

마이크로스트립 선로상 가우시안 펄스신호의 전파특성 해석 및 측정

正會員 이 승 엽*, 신 호 섭**, 김 남**, 권 원 현***

Propagation Characteristic Analysis and Measurement of Gaussian Pulse Signals on the Microstrip Line

Seoung-Yeop Rhee*, Ho-Sub Shin**, Nam Kim**, Weon-Hyun Kwan*** *Regular Members*

요 약

마이크로스트립 선로상의 가우시안 펄스신호의 전파특성을 해석하기 위해 펄스가 갖는 주파수 범위, 정확도 및 마이크로스트립 선로의 기하구조등을 고려한 Kirschning와 Jansen의 근사식을 이용하였다. 마이크로스트립 선로의 비유전율 ϵ , 기판두께 h 그리고 스트립폭 w 등이 펄스 신호의 분산에 미치는 영향을 분석하였다. 이론적으로 얻어진 결과를 확인하기 위해 50Ω 마이크로스트립 선로를 제작하였으며, 시간영역 분석기능을 갖는 VNA(Vector Network Analyzer)를 이용하여 펄스의 전송특성에 대한 측정값과 이론값이 잘 일치됨을 확인하였다.

ABSTRACT

The propagation properties of Gaussian pulse signals on the microstrip line are investigated by the Kirschning & Jansen's approximated equation to meet the frequency range of a pulse, accuracy, and geometrical requirements of the microstrip line. The dispersion of pulse signals is analyzed regarding to the relative permittivity ϵ , substrate height h and strip width w of the microstrip line.

To verify theoretical results, several samples of 50Ω microstrip lines are fabricated. And the characteristics of pulse propagation along these lines are simply measured using VNA(Vector Network Analyzer) with time-domain analysis function. A fairly good agreement has been found between the measured pulse waveforms and computer simulations.

I. 서 론

마이크로스트립 선로는 일반적인 M(M)IC뿐 만 아니라 최근에는 클럭 주파수가 증가하고 회로의 집

적도가 높아짐에 따라 고속 컴퓨터와 같은 고속 고집적회로등에도 사용되고 있다. MMIC를 설계하기 위해서는 마이크로스트립 선로상에 진행되는 펄스 신호의 전파 특성을 주파수 영역은 물론 시간 영역에서도 정확하게 알아야 한다. 왜냐하면 마이크로스트립 선로의 주파수 영역에서 얻을 수 없는 정보를 시간 영역에서 얻을 수 있을 있기 때문이다. 특히, 매우 빠른 스위칭 속도에서 동작되는 회로나 MMIC와 같은 고

* 여수대학교 전자통신공학과
** 충북대학교 정보통신공학과
*** 안양대학교 정보통신공학과
論文番號 : 97301-0828
接受日字 : 1997年 8月 28日

집적회로에서의 회로의 대부분을 차지하는 마이크로 스트립 선로의 위상속도에 의한 분산은 펄스 신호의 전파특성을 해석하는 데 매우 중요한 파라미터가 된다. 이에 따라 선로상의 펄스 전송에 대한 정확한 해석은 매우 중요한 연구 과제가 되고 있다.[1][2]

일반적으로 펄스는 여러 삼각함수의 무한 합으로 이루어져 있다. 마이크로스트립 선로에서 위상속도는 주파수 함수이기 때문에 펄스를 이루는 각 주파수 성분의 신호들에 대해서 그 대응 되는 속도가 다르다. 그러므로 선로 종단에서의 신호 모양은 원래 인가된 펄스의 모양이 아니라 크기나 위상이 왜곡된 신호가 도달하게 된다.

