

# E2E 인공지능을 통한 자율주행 기술의 혁신

‘통합 학습·통합 판단’  
E2E 인공지능,  
자율주행의  
새로운 패러다임 제시

## 진화의 한계를 넘는 자율주행의 새로운 패러다임

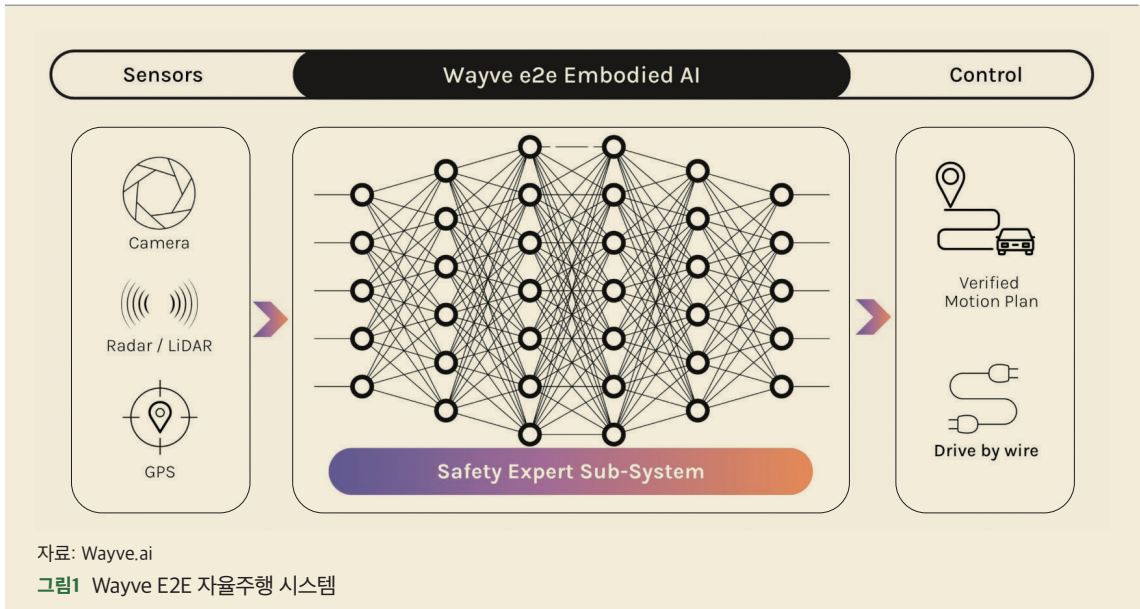
자율주행 기술은 지난 10여 년간 눈부신 발전을 거듭해 왔다. 특히 2010년대 이후 딥러닝 기반의 인식 기술이 비약적으로 향상되면서 차량이 주변 사물을 인지하고 해석하는 능력은 획기적인 진전을 이루었다. 현재 ‘완전 자율주행(Level 4 이상)’은 미국과 중국의 일부 도시에서 제한적으로 상용화되고 있지만, 전면적인 확산에는 아직 이르지 못한 상황이다. 이는 단순히 기술의 미성숙 때문만은 아니다. 다수의 자율주행 시스템은 ‘인지(Perception)-판단(Decision)-제어(Control)’를 분리한 모듈형 구조(Modular Pipeline)를 기반으로 설계되어 있다. 하지만 이 방식은 복잡한 주행 시나리오에서 의사결정의 일관성 저하, 정보 손실, 예외 상

황 대응의 한계 등 구조적 제약을 내포하고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 최근 주목받는 기술이 바로 E2E(End-to-End) 인공지능 자율주행이다. 이는 입력(센서 데이터)부터 출력(차량 제어 명령)까지의 전 과정을 하나의 통합된 딥러닝 모델이 학습하고 실행하는 구조로, 사람처럼 ‘전체 문맥’을 고려한 판단을 가능하게 한다. 특히 Vision Transformer, BEV(Bird’s Eye View) 변환, Multi-modal Fusion 등 최신 AI 기술과 결합하면서 자율주행의 새로운 패러다임을 형성하고 있다.<sup>1), 2)</sup>

## 기존 자율주행 구조의 제약: 왜 E2E가 필요한가?

현재 자율주행차의 대부분은 ‘인지-판단-제어’의

1) Lechner, M. et al. (2023). "What Can Transformers Learn in Autonomous Driving?" arXiv:2301.11009.  
2) Liu, Z. et al. (2022). "BEVFormer: Bird's Eye View Feature Transformation using Transformers for Multi-Camera 3D Object Detection." ECCV.



