

RIGOL

100BASE-TX 및 1000BASE-T 용

물리계층 적합성 테스트 솔루션

Physical Layer Compliance Test Solution



어플리케이션 노트

KR Version

저작권

© 2023 리골 테크놀로지스(주) ALL RIGHTS RESERVED.

문의사항

본 문서를 확인하신 후 궁금한 점이 있으시면 아래 주소로 문의하여 주시기 바랍니다.

이메일: inquiry@waveinsense.com

웹사이트: <https://www.waveinsense.com>



이 어플리케이션 노트를 통해 다음 내용에 대해 알 수 있습니다.

- 100BASE-TX 및 1000BASE-T 이더넷에 대한 간략한 소개
- 100BASE-TX 및 1000BASE-T 물리 계층 준수 테스트 설명
- 컴플라이언스 테스트에 필요한 계측기에 대한 정보 제공
- 시험장비 선정기준 일람

어플리케이션 노트 전체를 읽는 데 대략 10 분이 소요될 것으로 예상됩니다.



WAVEINSENSE

소개

이더넷 (Ethernet)은 오늘날 사용되는 컴퓨터 네트워킹 기술 중 가장 인기 있는 기술입니다. 이더넷은 1973년 제록스 팔로 알토 연구 센터(제록스 PARC)의 로버트 메트칼페와 그의 동료들이 센터를 다른 워크스테이션, 서버, 레이저 프린터와 연결하려고 할 때 만들어졌습니다. 이더넷은 나중에 이더넷의 사양을 정의하는 IEEE 802.3 표준으로 표준화되었습니다. 이더넷 네트워크는 수년에 걸쳐 상당히 발전했습니다. 이더넷의 속도는 10 Mbps, 100 Mbps, 1000 Mbps에서 10 Gbps 까지 다양합니다. 이더넷은 원래 전송 매체로 동축 케이블을 사용했으나, 요즘은 트위스트 페어 케이블 (차폐/비 차폐)과 광섬유 케이블 (단일 모드/멀티 모드)을 포함하게 발전해 왔습니다.

Ethernet Data Rate Evolution

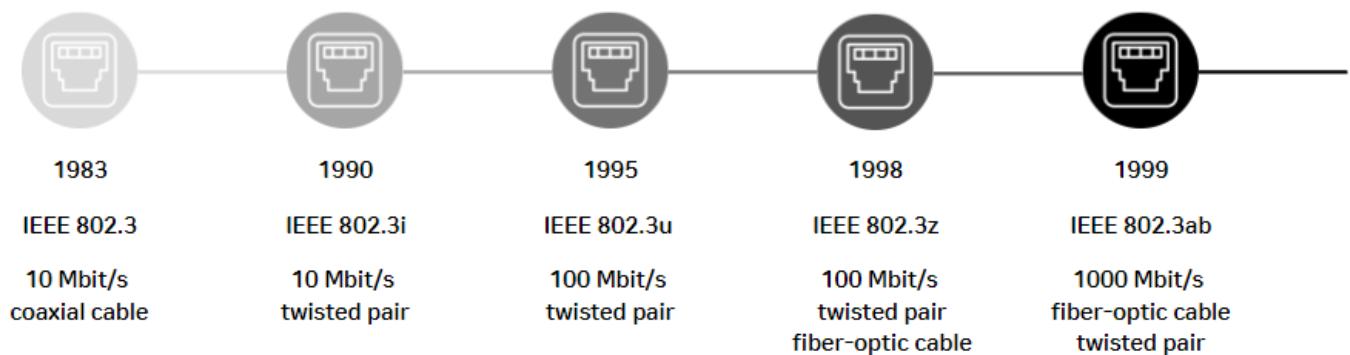


그림 1. 이더넷 데이터 속도 진화

이 어플리케이션 노트에서는 100 Mbps 고속 이더넷과 1000 Mbps 기가비트 이더넷의 물리 계층 적합성 테스트 및 테스트 솔루션에 대해 설명합니다. 엔지니어가 빠르고 효율적으로 테스트를 수행할 수 있도록 도와 제품 개발 및 테스트의 효율성을 향상시킵니다.

1. 100BASE-TX 및 1000BASE-T 기본 사항

1.1 100BASE-TX/1000BASE-T 커넥터 및 핀

100BASE-TX 와 1000BASE-T는 모두 트위스트 페어 케이블을 전송 매체로 사용하고 RJ45 커넥터를 표준 인터페이스로 사용합니다. 이들은 배선이 용이하고 비용이 저렴하며 사용이 편리하기 때문에 오늘날 가장 일반적으로 사용되는 이더넷 기술입니다. 100BASE-TX 의 TX 는 Transmit 과 Receive 의 약자로, 데이터를 받는 한 쌍(RX)과 보내는 다른 한 쌍(TX)에 두 개의 트위스트 페어가 사용됨을 의미합니다. TX 가 붙은 표준은 보통 100Mbps 속도로 데이터를 전송하는 이더넷을 가리킵니다. 1000BASE-T 의 T 는 사용되는 케이블의 종류가 트위스트 페어(Twisted Pair)임을 의미합니다. 트위스티드 페어 케이블은 두 가닥의 전선이 꼬여 있는 형태로, 전자기 간섭을 줄이기 위해 설계되었습니다. 100BASE-TX 는 전송을 위해 2 개의 트위스티드 페어(4 개의 전선 중 2 쌍만 사용)를 활용하여, MLT-3 라는 변조 방식을 사용하여 데이터를 전송합니다. 1000BASE-T 는 100BASE-TX 와는 달리 모든 4 쌍의 트위스티드 페어를 사용합니다. 즉, 총 8 개의 전선이 모두 사용되며, 각 쌍이 양방향으로 데이터를 송수신 할 수 있습니다. 1000BASE-T 는 4D-PAM5 라는 변조 방식을 사용하여, 한 번에 더 많은 데이터를 전송할 수 있도록 설계되었습니다.

Pin	100BASE-TX	1000BASE-T
1	TD+	BI_DA+
2	TD-	BI_DA-
3	RD+	BI_DB+
4	Unused	BI_DB-
5	Unused	BI_DC+
6	RD-	BI_DC-
7	Unused	BI_DD+
8	Unused	BI_DD-

표 1. RJ45 커넥터 핀 구성

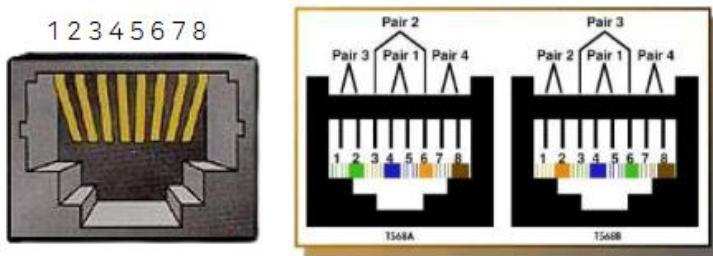


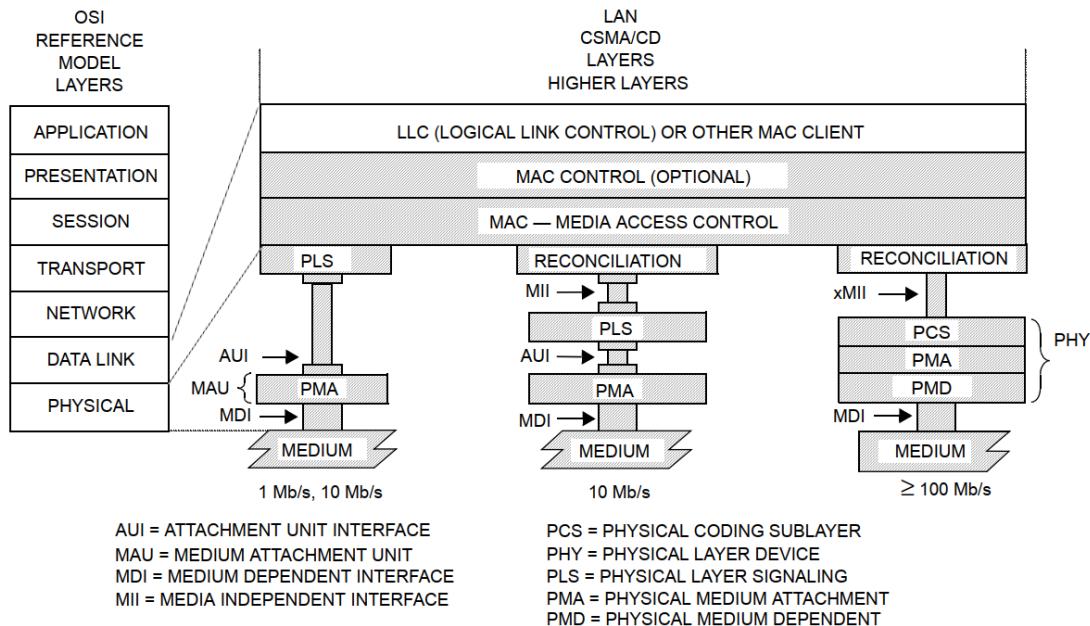
그림 2. RJ45 커넥터와 크로스오버 케이블 (왼쪽)/스트레이트 케이블 (오른쪽) 핀 구성

100BASE-TX 는 Fast Ethernet 의 한 종류로, 100Mbps 속도로 데이터를 전송하고, 1000Base-T 는 Gigabit Ethernet 의 한 종류로 1000Mbps (즉, 1Gbps) 속도로 데이터를 전송합니다.

