

SDV 아키텍처 및 플랫폼 연동 분석 및 전략: 산업적 관점을 중심으로

장 하 램¹⁾ · 김 영 은²⁾ · 김 준 영³⁾

성신여자대학교 융합보안공학과¹⁾ · 성신여자대학교 미래융합기술공학과²⁾ · 성신여자대학교 AI융합학부³⁾

Architectures and Platform Integration Analysis and Strategies for Software-Defined Vehicles: From the Industry Perspectives

Ha Ram Jang¹⁾ · Young Eun Kim²⁾ · Joon Young Kim³⁾

¹⁾Department of Convergence Security Engineering, Sungshin Women's University, Seoul 02844, Korea

²⁾Department of Future Convergence Technology Engineering, Sungshin Women's University, Seoul 02844, Korea

³⁾School of AI Convergence, Sungshin Women's University, Seoul 02844, Korea

(Received 12 August 2025 / Revised 11 September 2025 / Accepted 16 September 2025)

Abstract : In recent years, the automotive industry has experienced a significant transformation of the Software-Defined Vehicle(SDV). SDV is a relatively new vehicle concept used in enhancing vehicle flexibility and upgradability through over-the-air(OTA) updates, centralized computing, and cloud-based functionalities. To adapt to such developments, we must thoroughly investigate related trends and the future direction of SDVs in terms of vehicle performance and enhancement. In this paper, we examined the fundamental concepts and representative architectures of SDVs, including domain-based, zonal, and centralized models. Moreover, we also compared strategic approaches adopted by companies with differing technological foundations. In our work, SDV architectures in internal combustion engine(ICE) and hybrid platforms can be applicable with specific technical considerations in full integration. We also suggested that the evolution of SDVs should not be limited to specific propulsion technologies, including considering hardware advancements across diverse vehicle platforms.

Key words : Software-defined vehicle(소프트웨어 정의 차량), Vehicle architecture(차량 아키텍처), Centralized computing(중앙 집중형 컴퓨팅), OTA update(무선 소프트웨어 업데이트), Software platform(소프트웨어 플랫폼)

1. 서론

최근 자동차 산업은 기능 업데이트의 소프트웨어화를 중심으로, 차량 개념의 변환으로 인한 구조적 전환의 흐름을 맞이하고 있다. 특히 소프트웨어 정의 차량 경우 차량 기능의 구현부터 설정 및 제어까지 기존 기계적 하드웨어 중심에서 소프트웨어 중심의 체계로 변화 재편하려는 움직임을 보이고 있다. 특히 SDV를 통해 OTA 업데이트, 중앙 집중형 컴퓨팅, 클라우드 연계 서비스 등을 제공하며, 사용자에게 유연성과 확장성 있는 기술을 제공하려 하고 있다.¹⁾ 또한 ICT 기업과 중견 OEM을 중심으로 SDV는 활발히 도입되고 있으며, 미래 자동차 내 아키텍처 구조의 전환점을 제시하고 있다.²⁾

다만 기존 자동차 제조사들 경우 그간 축적된 내연기관(ICE) 기반 기술 역량을 바탕으로, SDV 도입에 보다 신중하고 점진적인 전략을 취하고 있으며, 일부 기업은 하이브리드 시스템이나 기존 엔진 제어 구조 위에 소프트웨어 요소를 통합함으로써, 자신들의 핵심 기술 자산을 유지하는 동시에 새로운 기술 흐름에도 유연하게 대응하고 있다.^{3,4)}

본 논문은 이러한 산업적 흐름을 바탕으로 한 SDV의 개념과 주요 아키텍처(도메인 기반, 존 기반, 중앙 집중형 구조) 비교 분석을 토대로 통합 전략을 제시하고자 한다. 이를 위해 주요 제조사들의 간의 SDV 기술 전략을 비교하였으며 내연기관 및 하이브리드 플랫폼 내 구현

*Corresponding author, E-mail: jkim@sungshin.ac.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

가능한 SDV 아키텍처 예시를 통해, 기존 ICE 기술과 SDV 기술 간의 연결 가능성과 기술적 접점 및 연계점을 분석하였다. 이를 통해 SDV가 하나의 독립적인 기술 흐름을 넘어 다양한 차량 플랫폼 위에서 융합적으로 발전할 수 있는 가능성에 대한 전략을 제시하고자 한다. 이와 병행하여 자동차 산업이 보다 균형 잡힌 아키텍처 전략을 수립하기 위한 시사점을 제공한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 SDV가 진행된 배경 및 기존 차량의 한계점에 대해서 설명한다. 제3장에서는 SDV 구조 및 시스템 분석을 진행하며 제4장에서는 자동차 산업 차원에서 SDV 동향 및 기업별 기술 전략에 대한 분석을 진행한다. 제5장에서는 SDV 개발의 고려 사항 및 시사점을 도출하며 본 논문의 결론을 제6장에서 제시한다.

2. SDV 배경 및 기존 차량의 한계점

SDV 개념은 소프트웨어로 정의되는 차량으로써 전통적인 전자 제어 유닛(ECU) 기반 차량 아키텍처가 가진 한계를 극복하기 위한 노력에서 출발하였다.¹⁾ 초기 차량 전장 경우 기능별 ECU를 분산 배치 설계되었으나, 이로 인한 배선 복잡성 증가, 유지보수 비용 상승, 기능 확장 난제 등의 문제가 대두되었다.²⁾

이에 따라 중앙집중형 컴퓨팅 구조와 소프트웨어 기반 제어를 핵심으로 하는 SDV 개념이 등장하게 되었으며, Google, Tesla 등 전자정보 기술 중심의 기업 위주로 발전 중에 있다.⁶⁾ 하드웨어 중심 설계로 인한 직접적인 하드웨어 교체 등이 필수적인 기존 차량과 대비하여 SDV 경우, 주요 차량 기능들을 소프트웨어로 정의하고 분리하였다. 이는 소프트웨어만을 활용한 기능 확장성과 유지보수 용이성 개선을 통해 전통 차량과의 차별화를 가지고 왔다. 특히 OTA를 통한 차량 업데이트를 가능하게 하였다.⁷⁾

기존 전통 차량 경우 전용 ECU를 통한 개별적으로 기능 제어가 되는 분산형 아키텍처를 적용하고 있다. 즉,

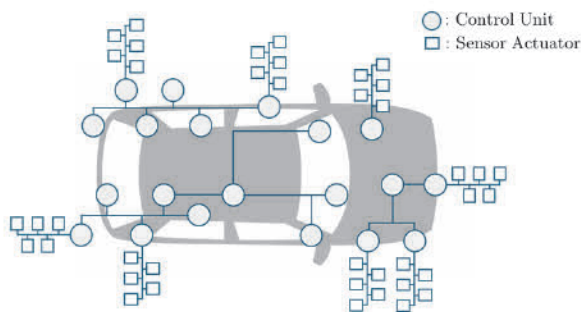


Fig. 1 Existing vehicle architecture(distributed architecture)⁸⁾

ECU의 펌웨어는 특정 하드웨어에 맞춰 설계되어, 기능별로 독립 작동한다. 이후 차량의 전자 시스템의 발전과 더불어 차량 시스템이 추가됨에 따라 기능별 ECU를 지속적으로 추가하면서 확장해왔다.⁵⁾

하드웨어를 중심으로 한 기존 구조의 분산형 아키텍처는 지속되는 ECU 추가로 인해 차량 전장 시스템 복잡성 및 확장성 한계에 부딪혔다.

기존 차량 시스템 경우 1980년대 이후 전장 시스템의 점진적 확장을 통해 형성된 레거시 구조로써 ECU가 다수 탑재되어 차량 내 기능별로 분산 배치되어 있다. 내비게이션, 에어백 등의 기능들도 전용 ECU로 독립화되어 동작한다. 또한 ECU별 자체 전원과 프로세서, 메모리를 구성한 경우들도 존재한다.⁹⁾

이러한 시스템 경우들 주로 CAN 통신 기반의 송수신을 진행하며 일부 기능을 위해 LIN 등의 별도 프로토콜들도 적용된다. 도메인별 게이트웨이를 통해 ECU 간 데이터를 교환하지만, 최대 통신 속도가 CAN의 경우 1 Mbps에 불과하여 고해상도 센서 데이터의 실시간 처리는 실질적으로 한계가 있다.

이와 더불어 차량 내 기능들의 다양화 및 고도화를 통해 ECU는 수백 개까지 증가하였으며 이러한 높은 ECU 개수로 인한 상호 간 통신 지연, 시스템 통합 복잡성 증가 및 유지보수 비용 상승 등의 문제로 이어진다. 또한, ECU의 독립적 운영으로 인한 전원 공급 및 배선 구조 문제가 필연적으로 발생하며 이는 전체 시스템의 데이터 처리 효율을 저하시킨다.^{6,10)}

과거의 차량에서는 물리적인 하드웨어 교체를 통해 소프트웨어 업데이트가 가능한 ECU가 소수에 불과했다. 반면, 최근 차량은 ADAS 및 자율주행 기술들의 발전으로 소프트웨어 중요성과 복잡성이 증가하였고, 지속적인 기능 개선과 업데이트가 필수적으로 요구되고 있는 상황이다. 이러한 차량들 경우 하드웨어 교체 방식을 사용하면 비효율적일뿐만 아니라 업데이트를 위한 주기적인 서비스센터 방문으로 사용자 경험 측면에서도 비효율적이다.¹¹⁾

이러한 문제 해결을 위해 OEM사들과 부품사, ICT 기업들은 하드웨어를 통합적으로 제어하는 SDV와 같은 소프트웨어 중심 접근 방식에 집중하고 있다.⁶⁾

3. SDV 구조 및 시스템 모델 분석

3.1 SDV의 핵심 개념과 구성요소

소프트웨어 정의 차량으로 통칭되는 SDV의 기본 개념은 소프트웨어상의 업데이트만으로도 차량의 특정 기능이 생성될 수 있으며 성능 개선까지 이루어질 수 있는 소프트웨어 기반의 차량을 의미한다.¹²⁾ 이때 소프트웨어

업데이트의 의미는 기본적인 정비소 혹은 메모리 및 카드 같은 저장장치 등 오프로드 형태로 진행되는 업데이트가 아니라 외부 무선 연동된 차량이 OTA를 통한 소프트웨어 업데이트를 의미한다.¹¹⁾ 기능과 중요도에 따라서 이러한 업데이트 및 소프트웨어 적용은 정차, 주행 중 인터페이스 사용 등 다양한 상황에서 차등적으로 적용이 가능할 수 있다. 또한 해당 업데이트는 차량 내 ECU 내 적용될 펌웨어 업데이트도 기본적으로 동반하는 바 이를 적용하는 방식에 대한 고려도 SDV라는 개념 내에 포함되어야 한다.

