

다중 채널 동축 케이블의 초고주파 측정용 보드 설계

A Design of Microwave Measurement Board for Multi-channel Coaxial Cable Assembly

문 수 덕* 김 진 규** 황 희 용***
Moon, Soo-Deok Kim, Jin-Kyu Hwang, Hee-Yong

Abstract

In High-Speed DSP systems, crosstalk between transmission lines of multi-channel can degrade the performance of equipment operations. This paper presents a microwave board to measure multi-channel coaxial cable assembly. The designed board has good performances from DC to 3GHz, which have improved characteristic impedance, reduced crosstalk by using via fence, and low transmission loss. Using the designed board, we can measure characteristics of DUT(Device Under Test) such as return loss, insertion loss, crosstalk, phase delay, and characteristic impedance. The measured results are used to improve performances of a produced coaxial cable assembly.

키워드 : 다중채널, 비아 펜스, 결합 선로의 누화
Keywords : multi-channel, via fence, crosstalk

1. 서론

정보기기들의 발달로 인해 기기간의 통신하는 데이터양이 점점 늘어 가는 추세이다. 따라서 동일한 시간동안 데이터양을 늘리기 위하여 다중 채널을 사용하고, 데이터 전송속도가 수백 MHz 이상으로 점점 빨라지고 있다. 이렇게 광대역 신호와 고속 스위칭 소자들을 사용하는 기기들이 늘어나면서 전자파 장애(Electromagnetic Interference: EMI) 현상도 점점 커지고 있다. 전송선로에서 데이터의 전송속도가 점점 증가할수록 인접된 선로

간의 누화(Crosstalk)는 점점 증가한다[1]. 채널간의 누화로 인해 아날로그 신호나 디지털 신호의 질을 저하시켜 정보를 잃어버리거나 왜곡시킬 수 있다. 이러한 결합선로의 누화는 전송선로의 기하학적 구조, 종단 임피던스, 전송선로에 흐르는 신호의 형태에 밀접한 관계가 있다. 전송선로에 흐르는 신호의 형태와 종단 임피던스가 일정하다고 가정하면, 전송선로의 기하학적인 구조에 크게 의존한다.

다중 전송선로의 결합으로 인한 누화는 Paul에 의해 연구되었으며[2], Kami는 회로 개념을 이용하여 두 전송선 사이의 결합 또는 외부 전자파가 전송선에 미치는 영향을 해석하였다[3][4].

대부분의 기기에서는 인쇄회로기판(Print Circuit Board: PCB)을 이용하여 전송선로를 구성하지만, 노트북과 같이 전송선로의 변형이 필요한 구조에서는 동축선로(coaxial line)를 이용하고 있다. 동축선로를 사용할 경우 접지선로가 신호선을 감싸는 동축선로의 특성상 채널간의 누화는 거의 일어나

* 강원대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정
** (주) 태양3C 품질경영팀
*** 강원대학교 IT특성화학부대학 전기전자전공
조교수(교신저자)

지 않는다. 하지만 동축선로가 회로 기판과 연결이 되어야 하기 때문에 PCB와 동축선로의 연결단자에서 누화가 일어나고 임피던스 부정합이 발생한다. 따라서 연결단자와 결합된 동축선로의 특성을 측정하여 연결단자에서 발생하는 문제점을 최소화시켜야 한다.

다중 채널 동축 케이블을 측정하기 위해서는 계측기와 케이블을 연결 시켜주는 측정 보드가 필요하다. 본 논문에서는 Microstrip 선로를 사용하여 초고주파회로를 설계할 때 고려할 사항과 인접 선로간의 전력누화에 대해 알아보고, 이를 이용하여 4층 기판으로 다중채널 동축 케이블의 초고주파 측정용 보드를 설계하여 (주)태양3C社의 DEBORAH 15.1 FULL XGA 모델의 초고주파 특성을 측정하였다.

