

자동차 이더넷 (Automotive Ethernet)

1. 개요

최근 수년간 이더넷 기술은 현대의 자동차를 위한 통합 네트워크 기술로 발전했습니다. 높은 대역폭과 예측 가능한 지연시간(Deterministic Latency), 그리고 센서 데이터부터 진단 데이터까지 단일 네트워크를 통해 전송할 수 있는 기능을 제공합니다.

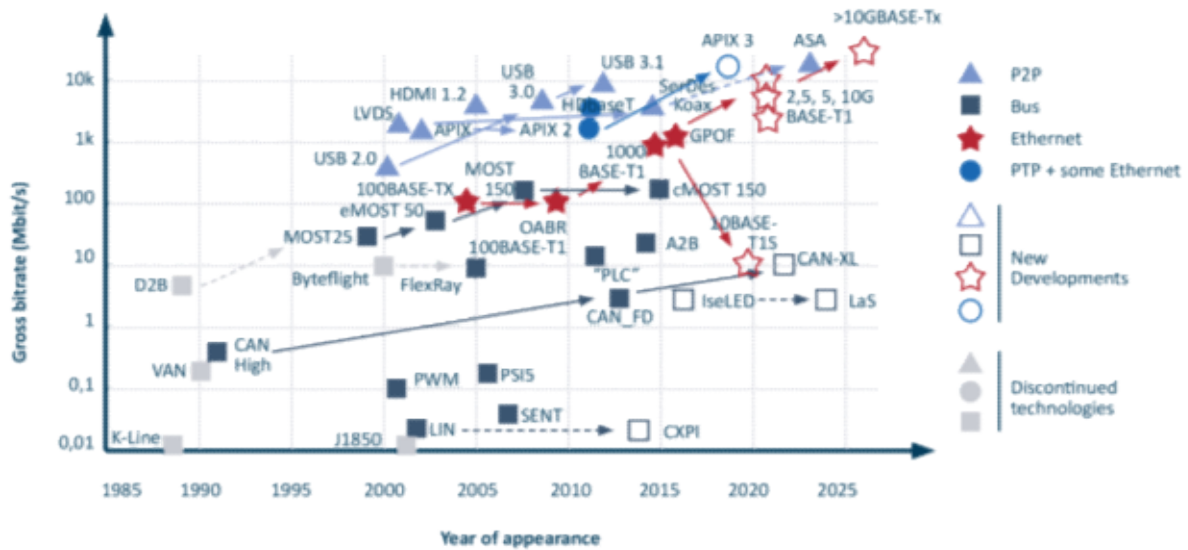
2. 일반 Ethernet 과 Automotive Ethernet 의 차이

일반 Ethernet 은 사무실과 데이터센터 환경을 위해 설계되었습니다. 이러한 환경에서는 온도 변화가 크지 않고 전원 공급이 안정적이며, 패킷이 몇 밀리초 정도 지연되더라도 큰 문제가 되지 않습니다.

반면 Automotive Ethernet 은 Ethernet 프레임, IP, TCP/UDP 와 같은 표준 Ethernet 기술을 기반으로 하면서도 자동차 환경의 요구사항을 충족하도록 최적화되었습니다. 자동차는 주행 중 지속적인 진동에 노출되고, -40°C 에서 $+125^{\circ}\text{C}$ 에 이르는 극한의 온도 조건에서도 안정적으로 동작해야 합니다. 또한 차량 중량과 제조 비용을 줄이기 위해 배선 무게를 최소화해야 하며, 제동·조향과 같은 안전 관련 시스템에서는 예측 가능한 통신 지연시간과 높은 신뢰성이 요구됩니다.

이러한 요구사항을 충족하기 위해 Automotive Ethernet 은 여러 기술을 적용합니다. 대표적으로 Single-Pair Ethernet(SPE)은 기존 Ethernet 의 4 쌍 꼬임선 대신 1 쌍의 케이블만 사용하여 배선 무게와 하네스(배선 세트) 복잡도를 줄입니다. 또한 TSN (Time-Sensitive Networking, 시간 민감형 네트워킹 - 정해진 시간 안에 데이터가 반드시 전달되도록 보장하는 기술 표준 집합)을 통해 실시간 제어에 필요한 예측 가능한 지연시간을 제공하며, VLAN 을 이용해 인포테인먼트, ADAS, 안전 관련 트래픽을 논리적으로 분리할 수 있습니다. 또한 MACsec(이더넷 통신을 2 계층에서 암호화하는 보안 기술)은 UNECE R155 규정(자동차 사이버보안 관리 체계에 관한 국제 규정) 준수를 지원하는 기술적 보안 대책 중 하나로 활용될 수 있습니다.

