

USB 2.0 Test: 기본 원리와 신호품질의 중요성

Application Note

Introduction / 서론: 우리 곁의 USB, 제대로 알아보기

USB(Universal Serial Bus)는 오늘날 컴퓨터, 스마트폰, 그리고 수많은 전자기기에서 데이터를 전송하고 전원을 공급하는 가장 보편적인 기술입니다. 우리는 매일 USB 케이블을 연결하고 분리하지만, 그 속에서 어떤 일이 일어나는지는 잘 알지 못합니다. 이 문서는 USB 기술을 처음 접하는 학생이나 초보자를 위해 USB 2.0의 기본 개념을 소개하고, 안정적인 연결을 보장하는 핵심 요소인 '신호 품질 테스트'의 중요성을 알기 쉽게 설명하기 위해 작성되었습니다.

1. USB 2.0이란 무엇일까요?

USB의 탄생 배경

1990년대 중반에 처음 등장한 USB는 기존에 사용되던 복잡한 직렬 포트(Serial Port)와 병렬 포트(Parallel Port)를 대체하기 위해 개발되었습니다. 하나의 표준화된 인터페이스로 다양한 주변기기를 쉽게 연결할 수 있는 편리함과 확장성 덕분에, USB는 빠르게 컴퓨터와 주변기기를 잇는 핵심 기술로 자리 잡았습니다.

USB 2.0의 핵심 구성

USB 2.0은 기본적으로 4개의 선으로 구성된 직렬 버스입니다.

- VBUS: 전원 공급 (+5V)
- D+ / D-: 데이터 전송을 위한 차동 신호 쌍(Differential Pair)
- GND: 접지

이 중 D+와 D- 두 가닥의 선이 핵심적인 데이터 통신 역할을 합니다. 이들은 동일한 신호를 서로 반대 위상(하나는 +, 다른 하나는 -)으로 동시에 전송하는 '차동 신호' 방식을 사용합니다. 이 방식은 외부에서 들어오는 전자기 간섭(EMI)과 같은 노이즈가 두 선에 동일하게 영향을 미치게 하여, 수신 측에서 그 노이즈를 효과적으로 상쇄시킬 수 있게 해줍니다. 바로 이 설계 덕분에 USB는 신호 품질을 높이고 안정적인 데이터 전송을 보장할 수 있습니다.

USB 2.0의 세 가지 속도

USB 2.0은 기존의 USB 1.1과 완벽하게 호환되며, 장치의 특성에 따라 세 가지 다른 데이터 전송 속도를 지원합니다.

속도구분	데이터 전송률	핵심용도
저속 (Low Speed, LS)	1.5 Mbps	키보드, 마우스처럼 몇 글자 수준의 작은 데이터를 간헐적으로 보내는 데 적합합니다.
전속 (Full Speed, FS)	12 Mbps	프린터, 스캐너 등 저속보다는 빠르지만 초고속 전송은 필요 없는 장치에 사용됩니다.
고속 (High Speed, HS)	480 Mbps	외장 하드 드라이브처럼 영화 한 편과 같은 대용량 파일을 빠르게 읽기는 데 필수적입니다.

USB 2.0의 주요 장점

USB 2.0이 사용자에게 제공하는 가장 중요한 혜택은 다음과 같습니다.

- 고속 전송 (High-Speed Transfer) 최대 480 Mbps의 속도는 수 기가바이트(GB)에 달하는 대용량 파일도 몇 분 안에 전송할 수 있게 해줍니다. 이는 특히 외장 저장 장치를 사용하는 데 큰 이점을 제공합니다.
- 플러그 앤 플레이 (Plug and Play) 컴퓨터를 끄거나 재시작할 필요 없이 장치를 자유롭게 연결하고 분리할 수 있는 '핫 스와핑(Hot Swapping)' 기능을 지원합니다. 이 덕분에 사용자는 매우 편리하게 장치를 교체하며 사용할 수 있습니다.
- 전원 공급 (Power Source) 데이터 전송선으로 최대 500mA의 전력을 공급할 수 있습니다. 덕분에 웹캠, 소형 스피커, 충전 기기 등 많은 주변 장치가 별도의 전원 어댑터 없이 USB 포트 연결만으로 작동할 수 있습니다.