2. 초고주파회로 설계시 고려사항

초고주파회로에서는 인접한 신호 선로나 PCB 트레이스(trace)에 의해서 신호의 누화 현상이 발생된다. 이러한 현상을 줄이기 위해서 접지면(ground plane)을 적절하게 배치하고, PCB 트레이스 간격을 적당하게 띄우고, 소자들의 스텐브(stub) 인덕턴스를 줄여야 한다. 그림 1과 같이 PCB 트레이스의 귀환 전류 분포가 트레이스 폭의 3배 정도에 분포하기 때문에 인접된 트레이스 폭의 3배 떨어지게 배치하는 것이 누화 현상을 줄일 수 있다[5]. 또한 전송선로에서 임피던스 부정합으로 인한 반사로 인해 전달되는 신호가 감소하게 된다. 이러한 신호의 반사는 시스템의 잡음을 추가시켜 신호가 갖는 의미나 형상을 왜곡시킬 수 있다. 따라서 각 소자들을 연결할 때 반드시 임피던스 정합을 해 주어야 하며, PCB의 트레이스와 접지면의 간격, 또는 트레이스의 폭을 적당히 맞춰 임피던스 정합을 유지해야 한다.

그림 2와 같이 전송선로를 직각으로 꺾을 경우 모서리 부분에서 기생적인 리액턴스 성분이 생성되기 때문에 임피던스가 불연속으로 되어 위상, 진폭, 불요신호의 결합, 입출력 부정합이 생길 수 있다. 따라서 반지름이 선로 폭의 3배 이상 되도록 둥글게 휘는 방법이 최선이나 $a=1.8W$ 이 되도록

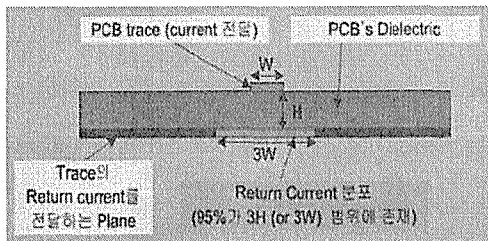


그림 1 PCB trace의 귀환 전류 분포

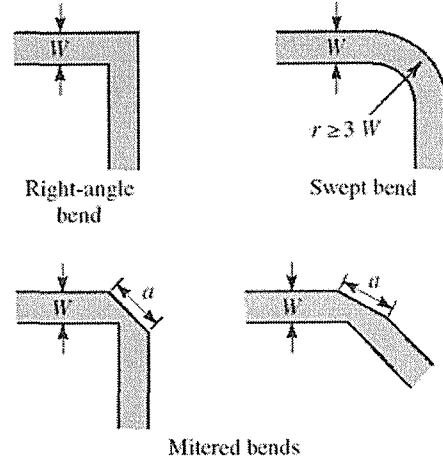


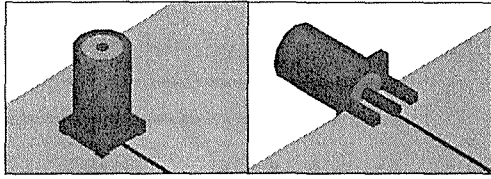
그림 2 Microstrip 전송선로의 불연속 보상

하여 연커모양으로 구성하여도 양호한 특성을 얻을 수 있다[6].

Microstrip 선로를 비롯한 PCB 에칭(etching)은 초고주파의 침투깊이(Skin effect)를 고려하여 1/2 온스를 사용하고, 선폭 허용 오차가 적을수록 우수하다. 도금은 초고주파에서 뛰어난 표면 특성을 갖는 HASL 대신 니켈/주액 금을 사용해야 한다. 또한 유전체 상수가 엄격히 제어될 수 있는 고성능 유전체 기판을 사용하는 것이 PCB의 전자기장을 계획적으로 관리 할 수 있다.

회로에 실장되는 부품 중에 lead 타입이나 DIP(Dual In-line Package)의 경우 연결되는 다리의 길이에 의해 스텐브 인덕턴스 영향을 받기 때문에 SMD(Surface Mount Device)를 사용하는 것이 유리하다. 또한 신호를 비아(via)를 통해서 연결 할 때는 민감한 기판영역에서 스텐브 인덕턴스와 원치 않은 방사가 일어날 수 있음을 유의해야 한다.

