

통신시스템 기가비트 연결 설계기술

남상식, 박종대
 ETRI 교환전송기술연구소 교환기술연구부
 전화: (042)860-5392/팩스(042)860-6858

The Technology of Gigabit Interconnects for Communication Systems

Sang Sig Nam, Jong Dae Park,
 Switching Technology Dept., Switching & Transmission Technology Lab., ETRI
 E-mail:ssnam@etri.re.kr

Abstract

As VLSI technology advances rapidly, the operating frequency of digital systems becomes very fast. In such a high-speed system, there are many factors that threaten signal integrity. The noise sources in digital system include the noises in power supply, ground bounce and packaging media and distortions on single and multiple transmission lines. This paper will present a technology survey useful in the design of Gigabit interconnection systems. Some case studies have been constructed which show the lossy transmission line effect of skin effect, dielectric loss, with backplane connectors using the theoretical and practical conditions.

1. 서 론

반도체 기술의 급속한 발전으로 시스템이 고집적화되고 동작주파수가 높아짐에 따라 시스템 모듈 상호간의 신호전송에 있어서 신호 충실성(Signal Integrity)을 보장하는 것이 중요한 문제로 부각되고 있다. 신호의 충실성을 보장한다는 것은 디지털 정보를 전송할 때 전송비트의 오류(Error rate)를 최소화 하는 것을 의미한다. 고속 통신시스템의 동작주파수가 수 GHz 대역의 고주파로 증가함에 따라 신호선로는 전송선으로 해석하여야 한다. 이때 시스템 해석에서 신호의 비행시간(Time of Flight), 종단망(Far-end) 조건에 따른 파형반사(Reflection) 및 이웃한 선로간의 전자기적 결합으로 인한 누화(Crosstalk) 등을 고려해야 하며, 해석상의 정확성을 요구하는 경우에는 주파수에 의존하는 표피효과(Skin effect) 및 근접효과(Proximity effect) 등의 이차적인 신호감쇠요인도 고려하여야 한다. 고속 통신 시스템에서의 신호경로의 물리적 설계인 신호선의 구조 및 배치는 여러 잡음원과 결부되어 회로 오동작을 일으키는 원인이 되므로 시스템 설계시 고려

되어야 할 매우 중요한 요소이다. 또한 각 신호경로 상에서 발생하는 잡음들은 상호 독립적인 문제라기 보다 시스템 동작시 동시에 발생하는 문제들로서 시스템의 성능 즉, 속도에 지대한 영향을 미치기 때문에 총체적이고 체계적인 해석이 요구된다.

본 논문에서는 고속 통신시스템상의 신호 충실성을 보장하기 위해 차세대 통신시스템의 백플레인 보드로 사용될 모듈을 표피효과, 유전 손실과 전도 손실을 고려하여 Hspice 로 시뮬레이션 하였다. 또한 그 특성을 측정치와 비교 분석하여 기가비트 연결 설계기술의 가능성을 고찰하였다.

2. 기가비트 연결기술을 위한 시뮬레이션

기가비트 연결기술 해석을 위해 본 연구에서는 이론적 조건들을 해석하고 각각의 case 연구를 수행하였다. 먼저 이론을 살펴보면 전송선은 두개의 손실 요소인 직렬 저항손실(series resistive loss)과 병렬 유전손실(shunt dielectric loss)을 가지고 있다. 이러한 손실은 DC 손실항과 주파수에 관계된 AC 손실항을 가지고 있다. 표피 효과 손실은 $R_{skin} \propto \sqrt{f}$ 와 같이 주파수에 비례하는 특성이 있다. 고주파 영역에서는 AC 유전손실이 중요한 요소가 되고 DC 유전손실은 일반적으로 무시할 수 있다. 병렬 컨덕턴스 G_c 로 표현되는 유전손실을 갖는 병렬 커패시터 C 를 고려하면 어드미턴스는 다음과 같다.

$$Y(j\omega) = j\omega C + G_c = j\omega \left[C - j \frac{G_c}{\omega} \right] \dots (1)$$

식 2 로 치환함으로써 해서 무손실(lossless)주파수 분석에 의한 손실(lossy) C 를 구할 수 있다.

$$C \rightarrow C - j \frac{G_c}{\omega} \dots \dots \dots (2)$$

유전체의 특성은 유전율과 유전손실 계수로 표현된다. 동일 물질인 경우 Gc는 다음과 같다.

