

100BASE-T1 및 1000BASE-T1

- 엔지니어가 꼭 알아야 할 차량용 이더넷의 모든 것 -

1. 개요

차량용 이더넷(Automotive Ethernet)이 차량 내 네트워크 시스템의 패러다임을 바꾸고 있습니다. 본 문서에서는 싱글 페어(Single-pair) 케이블 배선과 PAM-3 신호 방식부터 에코 제거(Echo Cancellation), PHY 설정, 그리고 실제 적용 사례까지, 엔지니어들이 100BASE-T1과 1000BASE-T1에 대해 반드시 알아야 할 핵심 내용을 설명합니다.

싱글 페어 이더넷(Single Pair Ethernet)은 케이블 배선 무게를 획기적으로 줄이면서도, IT 환경에서나 쓰이던 고성능 네트워크를 차량용 와이어링 하네스에 그대로 구현해 냈습니다. 그 기반이 되는 IEEE 표준과 전선 위에서 구동되는 PAM-3 신호 방식, 그리고 두 PHY(물리 계층)가 동일한 한 쌍의 전선에서 동시에 데이터를 주고받을 수 있게 해주는 에코 제거 기술을 살펴보겠습니다. 참고로, 이를 제외한 나머지 프로토콜 스택은 우리가 흔히 아는 일반적인 표준 이더넷과 완전히 동일합니다.

ADAS(첨단 운전자 보조 시스템), 서라운드 뷰 카메라, 존 아키텍처(Zonal Architecture)의 시대가 도래하면서, 차량 내부에서 요구되는 데이터 전송 속도는 CAN, LIN, FlexRay 같은 기존의 차량용 버스 시스템이 감당할 수 있는 수준을 훨씬 넘어섰습니다. 하지만 고대역폭 네트워크의 표준 해법인 일반적인 이더넷(2쌍 또는 4쌍의 케이블 사용)은 차량용 와이어링 하네스로 쓰기에는 너무 무겁고 부피가 크며 비용도 많이 듭니다. 이에 대한 해결책으로 등장한 것이 바로 한 쌍의 꼬임선(Twisted pair)으로 전이중(Full-duplex) 통신을 지원하는 이더넷 규격 제품군인 100BASE-T1, 1000BASE-T1 및 그 이상의 고속 후속 표준들입니다.

