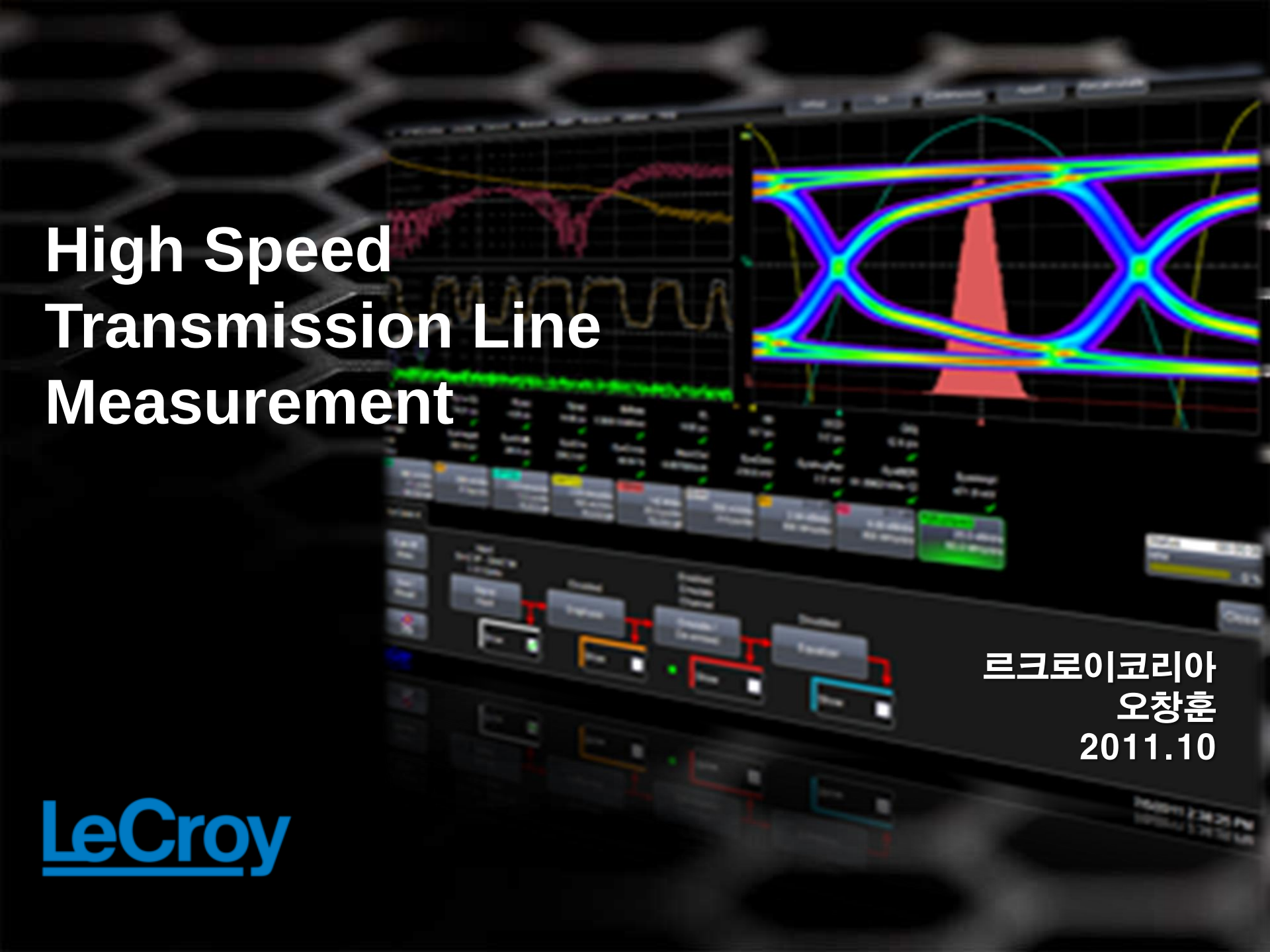
High Speed Transmission Line Measurement



르크로이코리아
오창훈
2011.10

LeCroy

목차

Part I.

- 일반적인 신호 품질 문제
- TDR/TDT
- S-Parameters

Part II.

- 기본 측정 파라메터 들
- SI Network Analyzer (SPARQ)

LeCroy

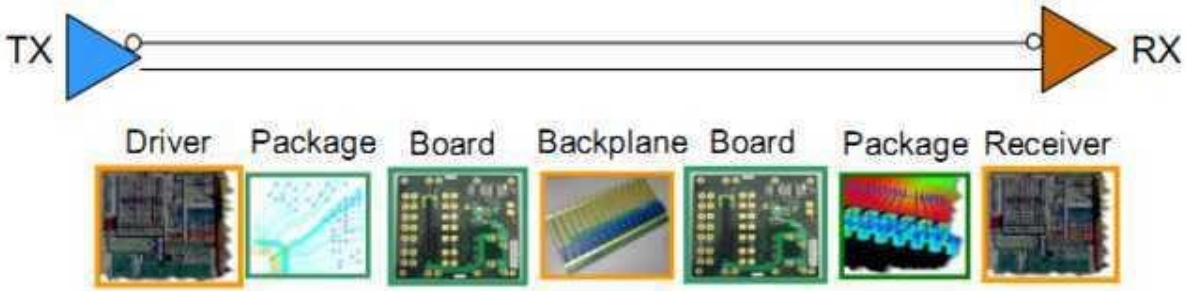
고속 신호 품질 문제 및 전송선

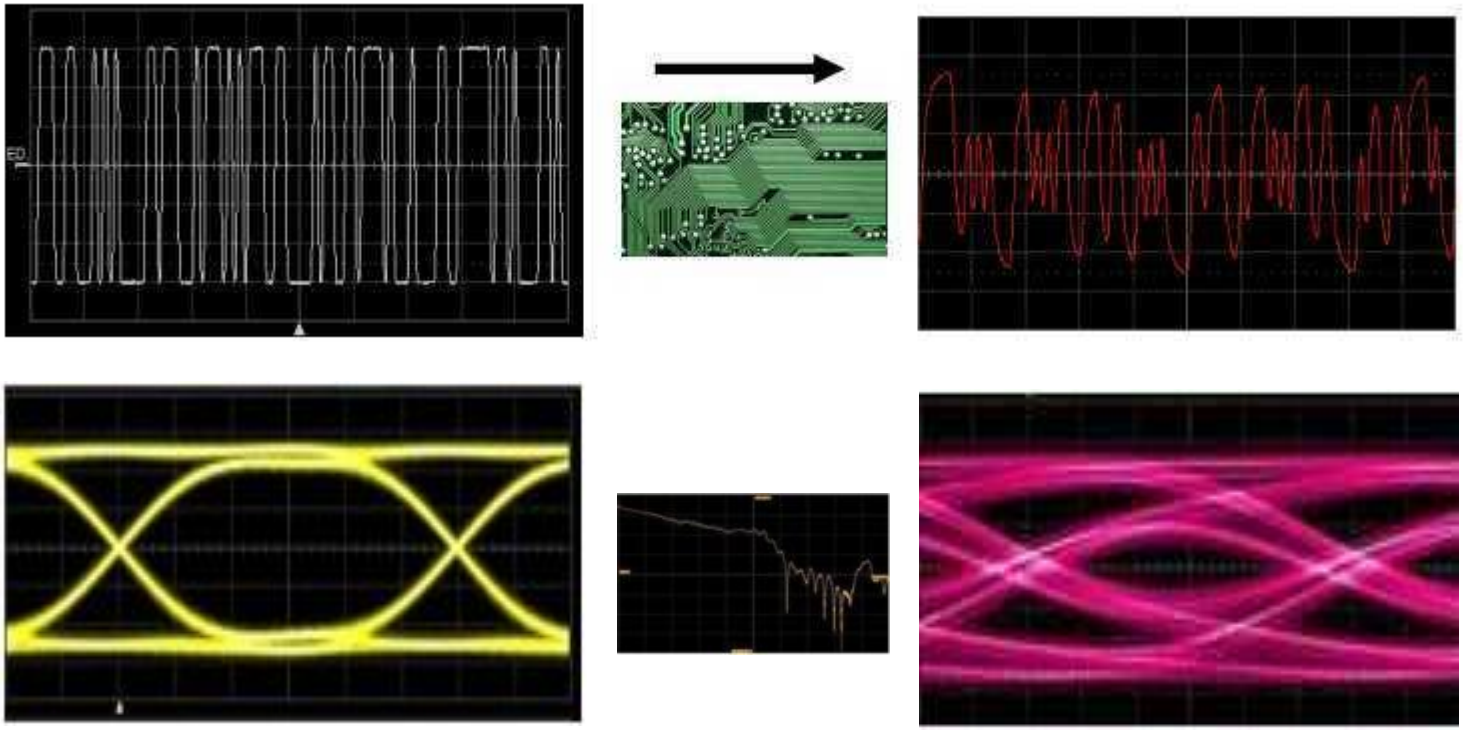
Part I.

