

초고주파 집적회로 설계를 위한 펄스의 시간영역 분산 특성 해석

김기래*

Time Domain Analysis of Dispersion Characteristics of Pulse for MMIC Design

Gi-Rae Kim*

Department of Electronic Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

요 약

본 논문에서는 마이크로스트립 선로를 따라 펄스가 전송될 때 분산에 의한 펄스의 왜곡특성을 시간영역에서 해석하였다. 전송선로의 구조, 유전율에 따른 분산특성을 비교 분석하였고, 구형펄스와 가우시안 펄스에 대해 펄스의 폭과 진폭, 그리고 전송속도에 따라 분산특성을 분석하였다. 구형 펄스의 경우 더 높은 고차 고조파 성분을 가지고 있기 때문에 이에 따른 저차 고조파 성분과의 위상 속도 차이가 선로를 따라 진행함에 따라 급격히 나타나서 분산이 심하게 나타났다. 본 연구의 결과는 MIC 또는 MMIC를 설계할 때 펄스전송에서 왜곡을 최소화하기 위해 펄스 폭, 선로의 폭, 기판의 높이 그리고 유전율을 결정하는데 유용하게 사용될 것이다.

ABSTRACT

In this paper, when the pulses propagate on a uniform microstrip line, the distortion of pulse signal caused by dispersion is investigated in time domain. We analyzed dispersion characteristics according to dielectric constant and structure of transmission line, and compared propagating characteristics for square and gaussian pulse according to pulse width, pulse amplitude, and propagation velocity. The results of this paper are compatible to the trade-off determination of relative permittivity, substrate height, strip width and pulse width of signal pulse when a design of MIC and MMIC is necessary.

키워드 : 고주파 집적회로, VLSI, 분산, 펄스 왜곡

Key word : MMIC, VLSI, Dispersion, Pulse Distortion

접수일자 : 2013. 03. 14 심사완료일자 : 2013. 04. 21 게재확정일자 : 2013. 05. 03

* **Corresponding Author** Gi-Rae Kim (E-mail : grkim@silla.ac.kr, Tel : +82-51-999-5697)

Department of Electronic Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.8.1755>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

마이크로스트립 선로는 현재 마이크로파 시스템의 기본소자로 매우 중요하고도 필수적인 역할을 하고 있다. 이러한 마이크로스트립 선로의 저주파수대 준정적(*quasi-static*) 해석은 마이크로스트립 모드의 *non-TEM* 특성을 고려하지 않는다[1]. 마이크로스트립 선로 상에 펄스신호가 전송될 때 그 펄스신호의 주파수 성분들은 수십~수백 GHz 까지 광대역으로 존재하게 된다. 시간 영역에서 펄스 신호는 어떤 전송선로에 대해 주파수 영역에서 서로 다른 주파수 성분들의 위상속도가 다르면 분산을 가져오게 되는데, 분산 특성은 마이크로스트립 선로의 크기뿐만 아니라 주파수 의존성을 고려하여 유효유전상수 $\epsilon_{eff}(f)$ 를 계산함으로써 정확히 해석될 수 있다[2]. 마이크로스트립 선로상의 $\epsilon_{eff}(f)$ 를 결정하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 이들 중 그 정확함이 알려져 있는 스펙트럴 영역법[3] 과 횡전류분포법과 같은 *full-wave* 해를 이용하지만, 이런 방법들은 복잡한 프로그램을 요구하고, 계산하는데 시간이 많이 걸리며 CAD에 유용한 *closed-form* 해를 제공하지 않는다. 본 논문에서는 $\epsilon_{eff}(f)$ 를 계산함에 있어서 비록 *full-wave* 해석보다 정확도는 떨어지지만 계산 시간을 줄이고 CAD등에 쉽게 적용할 수 있는 해석방법을 제안 한다. 이 해석 방법을 이용하여 균일한 마이크로 스트립 선로 상에 가우시안 펄스와 구형 펄스를 전송할 때 선로의 유전율, 펄스폭, 선로의 길이, 등에 따라 나타나는 분산 특성을 해석하였고 측정 결과와 비교하여 일치함을 얻었다.