결과적으로 Automotive Ethernet은 표준 Ethernet 기술을 기반으로 하면서도 자동차 환경의 특수한 요구사항에 맞게 발전된 차량용 네트워크 기술이라고 할 수 있습니다.

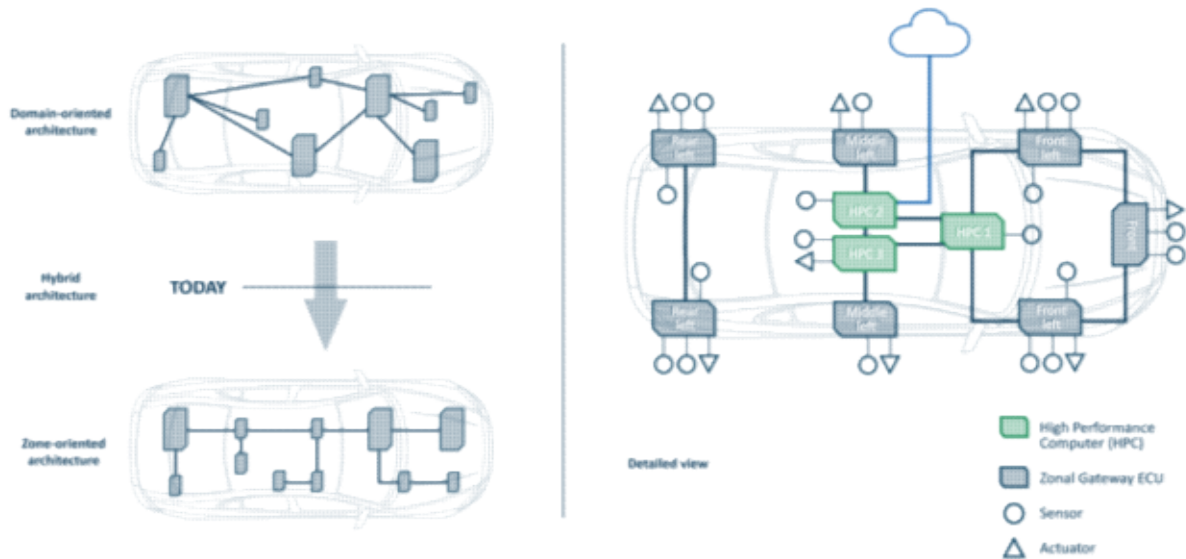


<그림 1: 자동차 네트워크 기술의 발전 (Matheus & BMW AG, 2019)>

3. 왜 Automotive Ethernet 이 필요한가?

현대의 자동차는 연결성(Connected), 자율주행(Autonomous), 공유(Shared), 전동화(Electrified)라는 네 가지 메가 트렌드에 의해 발전하고 있습니다. 이러한 변화의 결과로 자동차는 '바퀴 달린 스마트폰'과 같은 형태로 진화하였으며, 소프트웨어가 차량의 핵심 차별 요소가 되었습니다. 이에 따라 차량 내 네트워크는 훨씬 더 많은 데이터를 처리해야 할 뿐만 아니라, 엄격한 시간 보장(타이밍 요구사항)도 충족해야 합니다.

동시에 전기/전자(E/E) 아키텍처는 기능별로 하나의 ECU가 담당하던 기존 구조에서 벗어나, 중앙의 고성능 컴퓨터(HPC)를 중심으로 하는 존(zonal) 기반 구조로 전환되고 있습니다. 이 과정에서 원시 센서 데이터는 더 이상 로컬 ECU에 머무르지 않고 중앙 HPC로 전달되어 처리됩니다. 이러한 변화는 네트워크 부하를 크게 증가시키며, 결과적으로 링크 속도 요구사항을 기존의 킬로비트 수준에서 멀티 기가비트 수준까지 끌어올리고 있습니다.