이 어플리케이션 노트에서는 100 Mbps 고속 이더넷과 1000 Mbps 기가비트 이더넷의 물리 계층 적합성 테스트 및 테스트 솔루션에 대해 설명합니다. 엔지니어가 빠르고 효율적으로 테스트를 수행할 수 있도록 도와 제품 개발 및 테스트의 효율성을 향상시킵니다.

1.2 100BASE-TX/1000BASE-T 커넥터 및 핀

100BASE-TX 물리 계층은 PCS(Physical Coding Sublayer), PMA(Physical Media Attachment) 및 PMD(Physical Media Dependent)로 구성됩니다.



NOTE—In this figure, the xMII is used as a generic term for the Media Independent Interfaces for implementations of 100 Mb/s and above. For example: for 100 Mb/s implementations this interface is called MII; for 1 Gb/s implementations it is called GMII; for 10 Gb/s implementations it is called XGMII; etc.

Figure 1-1—IEEE 802.3 standard relationship to the ISO/IEC Open Systems Interconnection (OSI) reference model

그림 3. 1/10/100 MBPS 이더넷 물리 계층

100BASE-TX는 이더넷 표준 중 하나로, 데이터를 전송할 때 특정한 방식으로 인코딩을 수행합니다. 이 과정은 몇 가지 중요한 단계로 나눌 수 있습니다.

PCS (Physical Coding Sublayer) 부분은 데이터 인코딩을 담당합니다. MII(Media Independent Interface)라는 인터페이스를 통해 100 Mbps의 데이터 스트림을 받습니다. 이 데이터는 4 비트 단위로 들어오는데, 이 4 비트 데이터를 5 비트 코드 그룹으로 변환합니다. 이 과정을 4B/5B 변환이라고 합니다. 이렇게 하면 인코딩 된 데이터의 속도가 125 Mbps로 증가합니다. 이 말은 외부에서 측정했을 때의 데이터 속도가 125 Mbps가 된다는 의미입니다. UI(Unit Interval)는 각 비트가 전송되는 시간 간격을 의미하며, 여기서는 8 ns입니다.

PMA 레이어에서는 MLT-3(Multi-Level Transmit 3)이라는 인코딩 방식을 사용합니다. 이 인코딩 방식에서는 신호가 세가지 레벨 (예를 들어 -1, 0, 1)을 가집니다. MLT-3 인코딩은 NRZ(Non-Return-to-Zero) 방식으로 이루어집니다. NRZ 방식에서는 비트가 "1"일 때 신호가 전환되고, "0"일 때 전환이 일어나지 않습니다.

데이터 전송 과정에서 "1"이나 "0"이 너무 길게 연속적으로 나타나면 전자기 간섭(EMI)이 증가하거나 직류 성분이 너무 많아질 수 있습니다. 이러한 문제를 피하기 위해 스크램블링이라는 과정을 사용합니다. 스크램블링은 데이터의 패턴을 변환하여 전송하되, 수신 측에서 다시 원래 데이터로 복구할 수 있도록 합니다. 100BASE-TX의 경우 최대 12 개의 연속된 "0"을 전송할 수 있습니다.

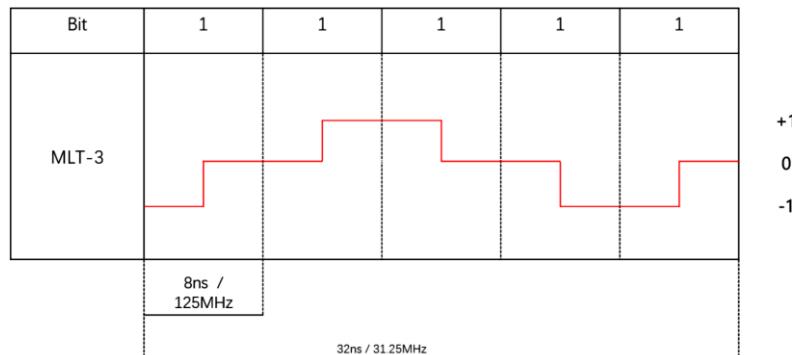


그림 4. MLT-3 인코딩과 NRZ 인코딩

MLT-3(Multi-Level Transmit 3) 인코딩은 네트워크 데이터 전송에서 주로 사용하는 인코딩 방식 중 하나로, 특히 100Base-TX 와 같은 Fast Ethernet 표준에서 많이 사용됩니다. MLT-3는 데이터를 전송할 때 전송신호의 전압 수준을 세가지로 변환하여 사용하는 방식입니다. MLT-3의 주요 목적은 전송 대역폭을 줄이면서도 효율적으로 데이터를 전달하는 것입니다.

MLT-3 인코딩은 세 가지 전압레벨 -1, 0, +1을 사용합니다. 이는 단순 NRZ 인코딩이 두 가지 레벨(보통 0과 +1)을 사용하는 것과 비교됩니다.

MLT-3에서 신호 레벨 변환은 비트 "1"에서만 일어납니다. 비트가 "1"일 때마다 신호가 다음 레벨로 이동합니다. 예를 들어, +1에서 0으로, 0에서 -1로, -1에서 다시 0으로, 그리고 0에서 +1로 전환합니다. 그리고 비트가 0 일때는 현재 신호 레벨을 유지합니다.

MLT-3 인코딩의 큰 장점은 신호 전환 빈도가 낮아진다는 점입니다. NRZ에서 비트 "1"이 연속될 때마다 신호가 전환되는 반면, MLT-3에서는 세가지 상태 사이를 순차적으로 이동하기 때문에 동일한 데이터 속도에서도 신호 전환이 적습니다. 이는 전송 대역폭을 줄여주고, 고속 네트워크에서 신호 무결성을 유지하는 데에 도움이 됩니다.

예를 들어서 설명 드리면, NRZ 인코딩에서는 "11100"이라는 비트 시퀀스가 있다면 MLT-3 인코딩을 거치면 신호가 다음과 같이 변환됩니다. 첫 번째 "1"에서 신호가 0에서 +1로 전환됩니다. 두 번째 "1"에서 신호가 +1에서 0으로 전환됩니다. 세 번째 "1"에서 신호가 0에서 -1로 전환됩니다. 네 번째 "0"에서는 신호가 유지되므로 -1 상태를 유지합니다. 다섯 번째 "0"에서도 신호가 유지됩니다.

이렇게 MLT-3를 사용하면 대역폭을 줄이고, 전송 간에 신호의 스펙트럼을 분산시켜 전자기 간섭(EMI)을 줄이는 데 도움을 줍니다. 하지만 다소 복잡한 인코딩 방식으로 인해 해석과 구현이 단순 NRZ 방식보다 어렵습니다.

이러한 MLT-3 인코딩 방식은 100BASE-TX 와 같은 고속 네트워크에서 효율적인 데이터 전송을 위해 널리 사용됩니다. 이 방식은 전송 신호의 주파수 성분을 낮추고, 효율적으로 신호를 전송할 수 있게 도와줍니다.

1.3 100BASE-TX/1000BASE-T 커넥터 및 핀

위에서 언급한 100BASE-TX 물리 계층과 유사하게, 1000BASE-T 물리 계층은 PCS(Physical Coding Sublayer), PMA(Physical Media Attachment) 및 AUTONEG(Auto-Negotiation)로 구성됩니다.