II. 전송 특성 해석

낮은 주파수에서 파의 전파는 *TEM* 모드로 근사화 되고 분산은 실제적으로 거의 무시할 수 있으나, 높은 주파수 성분을 갖는 펄스 파형은 펄스의 고차 고조파 성분이 저차 고조파 성분보다 더 느린 속도로 진행하기 때문에 분산이 일어난다. 마이크로스트립 선로의 기준점 $x=0$ 에서 시간 영역과 주파수 영역의 전압은 각각 식(1a)와 식(1b)와 같이 표현된다.

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

$$V(f, x=0) = \int_{-T/2}^{T/2} v(t, x=0) e^{-j2\pi f t} dt \quad (1b)$$

구형펄스와 같은 어떤 과도신호에 대해서는 구간 $-T/2 \leq t \leq T/2$ 에서 펄스 폭을 정의하고 신호는 짧은 시간 간격 내로 제한한다. 가우시안 펄스의 경우에 그 응답을 완전히 특성 짓기 위해서는 $-\infty < t < \infty$ 의 시간 간격이 요구된다. 무손실 전송 선로에서 거리 L 에서 주파수 영역의 펄스 신호는 식(2)와 같이 표현되고 이것을 시간영역에서 변환하면 식(3)과 같이 된다.

$$V(f, x=L) = V(f, x=0) e^{-j\beta(f)L} \quad (2)$$

$$v(t, L) = \int_{-\infty}^{\infty} V(f, x=0) e^{+j[2\pi f t - \beta(f)L]} df \quad (3)$$

무손실 선로에서 위상상수 $\beta(f)$ 는 식(4)와 같이 된다.

$$\beta(f) = 2\pi f \sqrt{\mu\epsilon(f)} = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_{eff}(f)} \quad (4)$$

$v(t, 0)$ 의 푸리에 변환 식, $V(f, x=0)$ 는 구형펄스, 가우시안펄스, 삼각펄스에 의해 변조된 RF파와 같은 파형에 대해 쉽게 구할 수 있다.

주파수 함수인 위상상수 $\beta(f)$ 의 복잡성이 *closed-form*의 적분 계산을 어렵게 한다. 이러한 적분 계산을 하는 데는 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫째는 가장 직접적인 방법인 수치적분법이고[4], 둘째는 적분식이 전체 적분구간에 대해 근사화 하는 테일러 급수 전개 (*Taylor series expansion*) 방법이다[5]. 이 방법은 수치적분법에 비해 계산시간이 덜 걸리는 장점은 있지만 정확도는 떨어진다. 셋째는 식(4)의 적분구간에 대해 어떤 정지 위상점을 갖는 f_s 를 찾아 수식을 재배열함으로써 적분을 수행하는 정지 위상법이다[6]. 이는 펄스가 선로를 따라 진행해 갈 때 거리 L 에 대한 정지 위상 점은 어떤 시간 영역에 대해서만 알 수 있으며, 시간영역은 펄스의 위치와 일치한다. 그러나 시간 간격이 너무 짧아서 대부분의 경우에 전체 펄스를 포함할 수 없으며

로 이 방법은 한정된 범위에서만 유효하다. 본 논문에서는 비교적 정확성을 가지며 시뮬레이션하기에 편리한 수치적분법을 이용하였으며, 식(3)에서 적분구간은 $-\infty < f < \infty$ 이지만 신호의 특성상 차단 주파수, $f_L = \delta / \tau$ 이상에서는 신호레벨이 미약하므로 적분 값은 무시될 수 있다. 입력 신호는 식(5)와 같이 다시 표현될 수 있고, 수렴도를 고려하여 적당한 $f_L = \delta / \tau$ 을 선택하는 것이 중요하다.

$$v(t, L) = \int_{-f_L}^{f_L} V(f, x=0) e^{j[2\pi f t - \beta(f)L]} df \quad (5)$$

