

테이퍼형 마이크로 스트립 선로에서 분산과 반사가 펄스의 왜곡에 미치는 영향

김기래 (金紀來)

신라대학교 컴퓨터정보공학부 정보통신공학과

An effects of the Pulse Distortion due to Dispersion and Reflection on Tapered Microstrip Line

Gi Rae Kim

Dept. of Information and Communication Engineering, Silla University, Pusan

E-mail : grkim@silla.ac.kr

Abstracts

In this paper, the distortion of an electrical pulse with rise/fall time resulting from dispersion and reflection as it propagates along a tapered microstrip line is investigated, and the delay time and distortion rate with respect to input and load impedances are analyzed on triangular and exponential tapered lines and analyzed the influence of the reflection and frequency dispersion on the distorted voltage wave in the tapered lines. The observed overshoot in front of the distorted wave is caused due to the frequency dispersion and the sustained tail of that comes from the reflection in the tapered line.

I. 서론

광대역 임피던스 정합을 위해 사용되는 테이퍼 전송 선로의 특성은 대부분 주파수 영역에서 산란계수에 의해 표현되었다. 최근 디지털 시스템의 클럭 주파수가 높아지면서 디지털 신호의 임피던스 정합을 위해 테이퍼 전송 선로가 사용되고 있다. 이런 디지털 신호의 왜곡을 분석하기 위해서는 시간영역의 해석이 필요하다. 테이퍼 전송 선로에서 펄스가 진행하면서 주파수의 비선형 특성에 따른 분산 특성과 임피던스의 부정합에 때문에 발생하는 반사에 의해 왜곡이 나타난다. 펄스의 왜곡 특성을 분석하기 위해서는 시간 영역의 해석이 필요하다. Kobayashi^[1]는 지수형과 체비셰프형 테이퍼 선로에 대한 수학적 결과를 나타내었고, 테이퍼형 마이크로 스트립 선로의 효율적인 설계 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 지수분포형(exponential), 삼각분포형(triangular) 및 체비셰프(Tcheby-cheff) 임피던스 분포

를 갖는 테이퍼 전송선로에서 디지털 펄스가 전송될 때 시간영역에서 분산과 반사에 의해 나타나는 신호의 왜곡 특성을 나타내고, 파형의 왜곡 원인에 따른 파형의 특성을 분석하였다. 테이퍼 전송선로에서 왜곡의 원인은 분산과 반사인데, 분산과 반사가 출력 펄스 파형의 왜곡에 미치는 영향을 분석하였다. 이런 분석 결과를 바탕으로 MMIC 등에 대해 시간영역에서 디지털 펄스의 왜곡 파형을 측정하여 왜곡의 주요 원인을 판단할 수 있을 것이다.

II. 전송 특성 해석

선로의 길이가 L 인 균일 전송선로에서 x=L인 부하 점에서의 신호는 식(1)과 같이 표현된다.

$$V(w, x=L) = V(w, x=0) e^{-i\beta(w)L} \quad (1)$$

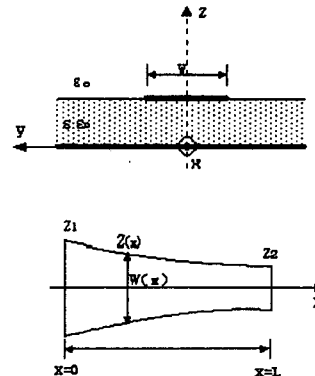


그림 1. 테이퍼 마이크로 스트립 선로
(a) 단면구조 (b) x축 평면 구조

ρ 는 전압과 전류의 반사계수이며 다음과 같다^[2].

$$\rho = \int_0^{\tau_L} e^{jw\tau} \frac{1}{2} \frac{d \ln(Z_2/Z_1)}{d\tau} d\tau \quad (2)$$

식(2)에서 θ_L 은 선로에서 펄스의 왕복시간 τ_L 에 대한 전기적 길이를 나타내며, β 는 위상속도 $v(x, w)$ 로 나타내어진다.

$$\theta_L = w \tau_L \quad (3)$$

$$\tau_L = \int_0^L \frac{2}{v(x, w)} dx \quad (4)$$

$$\beta(w, x) = \frac{w}{c} \sqrt{\epsilon_{eff}(w, x)} \quad (5)$$

식(5)에서 c 는 공기 중에서 빛의 속도이고 주파수의 함수인 실효 유전 상수, $\epsilon_{eff}(w)$ 는 주파수에 따라 비선형 특성을 가진다. 본 논문에서는 정확도가 우수한 Kirschning-Jansen^[3]의 Closed-form 모델 식을 사용하였고 이들에 대한 특성을 그림 3에 나타내었다. 전송선로에서 주파수 영역에서 부하점 ($x=L$)에 나타나는 펄스 신호는 $x=0$ 점에서 입력된 펄스 신호가 전송 계수에 영향을 받아 다음과 같이 표현된다.