이제 USB 2.0의 기본 개념을 이해했으므로, 이러한 장점들이 제대로 작동하기 위해 왜 '신호 품질'이라는 보이지 않는 요소가 결정적인지 알아보겠습니다.

2. 왜 신호 품질이 중요한가요?

신호 무결성(Signal Integrity)의 개념

신호 무결성이란, 고속도로를 달리는 데이터 트럭이 톤게이트(목적지)에 도착할 때까지 짐(데이터)을 하나도 훌리지 않고, 정해진 차선을 벗어나지 않으며(왜곡), 제시간에 도착하는(타이밍) 능력과 같습니다. 즉, "데이터를 실어 나르는 전기 신호가 왜곡 없이 깨끗하게 유지되는 정도"를 의미합니다.

하지만 신호는 긴 케이블이나 여러 커넥터를 거치면서 원래의 깨끗한 모양을 잃고 뭉개질 수 있습니다. 특히 주변 전자기기에서 발생하는 전자기 간섭(EMI)은 신호를 저하시키는 주요 원인입니다. 또한, 신호의 타이밍이 이상적인 위치에서 미세하게 흔들리는 현상인 지터(Jitter)도 신호 품질을 떨어뜨리는 핵심적인 문제입니다.

신호 품질 저하가 초래하는 문제점

신호 품질이 나빠지면 다음과 같은 심각한 문제들이 발생할 수 있습니다.

- 데이터 전송 오류 신호가 왜곡되면 수신 측에서 '0'을 '1'로, 또는 '1'을 '0'으로 잘못 인식할 수 있습니다. 이는 파일이 깨지거나(손상), 프로그램이 오작동하는 직접적인 원인이 됩니다.
- 성능 저하 오류가 잦아지면 시스템은 데이터를 계속해서 재전송해야 하므로, 장치가 제 속도를 내지 못하고 현저히 느리게 작동하게 됩니다. '고속(High Speed)' 장치가 '전속(Full Speed)'처럼 작동하는 현상이 대표적입니다.
- 연결 불안정 또는 실패 신호 품질이 너무 나쁘면 컴퓨터가 장치를 아예 인식하지 못하거나, 연결이 수시로 끊기는 문제가 발생할 수 있습니다.

표준화의 필요성 (USB-IF)

전 세계 수많은 제조사가 만든 USB 장치들이 서로 문제없이 작동(상호운용성)하려면, 모든 제품이 지켜야 할 엄격한 전기적 표준이 필요합니다. 이를 위해 USB-IF(USB Implementers Forum)라는 비영리 단체가 표준 규격을 만들고 관리합니다. 제조사들은 제품이 이 기준을 통과해야만 공식 USB 인증 로고를 사용할 수 있으며, 이 과정의 핵심이 바로 신호 품질 테스트입니다.

이처럼 중요한 신호 품질을 보장하기 위해, 엔지니어들은 '신호 품질 테스트'라는 정밀한 검사 과정을 거칩니다.

3. 신호 품질 테스트의 핵심: 아이 디어그램

신호 품질 테스트란?

신호 품질 테스트는 USB 장치가 USB-IF가 정한 전기적 사양을 정확히 준수하는지 확인하는 '종합 건강 검진'과 같습니다. 이 테스트는 장치가 안정적으로 통신할 수 있는지를 보증하는 과정이며, USB 인증 로고를 획득하기 위한 필수 관문입니다.

핵심 테스트 항목 소개

다양한 테스트 항목이 있지만, 그중 신호 품질을 결정하는 두 가지 핵심 개념은 다음과 같습니다. 이들은 모두 아이 디어그램의 모양에 직접적인 영향을 미칩니다.

- 에지 단조성 (Edge Monotonicity) 디지털 신호가 '0'에서 '1'로 상승하거나(Rising Edge) '1'에서 '0'으로 하강할(Falling Edge) 때, 중간에 출렁임 없이 부드럽게 변해야 한다는 의미입니다. 만약 신호가 출렁이면(비단조) 아이 디어그램의 눈이 위아래로 좁아지는 원인이 됩니다.