$$G_c = \frac{\epsilon''}{\epsilon_r} \cdot \omega C \dots\dots\dots(3)$$

여기서 ω 는 각속도이고, 손실 탄젠트(loss tangent)는 다음과 같이 주어진다.

$$\tan \delta \approx \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon_r} \dots\dots\dots(4)$$

대부분의 물질인 경우 손실 탄젠트는 매우 작으며 라디안 각(radian angle)으로 근사화 할 수 있다. 식 3, 4를 이용하여 손실, 커패시턴스, 컨덕턴스의 관계를 식 5와 같이 표현할 수 있다.

$$G_c = \delta \omega C \dots\dots\dots(5)$$

대부분의 PCB 유전체인 경우 δ 는 특정 주파수에서 주어지는 값이다. 만약 δ 를 상수로 가정한다면 병렬 컨덕턴스 Gc는 아래식과 같이 주어진다.

$$G_c \equiv G_0 + G_d f \dots\dots\dots(6)$$

여기서 G_0 는 DC 병렬 커패시턴스이고, G_d 는 단위 주파수당 유전손실이다. PCB 수지의 폴리머 특성에 근거하여 일반적인 동작온도에서 G_0 는 0로 가정할 수 있다.

$$G_d = 2\pi\delta C \dots\dots\dots(7)$$

손실 커패시터 모델이 PCB 전송선으로 확장된다면 식 7의 커패시턴스는 단위 길이당 값으로 표현된다. 그래서 컨덕턴스값은 밴드에서 주어진 값 δ , 무손실 PCB electromagnetic field solver로 계산된 C에 의해 알 수 있다.

전송선 감쇄(Transmission Line Attenuation)

전송선 감쇄는 미소한 손실을 갖는 전송선의 이론으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\text{Attenuation}}{\text{PerUnitLength}} \text{ (dB)} = 4.35 \left[GZ_0 + \frac{R}{Z_0} \right] \dots\dots(8)$$

여기서 Z_0 는 전송선의 특성 임피던스, R은 표피 효과를 포함하는 전송선 저항이다. 이 저항은 주파수에 비례하는 직렬저항 손실로 아래식과 같이 주어진다.

$$R = R_0 + R_s \sqrt{f} \dots\dots\dots(9)$$

여기서 R_0 는 전송선의 DC 손실, R_s 는 전송선 표피효과 손실에 관련된 변수이다. 일반 고주파 동작 범위 내에서는 표피효과가 DC 손실에 비해 훨씬 크다.

전송선 중단점(Break Point) 주파수(fe)

전송선 중단점(Break Point) 주파수(fe)는 표피효과로 인

한 감쇄가 유전손실 감쇄와 같은 주파수로 식 10과 같이 주어진다.

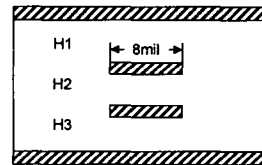
$$f_e \equiv \left[\frac{R_s}{G_d} \cdot \frac{1}{Z_0} \right]^2 \dots\dots\dots(10)$$

이때 $f < f_e$ 이면 표피효과 손실이 유전손실보다 우세하고, $f > f_e$ 이면 유전손실이 표피효과 손실보다 우세하다. 디지털 시스템에서 이 주파수는 근사화된 아래식과 같이 표현할 수 있다.

$$f_{high} \approx \frac{0.35}{\Delta \tau_r} \dots\dots\dots(11)$$

기가비트 상호연결 시뮬레이션 Case 연구

Case 연구는 표피효과 손실만을 고려한 경우, 표피효과 손실과 유전손실을 고려한 경우, 두 가지 요소와 백플레인 커넥터를 고려한 경우에 대한 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 40" 길이로 2.5Gbps 데이터의 차동 전송선 신호를 조사하였다. 사용된 유전체는 유전상수 4.5, 손실 탄젠트 0.021인 FR-4를 사용하였다. 설계된 전송선의 차동 임피던스는 100Ω, 선폭 8mils, 1oz 구리를 사용하여 제작하였다. 단일(single-ended) 전송선 임피던스는 65Ω으로 계산되었다. 이 경우 차동 신호의 fe=205MHz이다.