지금까지 마이크로 스트립 선로에서 주파수 분산에 의한 펄스 신호의 왜곡 특성에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다. Veghte와 Balanis^[3]는 여러 펄스 형태에 대한 전파특성을 연구하였으며, Leung와 Balanis^[4]는 손실이 있는 경우의 펄스전파 특성을 연구하였다. 그리고 Gilb와 Balanis는 Full-wave방법을 이용하여 유효유전율을 구해 마이크로스트립 선로의 분산 특성을 구하였고^[5] 1991년에는 일반적인 선로에 대해 신호의 전송특성을 구하였다.^[6] 그러나 실제 이들 연구들은 대부분 이론적인 해석에 그쳤고 최근에는 Qian와 Yamashita^[7]는 두개의 비대칭 결합 선로에 대한 분산 특성 및 누화 특성을 구해 이를 실험적으로 확인하였다. 이와 같이 펄스 전송특성에 대한 실험 결과 분석은 매우 미흡하다. 이는 펄스 측정을 하기 위해서는 시간 영역에서 수 피코초의 매우 짧은 펄스가 필요하고 이를 측정하기 위해서는 매우 복잡한 실험 장치가 필요하기 때문이다. 펄스 측정을 하기 위한 방법은 일반적으로 실시간에서 측정이 가능한 오실로스코프를 사용하고 있으나 측정가능한 펄스 밴드 폭이 수 GHz이고 그 이상의 주파수 대역을 측정하기 위해서는 특수한 목적으로 사용되기 때문에 제약이 많다. 파형기록기(waveform recorder: 디지털 오실로스코프라고도 함.)는 CRT(cathode ray tube) 대신에 A/D변환기를 이용하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 저장 및 처리를 하는 계측기로 앞서의 오실로스코프보다 한단계 발전된 계측기이다. 그러나 이것은 A/D 변환 성능에 크게 좌우되며, 매우 고가이다. 이들은 측정범위가 한정되어 있으며, 펄스 측정을 위해서

는 동기 및 신호합성기(펄스 신호 인가용)등의 부가적인 계측기가 필요하다.^{[1][7][8]}

본 논문에서는 VNA(Vector Network Analyzer)의 시간 영역프로그램을 이용하여 펄스 신호 왜곡 특성을 측정하였으며 이 방법은 기존의 TDR(Time Domain Reflectometer)방법과 유사한 방법이다. 기존의 TDR은 전송선로의 불연속이나 잘못된 지점을 찾아내는 데 사용되어 왔다. 아주 짧은 펄스를 선로에 인가 시키면 이 신호가 불연속지점등에 의해 임의의 크기를 갖는 반사되는 신호를 되돌려 준다 이때 되돌아 오는 신호의 크기 및 시간적 데이터를 분석하여 선로의 상태를 분석하는 것이 TDR이다.

VNA의 TDR기능이 일반적인 TDR과 다른 것은 되돌아오는 신호의 크기 뿐 만 아니라 불연속 정도를 주파수 영역에서 측정된 데이터를 이용한다는 것이다. VNA는 이러한 주파수 영역에서 얻어진 데이터를 역FFT 기능을 이용하여 시간영역에서 필요한 데이터를 얻을 수 있는 기능을 갖고 있다.

본 논문에서는 마이크로스트립 선로의 non-TEM(TE, TM)모드 특성을 고려하여 구해진 마이크로스트립 선로의 closed-form형식의 주파수 의존 유효유전율 상수 수식중 가장 정확한 Kirschning와 Jansen^[9]이 이 발표한 수식을 이용하여 마이크로스트립 선로 상에서 Gaussian펄스신호가 진행할 때 스트립 폭, 기판높이 및 비유전율에 따른 신호펄스의 전송 특성을 분석하였다. 그리고 VNA가 갖고 있는 TDR 기능을 이용하여 수 ps의 펄스 측정시스템의 복잡성을 단순화하였다. 마이크로스트립 선로상에서 펄스의 전파 특성을 실험적으로 확인하기 위하여, 마이크로스트립 선로들을 제작하고 VNA를 이용하여 측정후, 이론적으로 구한 전파 특성과 비교 분석하였다.