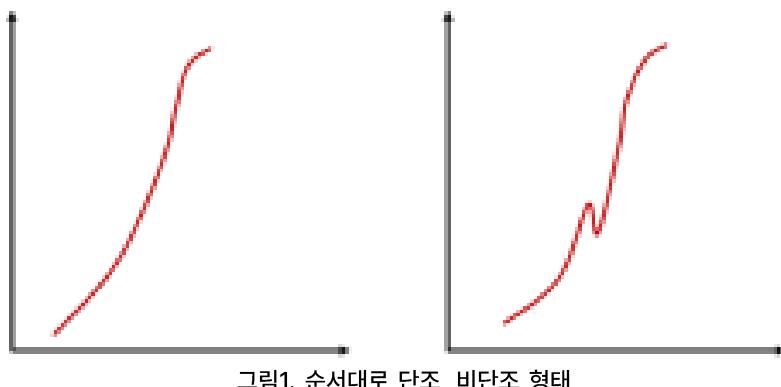


그림1. 순서대로 단조, 비단조 형태

- 상승/하강 시간 (Rise/Fall Time) 신호가 '0'과 '1' 사이를 전환하는 데 걸리는 시간입니다. 이 시간이 규격보다 너무 느리면 데이터 전송 타이밍에 문제가 생기고, 아이 디어그램의 기울기가 완만해져 눈이 좌우로 좁아지는 결과를 낳습니다.

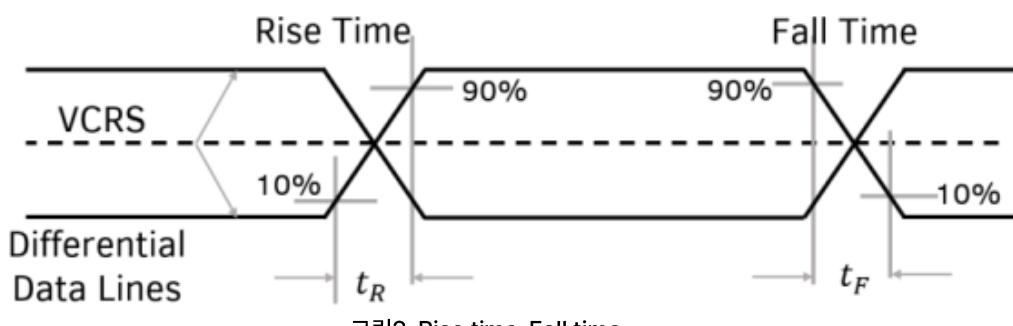


그림2. Rise time, Fall time

집중 탐구: 아이 디어그램(Eye Diagram)

- 아이 디어그램이란?

수천, 수만 개의 디지털 신호 파형을 계속해서 한 화면에 겹쳐 그렸을 때 나타나는 모양이 마치 사람의 '눈(Eye)'과 같다고 해서 붙여진 이름입니다. 엔지니어는 이 '눈' 모양을 통해 신호의 전반적인 건강 상태와 품질을 한눈에 파악할 수 있습니다.

