 감소된 경우.

■ 제번스의 역설(Jevons Paradox)의 반영

■ 무어의 법칙에 따라 반도체 효율성이 지속적으로 증가하지만, 에너지 사용량은 데이터 처리량과 반도체 수요 증가에 따른 작업량 증가로 인해 오히려 증가할 수 있습니다. 이 연구에서는 제번스의 역설을 고려하여 α 에도 이러한 상쇄 효과를 포함하였습니다.

- 효율성 증가 요소:
 - 반도체 기술 발전: 무어의 법칙에 따라 약 2년마다 성능이 두 배로 증가하며, 단위 작업당 에너지 소비량 감소
 - 네트워크 최적화: V2X 통신 시스템에서 효율적인 데이터 처리 및 전송 기술 도입.
 - 데이터센터 개선: 고성능 AI 알고리즘과 데이터 처리 시스템의 최적화로 단위 작업당 에너지 소비 절감.
- 부하 증가 요소:
 - 반도체 성능 향상으로 데이터 처리량 증가: 더 복잡한 알고리즘, 실시간 센서 데이터 분석 등으로 컴퓨팅 부하 증가.
 - V2X 통신량 증가: 자율주행차 보급률 상승에 따른 실시간 통신 요구 증가.
 - 데이터센터 부하: 클라우드 기반 자율주행 인프라가 필요로 하는 데이터 저장 및 처리량 확대.
- 효율성 증대와 부하 증가의 균형:
 - 기술 발전으로 단위 작업당 에너지 소비는 감소하나, 총 작업량 증대로 인해 에너지 소비가 감소하지 않을 가능성을 α 에 내포한다. 즉 α 는 단순히 효율성 증대만을 나타내는 것이 아니라, 기술 발전과 부하 증가의 상쇄 효과를 종합적으로 반영 즉 무어의 효과로 성능이 2배 증가할 때 마다 에너지 효율이 2배 좋아지는 것이 아니라 부하 증가로 인해 효과가 상쇄되어 α 에 투영된다.

■ 효율성 증대 계수의 통합적 적용

이 연구에서는 α 를 단일 계수로 사용하여 효율성 증가와 부하 증가를 모두 반영하였습니다. 이는 개별 요소별로 효율성 증대 및 부하 증가를 분리하여 모델링하는 대신, 전체 시스템의 변화량을 하나의 계수로 통합한 접근 방식입니다. 통합 적용했을 때 장점으로는 연구의 범위 내에서 단순하고 통합적인 모델링이 가능하고 시스템 내 모든 구성 요소의 상호작용을 하나의 변수로 반영하여 계산의 복잡성을 줄인다는 장점이 있습니다. 다만 구성 요소별로 효율성 증대와 부하 증가를 개별적으로 분석하지 않으므로, 특정 요소에서의 변화가 전체에 미치는 영향을 분리하기 어렵다는 문제가 있습니다. 예를 들어, 반도체 기술 발전으로 데이터센터 효율성이 향상되더라도, 통신 인프라의 부하 증가는 정확히 반영되지 않을 수 있습니다.

■ <오차항 (ϵ)>

오차항 ϵ 은 모델의 불확실성을 반영하는 변수로, 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따릅니다 $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$. 이는 데이터의 잡음이나 예측되지 않은 변수의 영향을 포함하여 실제 데이터와의 차이를 설명하는 데 사용됩니다. 평균이 0인 점에서 체계적인 편향을 추가하지 않으며, 오차의 분포는 분산 σ^2 에 의해 결정됩니다. 이를 통해 모델의 신뢰성과 현실성을 높이고, 다양한 환경에서의 적용 가능성을 확보할 수 있습니다.

■ $E_{total} = \alpha \times (E_{electric} + E_{drive}^{av} + E_{additional}^{av} + E_{RSU}) + \epsilon$ 설계에 대한 이유

자율주행차 운행 시스템의 총 에너지 소비량을 정확히 추정하고, 기술 발전 및 시스템 최적화가 에너지 소비에 미치는 영향을 통합적으로 반영하기 위해

$E_{total} = \alpha \times (E_{electric} + E_{drive}^{av} + E_{additional}^{av} + E_{RSU}) + \epsilon$ 이렇게 식을 설계했다. 자율주행차 운행은 단순히 차량의 효율성만을 개선하는 것이 아니라, V2X 통신, 데이터센터, RSU(Road Side Unit) 등 외부 인프라와 연계된 복합 시스템입니다. 또한 모델에서 $E_{electric}$ 는 자율주행 기술이 적용되지 않은 전기차의 기본 에너지 소비량을 나타냅니다. 이를 포함한 이유는 자율주행 기술 도입 전후의 에너지 소비량 변화를 비교하고, 기술 레벨에 따른 에너지 효율성과 부하를 평가하기 위함이다. 특히, 자율주행 기술이 레벨 2~3인 경우 기본 전기차와 에너지 소비량의 차이가 제한적일 수 있기에 이를 그냥 $E_{electric}$ 과 동일하게 하고 이를 에너지 소모량에 반영하기로 이 연구에서는 정했다. 레벨 4~5로 발전하면서

자율주행 기술로 인한 에너지 부하와 효율성 개선 효과가 두드러지게 나타날 것으로 기대되기에 $E_{electric}$ 을 포함함으로써 이처럼 기술 레벨 발전에 따른 에너지 소비량의 차이,변화를 모델에 반영하기 위해 $E_{electric}$ 을 모델에 포함시켰고 효율성계수, 오차항을 넣어서 모델의 불확실성,효율 변화를 반영한 모형을 설계하는등 여러 변수가 존재하기에 모델을 최대한 유연하게 설계하려고 노력하였다.

바. 자율주행 운행 시스템 탄소 배출 모형

$$C_{av}^{electric} = \alpha \times (E_{electric} + E_{drive}^{av} + E_{additional}^{av} + E_{RSU}) \times \omega_{electric} + \epsilon$$

- $C_{av}^{electric}$: 자율주행 전기차의 총 탄소 배출량 (kg CO₂).
- $\omega_{electric}$: 1kWh당 탄소 배출 계수 (0.488 kg CO₂ /kWh).

즉 나머지 식은 총 자율주행 운행 소모 에너지 E_{Total} 과 같은데 거기서 탄소 배출 계수를 곱해서 총 탄소 배출량을 계산했다.

사. 자율주행 운행 시스템+ 가솔린차의 탄소 배출 모형

$$C_{av}^{gasoline} = E_{gasoline} \times \omega_{gasoline} + \alpha \times (E_{drive}^{av} + E_{additional}^{av} + E_{RSU}) \times \omega_{electric} + \epsilon$$

- $C_{av}^{gasoline}$: 자율주행 가솔린차의 총 탄소 배출량 (kg CO₂).
- $\omega_{gasoline}$: 휘발유 1리터당 탄소 배출 계수 (2.3 kg CO₂ /L).
- α, ϵ : 효율성 증대 계수 및 오차항 (위와 동일).

아. 설계 이유

탄소 배출 계수 (ω) 도입의 필요성

탄소 배출 계수 ω 를 도입함으로써 에너지 소비와 탄소 배출 간의 관계를 명확히 수량화할 수 있다..

이를 통해 전기차와 가솔린 차량의 에너지 사용 특성을 구분하고, 각 에너지원에서 발생하는 탄소 배출량의 차이를 효과적으로 반영할 수 있다.

○ 전기차: $\omega_{electric}$ 을 사용하여 전력 생산 과정에서의 간접 탄소 배출을 반영.

○ 가솔린 차량: $\omega_{gasoline}$ 을 사용하여 화석 연료 연소로 인한 직접 탄소 배출을 포함.

이 방식은 두 에너지원의 환경적 영향을 직관적으로 평가할 수 있도록 지원합니다.

전기차와 가솔린 차량의 구분

$\omega_{electric}$, $\omega_{gasoline}$ 을 별도로 설정하여 전기차와 가솔린 차량의 에너지 사용 방식 및 탄소 배출 특성을 명확히 구분합니다.

○ 전기차: 간접 탄소 배출(전력 생산 과정에서 발생).

○ 가솔린 차량: 직접 탄소 배출(연료 연소 과정에서 발생).

이를 통해 각 차량 유형의 탄소 배출량을 비교하고, 환경적 영향을 분석할 수 있는 기반을 제공

즉 탄소 배출 계수 ω 를 도입함으로써, 자율주행 차량의 탄소 배출 특성을 체계적으로 분석할 수 있게 됐다. 자율주행 전기차와 자율주행 + 가솔린 차량의 탄소 배출 모형을 별도로 설계함으로써 각 차량 유형의 환경적 영향을 세부적으로 평가할 수 있다. 전과 마찬가지로, α, ϵ 등 효율성 계수, 오차항을 포함시켜서 기술 발전에 따른 효율성 개선 효과와 컴퓨팅 및 통신 부하 증가를 종합적으로 반영하여, 자율주행 기술 도입이 환경에 미치는 영향을 보다 정교하게 분석할 수 있습니다. 이 통합적 접근은 자율주행 기술의 지속 가능성을 평가하고, 최적의 운영 전략을 수립하는 데 중요한 기초 정보를 제공할 것이다.

3. 자율주행 운행 에너지 소모, 탄소 배출 시뮬레이션 개발

이제 에너지 소모, 탄소 배출량 모형을 설계했기에 이를 바탕으로 python을 이용해 시뮬레이션을 개발했다.

가. 파이썬 기반 시뮬레이션 설계 및 흐름 분석

이 시뮬레이션은 자율주행 기술의 도입에 따른 에너지 소비와 탄소 배출량의 변화를 분석하기 위해 설계되었습니다. 주된 접근법은 몬테카를로(Monte Carlo) 방법론으로, 다양한 불확실성을 포함한

시나리오 기반 분석을 통해 결과를 정량적으로 예측합니다. 아래는 전체 시뮬레이션 설계와 작동 방식, 결과 분석 및 인사이트 제공 방식에 대한 체계적 정리입니다.