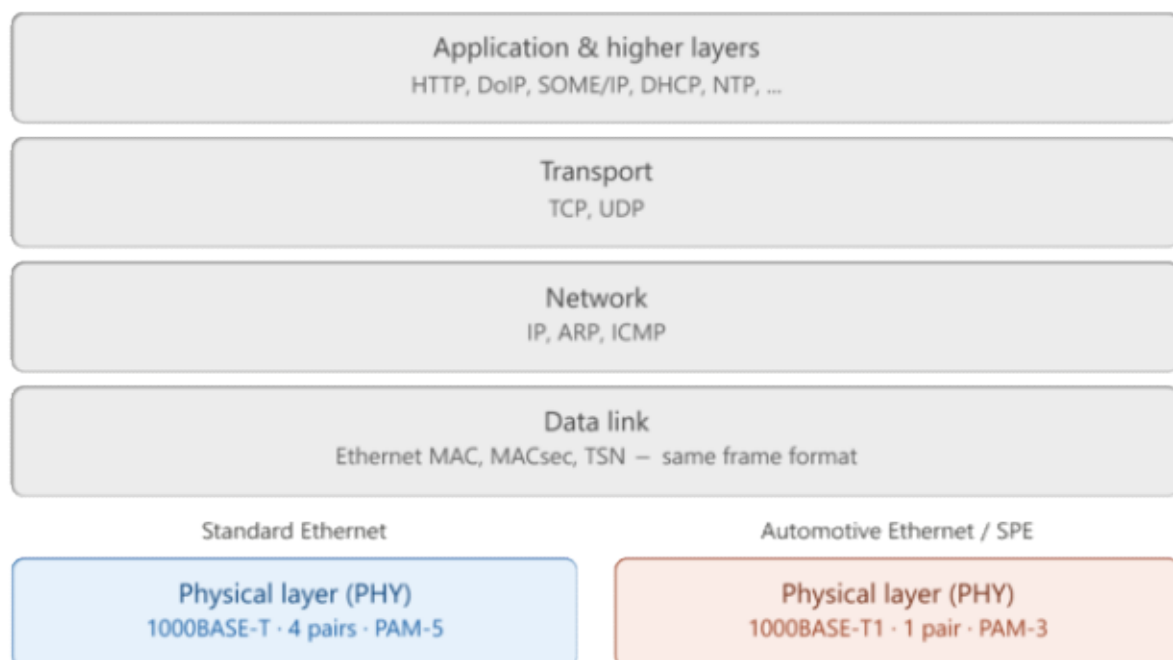
2. 사무실용 이더넷에서 차량용 와이어링 하네스까지

싱글 페어(Single-pair)의 여정은 IEEE 표준화 기구 외부에서 처음 시작되었습니다. 2011년 브로드컴(Broadcom)은 차량 내부 전용으로 '브로드알리치(BroadR-Reach)'라는 독자적인 100Mbit/s 기술을 개발했습니다. BMW는 2013년 주차 보조 카메라를 연결하는 데 이 기술을 최초로 적용했는데, 당시 기존의 4쌍짜리 Cat-5 케이블은 무게와 비용 측면에서 이 용도에

전혀 맞지 않았기 때문입니다. 이후 이 기술을 널리 알리고 표준화하기 위해 OPEN 얼라이언스(OPEN Alliance SIG)가 설립되었고, 얼마 지나지 않아 IEEE 가 이를 본격적으로 받아들였습니다.

그 결과물로 일련의 싱글 페어 표준 규격 제품군이 탄생하게 되었습니다. 사실상 브로드알리치 기술을 더욱 견고하게 다듬은 100BASE-T1 은 2015 년에 IEEE 802.3bw 로 승인되었으며 100Mbit/s 의 속도를 제공합니다. 이어서 2016 년에는 1000BASE-T1 이 IEEE 802.3bp 로 제정되었는데, 동일한 싱글 페어 및 전이중(Full-duplex) 방식을 그대로 적용하면서도 데이터 전송 속도를 10 배나 끌어올렸습니다.

더 낮은 대역폭 영역은 IEEE 802.3cg(2019)가 담당하고 있습니다. 여기에는 단거리 차량용 멀티드롭(Multidrop) 링크를 위한 10BASE-T1S 와 최대 1,000m 에 이르는 장거리 산업용 통신을 위한 10BASE-T1L 이 모두 정의되어 있습니다. 더 높은 데이터 속도가 필요한 영역은 차세대 ADAS 및 센서 백본망을 위한 IEEE 802.3ch(2.5/5/10Gbit/s)와 비교적 최근에 제정된 IEEE 802.3cy(25/50Gbit/s)가 해결해 주고 있습니다.



<그림 1: OSI 모델 기준 싱글 페어 이더넷과 표준 이더넷의 비교>

이 모든 표준에서 가장 핵심적인 부분은 바로 **바뀌지 않는 것이 무엇인가**입니다. OSI 모델 전체 중에서 오직 물리 계층(PHY, Physical layer)만 새로워졌을 뿐입니다.

PHY 윗단계의 모든 것은 우리가 아는 평범하고 전혀 변경되지 않은 이더넷 그대로입니다. 즉, 동일한 MAC, 동일한 프레임 구조, 동일한 에더타입(EtherType)을 사용합니다. 그렇기 때문에 기존의 소프트웨어 스택, 프로토콜 분석기(예: 와이어샤크), 그리고 상위 계층 프로토콜(TSN, MACsec 등)을 아무런 수정 없이 그대로 사용할 수 있습니다. 한쪽의 1000BASE-T와 다른 쪽의 1000BASE-T1 간에 데이터를 전달할 때도, 그저 PHY만 맞춰주는 단순한 미디어 컨버터(Media converter) 하나면 충분합니다. 그 사이를 연결하는 브리징 동작은 프로토콜 변환이 전혀 필요 없는 일반적인 이더넷 스위칭일 뿐입니다.