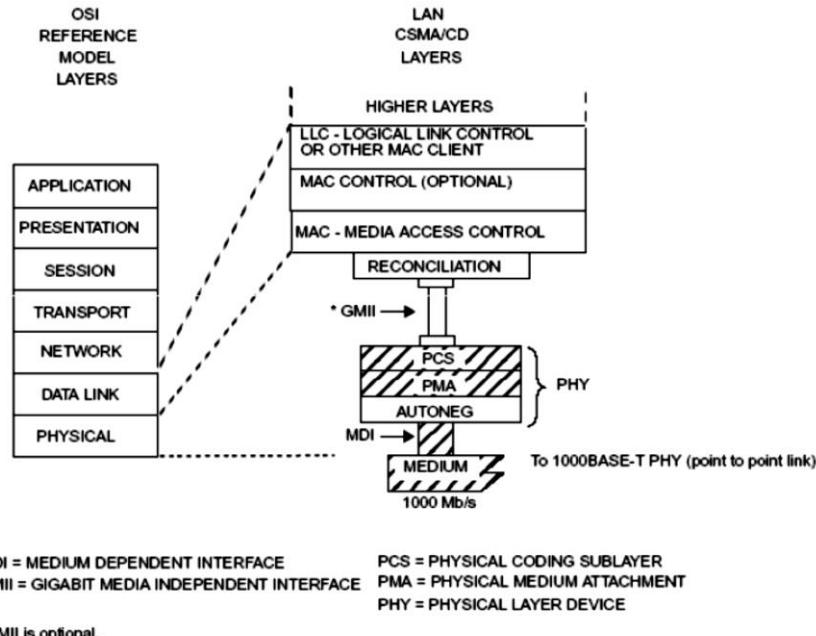


그림 5. 1000 MBPS 이더넷 물리 계층

차이점은 1000BASE-T의 PCS는 4D-PAM5라는 인코딩 방식을 채택하여 4 쌍의 전선과 5 개의 전압 레벨로 데이터를 전송한다는 것입니다. 각 쌍의 데이터 전송 속도는 125Mbps입니다. 2 비트를 전송을 위해 1 Baud로 변환하는 것, 즉 각 UI에서 2 비트를 전송하는 것입니다. 따라서 1000Mbps($4 \times 125\text{Mbps} \times 2$ 비트)의 전송 속도가 구현됩니다.

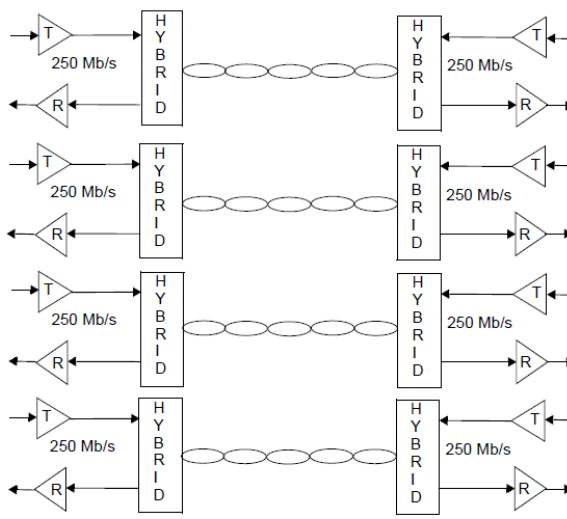


그림 6. 1000BASE-T 토플로지

4D-PAM5 인코딩 방식은 데이터를 효율적으로 전송하기 위해 설계된 복잡한 인코딩 기술입니다. 4D는 4 차원을 의미합니다. 여기서 4 차원은 물리적으로 4 개의 신호 쌍을 동시에 사용하여 데이터를 전송한다는

것을 의미합니다. 1000BASE-T 에서는 Cat5e 또는 Cat6 케이블의 4 쌍을 모두 사용합니다. 각 신호 쌍은 독립적으로 데이터를 송수신하며, 이들이 동시에 작동하여 더 높은 전송 속도를 실현합니다.

PAM5는 5 단계 펄스 진폭 변조를 의미합니다. 이 방식에서는 각 신호 쌍이 5 개의 서로 다른 전압 레벨(예를 들면, -2, -1, 0, +1, +2) 중 하나로 변조됩니다. PAM5는 각 신호 쌍이 동시에 두 비트의 정보를 전송할 수 있도록 합니다. 이를 통해 더 많은 정보를 동시에 전송할 수 있어 1000 Mbps의 데이터 전송 속도를 달성할 수 있습니다. 각 신호 쌍에서 최대 2 비트의 데이터가 전송됩니다. 그러나 실제로는 한 번에 8 비트(1바이트)를 전송할 수 있도록 4 개의 쌍이 동시에 사용됩니다. 예를 들어, 각 쌍이 두 비트씩 정보를 전송하면, 4 개의 쌍이 함께 8 비트를 전송하게 됩니다.

1000BASE-T에서는 4 개의 신호 쌍이 동시에 송신과 수신을 할 수 있습니다(Full Duplex). 즉, 동일한 신호 쌍이 송신과 수신을 동시에 수행합니다. 이 방식은 신호 쌍 간의 간섭을 최소화하기 위해 에코 캔슬링 및 다중화 기술을 사용합니다.

PAM5는 5 단계의 진폭을 사용하므로, 각 심볼(Symbol)이 2 비트 이상의 정보를 전달할 수 있습니다. 이러한 이유로 코딩 효율이 높아집니다. 4D-PAM5의 구조는 오류 감지 및 수정 능력을 향상시키는 데에도 기여합니다.

1.4 100BASE-TX vs. 1000BASE-T

100BASE-TX와 1000BASE-T의 유사한 점은 차동신호, RJ45 커넥터와 범주 5 케이블을 사용한다는 것, 그리고 각 와이어 쌍에 걸쳐 125Mbps의 데이터 전송 속도와 8ns UI를 사용하다는 점입니다. 반대로 차이점은 서로 다른 인코딩 방식(100BASE-TX는 3 개의 전압 레벨을 사용하는 MLT-3 인코딩 방식, 1000BASE-T는 5 개의 전압 레벨을 사용하는 4D-PAM5를 사용)으로 서로 다른 테스트 패밀릿을 생성한다는 점, 그리고 테스트 부하가 다르다는 점이 있습니다.

2. 100BASE-TX Fast Ethernet Testing

100BASE-TX 적합성 테스트에는 디지털 오실로스코프와 규정 준수 프로브, 케이블 및 테스트 장비가 필요합니다. 이에 대한 자세한 내용은 다음 섹션에서 설명합니다.

RIGOL 이더넷 적합성 테스트 소프트웨어는 테스트 프로세스를 자동화하여 엔지니어가 규정 준수 테스트를 보다 정확하고 효율적으로 수행할 수 있도록 지원합니다. 그림 7은 RIGOL DS70000 시리즈 디지털 오실로스코프에서 실행되는 이더넷 규정 준수 테스트 소프트웨어를 보여줍니다.

100BASE-TX 적합성 테스트에는 아래와 같은 내용들이 포함됩니다.

- 아이다이어그램/탬플릿 (Eye Diagram/Template)
- 진폭(Amplitude)
- 상승 시간(Rise Time)
- 지터(Jitter)
- 대칭(Symmetry)
- 하강 시간(Fall Time)
- 듀티 사이클 왜곡(Duty Cycle Distortion)
- 오버슈트(Overshoot)

기타 테스트(이 어플리케이션 노트에는 포함되지 않음): MDI 반사 로스 테스트(MDI return loss test) (송신기 및 수신기), 수신기 테스트 (BERT), 고급 테스트(ADR, 변압기 감쇄(transformer attenuation), 입력 임피던스)

2.1 아이 다이어그램/탬플릿 테스트 (Eye Diagram/Template Test)

아이 다이어그램/탬플릿 테스트는 이더넷 테스트에서 100BASE-TX의 신호 품질을 빠르게 추정하는 데 가장 자주 사용되는 도구입니다. 단위 간격(8ns)을 사용하여 신호 섹션을 나눕니다. 모든 섹션이 중첩되어 아이 다이어그램을 형성합니다. 테스트 신호의 모든 비트가 "진입 영역(enter area)" 내에서 실행되면 테스트에 통과한 것으로 간주됩니다. 그렇지 않으면 테스트에 실패한 것으로 간주됩니다.