II. 마이크로스트립 선로에서 펄스 신호의 분산

일반적으로 펄스 신호 파형은 푸리에 급수로 나타내면 높은 주파수로 증가함에 따라 진폭은 감소하는 무한개의 정현파로 이루어져 있다. 마이크로스트립 선로상에서 위상속도는 주파수에 의존하기 때문에 펄스파형의 다른 주파수 성분들은 다른 위상속도로 전파하게 되며, 결국 마이크로스트립 선로의 종단점에

서 펄스파형의 왜곡을 야기시킨다. 기하학적 구조상으로 볼 때 전자계가 도파로, 동축선로, 스트립선로에 서는 하나의 매질에 한정되는 반면, 마이크로스트립 선로는 필드가 부분적으로는 공기중에 있고, 부분적으로 유전체에 존재하도록 되어 있다. 이러한 선로 구조에서 공기와 유전체의 경계면에서는 순수한 TEM 모드외에 고차모드가 발생하게 된다. 그러므로 위상상수는 주파수의 선형함수가 아니며 선로의 분산 특성으로 인해 파형의 분산을 야기시킨다.

낮은 주파수에서 파의 전파는 TEM으로 근사화되고 분산은 실제적으로 거의 무시할 수 있다. 그러나 높은 주파수 성분을 갖는 펄스파형은 펄스의 고차 고조파 성분이 저차 고조파 성분보다 더 느린 속도로 진행하기 때문에 분산 특성이 나타나게 된다.

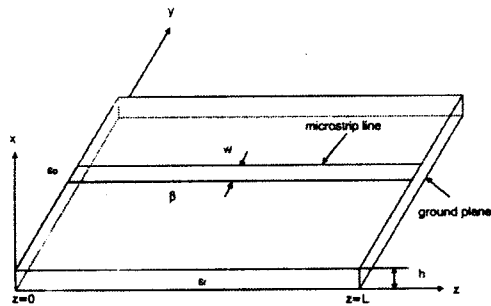


그림 1. 펄스 전파 해석을 위한 50Ω 마이크로스트립 선로 구조
Fig.1. Geometry of 50Ω microstrip line for analysis of pulse propagation

그림 1에서 마이크로스트립 선로의 기준점 z=0에서 전압 혹은 전계는 다음과 같이 표현된다.

$$v(t, z=0) = \begin{cases} v(t), & -T/2 \leq t \leq T/2 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1)$$

$$V(f, z=0) = \int_{-T/2}^{T/2} v(t, z=0) e^{j2\pi ft} dt \quad (2)$$

여기서, $v(t)$ 와 $V(f)$ 는 Fourier 변환쌍을 이룬다. 구형 펄스와 같은 어떤 과도신호에 대해서는 구간 $-T/2 \leq t \leq T/2$ 에서 펄스폭을 정의하고 신호는 짧은 시간

간격내로 제한한다. 가우시안 펄스의 경우에 그 응답을 완전히 특성짓기 위해서는 $-\infty < t < \infty$ 의 시간 간격이 요구된다.

거리 L에서 주파수 영역의 펄스신호는 식(3)과 같이 되며, 주파수에 의존하는 전파상수는 식(4)와 같다.

$$V(f, z=L) = V(f, z=0) e^{-\gamma(f)L} \quad (3)$$

$$\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f) \quad (4)$$

여기서 $\alpha(f)$ 와 $\beta(f)$ 는 각각 감쇄상수와 위상상수이다. 본 논문에서 주파수에 의존하는 감쇄상수 $\alpha(f)$ 는 무시된다고 가정하면, 식(3)은 식(5)로 다시 표현된다.

$$V(f, z=L) = V(f, z=0) e^{-j\beta(f)L} \quad (5)$$

식(5)에 Fourier 역변환을 취하면 z=L에서 펄스의 시간영역 응답을 알 수 있으며 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} v(t, L) &= \int_{-\infty}^{\infty} V(f, z=L) e^{+j2\pi ft} df \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} V(f, z=0) e^{+j(2\pi ft - \beta(f)L)} df \end{aligned} \quad (6)$$

손실이 없는 선로에 대해 위상상수 $\beta(f)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\beta(f) = 2\pi f \sqrt{\mu\epsilon(f)} = \frac{2\pi f}{C} \sqrt{\epsilon_{eff}(f)} \quad (7)$$

$v(t,0)$ 이 가우시안 펄스인 경우 시간영역에서의 식 및 Fourier 변환은 식(9)으로 주어진다.

$$v(t,0) = A \exp(-a^2 t^2) \quad (8)$$

$$v(f,0) = \frac{A\sqrt{\pi}}{a} \exp(-(2\pi f)^2/4a^2) \quad (9)$$

여기서 $2/a$ 는 3-dB 펄스폭이고 A는 시간영역에서 펄스의 진폭이다.