1. 일반적인 신호 품질 문제
2. TDR/TDT
3. S-Parameter

LeCroy

Real World Interconnects



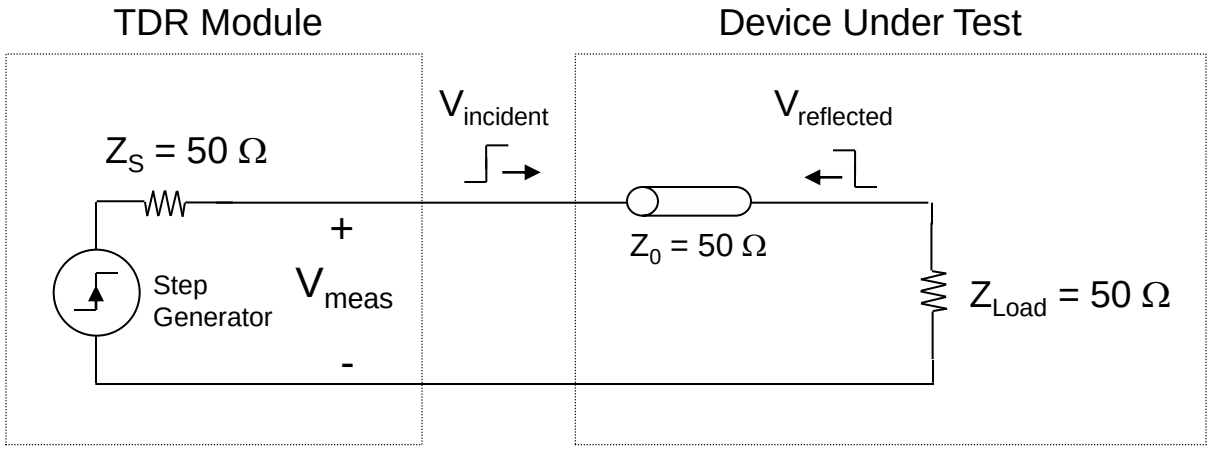


S-Parameter를 이용하여 인터커넥트 시스템의 특성을 표현

Time Domain Reflectometry

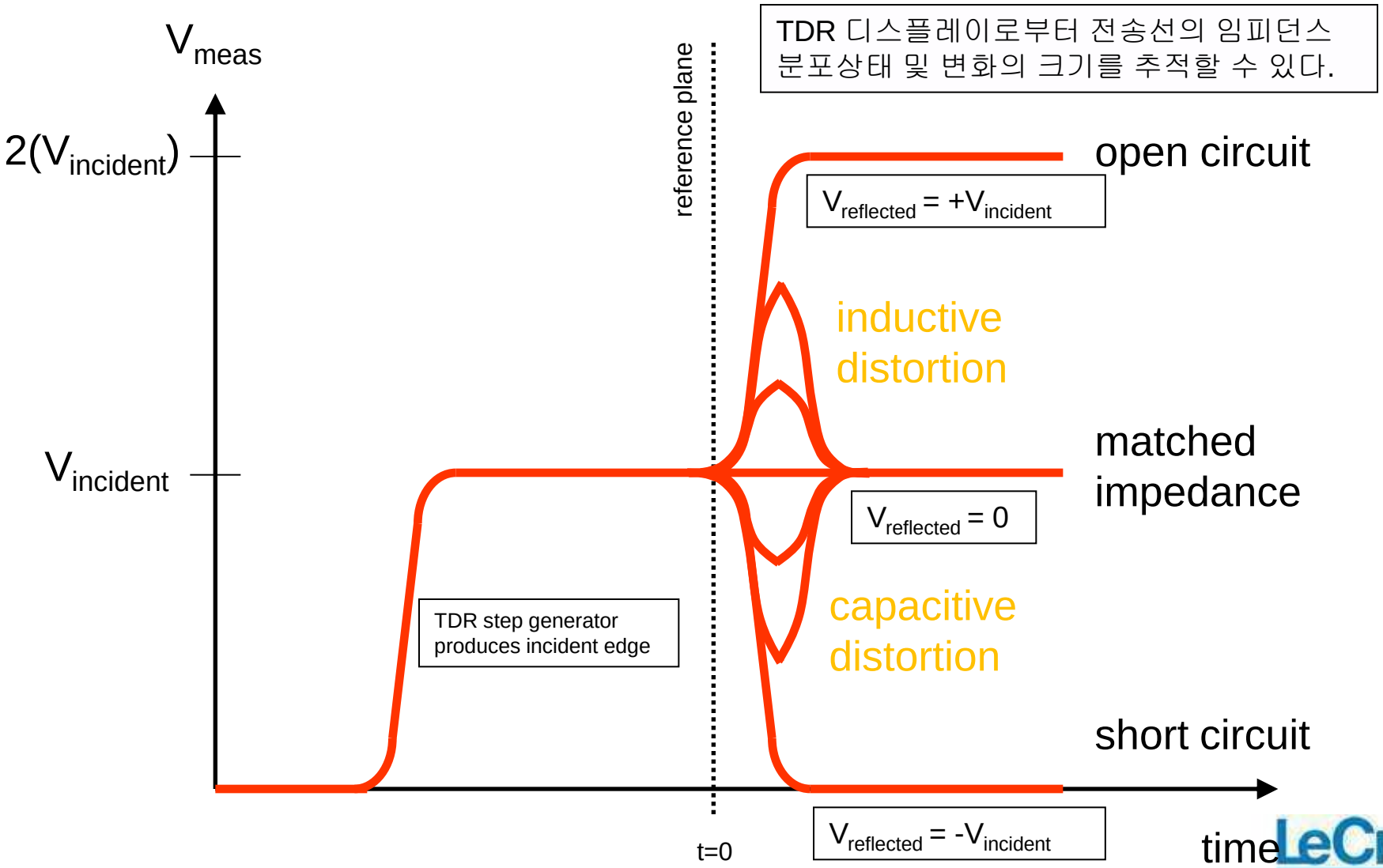
LeCroy

TDR 블록 다이어그램



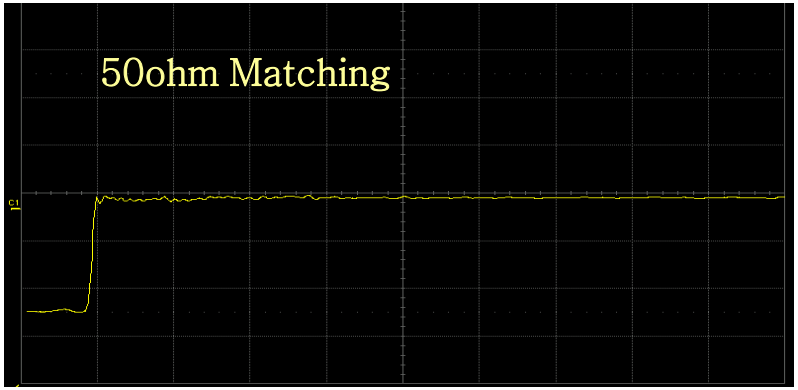
- Time Domain Reflectometry 또는 Time Domain Reflectometer로써 임피던스의 변화량을 트랙킹할 수 있는 계측장비이다.
- 임의의 전송매질에 송신부로부터 에너지가 입사되면 임피던스의 변화를 겪게 되고, 반사된 에너지는 원래의 송신부로 되돌아오게 된다.
- 따라서, 반사된 에너지의 양은 전송된 에너지의 양과 임피던스의 변화량에 비례하게 된다.
- 에너지의 입사로부터 반사되어 돌아오기까지 걸리는 시간은 Source로부터 임피던스가 변화되는 지점까지의 거리와 전파전달속도(Propagation Velocity)의 함수가 된다.
- 의도하지 않았던 전송선로의 Short나 Open과 같은 사고나, 설계시 목적했던 특성 임피던스가 실제로 구현되었는가는 물론 변화량도 시각적으로 추적할 수 있다.

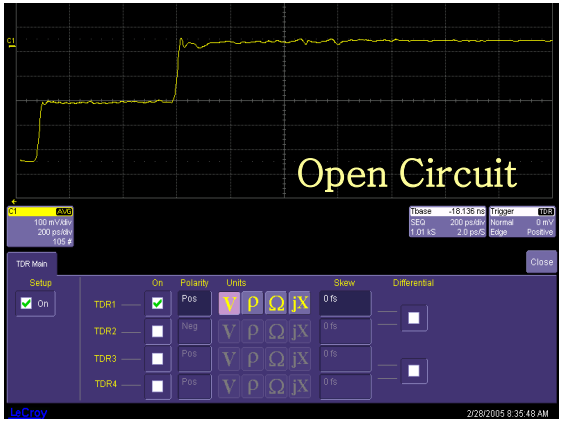
TDR 파형의 해석

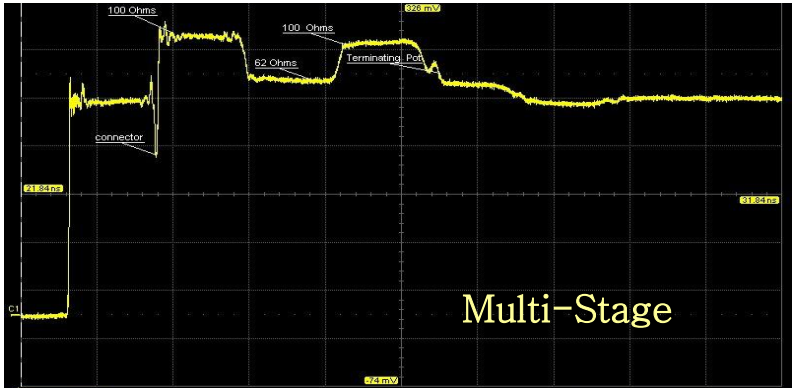

TDR 디스플레이로부터 전송선의 임피던스 분포상태 및 변화의 크기를 추적할 수 있다.
V meas
2(V incident)
V incident
reference plane
open circuit
V reflected = +V incident
inductive distortion
matched impedance
V reflected = 0
capacitive distortion
short circuit
TDR step generator produces incident edge
V reflected = -V incident
t=0
time
LeCroy

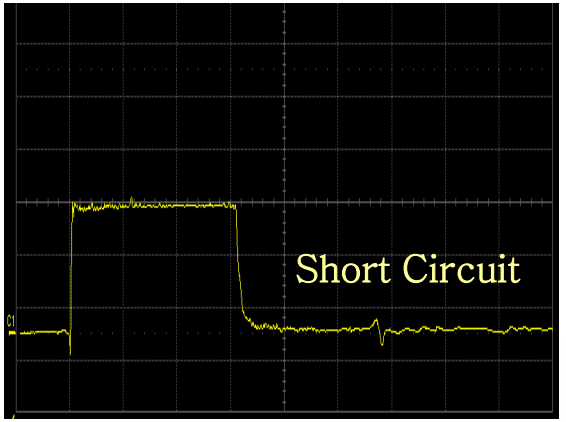
Differential Impedance : Examples

- 고속 신호들은 일반적으로 50ohm 로드에서 매칭되도록 설계되어 있다. 이것이 다른 회로단과 연결될 때 즉 커넥터, 케이블 등의 연결 부위 또는 PCB의 비아 등에서 임피던스가 달라지면 신호의 반사(Reflection)이 발생되어 신호 품질 즉, 데이터의 비트의 왜곡이 발생하게 되어, 데이터 전송이 제대로 이루어지지 않을 수 있다.
- 따라서, 비트의 손실이 발생되지 않도록 커넥터, 케이블 및 PCB 에서의 임피던스를 측정한다.
- HDMI, SATA, PCI Express 등은 Differential 100Ohm±15% 로 규정하고 있다.









저항성 로드의 반사

- **반사계수 (Voltage Reflection Coefficient σ)**
  - 입사되는 전압파의 양과 반사되어 돌아오는 전압파의 양의 비
  - '+'인 경우에는 동위상(In Phase)임을 나타내고, '-'인 경우 '반대위상(Out of Phase)'임을 나타낸다.