$$V(w, x=L) = T_V(w, x=L) V(w, x=0^-) \quad (6)$$

여기서 $I(w, x=0^-) = V(w, x=0^-)/Z_1$ 의 관계이며, $I(w, x=0^-)$ 와 $V(w, x=0^-)$ 는 $i(w, x=0^-)$ 와 $v(w, x=0^-)$ 각각의 푸리에 변환에 의한 주파수영역의 전류와 전압을 나타낸다. 시간영역에서 부하점 ($x=L$)의 전압은 역푸리에 변환을 통해 얻을 수 있다.

$$v(t, x=L) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V(w, x=0^-) |T(w)| e^{j(wt - \theta_L/2 - \theta_T)} dw \quad (7)$$

여기서 $|T(w)|$ 와 θ_T 는 전송선로에서 전압 전달 계수의 진폭과 위상각을 나타내며, 테이퍼형 비균일 전송선로에서 $T(w)$ 는 일반적으로 식(12)와 같이 표현된다^[4].

$$T(w) = \sqrt{1 - \frac{1}{4} \left[\ln \left(\frac{Z_L}{Z_0} \right) F(\theta(w)) \right]^2} e^{-j\theta(w)} \quad (8)$$

$F(\theta(w))$ 는 선로의 임피던스 분포 형태에 따라 결정된다^[5]. 테이퍼 선로의 부하점에서 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$V(t, L) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V(w, x=0) |T(w)| e^{j(wt - \alpha(w))} df \quad (9)$$

위 식에서 실수부만 관계되므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(t, L) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V(w, x=0) |T(w)| \times \cos(wt - \theta(w)) df \quad (10)$$

위 적분식을 계산함으로써 비균일 테이퍼 선로에서 부하의 시간 응답특성을 구할 수 있다. 테이퍼 선로에서 부정합에 의해 일부의 신호는 부하에서 반사되어 되돌아오게 되는 데 반사된 펄스의 진폭은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$V(t, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V(w, z=0) |R(w)| e^{j(wt - \alpha(w))} dw \quad (11)$$

$$R(w) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{Z_L}{Z_0} \right) F(\theta(w)) e^{-j\alpha(w)} \quad (12)$$

III. 결과 및 검토

그림 1과 같은 테이퍼 선로에서 선로의 임피던스가 지수형(exponential), 삼각형(triangular) 및 체비셰프(Tchebysheff) 임피던스 분포를 갖는 테이퍼 전송선로에서 그림 2와 같은 quadratic-linear-quadratic 특성을 갖는 비이상 구형 펄스를 입력했을 때의 왜곡 특성을 해석하여 나타내었다. 그림 3에는 주파수에 따른 실효 유전율의 closed-form 분산모델식의 대표적인 4가지 식^[4]에 대해 결과를 비교하여 나타내었다. 그림 4에는 $h=0.635 \text{ mm}$, $\epsilon_r=10.5$, $L=25.4 \text{ mm}$ 인 지수형과 삼각형 테이퍼선로에서 각각 Z_L/Z_0 의 비를 변화시키면서 분산 특성을 나타내었고, 그 전송특성을 <표 1>에 비교하여 나타내었다. <표 1>에서 지연시간(delay time)에 대한 괄호 안의 데이터는 Time Domain Reflector (TDR) 장비에 의해 측정된 결과를 이론치와 비교하기 위하여 나타냈다.

<표 1> 테이퍼선로의 전송 특성 비교

		$Z_L/Z_0=1$	$Z_L/Z_0=2$	$Z_L/Z_0=3$
Exponential Tapered Line	Delay time	135 (132)ps	139 (141)ps	149 (152)ps
	Distortion rate	13.2 %	20.4 %	24.0 %
Triangular Tapered Line	Delay time	135 (131)ps	137 (140)ps	140 (145)ps
	Distortion rate	13.6 %	22.9 %	31.2 %
Tchebysheff Tapered Line	Delay time	135 (131)ps	140 (142)ps	150 (152)ps
	Distortion rate	13.1 %	19.9 %	13.5 %