초고주파회로에서는 안테나와의 연결과 같이 SMA 커넥터를 이용하여 신호를 외부와 연결하는 경우가 많이 있다. 이러한 경우 가장 많이 사용되는 것이 그림 3과 같이 비아를 통해 표면에 커넥터를 연결하는 방법이다. 이 경우 회로를 설계하기 쉬운 장점이 있지만, 그림 4와 같이 모서리(edge) 실장 방법에 비해 커패시턴스가 증가하기 때문에 불연속 지점이 발생되어 반사파가 생기게 된다. 이러한 반사파는 주파수가 높아질수록 커지게 된다. 부득이하게 표면 실장 커넥터를 이용할 경우 신호선의 납땜 패턴을 최대한 작게 하면 커패시턴스 성분이 작아지므로 임피던스 불연속을 줄일 수 있다.



(a) 표면 실장 (b) 모서리(edge) 실장
그림 3 SMA 커넥터 실장

3. 인접선로간의 누화

초고주파회로에서는 인접한 전송선로간의 전력 누화가 생기게 된다. 이에 대한 해석은 Kami의 회로 개념을 이용하여 할 수 있다. 그림 4처럼 두 전송선로가 같은 접지면 위에 매우 근접하게 위치할 때 최종적으로 그림 5와 같이 4단자 회로망 모델로 등가 하여 ABCD 파라미터로 나타내었다[3][4].

이러한 인접한 전송선로간의 전력누화를 줄이기 위해서 두 전송선 사이에 전송선과 같은 형태인 별도의 도선을 삽입하거나, 결합 방지 효과를 높이기 위해 삽입된 선로에 비아 홀을 만들어 접지면에 연결시킨다. 그림 6과 같이 두 개의 전송선로 사이에 접지면과 비아로 직접 연결된 선로를 비아 펜스(via fence)라고 한다.

이러한 비아 펜스의 해석은 SPICE, FDTD, moment method 등의 수치해석 방법으로 수행될 수 있다. 이러한 방법은 많이 시간이 소요되어 앞서 소개한 Kami방법을 이용하여 ABCD 파라미터로 해석하는 방법도 연구되었다[7][8].

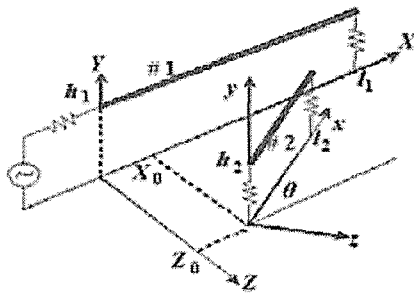


그림 4 인접된 전송선로의 모델

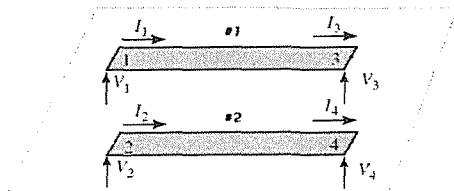


그림 5 등가된 4단자 망 모델

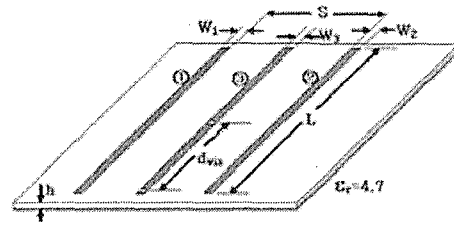


그림 6 두 개의 전송선로와 비아 펜스

비아 펜스를 이용하여 인접된 선로의 누화를 효과적으로 줄일 수 있지만, 비아 사이의 간격에 따라 더 나쁜 결과를 초래 할 수 있다. 삽입된 선로의 양 끝이 접지면에 직접 연결되어 있기 때문에 공진이 일어날 수 있기 때문이다. 이 공진주파수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_0 = \frac{C}{2d_{via} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

여기서 C는 광속 $3 \times 10^8 m/s$ 이고 ϵ_{eff} 는 기판의 유효 유전율이다. 비아의 간격 d_{via} 를 작게 하면 관심주파수 밖에서 공진이 일어날 수 있게 할 수 있다. 일반적으로 관심주파수의 최대치 파장의 8분의 1정도의 간격으로 비아를 위치시키는 것이 안정적이다. 하지만 과도한 비아사용은 제작비용을 높이는 원인이 될 수 있다.