<그림 2: 도메인 기반 구조에서 존 기반 구조로 전환됨에 따라 HPC 간 데이터 처리량 요구사항이 증가합니다. >

4. Automotive Ethernet 도입 이유

1) 높은 데이터 처리량

카메라, 레이더, 라이다 데이터 전송을 위해 10 Mbps 에서 25 Gbps 이상의 링크 속도가 필요합니다.

2) 결정론적 지연시간

센서 융합(Sensor Fusion)이나 원격 주차(Remote Parking) 같은 기능은 밀리초 단위의 매우 짧고 예측 가능한 지연시간이 요구됩니다. 그러나 기존 레거시 버스 시스템은 많은 ADAS 및 존 기반 아키텍처 사용 사례에서 요구되는 대역폭, 확장성, 그리고 지연시간의 결정성을 동시에 충족하지 못합니다.

3) 내장형 사이버보안

MACsec 을 통해 링크 계층 수준의 암호화 및 무결성 보호가 가능합니다.

4) 무게 및 비용 절감

Single-Pair Ethernet 은 케이블 수를 줄여 배선 하네스의 복잡도를 낮추고 차량 무게와 제조

비용을 절감합니다.

5. Automotive Ethernet 기술 스택

Automotive Ethernet 은 단일 규격이 아니라 ISO/OSI 전 계층을 포괄하는 기술 집합입니다. IEEE, ISO, AUTOSAR, OPEN Alliance 등의 표준이 함께 사용됩니다.

Layer 5~7 (Application)	서비스 기반 통신, 진단 및 캘리브레이션(보정) 신호 기반 통신뿐만 아니라 서비스 지향 통신도 지원하며, 진단, 캘리브레이션, 스트리밍 트래픽까지 함께 처리할 수 있도록 한다. 주요 프로토콜: <i>SOME/IP · SOME/IP-SD · DoIP · XCPoE · SOVD</i>
Layer 4 (Transport)	TCP / UDP UDP 는 가볍고 빠른 이벤트/브로드캐스트용, TCP 는 연결 기반으로 신뢰성이 필요한 진단용 통신이다. 주요 프로토콜: <i>TCP · UDP</i>
Layer 3 (Network)	IP 라우팅 IP 기반 네트워크에서의 통신 경로 설정, 주소 지정, 멀티캐스트 처리 주요 프로토콜: <i>IPv4 · IPv6 · ARP/NDP · IGMP / MLD for multicast</i>
Layer 2 (Data Link)	결정론성과 보안 TSN 은 서로 다른 중요도를 갖는 혼재 중요도(mixed-criticality) 네트워크 환경 전반에서 지연시간의 상한을 보장하고 트래픽을 격리합니다. MACsec 은 UNECE R155 기반 사이버보안 개념에서 차량 내 이더넷 위험을 완화하기 위한 기술적 대응 수단 중 하나로 사용될 수 있습니다. 주요 기술: <i>MAC · VLAN 802.1Q · TSN 802.1AS/Qbv/Qav/CB · MACsec 802.1AE · AVB / IEEE 1722</i>

Layer 1 (Physical)	Single-Pair Ethernet 기반 모든 속도 구간에서 단일 트위스티드 페어(꼬임선)를 사용한다. 커넥터는 H-MTD(Rosenberger)와 MATEnet(TE Connectivity)가 사용된다. PoDL(Power over Dataline, IEEE 802.3bu)은 동일한 한 쌍의 선로를 통해 데이터와 전력을 동시에 전송할 수 있게 한다. 주요 규격: 10BASE-T1S · 100BASE-T1 · 1000BASE-T1 · 2.5/5/10GBASE-T1 · 25GBASE-T1 · Optical 50G (emerging)
-----------------------	--

6. 물리 계층

적절한 물리 계층 선택

물리 계층은 단순한 전송 방식이 아니라 전체 네트워크 구조를 결정하는 중요한 설계 요소이며, 사용할 수 있는 대역폭에도 직접적인 영향을 줍니다. 또한 네트워크 형태(토폴로지), 배선 비용, 전자파 적합성(EMC) 대응 수준, ECU 복잡도까지 함께 결정됩니다. 자동차용 Ethernet은 차량의 끝단에서부터 핵심 네트워크까지 하나의 계열화된 단일 꼬임선 이더넷 표준으로 확장해 나가고 있습니다.