H1=H3=13mil, H2=14mil
FR-4 material, epsilon=4.5
Loss tangent=0.021
Zo=64.9 ohm, Zdiff=100 ohm
Copper=1 oz

그림 1 FR-4를 사용한 PCB stack up
Fig.1. PCB stack up with FR-4 material

식 8에서 11로부터 fe의 함수로서 단위길이(m)당 특정 손실을 계산하면 다음과 같다.

표 1. 단위길이당 손실

Table 1 Sample results of specific loss per meter

Freq. in terms of Fe	Total Signal loss(%)	DC Loss (dB)	Skin effect Loss(dB)	Dielectric Loss (dB)
1	16.2	0.2	0.663	0.663
2	24.7	0.2	0.937	1.326
3	31.9	0.2	1.148	1.989
4	38.2	0.2	1.326	2.652
8	67.3	0.2	1.875	5.304

주파수가 800MHz 이상이면 전체 손실은 무손실에 비해 38% 정도이고 GHz 대인 경우(8*Fe) 전체 손실은 67% 정도이다. 다음에 나타나는 시뮬레이션 결과는 구동신호로 $\pm 800\text{mV}$ 의 차동 소자출력을 사용하여 데이터 전송 특성을 표현하는 아이 다이어그램(eye diagram)을 Hspice 시뮬레이션을 통하여 비교 분석하였다.

Case 연구 1-a : 2.5Gbps의 차동 전송선로에 표피효과 손실만 고려한 경우는 아이 열림(eye opening) 특성이 우수하고 지터(jitter)도 거의 없는 이상적인 아이 다이어그램 특성을 나타내고 있다.

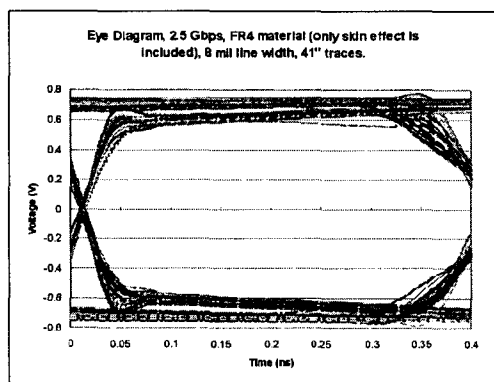


그림 2. DC 손실, 표피효과손실만을 고려한 아이 패턴
Fig. 2. Simulated eye pattern with DC and skin effect only

Case 연구 1-b : 2.5Gbps의 차동 전송선로에 표피효과 손실과 유전손실을 고려한 경우는 유전체 인자 Gd가 포함되고 Go는 0이 된다. 또한 손실 탄젠트는 0.021의 FR-4를 그대로 적용한다. 전송선의 RLGC는 2D magnetic field solver에 의해 추출하여 Hspice에 적용하였다. 그림 3은 그림 2와 비교할 때 아이 열림과 지터 특성도 감쇄가 심함을 확인할 수 있다.

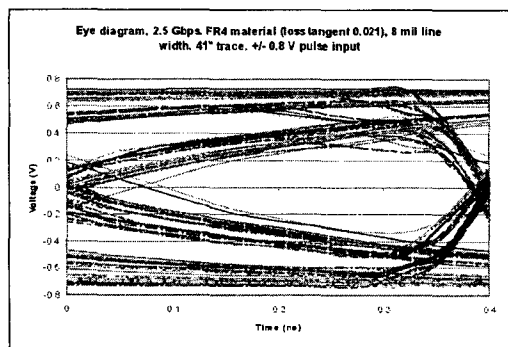


그림 3. DC 손실, 표피효과 손실 및 유전손실을 고려한

아이 패턴

Fig. 3. Simulated eye pattern with DC, skin effect & dielectric losses only

Case 연구 2 : 2.5Gbps 차동 전송선에 표피효과 손실, 유전손실, 전도손실을 고려한 차동 백플레인 시뮬레이션은 전체 차동 전송선 길이는 위와 같이 41"에서 양쪽 5"에 두개의 커넥터를 삽입하여 백플레인 길이는 31"이고, 완벽한 상호 연결을 위하여 2.5Gbps의 트랜시버를 사용하여 DC 손실, 표피효과 손실 및 유전 손실을 시뮬레이션 하였다.