4. 초고주파 보드 설계

앞서 설명한 초고주파 회로 설계시 고려사항과 비아 펜스를 이용하여 14채널 동축 케이블용 초고주파 측정용 보드를 설계하였다. 이 다중 동축 케이블은 노트북과 LCD 패널 간에 연결되며, 주로 100 MHz 대역의 데이터가 전송된다. 따라서 초고주파 측정용 보드를 이용하여 3 GHz까지의 주파수 특성을 확인하려 하였다. 이 보드를 이용하여 측정할 다중채널 동축 케이블의 특성은 그림 7과 같이 주파수 영역에서의 반사손실(SWR), 삽입손실(loss), 전력누화(crosstalk), 위상지연(phase delay)과 시간 영역에서의 특성임피던스이다.

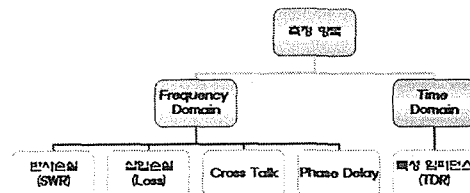


그림 7 측정항목

위 특성을 측정하기 위해서 초고주파 특성이 우수한 보드를 설계해야 한다. 우선 물리적으로 제작이 가능해야 하기 때문에 기판에서의 50Ω 선로 폭이 중요하다. 따라서 설계에 사용된 기판은 비유전율이 4.6인 FR-4이다. 동축 케이블에 연결된 커넥터는 JAE社의 FI-X30S-HF-NPB와 IPEX社의 20323-030E이다. 사용된 커넥터들의 핀 간격(Pinch)이 각각 1mm, 0.5mm이기 때문에 그림 8과 같이 프리프레그(prepreg)가 0.12mm이고 전체 두께가 0.8mm인 4층 기판을 사용하였다. 첫 번째 층에 신호선이 위치하며, 두 번째 층이 기준 접지면이 된다. 실제적으로 세 번째와 네 번째 층은 사용하지 않지만, 보드의 외형 변화와 파손을 방지하기 위해 전체 두께는 높이는 역할과 비아를 통해 2층의 접지면을 연결시키는 역할을 한다.

이때 1층에 삽입될 50Ω 선로의 폭은 0.2mm이므로 커넥터 연결에 용이하고, 인접 선로간의 전력누화를 줄일 수 있다.

JAE社의 커넥터는 핀 간격이 비교적 넓기 때문에 IPEX社의 커넥터를 기판에 연결할 때 보다 전력누화가 적다. 따라서 본 논문은 IPEX社의 커넥터에 맞는 기판 설계를 위주로 설명하였다. 그림 9는 커넥터를 기판과 연결하는 설계도면을 확대한 모습이다. 인접선로들이 겹치는 부분을 최대한 하였으며, 선로사이에 들어가는 비아펜스와 선로간의 간격을 0.5mm로 하였다. 전체적인 구조는 14채널을 효과적으로 배치하고 각 채널의 선로 길이를 동일하게 하기위해서 전체적인 모양은 그림 10과 같이 반원 모양이 된다. 원 모양으로 하면 더 작은 크기에 더 많은 채널을 측정할 수 있지만 반대편으로 비아를 통해서 연결해야 하기 때문에 비아연결로 인해 발생하는 임피던스 불연속과 인접 비아간의 전력누화로 인해 특성이 저하될 수 있다[9].

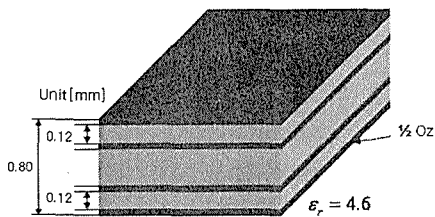


그림 8 설계된 4층 기판의 적층구조

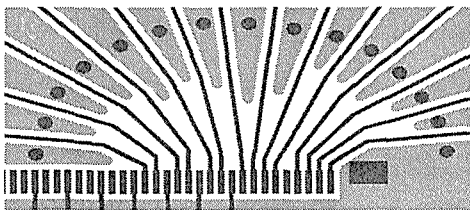


그림 9 설계된 1층 도면(커넥터 연결 부분)

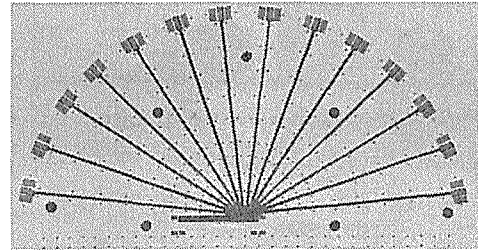


그림 10 설계된 1층 도면(전체)