III. 분산 모델

위상 정수 $\beta(f)$ 는 주파수 의존적이기 때문에 주파수가 다른 두 신호가 전송되면 위상 속도가 달라진다. 넓은 주파수 성분을 갖는 펄스 신호는 펄스의 고차 고조파 성분이 저차 고조파 성분보다 더 느린 속도로 진행하기 때문에 분산될 수 있다. 이와 같은 위상 정수의 주파수 의존 함수 식을 모델링하는 것이 해석에 있어서 중요한 요소가 된다. 분산 특성을 해석하기 위한 주파수에 따른 유효유전상수 $\epsilon_{eff}(f)$ 에 대한 closed-form 들은 대표적으로 M. V. Schneider[7], M. Kobayashi[8], Pramanick- Bhartia[9], 그리고 Kirschning-Jansen[10]의 식이 사용된다. 본 논문에서는 대표적인 4가지 모델 중에서 정확도가 우수한 Kirschning-Jansen 모델을 이용하여 분산 특성을 해석하였다. 이 모델의 주파수에 따른 유전상수 식은 (6)과 같다.

$$\epsilon_{eff}(f) = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{eff}(0)}{1 + P(f)} \quad (6)$$

여기서,

$$P(f) = P_1 P_2 [(0.1844 + P_3 P_4) 10 F]^{1.5763}$$

$$P_1 = 0.27488 + [0.6315 + 0.525 / (1 + 0.157F)^{20}] (w/h)$$

$$- 0.065683 \exp(-8.7513(w/h))$$

$$P_2 = 0.33622 [1 - \exp(-0.03442 \epsilon_r)]$$

$$P_3 = 0.0363 \exp(-4.6(w/h) \times [1 - \exp(-(F/3.87)^{4.97})])$$

$$P_4 = 1 + 2.751 [1 - \exp(-\epsilon_r / 15.916)^8]$$

$$F = fh \text{ (GHz-cm)}$$

IV. 해석 및 측정 결과

본 논문에서 선택한 Kirschning-Jansen 모델의 분산 특성을 가우시안 펄스와 구형 펄스에 대해 Pramanick-Bhartia의 분산 모델과 비교하여 그림 1에 나타내었다. 두 모델에 대한 주파수에 따른 실효 유전율 $\epsilon_{eff}(f)$ 의 0.2 % 차이는 분산된 파형의 작은 차이로 나타났음을 알 수 있다.

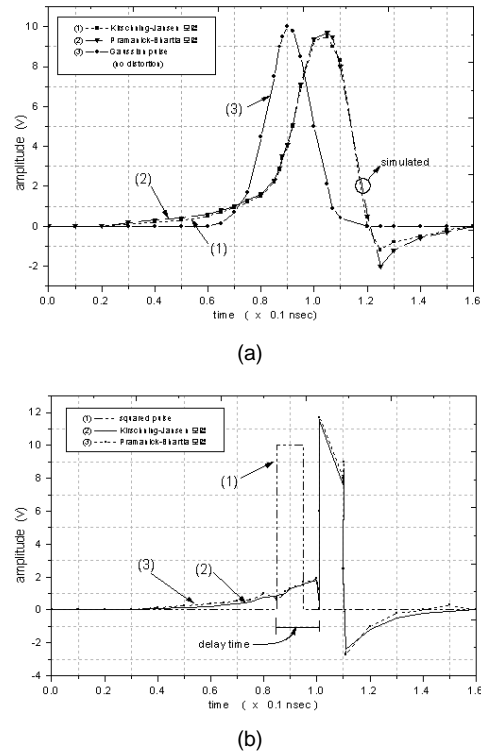


그림 1. Kirschning-Jansen 과 Pramanick-Bhartia 모델의 분산 특성 비교 (a) 가우시안펄스 (b) 사각 펄스
 Fig. 1 Comparison of dispersion by Kirschning-Jansen and Pramanick-Bhartia Model (a) for Gaussian Pulse (b) for Square Pulse

이러한 진폭, 펄스 폭, 스파크 현상 그리고 울림 현상 차이는 협대역 스펙트럼을 갖는 가우시안 펄스신호에 있어서는 0.12 ns 이후에서 약간의 차이를 나타냈고, 광대역의 주파수 성분을 갖는 구형 펄스신호에 대해서는 두 모델의 분산된 펄스 파형이 일치하였다.