1. 시뮬레이션 디렉토리 구조

```
simulation_project/
├── main.py
├── config.yaml
├── models/
│   ├── __init__.py
│   ├── energy_model.py
│   └── vehicle_model.py
├── utils/
│   ├── __init__.py
│   ├── config_loader.py
│   └── visualization.py
├── results/
│   └── (시뮬레이션 결과와 그래프 저장)
├── figure/
│   └── (생성된 그래프 저장)
└── simulation_results.csv
```

<그림 1> 디렉토리 구조

시뮬레이션 설계는 명확한 모듈화(Modularization)를 통해 디렉토리가 다음과 같이 구성되어 있습니다.

- **main.py:**

- 시뮬레이션 실행의 중심 스크립트
- 구성 파일 로드, 시나리오 생성, 시뮬레이션 실행 및 결과 집계, 시각화를 수행.

- **config.yaml:**

- 시뮬레이션 전반에 필요한 매개변수 및 설정 정보
- 차량 비율, 연료 효율성, 탄소 배출 계수, 자율주행 기술 도입률, 에너지 절감 효과 등을 정의.

- **models/vehicle_model.py:**

- 개별 차량 유형의 에너지 소비 및 탄소 배출 계산을 정의.
- 자율주행차, 전기차, 휘발유차의 소비 모델링을 담당.

- `models/energy_model.py`:

- 전반적인 에너지 소비량 및 탄소 배출량 계산.
- RSU(Road-Side Unit) 에너지 소비량 포함.

- `utils/config_loader.py`:

- `config.yaml`에서 설정을 로드하여 Python 객체로 변환.

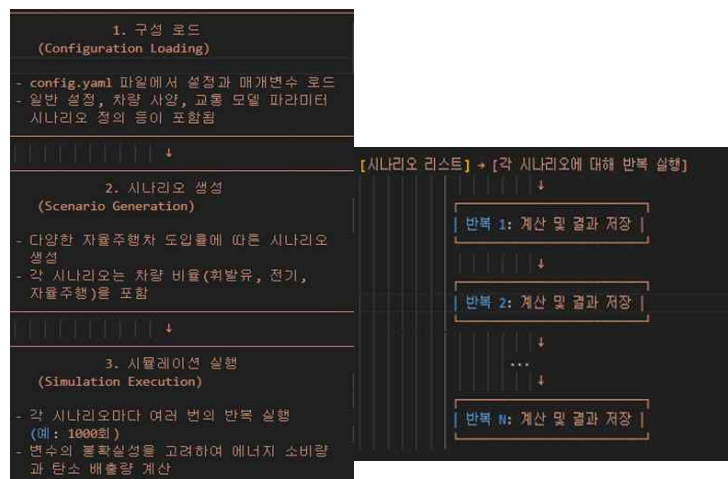
- `utils/visualization.py`:

- 시뮬레이션 결과의 시각화를 담당.
- 에너지 소비, 탄소 배출량, 평균 속도 등을 그래프로 생성.

- `results/` 및 `figure/` 디렉토리:

- 시뮬레이션 결과 데이터를 CSV 파일로 저장(`results/`).
- 생성된 시각화 그래프를 저장(`figure/`).

2. 시뮬레이션 흐름



〈그림 2〉 시뮬레이션 흐름

1) 구성 로드 (Configuration Loading)

● 설명:

- config.yaml에서 시뮬레이션에 필요한 설정을 로드합니다.
- 설정 파일은 차량 비율, 에너지 효율성, 탄소 배출 계수, 자율주행 도입률 등 전반적인 시뮬레이션 전제 조건을 정의합니다.

● 특징:

- 불확실성 모델링: 연비, 탄소 배출 계수 등은 정규분포로 모델링되어 변동성을 반영.
- 효율성 계수 α : 기술 발전에 따른 에너지 절감을 가정.

2) 시나리오 생성 (Scenario Generation)

● 설명:

- 자율주행 기술 도입률(0% ~ 100%)과 에너지 절감 효과(군집 주행, 최적 경로 탐색) 조합으로 다양한 시나리오를 생성.

● 특징:

- 시나리오별로 차량 비율(휘발유, 전기, 자율주행)**이 동적으로 계산.
- 몬테카를로 방식으로 시나리오별 여러 조합의 반복 실행이 가능.

3) 시뮬레이션 실행 (Simulation Execution)

● 설명:

- 각 시나리오에서 차량의 에너지 소비 및 탄소 배출량을 계산.
- 자율주행 기술 도입에 따른 속도 증가, 총 운행 시간 감소, 에너지 절감 효과를 반영.

● 프로세스:

- 전기차 에너지 소비: 전기 연비와 평균 속도를 사용하여 소비량 계산.
- 자율주행 에너지 소비: 주행 에너지 외에도 컴퓨팅, V2X 통신, 데이터센터 소비량 추가.
- RSU 에너지 소비: 연간 운영 시간과 RSU 전력을 반영하여 계산.

4) 결과 집계 및 저장 (Results Aggregation)

● 설명:

- 모든 시뮬레이션 결과를 집계하여 시나리오별 평균값 및 신뢰구간(5%~95%)을 계산.
- 결과는 simulation_results.csv에 저장.

● 포함 결과:

- 총 에너지 소비량 (전기 및 휘발유별).
- 탄소 배출량 (전기 및 휘발유별).
- 평균 속도, 총 운행 시간.
- 자율주행 추가 에너지 소비 구성(컴퓨팅, V2X, 데이터센터).

5) 데이터 시각화 (Visualization)

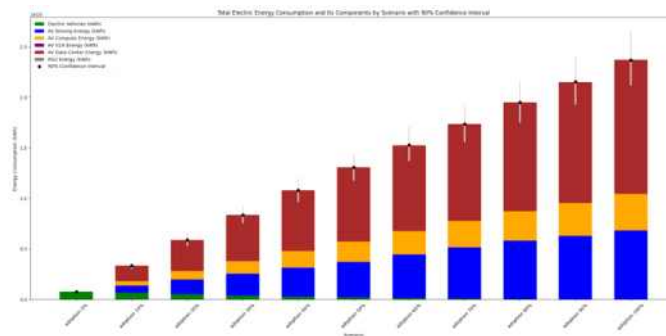
● 설명:

- 시나리오별 결과를 그래프로 생성하여 에너지 소비 변화, 탄소 배출량 비교, 평균 속도 변화를 시각화해줌.

● 생성 그래프:

- 총 에너지 소비량 그래프: 차량 유형별 에너지 소비량 구성.
- 탄소 배출량 그래프: 전기차와 휘발유차의 배출량 비교.
- 평균 속도 변화 그래프: 자율주행 도입률에 따른 변화.
- 추가 에너지 소비 구성: 컴퓨팅, V2X, 데이터센터 에너지 소비 비중.

ex)



<그림 3> 시각화 예시

나. 시뮬레이션의 의의

이 시뮬레이션은 전에 만들었던 에너지 모형들을 python으로 구현하여 자율주행 기술 도입이 에너지 소비와 탄소 배출에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있도록 설계되었습니다. 특히 자율주행 기술의 도입률, 군집 주행(clustering)과 최적 경로 탐색(optimal routing) 같은 기술적 요인을 고려하여, 다양한 시나리오에서의 환경적 효과를 수치화할 수 있습니다.

1. 기술 도입의 환경적 영향 평가

- 자율주행 기술이 에너지 소비와 탄소 배출을 얼마나 줄일 수 있는지, 그 효과를 객관적으로 수량화할 수 있었다.
- 군집 주행과 최적 경로 탐색 등 자율주행 기술의 세부적인 구성 요소가 환경적 성과에 미치는 기여도를 독립적으로 분석하여, 기술 개발 및 정책 결정에 실질적인 인사이트를 제공

2. 불확실성 반영

- 연비, 탄소 배출 계수, 컴퓨팅 파워 등 다양한 변수의 불확실성을 정규분포 기반의 확률적 접근으로 모델링하여, 현실적인 결과를 도출,민감도 분석을 통해 주요 변수의 변화가 결과에 미치는 영향을 평가하여, 정책적, 기술적 우선순위를 설정할 수 있다.

3. 현 실적과 비교

- 현재 서울의 에너지 소비 및 탄소 배출량 데이터를 기반으로 시뮬레이션 결과와 비교 분석하여, 정책 목표 달성을 위한 기준점과 가이드를 제공한다.

4. 정책 및 기술적 의사결정 지원

- 자율주행 기술의 확산이 환경에 미치는 긍정적/부정적 효과를 종합적으로 평가하여, 정책 수립 및 기술 개발 방향성 설정에 기여할 수 있다.

다. 시뮬레이션의 한계

1. 모델의 단순화

- 군집 주행, 최적 경로 탐색, 자율주행차의 컴퓨팅 부하 등이 단일 변수로 모델링되며, 실제 환경에서의 복잡한 상호작용을 완전히 반영하기는 어렵습니다.
- 자율주행 기술의 사회적, 경제적, 안전성 측면의 영향을 반영하지 않고, 에너지 소비와 탄소 배출만을 평가하는 점에서 한계가 있습니다.

2. 미래 기술 발전 반영의 어려움

- 자율주행 기술, 전기차 배터리 효율, 데이터센터 에너지 절감 기술 등은 빠르게 발전하고 있지만, 이를 정확히 예측하여 모델에 반영하는 데 한계가 있습니다.
- 예를 들어, 효율성 계수(α)와 같은 변수는 일정한 비율로 설정되지만, 실제 기술 발전은 비선형적으로 이루어질 가능성이 큼니다.

이렇듯이 아직 시뮬레이션이 모델의 단순,미래 변동성 때문에 완전히 개발이 완료된 상태가 아니기에 현실과 비슷하게 계속 개선하기 위해 코드를 개선 중에 있다.



〈그림 4〉 사용 코드문

위의 코드 사진들은 실제로 시뮬레이션을 할때 사용되었던 코드들이다.

[urbanking/AV_energy_consumption_predictmodel-](#) 실제로 이 연구에서 시뮬레이션이 어떻게 진행되었는지 세밀하게 확인하고자 한다면 위에 제시한 github 링크에 들어가면 연구에서 설계한 시뮬레이션 python 코드가 open source로 공개되어 있기에 자유롭게 이용하면 된다.