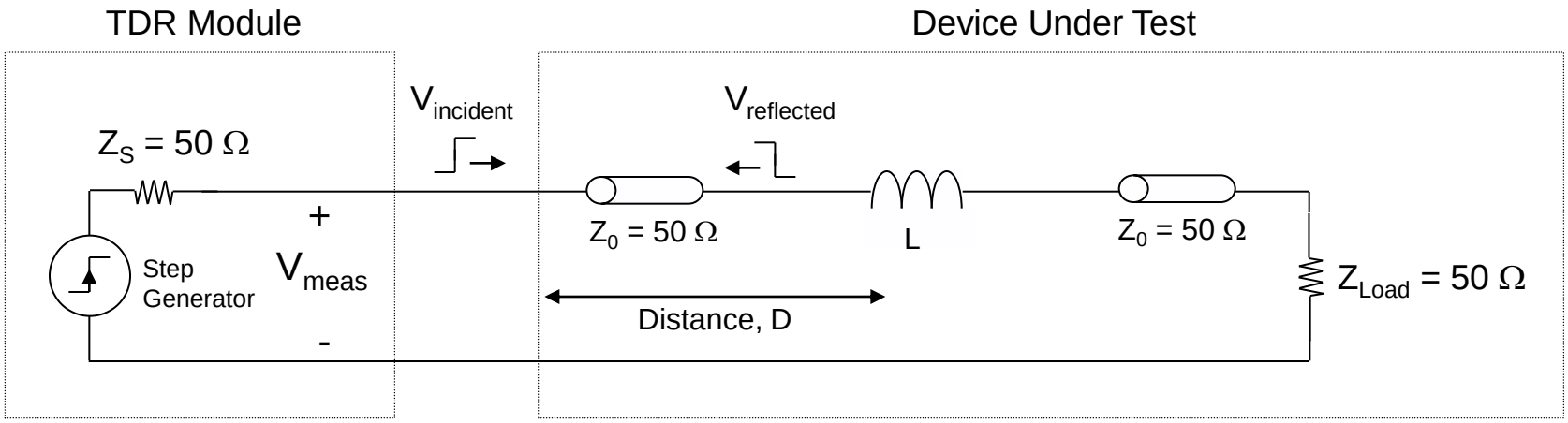
$$\rho = \frac{Vr}{Vi}$$

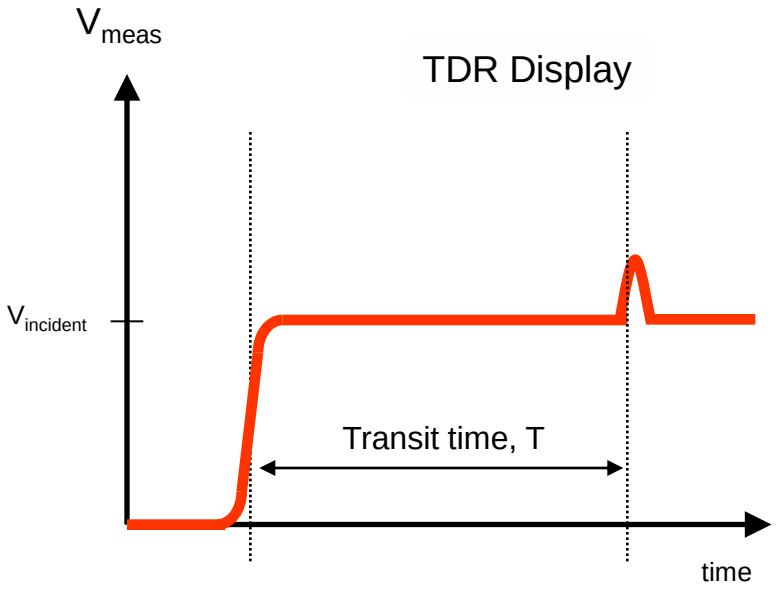
- **특성 임피던스와 Load 임피던스간의 관계에 따른 반사계수의 극성**
  - Load단의 임피던스가 특성 임피던스보다 클 경우, 반사계수는 '+'의 값을 갖게 되고
  - Load단의 임피던스가 특성 임피던스보다 작을 경우, 반사계수는 '-'의 값을 갖게 됨을 알 수 있다.

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

LeCroy

TDR Example: 문제가 발생한 지점 파악





문제가 발생한 물리적인 위치는 다음과 같이 계산할 수 있다. :

$$D = 0.5*(T)*(v_p)$$

D = 문제가 발생한 물리적인 위치
T = 입사파로부터 문제가 위치한 시간
v_p = 전파지연 속도 (매질의 특성)

TDR 선택에서 중요한 것은?

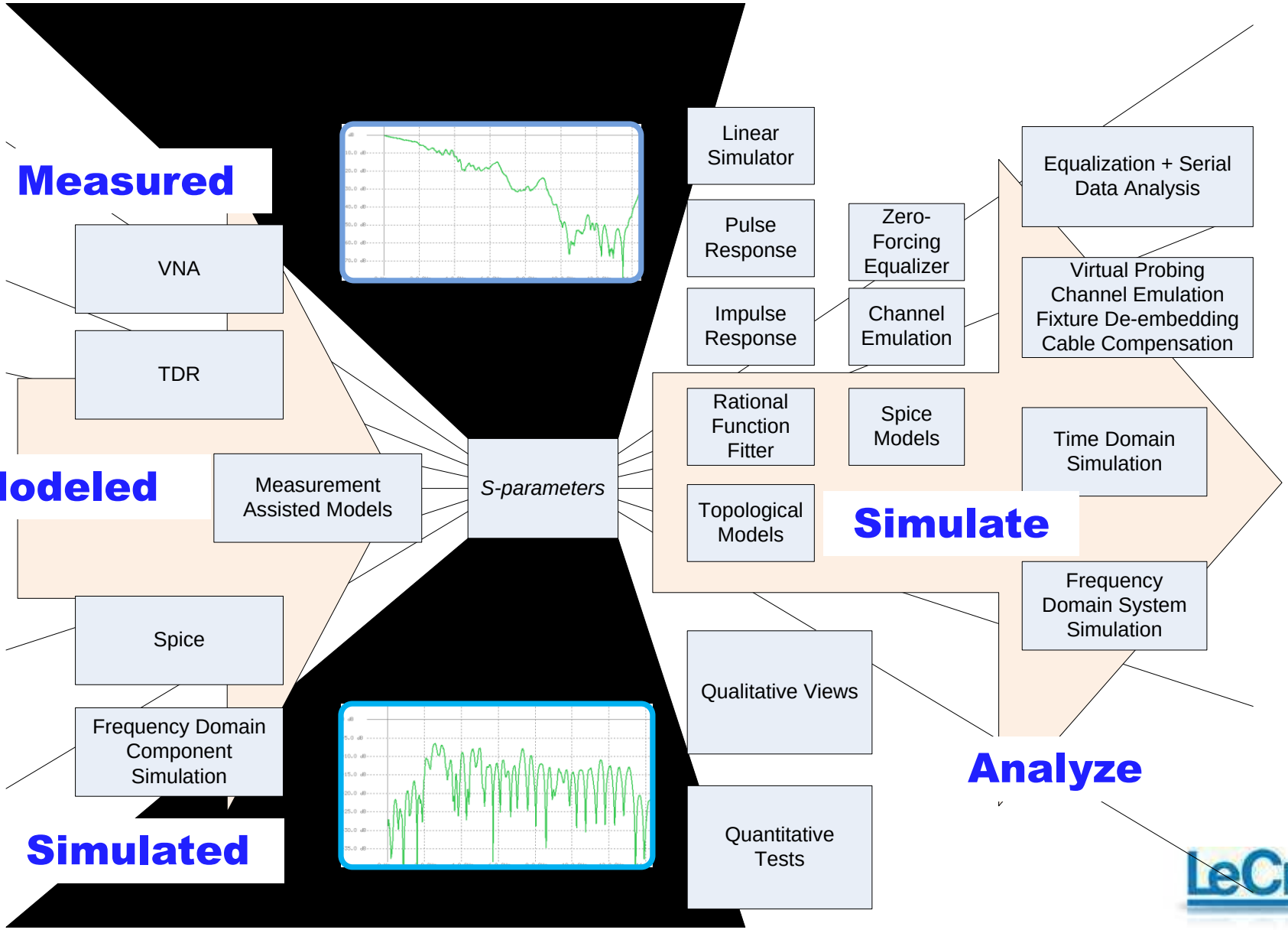
- **TDR 선택시의 중요한 파라메터**
  - ***Step Amplitude***
    - ✓ TDR로부터 발생되는 입사 스텝파의 전압량으로써, 값이 높을수록 더 긴 구간을 관측할 수 있다.
    - ✓ 값이 클수록 유리
  - ***Step Risetime***
    - ✓ 빠를수록 짧은 구간에 대한 자세한 분석이 유리
    - ✓ Resolution은 되돌아오는 반사파의 특성때문에, 반사파의 상승시간을 2로 나눈값으로 정의된다. 즉, 샘플링모듈의 Rise time에 직접적으로 영향을 받음.
    - ✓ 임피던스 변화가 매우 작은 구간에서 이루어진 경우, Resolution이 떨어지면 이에 대한 측정이
      불가능할 수도 있다.
  - ***Step Width***
    - ✓ TDR로부터 발생되는 입사 스텝파의 시간축상의 폭으로, 스텝파의 폭이 클수록(시간이 길수록) 더 긴 구간을 관측할 수 있다.