이러한 SDV의 주요 특징은 다음과 같이 서술될 수 있다: ① OTA 업데이트를 통한 기능 추가 및 개선이 가능하며 ② 차량 제어 기능의 중앙 집중화를 달성할 수 있다. 또한 ③ 클라우드와의 연계로 인한 고도화된 연결성을 가져올 수 있으며 이와 연계되어 ④ 사용자에게 최적화된 운전자 맞춤형 운전 경험을 제공할 수 있다. 이러한 맞춤형 경험을 위해 ⑤ 자율주행과 V2X 기반의 통신 체계는 기본적인 요소로써 구성되어야 한다.

3.2 주요 아키텍처 유형 비교

현재 자동차의 E/E 아키텍처는 SDV 구현을 위해 다양한 아키텍처 형태로 진행되고 있으며 통념적으로 도메인 아키텍처, 존 아키텍처를 거쳐 중앙집중형 아키텍처 구조로 진행하게 된다. SDV의 아키텍처별 상세 설명은 다음과 같다.⁴⁾

3.2.1 도메인 아키텍처(Domain Architecture)

2010년대 이후 ADAS(Advanced Driver Assistance Systems)와 인포테인먼트 시스템 등 차량 내 신규 기능이 늘면서 기존의 분산형 ECU 구조로는 복잡성이 과도하게 증가하는 문제가 발생하였다. 이에 따라 기능 영역별 ECU를 그룹화하는 도메인 아키텍처가 도입되었다.

Fig. 2와 같이 주요 기능별로 파워트레인, 차체 제어, 인포테인먼트, ADAS 등의 영역으로 나뉘며, 각 영역은 도메인 컨트롤러(DCU)가 담당한다. DCU당 5~8개의 ECU를 통합하여 시스템 복잡성을 줄이고, 차량 내 데이

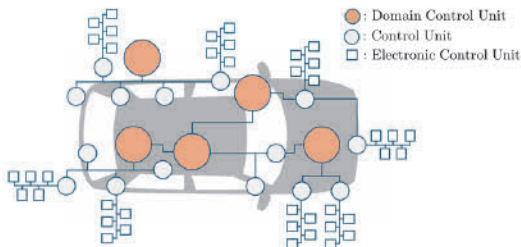


Fig. 2 Domain architecture^{8,9)}

터 통신을 고속화하기 위해 100BASE-T1(100 Mbps) 이더넷 백본을 도입했다. AUTOSAR classic 플랫폼을 기반으로 안정적인 소프트웨어 아키텍처를 구현하였다.¹³⁾

3.2.2 존 아키텍처(Zonal Architecture)

존 아키텍처는 물리적 차량 구조를 기반으로 특정 영역별(Zonal)로 ZCU(Zonal Control Unit)를 배치하는 방식이다.^{10,14)} Fig. 3과 같이 차량 내 센서 및 액추에이터에서 수집된 데이터는 해당 존의 ZCU로 집계되며, 이후 중앙 컴퓨팅 유닛(CCU, Central Computing Unit)으로 전달되는 계층적 구조를 따른다. 존 아키텍처가 적용된다면 차량 내 배선 길이를 기존 3 km에서 1.5 km로 50 % 감소할 수 있다. 테슬라는 완전한 존 아키텍처를 채택하지 않았으나 ECU 개수를 줄이고 배선 길이를 50 % 단축하는 등, Zonal 개념을 일부 적용하고 있다.^{4,15)}

3.2.3 중앙 집중형 아키텍처(Centralized Architecture)

최근 자동차 산업에서는 차량 내 컴퓨팅 성능을 극대화하고 복잡성을 줄이기 위해 중앙 집중형 아키텍처를 도입하고 SDV로서의 변모를 꾀하고 있는 추세다.

이 아키텍처의 경우 Fig. 4와 같이 기존의 분산된 전자제어장치(ECU)를 단일 고성능 컴퓨터(HPC, High Performance Computing)으로 통합하여 기능을 중앙에서

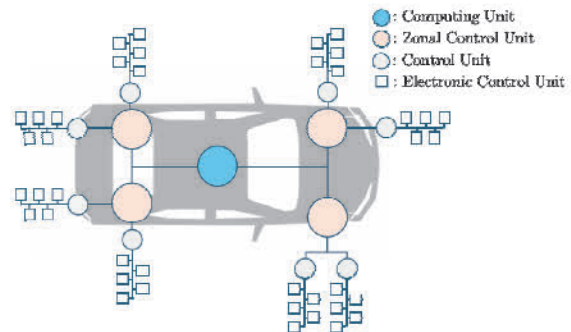


Fig. 3 Zonal architecture^{8,9)}

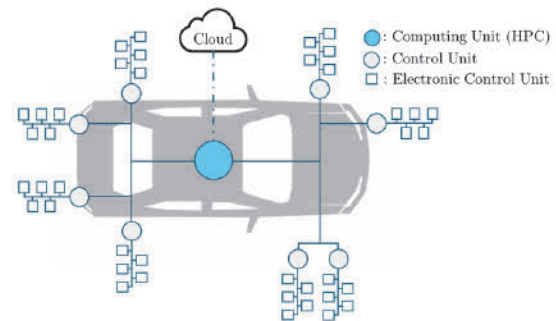


Fig. 4 Centralized architecture^{8,9)}

처리하는 구조를 가진다.¹⁰⁾

이러한 중앙 집산형 구조의 경우 직접적인 기능 적용이 가능해짐에 따라 서비스 레벨 적용이 상당히 용이해지게 된다. 또한 중앙 집중형 아키텍처 사용 시 대표적인 서비스 레벨 적용 방법론 혹은 아키텍처 형태인 SoA (Service-oriented Architecture)와 연계되어 소프트웨어 유닛 혹은 모듈을 서비스처럼 운영되는 크로스 레이어 기반의 아키텍처로써 구성도 가능해진다. 따라서 중앙 집중형 아키텍처는 외부 연동 통한 서비스 적용 및 기능 적용 차원에서 유기적으로 운용될 수 있는 형태이다. Fig. 5와 같이 HPC를 통해 SoA를 구현할 수 있으며, 자율주행 및 인공지능 기반 기능을 효과적으로 지원할 수 있다.¹⁶⁾ 현재 중앙 집중형 아키텍처는 2026년까지 전체 차량의 약 35%에 적용될 것으로 예상되며, 이는 자율주행 레벨 4 이상의 구현을 위해서 필수적인 기술 요소로써 평가받고 있다.¹⁷⁾

3.3 시스템 모델 및 산업적 접근 방식

3.2에서 설명된 아키텍처에 기반하여 SDV 시스템 경우 Fig. 6과 같이 다층 계층 구조로 정의될 수 있으며 주요 계층들은 하드웨어 계층, OS/미들웨어, 응용 어플리케이션, 클라우드 및 컨넥티비티이다.

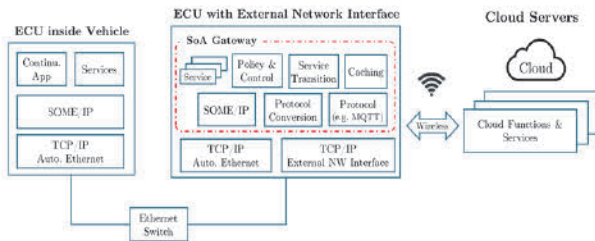


Fig. 5 Example structure of service-oriented architecture¹⁸⁾

- 하드웨어 계층: 센서, 액추에이터, ECU, SoC(System of Chip), V2X 물리장치로 구성된다. 특히 SDV 환경에서는 고성능 컴퓨팅 유닛(HPC), 멀티코어 기반 SoC, 이더넷 통신 인터페이스 등 고성능 장치의 비중이 증가하고 있다. 이러한 장치는 상위 소프트웨어 계층의 요구를 실시간으로 처리할 수 있는 연산 성능과 통신 대역폭이 요구된다.
- 하드웨어 추상화 계층(HAL): 하드웨어와 운영체제 및 미들웨어 사이의 표준화된 인터페이스를 제공하여, 상위 소프트웨어가 하드웨어 구조나 제조사에 관계없이 일관된 방식으로 자원에 접근할 수 있도록 한다. 이 계층에는 차량의 바디제어, 주행 및 조향 제어, 열전력 관리, 에너지 관리, 인지, 공조(HVAC), 디바이스 드라이버, 센서 및 액추에이터 인터페이스 등의 모듈이 포함된다. HAL은 하드웨어 의존성을 최소화하여 소프트웨어의 재사용성과 이식성을 높이고, 상위 계층의 개발 복잡도를 줄여 플랫폼 간 호환성을 확보하는 데 핵심적 역할을 수행한다. 이는 OTA 업데이트와 보안 기능 통합을 통해 SDV의 연속적인 고도화와 플랫폼 확장을 가능하게 하는 핵심 계층이다.
- OS 및 미들웨어: 하드웨어 자원의 제어와 응용 소프트웨어 실행 환경을 제공하는 중간 계층이다. 대표적으로 RTOS, Hypervisor, 차량용 미들웨어가 포함되며, 멀티 ECU 간 자원 공유, 스케줄링, 시간 결정성 보장, 서비스 디스커버리 등을 담당한다. 이 계층은 SDV의 실시간성 및 안전성 확보를 위한 핵심적 역할을 수행한다.
- 응용 어플리케이션: ADAS, 주행 제어, 인포테인먼트 등 차량의 구체적인 기능 블록으로 구성된다. 계층 구조 내에서 상위 모듈들은 기능별로 분리된 마이크로 서비스 형태로 설계되며, OTA 업데이트나 기능 추가