식 (6)의 주파수 의존 위상상수 $\beta(f)$ 를 구하는 방법¹⁰⁾은 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 계산결과

정확성 및 계산시간을 고려하여 closed-form 근사적인 Kirschning와 Jansen이 제안한 식을 이용하였다. 식 (6)을 적분하는 방법은 크게 3가지로 분류할 수 있다.¹¹⁾ 첫째는 가장 직접적인 방법인 수치적분법이고, 둘째는 적분식의 전체 적분구간에 대해 근사화하는 테일러 급수 전개(Taylor series expansion) 방법이다. 이 방법은 수치적분법에 비해 계산시간이 덜 걸리는 장점은 있지만 정확도면에서는 떨어진다. 셋째는 식 (6)의 적분구간에 대해 어떤 정지위상점을 갖는 f_c 를 찾아 수식을 재배열함으로써 적분을 수행하는 정지위상법(The method of stationary phase)이다. 이는 펄스가 선로를 따라 진행해 갈 때 거리 L에 대한 정지위상점은 어떤 시간차에 대해서만 알 수 있으며, 시간차는 펄스의 위치와 일치한다. 그러나 시간 간격이 너무 짧아서 대부분의 경우에 전체 펄스를 포함할 수 없으므로 이 방법은 한정된 범위에서만 유효하다. 본 논문에서는 비교적 정확성을 가지며 시뮬레이션하기에 편리한 수치적분법을 이용하였다.

식(6)에서 적분구간은 $-\infty < f < \infty$ 이지만 어떤 주파수 f_c 이상에서 적분값은 무시될 수 있다. 아주 폭이 좁은 펄스는 높은 주파수 성분을 갖으며 더 높은 f_c 를 필요로 하며, 만일 τ 이 펄스폭이라면 그 때,

$$f_c = \xi / \tau \quad (12)$$

이다. 여기서, ξ 는 파형에 따른 상수이며 적분의 수렴도를 고려하여 적절한 ξ 를 선택해야만 한다. 본 논문의 식(6)의 적분은 Gaussian 적분법을 이용하여 수치적분을 하였고, 적분 구간이 매우 넓기 때문에 총 적분 구간을 10여개의 적분 구간으로 나누어 적분을 수행한 후 이를 합하여 넓은 구간의 적분을 수행하였다. 또한 각 구간은 500개의 데이터(weight와 abscissas에 관계된 점)를 사용하여 적분의 정밀도를 높였다. 그리고 본 논문에서는 $\xi = 20$ 을 취하였다.

III. 수치 결과 및 실험 결과 고찰

그림 2는 펄스 왜곡 특성을 측정하기 위한 실험 블록도이다. 제작된 마이크로스트립 선로들을 측정하기 위해 Active Test Set(모델 : 3620A)와 마이크로파

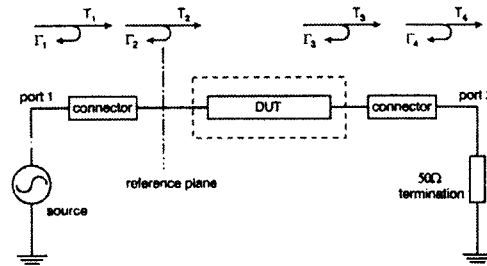


그림 2. 펄스 신호 측정을 위한 실험 블록도
Fig. 2. Block diagram of experimental setup for measuring pulse propagation