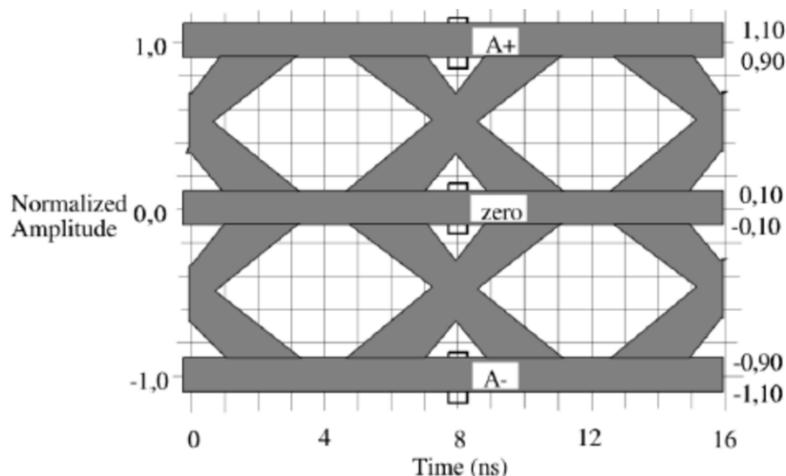


그림 7. 100BASE-TX 아이 패턴 템플릿

2.2 지터 테스트 (Jitter Test)

지터 테스트는 듀티 사이클 왜곡(duty cycle distortion)과 베이스라인 드리프트(baseline wander)의 기여를 포함한 총 송신 지터를 측정합니다. 지터는 정확한 타이밍에 도착하지 못하고 약간 빨라지거나 느려지는 현상을 이야기합니다. 디지털 신호가 규칙적인 간격으로 도착해야 하는데, 작은 오차가 생기면서 신호가 조금씩 어긋나는 현상을 이야기합니다. 이 오차가 심해지다 보면 데이터 전송에 오류가 발생할 수 있습니다. 따라서 이렇게 지터는 여러가지 원인으로 발생할 수 있는 데 그 중 중요한 두가지가 바로 듀티 사이클 왜곡과 베이스라인 드리프트입니다. 듀티사이클 왜곡은 신호의 펄스 길이가 의도한 것보다 짧거나 길어지는 현상입니다. On/Off의 길이가 정확해야 하는데, 이것이 틀어지면서 지터가 생길 수 있습니다. 베이스라인 드리프트는 신호의 기준점이 시간이 지남에 따라 조금씩 이동하는 현상입니다. 이런 이동이 생기면 신호가 정확히 해석되지 못하고 지터가 발생합니다. 이렇게 아이 딜레이그램에서 신호가 겹치는 교차점을 계속 측정하고, 이 교차점들이 약간씩 앞뒤로 흔들릴 때 흔들림의 정도를 히스토그램으로 볼 수 있습니다. 이렇게 만들어진 히스토그램을 보고 가장 큰 지터와 가장 작은 지터 차이를 피크-투-피크 지터(peak-to-peak jitter)라고 합니다. 이를 계산해 신호가 얼마나 흔들리는지를 추정할 수 있습니다. 이 파형은 3레벨 신호이기 때문에 양(+) 및 음(-) 교차점을 모두 측정하는 것이 중요합니다. 규격에 따르면 송신 지터(+/-)는 1.4 ns를 초과해서는 안 됩니다.

2.3 듀티 사이클 왜곡 테스트 (Duty Cycle Distortion Test)

듀티 사이클 왜곡(duty cycle distortion)이란 신호의 켜짐(1)과 꺼짐(0) 상태가 의도한 시간만큼 유지되지 않을 때 발생하는 오류를 이야기합니다. 예를 들면, 신호가 16ns 동안 켜져 있어야 하는데 더 짧거나 길 때 문제가 생기는 것입니다. 따라서 듀티 사이클 왜곡은 양(+) 펄스의 폭에서 $+V_{out}/2$ 지점과 음(-) 펄스의 폭에서 $-V_{out}/2$ 지점에서 측정됩니다. 각 양의 펄스와 음의 펄스의 절반 지점에서 신호가 정확히 반대로 전환되었는지를 확인하는 것입니다. 안정적인 파형은 01010101NRZ(non-return-to-zero) 비트 스트림을 생성하여 얻어집니다. NRZ 방식은 0과 1의 상태가 연속적으로 변화하며 중간에 리셋 없이 신호가 지속됩니다. 이 패턴을 사용하여 신호가 규칙적으로 반복되도록 만들어 안정적인 파형을 얻습니다. 양극 및 음극 신호 펄스의 폭은 각각 명목상 16 ns입니다. 규격에 따르면, 50% 교차 시점이 16 ns 간격의 시간 격자(time grid)에 가장 잘 맞춘 기준선에서 벗어나는 편차가 ± 0.25 ns를 초과해서는 안 됩니다. 이 내용은 그림 8에 나와 있습니다.

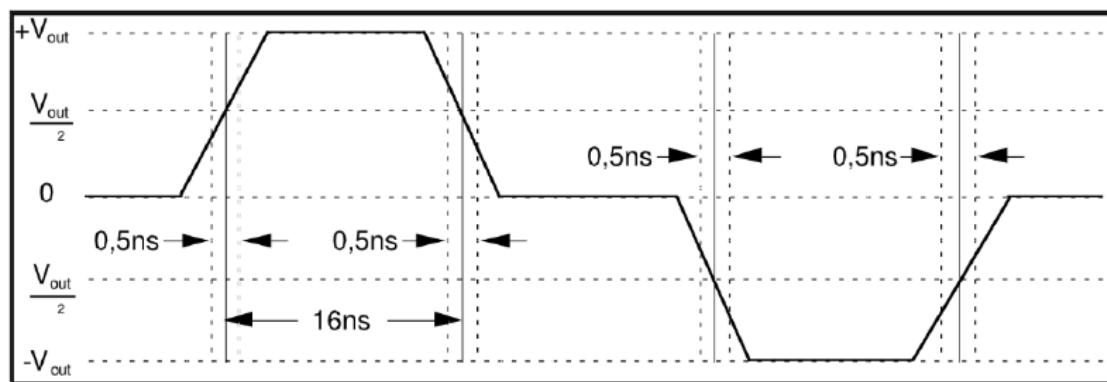


그림 8. 듀티 사이클 왜곡 테스트 신호 및 편차

2.4 진폭 테스트 (Amplitude Test)

진폭 테스트는 피크 진폭, 파형 오버슈트, 그리고 진폭 대칭을 포함합니다.

표준에 따르면, 차동 출력 전압은 Shielded Twisted Pair(STP)의 경우 $1165 \text{ mV} \sim 1285 \text{ mV}$ 사이여야 하고, Unshielded Twisted Pair(UTP)의 경우 $950 \text{ mV} \sim 1050 \text{ mV}$ 사이여야 합니다.

오버슈트는 신호가 전환될 때 최종 목표 값을 넘어서 일시적으로 더 높거나 더 낮은 값까지 도달하는 현상입니다. 따라서 신호가 전환될 때, 최종 조정된 값을 초과하는 정도를 백분율로 나타낸 것이 오버슈트입니다. 테스트 장비는 오버슈트를 테스트하기 위해 14 비트로 구성된 파형을 출력해야 하며, 각 신호 레벨의 지속 시간은 14 비트($14 \text{ 비트} \times 8\text{ns}/\text{비트} = 112\text{ns}$)입니다. 피크 투 피크 진폭은 대략적으로 V_{out} 의 두 배입니다. 오버슈트 테스트를 위해서 양 펄스와 음 펄스의 지속시간을 모두 측정해야 합니다. 표준에 따르면, 오버 슈트는 최대 5%를 초과해서는 안 됩니다.

신호의 진폭 대칭성을 평가하기 위해서는 $+V_{\text{out}}$ 과 $-V_{\text{out}}$ 의 비율을 계산해야 합니다. 이 비율은 0.98에서 1.02 사이여야 합니다. 만약 이 비율 기준을 벗어나면 신호가 한쪽으로 치우친 상태라는 의미이며, 이는 통신 품질에 악영향을 줄 수 있습니다.

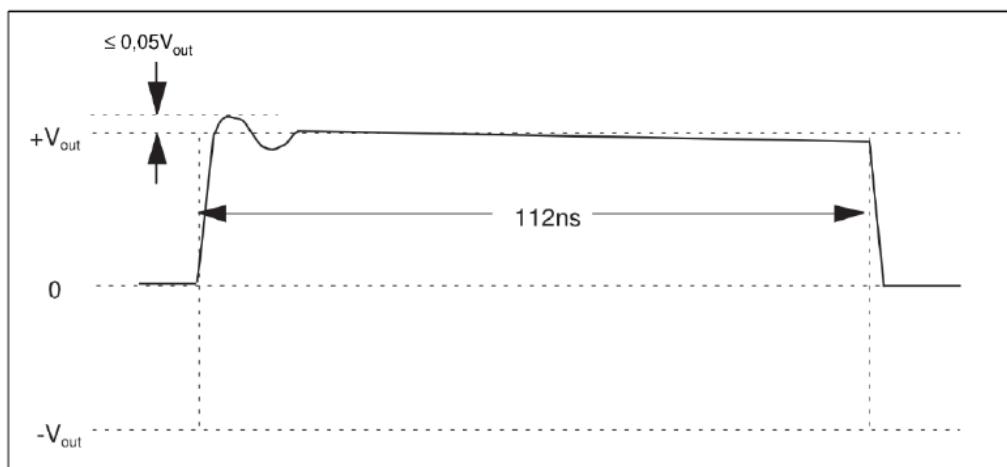


그림 9. 실제 출력 인터페이스의 오버슈트 현상

2.5 상승/하강 시간과 대칭성 (Rise/Fall Time)

표준에 따르면, 상승 시간(Rise Time)과 하강 시간(Fall Time)은 차동 전압의 10%에서 90% 사이에서 측정해야 합니다. 이 시간들은 신호가 얼마나 빠르게 전환하는지를 확인하기 위해 사용됩니다. 빠르게 전환되는 지는 통신 품질과 직결됩니다. 이 테스트 결과는 3ns와 5ns 사이에 있어야 합니다.