IT 진영에 이미 구축되어 있는 기존의 모든 기술과 이처럼 매끄럽게 호환된다는 점이야말로 싱글 페어 이더넷이 이토록 빠르게 도입된 가장 결정적인 이유입니다. 사실상 비용을 전혀 들이지 않고도 방대한 이더넷 소프트웨어와 툴 생태계를 그대로 물려받아 사용할 수 있기 때문입니다.

3. 싱글 페어 이더넷 vs. 차량용 이더넷

이 두 용어는 종종 서로 혼용되어 사용되지만, 실제로는 서로 다른 것을 나타내며 특히 두 번째 용어(차량용 이더넷)는 실무에서 꽤 느슨하게 쓰이고 있습니다. 싱글 페어 이더넷(Single Pair Ethernet, SPE)은 철저히 물리 계층(Physical-layer)만을 가리키는 제품군입니다. 두 쌍이나 네 쌍이 아닌, 단 한 쌍의 꼬임선(Twisted pair) 위에서 구동되는 모든 이더넷 변형 규격이 바로 싱글 페어 이더넷입니다. 명칭에 "T1"이 붙는 규격들—10BASE-T1S, 10BASE-T1L, 100BASE-T1, 1000BASE-T1 및 그 이상의 멀티 기가비트 후속 표준들—은 모두 SPE에 해당합니다.

반면 차량용 이더넷(Automotive Ethernet)은 더 넓은 의미를 담고 있으며 맥락에 따라 다르게 해석됩니다. 좁은 의미로는 자동차 산업의 까다로운 온도, EMC(전자파 적합성), 커넥터 요구사항을 충족하는 SPE PHY들을 뜻하며, 본질적으로 10BASE-T1S, 100BASE-T1, 1000BASE-T1 및 이들의 고속 후속 표준들이 여기에 속합니다. 하지만 완성차 업체(OEM)나 부품 협력사(Tier-1)의 일상적인 실무 통용어로 쓰일 때 '차량용 이더넷'은 대개 이 PHY들 위에서 구동되는 전체 프로토콜 스택(Whole stack)을 의미합니다. 즉, 오토사(AUTOSAR) 기반의 네트워크 관리, SOME/IP 서비스 지향 통신, DoIP 진단, MACsec 같은 보안 계층, 그리고 이를 둘러싼 차량 내 시스템 통합까지를 전부 포괄합니다. 이처럼 넓은 의미로 쓰일

때 차량용 이더넷은 단순한 케이블 선로라기보다는, IP 기반의 완전한 차량 내 네트워크 생태계를 뜻하게 됩니다.

비교를 예를 들자면, 10BASE-T1L은 SPE에는 속하지만 통상적으로 차량용 이더넷이라고 부르지는 않습니다. 이 규격은 수백 미터에 달하는 전송 거리와 동일한 한 쌍의 전선으로 전력까지 함께 공급하는 기능(PoDL, Power over Data Line)을 갖추고 있어, 산업용 필드버스(Field-bus) 대체 시장을 겨냥하기 때문입니다. 물리 계층 제품군은 같지만 사용 목적은 완전히 다른 사례로, 왜 두 용어가 항상 상호 교환해서 쓸 수 있는 것이 아닌지를 잘 보여주는 예시입니다.