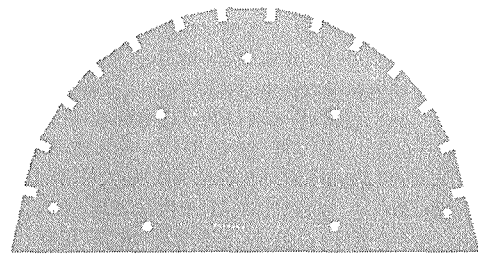


그림 11 설계된 2·3층의 도면

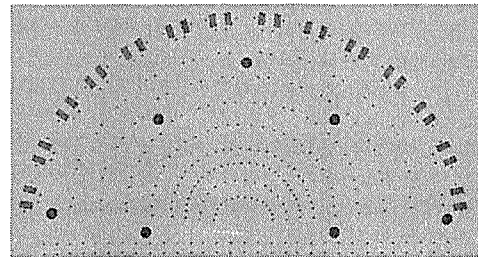


그림 12 설계된 4층의 도면

SMA 커넥터를 연결할 때 선로 폭이 증가하기 때문에 임피던스 불연속이 생기게 된다. 따라서 커넥터 연결부위의 2층과 3층에 접지면을 제거하여 1층과 4층으로 구성된 2층 기판의 효과를 보이게 하여 임피던스 불연속을 최소화 시키려 하였다. 이때 50Ω 선로의 폭은 1.58mm이다. 비아 펜스의 간격은 인접선로간의 간격이 좁으면 촘촘하게, 간격이 넓으면 여유 있게 배치하여 5mm에서 10mm로 유동적으로 하였다. 비아로 인해 발생하는 최소 공진주파수는 식(1)에 의해 약 8.2GHz로 관심주파수 3GHz에서 많이 벗어나 있다.

제작된 보드의 크기는 IPEX와 JAE 각각 7.8 × 14.3mm, 7.8 × 15.1mm이며, 그림 13과 그림 14 같이 SMA 커넥터를 모서리에 실장하기 위해 기판을 17각형으로 잘라내었다.

제작된 보드의 특성을 측정하기 위하여 Agilent社의 네트워크 분석기 N5230A를 이용하여 측정하였다. 그림 16은 개방 실험(open test)을 통해서 얻

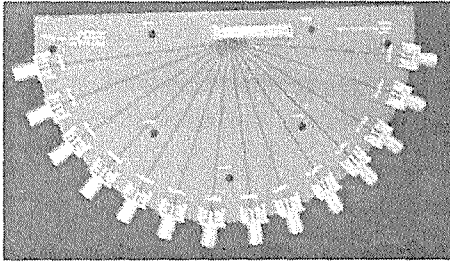


그림 13 IPEX 커넥터용 14채널 보드

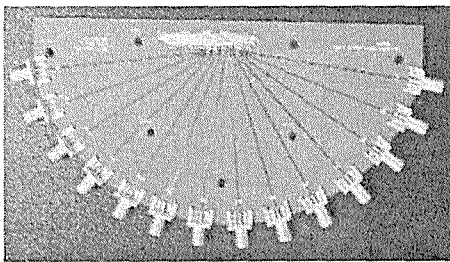


그림 14 JAE 커넥터용 14채널 보드

은 보드의 주파수 특성 결과이다. 측정된 결과는 하나의 기준 채널에 소스를 연결한 후에 인접채널의 near-end 단자로 유기되는 전압비를 측정하는 것이다. IPEX 커넥터의 핀 간격이 JAE 커넥터 보다 좁기 때문에 전력누화는 그림 15에서와 같이 더 커지게 된다. 하지만 -40dB는 출력 전력이 입력 전력의 $1/10^4$ 을 의미하므로 IPEX 커넥터용 보드의 주파수 특성이 우수하다고 할 수 있다. 또한 관심 주파수 범위(3GHz 까지)에서 비아 펜스로 인한 공진이 발생되지 않는다.