대칭성 측정에서는 모든 상승 시간 또는 하강 시간이 일관적인지를 확인합니다. 모든 상승 시간 또는 하강 시간의 최대 값과 최소 값 간의 차이가 0.5ns 미만이어야 합니다. 상승 시간과 하강 시간이 크게 차이나면, 신호 왜곡이 발생하고 데이터 전송의 정확도가 떨어질 수 있습니다. 대칭성이 보장되면 신호가 일정한 속도로 전환되어 통신 품질이 향상됩니다.

2.6 100BASE-TX 적합성 테스트 결과

실제 테스트에서는 패킷 생성기(packet generator)를 사용해 보드가 Ethernet 신호를 생성하도록 해야 합니다. 아래 그림 10은 DS70000에서 수행한 100BASE-TX 적합성(Compliance) 테스트 보고서를 보여줍니다.

이 보고서에는 측정 항목, 해당 항목의 최대/최소값 그리고 실제 측정값이 표시됩니다. 측정값과 최대/최소 한계 값을 비교하여 마지막 열에 Pass/Fail 결과를 표시합니다.

100BaseT Test Results (Ref: IEEE 802.3-2018)					
Test Information	Report Time: 2024-10-16 11:26:38				
	1.0.0.0				
Equipment Information	Device	Manufacturer	Model	Serial Number	
	Probe	RIGOL TECHNOLOGIES	PVA8700	PVAE241100001	
Device Under Test	Device ID	Device Description	Device Pair ID	Port ID	
	Ethernet 01	Ethernet	A	1#	
Measure	Item	Measured Value	Minimum	Maximum	Result
	Output Voltage(+Vout)	957.89 mV	950 mV	1050 mV	Passes
	Output Voltage(-Vout)	-968.83 mV	-1050 mV	-950 mV	Passes
	Signal Amplitude Symmetry	0.9887	0.98	1.02	Passes
	Waveform Overshoot(+Ve)	2.418 %	0 %	5 %	Passes
	Waveform Overshoot(-Ve)	1.685 %	0 %	5 %	Passes
	Rise Time(+Ve)	4.154 ns	3 ns	5 ns	Passes
	Fall Time(+Ve)	4.461 ns	3 ns	5 ns	Passes
	Rise Time(-Ve)	4.255 ns	3 ns	5 ns	Passes
	Fall Time(-Ve)	4.428 ns	3 ns	5 ns	Passes
	Rise/Fall Time Symmetry(+Ve)	307.6 ps	0 ps	500 ps	Passes
	Rise/Fall Time Symmetry(-Ve)	173.06 ps	0 ps	500 ps	Passes
	Distortion(peak-to-peak)	450 ps	0 ps	500 ps	Passes
	Eye UI	31247	NA	NA	Passes
	Transmit Jitter(+Ve)	0.62 ns	0 ns	1.4 ns	Passes
	Transmit Jitter(-Ve)	0.62 ns	0 ns	1.4 ns	Passes

그림 10. 100BASE-TX 적합성 결과 레포트

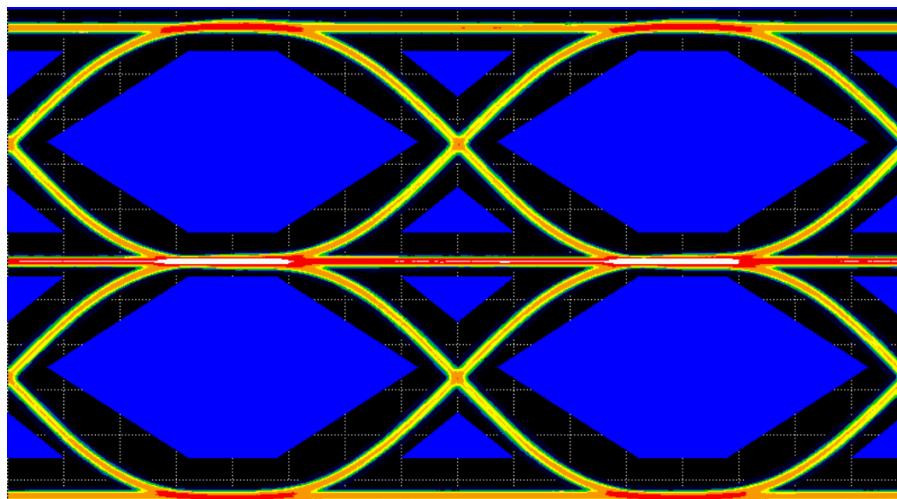


그림 11. 100BASE-TX 아이 다이어그램 결과

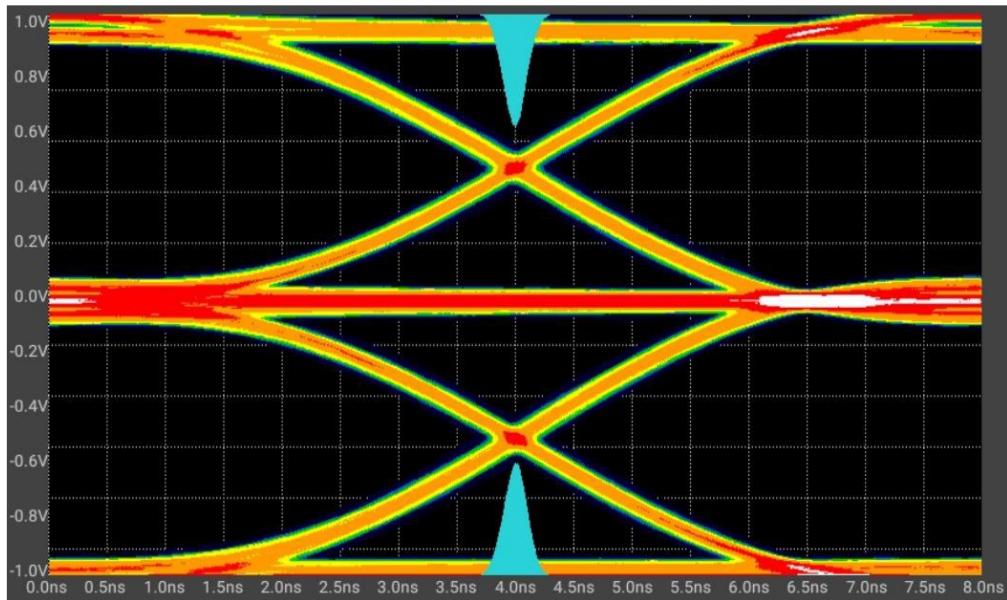


그림 12. 100BASE-TX 파형 지터 분석 결과

3. 1000BASE-T Gigabit Ethernet Testing

100BASE-T는 100BASE-TX 보다 10 배 더 빠른 데이터 속도를 제공하는 Ethernet 버전입니다. 네트워크 대역폭이 확장됨에 따라, 실시간 대역폭이 더 많이 필요한 어플리케이션에서 사용할 수 있습니다.

100BASE-T 신호의 복잡성으로 인해 IEEE 802.3ab 표준에서는 기가비트 이더넷(Gigabit Ethernet)의 물리계층(Physical Layer) 적합성을 테스트하기 위한 4 가지 테스트 모드를 정의하고 있습니다.

100BASE-T 적합성 테스트를 위해서는 디지털 오실로스코프, 규격에 맞는 프로브, 케이블, 테스트 픽스쳐가 필요합니다. 이에 대한 자세한 내용은 4. Instrumentation Requirements for 100BASE-TX and 1000BASE-T Compliance Test에서 다룹니다. 그림 13은 RIGOL DS70000 시리즈 디지털 오실로스코프에서 실행 중인 Ethernet 적합성 테스트 소프트웨어를 보여줍니다.