10 Mbit/s	10BASE-T1S · IEEE 802.3cg 멀티드롭 버스 구조 차량 엣지/센서 네트워크용 이 기술은 차량 엣지 영역과 센서 네트워크를 위한 이더넷 규격으로, 반이중(Half-duplex) 방식에서 하나의 비차폐 연선(UTP)에 여러 장치를 연결할 수 있는 멀티드롭 구성을 지원합니다. 최대 약 25m 구간에서 최대 8개의 노드를 하나의 선로에 연결할 수 있습니다. 또한 선택적으로 PLCA(Physical Layer Collision Avoidance)를 사용하면 라운드로빈(여러 장치가 순서를 정해 돌아가면서 하나씩 통신하는) 방식으로 통신 순서를 제어하여 충돌 없이 예측 가능한 통신을 구현할 수 있습니다. 이러한 특성 때문에 차량 엣지 영역에서는 CAN, CAN FD, LIN 과 직접 경쟁하는 구조를 가집니다. 이 구간은 차량 내 데이터의 약 80%를 차지하는 저대역 트래픽 영역을 담당합니다. 대표 적용: 스마트 센서, 바디 전장, 조명, 액추에이터 (존 아키텍처 기반)
-----------	--

100 Mbit/s	100BASE-T1 · IEEE 802.3bw 1:1(point-to-point) 연결 방식 현재 양산 차량에서 가장 널리 쓰이는 주력 기술 이 규격은 현재 실제 양산 차량에서 사용되는 자동차 이더넷 물리계층 중 가장 성숙하고 안정화된 기술입니다. 두 장치가 1:1로 직접 연결되는 구조이며, 양방향 동시에 통신이 가능한 전이중(Full-duplex) 방식과 비차폐 연선(UTP) 기반 케이블을 사용합니다. 최대 약 15m 거리까지 안정적인 통신이 가능합니다. 또한 이미 반도체 칩, 개발 도구, 테스트 규격까지 산업 전반의 생태계가 잘 구축되어 있어 실제 차량 적용에 가장 널리 활용되고 있습니다. 대표 적용 분야는 카메라, 레이더, 인포테인먼트 시스템, 게이트웨이 ECU, 그리고 차량 내 주요 핵심 네트워크입니다.
1 Gbit/s	1000BASE-T1 · IEEE 802.3bp 1:1(point-to-point) 연결 방식 Backbone (핵심네트워크) & HPC 연결 이 규격은 높은 대역폭이 필요한 ADAS 센서, 디스플레이, 그리고 중앙 고성능 컴퓨터(HPC)를 연결하기 위한 백본급 이더넷 링크입니다. 하나의 비차폐 연선(UTP)을 사용하며 최대 약 15m 거리까지 지원하고, 양방향 동시에 통신할 수 있는 전이중(Full-duplex) 방식입니다. 대표 적용 분야는 HPC 간 데이터 연결과 고해상도 카메라 데이터의 집선 및 전송입니다.
2.5~25 Gbit/s (Multi-Gig)	Multi-Gig · IEEE 802.3ch / IEEE 802.3cy 표준화 완료 / 초기 도입 및 확산 단계 차량 내 구역(Zone) 백본 및 원시 카메라 영상 전송 이 구간은 2.5, 5, 10Gbps 속도에서는 차폐된 꼬임선 케이블을 사용하고, 25Gbps 구간은 동일한 차폐 케이블 기준으로 약 11m 거리까지 통신이 가능합니다. 충분히 높은 대역폭을 제공하기 때문에 압축하지 않은 고화질

	카메라 영상을 여러 개 동시에 전송할 수 있으며, 기존에 카메라용으로 따로 쓰이던 전용 직렬 통신 방식을 대체합니다.
최대 50 bit/s	광통신 · IEEE 802.3cz / OA TC7 IEEE 802.3cz 는 표준화가 완료, OPEN Alliance TC7 은 자동차 환경에 맞는 추가 규격과 적합성 생태계를 계속 확장하고 있습니다. 차세대 광 기반 핵심 네트워크 유리 광섬유를 사용하며 최대 약 40m 까지 데이터 전송이 가능합니다. 광 신호를 사용하기 때문에 케이블 구간에서 전자파 간섭의 영향을 받지 않는 것이 특징입니다. OPEN Alliance TC7 은 IEEE 802.3cz 를 기반으로 자동차 전용 커넥터 규격과 시험 절차를 추가로 개발하고 있습니다.