V 연구 결과



1. 평균 속도
2. 전력 소비량
3. 탄소 배출량
4. 소결

V 연구 결과

본 연구는 자율주행자동차의 도입률에 따른 에너지 소비와 탄소 배출에 미치는 영향을 분석하기 위해 시뮬레이션 기반 연구를 수행하였다. 자율주행자동차, 비자율주행 전기자동차, 그리고 가솔린 차량의 비율을 90:1:9로 유지한 시나리오를 통해 도입률 증가에 따른 에너지 소비와 환경적 영향을 평가하였다.

연구 결과, 자율주행자동차의 도입률이 증가함에 따라 총 에너지 소비량이 증가하였으며, 특히 데이터센터와 컴퓨팅 에너지가 주요 에너지 소비 요인으로 확인되었다. 자율주행자동차의 도입률이 100%에 도달했을 때, 총 에너지 소비량은 약 23,000GWh로 추산되었으며, 데이터센터의 에너지 소비 비중이 가장 높은 것으로 나타났다. 반면, V2X 통신에 따른 에너지 소비 비중은 상대적으로 미미하였다.

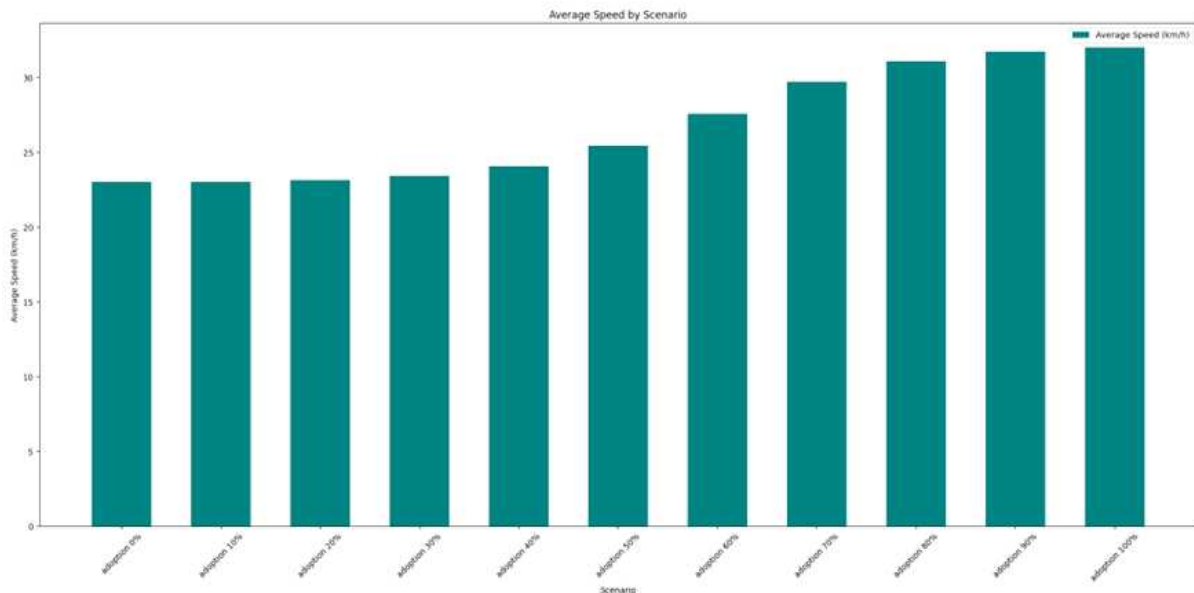
탄소 배출량 분석에서는 전기자동차의 비율 증가로 인해 가솔린 차량의 배출량은 감소하였으나, 자율주행자동차의 도입률이 증가함에 따라 전체 탄소 배출량은 오히려 증가하는 양상을 보였다. 특히, 도입률 60~70%에서 탄소 배출량이 최대치를 기록하며, 자율주행 기술의 도입이 단순히 탄소 배출량 감소로 이어지지 않았다.

Scenario (%)	평균 속도 (km/h)	총 운행 시간 (시간)	총 에너지 소비량 (kWh)	탄소 배출량 (kg CO ₂)
0	23.02	1,677,579,501	780,975,726.9	312,390,290.8
10	23.06	1,676,168,026	3,366,804,587	1,346,721,835
20	23.17	1,672,414,181	5,903,495,465	2,361,398,186
30	23.44	1,662,785,081	8,373,132,122	3,349,252,849
40	24.1	1,640,215,546	10,816,766,047	4,326,706,419
50	25.47	1,596,898,553	13,072,397,701	5,228,959,080
60	27.6	1,538,541,304	15,304,349,831	6,121,739,933
70	29.73	1,488,530,511	17,353,325,487	6,941,330,195
80	31.1	1,459,771,280	19,502,881,235	7,801,152,494
90	31.76	1,446,870,047	21,535,081,200	8,614,032,480
100	32.03	1,441,732,366	23,686,037,548	9,474,415,019

〈표 5〉 연구결과

1. 평균 속도

본 연구에서는 자율주행자동차 도입률이 평균 속도에 미치는 영향을 분석하기 위해 시뮬레이션을 진행하였으며, 이 과정에서 평균 속도를 실험자가 조절하는 변수(Control Variable, CV)로 설정하였다. 평균 속도는 자율주행자동차의 도입률 변화에 따라 로지스틱 모형(Logistic Model)을 적용하여 시나리오별 변화를 모의하였다. 이는 자율주행 기술의 도입이 도로의 효율성과 교통 흐름 개선에 기여한다는 기존 가정을 기반으로 하였다.



<그림 5> 평균속도 그래프

<그림 5>는 자율주행자동차 도입률(0%~100%)에 따른 평균 속도의 변화를 나타낸다. 도입률이 0%일 때 평균 속도는 약 23km/h에서 시작하며, 도입률이 증가함에 따라 평균 속도가 점진적으로 상승하여 도입률 100%일 때 약 30km/h에 도달하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 자율주행 기술이 교통 흐름의 효율성을 증대시키는 데 긍정적인 영향을 미칠 가능성을 보여준다.

특히, 도입률이 낮은 초기 단계(0%~30%)에서는 평균 속도의 증가 폭이 완만하였으나, 도입률이 중간 이상(50% 이상)에 도달하면서 평균 속도가 더 빠르게 상승하는 양상을 나타냈다. 이는

자율주행자동차가 일정 비율 이상 도입되었을 때, 차량 간 통신(V2X)과 경로 최적화 기술이 도로 네트워크의 효율성을 극대화하는 데 기여할 수 있음을 의미한다.

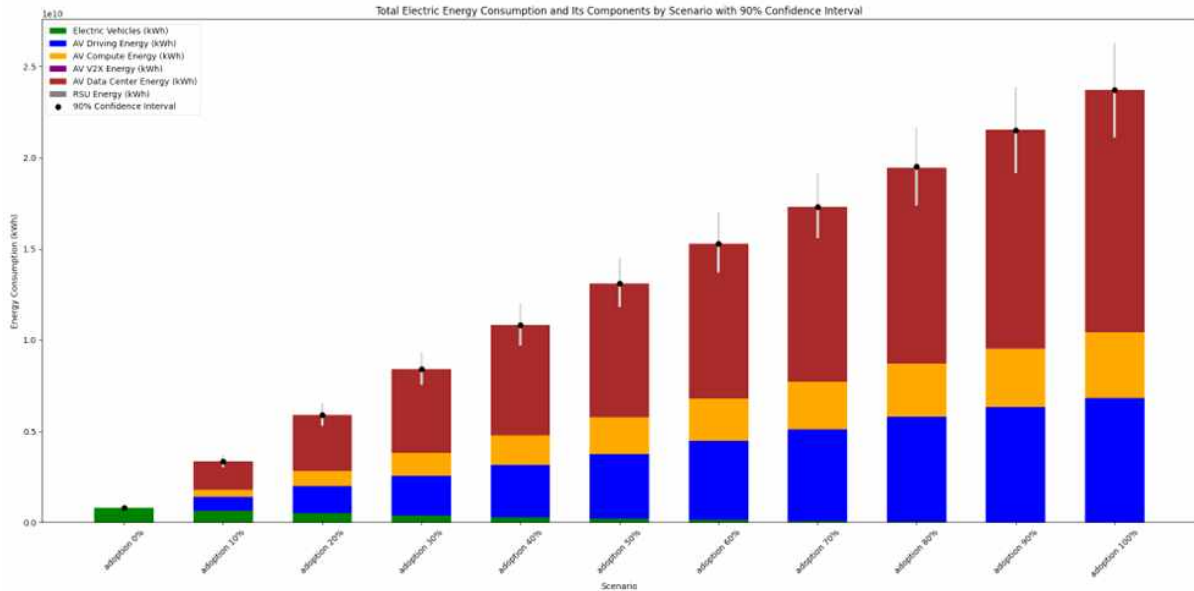
또한, 자율주행자동차의 도입으로 평균 속도가 증가하면, 도로 혼잡이 감소하고 정체 구간이 줄어들어 효과를 가져올 수 있다. 이는 차량의 에너지 소비 효율성을 개선하는 데에도 영향을 미치며, 주행 시간 단축 및 연료 또는 전력 소모 감소로 이어질 가능성을 높인다.

결론적으로, 본 연구에서 자율주행자동차 도입률에 따라 설정한 로지스틱 모형을 통해, 평균 속도가 채택률 증가에 따라 증가하는 양상을 명확히 확인하였다. 이러한 결과는 자율주행 기술이 교통 체계 개선 및 에너지 소비 최적화에 중요한 역할을 할 수 있음을 나타낸다.

2. 전력 소비량

가. 총에너지 구성 변화

본 연구는 자율주행자동차 도입률 증가에 따른 총 에너지 소비 구성의 변화를 분석하기 위해 다양한 에너지 소비 항목을 시뮬레이션하였다. 에너지 소비는 전기자동차(비자율주행), 자율주행 주행 에너지, 자율주행 컴퓨팅 에너지, V2X 통신 에너지, 데이터센터 에너지 등으로 세분화하였으며, 각각의 비중과 총합을 도입률 변화에 따라 평가하였다.