해석 및 측정 결과에 의하면 삼각형 분포의 테이퍼 선로보다 지수형 테이퍼 선로의 경우가 펄스 지연이 더 크게 나타났고, 왜곡은 반대로 삼각형 테이퍼 선로가 크게 나타났다. Z_L/Z_0 의 비가 1일 때는 왜곡률이 13.0% 정도로 적게 일어났으나 Z_L/Z_0 의 비 커질수록 왜곡 현상이 심해진다. 그림 5에는 식(11)의 적분식에 대해 반사되는 신호의 크기를 비교하여 나타내었다. 임피던스를 $Z_0=50\Omega$, $Z_L=100\Omega$ 로 하였고 반사된 신호의 크기는 삼각 분포형에서 반사 신호의 레벨이 다른 것에 비해 크게 나타났고, 지수형 테이퍼가 상대적으로 적게 나타났다. 그림 6에는 지수형 테이퍼 선로에서 일어나는 분산과 반사가 펄스 신호의 왜곡에 미치는 영향을 분석하기 위해 다음 조건으로 해석하였다. 선로의 구조는 $\epsilon=8.0$, $h=0.5\text{mm}$, $L=50\text{mm}$, $Z_1=63.58\Omega$, $Z_2=117.99\Omega$ 이며, $x=0$ 에서 비이상형 구형펄스 ($2\tau_1=200\mu\text{s}$, $\tau_1=20\mu\text{s}$, $q=0.12$) 입력하고 무반사 (No Reflection; NR) 조건의 경우와 무분산(No Dispersion; ND) 조건에 대해 서로 부하 점에서 나타나는 펄스의 왜곡 특성을 분석하여 분산과 반사가 파형의 왜곡 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 무분산(ND) 조건은 식(11)에서 $\epsilon_{\text{eff}}(x, w)$ 의 비선형 특성을 무시하는 조건이므로 $\omega=0$ 인 $\epsilon_{\text{eff}}(x, 0)$ 값으로 대체하여 계산한다. 그리고 식(11)에서 무반사(NR) 조건은 $T(w, x=0) = 1$ 인 경우이다. 해석결과에서 기호 ND-NR은 무반사와 무분산의 조건인 경우로서 이 때는 출력 파형의 왜곡이 발생하지 않고 입력펄스가 $\tau_L/2$ 만큼 지연되어 나타나게 된다. 그림 6에 나타낸 ND-NR은 상단부에 작은 리플을 보이고 있는데 이것은 이론 결과와 식(11)의 적분 결과의 차이를 나타낸다. 그림 6(a)에는 분산 특성이 파형 왜곡에 미치는 영향을 분석하기 위해 해석에 있어서 NR-D의 조건에 대해 해석하여 이 결과를 NR-ND 조건과 비교하여 나타냈다. 그림 6(b)에는 반사 특성이 파형 왜곡에 미치는 영향을 분석하기 위해 ND-R의 조건에 대해 해석하여 이 결과를 NR-ND 조건과 비교하여 나타냈다. 그리고 그림 6(c)는 반사와 분산의 두 가지 영향이 복합적으로 나타나게 되는 D-R 조건에 대한 결과를 ND-NR의 파형과 각각 비교하여 나타냈다. 그림 6의 결과를 분석해 보면 왜곡된 출력 파형의 앞부분에서 강하게 나타나는 오버슈트(overshoot) 왜곡은 R-ND와 NR-ND 조건에서는 나타나지 않고 R-D와 NR-D에서 나타나기 때문에 오버슈트 특성은 실효유전율의 주파수에 대한 비선형 특성에 기인하는 분산 특성이 주요한 원인이 됨을 알 수 있다. 그리고 왜곡된 파형의 뒷부분의 꼬리에서 나타나는 잔류왜곡특성은 NR-D와 NR-ND에서는 나타나지 않고 R-ND와 R-D에서 나타나기 때문에 반사에 의해 나타나는 왜곡으로 생각된다.

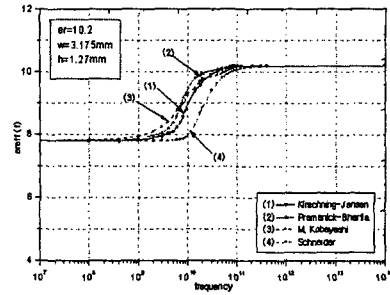
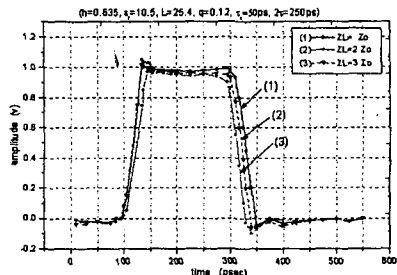
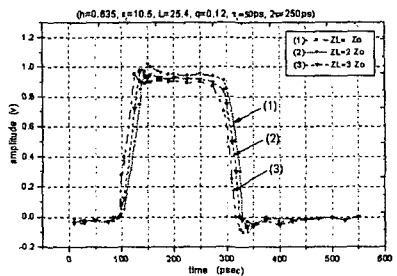