모듈형 구조를 따르며, 이는 시스템 안전성과 규제 대응 측면에서 강점이 있다. 하지만 모듈 간 정보 손실과 오류 누적, 도심 환경에 대한 유연한 대응 부족 등 한계도 뚜렷하다. 특히 비정형적 시나리오에서는 의사결정의 일관성 확보가 어렵고 유지보수 비용 또한 높다.<sup>3)</sup>

이러한 배경 속에서 최근 주목을 받는 접근이 바로 E2E(End-to-End) 인공지능 기반 자율주행이다. 입력부터 출력까지를 하나의 통합된 모델로 학습하는 방식은 정보 흐름의 왜곡을 줄이고, 복잡한 상황에 대한 통합적 판단을 가능하게 한다. 이는 단순한 구조 개선을 넘어, 자율주행 시스템이 ‘학습

기반 의사결정’으로 진화하는 방향을 제시한다.

### E2E 자율주행의 개념과 구성

자율주행 기술은 2010년대 이후 눈부신 발전을 거듭해 왔지만, 완전한 자율주행(Level 4 이상)의 상용화는 여전히 제한적이다. 이는 단순히 기술의 미성숙 때문이 아니라, 기존 자율주행 시스템 구조 자체가 갖는 본질적인 한계에 기인한 측면도 크다. 이러한 맥락에서 최근 주목받는 것이 바로 Autonomy 2.0, 즉 E2E 기반의 자율주행 기술이다. 이 접근은 기존 Autonomy 1.0의 모듈형 아키텍처

3) Chen, C. et al. (2015). "DeepDriving: Learning Affordance for Direct Perception in Autonomous Driving." ICCV.

택처와는 구조적으로, 철학적으로, 그리고 기술적으로 근본적인 차이를 지닌다.

Autonomy 1.0은 ‘인지-판단-제어’로 구성된 일련의 모듈을 단계적으로 구현하는 구조이다. 각 모듈은 독립적으로 설계되고 검증되며, 기능 안전성(예: ISO 26262)에 적합하게 맞춤화되어 있다. 이러한 구조는 각 기능의 명확한 정의와 규칙 기반의 설계가 가능하다는 점에서 장점이 있지만, 동시에 다음과 같은 구조적 한계를 안고 있다. 첫째, 각 모듈 간 인터페이스에서 발생하는 데이터 손실과 오류 누적의 위험이 상존한다. 둘째, 복합적인 도심 주행 환경이나 일반적이지 않은 비정형적 상황에 대한 대응력이 떨어진다. 셋째, 유지보수 및 확장성이 낮고 전체 시스템의 통합 및 개발 비용이 급격히 증가하는 경향이 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 등장한 Autonomy 2.0은 기존의 모듈 구조를 탈피하여 센서 입력부터 차량 제어 출력까지 전 과정을 하나의 신경망 기반 인공지능이 통합적으로 학습하는 구조를 가진다. 즉, 여러 모듈을 분할하고 규칙을 수립하는 대신 차량 주행 데이터를 기반으로 딥러닝 모델이 스스로 판단과 제어 정책을 학습하게 된다. 대표적인 구현 방식으로는 운전자의 운전 행태를 모사하는 ‘Behavior Cloning’, 보상 함수를 기반으로 최적 정책을 학습하는 ‘Reinforcement Learning’, 라벨링 없이 대규모 데이터를 활용하는 ‘Self-supervised Learning’ 등이 있다. 이러한