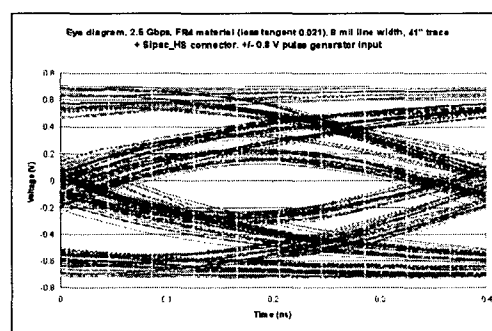


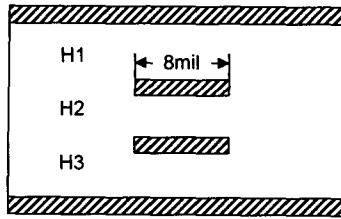
그림 4. DC 손실, 표피효과손실, 유전손실 및 전도손실을 고려한 아이 패턴

Fig. 4. Simulated eye pattern with DC, skin effect & dielectric losses and connectors

그림 4는 그림 3과 비교할 때 전도손실의 영향으로 신호특성의 감쇄가 심각함을 나타내고 있다. 전체적인 시뮬레이션 결과로 볼 때 2.5Gbps의 긴 선로인 경우는 표피효과 손실보다는 유전손실에 의한 요소가 지배적임을 알 수 있다. 따라서 낮은 유전손실의 재료를 사용한다면 특성의 변화를 기대할 수 있다.

Case 연구 3 : 저 손실 2.5Gbps의 차동 전송선로에 표피효과 손실, 유전손실, 도체를 고려한 차동 백플레인 시뮬레이션은 저 손실 물질인 Rogers RO3203을 사용하여 아래의 구조로 시뮬레이션을 실시하였다. RO3203은 손실 탄젠트 0.0016, 유전상수 3.02, 단일 전송선 임피던스 67Ω, 차동임피던스 100.5Ω, 8mil 폭, 1oz 구리를 사용하였다.

이 경우 차동신호의 f_c 는 58.8GHz이다. 유전체의 유전상수가 낮아 각 층의 두께도 얇아지고, 전송선의 커패시턴스로 줄어든다. 결국 병렬 컨덕턴스도 줄어든다(식 3 참조). 그 시뮬레이션 결과가 그림 6에 나타나 있다.



H1=H3=9mil, H2=10mil
 Rogers RO3202 material, epsilon=3.02
 Loss tangent=0.016
 Zo=66.95 ohm, Zdiff=100 ohm
 Copper=1 oz

그림 5. Rogers 물질을 사용한 PCB stack up
 Fig. 5. PCB stack up using rogers material

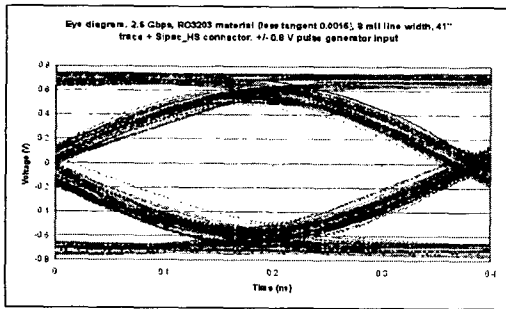


그림 6. 저 손실 물질을 사용한 아이 패턴
 Fig. 6. Simulated eye pattern with low loss dielectric materials.

그림 6은 그림 4에 비해서 우수한 눈 열림 특성을 나타내고 있다. 이 구조는 수신기에 대한 충분한 잡음 마진을 갖고 있는 우수한 특성을 갖고 있다.

3. 측정결과 및 고찰

주어진 경로에 대한 반사와 전송 지연, 진폭이득, 델타 상승시간, 표피효과, 유전손실 등을 측정하기 위해 TDR/TDT를 사용하였다. TDR/TDT 측정은 HP54750A differential TDR/oscilloscope와 HP54751A plug-in module을 사용하여 전송된 차동신호(TDT)와 아이 패턴 데이터를 수신하였다.

Case 연구; 23" 길이 path 측정결과

이 상호 연결은 카드의 신호경로, 백플레인 신호경로, 2개의 고속 백플레인 커넥터로 구성되어 있다. 유전손실이 0.021인 표준 FR-4로 구현된 백플레인 차동신호는 폭 8mil 길이 23", 카드 신호경로는 폭 6mil, 길이 11"로 구성되어 있고 설계된 차동 전송선의 선로 임피

던스는 100Ω이다. 이때 TDR로 측정된 결과가 그림 7에 나타나 있다.

