

소프트웨어 정의 차량 내 자율주행을 위한 차량 전기/전자 아키텍처 설계 사양 분석

장하람, 배이례, 김준영*

성신여자대학교

220256120@sungshin.ac.kr, 20231369@sungshin.ac.kr, *jkim@sungshin.ac.kr

Design Specification Analysis of Vehicle Electrical/Electronic Architecture for Autonomous Driving in Software Defined Vehicle

Haram Jang, Ire Bae, Jun Young Kim*

Sungshin Women's University

요약

SDV 기반 자율주행 차량에서는 기존 분산 ECU 중심 구조의 한계를 극복하기 위해 도메인 및 존 기반 E/E 아키텍처로의 전환이 요구된다. 본 논문은 네트워크 대역폭과 지연, 서비스 지향 미들웨어, OTA 업데이트 요구와 같은 설계 요인을 정의하고, UNECE R155/R156 등 규제 준수가 아키텍처 선택에 미치는 영향을 분석한다. 또한 Tesla, 기존 OEM, 중국 사례 비교를 통해 네트워크 구조와 OTA 전략이 컴퓨팅 토폴로지 형성에 미치는 차이를 도출한다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 SDV 전환기에 있는 국내 OEM을 위한 설계 시사점을 제시한다.

I. 서론

최근 소프트웨어 정의 차량(SDV, Software-Defined Vehicle)과 자율주행(AD, Autonomous Driving)의 융합은 차량 E/E 아키텍처의 근본적 재설계 요구로 이어지고 있다 [1,2]. SAE J3016에서 정의한 자율주행 레벨 달성을 더불어, UNECE R155 (사이버보안 관리 시스템, CSMS), R156 (소프트웨어 업데이트 관리 시스템, SUMS)과 같은 국제 규제 준수를 위해서 대규모 센서 데이터의 실시간 통합 처리, 중앙집권적 연산, 지속적인 OTA (Over-The-Air) 업데이트가 필수적이다 [3,4,5]. 기존의 분산형 전자 제어 유닛 (ECU, Electronic Control Unit) 중심 아키텍처는 이러한 요구사항을 충족하기에 구조적 한계가 있으며, 이에 따라 도메인 컨트롤러, 존(Zonal) 아키텍처, 중앙 차량 컴퓨터로의 전화가 가속화되고 있다 [2]. 특히 자율주행과 SDV 환경에서는 차량 내부 네트워크 대역폭 및 지연 특성과 OTA 업데이트 위한 통신 구조가 아키텍처 설계 핵심 제약 조건으로 작용한다. 이에 따라 차량 네트워크는 CAN (Control Area Network) 중심에서 이더넷 기반으로 전환 중이며 SOME/IP (Scalable service-Oriented Middleware over IP)와 같은 서비스 지향 통신(SOA, Service-Oriented Architecture) 프로토콜이 표준으로 자리 잡고 있다 [6,7]. 한편, Tesla의 중앙 집중형 접근, 기존 OEM의 하이브리드 전환 전략, 중국의 ICV(Intelligent Connected Vehicle) 표준 주도 정책 등에서는 글로벌 기업별, 국가별로 상이한 아키텍처 선택이 관찰되고 있다 [2,8]. 본 논문은 통신, 이더넷 차량 네트워크 및 OTA 관점에서 SDV 기반 자율주행 차량의 E/E 아키텍처 설계 시 발생하는 주요 설계 조건을 분석하고, 글로벌 사례 비교를 통해 이러한 설계 선택의 구조적 원인을 정리한다.

II. E/E 아키텍처 구조 변화와 네트워크 및 OTA 요구 요인

SDV-자율주행 환경 내 주요 E/E 아키텍처 변화는 차량 네트워크 토폴로지 전화이다 [2]. 기존 분산 ECU 중심 구조는 CAN 기반으로 설계되었으나, L2+ 이상 자율주행을 위해서는 고해상도 카메라 (4K×30fps 이상), LiDAR (128채널), Radar 등 다중 센서 내 발생하는 대규모 데이터를 실시간 처리해야 한다 [3,6]. 이러한 요구사항은 CAN의 1Mbps 대역폭 한계를 초과하므로 이더넷 네트워크로 전환이 불가피하며 대역폭 경우도 Gigabit수준의 트래픽 처리가 가능해야 할 것이다 [9].

표 1 SDV 및 자율주행 환경에서 차량 E/E 아키텍처의 진화 [2]

단계	형태	특징	한계 극복	대표 사례
1	분산 ECU (Legacy)	CAN 및 기존 차량 네트워크 프로토콜	-	기존 양산 차량
2	도메인 컨트롤러	도메인별 Ethernet 도입	파워트레인 / 차체 분리	BMW iX
3	존(Zonal) 아키텍처	중앙 게이트웨이 + 존 컨트롤러	배선 30~50% 감소	Tesla HW4, Continental
4	중앙 집중형	단일 고성능 SoC	실시간 AD 처리	Tesla FSD HW

이더넷 네트워크 도입의 경우 단순 대역폭 확장을 넘어 네트워크 토폴로지 재설계를 유도하며 이를 통한 도메인 컨트롤러/존 아키텍처로의 전환 가속화를 유도한다. 이러한 구조적 변화는 배선 하네스 길이와 중량 감소 효과 연계로 보고된다 [1]. 차량 네트워크는 이러한 요구에 따라 표1 과정에 맞춰 전화되고 있다. 이더넷 기반 네트워크에서는 단순 대역폭 확장뿐 아니라, TSN (Time-Sensitive Networking) 표준을 통해 자율주행 제어에 요구되는 실시간성을 보장하고 이를 위한 트래픽 환경 세팅을 중점적으로 진행할 수 있다 [9].