신호원(10MHz-20GHz) 이 내장된 Wiltron사의 360A VNA를 사용하였으며, VNA의 시간 영역 측정을 위해서 VNA를 시간 영역에서 LRL(Line, Reflect, Line) 방법으로 사전교정(Calibration)을 하였다. 또한 마이크로스트립 선로를 정확하게 측정하기 위해 선로 측정용으로 Wiltron사에서 제작한 Universal Test Fixture(Model-3680-20)를 이용하였다. VNA의 포트 1의 코넥터와 포트 2의 코넥터를 직접연결하여 S21의 파형을 측정한다. 측정 결과 그림 3과 같으며, 이것은 펄스 폭이 23ps인 가우시안 펄스 파형과 같은 모양임을 알 수 있다. 일반적으로 VNA의 두 개 포트에서 발생하는 반사(Γ_1 과 Γ_4)는 무시되며, DUT(Device Under Test)가 50Ω 선로이면 DUT의 두 포트와 VNA의 코넥터 연결지점인 곳에서의 반사(Γ_2 와 Γ_3)도 무시할 수 있다. 그러므로 포트1과 포트 2를 직접 연결하여 얻은 파형임으로 이 신호는 제작한 마이크로스트립 선로인 DUT에 인가하는 신호가 된다.

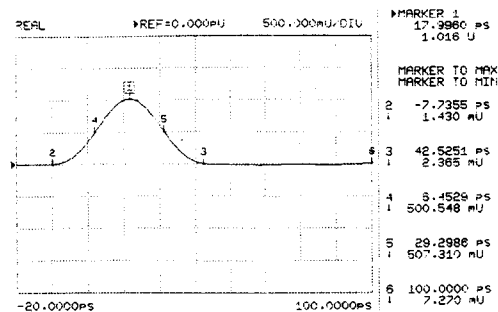
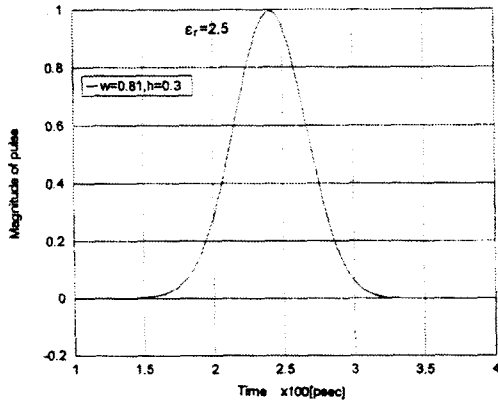


그림 3. 포트 1과 포트 2를 직접 연결했을 경우의 측정 펄스
Fig.3 Measured pulse in case of directly connecting port 1 with port 2

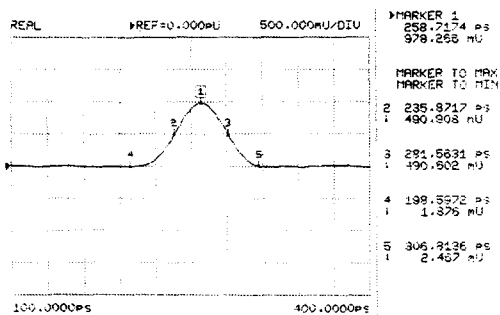
마이크로스트립 선로에서의 가우시안 펄스의 전송 특성을 이론값과 비교하기 위하여, 표1과 같이 여러 가지 기판에 50Ω 선로를 제작하였다.

표 1. 제작된 50Ω 마이크로스트립 선로의 제원
Table 1. Dimensions of fabricated 50Ω microstrip lines

선로번호	유전율	기판높이(mm)	선로(mm)	선로길이(mm)
1	2.5	0.3	0.81	5.
2	2.5	0.5	1.42	5.
3	10.2	0.635	0.635	5.
4	10.2	0.635	0.635	10.