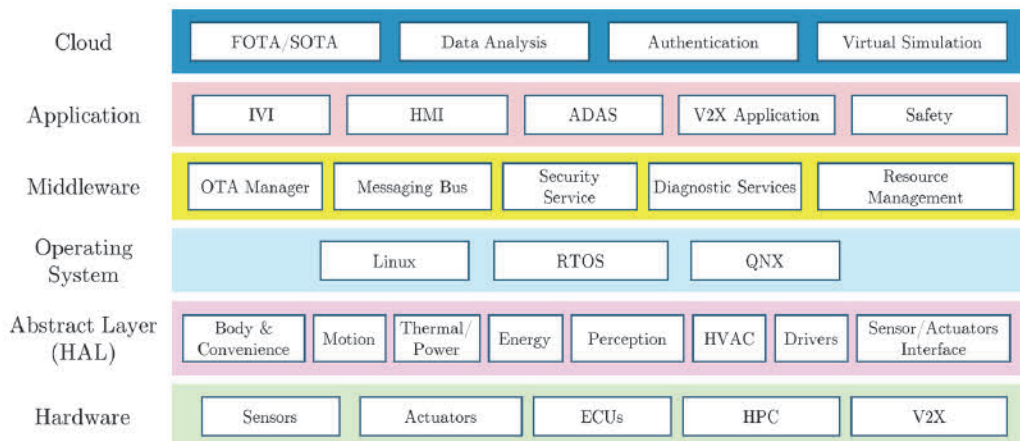


Fig. 6 Generalization of basic SDV software architecture structure^{19,20,21)}

및 제거가 용이한 유연한 구조를 지향한다.

- 클라우드 및 커넥티비티: 차량 외부와의 데이터 연계 및 원격 제어 기능을 담당한다. 이 계층은 차량 외부인 프라와의 V2X 통신 기능, FOTA/SOTA 업데이트, 차량 데이터 분석, 디지털 트윈 기반 진단 등 다양한 기능을 포함하며, SDV의 지속적인 진화를 가능하게 하는 핵심 인프라로 작용한다. 차량 내 통신 게이트웨이와 연동하여 보안 인증, 업데이트 대상 식별, 백엔드 데이터 학습 등을 수행한다.

3.4 OTA 무선 업데이트

OTA 시스템은 게이트웨이 제어기를 중심으로, 차량 내부 IVN과 클라우드 간 인터페이스 역할을 수행하며, CAN, LIN, Ethernet 등 이기종 네트워크 간 프로토콜 변환을 지원한다. UN R155(CSMS), Sums 요구사항에 따라 보안 전용 ECU가 별도 운용되며, 여기에는 소프트웨어 형상 관리, 업데이트 사전 검증, 침입 탐지 시스템(IDS)이 통합된다.²²⁾ 업데이트 콘텐츠는 SHA-256 해시 및 ECDSA 기반 전자서명으로 무결성이 보장되며, MQTT 기반 메시징 프로토콜을 통해 전송된다. 수신된 패키지는 듀얼 बैं크 구조의 플래시에 기록되고, A/B 파티션 전환을 통해 롤백이 가능한 구조로 적용된다. 이와 함께 TLS 1.3 암호화 채널, X.509 인증서 기반 인증, TPM 기반 Secure Boot 등 다층 보안 체계가 구축되어 있다.²²⁾

이러한 아키텍처는 고도화된 안정성과 신뢰성을 지향하지만, 실차 환경에서는 여전히 통신 지연, 전원 조건 변화, ECU 간 의존성 등의 요소로 인해 예기치 못한 오류 가능성이 완전히 배제되지 않는다는 점이다. Tesla, BMW 등 주요 OEM 사례에서도 OTA 적용 이후 일부 기능 저하, 시스템 재부팅, 사용자 불만 등이 관찰되고 있으며,²³⁾ 이는 OTA가 SDV 구현의 핵심 인프라이면서도 실사용 안정성 면에서는 여전히 정교한 운영 체계와 장애 대응 프로세스 정착이 요구되는 과도기적 기술임을 시사한다.

3.5 내연기관/하이브리드 기반 SDV 사례 분석

SDV 기술은 전기차 플랫폼뿐 아니라, 기존 내연기관(ICE) 및 하이브리드(HEV) 차량 플랫폼에서도 구현 가능한 확장성을 지닌다. 특히 도메인 기반 E/E 아키텍처는 여러 개의 분산형 ECU를 통합하는 방향으로 발전하고 있으며, ICE 차량에서도 적용이 가능하다. PwC 기술 보고서에 따르면, 기존 엔진 제어, 변속기, 배기가스 후처리 등 기능을 하나의 파워트레인 도메인 컨트롤러로 통합함으로써, 소프트웨어 정의 기반의 실시간 제어 최적화를 가능하게 한다. 이러한 접근은 ICE 아키텍처에 SDV 개념을 적용할 수 있는 대표적 사례로 간주된다.¹⁷⁾

OTA 업데이트 기능 또한 ICE 기반 차량에서의 소프트웨어 정의 구현을 가능케 한다. 이러한 방식은 파워트레인 시스템의 성능 향상뿐만 아니라 유지보수 측면에서도 비용 효율성을 제공할 수 있다.¹⁷⁾

ICE 및 HEV 플랫폼에서의 SDV 적용은 전통적 파워트레인의 구조적 한계(저속 시 후처리 활성화 지연, 분산 ECU로 인한 기능 통합·최적화 제약 등)를 실증적으로 보완하며, SDV 개념의 범용성을 확인해 준다. 48V 마일드 하이브리드 중대형 트럭에서 전기히터(EHC)로 후처리 워밍업을 단축하고 실주행 및 배출·효율 개선을 확인한 사례가 보고되었다.²⁴⁾ 근접 배치 SCR와 언더플로어 SCR를 조합한 Twin-dosing 시스템은 주행 상태와 NH₃ 슬립 예측을 반영해 이종 분사를 정밀 제어하는 소프트웨어 구조가 제시되었다.²⁵⁾ NH₃ 센서를 이용한 페루프 분사와 NOx 및 NH₃ 슬립 동시 예측 기반 보정 기법도 실험적으로 검증되어 왔다.^{26,27)} 이러한 요구는 분산 ECU를 도메인 컨트롤러 등 중앙화된 연산 자원으로 재구성함으로써 ICE를 포함한 다양한 파워트레인에서 토크·변속·48V 전원망 조율, 열관리, OBD(On-Board Diagnostics) 등을 통합하고 실시간 최적화할 수 있는 SDV 아키텍처로 연결된다.^{28,29)} 나아가 디지털 트윈·시뮬레이션 도구는 클라우드 분석-모델 기반 개발-OTA 갱신으로 이어지는 SDV 워크플로를 ICE 및 HEV 영역으로 확장하는 기반을 제공한다.³⁰⁾

한편, 서비스 지향 아키텍처(SoA)의 도입은 하이브리드 파워트레인 시스템에서 엔진과 전기모터 간 제어 로직을 모듈화된 API 형태로 구현할 수 있게 한다. 토크분배 제어 API를 표준화함으로써 차량 제어 시스템(CPS)은 주행 상황에 따라 엔진 출력과 모터 출력의 비율을 실시간으로 조정할 수 있으며, 이는 미들웨어 계층에서 이더넷 기반의 고속 통신 구조를 통해 더욱 정교한 제어를 가능하게 한다.³¹⁾

이처럼 ICE 및 하이브리드 플랫폼에서의 SDV 구현 사례는 기존 파워트레인 기술의 한계를 극복함과 동시에, SDV의 기술적 범용성을 증명한다. 이러한 사례들은 전통적인 파워트레인 기술과 SDV의 접목이 연속선상에서 진행되어야 한다는 것을 시사한다.

4. 자동차 산업 동향 및 기업별 기술 전략 분석

AI 기술의 급속한 발전과 소비자들의 소프트웨어 경험 확대는 차량 레벨에서도 새로운 사용자 경험에 대한 요구를 높이고 있다. 이에 따라 차량 또한 하드웨어에 맞춰 소프트웨어를 개발하던 기존 방식에서 벗어나, 사용자가 지속적으로 새로운 기능과 서비스를 경험할 수 있는 SDV가 미래 차량 기술로써 더욱 확장되고 있다.

이러한 흐름 속에서 차량 제조사들 또한 기존의 생산 및 개발 방식을 재편하려는 시도를 보이고 있다. 그러나 SDV는 여전히 선도적인 개념으로, 기업의 성격과 산업 영역에 따라 접근 방식에 뚜렷한 차이를 보인다. 따라서 기업별 기술 전략을 유형별로 분석하고, SDV의 실현 방향 및 접근법 파악이 중요하다. 본 절에서는 주요 자동차 OEM 및 ICT 기업을 중심으로, 각 기업의 SDV 기술 도입 전략과 산업 내 위치를 사례 기반으로 분석하고자 한다.