그림 16은 보드의 특성임피던스를 시간 축으로 나타낸 것이다. 여기서 특성임피던스를 얻기 위해 사용한 방법은 TDR(Time Domain Reflectometry)이다. 이 방법을 이용하여 전송선로의 물리적 결함과 결함시 결함을 분석할 수 있다[10]. 여기서 구한 TDR 결과는 네트워크 분석기를 이용하여 얻은 20GHz까지의 주파수 특성을 역푸리에 변환(FFT)을 통해 얻을 수 있다. 본 논문에서는 회로 시뮬레이터인 Agilent社의 ADS를 사용하여 결과 값을 얻었다. 측정결과 1.1nsec 지점에서 SMA 커넥터의 연결로 인하여 약 40Ω 정도로 임피던스가 내려가 있다. 이것은 식(2)에 의해 선로의 커패시턴스 값이 커졌음을 알 수 있다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

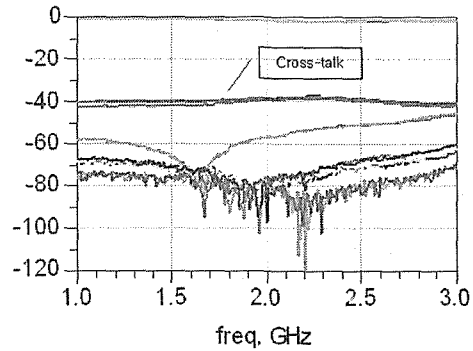


그림 15 측정된 보드의 주파수 특성

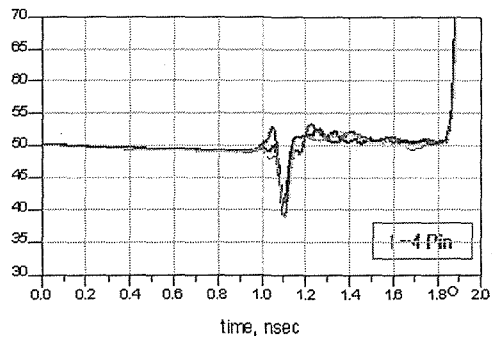


그림 16 측정된 보드의 특성임피던스(TDR)

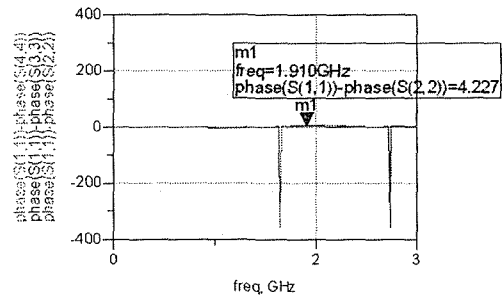


그림 17 측정된 보드의 위상지연

만약 모서리 실장 방식이 아닌 표면 실장일 경우 25Ω 정도까지 임피던스가 낮아질 수 있다. 또한 보드의 선로 임피던스는 IPEX와 JAE보드가 각각 53Ω과 51Ω을 유지 하며 전체적으로 양호한 임피던스 특성을 갖고 있다.

측정된 보드의 위상지연은 그림 17에 나타내었다. 인접된 두 채널의 위상변위의 최댓값이 IPEX에서 4.23°로 양호한 특성을 갖고며 신호의 전송주파수인 100MHz에서는 거의 위상차가 나타나지 않는다. 앞에서 살펴본 제작된 보드의 특성을 표 1에 나타내었다.

표 1 보드의 특성

	IPEX	JAE
Crosstalk	약 40 dB	약 50 dB
특성임피던스	약 53 Ω	약 51 Ω
반사손실(Max)	20 dB	18 dB
삽입손실(Max) @ 3 GHz	1.40 dB	1.48 dB
SMA 커넥터 연결부 임피던스	약 40 dB	약 40 dB

표 1에서와 같이 제작된 보드는 목표로 했던 3 GHz까지 양호한 특성을 유지 하고 있고, 앞으로 측정할 케이블을 특성에 커다란 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다. 이러한 특성을 측정대상의 정확도를 평가하는 기준이 된다. 예를 들어 보드의 전력누화가 40 dB라면, 측정대상(DUT)의 최대 측정 범위는 40 dB가 된다.