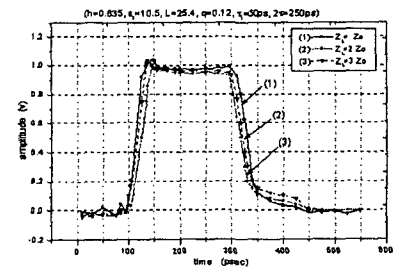
그림 3 주파수에 따른 유효유전율의 변화



(a) Distorted Pulse in Exponential Tapered Line



(b) Distorted Pulse in Triangular Tapered Line



(c) Distorted Pulse in Tchebycheff Tapered Line

그림 4 세 종류 테이퍼의 펄스 왜곡 특성 비교

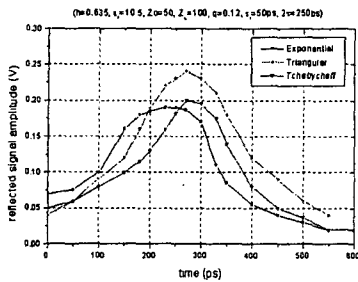
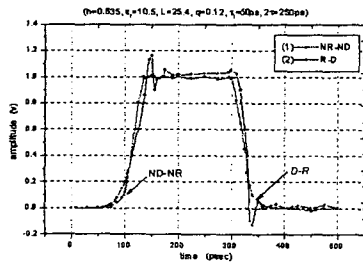
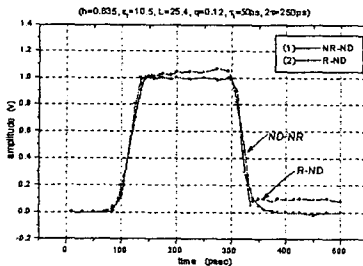


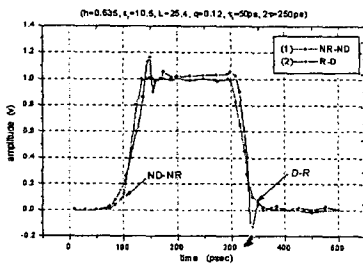
그림 5 테이퍼 선로에서 반사된 펄스의 분산 특성
Fig. 5 Dispersion of Reflected Pulse in Tapered Line



(a) 분산이 왜곡에 미치는 영향 (NR-D)



(b) 반사가 왜곡에 미치는 영향 (R-ND)



(c) 분산과 반사가 왜곡에 미치는 영향 (D-R)

그림 6. 주파수 분산과 반사가 파형의 왜곡에 미치는 영향

IV. 결론

MCM 또는 MIC등에서 광대역 임피던스 정합을 위해

사용되는 테이퍼 선로의 임피던스 분포에 따른 대표적인 세 가지 형태에 대해 펄스 신호의 왜곡 특성을 시간 영역에서 비교하였다. 결과에 의하면 삼각형 분포의 테이퍼 선로보다 지수형 테이퍼 선로의 경우가 펄스 지연이 더 크게 나타났고, 왜곡은 반대로 삼각형 테이퍼 선로가 크게 나타났다. Z_L/Z_0 의 비가 1일 때는 왜곡률이 13.0% 정도로 적게 일어났으나 Z_L/Z_0 의 비 커질수록 왜곡 현상이 심해짐을 알 수 있었고, 반사되는 신호의 분산 특성을 비교한 결과 반사된 신호의 크기는 삼각 분포형에서 반사 신호의 레벨이 다른 것에 비해 크게 나타났다. 그림6(a)에 나타나는 오버슈트(overshoot) 왜곡은 실효유전율의 주파수에 대한 비선형 특성에 기인하는 분산 특성이 주요한 원인이 됨을 알 수 있었고, 왜곡된 파형의 뒷부분의 꼬리에서 나타나는 잔류 왜곡 특성은 선로의 부정합에 의한 반사에 의해 나타나는 영향으로 판단된다. 선로에서 지연에 의한 파형의 기울어짐 현상은 테이퍼 선로에서 공통적으로 나타나는 왜곡 특성임을 알 수 있다. 이런 분석 결과를 바탕으로 MIMIC 등에 대해 시간영역에서 디지털 펄스의 왜곡 파형을 측정하여 왜곡의 주요 원인을 판단할 수 있다.

참고 문헌

- [1] M. Kobayashi and N. Sawada, "Analysis and synthesis of tapered microstrip transmission lines," *IEEE Trans, Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-40 pp. 1642-1646, Aug. 1992.
- [2] R. E. Collin, *Foundation for Microwave Engineering*, New York; McGraw Hill, 1966
- [3] M. V. Schneider, "Microstrip dispersion," *IEEE Trans, Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-20, No. 1, pp. 144-146, 1972
- [4] M. Kobayashi, "Important role of inflection frequency in the dispersive properties of microstrip," *IEEE Trans, Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-30, No. 11, pp. 2057-2059, Nov., 1982
- [5] 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
- [6] P. Pramanick and P. Bhartia, "An Accurate description of dispersion in microstrip," *Microwave J.* pp. 89-92, Dec, 1983.
- [7] 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. 1427-1432, 1986.