7. 공유 기능

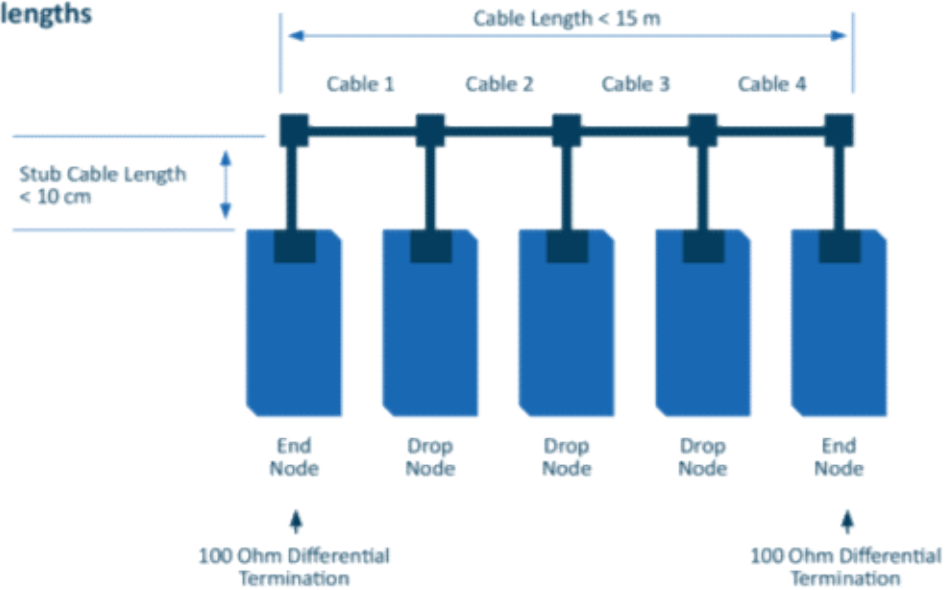
멀티드롭(Multi-drop) 지원

기존 이더넷은 각 장치가 스위치에 직접 연결되도록 개별 케이블을 사용하는 구조입니다. 반면 멀티드롭 방식은 하나의 케이블을 차량 전체에 따라 배치하고, 그 중간에 여러 장치가 연결되어 데이터를 공유하는 구조입니다. 이 방식에서는 별도의 스위치가 필요하지 않습니다.

다만 여러 장치가 동시에 데이터를 보내면 서로 신호가 충돌해 데이터가 깨질 수 있다는 문제가 있습니다. 10BASE-T1S 는 이를 PLCA(물리 계층 충돌 회피) 방식으로 해결하는데, 각 장치에 순서를 돌아가며 통신할 수 있는 시간을 미리 할당해 주는 방식입니다. 이를 통해 통신 순서가 예측 가능하고 결정론적으로 동작하게 됩니다.

이 구조의 실질적인 장점은 매우 큽니다. 기존처럼 모든 센서를 하나씩 게이트웨이까지 개별 배선으로 연결할 필요 없이, 하나의 케이블이 하나의 차량 구역 전체를 담당할 수 있습니다. 그 결과 커넥터 수가 줄고, 배선 하네스 무게와 비용이 모두 감소합니다. 이러한 이유로 10BASE-T1S 는 차량 엣지 영역에서 CAN 과 LIN 을 대체할 차세대 기술로 평가됩니다.

10BASE-T1S Bus Line (Twisted Pair) Mixing segments with different cable lengths



<그림 3: 10BASE-T1S 멀티드롭 버스 방식 동작 모드>

8. 결론

자동차용 이더넷은 소프트웨어 중심 자동차(SDV)의 핵심 네트워크로 자리 잡고 있습니다. 단일 꼬임선 이더넷(SPE), 확장 가능한 대역폭, 결정론적 TSN 통신, VLAN 기반 트래픽 분리, MACsec 보안 기능을 결합함으로써 현대 전기/전자(E/E) 아키텍처가 차량 전반에서 센서 데이터, 진단 정보, 인포테인먼트 데이터, 제어 데이터를 안정적으로 대량 전송할 수 있도록 합니다.