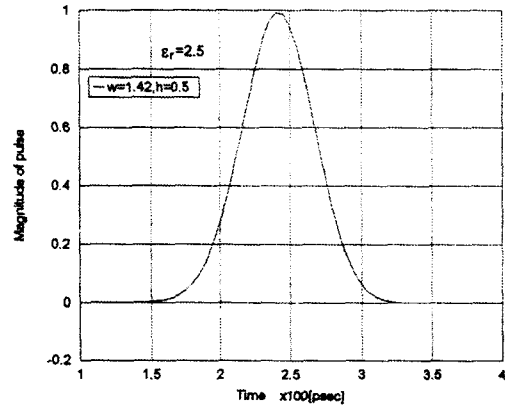


(a) 계산 결과

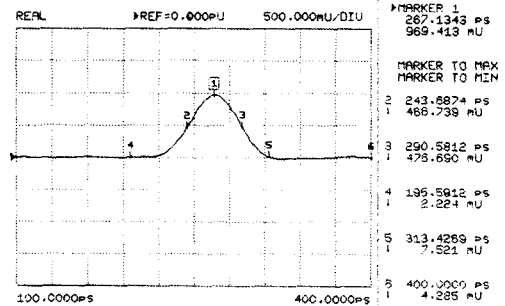


(b) 계산 결과

그림 4. 마이크로스트립 선로 1에 대한 왜곡된 가우시안 펄스의 이론값 및 측정값
Fig. 4. Experimental and theoretical results for distorted Gaussian pulse along the microstrip line No. 1. ($\epsilon_r=2.5$, $h=0.3\text{mm}$, $w=0.81\text{mm}$, $L=5\text{cm}$)



(a) 계산 결과



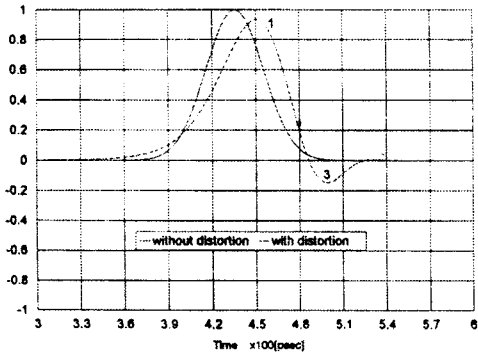
(b) 측정 결과

그림 5. 마이크로스트립 선로 2에 대한 왜곡된 가우시안 펄스의 이론값 및 측정값
Fig. 5. Experimental and theoretical results for distorted Gaussian pulse along the microstrip line No. 2. ($\epsilon_r=2.5$, $h=0.5\text{mm}$, $w=1.42\text{mm}$, $L=5\text{cm}$)

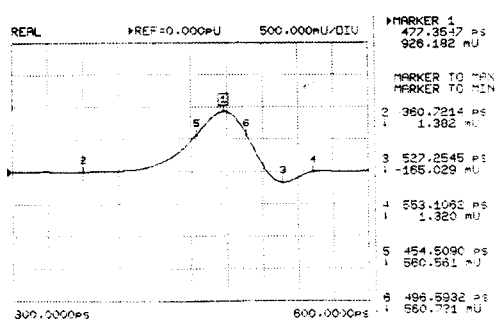
그림 4와 5는 표 1에서 제작한 마이크로스트립 선로의 기판 1과 2의 50Ω 선로에 대한 이론적 결과와 실험적 결과를 나타낸 것이다. 분산에 의해 원래의 가우시안 폭에서 선로 1에서는 46ps 선로 2에서는 49ps로 원래의 신호에 비해 약 2배 정도로 신호가 퍼졌음을 알 수 있으며, 폭 변화에 비해 신호의 크기는 크게 일어나지 않음을 알 수 있다.

그림 6과 7은 유전율이 10.2인 기판을 사용한 선로 3과 4에 대한 분산 특성에 의한 신호의 왜곡 특성을 이론값과 측정값을 비교한 그림이다. 그림 6은 5cm인

선로의 길이에 대한 것으로 그림 4와 5의 같은 길이의 유전을 2.5인 선로에 비해 심하게 펄스가 왜곡되어 있음을 쉽게 알 수 있다. 그림에 표시된 중요 측정값은 실험값과 쉽게 구분 및 비교하기 위한 것으로 최대값(점1)은 크게 낮아졌으며, 펄스의 폭 또한 42ps로 넓어졌다. 이 값은 그림 4와 5의 결과에 비해 크게 차이가 나는 값은 아니지만 그림 4와 5에서는 발생하지 않은 음의 값을 갖는 신호 부분까지 포함한다면 신호가 크게 확산되어 왜곡된 모양이다.