LeCroy

S-Parameters

LeCroy

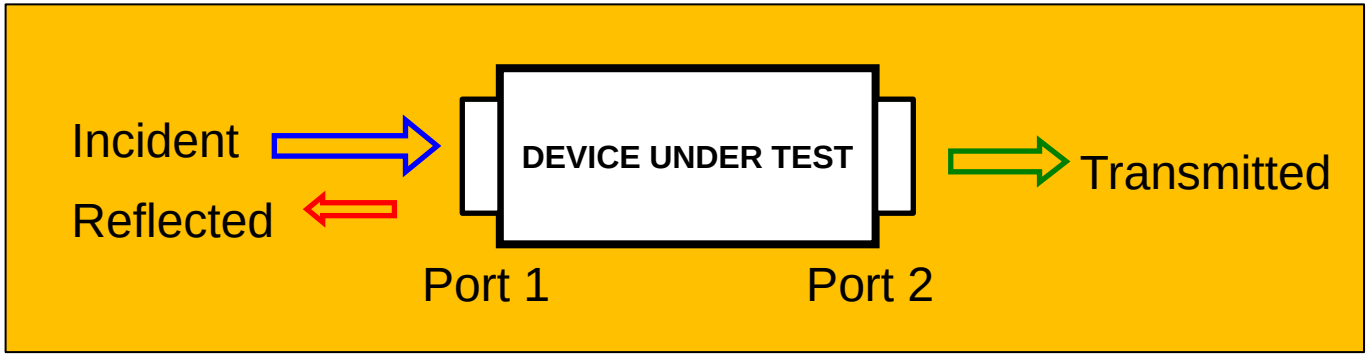
S-parameters are at the heart of everything



S-Parameter란

- **관측 가능한 모든 주파수 영역에서 입출력 신호의 비 :**

S11



S21

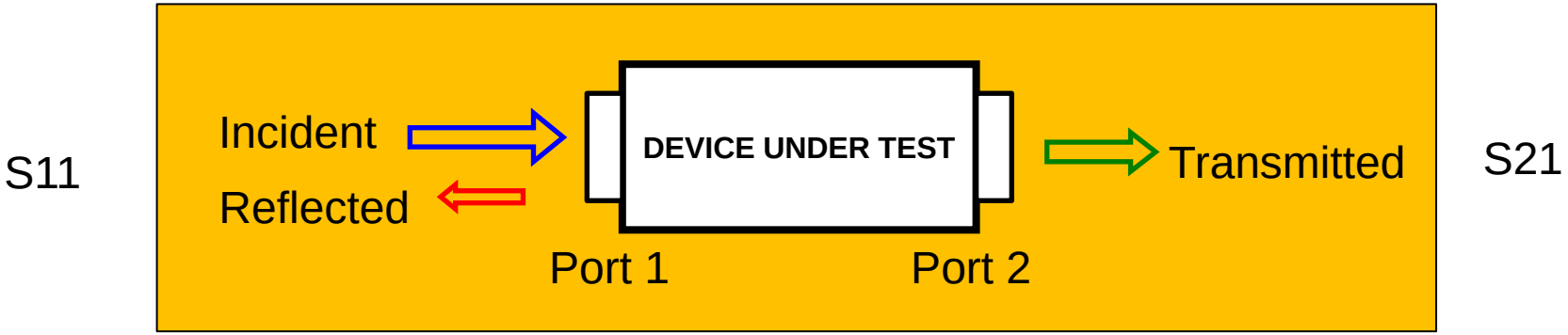
Reflected waves $S_{11} = \frac{wave\ out\ from\ Port\ 1}{wave\ into\ Port\ 1}$

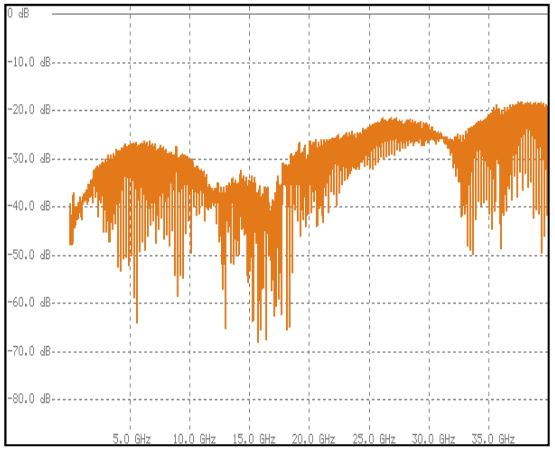
Transmitted waves $S_{21} = \frac{wave\ out\ from\ Port\ 2}{wave\ into\ Port\ 1}$

S-Parameter 는 Magnitude , Phase 또는 Real , Imaginary로 표현됨.

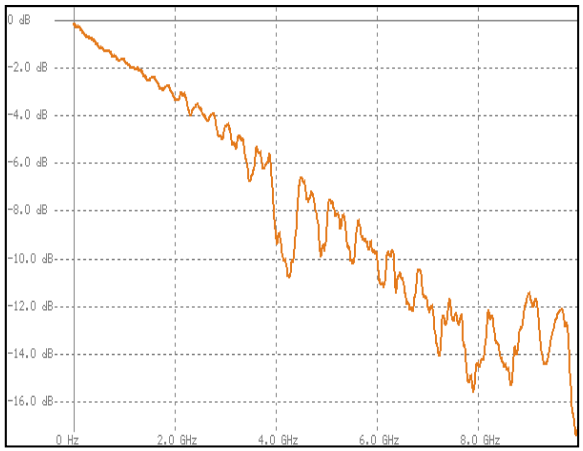
S-Parameter란

- **관측 가능한 모든 주파수 영역에서 입출력 신호의 비 :**

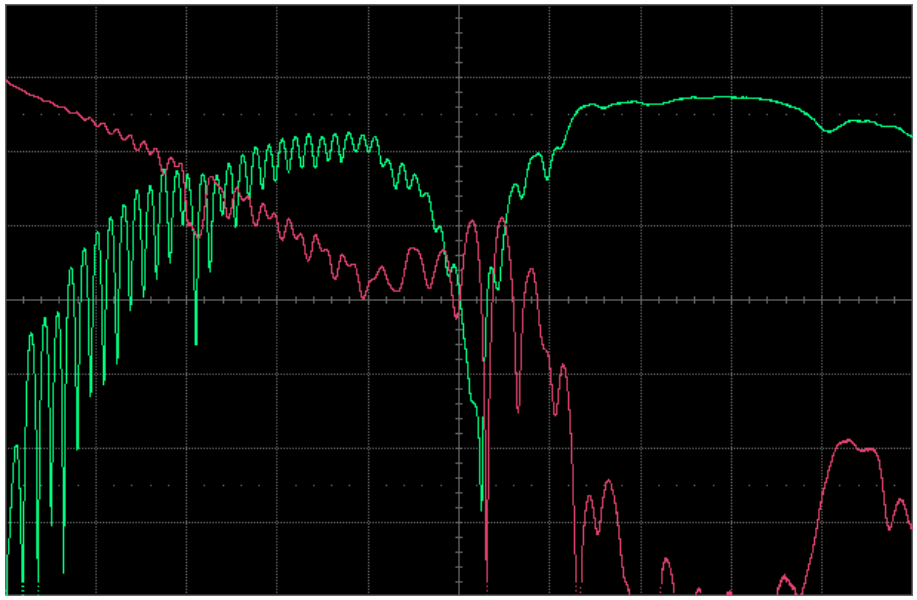




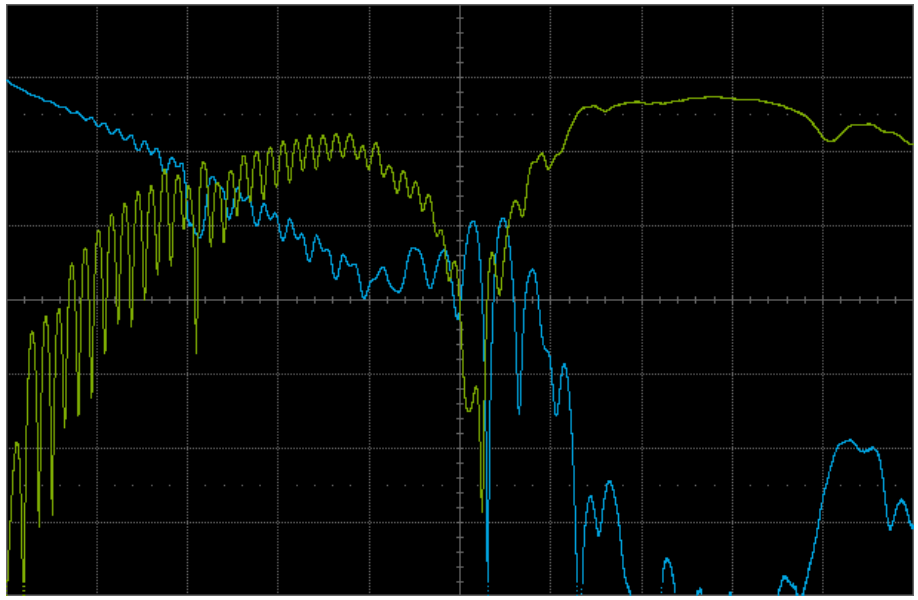
- **S11 : Return Loss**
  - DUT의 반사 특성
  - 임피던스 불일치 판단
  - 손실
- **S21 : Insertion Loss**
  - DUT의 통과 특성
  - 임피던스 불일치성 판단
  - 손실(감쇠)