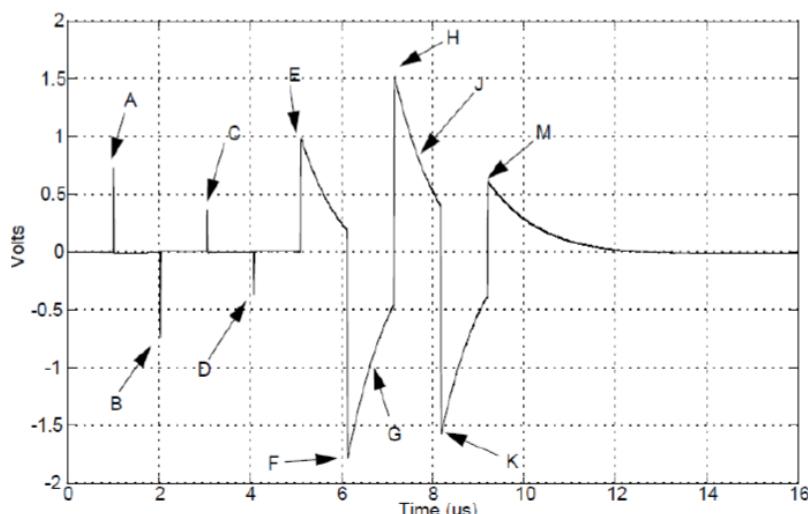
진폭 테스트는 피크 진폭, 파형 오버슈트, 그리고 진폭 대칭을 포함합니다.

3.1 테스트 모드 1

테스트 모드 1은 1000BASE-T 인터페이스에서 생성된 테스트 모드 1 신호를 사용하여 템플릿 (Template), 피크(Peak), 드롭(Droop) 테스트를 수행하는 데 사용됩니다. 테스트 모드 1에서 전송되는 데이터 신호는 다음과 같습니다. A: (+2 후에 127 개의 0 심볼), B: (-2 후에 127 개의 0 심볼), C: (+1 후에 127 개의 0 심볼), D: (-1 후에 127 개의 0 심볼), E/H: (128 개의 +2 심볼), F/K: (128 개의 -2 심볼), M: (1024 개의 0 심볼)

테스트 모드 1의 테스트 목적은 다음과 같습니다.

- 최대 100 미터 거리까지 데이터를 전송할 수 있는 인터페이스의 성능을 검증합니다.
- 정확한 상승 시간을 확인하여 데이터 교환이 원활하게 이루어지는지 검증합니다.
- 신호의 대칭성을 검증합니다.

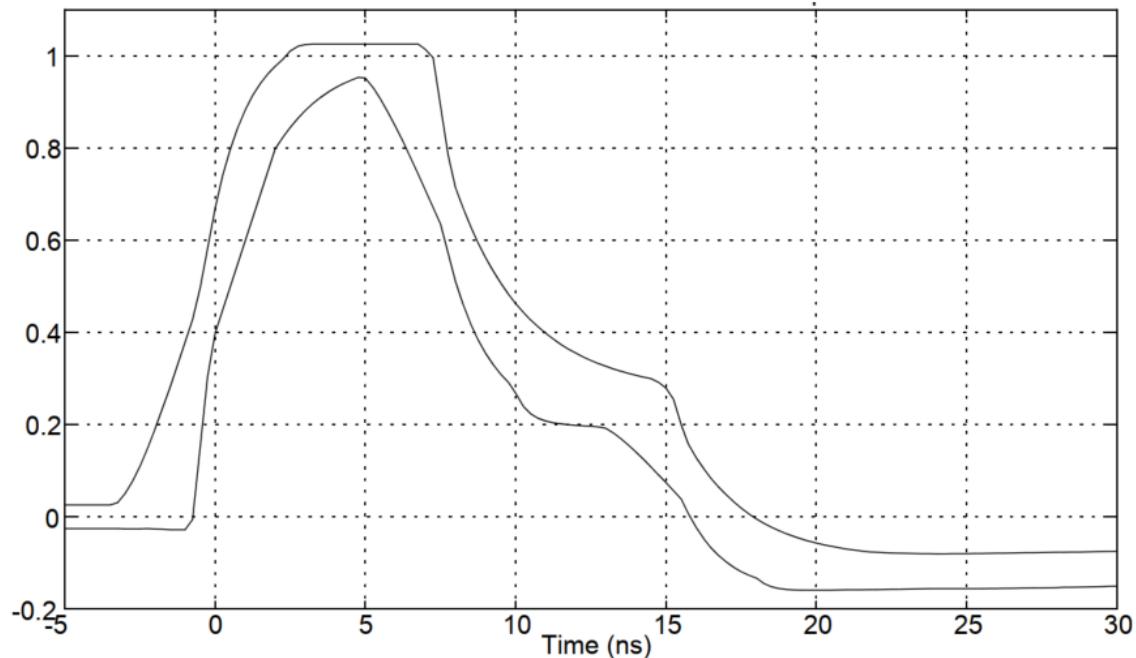


테스트 모드 1 파형

IEEE 802.3 규격에 정의된 피크 테스트와 드롭 테스트의 합격 기준:

- A 와 B 지점에서 파형 피크의 절대값은 670 mV ~ 820 mV ($0.75 \text{ V} \pm 0.83 \text{ dB}$) 범위 내에 있어야 합니다.
- A 와 B 지점에서 파형 피크의 절대값 차이는 A 와 B 지점 피크 절대값의 평균치에서 1% 미만이어야 합니다.
- C 와 D 지점에서 파형 피크의 절대값 차이는 A 와 B 지점 피크 절대값 평균치의 0.5 배에서 2% 미만이어야 합니다.
- G 지점에서 파형의 음의 피크 값의 크기는 F 지점의 음의 피크 값 크기의 73.1% 이상이어야 합니다. (G 지점은 F 지점에서 정확히 500 ns 후의 지점으로 정의됩니다. F 지점은 파형이 최소값에 도달하는 지점으로 정의됩니다.)
- J 지점에서 파형 피크 값의 크기는 H 지점에서 파형 피크 값의 크기의 73.1% 이상이어야 합니다. (J 지점은 H 지점에서 정확히 500 ns 후의 지점으로 정의됩니다. H 지점은 파형이 최대값에 도달하는 지점으로 정의됩니다.)

정규화된 후 A, B, C, D 지점 주변의 전압 파형은 아래에 표시된 시간 영역 템플릿 내에 있어야 합니다. 이 템플릿을 사용하여 테스트 중인 신호가 표준에 정의된 템플릿에 맞는지 확인할 수 있습니다.



A, B, C, D 지점 주변의 정규화된 전압 파형을 사용한 테스트 템플릿

정규화된 후 F 지점과 H 지점 주변의 전압 파형은 아래에 표시된 시간 영역 템플릿 내에 있어야 합니다. 이 템플릿을 사용하여 테스트 중인 신호가 표준에 정의된 템플릿에 맞는지 확인할 수 있습니다.