〈그림 6〉 총에너지 구성 변화 그래프

〈그림 6〉는 자율주행자동차 도입률(0%~100%)에 따른 총 에너지 소비 구성의 변화를 보여준다. 초기(도입률 0%)에는 전기자동차의 에너지 소비가 대부분을 차지하며, 이는 비자율주행 전기자동차가 주요 에너지 소비 주체임을 나타낸다. 그러나 도입률이 증가함에 따라 자율주행 주행 에너지 및 자율주행 관련 에너지(V2X 통신, 컴퓨팅, 데이터센터) 소비가 점차 증가하며, 자율주행 에너지가 전체 에너지 소비에서 차지하는 비중이 점진적으로 확대된다.

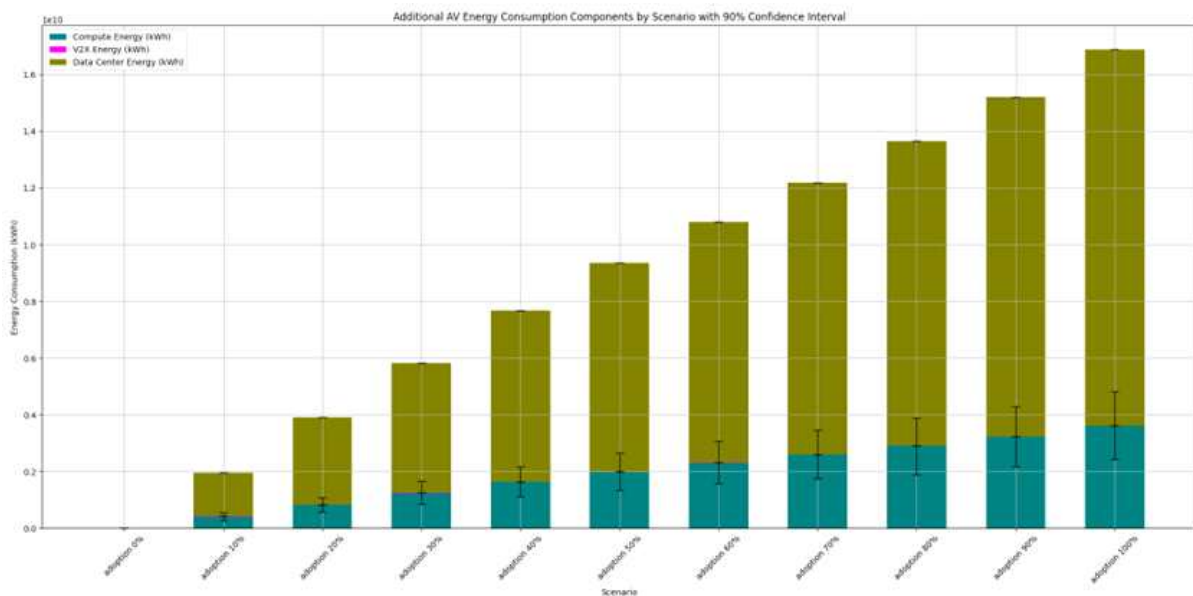
특히, 자율주행 기술의 채택률이 50% 이상으로 상승함에 따라 데이터센터 에너지 소비가 전체 에너지 소비에서 가장 큰 비중을 차지하는 경향이 나타났다. 이는 자율주행자동차의 운영 과정에서 차량 내 컴퓨팅과 데이터센터 간의 데이터 처리 및 저장 작업이 막대한 전력을 요구한다는 점을 시사한다. 데이터센터 에너지는 채택률이 100%에 도달했을 때 총 에너지 소비의 가장 큰 부분을 구성하며, 자율주행 주행 에너지와 자율주행 컴퓨팅 에너지가 그 뒤를 이었다.

반면, V2X 통신 에너지와 RSU 관련 에너지 소비는 상대적으로 미미한 수준으로 확인되었다. 이는 통신 과정에서 발생하는 에너지 소비가 자율주행차량 및 데이터센터의 주요 에너지 소비 항목과 비교하여 현저히 낮다는 것을 보여준다.

자율주행 운행 시스템의 총 에너지 소비량은 자율주행자동차의 도입률이 증가함에 따라 지속적으로 증가하며, 도입률 100%에서는 약 23,000GWh에 도달하였다. 이러한 결과는 자율주행자동차의 도입이

도시 에너지 소비 구조를 크게 변화시키고, 데이터센터와 컴퓨팅 에너지가 에너지 소비의 핵심 요인으로 자리잡을 가능성을 보여준다.

나. 자율 주행차 추가 에너지 구성



〈그림 7〉 자율주행차 추가 에너지 구성 그래프

〈그림 7〉은 자율주행자동차 도입률 증가에 따라 컴퓨팅 에너지, V2X 통신 에너지, 데이터센터 에너지의 소비 구성을 분석하였다. 이는 자율주행 기술이 추가적으로 요구하는 에너지 소비 패턴을 구체적으로 파악하고, 자율주행 기술 도입이 도시 에너지 소비 구조에 미치는 영향을 평가하기 위함이다.

분석 결과, 자율주행자동차 도입률이 증가함에 따라 모든 추가 에너지 소비 항목의 소비량이 점차 증가하는 추세를 보였다. 특히, 데이터센터와 컴퓨팅 에너지가 주요 에너지 소비 항목으로 나타났다.

먼저, 데이터센터 에너지는 도입률 증가에 따라 가장 큰 비중으로 증가하였다. 데이터센터는 자율주행자동차가 생성한 데이터를 저장, 처리, 그리고 학습 모델을 훈련하는 데 필요한 주요 인프라로, 도입률 100%에서는 전체 추가 에너지 소비의 대부분을 차지하였다. 이는 자율주행 기술 도입이 데이터센터의 에너지 요구량을 크게 증가시킬 수 있음을 의미한다.

다음으로, 컴퓨팅 에너지는 자율주행차량 내부에서 자율주행 스택(객체 인식, 경로 계획 등)을 실행하기 위해 소모되는 에너지로, 도입률이 증가함에 따라 점진적으로 상승하였다. 도입률 50%를 넘어서면서 컴퓨팅 에너지가 데이터센터 에너지와 함께 주요 에너지 소비 항목으로 자리 잡는 모습을 보였다. 이는 차량 내부에서의 연산 부하가 자율주행 기술의 핵심 에너지 요구 사항 중 하나임을 시사한다.

반면, V2X 통신 에너지는 자율주행자동차 간 또는 차량-인프라 간 통신을 지원하기 위해 소모되는 에너지로, 도입률 증가에 따라 약간의 상승세를 보였으나, 전체 에너지 소비에서 차지하는 비중은 매우 작았다. 이는 V2X 통신 기술이 상대적으로 에너지 효율적임을 나타내며, 자율주행 기술의 통신 인프라가 에너지 소비에 큰 부담을 주지 않을 가능성을 시사한다.

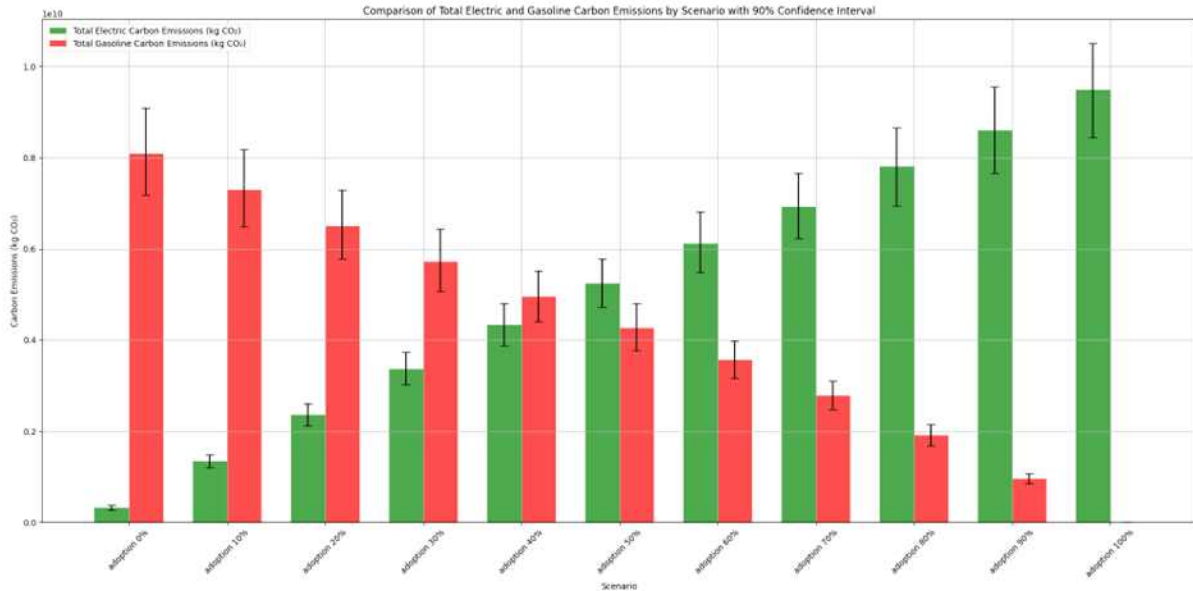
총 에너지 소비량은 도입률 100%에 도달했을 때 약 16,000GWh에 달했으며, 이 중 데이터센터와 컴퓨팅 에너지가 대부분을 차지하였다. 이는 자율주행 기술의 도입이 교통 효율성 개선뿐만 아니라 추가적인 에너지 소비를 동반한다는 점을 보여준다. 특히, 데이터센터는 자율주행 기술의 에너지 소비에서 가장 큰 비중을 차지하며, 데이터 처리와 저장에 요구되는 에너지가 향후 에너지 효율 개선의 중요한 과제로 떠오를 가능성을 시사한다.

결론적으로, 자율주행자동차 도입률 증가에 따라 데이터센터와 컴퓨팅 에너지가 에너지 소비의 핵심 항목으로 자리잡았으며, 이는 자율주행 기술이 단순한 교통 효율성 향상 이상의 영향을 미친다는 점을 보여준다. 특히, 데이터센터의 에너지 효율성 개선과 컴퓨팅 기술의 최적화는 자율주행 기술의 지속 가능성을 확보하기 위한 핵심 과제가 될 것이다. 한편, V2X 통신 에너지는 상대적으로 적은 비중을 보이며, 에너지 효율성이 높은 기술로 평가되었다.