2-Port S-parameters plots



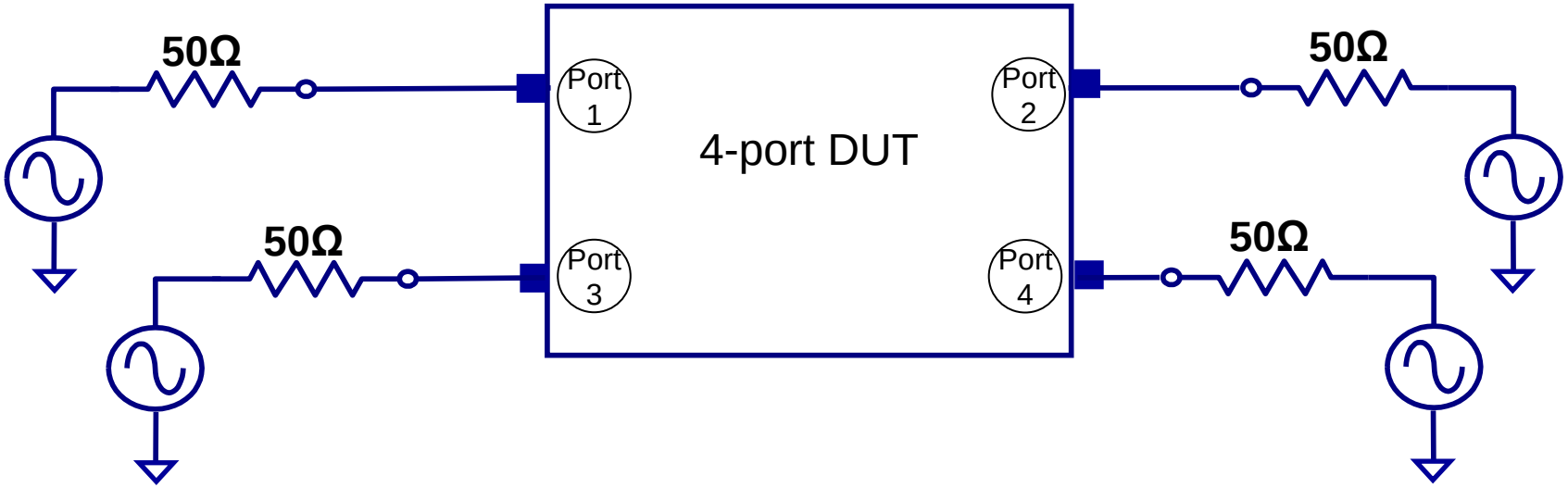
S_{11} and S_{21} Plots



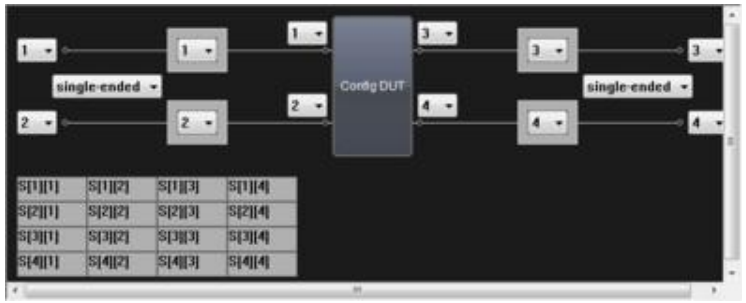
S_{22} and S_{12} Plots

- **백플레인의 S-Parameter Plot**
  - 2-port DUT
  - S11 과 S22, S21과 S12의 결과가 매우 비슷함.
    - **수동 소자들의 대표적인 특징인 “reciprocal” 특징.**

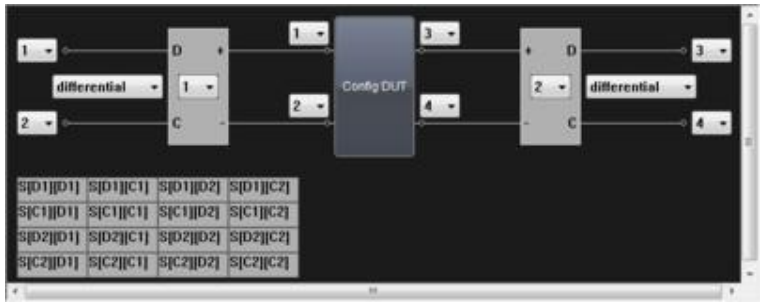
General 4 port Measurement Setup



- **4-port 네트웍은 single-ended 또는 differential 방식으로 해석 가능**
  - Single ended S-parameter은 2-Port와 같이 각 포트의 입출력의 비
  - 4-port 네트웍은 일반적으로 Mixed-Mode S-parameter라 함.



Single Ended



Differential Ended (Mixed Mode)

Touchstone Files

- **S-parameter 데이터들은 일반적으로 Touchstone 파일로 저장.**
  - .sNp의 확장자를 가지며, N 은 측정된 포트의 수.
    - **2-port >> .s2p, 4-port >> .s4p, etc.**
  - 르크로이의 Eye Doctor, SI 분석툴에서 터치스톤 파일 사용 가능

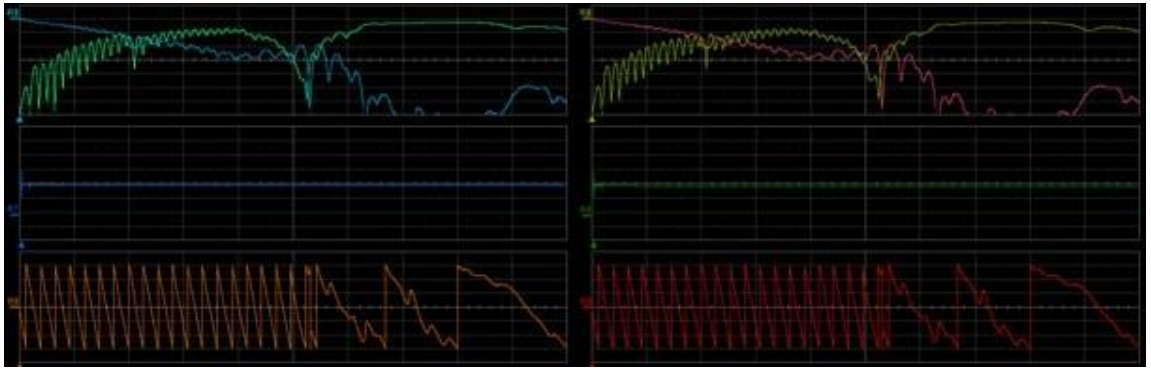
각 파일은 아래의 형식을 가지면, dB 및 위상 값 저장. 2-port data의 예.:

<*frequency value*> <*Mag S11*> <Phase S11> <Mag S21> <Phase S21> <Mag S12> <Phase S12> <Mag S22> <Phase S22>

xilinx20inch.s2p - Notepad

File Edit Format View Help

```
# Hz S  dB   R 50
5000000 -3.292588e+001 1.339770e+000 -2.115960e-001 -7.274739e+000 -2.125150e-001 -7.252116e+000 -3.335005e+001 1.970984e+000
10000000 -3.220274e+001 -5.063588e+000 -2.408994e-001 -1.432816e+001 -2.417186e-001 -1.432715e+001 -3.272321e+001 -4.269377e+000
15000000 -3.163517e+001 -1.202139e+001 -2.734548e-001 -2.131998e+001 -2.711079e-001 -2.131467e+001 -3.234591e+001 -1.039995e+001
20000000 -3.080432e+001 -2.293303e+001 -3.057472e-001 -2.823517e+001 -3.029727e-001 -2.826897e+001 -3.150823e+001 -1.843621e+001
25000000 -3.065076e+001 -3.148632e+001 -3.354474e-001 -3.513725e+001 -3.348851e-001 -3.518803e+001 -3.142670e+001 -2.645738e+001
30000000 -3.088231e+001 -3.785363e+001 -3.621418e-001 -4.203086e+001 -3.641001e-001 -4.206373e+001 -3.176102e+001 -3.346678e+001
35000000 -3.117141e+001 -4.561022e+001 -3.920968e-001 -4.887176e+001 -3.918591e-001 -4.892321e+001 -3.201862e+001 -4.004850e+001
40000000 -3.129151e+001 -5.212880e+001 -4.186318e-001 -5.572252e+001 -4.183406e-001 -5.574117e+001 -3.218638e+001 -4.680326e+001
45000000 -3.104787e+001 -5.630785e+001 -4.537330e-001 -6.255966e+001 -4.535785e-001 -6.255695e+001 -3.251316e+001 -5.302004e+001
50000000 -3.063910e+001 -6.046483e+001 -4.765169e-001 -6.937512e+001 -4.773997e-001 -6.936177e+001 -3.299276e+001 -5.927362e+001
55000000 -3.039936e+001 -6.638361e+001 -5.014204e-001 -7.618469e+001 -5.022026e-001 -7.618693e+001 -3.343415e+001 -6.408955e+001
```



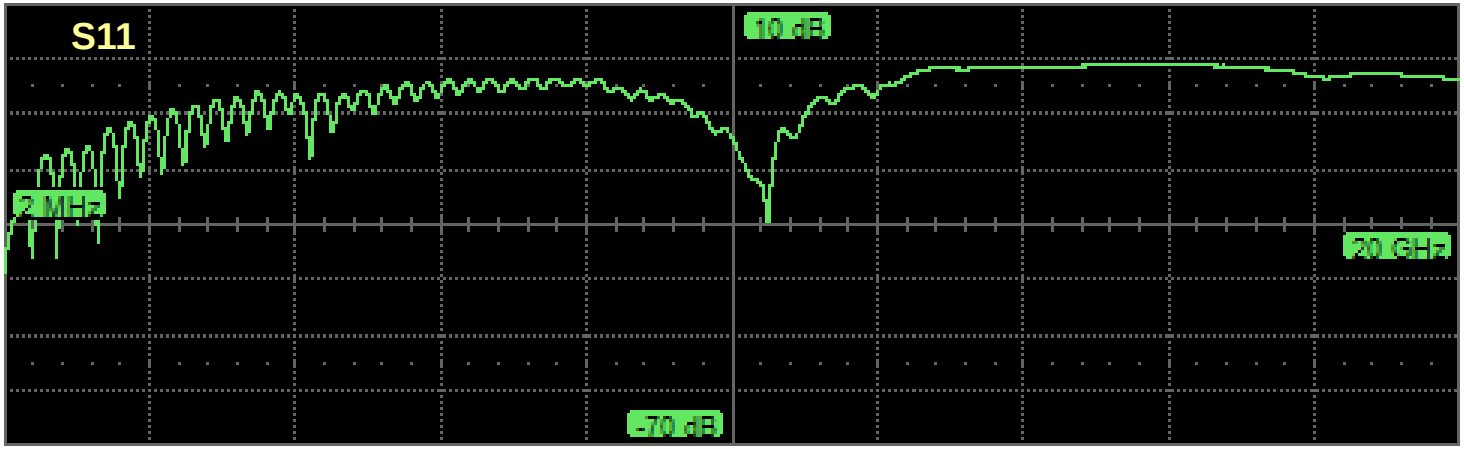
S-parameter 파일들은 르크로이의 분석 툴인 Eye docor 또는 SI Tool에서 쉽게 플롯으로 확인할 수 있다.

Return Loss : S11

- 특정 입력단으로 신호가 전송라인에 입력되어 동일 라인의 입력단으로 반사되어 되돌아오는 신호의 크기를 측정하는 파라메터.
- 반사손실(Return Loss) 는 인터커넥터 또는 전송라인이 50ohm에 얼마나 잘 매칭 되었는지를 나타내주는 파라메터
- 측정법은 일반적으로 TDR에서 S-Parameter를 이용하여 측정한다.