(a) 계산 결과

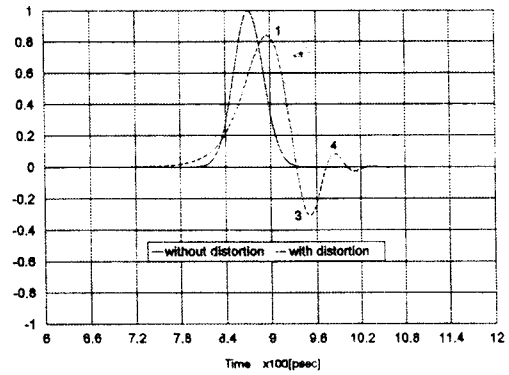


(b) 측정 결과

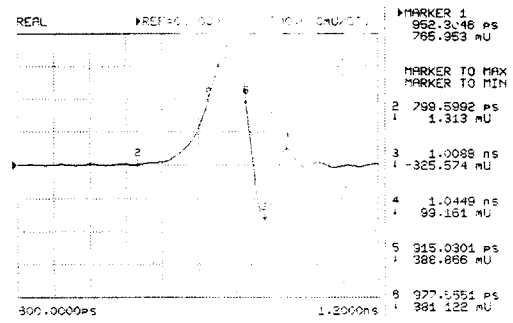
그림 6. 마이크로스트립 선로 3에 대한 왜곡된 가우시안 펄스의 이론값 및 측정값
Fig. 6. Experimental and theoretical results for distorted Gaussian pulse along the microstrip line No. 3. ($\epsilon=10.2$, $h=0.635\text{mm}$, $w=0.635\text{mm}$, $L=5\text{cm}$)

표 2. 그림 6의 마크된 점들의 실험값과 이론값
Table 2. Experimental and theoretical values of marked points in Fig. 6.

Marked point	experimental value		theoretical value		error	
	time[psec]	magnitude	time[psec]	magnitude	time[psec]	magnitude
1	477.4	0.926	450.0	0.934	27.4	-0.008
3	527.3	-0.165	500.2	-0.146	27.1	-0.019



(a) 계산 결과



(b) 측정 결과

그림 7. 마이크로스트립 선로 4에 대한 왜곡된 가우시안 펄스의 이론값 및 측정값
Fig. 7. Experimental and theoretical results for distorted Gaussian pulse along the microstrip line No. 4. ($\epsilon=10.2$, $h=0.635\text{mm}$, $w=0.635\text{mm}$, $L=10\text{cm}$)

그림 7은 선로 길이 10cm에 대한 신호의 분산 특성을 측정된 값이다. 실제로 마이크로스트립 선로의 길이가 10cm인 경우는 극히 드물지만 이 실험은 심하게 왜곡된 신호를 분석하고, 길이 변화에 대한 펄스의 왜곡 특성을 이론값과 비교 분석하기 위한 것이다. 그림 7에서 알 수 있듯이 그림 6의 결과에 비해 신호의 최대값(점1)과 음의 최소점(점3)의 차이가 확연하게 나타나며, 특히, 음의 최소점의 크기가 그림 6의 결과보다 커져 있어 원래의 신호를 알 수 없을 정도로 심하게 왜곡되었음을 알 수 있다.

표 3. 그림 7의 마크된 점들의 실험값과 이론값
Table 3. Experimental and theoretical values of marked points in Fig. 7.

Marked point	experimental value		theoretical value		error	
	time[psec]	magnitude	time[psec]	magnitude	time[psec]	magnitude
1	952.3	0.766	897.0	0.838	55.3	-0.072
3	1008.8	-0.326	951.2	-0.307	57.6	-0.019
4	1044.9	-0.099	984.4	-0.071	60.5	-0.028

실험결과 전반적으로 이론값과 측정값이 시간 축으로 평균 41ps정도 이동(time shift)된 것을 관측할 수 있는데 이는 마이크로스트립 선로와 VNA의 코넥터 사이의 SMA코넥터에 의한 것으로 생각할 수 있다.