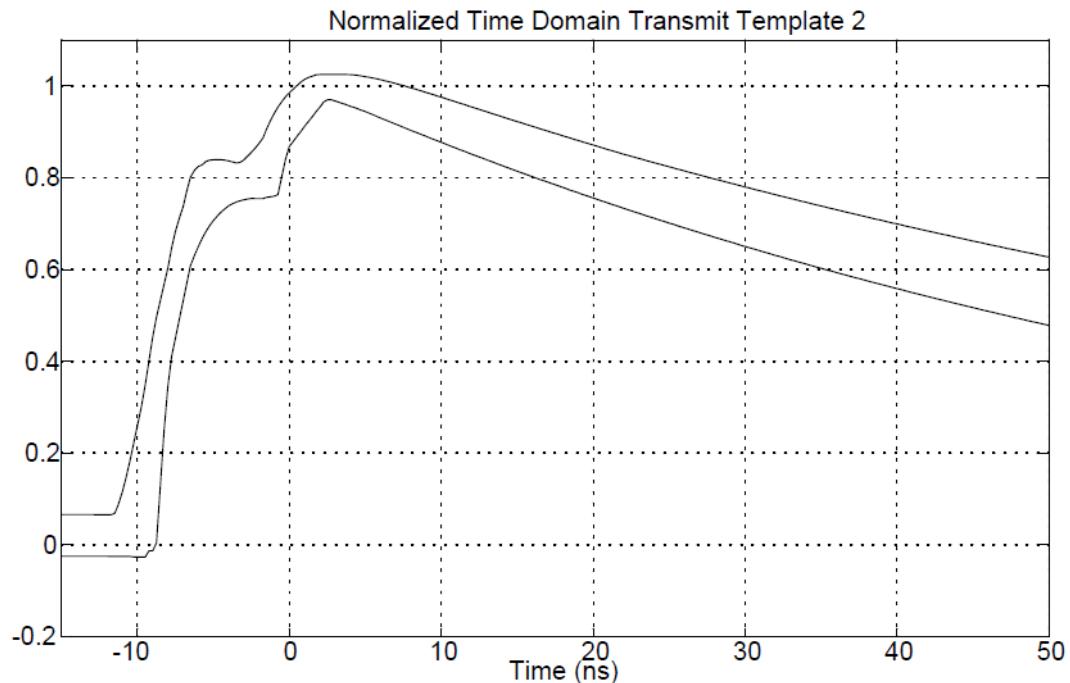


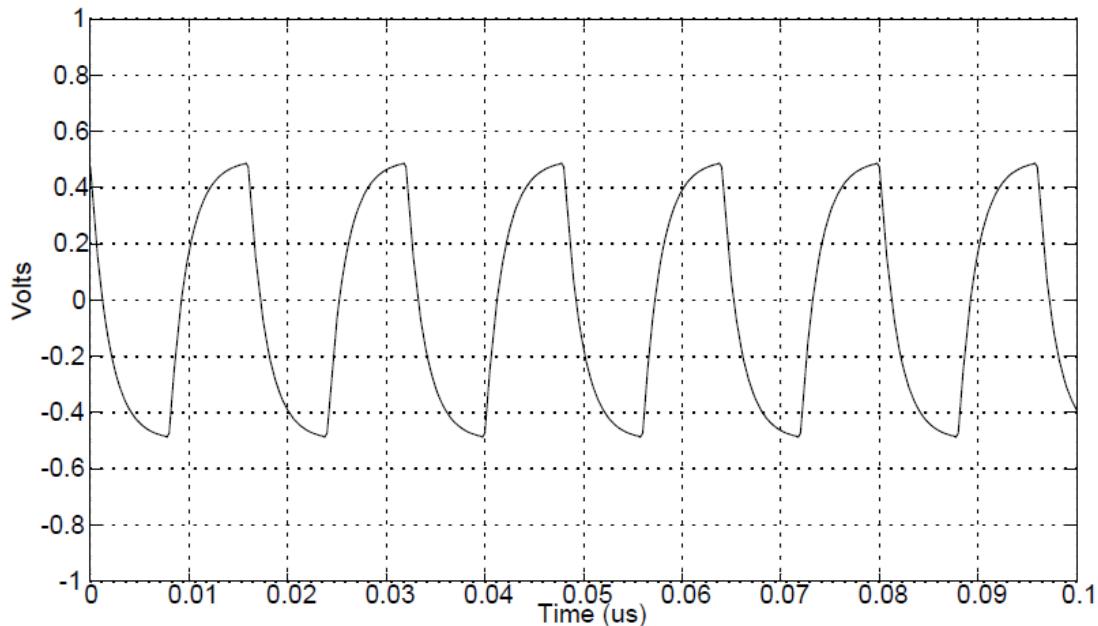
Figure 40-27—Normalized transmit templates as measured at MDI using transmit test fixture 1

F, H 지점 주변의 정규화된 전압 파형을 사용한 테스트 템플릿



3.2 테스트 모드 2 그리고 테스트 모드 3

테스트 모드 2는 마스터 모드에서 지터 테스트를 수행하는 데 사용되며, 테스트 모드 3은 슬레이브 모드에서 지터 테스트를 수행하는 데 사용됩니다. 그림 17에 표시된 1000BASE-T 인터페이스의 테스트 모드 2/3 신호를 사용하여 테스트를 수행할 수 있습니다.



테스트 모드 2 와 3 파형

표 2. 마스터 슬레이브 모드에서의 지터 테스트 사양

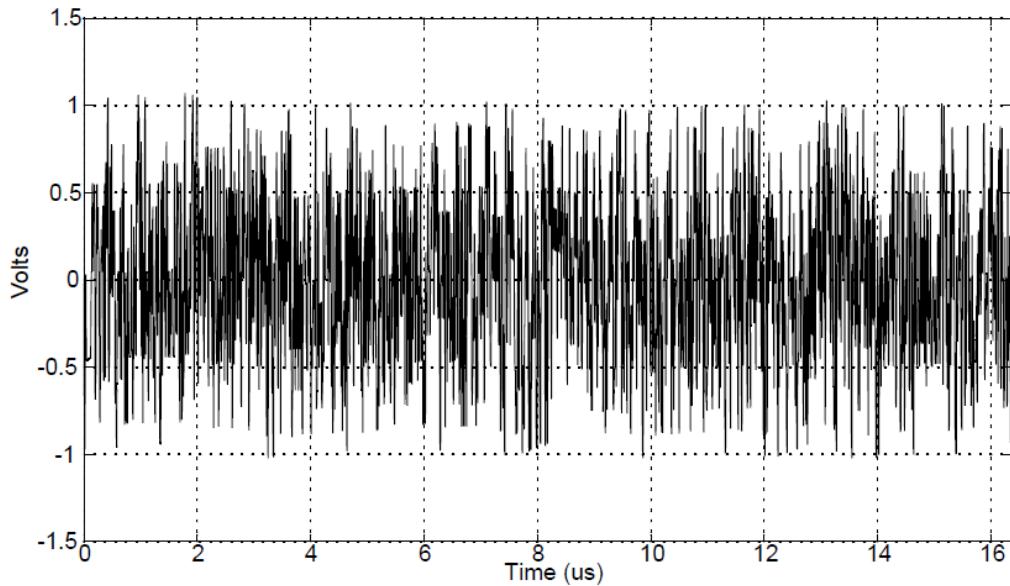
테스트 모드	테스트 항목	사양
마스터 지터[1]	마스터 TX_TCLK 의 피크 투 피크 지터 값	$\leq 1.4 \text{ ns}$
	마스터 TX_TCLK 신호의 지터를 고역 필터(High-Pass Filter)로 필터링 한 후, 측정했을 때 값	$\leq 0.3 \text{ ns}$
	$H_{jf1}(f) = \frac{jf}{jf + 5000}$	
슬레이브 지터[1]	슬레이브 TX_TCLK 의 피크 투 피크 지터 값	$\leq 1.4 \text{ ns}$
	슬레이브 TX_TCLK 신호의 지터를 고역 필터(High-Pass Filter)로 필터링 한 후, 측정했을 때 값	$\leq 0.4 \text{ ns}$
	$H_{jf2}(f) = \frac{jf}{jf + 32000}$	

3.3 테스트 모드 4

테스트 모드 4는 송신기 테스트 픽스처를 사용하여 MDI(Medium Dependent Interface)에서 차동 신호 출력을 관찰하는 데 사용됩니다. (그림 18에 표시된 테스트 모드 4 파형 참조)

규격에 따르면, 피크 왜곡(peak distortion)은 TX_TCLK 심볼 속도로 임의의 위상에서 차동 신호 출력을 샘플링하고, 2047 개의 연속된 샘플 블록을 표준 기관에서 제공한 코드나 동등한 방식으로 처리하여 결정됩니다.

아이 디어그램의 개구(Eye Opening)내에서 UI(Unit Interval)의 60% 이상에서 피크 왜곡이 10mV 이하일 경우 물리 계층이 테스트에 합격한 것으로 간주됩니다.



테스트 모드 4 파형

3.4 1000BASE-T 적합성 테스트 결과

실제 테스트에서는 제어 소프트웨어를 사용해 기가비트 이더넷 포트를 통해 테스트 신호를 전송해야 합니다. 예를 들어, Microchip KSZ9031RNX-EVAL 보드를 사용하여 이더넷 신호를 생성할 수 있습니다.

먼저 CMD21228_Setup.exe 드라이버 소프트웨어를 PC 설치한 후 mdioConfig Tool을 열어 구성 명령어를 입력하고 해당 포트를 통해 패스트 이더넷(Fast Ethernet) 또는 기가비트 이더넷(Gigabit Ethernet) 신호를 전송합니다.

그림 19는 DS70000 오실로스코프에서 실행 중인 1000BASE-T 적합성 테스트를 보여줍니다. 테스트 보고서에는 템플릿 테스트, 피크 테스트, 드롭 테스트의 결과가 표시됩니다. 이 보고서는 테스트 모드 1 측정 항목과 해당 항목의 최대/최소 한계 값, 측정된 값, 그리고 Pass/Fail의 결과를 포함합니다.

테스트된 신호가 표준 기가비트 이더넷 신호 이기 때문에 모든 항목의 기준을 충족하게 되면 마지막 열에 Passes로, 충족하지 못하는 경우 Failure로 표시됩니다.