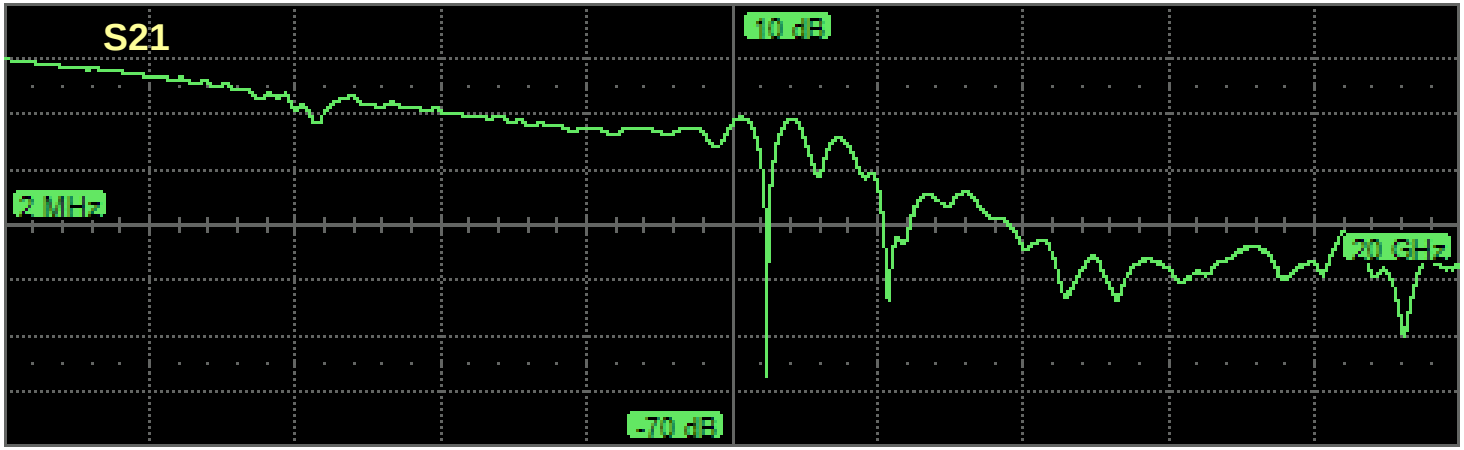
Measurement Point

Pulse Input



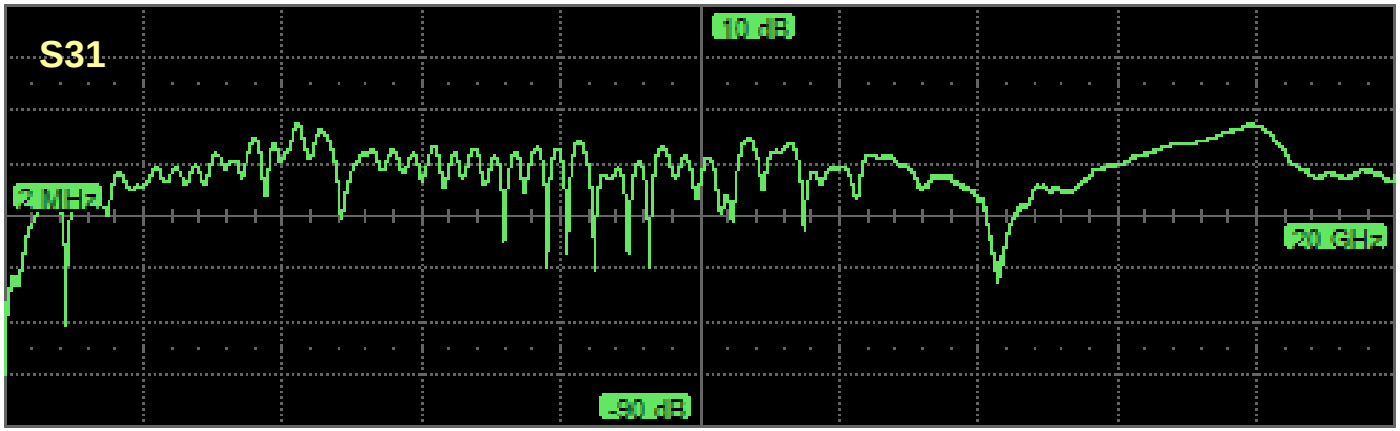
Insertion Loss : S21

- 특정 입력단으로 신호가 전송라인에 입력되어 동일 라인의 출력단으로 얼마나 잘 신호가 통과되는지를 파악하는 파라메터.
- 전달 손실은 전달된 신호의 품질과 인터커넥터 자체의 대역폭을 보여줌.
- 인터커넥터 또는 전송라인이 전달할 수 있는 능력을 나타냄.
- 측정법은 일반적으로 TDR에서 S-Parameter를 이용하여 측정한다.



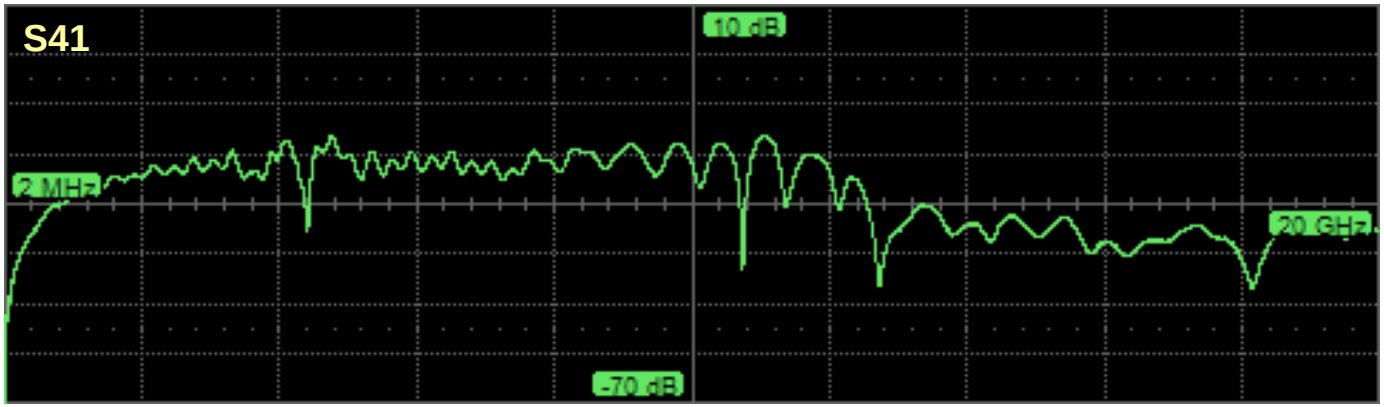
Near End Cross Talk (NEXT) : S31

- 특정 입력단으로 신호가 전송될 때 근접한 입력 채널에 주는 영향을 체크한다.
- 측정법은 일반적으로 TDR에서 S-Parameter를 이용하여 측정하며, 또다른 방법으로는 특정 데이터 레이트의 신호를 하나의 입력단에 입력하면서, 인접 입력단에서의 출력을 측정하여 두 신호를 비교하는 방법이 있을 수 있다.



Far End Cross Talk (FEXT) : S41

- 특정 입력단으로 신호가 전송될 때 근접한 전송라인의 출력 단에 주는 영향을 체크한다.
- 측정법은 일반적으로 TDR에서 S-Parameter를 이용하여 측정하며, 또다른 방법으로는 특정 데이터 레이트의 신호를 하나의 입력단에 입력하면서, 인접 입력단에서의 출력을 측정하여 두 신호를 비교하는 방법이 있을 수 있다.



신호 품질에서의S-Parameter

- S-Parameter는 백플레인, 커넥터, 케이블,연결 장치, PCB 등의 성능을 검증하고 예측하는 데 필요하다.
- S-parameter 측정은 모델을 생성하고 검증하기 위해 필요하다.
- VNA 가 많이 사용됨
  - 매우 비싸고, 주로 마이크로웨이브 엔지니어들 사용
  - VNA 사용자 5 ~ 10% 정도가 Signal Integrity applications에 사용
- 결과의 품질은
  - 측정 당시의 설정에 의해 좌우됨.
    - **캘리브레이션 : 측정 시작전에 수행해야 정확도 높아짐.**
    - **디임베딩 : 케이블, 픽스쳐 및 프로브의 영향을 측정결과에서 제거**

LeCroy

고속 신호 전송을 위한
전송선 및 커넥터 특성 측정

Part II.

1. 기본 파라메터 들
2. SI Network Analyzer (SPARQ)

LeCroy

측정 파라메터들 ...

Measurement Name	S-parameter
Differential Impedance	SDD11 (time domain transform)
Single-Ended Impedance	S11
Common Mode Impedance	SCC11 (time domain transform)
Differential Mode Return Loss	SDD11
Common Mode Return Loss	SCC11
Differential to Common Mode Impedance Balance	SCD11
Differential Mode Insertion Loss	SDD21 (cables connected differently than Xtalk)
Common Mode Insertion Loss	SCC21 (cables connected differently than Xtalk)
Near End Crosstalk (NEXT)	SDD21 (cables connected differently than FEXT)
Far End Crosstalk (FEXT)	SDD21 (cables connected differently than NEXT)

Other Parameters	
Signal Integrity	Eye Diagram and Jitter Measurement
Differential lane	Intra-Pair Skew
Between Lane	Inter-Pair Skew