5. 다중 채널 케이블 측정 결과

제작된 두개의 보드와 다중 채널 케이블을 그림 18과 같이 연결한 후에 서로 연결된 채널의 특성을 측정하였다. 측정된 케이블의 주파수 특성은

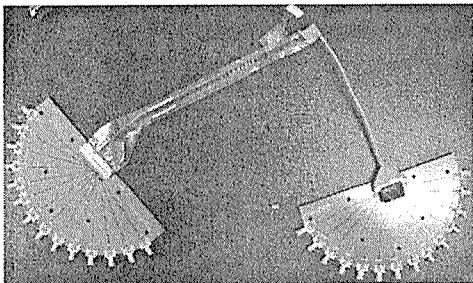


그림 18 보드와 케이블의 연결 사진

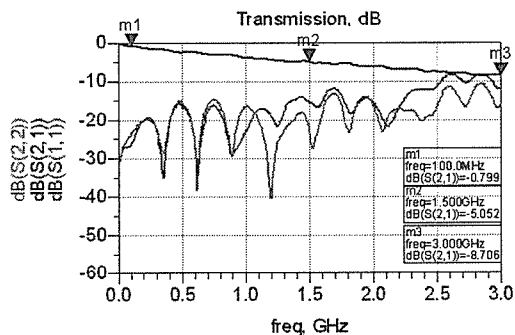


그림 19 측정된 케이블의 주파수 특성

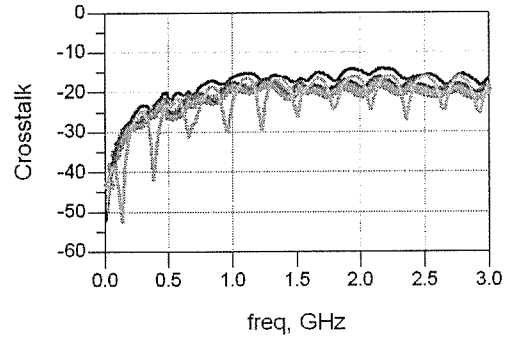


그림 20 측정된 케이블의 전력 누화

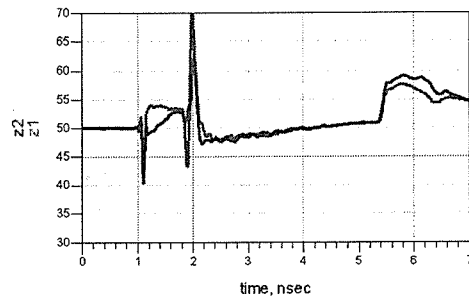


그림 21 측정된 케이블의 특성 임피던스(TDR)

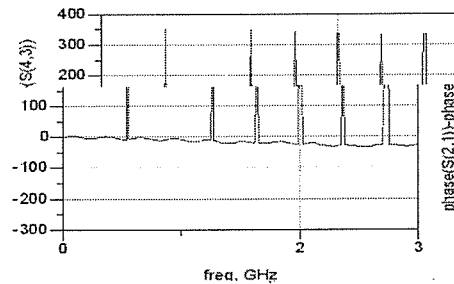
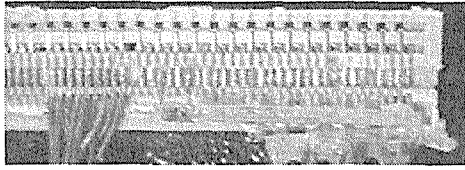


그림 22 측정된 케이블의 위상지연

그림 19에 나타내었다. 다중 채널 케이블에 사용된 동축 케이블의 직경이 0.35 mm로 매우 작기 때문에 주파수가 높아질수록 삽입손실(Loss)이 점점 커진다. 하지만 데이터 전송 주파수인 100 MHz에서는 손실이 0.8 dB 정도로 양호하며, 반사손실(Return Loss)도 -20 dB 이하로 양호하다. 그림 20에서 측정된 전력누화는 100MHz에서 약 30 dB 정도로 측정되었는데 이는 전력으로 환산하면 약 1/100의 전력이 인접 채널로 넘어간다고 할 수 있다. 따라서 케이블의 전력누화 특성도 양호하다.