RIGOL DS70000-ENETC 이더넷 적합성 테스트 소프트웨어는 측정값을 직접 제공하며, 측정값을 규격에 정의된 한계 값과 비교해 Pass 또는 Fail 결과를 표시합니다. 또한, 템플릿 테스트 결과를 규격에 정의된 마스크와 비교하여 엔지니어들이 참조할 수 있도록 합니다.

테스트 결과와 데이터는 HTML 형식의 보고서로 생성할 수 있습니다. 이 보고서에는 모든 테스트 데이터, 장비 일련번호, 테스트 시간, 그리고 기타 주요 정보가 포함됩니다. 생성된 보고서는 장비에 저장하거나 USB 저장 장치로 내보내어 고객 또는 공급업체와 쉽게 공유할 수 있습니다.

테스트 준비와 연결이 완료된 후, 하드웨어 가속 컴퓨팅과 데이터 처리 능력을 활용해 몇 초 만에 적합성 테스트를 수행할 수 있으며, 이를 통해 테스트 효율성이 크게 향상됩니다.

4. 100BASE-TX 와 1000BASE-T 적합성 테스트를 위한 장비 구성

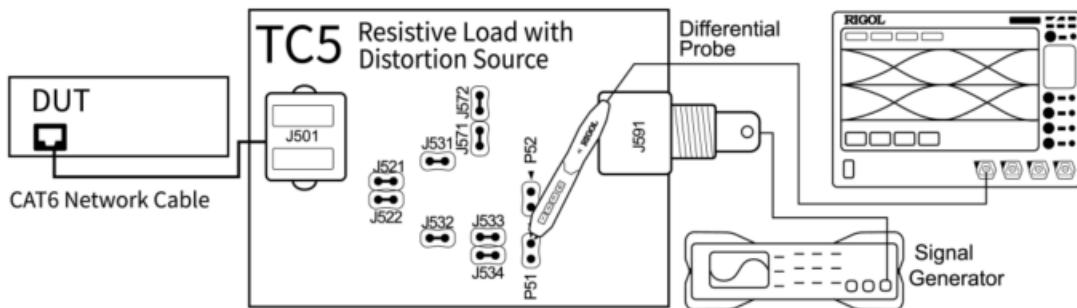


그림 21 1000BASE-T 적합성 테스트의 연결 다이어그램 (방해 신호 포함)

1000BASE-T 적합성 테스트 구성을 위한 추천 장비

개수	항목	모델/설명
1	오실로스코프	DS70304/DS70504
1	파형 발생기	DG5000
1	1000BASE-T 적합성 테스트 소프트웨어	DS70000-ENETC
1	프로브	PVA7000/PVA8000 시리즈 프로브
1	테스트 픽스쳐	이더넷 테스트 픽스쳐
1	CAT 6 네트워크 케이블	
N	점퍼 캡	

100BASE-TX 적합성 테스트 구성을 위한 추천 장비

개수	항목	모델/설명
1	오실로스코프	DS70304/DS70504
1	1000BASE-T 적합성 테스트 소프트웨어	DS70000-ENETC
1	프로브	PVA7000/PVA8000 시리즈 프로브
1	테스트 픽스쳐	이더넷 테스트 픽스쳐
1	CAT 6 네트워크 케이블	

5. 100BASE-TX 와 1000BASE-T 적합성 테스트를 위한 선택 도구

100BASE-TX 는 MLT-3 인코딩을, 1000BASE-T 는 4D-PAM5 인코딩을 사용하며, 각 와이어 쌍에서의 실제 데이터 전송 속도는 125 Mbps 입니다. ANSI X3.263-1995 및 IEEE 802.3 표준에 따르면, 권장되는 오실로스코프의 대역폭은 1GHz 이상이어야 합니다.

RIGOL DS70000 시리즈 오실로스코프는 최대 5 GHz 대역폭, 20 GSa/s 실시간 샘플링 속도, 2 Gpts 메모리 깊이를 제공하여 테스트 요구 사항을 충족합니다.



DS70000 시리즈 디지털 오실로스코프

테스트 모드 1에서는 ± 2.8 V 진폭과 31.25 MHz 주파수를 가진 사인파 방해 신호가 필요합니다. 이는 MDI 신호의 전송 과정에서 인접 채널 간섭(ACI)을 시뮬레이션하기 위함입니다. 규격에 따르면, 방해 신호는 정확한 31.25 MHz 주파수를 유지해야 하며, 모든 고조파 성분은 기본 주파수보다 최소 40 dB 이하여야 합니다.

방해 신호 생성을 위해 사용하는 함수/임의 파형 발생기는 50 MHz 대역폭과 10 Vpp 진폭을 지원해야 합니다. RIGOL DG Pro 시리즈 함수/임의 파형 발생기는 이러한 테스트 요구 사항을 충족합니다.



DG Pro 시리즈 임의 파형 발생기

또한, 테스트에는 고속 능동 차동 프로브, 능동 단일 종단 프로브, 그리고 이더넷 테스트 픽스처가 필요합니다. 차동 프로브의 대역폭은 1.5 GHz 이상이어야 합니다. 이와 관련해 RIGOL은 다음과 같은

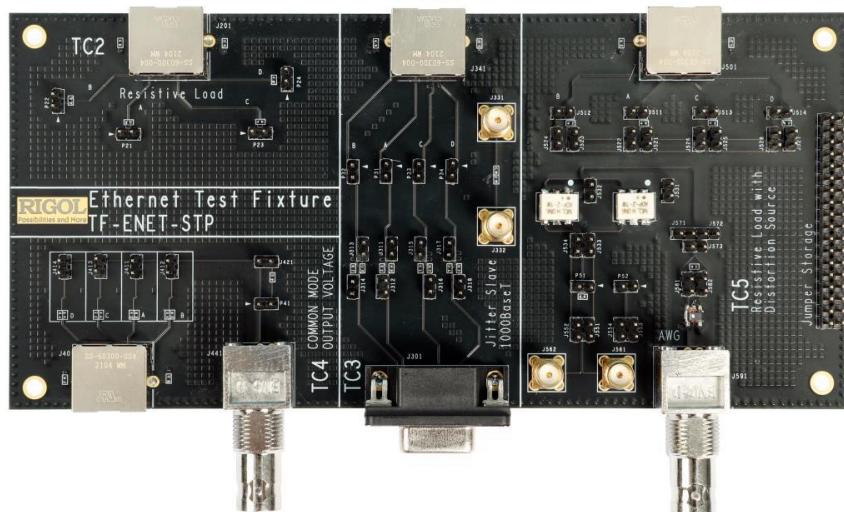
규격에 맞는 프로브를 제공합니다: 고속 능동 차동 프로브(PVA7000/PVA8000 시리즈)와 고속 능동 단일 종단 프로브(RP7000S 시리즈).



PVA8000 시리즈 능동 차동 프로브

TF-ENET-STP 픽스처는 1000BASE-T 및 100BASE-T 이더넷 적합성 테스트에 사용됩니다. 이더넷 신호는 고속 신호이므로, 작동 중인 이더넷 케이블을 직접 프로브로 측정할 수 없습니다. 대신, 신호가 끝나는 지점에 임피던스로 종단된 부분에서 측정해야 합니다. 따라서 이더넷 적합성 테스트를 수행하기 위해 테스트 픽스처가 필요합니다.

TF-ENET-STP 테스트 픽스처는 TC2, TC3, TC4, TC5로 구성되어 있으며, 각각 다른 테스트 항목을 위해 사용됩니다.



이더넷 적합성 테스트 픽스처 TF-ENET-STP

6. 결론

이더넷 기술이 발전함에 따라 기가비트 이더넷은 가장 빠른 네트워크 기술이 되었습니다. 대부분의 장치 제조업체는 기가비트 이더넷 제품의 동작 및 신뢰성을 테스트하는 데 어려움을 겪고 있습니다. 고속 네트워크 테스트의 어려움, 정교한 테스트 장비, 그리고 지속적으로 변화하는 표준과 기술은 테스트 엔지니어들에게 새로운 도전 과제가 되고 있습니다.

RIGOL은 디지털 오실로스코프, 방해 신호원, 전문 테스트 픽스처와 프로브, 그리고 완전 자동화된 적합성 테스트 소프트웨어를 포함한 포괄적인 도구 세트를 제공합니다. 이를 통해 장치 설계자들은 100BASE-TX 및 1000BASE-T 이더넷의 빠르고 정확한 적합성 테스트와 분석을 수행할 수 있습니다.

RIGOL은 엔지니어들에게 종합적인 테스트 솔루션을 제공하기 위해 최선을 다하고 있습니다. 자세한 내용은 kr.rigol.com을 방문해 주세요.



문의사항
www.waveinsense.com