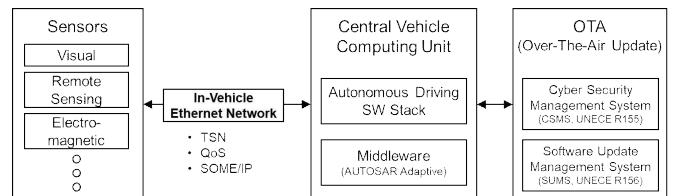


그림 1. SDV 기반 자율주행 차량의 데이터 파이프라인

OTA 업데이트는 UNECE R156 규정에 따라 차량 생애주기 동안 지속적으로 이루어져야 하며, 이를 위해 SOA가 주요 요소로 대두되고 있다 [5,6]. 또한 AUTOSAR Adaptive 플랫폼과 이더넷 네트워크상의 데이터 송수신 프로토콜인 SOME/IP를 통해서 센서 데이터 스트리밍과 자율주행 알고리즘 업데이트를 지원하는 형태로 구성할 수 있다 [7]. 이러한 네트워크 구성과 OTA 변화는 컴퓨팅 토폴로지(도메인→존→중앙)와 밀접하게 연계되어 다수 ECU에 분산된 기존 구조보다 소프트웨어 배포, 검증, 및 관리 측면에서 중앙 집중형 또한 도메인 통합형 컴퓨팅을 구조적으로 요구한다 [1,2].

III. 글로벌 SDV 아키텍처 사례 비교

실제 SDV 아키텍처 경우 기업별, 국가별로 네트워크 구조와 정책 방향에서 뚜렷한 차이를 보이며 이를 카테고리화 하면 Tesla, 기존 OEM, 중국과 같이 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 이를 기반으로 하여 네트워크, 미들웨어, OTA/보안 등의 다양한 측면에서의 아키텍처 접근 방식에 대한 비교는 표2를 참고한다.

표 2 SDV 기반 차율주행 E/E 아키텍처의 접근 방식 비교

설계 관점	Tesla	기존 OEM	중국
컴퓨팅 토폴로지	중앙 HW4 컴퓨터 + Zonal 컨트롤러	도메인 → 하이브리드	ICV 표준 내 도메인/존 통합
네트워크	통합 Gigabit Ethernet (고대역 AD 최적화)	CAN 자산 + Ethernet 혼재 (장기 공존)	C-V2X 및 고속 네트워크 표준화
미들웨어	독자 FSD 스펙 (비공개)	AUTOSAR Adaptive + SOME/IP (표준 기반)	ICV 표준 가이드라인 준수
OTA/보안	FSD 베타 빈번 OTA (CSMS준수)	공급망 포함 프로세스 인증	2025/2030 표준 시스템 구축 (GRVA)
정책 영향	기술 주도	공급망 호환성	표준 → 아키텍처 지배

Tesla는 HW4이라고 통칭되는 하드웨어 플랫폼 기반의 중앙 차에서 자체 설계 FSD SoC와 Zonal 컨트롤러를 통해 Ethernet 백본을 구성하고, 360도 센서 데이터를 실시간 융합 처리하는 중앙 집중형 아키텍처를 선택하고 있다. 이러한 접근은 OTA 업데이트 빈도와 차율주행 학습 속도 개선을 극대화하고 있다 [2,6]. 그러나 이는 성능 최적화에 강점이 있으나 중앙 컴퓨팅 의존도가 높은 구조에서의 설계 절충이 함께 논의되고 있다. VW, GM 등의 전통 OEM은 기존 CAN 자산을 유지하며 도메인 컨트롤러를 중심으로 점진적인 Ethernet 도입을 시도하는 중이다. 이는 공급망과 양산 안정성을 보장하나, 네트워크 혼재로 인한 지연 관리 및 보안 복잡도가 문제로 남는다 [2,9]. 반면 중국은 UNECE GRVA-17-27e 문서에서 명시한 2025년을 1차 목표로 ICV 표준 시스템 구축을 통해 C-V2X와 차량 내부 네트워크를 통합 표준화하고 있다. 이는 기업별 기술 최적화보다 국가 표준 정렬을 우선하는 정책 주도적 특징을 보인다 [8].