하지만 그림 21의 특성 임피던스는 신호선과 접지면 사이의 관계를 나타낸 것이다. 측정된 케이블의 특성 임피던스를 살펴보면 2nsec 부분이 커넥터와 동축 케이블의 결합 부분인데 그림 23에 나



(a) IPEX 커넥터



(b) JAE 커넥터

그림 23 커넥터와 동축 케이블 결합부분

타난 것과 같이 신호선과 접지면이 멀리 떨어져 있어 인덕턴스 성분이 커지게 되어 임피던스가 증가하여 IPEX와 JAE의 연결부분에서 임피던스가 각각 70Ω, 62Ω을 갖는다. 또한 동축 케이블의 특성 임피던스는 50±3Ω을 만족한다. 따라서 동축 케이블과 커넥터의 결합부분을 더 정밀하게 제작한다면 더 우수한 특성을 갖는 다중 채널 동축 케이블을 얻을 수 있을 것이다.

측정된 케이블의 위상지연은 100 MHz에서 약 5°, 3GHz에서 약 25°의 특성을 갖는다. 이것은 보드의 위상지연을 제외한 값으로 순수한 다중 채널 케이블의 위상지연 값이다. 전체적인 케이블의 특성은 데이터 전송 주파수인 100 MHz에서는 양호한 특성을 갖고 있으나, 주파수가 증가할수록 특성은 저하된다.

6. 결론

본 논문에서는 다중 채널 동축 케이블의 초고주파 특성을 측정하기 위하여 네트워크 분석기 등 초고주파 계측기에 연결할 수 있는 초고주파 보드를 설계·제작하였다. 설계된 보드는 전력누화, 위상지연, 임피던스 정합 등을 고려하여 설계되었으며, 검증결과 초고주파 특성이 우수하였다.

제작된 보드를 이용하여 최대 전력누화 40 dB, 반사손실 18 dB, 3 GHz에서의 전송손실 1.48 dB의 정확성을 갖고 다중 채널 케이블을 측정할 수 있다. 측정 결과는 데이터 전송 주파수인 100 MHz에서 케이블의 특성은 우수하나, 고주파로 갈수록 동축 케이블의 물리적인 한계로 인해 특성이 저하되었다. 이렇게 측정된 데이터는 제품을 생산하는 업체에서 생산된 제품을 샘플링 하여 제품의 양품 판별 및 품질 향상의 기초자료로 활용될 수 있다. 또한 제품의 개선 부분을 판단할 수 있어, 향후 제품의 불량률 감소 및 신뢰도 향상에 기여할 것이라고 사료된다.

감사의 글

본 결과물은 교육인적자원부·산업자원부·노동부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다. 또한 연구 관련 장비 및 시설을 지원해주신 (주)태양3C에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] D. A. Hill, K. H. Cavcey, R. T. Johnk, "Crosstalk between microstrip transmission lines", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* vol.36, pp. 314-321, Nov. 1994.
- [2] C. R. Paul, "Frequency response of multi-conductor transmission lines illuminated by an electromagnetic field", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-18, pp. 183-190, Nov. 1976.
- [3] Y. Kami, R. Sato, "Circuit-concept approach to externally excited transmission lines", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* vol. EMC-27, pp. 177-183, Nov. 1985.
- [4] Y. Kami, R. Sato, "Crosstalk of finite-length transmission lines in arbitrary directions on the same ground", *Proc. 1992 IEEE Int'l. Symp. Electromagn. Compat.*, pp. 247-250, Aug. 1992.
- [5] 정기범, "EMC를 고려한 일반적인 PCB 설계 지침", *한국전자과학기술*, 17(1), pp. 79-91, 2006년 1월.
- [6] David M. Pozar, *Microwave Engineering Third Edition*, John Wiley & Sons Inc, 2005.
- [7] 김종호, 박상욱, 주계철, 박동철, "PCB 전송선에서 비아 펜스의 효과 분석", *한국전자과학기술논문지*, 16(4), pp. 402-409, 2005년 4월.
- [8] 김종호, 한재권, 박동철, "구부러진 전송선에 비아 홀 펜스에 의한 누화 감소 해석", *한국전자과학기술논문지*, 16(10), pp. 1036-1042, 2005년 10월.
- [9] 한재권, 박동철, "4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로의 누화 해석" *한국전자과학기술논문지*, 17(6), pp. 529-537, 2006년 6월.
- [10] Woopoung Kim, Swarninathan. M, Li, Y. L, "Extraction of the frequency-dependent characteristic impedance of transmission lines using TDR measurements", *Electronics Packaging Technology Conference 2000*, pp. 191-197, Dec 2000.