3. 탄소 배출량

가. 전기차와 휘발유차의 탄소 배출량 비교

본 연구에서는 자율주행자동차 도입률 증가에 따라 전기차와 휘발유 차량의 탄소배출량 변화를 비교 분석하였다. 이를 통해 자율주행자동차 도입이 교통 부문 탄소배출량에 미치는 영향을 파악하고, 도입률 변화에 따른 배출량의 구성 변화를 명확히 하고자 하였다.



〈그림 8〉 전기차와 휘발유차 탄소 배출량 비교 그래프

도입률 0%의 초기 단계에서는 전기차의 탄소배출량이 미미한 수준으로 나타났으며, 대부분의 탄소배출량은 휘발유 차량에서 발생하였다. 이는 기존 교통 시스템에서 휘발유 차량이 주요 배출원으로 작용함을 보여준다. 그러나 자율주행자동차 도입률이 증가함에 따라 전기차의 탄소배출량은 점차 증가하고, 휘발유 차량의 배출량은 급격히 감소하는 추세를 보였다.

특히, 자율주행 전기차의 채택률이 높아질수록 기존 휘발유 차량이 감소하면서, 전체 교통 시스템에서 휘발유 차량의 탄소배출 기여도가 현저히 줄어드는 결과를 나타냈다. 도입률 50%를 넘어서는 단계에서는 전기차의 배출량이 휘발유 차량의 배출량을 초과하는 변곡점이 관찰되었으며, 도입률 100%에서는 대부분의 탄소배출량이 전기차에서 발생하는 양상을 보였다.

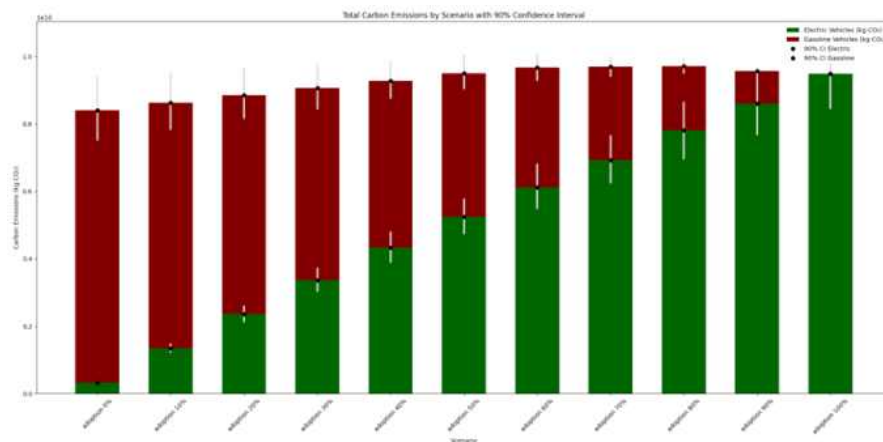
또한, 자율주행자동차와 비자율주행 전기차의 배출량은 도입률 증가에 따라 지속적으로 증가하였는데, 이는 자율주행 기술의 도입이 차량 자체의 배출량 감소를 도모하는 한편, 추가 에너지 소비(예: 데이터센터 및 컴퓨팅 에너지)로 인해 배출량이 증가할 수 있음을 시사한다. 이는 자율주행 기술 도입이 교통 효율성을 높이는 동시에, 에너지 소비 구조를 변화시켜 환경적 부담이 증가할 가능성을 반영한 결과로 해석된다.

결론적으로, 자율주행 전기차의 채택이 증가함에 따라 휘발유 차량의 배출량은 감소하였으나, 자율주행 기술 도입으로 인한 추가적인 전력 소비가 탄소배출량 증가에 기여하는 결과를 나타냈다.

이러한 결과는 자율주행 기술의 지속 가능성을 확보하기 위해 에너지 효율 향상과 저탄소 전력망 구축이 필수적임을 강조한다.

나. 시나리오별 총 탄소 배출량

본 연구는 자율주행자동차 도입률 증가가 교통 부문의 탄소배출량 총합에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 도입률 변화에 따른 탄소배출량의 추이를 파악하고, 자율주행자동차 도입이 환경적 영향을 어떻게 변화시키는지 평가하고자 하였다.



〈그림 9〉 시나리오별 총 탄소 배출량 그래프

분석 결과, 도입률 0% 단계에서는 대부분의 탄소배출량이 휘발유 차량에서 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 자율주행자동차 도입률이 증가함에 따라 전기자동차(비자율주행 포함)와 자율주행차량의 배출량이 점진적으로 증가하는 양상을 보였다. 특히 도입률 20% 이후부터 전기차와 자율주행차량의 배출량이 본격적으로 증가하기 시작하였으며, 휘발유 차량의 배출량은 이에 반비례하여 급격히 감소하였다. 이는 자율주행차량 도입이 기존 휘발유 차량의 교체를 촉진하며, 휘발유 차량의 배출 비중을 낮추는 효과를 나타냄을 의미한다.

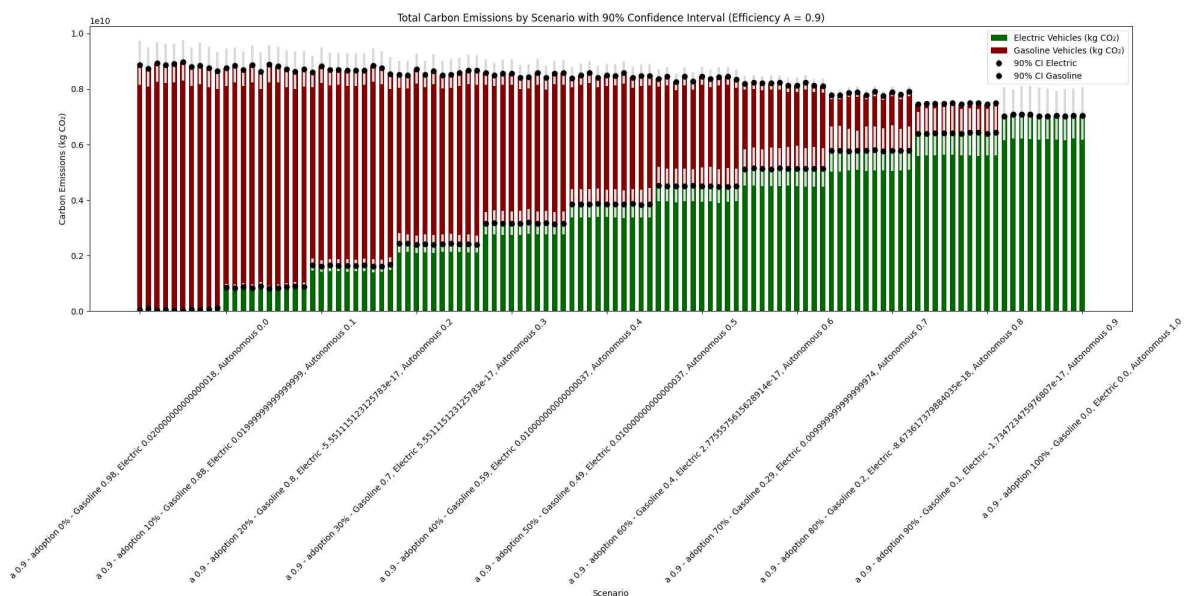
그러나 도입률 60%까지 증가함에 따라 탄소배출량의 총합은 꾸준히 상승하여 극대값을 기록하였다. 이는 자율주행차량의 도입으로 인해 데이터센터 및 차량 내부 컴퓨팅과 같은 추가적인 에너지 소비가 탄소배출량 증가에 크게 기여하기 때문으로 분석된다. 도입률 60% 이후, 휘발유 차량의 배출량 감소와

함께 전기차 및 자율주행차량의 배출량 증가가 상쇄되면서 총 탄소배출량이 소폭 감소하는 양상을 보였다.

결과적으로, 자율주행자동차의 도입은 휘발유 차량 배출량을 줄이는 긍정적인 효과가 있었으나, 자율주행차량 운영을 위한 추가 에너지 소비로 인해 탄소배출량 총합이 도입률 100%에서도 여전히 감소하지 않는 결과를 나타냈다. 이는 자율주행 기술의 도입이 환경적 효율성을 제고하려면 에너지 효율성을 높이고, 데이터센터 및 컴퓨팅 관련 에너지 소비를 줄이기 위한 추가적인 기술적 개선이 필수적임을 시사한다.

다. 기술 발전시 탄소 배출량

본 연구는 자율주행자동차 도입 시 에너지 효율성이 기술 발전으로 인해 증가하는 상황을 가정하여 탄소 배출량의 변화를 분석하였다. 에너지 효율성을 0.9로 설정하여 자율주행자동차와 데이터센터의 에너지 소비 효율이 향상되었음을 반영하였다. 이 시나리오의 기술 발전이 에너지 소비 구조에 미치는 영향을 평가하는 데 중점을 두고 있다.



〈그림 10〉 기술 발전시 시나리오별 탄소 배출량 그래프

분석 결과, 기술 발전으로 인해 에너지 효율성이 개선됨에 따라 전체 탄소 배출량이 지속적으로 감소하는 경향이 나타났다. 초기(도입률 0%)에는 휘발유 차량이 전체 탄소 배출량의 대부분을 차지하였다. 그러나 자율주행자동차의 도입률이 증가함에 따라 휘발유 차량의 탄소 배출량은 점차 감소하였다. 특히, 도입률 20% 이상부터는 휘발유 차량의 배출량 감소 폭이 두드러지게 나타났으며, 이는 자율주행자동차와 전기차의 보급이 휘발유 차량을 대체했기 때문이다.