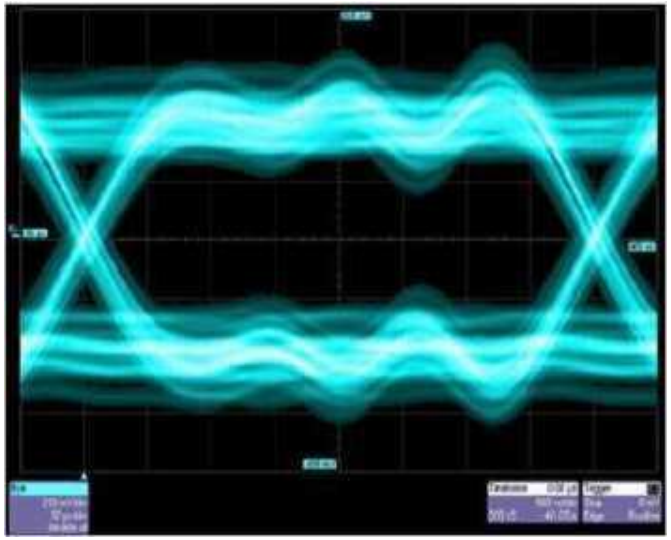
LeCroy

시리얼데이터 표준과 필요한 측정 파라메터들

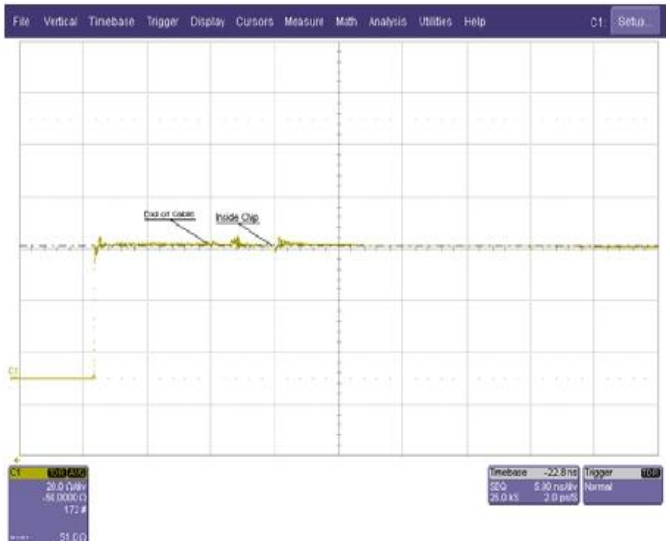
Test	USB 3.0	SATA	SAS	PCIe
Differential Mode Impedance	Yes – Transmitter and Receiver	Yes – Cable, Transmitter	Yes – Cable, Transmitter and Receiver	Yes – Transmitter and Receiver
Single-Ended Impedance		Yes		
Common Mode Impedance	Yes – Transmitter and Receiver	Yes - Cable	Yes - Receiver	
Differential Mode Return Loss	Yes	Yes	Yes – Transmitter and Receiver	Yes - Cables
Common Mode Return Loss		Yes	Yes – Transmitter and Receiver	
Differential to Common Mode Impedance Balance	Yes	Yes	Yes – Transmitter and Receiver	
Differential Mode Insertion Loss	Yes	Yes	Yes - Cables	Yes - Cables
Common Mode Insertion Loss				
Near End / Far End Cable Crosstalk	Between 3.0 pairs and 3.0 to 2.0 pairs	Near End Crosstalk	Yes	

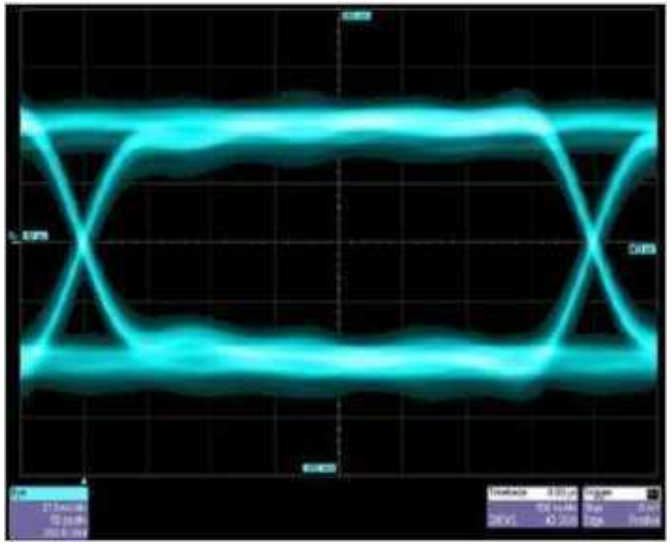
LeCroy

임피던스와 아이다이어그램



라인을 통과한 후 칩셋 내부에서 임피던스가 **66.2ohm** 으로 크게 변화하고 있다. 이 때문에 아이
패턴의 모양에 많은 반사가 포함되어 있음을 알 수 있다.





임피던스가 개선된 칩셋을 이용한 아이 패턴의 모양. 수직 축에 실려 있던 노이즈와 타이밍
에러(지터) 는 물론 반사되어 나타나던 모양이 모두 제거되어 있다.

LeCroy

측정의 필요성

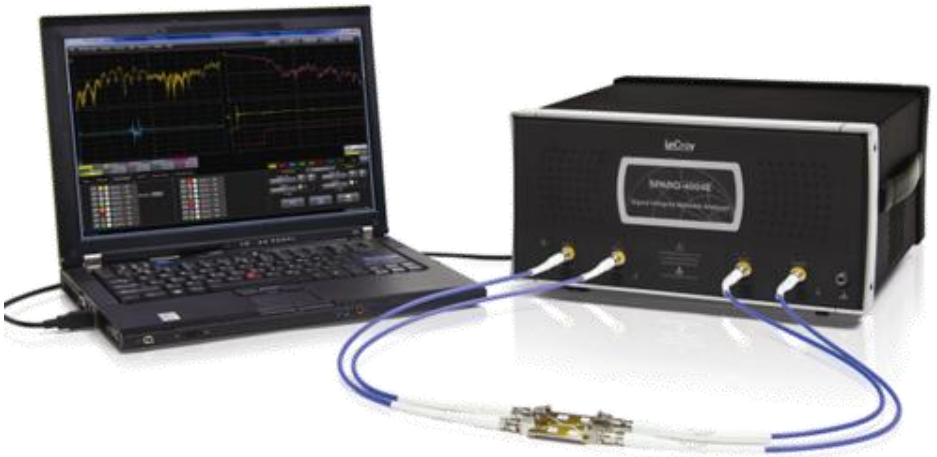
- 실제의 Measurement와 비교되지 않는 Simulation은 의미가 없음.
  - PCB의 Dielectric constant라는 것이 실제로는 정확하게 측정을 해서 Simulation에 적용해야 만 PCB의 C(capacitance)값을 정확하게 Modeling할 수 있다는 것입니다.
  - 실제의 PCB를 측정해서 이 PCB의 정확한 특성 치를 가지고 Simulation해야 정확한 결과를 얻을 수 있음.
-
- 측정장비는 VNA(Vector Network Analyzer), TDR/TDT, LCR Meter등
  - Signal Integrity를 수행하는 Engineer라면 기본적으로 다룰 줄 알아야 하는 장비
  - Simulation을 통한 Wave와 측정을 통한 Time domain Wave를 비교함으로써 Simulator의 정확도를 비교하지만, 이는 올바르지 못한 방법입니다.
  - 얼마나 정확한 Modeling data를 Simulator에 사용하느냐에 따라 시뮬레이션의 정확도 판가름.

LeCroy

SPARQ
&
Signal Integrity Studio

LeCroy

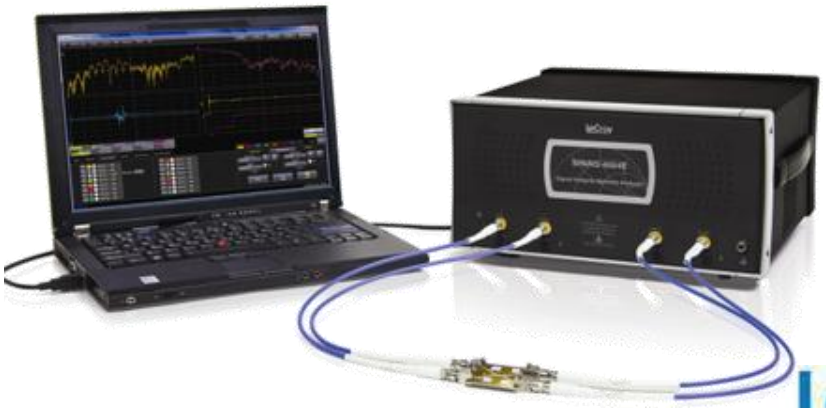
“ 40GHz, 4 포트 S-parameters 측정, 인터널 캘리브레이션 , 단 한 번의 번튼 클릭으로 결과 도출.”



LeCroy

4 port, 40 GHz

- **차동 S-Parameter 측정을 위하여 4 ports 필요함**
  - 차동 측정은 고속 전송 시스템에서 필수
  - 차동 방식의 S-parameters 관측
  - 1쌍의 차동 입/출력 관측 → 4 싱글 엔드 포트
- **40 GHz 는 최근의 시리얼 데이터 표준에 필수**
  - USB3.0, 6 SATA, PCIE G3, CAUI



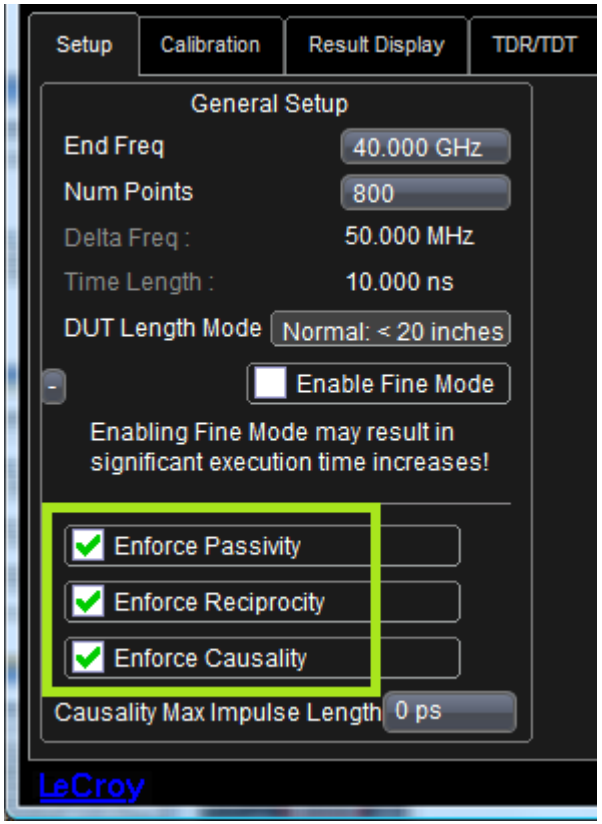
매우 간단한 동작법

- ✓ 단 1번의 버튼 클릭으로 측정 완료
  - ✓ **캘리브레이션 단계의 캘 킷 연결/제거의 반복 동작 불필요.**
  - ✓ **사용자의 동작 오류 없음.**
  - ✓ **완벽한 캘리브레이션 및 측정이 수 분 이내에 완료됨.**
- ✓ 누구나 사용가능 –VNA 전문가 필요하지 않음.
- ✓ 매우 쉬운 사용 .
- ✓ 캘리브레이션 킷의 분실 우려 없음
- ✓ 사용자의 사용 미숙에 의한 오류 없음.

LeCroy

Passivity, Reciprocity, Causality

- **Passivity: S-params are <0dB**
  - 수동 DUT들은 에너지 발생 못하고, 에너지를 소비함.
  - 따라서, 양의 dB 값을 가질 수 없음.
- **Reciprocity : $S_{ij} = S_{ji}$**
  - 대부분의 수동 디바이스들은 이 원칙을 따름
- **Causality**
  - 응답이 입사파 보다 빠르게 나올 수 없음.