“  
**Autonomy 1.0과 Autonomy 2.0은  
 자율주행 시스템이 지향하는  
 철학의 전환**이라 할 수 있다.  
 Autonomy 1.0이 ‘기능 분리와  
 규칙 기반 설계’를 중심으로 했다면,  
 Autonomy 2.0은  
 ‘학습과 통합 판단’이라는  
 새로운 패러다임을 제시하고 있다.  
 ”

기술은 최근 Transformer, Multi-modal Fusion 등 최신 AI 기법과 융합되며 빠르게 고도화되고 있다.<sup>4)</sup>

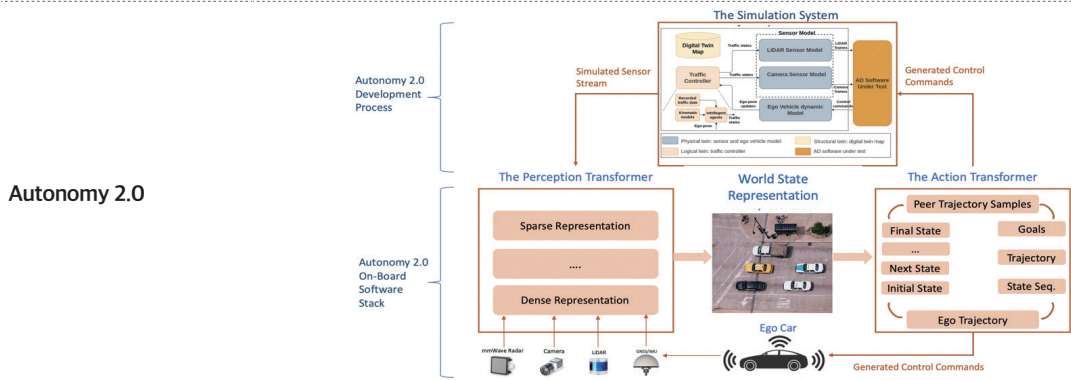
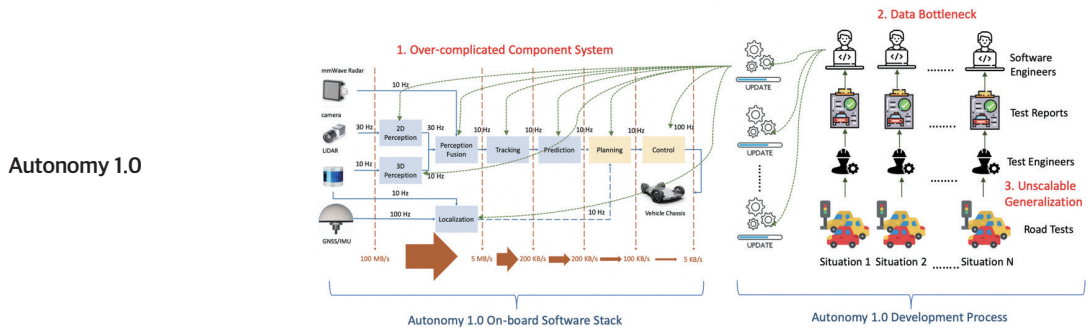
Autonomy 2.0의 가장 큰 강점은 구조의 단순화와 확장성이다. 모듈 간 인터페이스에서 발생하는 정보 손실을 제거하고, 시뮬레이션과 실제 주행 데이터를 통해 다양한 예외 상황에 대한 일반화 능력을 획득할 수 있다. 동시에, 하나의 통합된 목적 함수를 기반으로 전체 시스템을 최적화할 수 있어 성능 개선 속도도 빠르다. 반면, 설명 가능성 부족(eXplainable Artificial Intelligence, XAI), 학습 데이터 편향, 사고 시 책임소재 불명확성 등 새로운 윤리적·사회적 과제를 동반한다.