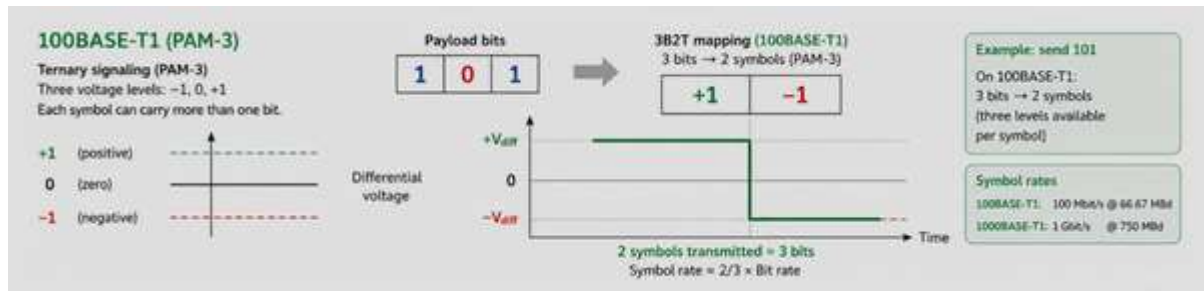
4. 통신의 기초 - 공유된 꼬임선(twisted pair) 위의 PAM-3

100BASE-T1과 1000BASE-T1에서 사용하는 라인 코드(Line code)는 PAM-3 방식입니다. 이는 전선 위에 세 가지 전압 레벨(\$-1\$, \$0\$, \$+1\$)을 두는 펄스 진폭 변조(Pulse Amplitude Modulation) 기술입니다.

기존의 CAN 통신 경험이 있으신 분들을 위해 비교하자면, CAN은 차동 신호선(CAN High 및 CAN Low 전선)을 통해 버스를 오직 두 가지 상태—우세(Dominant)와 열세(Recessive)—중 하나로만 구동합니다. 따라서 각 심볼이 곧 1비트가 되며, 비트 레이트(Bit rate)와 보오 레이트(Baud rate)를 서로 혼용해서 쓸 수 있습니다. 반면 PAM-3에서는 두 값이 다릅니다. 각 3진(Ternary, 데이터의 물리적 전송이 CAN처럼 이진 방식이 아님) 심볼이 1비트보다 더 많은 정보를 실어 나르기 때문에, 실제 전선이 작동하는 속도(클록)는 데이터 전송 속도에서 예상되는 것보다 더 느리게 흘러갑니다. 그 결과 100BASE-T1은 단 66.67MBd의 심볼 속도만으로 100Mbit/s의 속도를 내며, 1000BASE-T1은 750MBd로 1Gbit/s의 속도를 구현합니다.

이해를 돕기 위해, 각 시스템을 통해 101이라는 3비트의 페이로드 데이터를 전송하는 구체적인 상황을 가정해 보겠습니다. CAN의 경우, 이 3비트는 전선 위에서 3개의 우세/열세 심볼로 변환됩니다(비트당 1개의 레벨). 반면 100BASE-T1에서는 3B2T 매핑 기술을 거쳐 동일한 3비트가 오직 2개의 3진 심볼로 이루어진 코드 그룹으로 바뀝니다. 이때 각 심볼은 세 가지 전압 레벨 중 하나를 가집니다. 즉, 데이터의 양은 같지만 전선 위를

지나가는 심볼의 수는 3 분의 2 로 줄어들게 됩니다.



< 그림 2: 100BASE-T1 의 신호 전송 방식 >

동일한 데이터 전송 속도를 기준으로 할 때, 100 및 1000BASE-T1 은 CAN 방식의 이진 신호 전송에 비해 전선 위를 지나가는 보오 레이트(Baud rate)가 더 낮습니다. 이는 기본 주파수를 낮춰 결과적으로 전자파 방사(Radiated emissions)를 억제하는 데 도움을 줍니다.