IV. 결론

단일 마이크로스트립 선로상에서 가우시안 펄스의 전파특성을 이론적으로 해석하고 실험적으로 확인하였다. 마이크로스트립 선로의 펄스 전파 특성은 마이크로스트립 선로의 non-TEM(TE, TM)모드 특성을 고려하여 구해진 마이크로스트립 선로의 closed-form 형식의 주파수 의존 유효유전율 상수 수식중 가장 정확한 Kirschning와 Jansen 수식을 이용하여 구했다. 그리고 이론적으로 구한 펄스의 전파특성을 실험적으로 확인하기 위해 서로 다른 기판을 이용하여 50Ω 마이크로스트립 선로를 제작하고, 각 선로에서의 분산에 의한 신호 왜곡을 VNA의 시간영역 분석기능을 이용하여 측정하였다. 실험 결과, 이론 값과 측정값은 매우 잘 일치 하였다. 그리고 VNA의 사용대역이 넓으

면 더욱 짧은 펄스 신호에 대한 측정도 가능함을 알 수 있었다.

향후, 고속 컴퓨터 및 IC설계에서 펄스 신호의 왜곡에 대한 해석 및 측정 그리고 이에 대한 대책은 매우 중요한 연구 과제가 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. R.Sorrentino, "Modeling and design of millimeter-wave passive circuits : from 2 to 3D," 24th European Microwave Conf. in Cannes, France, pp. 48-61, Sept. 1994.
2. R.A. Lawton, "Pulse and time domain measurements," Proceedings of the IEEE, vol. 74, no. 1, pp. 77-81, Jan. 1986.
3. R. L. Veghte and C. A. Balanis, "Dispersion of transient signals in microstrip transmission lines", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol MTT-34, no. 12, pp. 1427-1436, Dec. 1986.
4. T. Leung and C. A. Balanis, "Attenuation distortion of transient signals in microstrip," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol MTT-36, no. 4, pp. 765-769, Apr. 1988.
5. J. P. K. Gilb and C. A. Balanis, "Transient analysis of distortion and coupling in lossy coupled microstrips", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol MTT-38, no. 12, pp. 1894-1898, Dec. 1990.
6. J. P. K. Gilb and C. A. Balanis, "Asymmetric, multi-conductor low-coupling structures for high-density digital interconnects", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol MTT-39, no. 12, pp. 2100-2106, Dec. 1991.
7. Yongxi Qian and Eikichi Yamashita, "Characterization of picosecond pulse crosstalk between coupled microstrip lines with arbitrary conductor width," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. MTT-41, no. 6/7, pp. 1011-1016, June/July 1993.
8. H. E. Stinehelfer, "Discussion of De-Embedding techniques using time-domain analysis," Proceedings of the IEEE, vol. 74, no. 1, pp. 90-94, Jan. 1986.

9. M. Kirschning and R. H. Jansen, "Accurate model for effective dielectric constant of microstrip with validity up to millimeterwave frequencies," Electron Lett., vol. 18, no. 6, pp. 272-273, Mar. 1982.

10. K. C. Gupta, et al., Microstrip Lines and Slotlines(2nd ed.), Artech House, Boston London, 1996.



이 승 엽 (Rhee Seoung Yeop) 정회원
1986년 2월:연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1988년 2월:연세대학교 전자공학과 본대학원 졸업(공학석사)

1993년 8월:연세대학교 전자공학과 본대학원 졸업(공학석사)

1993년 9월~현재:여수대학교 전자통신공학과(조교수)

* 관심분야:안테나 및 마이크로파소자, 광을 이용한 마이크로파 소자제어등임.

e-mail:ysrsy@yosu.ynfu.ac.kr



신 호 섭 (Ho Sub Shin) 정회원
1969년 4월 3일생
1995년 8월:충북대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)
1998년 2월:충북대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)

*주관심분야:전자파 해석, 전파전파, EMI/EMC



김 남 (Nam Kim) 정회원
1981년 2월:연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1983년 2월:연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1983년 8월:연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1992년 8월~1993년 8월:미 Stanford대학 방문교수

1989년 2월~현재:충북대학교 정보통신공학과 교수

*주관심분야:전자파 해석, 전파전파, EMI/EMC, 광 정보처리



권원현 (Weon Hyun Kwan) 중신회원
1983. 2 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1985. 2 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
1990. 8 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1990. 9~1994. 2 삼성전자 정보통신연구소 선임연구원

1994. 3~현재 안양대학교 정보통신공학과 조교수