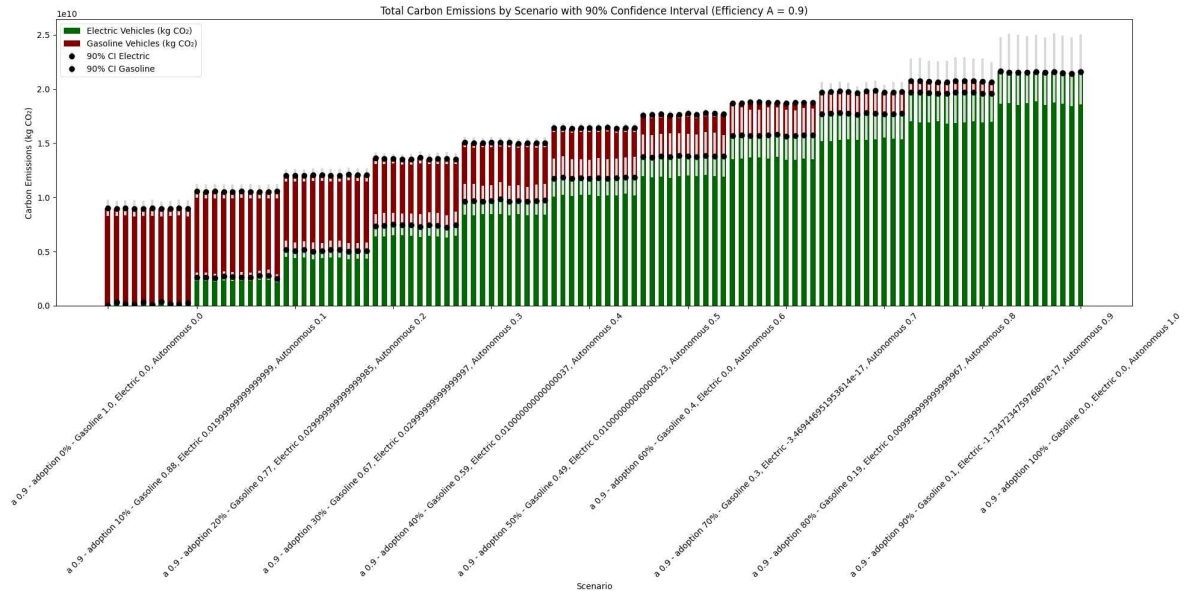
한편, 전기차 및 자율주행자동차의 탄소 배출량은 데이터센터와 컴퓨팅 에너지 소비 증가로 인해 증가하였으나, 에너지 효율성이 개선됨에 따라 배출량 증가 폭은 제한적이었다. 에너지 효율성 증가가 자율주행자동차 도입으로 인한 추가 에너지 소비의 영향을 상쇄하는 데 기여한 것으로 판단된다.

총 탄소 배출량은 도입률이 증가할수록 점진적으로 감소하였으며, 이는 에너지 효율성 개선이 자율주행 기술의 도입으로 인한 탄소 배출 영향을 완화할 수 있음을 시사한다. 그러나 휘발유 차량 배출량 감소가 가져오는 긍정적 효과는 자율주행 관련 추가 에너지 소비(데이터센터, 컴퓨팅 에너지)에 의해 일부 제한되는 양상을 보였다.

이 시나리오의 결과는 자율주행 기술 도입과 기술 발전이 탄소 배출량 감소에 기여할 가능성을 보여주지만, 데이터센터와 자율주행차량 내 연산 작업에 대한 에너지 소비 최적화가 여전히 중요한 과제로 남아 있음을 강조한다. 특히, 지속 가능한 에너지 공급과 데이터센터의 에너지 효율성 개선은 자율주행 기술의 환경적 지속 가능성을 확보하기 위한 필수 조건으로 나타난다.

라. 사용량 증가시 탄소 배출량

본 시뮬레이션은 기술 발전으로 인해 자율주행자동차와 데이터센터의 에너지 소비 효율이 향상되었지만, 기술 도입과 보급률 증가로 인해 에너지 사용량 또한 증가하는 상황을 가정하여 탄소 배출량 변화를 분석하였다. 에너지 효율성을 0.9로 설정한 상태에서 자율주행 기술과 관련된 추가 에너지 소비가 늘어날 경우를 평가하였다.



〈그림 11〉 사용량 증가시 시나리오별 탄소 배출량 그래프

분석 결과, 자율주행자동차 도입률이 증가함에 따라 전체 탄소 배출량은 지속적으로 증가하였다. 초기(도입률 0%)에는 휘발유 차량이 탄소 배출량의 대부분을 차지하였으나, 자율주행 기술의 도입률이 증가함에 따라 휘발유 차량 배출량은 감소하였다. 이는 자율주행자동차와 전기차가 휘발유 차량을 점진적으로 대체한 결과로 해석된다.

그러나 사용량 증가로 인해 전기차 및 자율주행자동차와 관련된 탄소 배출량이 크게 증가하였다. 특히, 데이터센터와 차량 내 컴퓨팅 에너지 소비는 도입률이 높아짐에 따라 전체 탄소 배출량에서 점점 더 큰 비중을 차지하였다. 이는 자율주행 기술의 도입이 에너지 효율성을 높이는 한편, 사용량 증가로 인해 추가적인 에너지 소비와 탄소 배출을 야기할 수 있음을 시사한다.

도입률 50% 이상에서는 탄소 배출량 증가가 가속화되었으며, 특히 데이터센터에서의 에너지 소비로 인해 전기차 관련 탄소 배출량이 전체 배출량에서 상당한 비중을 차지하였다. 휘발유 차량의 배출량 감소는 자율주행 관련 추가 탄소 배출량 증가로 상쇄되었으며, 도입률 100%에 가까워질수록 자율주행 관련 배출량이 전체 배출량을 압도하였다.

결론적으로, 기술 발전으로 인한 에너지 효율성 향상은 탄소 배출량 감소에 긍정적인 영향을 미치지만, 기술 도입과 보급 확대에 따른 에너지 사용량 증가는 탄소 배출량 증가를 초래할 수 있다.

이는 데이터센터와 컴퓨팅 에너지 소비를 포함한 추가 에너지 사용량에 대한 최적화가 필수적임을 보여준다.

4. 소결

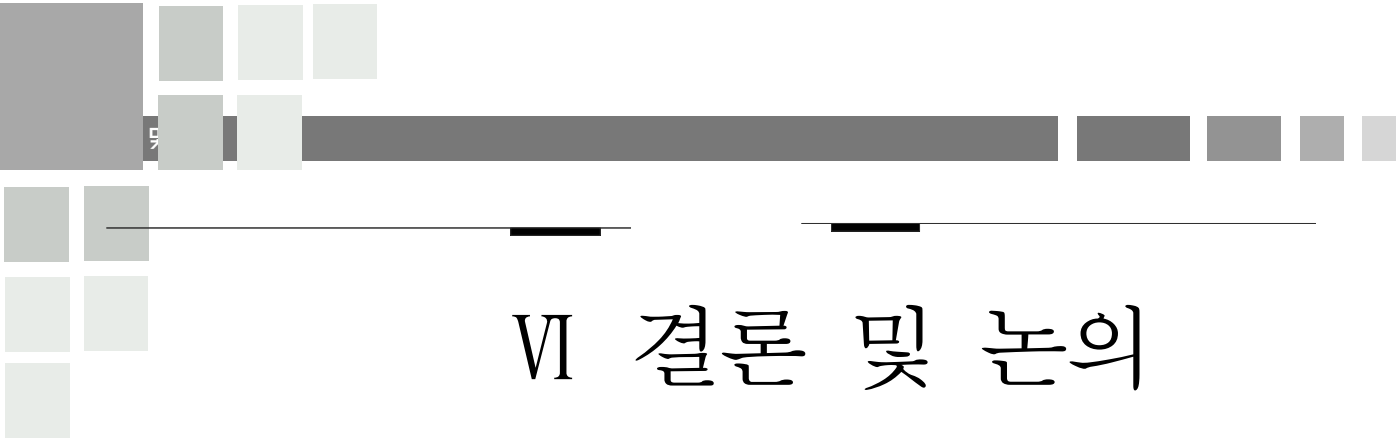
본 연구는 자율주행자동차의 도입이 에너지 소비와 탄소 배출에 미치는 영향을 다양한 시나리오를 통해 분석하였다. 연구 결과, 자율주행자동차의 도입률이 증가함에 따라 에너지 소비 구조와 탄소 배출량의 양상이 크게 변화함을 확인할 수 있었다.

첫째, 자율주행자동차 도입률 증가에 따라 평균 속도는 로지스틱 모형을 따르며 점진적으로 상승하였다. 도입률 100%에서는 평균 속도가 약 32km/h로 증가하였으며, 이는 초기 23km/h에 비해 약 40%가량 향상된 수치이다. 이러한 결과는 자율주행 기술이 교통 흐름을 개선하고 도로 효율성을 증대시켜 교통 체계 전반의 효율성을 높이는 데 기여할 수 있음을 시사한다.


둘째, 자율주행자동차 도입은 총 에너지 소비량의 증가를 동반하였다. 도입률 100%에서는 총 에너지 소비량이 약 23,000GWh로 추산되었으며, 이 중 데이터센터가 가장 큰 에너지 소비 항목으로 확인되었다. 자율주행 기술의 핵심 구성 요소인 데이터센터는 차량이 생성한 데이터를 처리하고 저장하는 작업에서 막대한 전력을 요구하며, 전체 에너지 소비 구조에서 가장 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 반면, V2X 통신과 RSU 설치에 따른 에너지 소비는 상대적으로 미미한 수준이었다.

셋째, 자율주행자동차 도입은 휘발유 차량의 탄소 배출량을 감소시키는 긍정적 효과를 가져왔으나, 자율주행차량과 관련된 추가 에너지 소비로 인해 전체 탄소 배출량은 오히려 증가하는 결과를 나타냈다. 특히, 데이터센터와 차량 내부 컴퓨팅에 사용되는 에너지가 탄소 배출 증가의 주요 원인으로 분석되었다. 이는 자율주행 기술이 교통 효율성을 높이는 동시에, 추가적인 에너지 소비로 인해 환경적 부담을 가중시킬 수 있음을 보여준다.

넷째, 에너지 효율성이 기술 발전으로 개선된 시나리오에서는 탄소 배출량이 감소하는 양상이 나타났다. 기술 발전으로 인해 데이터센터와 자율주행차량의 에너지 소비 효율이 향상되면서, 도입률 증가에도 불구하고 탄소 배출량 증가 폭이 줄어드는 결과를 보였다. 그러나 기술 보급이 확대되어 사용량이 증가하는 경우, 총 에너지 소비와 탄소 배출량이 다시 증가하는 양상이 확인되었다.