LeCroy

SPARQ Simulation-ready의 장점

- ✓ 한 번 측정으로 올바른 결과 획득
  - ✓ 잘못된 결과 때문에 여러 번 캘리브레이션을 하거나
  - ✓ 여러 번 측정할 이유 없음
- ✓ S-parameter 값이 수동성, 인과성, 상호성의 원칙 준수
- ✓ S-params 결과에 DC 측정값 포함.
  - ✓ VNA의 경우, 외삽 을 수행해야 함
- ✓ 외부의 SW 없이 믹스드 모드 S-Parameter 관측 가능
  - ✓ Single mode <-> Mixed mode 변환이 자유로움.

LeCroy

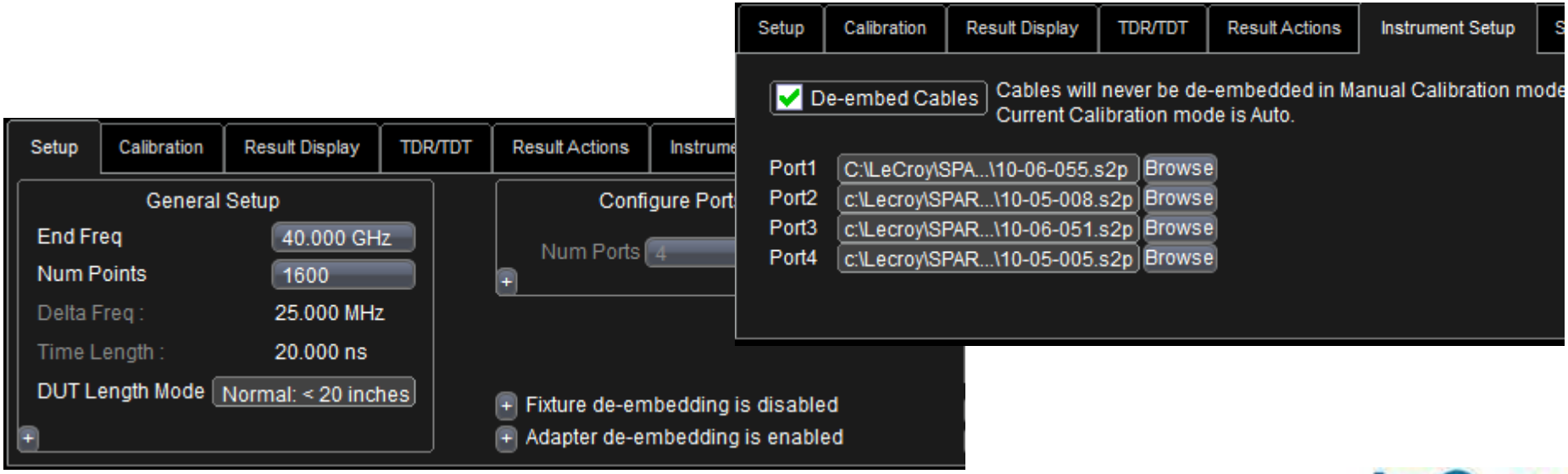
TDR / TDT Mode

- 사용자가 직접 펄서 또는 샘플러를 지정할 수 있음.
- TDR /TDT 결과 트레이스의 업데이트가 매우 빠름
- 빠른 TDR 펄스 에지 상승시간: 6 ps 상승시간

- TDR / TDT 모드의 장점
  - 문제가 발생한 지점의 문제를 빠르게 찾아낼 수 있음.
  - S-parameter 문제를 타임도메인에서 확인 가능
  - 연결성 확인
  - TDR/T 분석

SPARQ De-embedding의 장점

- **사용자는 DUT 만의 S-parameters 를 측정할 수 있음.**
  - 빠르게 케이블, 어댑터, 픽스쳐를 디-임베딩 할 수 있음.
  - De-embedding 기본 탑재- 별도의 SW 필요 없음
  - 별도의 과정 필요 없음.



Signal Integrity Studio Overview

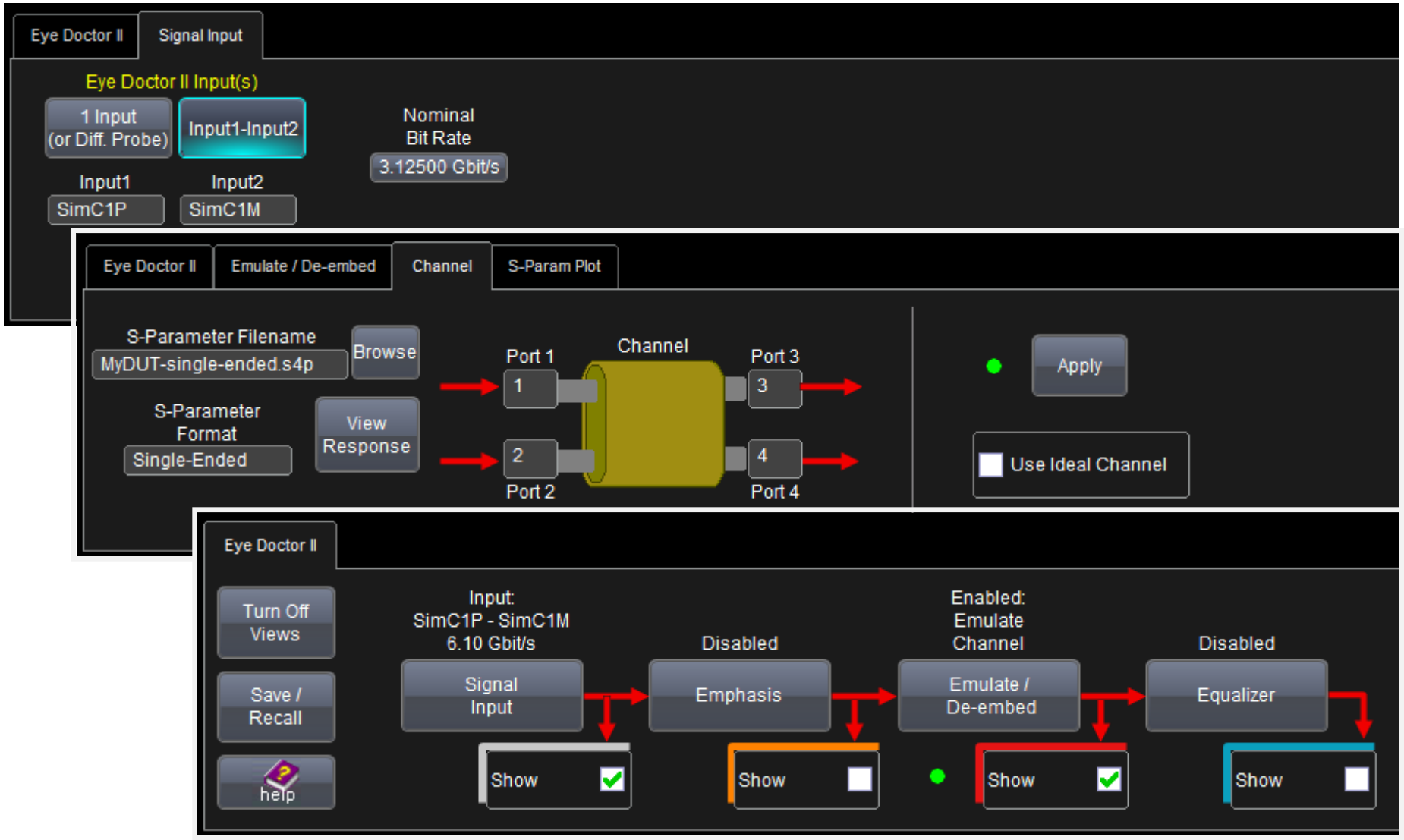
SISTUDIO:

- 시리얼 데이터 신호 시뮬레이션
- 트랜스미터 엠퍼시스 모델
- S-Parameter를 이용한 채널 에뮬레이션 및 디임베드 가능
- 리시버 이퀄라이제인션 모델
- 아이 및 지터 측정 분석

SI Studio Stand alone

SPARQ- SiStudio

Using SI Studio - Configure Eye Doctor



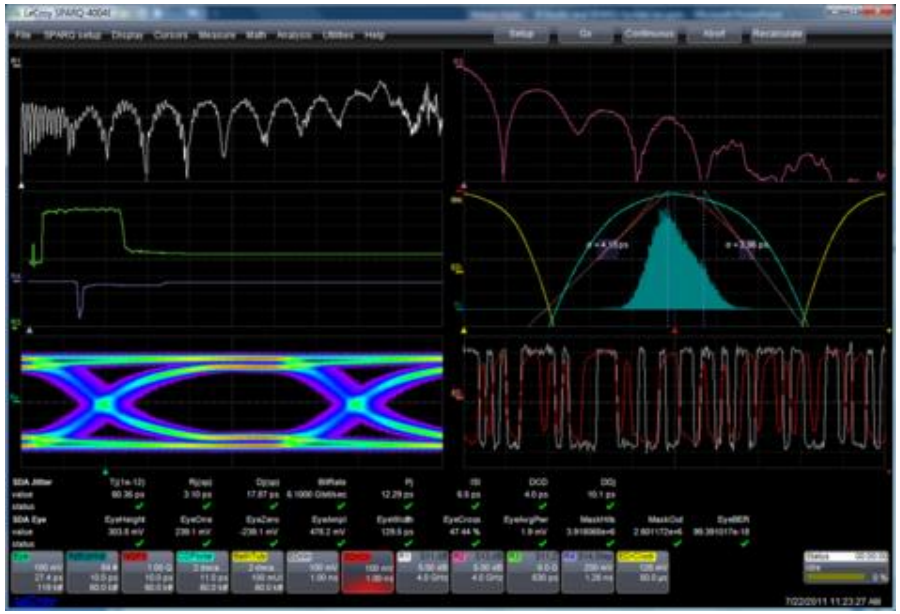
Using SI Studio: View Results

측정에 필요한 모든 것들 제공

SPARQ 에 포함되는 것들:

- ✓ 주파수 도메인 결과 도출 (single-ended & mixed-mode)
- ✓ 타임 도메인 결과 도출 (Step, impulse, Z, rho)
- ✓ Passivity/Reciprocity/Causality 적용
- ✓ 케이블, 어댑터, 픽스쳐 De-embedding
- ✓ 측정용 케이블 (S-Parameter 파일 제공)
- ✓ 소프트웨어 (업그레이드 무료, 무료 라이선스)
- ✓ TDR/TDT 디버그 모드
- ✓ SI Studio를 이용한 시뮬레이션 옵션

LeCroy



www.beTheSignal.com
www.lecroy.com

LeCroy