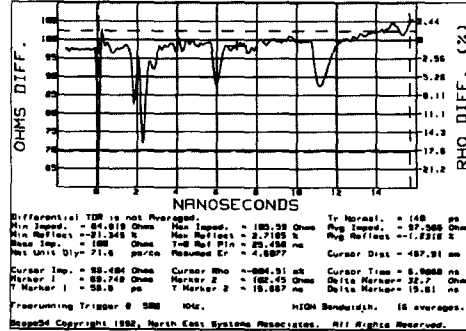


그림 7. 23"길이의 Differential TDR
 Fig. 7. Differential TDR; path with 23" in traces

Differential TDR의 상승시간은 140ps로 측정했을 때 첫번째 불연속(시간 0인곳)은 SMA 시험용 커넥터에 기인한 것이고 첫번째 카드의 신호경로는 0~4ns 사이의 TDR profile을 나타내고 6ns 근처에서는 두번째 카드를 나타내고 있다. 또한 상호연결을 통한 전달지연(propagation delay)은 커넥터 효과를 포함한 그림 8과 같이 4.67ns로 나타나고 있다.

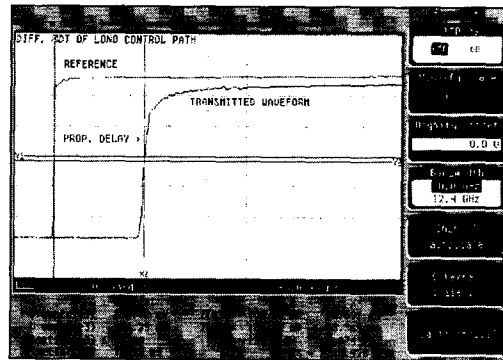


그림 8. Differential TDT; 23" 길이
 Fig. 8. Differential TDT; path with 23" in traces

±800mV, 1.25Gbps 차동 입력신호를 인가하였을 때 측정된 아이 패턴은 그림 9와 같이 100ps 지터, 703mV 눈 높이, 701ps 눈 폭을 나타내고 있다. 이 눈 열림 결과는 적절한 수신기의 동작을 위한 ECL 입력 임계치(threshold)를 만족한다.

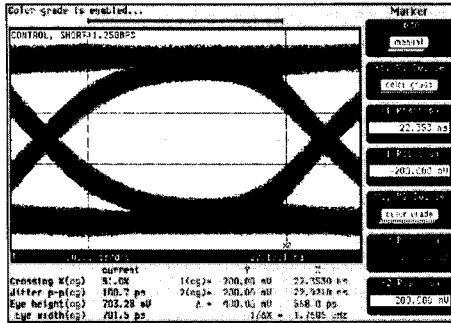


그림 9. 측정된 아이 패턴; 23"길이
 Fig. 9. Measured eye pattern, with a 1.25Gbps data rate and 23" PCB traces

아래 표 2 는 TDR/TDT 측정결과를 나타내고 있다.

표 2. TDR/TDT 측정결과
 Table 2 Measured results of TDR/TDT

	Time Jitter (ps)	Eye Height (mV)	Eye Width (ps)
23" PCB 1.25Gbps	100.7	703.8	701.5
41" PCB 1.25Gbps	167.7	745.3	634.5
23" PCB 2.5Gbps	136.1	581.2	265.5
41" PCB 2.5Gbps	N/A	136	90

4. 결론

본 논문에서는 고속 통신시스템상의 신호 충실성을 보장하기 위해 차세대 통신시스템의 백플레인 보드로 사용될 모듈을 표피효과, 유전 손실과 전도 손실을 고려하여 Hspice 로 시뮬레이션 하였다. 또한 그 특성을 측정치와 비교 분석하여 기가비트 연결 설계기술의 가능성을 고찰하였다. 그 결과 기가비트 상호연결 체계에서 유전손실이 더 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 즉 2.5Gbps 상호연결에서 전송비트의 오류를 최소화하기 위해서는 신호경로는 8mil 또는 그 이상의 두께로 20"길이 보다 짧게 설계하고, 낮은 손실을 갖는 유전물질을 사용하는 것이 바람직하다.

참고문헌

- [1] F.Y.Chang, "Transient Analysis of Lossless Coupled Transmission Lines in Nonhomogeneous Dielectric Medium", IEEE Trans. Microwave Tech, Sep., pp.616-626, 1970.
- [2] Mark I. Montrose, "EMC and the printed circuit board", IEEE Inc., pp.175-182, 1996.