VI 결론 및 논의



1. 연구 의의
2. 연구 한계
3. 결론

VI 결론 및 논의

1. 연구 의의

본 연구는 자율주행자동차의 도입이 도시 교통 체계, 에너지 소비, 그리고 탄소 배출에 미치는 영향을 종합적으로 분석하고, 도입률에 따른 시뮬레이션을 통해 정량적 결과를 도출한 점에서 중요한

학술적 의의를 가진다. 특히, 자율주행자동차와 관련된 다양한 요소를 통합적으로 평가하여 자율주행 기술 도입의 기회와 한계를 명확히 드러냈다는 점에서 의미가 크다.

자율주행자동차 도입률 증가에 따른 평균 속도의 변화를 정량적으로 평가함으로써, 자율주행 기술이 교통 흐름을 개선하고 도로 혼잡을 완화할 수 있는 가능성을 확인하였다. 본 연구는 로지스틱 모형(Logistic Model)을 적용하여 자율주행자동차 도입률이 도로 네트워크의 평균 속도에 미치는 긍정적 영향을 실증적으로 제시하였다. 이는 자율주행 기술이 도시 교통 체계의 효율성을 증대시키고, 주행 시간 단축 및 교통 체증 해소를 통해 사회적 비용을 감소시킬 수 있음을 시사한다.

본 연구는 자율주행자동차 도입률 증가에 따른 에너지 소비 구조의 변화를 세부적으로 분석하였다. 특히, 자율주행 기술 도입이 데이터센터와 차량 내 컴퓨팅과 같은 추가적인 에너지 소비 항목에서 막대한 전력을 요구한다는 점을 강조하였다. 이러한 결과는 자율주행 기술 도입이 단순히 차량 간 통신 및 교통 효율성에 국한되지 않고, 도시 에너지 소비 구조에 중대한 변화를 가져올 수 있음을 보여준다. 또한, 데이터센터와 컴퓨팅 에너지가 자율주행 기술의 에너지 소비에서 핵심적인 역할을 차지함을 밝힘으로써, 에너지 관리 및 최적화가 자율주행 기술의 지속 가능성을 확보하기 위한 필수적인 과제임을 제시하였다.

탄소 배출량 분석을 통해 자율주행자동차 도입이 기존 휘발유 차량의 탄소 배출량을 감소시키는 긍정적 효과가 있지만, 자율주행 기술의 추가적인 에너지 소비로 인해 전체 탄소 배출량은 오히려 증가할 수 있음을 확인하였다. 특히, 데이터센터와 컴퓨팅 에너지 소비가 탄소 배출량 증가의 주요 원인으로 작용함을 실증적으로 보여주었다. 이는 자율주행 기술의 환경적 지속 가능성을 확보하기 위해 데이터센터와 관련된 에너지 효율성을 개선해야 한다는 점을 강조하며, 저탄소 전력망 구축의 필요성을 부각시킨다.

에너지 효율성이 향상된 시나리오를 도입하여 기술 발전이 에너지 소비와 탄소 배출량에 미치는 긍정적 영향을 실증적으로 확인하였다. 연구 결과, 기술 발전을 통해 데이터센터 및 차량 내 컴퓨팅 에너지의 효율성이 증가하면 탄소 배출량이 감소할 가능성을 확인하였으나, 기술 도입과 보급으로 인한 에너지 사용량 증가가 이러한 긍정적 영향을 상쇄할 수 있음을 제시하였다. 이는 기술 발전과 더불어 데이터센터 및 차량 내 에너지 소비의 최적화가 필수적임을 보여주며, 에너지 사용량 관리와 기술 혁신의 중요성을 동시에 강조한다.

본 연구는 자율주행자동차 도입과 관련된 정책 수립에 중요한 시사점을 제공한다. 연구 결과는 자율주행 기술 도입이 교통 효율성을 높이고, 기존 휘발유 차량의 대체를 통해 탄소 배출을 감소시킬 수 있음을 보여준다. 그러나 동시에 자율주행 기술의 추가적인 에너지 소비가 환경적 부담으로 작용할 가능성을 제시하며, 이에 대한 대책 마련이 필요하다는 점을 강조한다. 따라서 본 연구는 자율주행 기술의 도입과 보급이 환경적 지속 가능성을 보장할 수 있도록, 저탄소 전력망 구축, 데이터센터의 에너지 효율성 개선, 컴퓨팅 기술의 최적화, 그리고 에너지 사용량 관리와 같은 종합적 접근이 필요함을 시사한다.

본 연구는 자율주행 기술이 단순히 교통 효율성 증대와 환경적 이점에 그치지 않고, 추가적인 에너지 소비와 탄소 배출의 증가로 이어질 수 있음을 명확히 밝혔다. 이를 통해 자율주행 기술이 교통 및 에너지 시스템의 지속 가능성을 확보하기 위해 해결해야 할 과제를 구체적으로 제시하였다. 이는 자율주행 기술 도입의 장기적 효과를 평가하고, 기술 도입 초기부터 환경적 영향을 최소화할 수 있는 방안을 고려해야 함을 강조한다.

결론적으로, 본 연구는 자율주행 기술 도입의 긍정적 효과와 잠재적 한계를 균형적으로 제시하며, 교통 체계, 에너지 소비, 그리고 환경적 지속 가능성을 고려한 통합적 접근의 중요성을 제시하였다. 이러한 연구는 자율주행 기술이 가져올 미래 사회의 변화를 예측하고, 지속 가능한 도시 교통 및 에너지 시스템 구축을 위한 학술적, 정책적 근거를 제공한다는 점에서 중요한 의의를 가진다.

2. 연구 한계

본 연구는 자율주행자동차 도입률 증가에 따른 에너지 소비와 탄소 배출에 미치는 영향을 분석하기 위해 시뮬레이션 기반 접근 방식을 활용하였으며, 정량적 결과를 도출하는 데 성공하였다. 그러나 연구 결과를 해석하고 확장하는 과정에서 다음과 같은 한계가 존재하며, 이는 후속 연구에서 보완되어야 할 부분이다.

본 연구에서 사용된 데이터는 특정 시점과 조건을 기반으로 수집되었으며, 여러 가정을 통해 모델링이 이루어졌다. 특히, 자율주행자동차의 도입률 변화에 따른 데이터센터 에너지 소비량, 컴퓨팅 에너지 소비량, V2X 통신 에너지 등의 세부 데이터를 추정하는 과정에서 불확실성이 존재한다. 이는 현실의 기술 발전 속도, 전력망 구성, 그리고 차량 운행 패턴에 따라 크게 달라질 수 있어, 결과가 모든 도시나 국가에 일반화되기에는 한계가 있다.

본 연구는 자율주행자동차의 도입률 변화와 함께 기술 발전(에너지 효율성 증가) 또는 사용량 증가를 독립적으로 가정한 정적 시나리오를 기반으로 하였다. 그러나 실제 기술 도입 과정에서는 기술 발전과 사용량 증가가 상호작용하며 동시에 진행될 가능성이 높다. 이러한 동적인 상호작용을 모델링하지 못한 점은 연구의 한계로 작용하며, 현실적인 시나리오 구축을 위해서는 동적 변수들을 포함한 복합적인 접근이 필요하다.

탄소 배출량 분석은 차량의 운행 과정에서 발생하는 직접 배출뿐만 아니라, 데이터센터와 같은 간접 배출원을 포함하여 이루어졌다. 그러나 전력망의 탄소 집약도가 시간이 지나면서 변화할 수 있다는 점을 충분히 반영하지 못하였다. 예를 들어, 전력 생산 과정에서 재생 가능 에너지의 비율이 증가하거나 화석 연료 의존도가 낮아질 경우, 본 연구에서 도출된 탄소 배출량 결과는 달라질 수 있다. 따라서 전력망의 에너지 믹스 변화와 기술적 혁신이 배출량에 미치는 장기적 영향을 포함한 분석이 필요하다.

자율주행자동차 기술은 아직 상용화 초기 단계에 있으며, 기술적 한계와 법적, 사회적 문제들이 해결되지 않은 상태이다. 본 연구는 자율주행 기술이 완전히 도입된 상황을 가정하여 분석을 진행하였으나, 상용화가 이루어지기 전까지는 다양한 변수가 발생할 수 있다. 예를 들어, 도입률이 낮은 초기 단계에서는 차량 간 연결성(V2X) 부족으로 인해 에너지 소비와 효율성이 기대 수준에 도달하지 않을 가능성이 있다.

자율주행자동차의 도입은 기술적 측면뿐만 아니라, 사회적 및 경제적 요인에도 크게 영향을 받는다. 그러나 본 연구에서는 도입 비용, 정책 지원, 사용자 수용성, 교통 정책 변화 등 경제적·사회적 변수들을 포함하지 않았다. 이러한 변수들은 실제 도입률과 도입 속도에 영향을 미칠 수 있으며, 연구 결과의 현실성을 높이기 위해서는 이러한 요인들을 추가로 고려해야 한다.

본 연구는 자율주행자동차의 추가 에너지 소비 항목으로 데이터센터와 차량 내 컴퓨팅 에너지, V2X 통신 에너지를 포함하였다. 그러나 자율주행자동차의 도입으로 인해 발생할 수 있는 기타 에너지 소비 항목(예: 차량 생산 및 폐기 과정에서의 에너지 사용, 인프라 구축에 따른 에너지 소비 등)은 충분히 반영되지 않았다. 이는 연구 결과가 전체적인 에너지 소비 및 탄소 배출 영향을 과소평가할 가능성을 남긴다.

본 연구는 서울시를 대상으로 연구를 수행하였으며, 도시의 교통 체계와 에너지 소비 특성에 맞춘 결과를 도출하였다. 그러나 이러한 결과는 도시 구조, 교통 흐름, 에너지 공급 체계가 상이한 다른 지역에서는 직접적으로 적용하기 어려울 수 있다. 예를 들어, 교외 지역이나 저밀도 도시에서는 자율주행 기술 도입의 효과와 한계가 다르게 나타날 가능성이 크다. 따라서 다양한 도시와 지역을 대상으로 한 확장 연구가 필요하다.