대신 그 대가는 수신단(Receiver)이 치르게 됩니다. 세 가지 전압 레벨을 사용하기 때문에 심볼 간의 간격이 CAN 의 우세/열세 간격보다 좁아지며, 이로 인해 PHY(물리 계층)는 신호를 복원하기 위해 적응형 등화(Adaptive equalization), 정밀한 레벨 슬라이싱(Level slicing), 그리고 에코 제거 기술을 필요로 합니다. 즉, SPE 는 EMC(전자파 적합성) 제한 기준을 맞추기에는 유리하지만, 채널의 불완전함(결함)에 대해서는 관대하지 못합니다. 노이즈, 반사파, 임피던스 불일치 등은 수신기가 신호를 판별하는 기준이 되는 레벨 간격에 곧바로 악영향을 미칩니다. CAN 버스는 훨씬 거친 케이블 환경에서도 잘 작동하는 반면, 1000BASE-T1 이 일반적으로 차폐 꼬임선(STP, Shielded Twisted Pair)을 요구하는 이유가 바로 여기에 있습니다.

그렇다고 이러한 기술들이 이더넷 세계에서 생소한 것은 아닙니다. 기존 사무실에서 쓰이던 "RJ45 100 Mbit/s" 규격인 100BASE-TX 는 이미 4B5B 코딩을 거친 후 MLT-3 라는 3 레벨 라인 코드를 사용하고 있으며, 각각 단방향으로 통신하는 두 쌍의 케이블을 이용합니다. 한 걸음 더 나아가 1000BASE-T 는 네 쌍의 케이블을 동시에 사용하면서 PAM-5(5 레벨) 방식을 적용합니다. 자동차용 T1 규격들은 이처럼 이미 잘 알려진 기술들을 단 한 쌍의 꼬임선에 맞춰 적용한 것뿐입니다.

5. 하나의 전선으로 양방향 통신을 처리하는 방법: 신호 충돌 피하는 비결

100BASE-T1 과 1000BASE-T1 은 양방향 통신에 **단 한 쌍의 전선을 동시에** 사용합니다. 두 PHY 가 시간 분할(Time-slotting)이나 주파수 분리(Frequency separation) 없이, 동일한 신호 방식을 사용하여 동시에 전선을 구동하는 것입니다.

만약 활성화된 100BASE-T1 링크에 광대역 오실로스코프 프로브를 대고 측정한다면, 전선 위에서 관찰되는 신호는 마스터(Master)가 전송한 PAM-3 신호, 슬레이브(Slave)가 전송한 PAM-3 신호, 두 신호 모두에 영향을 미친 채널의 주파수 응답, 그리고 임피던스 불일치로 인한 반사파가 모두 더해진 복합적인 결과물입니다. 최소한 한쪽에서 무엇을 전송하고 있는지 알지 못한다면, 그 파형 자체만 보고 두 데이터 스트림을 서로 구별해내는 것은 근본적으로 **불가능합니다**.

그렇다면 PHY 들은 어떻게 이 신호들을 구별해낼 수 있을까요? 그 비결은 각 PHY 가 **자신이 무엇을 전송하고 있는지 이미 알고 있다는 점**에 있습니다. 이미 알고 있는 이 전송 신호와, 그로 인해 예상되는 채널 응답 및 반사파를 모델링하여 PHY 가 선로에서 샘플링한 전체 신호에서 빼버리는 것입니다. 이 모델과 일치하지 않는 나머지 모든 것은 정의상 반대편 PHY 가 보낸 신호가 됩니다.

이 과정에는 '에코 제거기(Echo Canceller)'라 불리는 적응형 디지털 필터가 사용됩니다. 이 필터는 로컬(자신)의 송신 심볼을 입력받아 반사파를 포함하여 자신의 신호가 자신의 수신단에 어떻게 나타날지 예측값을 만들어냅니다. 수신기(Receiver)는 샘플링된 전선 신호에서 이 예측값을 빼냅니다. 그렇게 남은 나머지가 바로 반대편 PHY 의 데이터이며, 이는 케이블의 주파수 응답을 보정해 주는 등화기(DFE/FFE)를 거쳐 추가로 처리됩니다.