궁극적으로 Autonomy 1.0과 2.0은 단순한 기술 세대교체를 넘어 자율주행 시스템이 지향하는 철학의 전환이라 할 수 있다. Autonomy 1.0이

4) Amodei, D. et al. (2016). "Concrete Problems in AI Safety"

표1 Autonomy 1.0 vs. Autonomy 2.0 개념 비교표

항목	Autonomy 1.0(Rule-based)	Autonomy2.0(E2E)
아키텍처	인지/판단/제어, 모듈별 구분	End-to-End 신경망 (센서 → 제어까지 하나의 통합 모델)
작동 방식	센서(라이다, 레이더, 카메라) → 객체 감지 → 규칙 기반 의사결정 → 차량 제어, 지도 기반 주행	센서 입력 → 신경망 학습(딥러닝) → 직접 차량 제어
개발 방식	프로그래머가 규칙을 명시하는 규칙 기반 프로그래밍 + 모듈별 설계/검증	데이터 기반 네트워크 학습 사전 규칙 없이 시가 주행 정책 학습
대표 기업	Waymo, Mobileye, GM Cruise 등	Tesla, Xpeng 등
장점	안전성과 예측 가능성 높음, 규제 및 인증에 강점	고정된 HD 지도 없이도 주행 가능 → 지도 의존성 낮음
단점	ODD(운행설계영역) 제약, 지도 의존성 큼, 유지보수 비용 높음, 롱테일 시나리오(비정형 상황) 대응 어려움	설명 가능성 부족, 법적 승인 및 책임소재 불명확, 롱테일 시나리오 학습 어려움
확장성	엔지니어 인력에 의존, 모듈별 최적화 필요	데이터·컴퓨팅 자원 기반 확장 가능 (단, 초기 진입 장벽 존재)
테스트 방식	실제 도로 주행 및 모듈별 시뮬레이션 중심	시뮬레이션 및 클로즈드 루프 테스트 중심 시나리오 기반 반복 학습 가능



자료: ACM SIGARCH

‘기능 분리와 규칙 기반 설계’를 중심으로 했다면, Autonomy 2.0은 ‘학습과 통합 판단’이라는 새로운 패러다임을 제시하고 있다. 이러한 전환은 기술뿐만 아니라 제도, 사회적 신뢰, 법적 체계의 전반적인 진화를 동반할 때 비로소 완성될 수 있다.

## 실제 적용 사례

테슬라는 E2E 자율주행 구현에서 선도적인 기업으로 평가된다. FSD Beta v12는 기존의 규칙 기반 코드를 대폭 줄이고, 단일 E2E 신경망을 통해 대부분의 주행 판단을 수행한다. 이는 운전 데이터를 통해 행동을 모사하는 ‘Behavior Cloning’과 강화학습을 결합한 구조로 1억 마일 이상 실도로 데이터를 학습하고 있다. 테슬라는 자사 모델이 운전자 수준의 직관적 판단을 모사할 수 있다고 평가하고 있다.<sup>5)</sup>

구글의 웨이모는 더 보수적인 접근을 취하나, 최근 Transformer 기반 예측 모델을 일부 도심 환경에 도입하고 있으며, 데이터 기반 행동 정책 학습을 실험 중이다. NVIDIA는 ‘DRIVE Sim’을 통해 자율주행 E2E 모델을 시뮬레이션 환경에서 훈련시키고 있으며, 벤츠, 현대, 볼보 등이 이를 활용하여 테스트 중이다.

중국의 바이두와 디디추싱도 적극적이다. 바이두의 Apollo 프로젝트는 E2E 요소를 포함한 판단

알고리즘을 바탕으로 베이징, 상하이 등 주요 도시에서 로보택시 서비스를 실제로 운영하고 있으며, 일부 지역에서는 무인 주행도 실현하고 있다. 중국은 자율주행 기술 발전을 위해 자국 기업이 대규모 데이터를 수집·활용할 수 있도록 제도적 기반을 마련하고 있으며, 이와 같은 정책적 환경이 기술 상용화를 촉진하는 요인으로 작용하고 있다.<sup>6)</sup>

## 제도 및 정책적 시사점

E2E 자율주행 기술의 확산은 기존 규제체계에 근본적인 변화를 요구한다. 지금까지는 모듈 단위의 기능 검증, ISO 26262 기반의 기능 안전성 평가 등이 주류였으나, E2E는 하나의 통합된 알고리즘이 모든 판단을 수행하기 때문에 평가 기준도 시스템 전체의 판단에 대한 안전성과 책임성을 평가할 수 있어야 한다.