본 연구는 주로 에너지 소비와 탄소 배출량에 초점을 맞추었으나, 자율주행자동차 도입이 사회·경제적, 환경적 측면에서 가져올 복합적 영향을 충분히 고려하지 못하였다. 예를 들어, 자율주행 기술은 차량 공유 서비스 활성화, 주차 공간 감소, 도시 공간 재구성 등과 같은 경제적·사회적 효과를 동반할 수 있다. 이러한 요소를 포함한 통합적 평가가 이루어지지 못한 점은 본 연구의 중요한 한계로 남는다.

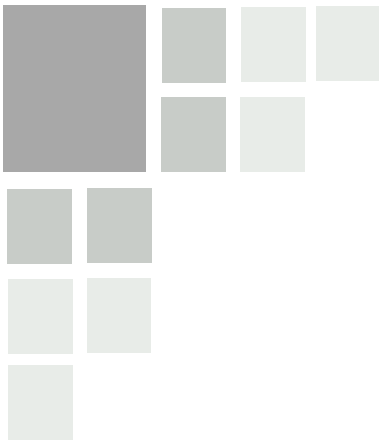
3. 결론

본 연구는 자율주행자동차의 도입률 증가가 에너지 소비와 탄소 배출에 미치는 영향을 분석하기 위해 시뮬레이션 기반의 정량적 연구를 수행하였다. 연구 결과, 자율주행자동차의 도입률이 증가함에 따라 총 에너지 소비량이 꾸준히 증가했으며, 도입률 100%에 도달했을 때 약 23,000GWh의 에너지가 소비될 것으로 나타났다. 특히 데이터센터와 컴퓨팅 에너지가 주요 에너지 소비 항목으로 확인되었으며, V2X 통신 에너지는 상대적으로 적은 비중을 차지하였다. 또한, 자율주행자동차 도입으로 인한 평균 속도는 도입률이 증가할수록 상승하여 도입률 100% 시 약 32km/h에 도달하였다. 이는 교통 혼잡 완화와 주행 시간 단축에 긍정적인 영향을 미칠 가능성을 보여준다.

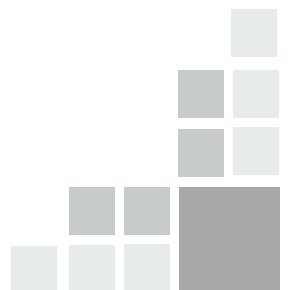
탄소 배출 측면에서는 자율주행자동차와 전기자동차의 보급으로 휘발유 차량의 배출량은 감소했으나, 자율주행 기술 도입에 따른 추가적인 에너지 소비로 인해 전체 탄소 배출량은 오히려 증가하는 양상을 보였다. 기술 발전과 에너지 효율성 개선 시나리오에서도 에너지 사용량 증가로 인해 탄소 배출량 감소 효과는 제한적이었다.

서울시 전력공급계획과 본 연구의 결과를 비교해보면, 서울시는 자율주행자동차 도입률 증가에 따른 전력 수요 증가를 충족시키기 위해 2040년까지 약 16,221GWh의 전력 생산을 목표로 하고 있다. 그러나 본 연구에서 도출된 자율주행자동차 도입률 100% 시 에너지 소비량은 약 23,686GWh로, 현재 계획된 전력 공급량으로는 이를 충족하기 어려울 수 있다. 이는 서울시가 재생 가능 에너지와 같은 저탄소 전력원의 비율을 늘리고, 전력 생산 목표를 재검토할 필요가 있음을 시사한다.

자율주행 기술은 교통 효율성을 개선하고 휘발유 차량의 탄소 배출을 줄이는 긍정적인 효과를 가져오지만, 데이터센터와 컴퓨팅 에너지 소비 증가로 인해 탄소 배출량이 증가할 수 있음을 보여준다. 따라서 기술적 혁신을 통해 데이터센터와 컴퓨팅 기술의 에너지 효율성을 높이고, 태양광 및 연료전지와 같은 재생 가능 에너지의 활용을 확대해야 한다. 동시에, 자율주행 기술 도입과 관련된 에너지 수요 및 환경적 영향을 완화하기 위해 정책적 지원과 종합적인 계획 수립이 필요하다. 결론적으로, 자율주행 기술은 교통체계 혁신과 환경적 지속 가능성을 동시에 달성할 가능성을 가지고 있으나, 이를 위해서는 기술적, 정책적, 환경적 노력이 균형 있게 이루어져야 한다. 본 연구는 이러한 점에서 자율주행 기술 도입에 따른 환경적 영향을 심층적으로 평가하고 정책적 방향성을 제시하는 데 기여하였다.



VII 참고문헌



VI

참고문헌

- 1) Arrow.com (2024). Automotive Power Demands Drive Energy Efficiency Innovation.
- 2) Autopilot Review. Tesla Hardware and Energy Analysis.
- 3) Bautista, C., & Mester, G. (2023). Internet of Things in Self-driving Cars Environment. Interdisciplinary Description of Complex Systems.
- 4) Conlon, J., & Lin, J. (2019). Greenhouse Gas Emission Impact of Autonomous Vehicles in an Urban Environment. Semantic Scholar.
- 5) Cordts, M., Omran, M., Ramos, S., Rehfeld, T., Enzweiler, M., Benenson, R., ... & Schiele, B. (2016). The cityscapes dataset for semantic urban scene understanding. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 3213-3223.
- 6) Donovan Huang, Samsung Electronics. (2022). Data Centers on Wheels: Emissions from Computing Onboard Autonomous Vehicles.
- 7) IEEE Micro Journal (2024). Data Centers on Wheels: Emissions From Computing Onboard Autonomous Vehicles.
- 8) Ivanchev, J., Fonseca, J. A., & Knoll, A. (2020). Electrification and Automation of Road Transport: Impact Analysis of Heat and Carbon Emissions for Singapore. 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 1-8.
- 9) KOTRA. (2024). Seoul to raise share of renewables in energy sourcing to over 30% by 2040.
- 10) Lee, J. H., Choi, Y. S., Choi, S. H., Lee, S. H., Kim, H. J., Kang, J. H., ... & Choi, J. W. (2023). Atomic-scale observation of the initial oxidation of Cu(111) at room temperature. Nature Communications, 14(1), 6289.
- 11) Luo, Z. (2023). The Impact of Autonomous Vehicles on Cities. Advances in Economics, Management and Political Sciences.
- 12) McCarthy, J. (2017). Sustainability of Self-Driving Mobility: An Analysis of Carbon Emissions Between Autonomous Vehicles and Conventional Modes of Transportation. Semantic Scholar.
- 13) McKinsey & Company. (2023). The autonomous vehicle industry moving forward.
- 14) Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2022). Autonomous Vehicle Commercialization Plan.
- 15) MIT News Office. (2023, January 13). Autonomous vehicles could drive up emissions without hardware efficiency gains. Massachusetts Institute of Technology.
- 16) MIT Technology Review (2024). Carbon Footprint Analysis of Autonomous Vehicles.
- 17) Niels, T., & Bogenberger, K. (2023). Optimized Trajectory Planning to Reduce Electric Vehicle Energy Consumption in Urban Areas. Semantic Scholar.

- 18) Science Direct. (2023). Environmental impacts of autonomous vehicles: A review.
- 19) Silva, C. A., & Melo, S. (2022). A Submodel as a Plug-in for the Assessment of Autonomous Vehicles and Their Impact on Urban Mobility. Semantic Scholar.
- 20) Sony Semiconductor Solutions Technical Report (2024). Energy Consumption in Autonomous Vehicles.
- 21) Sun, P., Kretzschmar, H., Dotiwalla, X., Chouard, A., Patnaik, V., Tsui, P., ... & Zeng, W. (2020). Scalability in perception for autonomous driving: Waymo open dataset. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2446-2454.
- 22) Techahead Corp. (2024). Reshaping Cities: How Autonomous Cars Impact Urban Life.
- 23) The Robot Report (2023). Self-Driving Cars Have a Power Consumption Problem.
- 24) U.S. Energy Information Administration (2024). Autonomous Vehicles: Uncertainties and Energy Implications.
- 25) V2X Priority. (n.d.). RSU technical document: Specifications and applications.
- 26) Wang, T., & Hu, X. (2022). The Impact of Autonomous Vehicles on People's Use of Vehicles and the Possible Environmental Pollution. Highlights in Science, Engineering and Technology.
- 27) World Economic Forum (2024). The Hidden Downsides of Autonomous Vehicles.
- 28) Zawodny, M., & Kruszyna, M. (2022). Proposals for Using the Advanced Tools of Communication between Autonomous Vehicles and Infrastructure in Selected Cases. Energies.
- 29) Zheng, Y. (2023). Comfort-oriented driving: performance comparison between human drivers and motion planners. arXiv:2301.10538.
- 30) IT뉴스. 도로 데이터 분석.
- 31) SK증권 (2024). AI, 전력질주하기엔 전력 부족.
- 32) 김남욱, [국가R&D연구보고서] [보고서]자율주행 및 군집주행 기반의 차세대 차량 기술이 교통 흐름 및 에너지 소모에 미치는 영향도를 분석하기 위한 교통 시뮬레이션 해석 플랫폼 개발 ,2018,국토교통부,한양대학교.
- 33) 김남욱. (2021). Domestic Automobile LCA Greenhouse Gas Emissions Analysis. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 43(5), 17-22.
- 34) 서울사랑 (2024). 서울을 달리는 무공해 미래 차를 만나다.
- 35) 서울에너지드림센터. (2020). 서울시 2050 온실가스 감축전략. 서울특별시.
- 36) 서울시 교통정보센터(TOPIS). 서울시 교통 데이터.
- 37) 공공데이터포털. 서울특별시 행정동별 자동차등록대수 현황.
- 38) 한국교통안전공단. 교통 데이터 통계.
- 39) 한국에너지공단. 전력의 탄소 집약도 및 한국의 전력망 통계.
- 40) 한경석, [국가R&D연구보고서] [보고서]자율 주행 자동차의 에너지 소모 최소화를 위한 최적 제어 전략 개발, 2018, 과학기술정보통신부, 경북대학교.