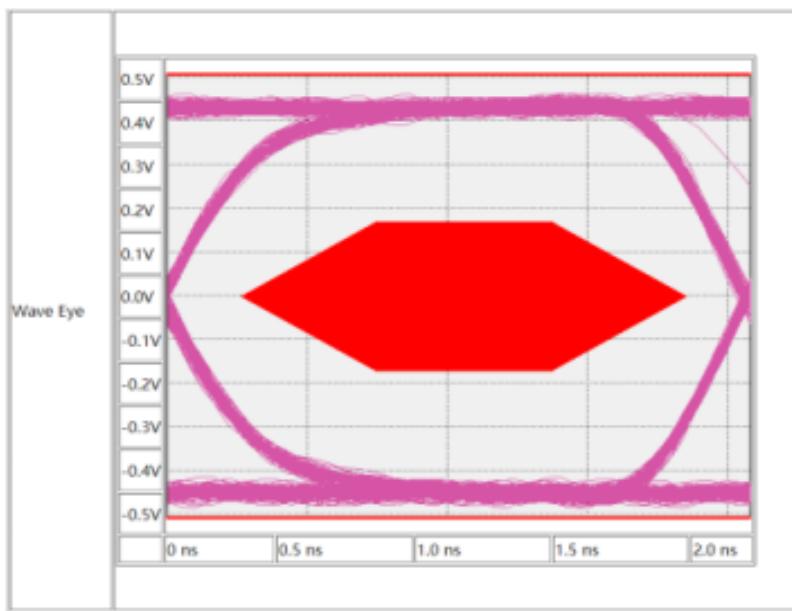


그림3. 아이다이어그램 분석 템플릿 – Rigol S/W

- '뜬 눈'과 '감긴 눈'의 의미 아이 디어그램을 해석하는 방법은 매우 직관적입니다.
 - 크고 선명하게 열린 눈 이는 앞서 설명한 지터(타이밍 흔들림)가 적고, 전압 레벨이 안정적이며, 왜곡이 거의 없다는 의미입니다. '건강한 신호'로, 데이터 오류가 발생할 확률이 매우 낮습니다.
 - 작고 흐릿하게 닫힌 눈 이는 지터가 심하고 신호 왜곡이 많아 눈 모양이 거의 감긴 것처럼 보이는 상태입니다. '불량 신호'로, 데이터 오류가 발생할 위험이 매우 높습니다.
- 합격/불합격의 기준 USB-IF는 아이 디어그램의 정중앙에 '마스크(Mask)'라는 '금지 구역'을 정의합니다. 테스트 중인 신호 파형 중 어느 하나라도 이 마스크 영역을 침범하면 테스트에 불합격(Fail)됩니다. 소스 문서의 Wave Eye 이미지에 보이는 붉은색 육각형 영역이 바로 이 마스크에 해당합니다. 이 영역이 깨끗하게 비어있을수록 신호 품질이 우수하다는 뜻입니다.

이처럼 아이 디어그램은 USB 장치의 보이지 않는 품질을 증명하는 결정적인 증거가 됩니다.

4. USB 2.0 신호 품질 테스트 장비 목록

USB 2.0 신호 품질 테스트에는 디지털 오실로스코프, 컴플라이언스 프로브, 케이블, 그리고 테스트 픽스처가 필요합니다

- 차동 프로브를 사용하는 RIGOL 권장 장비 리스트

항목	설명/모델/시리즈
오실로스코프	DS70000시리즈/DS80000시리즈
USB 2.0 컴플라이언스 테스트 소프트웨어	DS70000-USBC/DS80000-USBC
차동 프로브	PVA7250/PVA8000 Series Active Probe
테스트 픽스처	USB-IF 표준 또는 RIGOL의 USB 2.0 사양 준수 픽스처
테스트 패킷 생성 소프트웨어	USBHSETT
5V 전원 케이블	USB A Male to B Male cable

- 동축 케이블을 사용하는 RIGOL 권장 장비 리스트

항목	설명/모델/시리즈
오실로스코프	DS70000시리즈/DS80000시리즈
USB 2.0 컴플라이언스 테스트 소프트웨어	DS70000-USBC/DS80000-USBC
차동 프로브	PVA7250/PVA8000 Series Active Probe
테스트 픽스처	USB-IF 표준 또는 RIGOL의 USB 2.0 사양 준수 픽스처
SMA-BNC 케이블	SMA-BNC 테스팅 케이블
5V 전원 케이블	USB A Male to B Male cable

5. 결론: 안정적인 연결의 비밀, 신호 품질

이 문서를 통해 우리는 눈에 보이는 편리함 뒤에 숨겨진 USB 기술의 핵심 원리를 살펴보았습니다.

1. USB 2.0은 최대 480 Mbps의 빠른 속도와 플러그 앤 플레이의 편리함을 제공하는 핵심 인터페이스 기술입니다.
2. 이러한 성능을 안정적으로 사용하기 위해서는 눈에 보이지 않는 '신호 품질'이 매우 중요하며, 품질이 나쁘면 데이터 오류나 성능 저하를 유발합니다.
3. 아이 디어그램과 같은 정밀한 신호 품질 테스트는 모든 USB 장치가 정해진 표준에 따라 안정적으로 작동하도록 보장하는 필수적인 검증 과정입니다.

우리가 매일 편리하게 사용하는 USB 장치의 안정성 뒤에는, 이처럼 엄격한 전기적 표준을 만족시키고 완벽한 신호 품질을 구현하기 위해 노력하는 엔지니어들의 보이지 않는 노력이 숨어있습니다.

<참고문서>

1. Rigol : Application note ANW01100-1220-0012 < USB 2.0 Pre-Compliance Testing>
2. Rigol : Application note May, 2022 <USB 2.0 Compliance Test Solution>