유럽연합(EU)은 2024년 ‘AI Act’를 통해 자율주행 AI를 ‘고위험 AI 시스템(High-risk AI Systems)’으로 분류하고, 훈련 데이터 공개, 판단 근거 설명 가능성, 인간 개입 보장 등을 법제화했다.<sup>7)</sup> 미국 고속도로교통안전국(NHTSA)은 AV STEP(Automated Vehicle Safety, Transparency and Evaluation Program)을 통해 AI 판단 과정을 기록할 수 있는 AI-EDR(확장형 사고기록장치)을 의무화하려는 움직임을 보이고 있으며 보험과 사고 책임에 관한 법제

5) Tesla. Release Notes: FSD Beta v12 - "city-streets driving stack to a single end-to-end neural network trained on millions of video clips, replacing over 300k lines of explicit C++ code." 2023.44.30.12 버전.

6) Baidu Apollo, 2024 / NVIDIA DRIVE Sim.

7) ISACA, Understanding the EU AI Act: Requirements and Next Steps.

“

한국은 기술 개발 지원을 넘어  
대규모 실증 투자와 제도적 혁신을  
병행함으로써 자율주행 산업 전반의  
도약을 견인해야 한다.

이를 위해 우선, E2E 구조에 필수적인  
고품질 학습 데이터를 확보하고  
공유할 수 있는 공공-민간 협력 기반의  
데이터 세트 구축 체계를 마련해야 한다.

”

도 개편을 검토 중이다.<sup>8)</sup>

한국은 기술 개발 지원에 머무는 수준을 넘어 대규모 실증 투자와 제도적 혁신을 병행함으로써 자율주행 산업 전반의 도약을 견인해야 한다. 특히, 공공이 제도와 인프라를 정비하고 민간이 기술 개발과 실증을 주도하는 방식의 협력 구조가 핵심이다. 이를 위해 우선 E2E 구조에 필수적인 고품질 학습 데이터를 확보하고 공유할 수 있는 공공-민간 협력 기반의 데이터 세트 구축 체계를 마련해야 한다. 예를 들어 규제 샌드박스 방식이나 자율주행차 시범운행지구와 같은 특정 지역을 중심으로 촬영·주행 데이터를 표준화된 방식으로 축적하고, 공공이 이를 안전하게 관리·제공하는 한편 민간은 이를 기반으로 알고리즘을 설계하고 모델을 고도화하는 주체로 기능해야 한다. 데이터 제공, 컴퓨팅 자원, 법적 보호 등은 공공이 적극적으로

로 뒷받침하되 알고리즘 설계와 실증 적용은 민간이 책임 있게 수행할 수 있도록 유도하는 것이 바람직하다. 이러한 역할 분담은 단순한 기술 개발 지원을 넘어, 민간의 기술 경쟁력을 가속화하는 전략적 촉진제로 작동할 수 있다. 궁극적으로 E2E 자율주행의 제도화는 사전 규제 논리를 넘어, 데이터 기반의 동적 검증 체계, 사후 책임 기반의 사회적 합의, 공공-민간의 신뢰 기반 협력을 중심으로 설계되어야 한다. 기술의 진보가 규제를 앞지르기 시작한 지금, 제도는 혁신을 억제하기보다 국내 기업이 글로벌 무대에서 경쟁력을 키울 수 있는 안전하고 유연한 성장 기반이 되어야 한다.