4.1 자동차 제조사(OEM)

우선 주요 자동차 제조사들의 경우 Table 1과 같이 대폭 변화보다는 기존 개발 구조상의 점진적인 변화를 꾀하는 형태를 취하고 있다. 소프트웨어의 복잡성, 품질관리, 전통적 개발 문화 상충 등의 시행착오도 병행되고 있어 완전한 SDV 대중화까지는 추가적인 시간이 필요할 전망이다.

르노의 경우 기존 자동차 OEM의 대표적인 경우로 기존 전기차 하드웨어 기반 하에 OS 및 서비스를 적용하는 형태로 구성되어 있다. 이러한 형태를 토대로 하여서 디지털 트윈을 포함한 클라우드 기반의 기술 및 서비스 적용을 바라보고 있다.^{32,33)}

현대자동차그룹은 SDV(Software-Defined Vehicle) 전환 가속을 위해 Pleos를 발표하였다. Pleos는 차량 운영체제(Vehicle OS), 차세대 인포테인먼트 시스템(Connect), 개방형 개발 플랫폼(Playground)으로 구성된다. Pleos는 고성능 차량용 컴퓨터와 각 준별 제어를 통합한 E/E

아키텍처를 기반으로, 기존 대비 제어기 수를 약 66% 감소시켜 시스템 복잡성과 중량을 줄이는 방향으로 설계되었다.²⁰⁾ Pleos는 전용 플랫폼을 통해 외부 개발자에게 SDK 및 API를 지원하여 차량, 클라우드, 모바일을 연동하는 차량용 앱과 서비스를 개발 및 배포할 수 있도록 지원하고 있다.^{19,20)}

Toyota의 Arene OS^{34,36,37)}는 차량 내 소프트웨어 아키텍처의 모듈화와 가상화 기반 개발 환경을 지원하는 SDV용 플랫폼이다. 이 시스템은 OTA 업데이트, 실차 없이 기능 검증이 가능한 시뮬레이션 도구, 그리고 주행 감각 커스터마이징 기능을 제공한다.³⁶⁾ Toyota의 특이 사항은 4가지 공통 ECU로, AD/ADAS, Cluster, IVI, Central을 4가지 공통 ECU로 지정하여 모든 자동차에 동일하게 적용할 계획이다. 2026년, 배터리 전기차(BEV)인 렉서스(LF-ZC)에서 Arene OS를 안정화시킨 후 전 차종 확대 계획이었지만 추진에 난항을 겪고 있다.^{34,36)}

Tesla의 경우 다른 OEM이 기존 개발 구조상의 점진적인 변화를 추구하는 것과 다르게 차량 설계 초기 단계부터 소프트웨어 중심의 아키텍처를 채택하여 미래 자동차의 발전에 앞장서고 있다. Model 3 및 Model Y에서 중앙집중형 E/E 아키텍처를 도입하여, 약 20개의 ECU로 차량 기능을 통합 관리하고 존 아키텍처를 통해 배선 복잡성을 줄이고 유지보수 효율성을 향상했다.^{6,37,38)} 그러나 테슬라의 이러한 급진적인 SDV 구현 방식은 기존 자동차 산업의 품질 관리 및 안전 표준과의 충돌 가능성도 내포하고 있으며 일부 OTA 업데이트 사례에서는 기능

Table 1 SDV implementation strategies and technical features of major OEMs

Company	Architecture strategy	SW development approach	Key platforms / technologies	SDV-related characteristic
Renault ^{32,40)}	Traditional E/E-based	Adoption of OS and cloud services	Digital twin	Expanding from hardware-centric structure to software services
Hyundai ⁴¹⁾	Enhanced E/E architecture	HW-SW decoupling, in-house OS development	Integrated OS	Increasing investment to secure proprietary SDV platform
Toyota ^{34-36,42)}	Modularization + Virtualization	Arene OS development	Arene OS	Simulation-based verification and OTA-ready platform
Tesla ^{6,37)}	Zonal architecture → Centralized	Proprietary OS, OTA-based	FSD chip, OTA	Fully centralized computing and independent software ecosystem
Stellantis ^{43,44)}	STLA brain	SoC-based integrated control	STLA Brain	SoC integration and enhanced OTA flexibility
Volvo ⁴⁵⁾	HPC-based	NVIDIA SoC utilization	DRIVE Orin/Thor	Transitioning to AI-computing-centric SDV architecture
BYD/Xpeng/Li auto ⁴⁶⁻⁴⁸⁾	Zonal + Thor based	NVIDIA ecosystem-based	NVIDIA Thor, Omniverse, Isaac	Full-stack AI-based SDV, integration of autonomous driving and infotainment

안정성에 대한 우려도 제기된 바 있다.³⁹⁾

4.2 자동차 부품사

자동차 부품 개발사들 경우 Table 2와 같이 기존 구성 중인 부품 레벨에서부터 시작하여 소프트웨어화 등을 진행할 수 있어 기본적인 자동차 생태계를 고려해야 하는 전통 OEM과 달리 상당한 SDV 개발을 부품 레벨로 진행할 수 있는 입장이다. 거대한 자동차 전체를 보는 입장이 아닌 만큼 부품별로 영역화해서 신규 개발 및 연구를 진행할 수 있는 여지가 충분하다.

보쉬의 경우는 기능 및 도메인 영역별로 소프트웨어 구성요소를 분리하여 다양한 OEM사들을 대응할 수 있도록 모듈형 SW 아키텍처를 지향하고 있다. SoC 혹은 마이크로컨트롤러 제어기에 기반한 VCU를 통해 실시간 제어와 기능 안전 요구를 고려한 구조를 방향성으로 추진하고 있다.²⁷⁾ 또한 보쉬는 클라우드 및 네이티브 개발, 마이크로서비스, DevOps를 핵심으로 하는 소프트웨어 서비스 전환 전략을 제시하고, 지속적 통합·배포와 OTA 중심의 소프트웨어 제공 체계를 강조한다.⁴⁹⁾

컨티넨탈은 SDV 아키텍처의 발전을 위해, 컨티넨탈과 인피니언 테크놀로지스 연합하에 기존의 다수 개별 제어 유닛을 HPC와 ZCU으로 대체하는 E/E 아키텍처를 공동 개발하고 있다. 이러한 구조에서 인피니언의

AURIX TC4x 마이크로컨트롤러는 RRAM 기술을 활용하여 차량 소프트웨어를 항상 대기 상태로 유지해, 시동 시 주차 보조, 공조 시스템, 서스펜션 등의 기능이 즉시 작동할 수 있도록 지원한다.^{50,51)}

유라코퍼레이션은 SDV 아키텍처 구현을 위해 48 V /12 V 전력 변환 시스템, 고전압 커넥터 및 정션 블록 등 EV 전장부품의 설계 및 생산 역량을 강화하고 있다.⁵⁵⁾ 전자파 차폐 시험실 등 160여 종의 시험 설비를 기반으로 설계·검증·양산까지 연계된 개발 체계를 갖추고 있으며, 현대자동차의 R&D 파트너로서 SDV 존 아키텍처 기반의 전원 공급 시스템을 공동 개발하고 있다.⁴¹⁾

덴소는 Woven by Toyota 협력하에 SDV 구현을 위한 중앙집중형 아키텍처를 개발하고 있다. 이들은 조직 재편과 공동 개발을 통해 소프트웨어 중심 차량 플랫폼 구축을 추진하고 있으며,⁴²⁾ 덴소는 NTT 데이터와의 제휴를 통해 대규모 차량용 소프트웨어 개발 체계를 강화하고 있다.⁵⁴⁾

4.3 ICT 기업

ICT 기업들 경우 Table 2와 같이 기본적으로 클라우드 및 플랫폼 운용 경험을 바탕으로 SDV에 대해 접근한다. 장치 레벨에서는 추상적 개념 접근으로 핵심 경쟁력인 컴퓨팅 OS, 성능 클라우드 활용 등의 대두를 통해 간접

Table 2 SDV implementation approaches by leading tier-1 automotive suppliers and ICT companies

Company	Architecture strategy	Key platforms / Technologies	SDV-related characteristics
Bosch ^{49,55,56)}	Microservice-based software platform	digital.auto (API, dreamKIT, playground)	Building a flexible structure to support multiple OEMs
Continental ^{50,51)}	HPC + ZCU-centered E/E architecture	AURIX TC4x MCU, RRAM technology	Co-developed with Infineon
Denso ⁵⁴⁾	Centralized architecture	Joint SDV platform with Toyota	Consortium based on equity partnership
Yura ^{52,53)}	Zonal architecture compatible	48 V/12 V power systems, high-voltage connectors	Supplier for Hyundai's EV project in the China market
Google ^{40,57)}	Software platform + digital twin	Android Automotive OS; Google Cloud	SDV/digital-twin collaboration with Renault Group.
Qualcomm ⁵⁸⁾	Modular SDV computing	Snapdragon Digital Chassis	Integrates connectivity, OTA, and automated-driving modules.
NVIDIA ^{45,59-61,85)}	High-performance edge computing	DRIVE Orin; DRIVE Thor; CUDA / TensorRT	Partnerships with BYD, XPeng, Volvo; EX90 uses Orin.
LG ^{62,63)}	5G V2X + infotainment	AlphaWare SDK; webOS Auto ⁶³⁾	User-personalized infotainment platform.
Sonatus ^{64,65)}	OTA optimization + unified management	Delta Update; ECU policy orchestration	Package size reduction; Cloud-based Simulation.
Wayve ⁶⁶⁾	Advanced autonomous-driving AI	AV2.0 model; multimodal sensor fusion	Data-driven adaptation to road environments.
Aptiv ⁶⁷⁾	Domain-integrated control	Smart Vehicle Architecture	Open-API, cloud-native architecture.