그림 2에는 $w/h = 1$ ($w = 0.635mm, h = 0.635mm$) 펄스폭 $\tau = 10ps$, 선로길이 $L = 0.01m$ 일 때 마이크로 스트립 선로상의 비유전율에 대한 가우시안 및 구형 펄스신호의 분산을 비교하였으며, 비유전율에 따라 펄스의 전송 지연이 다르게 나타나므로 생기는 왜곡 특성이이다.

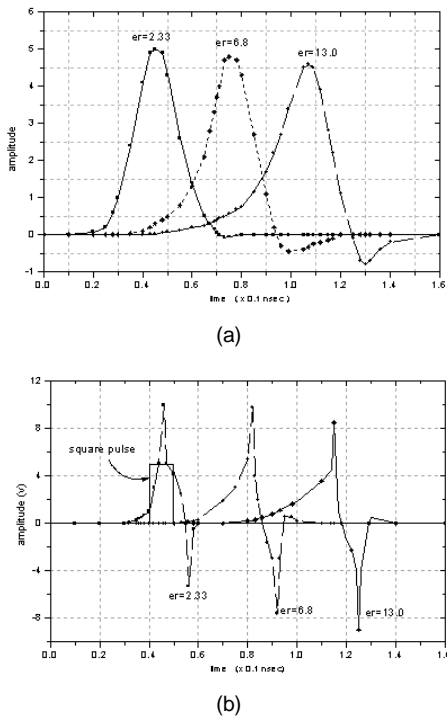


그림 2. 마이크로 스트립 선로상의 비유전율 변화에 대한 분산 특성 (a) 가우시안펄스 (b) 사각 펄스
Fig. 2 Dispersion characteristics according to dielectric constant (a) for Gaussian Pulse (b) for Square Pulse

그림 3에는 $\epsilon_r = 10.2$, 펄스폭 $\tau = 10ps$, 선로 길이 $L = 0.01m$ 일 때 마이크로 스트립 선로상의 w/h 비에 대한 가우시안 및 구형 펄스신호의 분산을 비교하였다. w/h 비는 각각 0.8, 1, 2.5 인 경우를 선택하였다. 해석

결과를 살펴보면 w/h 비가 커질수록 분산이 많이 일어난다. 그림 4에는 $\epsilon_r = 2.33, w/h = 2.5$ 선로 길이 $L = 0.05$ 일 때 사각 펄스의 펄스폭 τ 가 각각 10ps, 100ps, 250ps 인 경우에 대해 분산 특성을 비교하였다.

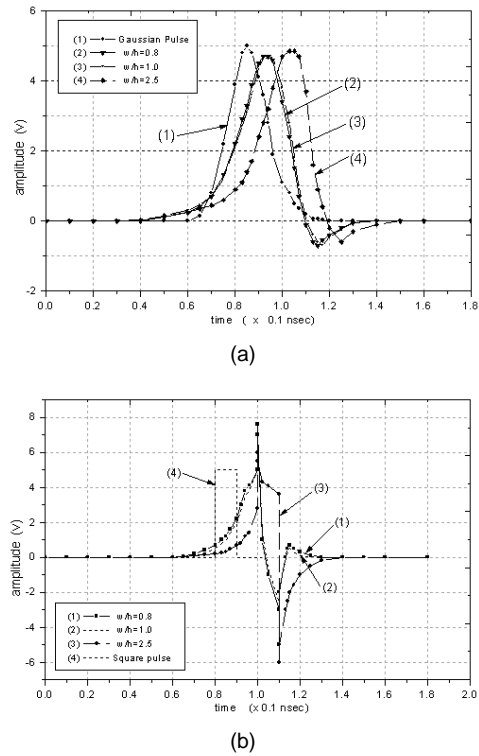


그림 3. 마이크로 스트립 선로상의 w/h 비에 따른 펄스 분산 특성 비교 (a) 가우시안펄스 (b) 사각 펄스
Fig. 3 Dispersion characteristics according to w/h ratio (a) for Gaussian Pulse (b) for Square Pulse