**맺음말:**

**인공지능 자율주행의 다음 시대를 준비하며**

E2E 인공지능 기반 자율주행은 단순한 기술 구조의 전환이 아니라 도시교통 시스템과 산업 질서를 다시 그리는 대전환의 출발점이다. 인간처럼 전체 문맥을 이해하고 판단하는 AI 운전자의 등장은 기존 규칙 기반 자동화의 한계를 넘어서는 새로운 운행 패러다임을 제시한다. 하지만 자율주행의 미래는 기술의 완성만으로는 열리지 않는다. 법과 제도, 인프라, 그리고 시민의 신뢰라는 생태계 전반의 진화가 병행되어야 한다. 이런 맥락에서 지금, 이 순간이 바로 한국이 기술 혁신을 정책 혁신으로 연결해 글로벌 자율주행 시장에서 도약할 수

8) <https://www.nhtsa.gov/press-releases/nhtsa-proposes-national-program-vehicles-automated-driving-systems>

“

**자율주행이 전방위적으로 대변혁을** 불러오고 있다. 변화의 물결 속에서 **공공과 민간이 함께** 나아가지 않는다면, 우리는 기술은 있으나 시장은 없는 공허한 실력의 함정에 빠질 수 있다. **교통의 미래는 ‘기술의 속도’가 아니라 ‘제도와 신뢰의 속도’**로 완성된다. 지금이 그 속도를 우리 기업과 함께 맞춰야 할 시간이다.

”

있는 결정적 골든타임이다. 향후 2~3년은 기술 확보에서 상용화로 전환하는 핵심 시기로 정부의 전폭적인 제도적·재정적 뒷받침과 기업의 과감한 실증 투자가 함께 이루어져야 한다. 이를 위해 세 가지 전략적 대응이 요구된다.

첫째, 제도 혁신을 통해 실증 환경을 조성해야 한다. 현재 자율주행차는 보호구역 내 자율주행 금지, 원격주행 제한 등 실제 도심 주행과 괴리가 큰 규제에 직면해 있다. 기술 안정성을 기반으로 한 조건부 규제 완화와 비과실 사고에 대한 제도적 보호장치 마련이 시급하다. 특히 무인 자율주행 상용화의 핵심인 원격주행은 제도적 보안을 통해 통신 인프라가 우수한 지역에서부터 단계적 실증이 가능하도록 제도 설계가 필요하다.

둘째, 데이터와 인프라에 대한 접근성을 강화해야 한다. AI 기반 자율주행 기술의 고도화를 위해서는 많은 양의 주행 영상 데이터와 이를 처리할 수

있는 고성능 컴퓨팅 자원이 필수적이다. 그러나 현재는 개인정보보호 규제 때문에 영상 데이터를 학습용으로 활용하는 데 제약이 있고, GPU·저장장치 확보에 따른 비용 부담 또한 민간 기업의 진입 장벽이 되고 있다. 이에 따라 정부는 공공 GPU 클러스터와 데이터센터를 조성하고, 일정 요건을 충족하는 경우 영상 데이터를 안전하게 활용할 수 있도록 법적 기반을 마련할 필요가 있다.

셋째, 공공이 선도적으로 실증에 나서고 사회적 신뢰를 축적해 나가야 한다. 기술은 시민의 수용성과 연결될 때 비로소 사회적 자산으로 기능한다. 따라서 공공부문은 자율주행 서비스를 직접 실증하고 사고 발생 시 판단 기록을 투명하게 공개하며, 시민들과 지속해서 소통함으로써 제도에 대한 신뢰를 형성해야 한다. 이러한 과정은 자율주행 기술의 신뢰성과 교통정책의 정당성을 동시에 확보하는 중요한 기반이 될 수 있다.

결론적으로 자율주행은 단순한 교통수단의 혁신을 넘어, 도시 구조, 산업 생태계, 시민의 일상까지 재편하는 전방위적 대변혁이다. 이 변화의 물결 속에서 공공과 민간이 함께 나아가지 않는다면, 우리는 기술은 있으나 시장은 없는 공허한 실력의 함정에 빠질 수 있다. 특히 우리나라 기업들이 글로벌 경쟁에서 살아남고 도약하기 위해서는, 기술 개발을 넘어 이를 뒷받침할 과감한 제도 혁신과 사회적 신뢰 축적이 반드시 병행되어야 한다. 교통의 미래는 ‘기술의 속도’가 아니라 ‘제도와 신뢰의 속도’로 완성된다. 지금이 그 속도를 우리 기업과 함께 맞춰야 할 시간이다. 