적인 방식이 아닌 직접적인 SDV를 운영하는 관점에 집중하는 경향을 보이고 있다.

Google은 르노와의 전략적 협업을 통해 Android automotive OS 기반의 차량용 소프트웨어 플랫폼과 Google Cloud를 통합한 솔루션을 제공하고 있다.³⁴⁾ 특히 차량 데이터 분석과 예측 기능을 강화하기 위해 디지털 트윈 기술을 적용하고 있으며, 이는 배터리 상태 예측, 충전소 안내 등 다양한 차량 서비스에 활용된다. 또한 퀄컴의 Snapdragon 플랫폼과 결합된 생성형 AI 기반 대화형 음성 인터페이스와 실시간 지도 업데이트 기능을 확장하고 있다.^{40,57)}

Qualcomm의 Snapdragon digital chassis는 차량 내 컴퓨팅, 통신, 인포테인먼트, 클라우드 연계를 통합한 SDV 전용 플랫폼으로, 고성능 저전력 SoC 기반의 모듈화된 아키텍처를 제공한다. Snapdragon ride는 자율주행용 센서 융합 및 실시간 AI 추론 처리를 지원하고, Cockpit 플

랫폼은 다중 디스플레이 및 음성 기반 인터페이스를 구현한다. Auto connectivity는 5G, Wi-Fi, V2X 기반 통신 모듈을 통합하며, Car-to-Cloud는 OTA 업데이트, 원격 진단, 기능 확장을 위한 클라우드 연계를 담당한다.⁵⁸⁾

Nvidia는 고성능 SoC인 DRIVE AGX Orin을 통해 레벨 2~5 수준의 자율주행을 지원하고 있으며, CES 2025에서 공개된 차세대 Thor AI 칩은 엣지 AI 처리 능력을 한층 강화하였다.^{40,59)} 소프트웨어 생태계 측면에서는 CUDA, TensorRT와 같은 API를 기반으로 다양한 자율주행 소프트웨어와의 호환성을 유지하고 있으며,⁶¹⁾ 벤츠와의 협력을 통해 고성능 컴퓨팅 기반의 SDV 아키텍처 공동 개발을 진행 중이다.

LG는 5G 기반 V2X 통신과 보안 프로토콜을 접목하여 실시간 차량-인프라 연결성을 확보하고 있으며, 운전자 생체 신호 분석 기반의 AI 센싱 기술을 통해 피로도와 집중도 모니터링 기능을 제공한다. 자체 개발한 LG AlphaWare

Table 3 OEM software-defined vehicle (SDV) development and deployment status (◎ = mass production, ○ = development, △ = under development, X = no official evidence)

Company	OTA	Proprietary SDV SW / Platform	Centralized / Zonal E/E	Notes
Tesla	◎	○	◎	Continuous OTA updates; Proprietary FSD HW/stack-based central computing ^{15,39)}
Mercedes-Benz	◎	○	○	Expanding MB.OS deployment ^{70,71)} ; Transition to HPC-based architecture ⁷⁰⁾
BMW	◎	◎	○	OS8/9 & RSU OTA ^{72,73)} ; Transition to centralized architecture ⁷³⁾
Volkswagen group / CARIAD	◎	△	○	VW.OS 2025 plan ⁷⁴⁾ ; Regular OTA for ID. series ⁷⁵⁻⁷⁷⁾
Toyota	△	◎	○	Arene OS ^{34,36)} ; Preparing OTA for selected BEV/HEV models ³⁴⁾
Hyundai motor group	◎	◎	○	Pleos OS ^{19,20)} ; OTA rollout planned for selected models ¹⁹⁾
General motors	◎	△	○	Full-line VIP OTA ⁷⁵⁾ ; Gradual Ultifi deployment ⁷⁶⁾
Ford	◎	△	○	Power-Up OTA ⁸⁰⁾ ; Service expansion based on AAOS ⁸¹⁾
Volvo cars	◎	△	◎	OTA ⁸²⁾ ; NVIDIA Orin HPC in mass production (EX92) ^{45,83)}
BYD	◎	△	○	DiLink OTA ⁸⁴⁾ ; Next-gen rollout with Thor platform ⁸⁵⁾
Stellantis	△	◎	△	STLA Brain OTA in development phase ^{86,87)}
Renault	△	△	X	OTA development in partnership with Google ^{33,57,88)}
Honda	△	△	△	e:Architecture ⁸⁹⁾ ; ASIMO OS in development ⁹⁰⁾
Nissan	△	△	△	Joint SDV platform R&D with Honda ⁹¹⁾
Geely / Zeekr	△	△	○	SEA OTA support ^{92,93)} ; Partial Thor/Orin deployment ^{59,94,95)}
SAIC (IM)	△	△	○	Partial central computing deployment with Orin ⁹⁶⁾
NIO	◎	△	◎	Adam HPC with mass production OTA ⁹⁷⁾
XPeng	○	△	○	Thor adoption in selected models ^{46,98)}
Li Auto	◎	△	○	Orin HPC with mass production OTA (HD map-free NOA) ^{47,48)}

SDK는 차량 제어와 인포테인먼트 기능을 통합 지원하며, webOS auto 플랫폼은 OTA 기반 콘텐츠 확장성과 사용자 경험 향상에 초점을 맞춘 확장형 소프트웨어 솔루션이다.⁶²⁾

Sonatus는 OTA 업데이트 효율성을 위해 Delta 업데이트 기술을 적용하여 패키지 크기를 최대 95%까지 축소하였으며,⁶⁴⁾ 클라우드 기반 디지털 트윈 시뮬레이션을 통해 사전 검증을 수행함으로써 업데이트 실패 가능성을 최소화하고 있다. 또한 ECU 펌웨어 및 운영 정책의 통합 관리를 위한 단일 제어 인터페이스를 제공하여 유지보수와 기능 확장의 효율성을 높이고 있다.⁶⁵⁾

Wayve는 AV2.0 자율주행 AI 모델을 통해 지역별 도로 환경과 운전 패턴에 자동 적응 가능한 학습 시스템을 구현하고 있다. 또한 멀티모달 센서 융합 기술(카메라·라이다 통합)을 통해 실시간 의사결정 성능을 강화하였고, AI모델의 일반화 역량을 지속적으로 고도화하고 있다.⁶⁶⁾

Aptiv는 Smart vehicle architecture™를 통해 차량 내 도메인 기능을 존 컨트롤러로 집중 제어하고 있으며, 이는 센서 및 액추에이터 IO의 고속 네트워크 처리를 가능하게 한다. 오픈 서버 플랫폼은 클라우드 네이티브 애플리케이션과의 통합을 위한 표준 API를 제공하며,⁶⁷⁾ OTA 기반으로 주행 보조 및 인포테인먼트 기능의 유연한 업그레이드를 지원함으로써 SDV 환경에서의 기능 정의와 진화를 가능하게 한다.

4.4 종합적인 SDV 개발 방향성

상기 언급된 자동차사부터 부품사, 그리고 ICT 기업 차원에서의 SDV 개발의 경우 기업별 상황에 맞춰서 진행 중인 경우가 많으며 특히 부품사와 ICT 기업 경우 개별적인 핵심 개발 요소인 자동차 부품과 소프트웨어를 기반으로 한 SDV 전용 개발들을 진행 및 추진중에 있다. 이러한 경향성을 바탕으로 하여 자동차사별로 진행 중인 SDV 구성 요소들을 크게 1) OTA, 2) 상용 SW/플랫폼, 3) 중앙집중형 아키텍처로 분류 시 기업별로 진행 단계는 Table 3과 같이 나타낼 수 있다.

특히 Table 3에서의 경향성은 다음과 같이 설명될 수 있다. 먼저 OTA 경우 일반적인 무선 업데이트 레벨로써 대부분의 기업 차원에서 신규 차량 양산 경우 적용하는 기술로써 안착된 상태이다. 이와 더불어 상용 SW 및 플랫폼 경우 자체 개발이 가능한 OEM들 경우 선행 초기 개발을 통한 적용 완료 및 이를 통한 생태계 구축을 위해 나아가고 있다. 다만 BYD 및 NIO, Ford 등의 SDV 관련한 상대적 후발 주자들 경우 소프트웨어의 경쟁력 확보 난제로 인해 SDV 연계 하드웨어 역량 확보에 집중하는 경향성을 보이고 있다. 중앙집중형 아키텍처 경우

Tesla를 제외하고 주요 OEM들 경우 부분적인 양산 단계 중에 있는 것으로 알려져 있다. 특히 Nissan, Geely와 같은 후발주자들 경우 이러한 소프트웨어 한계점을 인식하고 하드웨어 개발을 진행하면서 아키텍처도 통합해서 진행하는 경우를 보여주고 있다.