이를 가능하게 하려면 두 가지 조건이 더 충족되어야 합니다. 첫째, 하나의 공통된 비트 클럭(Bit clock)을 사용해야 합니다. 즉, 링크 내에서 역할이 비대칭적이어야 합니다. 한쪽은 마스터, 다른 쪽은 슬레이브가 됩니다. 마스터는 자체 발진기(Oscillator)에서 심볼 클럭을 이끌어내며, 슬레이브는 들어오는 마스터 신호로부터 타이밍을 복원하여 자신의 전송 클럭으로 동일하게 사용합니다. 결과적으로 양방향의 '심볼 동기화(Symbol-synchronous)' 상태가 되며, 이는 에코 제거기가 로컬 신호를 정밀하게 모델링하는 데 필수적인 요소입니다. 둘째, 트레이닝 단계(Training phase)가 필요합니다. 에코 제거기의 필터 계수는 미리 알 수 없으며(실제 케이블, 커넥터, PCB 상태에 따라 달라짐), 구조화된 링크 스타트업 과정 동안 학습되어야 합니다. 실무적으로 이는 통신 참여자 중 한쪽을 마스터로, 다른 쪽을 슬레이브로

설정해야 함(PHY 설정)을 의미합니다.

이 기능을 지원하는 PHY에서는 자동 협상(Auto-Negotiation, IEEE 802.3 Clause 98)을 통해 링크 속도와 마스터/슬레이브 역할을 자동으로 결정할 수 있습니다. 각자 지원 가능한 속도와 선호하는 마스터/슬레이브 역할을 알리고, 서로 지원하는 가장 높은 속도와 지정된 역할로 링크가 연결됩니다. 그러나 자동 협상은 선택 사항이며, 양쪽 PHY가 모두 속도 및 마스터/슬레이브 선택에 자동 협상을 사용하도록 설정되어 있을 때만 작동합니다. 만약 한쪽은 고정된 속도와 역할로 설정되어 있고 다른 쪽은 자동 협상으로 설정되어 있다면 링크는 연결되지 않습니다.

6. 장점과 한계

단 한 쌍의 비차폐 꼬임선(UTP)을 사용하는 방식은 기존 이더넷과 비교했을 때 연결 비용을 획기적으로 절감할 수 있는 잠재력을 지니고 있습니다. 와이어링 하네스의 무게를 줄여줄 뿐만 아니라, 차량 내부에 필수적인 CISPR-25 및 완성차 업체(OEM)의 EMC 제한 기준을 충족합니다. 게다가 물리 계층(PHY) 윗단계의 모든 것은 일반 이더넷과 완전히 동일하므로 기존 IT 툴체인을 그대로 적용할 수 있습니다. 별도의 프로토콜 변환 없이 단순한 미디어 컨버터만으로 SPE를 RJ45 이더넷으로 브리징할 수 있고, 와이어샤크(Wireshark)로 트래픽을 분석할 수 있으며, IP 기반의 진단 및 서비스 프레임워크(DoIP, SOME/IP)도 기본적으로 동작합니다. 리눅스(Linux), 오토사(AUTOSAR), POSIX 등의 네트워크 스택 역시 새로운 전선에서 구동하기 위해 프로토콜 수준에서 변경할 필요가 전혀 없습니다.

반면, 한계점 또한 명확합니다. 100BASE-T1과 1000BASE-T1은 철저히 **점대점(Point-to-point)** 방식입니다. 회선을 분기하거나 아주 단순한 스텝(Stub) 노드를 하나 추가하려 해도 반드시 스위치가 필요합니다. 전송 거리 또한 차량 규모에 맞춰 제한적입니다. Type-A 차량용 케이블 기준 약 15m이며, 1000BASE-T1의 경우 선택적으로 최대 40m까지 지원하는 Type-B 변형 규격이 있습니다.