본 세 가지 카테고리 상에서의 주요 차이점은 네트워크 설계 선택이 컴퓨팅 토폴로지와 OTA 전략에 직접 영향을 미친다는 점이다. Tesla는 네트워크 통합으로 중앙 컴퓨팅을, 기존 OEM은 혼재 네트워크로 하이브리드 구조를, 중국은 표준화 네트워크로 통합 아키텍처를 선택하였다. 이는 한국 OEM이 SDV-차율주행 전환 과정에서 기존 CAN 기반 자산과 양산 공급망 제약을 유지하면서도, 차율주행과 SDV 요구사항을 충족하기 위해 Ethernet 기반 고속 네트워크를 병행하는 하이브리드 네트워크 전략과 국제 표준(C-V2X, AUTOSAR) 병행 전략을 고려해야 함을 시사한다.

추가로 네트워크 구조 선택이 컴퓨팅 토폴로지와 OTA 전략을 포함한 E/E 아키텍처 전반을 결정하는 핵심 요인임을 확인할 수 있다. Tesla는 Ethernet 기반 네트워크 통합을 통해 실시간 차율주행 처리와 OTA 운영 효율을 극대화하였으나, 중앙 집중 구조에서의 설계 트레이드오프가 함께 논의된다. 기존 OEM은 CAN 기반 자산 활용을 통해 공급망 안정성을 확보하고 있으나, CAN-Ethernet 혼재 환경에서 지연 관리 및 보안 복잡도가 증가하는 한계를 가진다. 중국은 정책 주도의 ICV 표준화를 통해 차량 내/외부 네트워크 연계성을 확보하고 있으나, 기업 단위의 아키텍처 최적화 유연성에는 제약이 존재한다. 이러한 비교를 바탕으로 도출된 주요 OEM 차원에서의 시사점은 크게 세 가지로 귀결될 수 있다. 우선 하이브리드 네트워크 전략 고려가 필수적이라고 할 수 있다. 도메인 아키텍처를 활용하여 기존 CAN 기반 자산의 이전 기간을 유지하면서 Ethernet 기반 고속 네트워크 전환

을 단계적으로 가속할 필요가 있다. 또한 국제 표준 선제 대응이 필요한데 C-V2X 및 AUTOSAR와 같은 국제 표준을 중심으로, 중국의 GRVA 기반 표준 정렬 사례를 참고한 체계적 표준 대응 전략이 요구된다. 마지막으로 OTA 중심 SDV 운영 체계 구축이 필수적이라고 할 수 있다. 특히 UNECE R155/R156 규제 준수와 SOME/IP 기반 서비스 지향 통신을 통해 SDV 운영 경쟁력을 확보할 필요가 있다. 마지막으로 상기 기술된 세 가지 시사점의 경우 기존 OEM 차원의 고려인 만큼, 전기차 전환의 강제가 아닌 하나의 옵션으로 고려되면서 중요 기술인 내연기관의 적용 가능성을 가정하고 진행해야 SDV 확장 차원에서 긍정적인 영향으로 작용할 수 있을 것이다.

IV. 결론

본 논문은 SDV-AD 환경에서 네트워크 중심의 설계 제약 사항에 대해서 조사하고, 이를 Tesla, 기존 OEM, 중국의 대표적 SDV E/E 아키텍처 사례에 적용하여 비교 분석하였다. 향후 연구는 제시된 설계 제약 프레임워크를 실제 차량 플랫폼에 적용하여 네트워크 지연, 대역폭 활용도, OTA 배포 특성 등을 정량적으로 검증하는 방향으로 확장될 필요가 있다. 또한 국내 OEM의 CAN-Ethernet 혼재 환경과 C-V2X 연계를 고려한 모델링을 통해 SDV 기반 차율주행 차량 아키텍처의 최적 설계 방안을 도출하는 후속 연구가 요구된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 한국연구재단 논문연구과제 (2022R1G1A1009023), 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 산업혁신인재성장지원사업 (RS-2024-00415520)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 ICT 혁신인재4.0 사업의 연구결과로 수행되었음 (No. IITP-2022-RS-2022-00156310)

참 고 문 헌

- [1] GSA and McKinsey & Company, Getting Ready for Next-Generation E/E Architecture with Zonal, Final Report, 2023.
- [2] W. Wang, "Review of Electrical and Electronic Architectures for Vehicles: Domain-Oriented vs. Zone-Oriented and Hybrid Roadmaps," Automotive Innovation, 2024.
- [3] SAE International, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, SAE J3016TM_202104, 2021.
- [4] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), UN Regulation No. 155: Cyber Security and Cyber Security Management System (CSMS), 2021.
- [5] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), UN Regulation No. 156: Software Update and Software Update Management System (SUMS), 2021.
- [6] AUTOSAR, SOME/IP Protocol Specification (R24-11), 2024.
- [7] International Organization for Standardization (ISO), ISO 21448:2022 Road Vehicles – Safety of the Intended Functionality (SOTIF), 2022.
- [8] UNECE GRVA, Guideline of Intelligent and Connected Vehicle Standard System Construction (China), GRVA-17-27e, 2023.
- [9] 5G Automotive Association (5GAA), C-V2X Standardisation in China, 2022.