5. 주요 SDV 개발 고려 사항 및 시사점

제 4장에서는 기업별 개발 경향성 및 실제 진행 현황 등에 대한 분석 및 상세 내용들을 제시하였다. 이러한 정보들에 기반했을 때 SDV 경우 상당 부분 개발 수준이 올라왔으나 환경적 기반, 보조 및 접근법에 있어서 추가적인 요소가 필요하다. 특히 기존 OEM은 하드웨어 중심의 개발 체계 기반으로 성장해왔기 때문에, 소프트웨어 중심으로 전환되는 SDV 패러다임에 빠르게 적응하는 데 한계가 존재할 수 있다. 이에 따라 독립적인 기술 전환보다는, 소프트웨어 기반의 기업과 협업을 통해 전략적으로 SDV 관련 역량을 강화하고, 기존 하드웨어 기반의 개발 방식 위에 점진적으로 소프트웨어 아키텍처를 구축해 나가는 방식을 취하는 것이 좀 더 적절한 방향이 될 수 있다. 토요타는 자사 개발 소프트웨어 플랫폼인 Arene을 하이브리드를 포함한 신형 RAV4에 적용하였다.³⁶⁾

또한 산업 전반이 전기차 중심으로 전환이 진행되고 있으나, 현 시점에서 기존 ICE 기반 차량과 하이브리드 차량 역시 여전히 무시할 수 없는 중요한 시장을 형성하고 있다. 각 파워트레인 유형은 고유한 하드웨어 구조와 운용 환경을 가지고 있으므로, SDV 기술은 특정 차량 유형에 국한되지 않고 모든 차량군에서 적용 가능하도록 아키텍처적 접근을 병행하는 것이 필수적일 것이다. 현대자동차그룹은 Unlock the software age 글로벌 포럼을 통해 2025년까지 내연기관을 포함한 모든 차량을 SDV로 전환하겠다고 공식 발표하였다.⁶⁸⁾ 또한 스텔란티스(Stellantis)는 STLA Large 및 STLA Frame 플랫폼이 내연기관, 하이브리드, 순수 전기차 등 다양한 파워트레인을 지원하는 멀티-에너지 플랫폼임을 밝혔다.⁶⁹⁾ 이는 차량의 하드웨어 기반은 유지하되, 소프트웨어 플랫폼과 OTA 기능을 점진적으로 통합하겠다는 실질적 전략의 근거가 된다.

이러한 산업의 흐름으로 볼 때, 내연기관 차량을 기반으로 SDV 기능을 실현하기 위해서는 기존 하드웨어 구조와의 호환성을 고려한 소프트웨어 아키텍처 설계가 필수적이다. 이에 더해 하드웨어 차원의 병행 연구와 특히 기존 파워트레인 제어 시스템과의 통합성을 확보하는 것은 ICE 기반 SDV 개발의 핵심 과제가 될 수 있다.

또한 OTA는 SDV 전환에 필수적인 소프트웨어 기반 업데이트 수단으로 차량 전 생애주기 동안 핵심 역할을

수행한다. 그러나 OTA가 배포 서버, 전송 경로, 인증 체계, 차량 클라이언트 등에서 공격 표면을 확장함으로써, 업데이트가 진행되는 순간 그 자체가 보안적으로 취약한 구간이 될 수 있다.⁹⁹⁾ 따라서 OTA 수행 과정에서의 보안 강화는 단순한 패치 단계가 아닌, SDV 아키텍처 설계 초기부터 통합되어야 한다. Tesla는 과거 원격 취약성 사건 이후 OTA를 통한 코드 서명 배포, 보안 팀 상시 가동, 정기적인 취약점 식별 및 패치 등 OTA 수행 단계에서의 보안 연구와 대응의 중요성을 입증하고 있다.^{100,101)} 이처럼 OTA 수행 시점의 보안은 SDV 신뢰성 확보를 위한 필수 요소이며, OEM은 초기 아키텍처 설계 단계에서부터 이를 보장하는 실증적, 정책적 연구를 병행해야 한다.

6. 결론

본 연구에서는 SDV의 개념과 핵심 아키텍처(도메인, 존, 중앙 집중형)를 분석하고, 주요 OEM과 부품사의 기술 전략을 비교하였다. 특히 내연기관 및 하이브리드 기반 플랫폼에서도 SDV 구조가 구현 가능한지를 사례 중심으로 검토하였으며, 기존 하드웨어 중심 제어 구조와의 연계 가능성을 개념적으로 제시하였다.

OEM은 기존 하드웨어 자산을 유지하면서 OTA 기반 업데이트와 소프트웨어 아키텍처를 점진적으로 탑재하는 방식으로 SDV 전환을 추진하고 있으며, 부품사들은 고성능 컴퓨팅, 반도체, 통신 모듈 등 SDV 구현에 필수적인 핵심 부품 개발에 주력하고 있는 것으로 나타났다.

자동차 산업의 미래가 EV 중심으로 재편되는 것처럼 보이지만 ICE와 HEV 차량을 완전히 배제할 수 없으며, 실제로 OEM은 내연기관 차량까지 포함한 SDV 전환 전략을 추진하고 있다. 토요타의 Arene 플랫폼을 활용한 하이브리드 차량 적용, 현대자동차그룹의 전 차종 SDV 전환 선언, 스텔란티스의 멀티-에너지 플랫폼 전략은 이를 뒷받침하는 사례이다. 이와 더불어 테슬라는 OTA 보안 취약성 사건을 계기로 코드 서명 배포, 전담 보안팀 운영, 정기적 취약점 점검을 도입하며 보안 대응의 중요성을 입증하였다. 이러한 사례는 SDV가 EV 전용 기술이 아니라 다양한 파워트레인으로 확장 가능한 구조임을 뒷받침하며, 보안 대응이 산업적 수용성을 확보하는 핵심 과제임을 보여준다.

결론적으로 본 연구는 SDV 기술이 기존 하드웨어 중심 구조와 소프트웨어 플랫폼을 연계할 수 있는 가능성을 개념적으로 제시하였고, OEM과 부품사의 상이한 전략을 통해 산업 전반의 전환 양상을 구체적으로 설명하였다. 또한 EV를 미래차의 중심축으로 보되 ICE와 HEV 역시 병존하는 산업 현실을 반영함으로써, 단계적 전환 전략의 필요성과 타당성을 강조하였다. 향후 연구에서

는 기능 단위 구조 설계, API 정합성, 소프트웨어 통합 및 검증, OTA 보안 메커니즘 평가와 같은 과제들이 SDV의 신뢰성과 호환성을 높이는 방향으로 지속적으로 논의될 필요가 있다.

후 기

본 연구 경우 한국연구재단 논문연구과제(2022 R1G1A1009023)와 첨단산업기술보호 전문 인력 양성 사업, 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 산업혁신인재성장지원사업(RS-2024-00415520)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 ICT혁신인재 4.0 사업의 연구결과로 수행되었음(No.IITP-2022-RS-2022-00156310). 또한 과학기술정보통신부 여대학원생 공학 연구팀제 지원사업(WISET 계약 제2025-165호)으로 과학기술정보통신부와 한국여성과학기술인육성재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- 1) G.-M. Jeong, J.-H. Myung, J.-Y. Kim and B.-S. Ku, "Evolution of Software-Defined Vehicles and Their Implications for the Automotive Industry Ecosystem," *Mobility Research*, Vol.4, No.2, pp.51-74, 2024.
- 2) S. Hong, "Can We Cross the SDV Chasm?," *Transactions of KSAE*, Vol.46, No.11, pp.43-48, 2024.
- 3) Samil PwC, *Why SDV (Software-Defined Vehicles) Development Is Crucial for OEMs to Maintain Competitiveness: Software-Defined Vehicles Driving Innovation in the Automotive Industry*, 2025.
- 4) J. Kim, Y. Kim and W. Ko, "Consideration of Technical Direction of Software Defined Vehicle Integration with C-ITS Based on the Analysis of In-Vehicle Infotainments," *The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, Vol.19, No.1, pp.149-156, 2024.
- 5) J. Park and H. Lim, "Electronic Architecture Design for Realizing SDV (Software Defined Vehicle)," *Communications of the Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, Vol.41, No.12, pp.9-14, 2023.
- 6) S. Hong, "Software-Defined Vehicle and Future of Automotive Industry," *Transactions of KSAE*, Vol.44, No.12, pp.41-44, 2022.
- 7) H. Sjafrie, *Introduction to Self-Driving Vehicle Technology*, trans. E. Kim, K. Nam, Y. Seo and S. Lee, Seoul, Acorn Publishing, 2021.
- 8) F. Sindaco, *Connectivity and Networking for Future*