IEEE 표준 사양은 채널 품질 요구사항을 명확히 규정하고 있습니다. 케이블과 커넥터가 이어지는 경로는 삽입 손실(채널을 따라 주파수에 따라 감쇄되는 정도), 반사 손실(채널 임피던스가 공칭 100Ω 표준에 얼마나 잘 맞아떨어져 반사파를 최소화하는지), 그리고 모드

변환(차동 신호가 얼마나 깨끗하게 차동 상태를 유지하여 전자파 방사와 노이즈 유입을 막아주는지)에 대해 정의된 제한 기준을 반드시 충족해야 합니다. 이는 채널 자체가 통과해야 하는 검증 기준들로, CAN 배선에 요구되는 수준보다 훨씬 엄격합니다. 특히 1000BASE-T1은 100BASE-T1에 비해 채널 품질에 눈에 띄게 더 민감하며, 100BASE-T1이 비차폐 꼬임선(UTP)에서도 작동하는 것과 달리 방사 제한 기준을 맞추기 위해 일반적으로 차폐 꼬임선(STP)을 필요로 합니다. 마지막으로, 정밀하게 조율된 마스터/슬레이브 핸드셰이크 과정을 거치는 링크 스타트업 특성상, 초기 구동 단계에서 디버깅하는 것이 CAN 버스에 비해 상당히 까다롭습니다.

7. 100BASE-T1 및 1000BASE-T1 한눈에 보기

Feature	100BASE-T1	1000BASE-T1
Standard	IEEE 802.3bw (2015)	IEEE 802.3bp (2016)
Data rate	100 Mbit/s	1 Gbit/s
Line code	PAM-3 with 4B3B / 3B2T coding	PAM-3 with 80B/81B block coding + RS-FEC
Symbol rate	66.67 MBd	750 MBd
Cable type and length	Unshielded Twisted Pair (UTP) – ≤15m	Type A - High-grade UTP – ≤ 15m Type B – Shielded Twisted Pair (STP) – ≤ 40m
Duplex / topology	Full-duplex, point-to-point	Full-duplex, point-to-point
Typical application	Cameras, infotainment, IP diagnostics	ADAS sensor links, zone-to-HPC backbone

< 표 1: 100BASE-T1 과 1000BASE-T1 비교 >

8. 100/1000BASE-T1의 실제 적용 분야

100BASE-T1은 카메라, 인포테인먼트 연결, OBD/DiP(Diagnostics-over-IP) 진단 등을 위한 기본 링크로 자리 잡았으며, 이 과정에서 기존의 MOST와 LVDS 기술을 대체했습니다. 반면 1000BASE-T1은 전방 카메라, 라이다(LiDAR) 전처리 데이터, 레이더 데이터 융합 등 고대역폭이 필요한 ADAS 데이터를 전송하는 데 쓰이며, 최신 전기/전자(E/E) 아키텍처에서 존(Zone)과 중앙 집중형 컴퓨터(Central Compute)를 연결하는 대표적인 백본망 역할을 담당하고 있습니다.

더 정밀하고 빠른 2.5G~10G 급 고속 변형 규격들은 중앙 HPC(고성능 컴퓨터) 플랫폼이
센서 트래픽을 통합 처리함에 따라 테스트 벤치와 파일럿 차량에 쓰이기 시작했습니다.
동시에 저대역폭 영역에서는 10BASE-T1S가 기존 CAN 세그먼트를 대체할
멀티드롭(Multidrop) 솔루션으로 채택되고 있으며, 이더넷 특유의 일관된 주소 지정 방식
덕분에 게이트웨이 설계가 한층 단순해졌습니다.

10년 전만 해도 '진짜' 이더넷에서 벗어난 실험적인 우회로처럼 보였던 기술이, 이제는
완벽히 자리 잡은 차량 내 핵심 네트워크 기술이 되었습니다. 그리고 이와 동일한 개념들이
전송 거리와 EMC 프로파일만 바뀐 채, 더 넓은 의미의 '싱글 페어 이더넷(SPE)'이라는 이름
아래 산업 자동화 분야에서도 그대로 반복되어 적용되고 있습니다.