- Car Architectures, NXP, PowerPoint Presentation, October 2019.
- 9) Hyundai Kefico, “Modular Architecture,” <https://www.hyundai-kefico.com/ko/future-tech/modulararchitecture/content.do>, 2025.
 - 10) L. Mauser and S. Wagner, “Centralization Potential of Automotive E/E Architectures,” *Journal of Systems and Software*, Vol.219, Paper No.112220, 2025.
 - 11) Y. Shin and S. Jeon, “A Research on Secure OTA Network Protocol for Vehicles,” *Transactions of KSAE*, Vol.32, No.8, pp.625–631, 2024.
 - 12) P. Veloso Teixeira, D. Raposo, R. Lopes and S. Sargento, “Software Defined Vehicles for Development of Deterministic Services,” arXiv e-prints, arXiv:2407, 2024.
 - 13) E. Faghani, J. Andric and J. Sjoblom, “Toward an Effective Virtual Powertrain Calibration System,” SAE 2018-01-0007, 2018.
 - 14) Hyundai Motor Company, “CES 2024: Introducing SDV Exhibits and Unveiling Core Hyundai Technologies,” *Brand Journal – Mobility Solution*, <https://www.hyundai.com/worldwide/en/brand-journal/mobility-solution/sdv>, 2025.
 - 15) Samjong KPMG Economic Research Institute, “Software-Defined Vehicle (SDV) and Automotive OS Market Trends,” Samjong INSIGHT, No.88, Samjong KPMG, <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/kr/pdf/2024/insight/kpmg-korea-software-defined-vehicle-20240513.pdf>, 2025.
 - 16) M. A. U. Rehman and B.-S. Kim, “Suggestions on Future Research Directions of Autonomous Vehicles Based on Information-Centric Micro-Service,” *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.21, No.2, pp.7–14, 2021.
 - 17) Samil PwC, *Software Defined Vehicle*, https://www.pwc.com/kr/ko/insights/industry-focus/samilpwc_software-defined-vehicles.pdf, 2025.
 - 18) H. R. Jang, H. W. Cho, K. Y. Kim, Y. W. Lee and J. Y. Kim, “Practical Implementation and Performance Analysis of an OTA System for SDV-Based Embedded Devices,” *Proceedings of the Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, June 2025.
 - 19) Hyundai Motor Group, “HMG Launches ‘Pleos’ SW Brand,” *Hyundai Worldwide Newsroom*, <https://www.hyundai.com/worldwide/en/newsroom/detail/hyundai-motor-group-launches-%E2%80%9998pleos%E2%80%99-software-brand%2C-unveiling-new-sdv-technologies-and-collaborations-000000921>, 2025.
 - 20) Hyundai Motor Group, “‘Pleos 25’ Conference,” *Hyundai News (US)*, <https://www.hyundainews.com/en-us/releases/4379>, 2025.
 - 21) S. Kirchner, N. Purschke, C. Wu, M. A. Khan, D. Dixit and A. C. Knoll, “Autoframe – A Software-Driven Integration Framework for Automotive Systems,” *Proc. of the 2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp.521–528, 2024.
 - 22) A. Bazzi, A. Shaout and D. Ma, “MT-SOTA: A Merkle-Tree-Based Approach for Secure Software Updates over the Air in Automotive Systems,” *Applied Sciences*, Vol.13, No.16, Paper No.9397, 2023.
 - 23) V. Iyieke, H. Jadidbonab, A. Rakib, J. Bryans, D. Dhaliwal and O. Kosmas, “An Adaptable Security-by-Design Approach for Ensuring a Secure Over the Air (OTA) Update in Modern Vehicles,” *Computers & Security*, Vol.150, Paper No.104268, 2025.
 - 24) P. Kumar, R. Lago Sari, A. Shah and B. Merritt, “E-Heater Performance for Aftertreatment Warm-Up in a 48V Mild-Hybrid Heavy-Duty Truck over Real Driving Cycles,” *Energies*, Vol.17, No.12, Paper No.3001, 2024.
 - 25) S. Yao, D. Wang, M. Shost, J.-H. Yoo, D. Cabush, D. Racine, R. Cloudt and F. Willems, “Ammonia Sensor for Closed-Loop SCR Control,” SAE 2008-01-0919, 2008.
 - 26) B. Pla, P. Piqueras and P. Bares, “Simultaneous NO_x and NH₃ Slip Prediction in a SCR Catalyst under Real Driving Conditions Including Potential Urea Injection Failures,” *Int. J. Engine Research*, Vol.23, pp.1213–1225, 2022.
 - 27) Robert Bosch GmbH, “Vehicle Control Unit — The Powertrain Domain Controller as Central E/E Architecture Component for All Powertrain Topologies,” *Product Brochure*, https://www.bosch-mobility.com/media/global/solutions/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-solutions/gasoline-direct-injection/vehicle-control-unit/ps_summary_vcu_rgb_en_300dpi_20240506.pdf, 2025.
 - 28) FEV Group, “Navigating the Shift to Centralized E/E Architectures in SDVs,” *MathWorks Automotive Conference Slides*, <https://www.mathworks.com/videos/navigating-the-shift-to-centralized-e-e-architectures-in-sdvs-1717560511491.html>, 2025.
 - 29) L. Mauser et al., “Modern Automotive E/E Architectures – Methodical Approach for

- Centralization Evaluation of Modern Automotive E/E Architectures,” arXiv:2209.14118, 2022.
- 30) AVL, “ICE Simulation,” <https://www.avl.com/en/simulation-solutions/ice-simulation>, 2025.
 - 31) J. Park, I. G. Jang and S.-H. Hwang, “Torque Distribution Algorithm for an Independently Driven Electric Vehicle Using a Fuzzy Control Method: Driving Stability and Efficiency,” *Energies*, Vol.11, No.12, Paper No.3479, 2018.
 - 32) Renault Group, “Futurgen Insight AI – The New Frontier of the Automotive Revolution,” <https://www.renaultgroup.com/en/magazine/technology/futurgen-insight-ai-the-new-frontier-of-the-automotive-revolution>, 2025.
 - 33) PR Newswire, “Renault-Google SDV Announcement,” PR Newswire, <https://www.prnewswire.com/news-releases/renault-group-and-google-accelerate-partnership-to-develop-the-vehicle-of-tomorrow-and-strengthen-renault-groups-digital-transformation-301671093.html>, 2025.
 - 34) Woven by Toyota, “Arene Debuts in Toyota’s All-New RAV4,” <https://woven.toyota/en/our-latest/20250521/>, 2025.
 - 35) Woven by Toyota, “News Overview,” <https://woven.toyota/en/>, 2025.
 - 36) Toyota Motor Corporation, “Intelligence Technology,” https://global.toyota/pages/news/images/2023/06/13/0500/intelligence_technology_en.pdf, 2025.
 - 37) S. Lu, N. Ammar, A. Ganlath, H. Wang and W. Shi, “A Comparison of End-to-End Architectures for Connected Vehicles,” *Fifth International Conference on Connected and Autonomous Driving (MetroCAD)*, pp. 72-80, 2022.
 - 38) IAR Systems, “Annual Report 2023,” <https://storage.mfn.se/a796df0b-918d-4f99-9693-fcf5eb9c5748/iar-ar-2023-eng-final.pdf>, 2025.
 - 39) Tesla, “Software Updates,” <https://www.tesla.com/support/software-updates>, 2025.
 - 40) Renault Group, “Renault Group and Google Accelerate Partnership to Develop the Vehicle of Tomorrow and Strengthen Renault Group’s Digital Transformation,” <https://media.renaultgroup.com/renault-group-and-google-accelerate-partnership-to-develop-the-vehicle-of-tomorrow-and-strengthen-renault-groups-digital-transformation>, 2025.
 - 41) Hyundai Motor Company, “Hyundai Motor Develops Next-Generation E/E Architecture,” <https://www.hyundai.co.kr/news/CONT0000000000163023>, 2025.
 - 42) Toyota Motor Corporation, “Toyota Announces Corporate Update,” <https://global.toyota/en/news-room/corporate/39828555.html>, 2025.
 - 43) Stellantis, “Stellantis Unveils STLA AutoDrive, Hands-Free and Eyes-Off Autonomous Technology for a New Era of Driving Comfort,” https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2025/february/stellantis-unveils-stla-autodrive-hands-free-and-eyes-off-autonomous-technology-for-a-new-era-of-driving-comfort?adobe_mc_ref=, 2025.
 - 44) Stellantis, “Stellantis Implements Multifaceted Semiconductor Strategy to Ensure Supply Security, Drive Innovation,” <https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2023/july/stellantis-implements-multifaceted-semiconductor-strategy-to-ensure-supply-security-drive-innovation>, 2025.
 - 45) NVIDIA Blog, “Volvo EX90 Rolls Out (DRIVE Orin),” <https://blogs.nvidia.com/blog/volvo-cars-accelerated-computing-ai/>, 2025.
 - 46) CnEVPost, “Xpeng Reportedly Considering Shelving Plans to Adopt Thor as Nvidia Chip Suffers Delays,” <https://cnevpost.com/2024/12/16/xpeng-considering-shelving-plans-adopt-nvidia-thor-report/>, 2025.
 - 47) Li Auto IR, “Orin Adoption Announcement,” <https://ir.lixiang.com/news-releases/news-release-details/li-auto-inc-announces-adoption-nvidias-next-generation>, 2025.
 - 48) CnEVPost, “Li Auto Brings HD Map-Free NOA Feature in Latest Software Update,” <https://cnevpost.com/2024/07/15/li-auto-brings-hd-map-free-noa-software-update/>, 2025.
 - 49) Bosch, *Beyond the Hype: Turning Automotive Disruption into Opportunity*, Bosch Mobility Solutions, <https://www.bosch-mobility.com/en/mobility-topics/software-defined-vehicle/>, 2025.
 - 50) Continental AG, “Continental and Infineon Collaborate on Semiconductors for Future Automotive Applications,” <https://www.continental.com/en/press/press-releases/20230313-continental-infineon>, 2025.
 - 51) Infineon Technologies AG, “The Transformative Power of Software-Defined Vehicles,” <https://www.infineon.com/our-stories/software-defined-vehicles>, 2025.
 - 52) Yura Corporation, “R&D – Product Development,” <https://www.yuracorp.co.kr/rnd/sub01.jsp>, 2025.
 - 53) S. Lee, “All Hyundai Vehicles Will Be Equipped with CATL Battery,” <https://www.thelec.kr/news/articleView.html?idxno=17480>, 2025.
 - 54) Denso Corporation, “NTT Data Collaboration for Automotive Tech Design,” <https://www.denso.com/>

- global/en/driven-base/tech-design/nttdata_teikei/, 2025.
- 55) digital.auto, Continuous Homologation for Software-Defined Vehicles, Bosch and digital.auto Whitepaper, <https://www.digital.auto/continuous-homologation-whitepaper>, 2024.
 - 56) Bosch Rexroth, “Microservices: Small Building Blocks with Huge Potential,” <https://apps.boschrexroth.com/microsites/ctrlx-automation/en/news-stories/story/microservices-small-building-blocks-with-huge-potential/>, 2025.
 - 57) Google Cloud Blog, “Ampere Uses Google Cloud for SDV Dev,” <https://cloud.google.com/blog/products/application-development/renault-groups-software-defined-vehicles-built-on-google-cloud>, 2025.
 - 58) Qualcomm, “Automotive Solutions,” <https://www.qualcomm.com/products/automotive>, 2025.
 - 59) NVIDIA, “Wave of EV Makers Choose NVIDIA DRIVE for Automated Driving,” <https://blogs.nvidia.co.kr/blog/nvidia-enters-production-with-drive-orin-announces-byd-and-lucid-group-as-new-ev-customers-unveils-next-gen-drive-hyperion-av-platform/>, 2025.
 - 60) NVIDIA, “NVIDIA DRIVE Powers Next Generation of Transportation — From Cars and Trucks to Robotaxis and Autonomous Delivery Vehicles,” <https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-drive-powers-next-generation-transportation>, 2025.
 - 61) NVIDIA, “TensorRT,” <https://developer.nvidia.com/tensorrt>, 2025.
 - 62) LG Electronics, “LG SDV-Enabled V2X Paves the Way for Autonomous Vehicles,” https://www.lg.com/global/mobility/media-center/more-stories/lg_sdv_enabled_v2x_paves_the_way_for_autonomous_vehicles, 2025.
 - 63) LG Electronics, “LG Redefines In-Vehicle Experience With Xbox Gaming and Zoom Meetings Partnerships,” <https://www.lgcorp.com/media/release/29351>, 2025.
 - 64) Sonatus, “Updater,” <https://www.sonatus.com/products/updater/>, 2025.
 - 65) Sonatus, “DI: What OTA Update Solutions Must Deliver in the SDV Era,” <https://www.sonatus.com/resources/di-what-ota-update-solutions-must-deliver-in-the-sdv-era>, 2025.
 - 66) Wayve, “AV2.0 Technology,” <https://wayve.ai/technology/av2-0>, 2025.
 - 67) Aptiv, Aptiv ADAS Platform White Paper, https://www.aptiv.com/docs/default-source/white-papers/2024_aptiv_whitepaper_adasplatform_8-5x11_v10.pdf?sfvrsn=9960173d_29, 2025.
 - 68) Hyundai Motor Group, “Hyundai Motor Group Announces Future Roadmap for Software-Defined Vehicles at ‘Unlock the Software Age’ Global Forum,” <https://www.hyundai.com/worldwide/en/newsroom/detail/hyundai-motor-group-announces-future-roadmap-for-software-defined-vehicles-at-unlock-the-software-age-global-forum-0000000125>, 2025.
 - 69) Stellantis, “Stellantis Launches Third All-New Multi-Energy Platform: STLA Frame Offers Best-in-Class 690-Mile Electrified Range or 500-Mile BEV Range, Towing and Payload,” <https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2024/november/stellantis-launches-third-all-new-multi-energy-platform-stla-frame-offers-best-in-class-690-mile-electrified-range-or-500-mile-bev-range-towing-and-payload>, 2025.
 - 70) Mercedes-Benz Group, “Software Architects: MB.OS Strategy Update,” <https://group.mercedes-benz.com/investors/events/2023-02-mercedes-benz-group-strategy-update.html>, 2025.
 - 71) Mercedes-Benz Group, “MB.OS Strategy Presentations,” <https://group.mercedes-benz.com/dokumente/investoren/presentationen/mbsu-os-2023-presentation-markus-schaefer-magnus-oestberg.pdf>, 2025.
 - 72) BMW USA, “Remote Software Upgrade,” <https://www.bmwusa.com/explore/connecteddrive/remote-software-upgrade.html>, 2025.
 - 73) BMW, “Software-Update / RSU 안내,” <https://www.bmw.com/en/footer/software-updates.html>, 2025.
 - 74) CARIAD, “Unified Software (VW.OS 2025),” <https://cariad.technology/de/en/solutions/unified-software.html>, 2025.
 - 75) Volkswagen Newsroom, “New Functions and Greater Comfort: Volkswagen Launches Over-the-Air Updates for the ID. Family,” <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/new-functions-and-greater-comfort-volkswagen-launches-over-the-air-updates-for-the-id-family-7285>, 2025.
 - 76) Volkswagen Newsroom, “Volkswagen Introduces Over-the-Air Updates for All ID. Models,” <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/volkswagen-introduces-over-the-air-updates-for-all-id-models-7497>, 2025.
 - 77) Volkswagen of America, “Vehicle Software Updates,” <https://www.vw.com/en/owners-and-services/connectivity-and-apps/vehicle-software-updates.html>, 2025.
 - 78) GM TechLink, “Over-the-Air Software Programming / VIP,” https://gm-techlink.com/wp-content/uploads/2021/04/GM_TechLink_06_Mid-March_2021.pdf,

- 2025.
- 79) GM Authority, “GM Drops ‘Ultifi’ Brand for In-Vehicle Software Platform,” <https://gmauthority.com/blog/2024/06/gm-drops-ultifi-brand-for-in-vehicle-software-platform/>, 2025.
 - 80) Ford, “Software Updates for SYNC 4/4A,” <https://www.ford.com/support/category/technology/software-updates/>, 2025.
 - 81) Ford Media, “Ford-Google Strategic Partnership,” <https://media.ford.com/content/dam/fordmedia/fmea/South-Africa/2021/01%20FEB%2021%20FMCSA%20release%20-%20Ford%20and%20Google%20to%20Accelerate%20Auto%20Innovation.pdf>, 2025.
 - 82) Volvo Cars Media, “From Car to Cloud – NVIDIA Collaboration,” <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/331848/from-car-to-cloud-volvo-cars-expands-collaboration-with-nvidia>, 2025.
 - 83) Volvo Cars Media, “The New Fully Electric Volvo EX90 – The Start of a New Era,” <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/305657/the-new-fully-electric-volvo-ex90-the-start-of-a-new-era-for-volvo-cars>, 2025.
 - 84) BYD, “BYD DiLink,” <https://www.byd.com/en-jo/support/dilink>, 2025.
 - 85) NVIDIA Newsroom, “DRIVE Thor Powers Next-Gen BYD Vehicles,” <https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-drive-powers-next-generation-transportation>, 2025.
 - 86) Stellantis, “Stellantis Unveils Multiple World Premiere Software-Driven Products Addressing B2C and B2B Customers,” <https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2024/june/stellantis-unveils-multiple-world-premiere-software-driven-products-addressing-b2c-and-b2b-customers>, 2025.
 - 87) Reuters, “Stellantis Launches In-House STLA AutoDrive,” <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/stellantis-launches-first-in-house-automated-driving-technology-2025-02-20/>, 2025.
 - 88) Renault Group Media, “Renault-Google Expand Partnership (SDV & Digital Twin),” <https://media.renaultgroup.com/?p=133673>, 2025.
 - 89) Honda Global, “Honda Electric Vehicles (EV),” https://global.honda/en/tech/Honda_electric_veichle_EV/, 2025.
 - 90) Honda News, “ASIMO OS Announcement,” <https://hondanews.com/en-US/releases/honda-0-saloon-and-honda-0-suv-prototypes-make-global-debut-at-ces-honda-announces-new-asimo-operating-system>, 2025.
 - 91) Nissan Global Newsroom, “Nissan and Honda Agree to Joint Research in Fundamental Technologies for Next-Generation SDV Platform,” <https://global.nissannews.com/en/releases/240801-02-e>, 2025.
 - 92) Geely Holding, “ESG Report 2024,” <https://global.geely.com/-/media/project/web-portal/2025/esg-report/esg-report-2024.pdf>, 2025.
 - 93) Geely Holding, “Geely Holding Launches Open-Source Electric Vehicle Architecture,” <https://zgh.com/media-center/news/20200923-1/?lang=en>, 2025.
 - 94) NVIDIA Newsroom, “Wave of EV Makers Choose NVIDIA DRIVE for Automated Driving,” <https://nvidianews.nvidia.com/news/wave-of-ev-makers-choose-nvidia-drive-for-automated-driving>, 2025.
 - 95) Gasgoo AutoNews, “ZEEKR Unveils Four Strategies for Global Market Expansion at CES 2025,” https://autonews.gasgoo.com/china_news/70035638.html, 2025.
 - 96) NVIDIA Blog, “IM AI: China Automaker SAIC Unveils EV Brand Powered by NVIDIA DRIVE Orin,” <https://blogs.nvidia.com/blog/saic-im-ev-nvidia-drive-orin/>, 2025.
 - 97) IDIA Newsroom, “NIO-NVIDIA Orin Partnership,” <https://nvidianews.nvidia.com/news/nio-partners-with-nvidia-to-develop-a-new-generation-of-automated-driving-electric-vehicles>, 2025.
 - 98) NVIDIA Investor News, “XPENG Adopts DRIVE Thor,” <https://investor.nvidia.com/news/press-release-details/2024/NVIDIA-DRIVE-Powers-Next-Generation-of-Transportation—From-Cars-and-Trucks-to-Robotaxis-and-Autonomous-Delivery-Vehicles/default.aspx>, 2025.
 - 99) A. Y. Bazzi, Secure Software Over-the-Air Updates in Automotive Modern Software Architecture, Ph.D. Dissertation, Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Michigan–Dearborn, Dearborn, MI, USA, 2024.
 - 100) Keen Security Lab, “Car Hacking Research: Remote Attack to Tesla Motors,” Keen Security Lab of Tencent Blog, <https://keenlab.tencent.com/en/2016/09/19/Keen-Security-Lab-of-Tencent-Car-Hacking-Research-Remote-Attack-to-Tesla-Cars/>, 2025.
 - 101) Keen Security Lab, “New Car Hacking Research: 2017 Remote Attack Surface on Tesla Motors,” Keen Security Lab of Tencent Blog, <https://keenlab.tencent.com/en/2017/07/27/New-Car-Hacking-Research-2017-Remote-Attack-Tesla-Motors-Again/>, 2025.