그림 5에는 $\epsilon_r = 2.33, w/h = 2.5, \tau = 100ps$ 일 때 선로의 길이가 $L = 0.05m$ 와 $0.1m$ 일 때, 각각에 대해 펄스의 분산을 비교하고 있으며, 시간축 상의 펄스들의 결과가 달리 나타나는 것은 선로 길이 L 에 대한 위상지연의 결과이다. 그림 5(a)의 가우시안 펄스신호의 경우 분산이 거의 일어나지 않았으며, 이것은 그림 5의 결과에 비추어 볼 때 펄스폭이 넓기 때문에 분산 효과가 아주 적으며 선로 길이 L 에 대해서도 영향을 받지 않는다. 그러나 구형 펄스신호의 경우 가우시안 펄스 신호 보다 더욱더 높은 고차 고조파 성분을 가지고 있기 때문에 그

에 따른 저차 고조파 성분과의 위상 속도차가 선로를 따라 진행함에 따라 급격히 심해진다. 그래서 그림 5(b)의 거리 0.1m 점에서 구형 펄스신호는 입력 펄스와 비교했을 때 상당히 왜곡이 일어난 것을 알 수 있다.

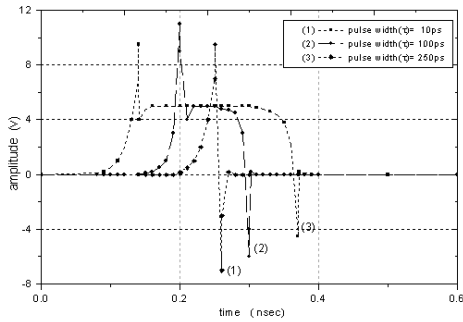
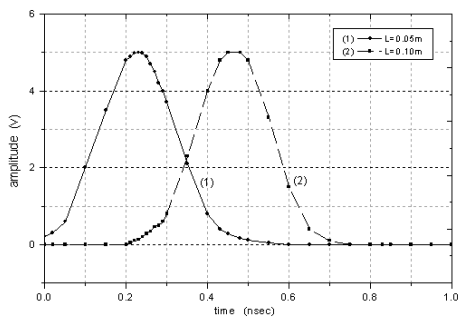
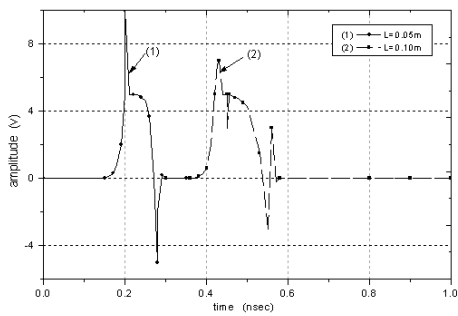


그림 4. 펄스폭 변화에 따른 펄스 분산 특성
Fig. 4 Dispersion characteristics according to pulse widths



(a)



(b)

그림 5. 선로의 길이에 따른 펄스 분산 특성 (a) 가우시안펄스 (b) 사각 펄스
Fig. 5 Dispersion characteristics according to line length (a) for Gaussian Pulse (b) for Square Pulse

V. 결론

단일 마이크로 스트립 선로에서 펄스가 전송될 때, 구형 펄스가 가우시안 펄스보다 전송시 분산과 고주파 성분의 임펄스 왜곡이 심하게 일어난다. $w/h=1, L=10\text{cm}$ 인 선로의 비유전율을 2.33, 6.8, 13.0으로 했을 때 전송 지연이 각각 50.8ps, 86.9ps, 120.2ps로 나타나며, 손실은 각각 -1.37dB, -2.33dB, -2.94dB로 나타났다. $w/h=2.5, L=0.05\text{m}, \epsilon_r=2.33$ 인 선로에 신호의 펄스폭을 10ps, 100ps, 250ps로 변화시킬 때 왜율이 가우시안 펄스의 경우는 32.1%, 26.2%, 14.5%이고, 구형 펄스의 경우는 36.4%, 29.1%, 17.4%로 나타났다. 즉, 펄스 폭이 좁을수록 고주파 성분에 의한 왜곡이 심하며, 구형 펄스가 광대역의 주파수 성분을 갖기 때문에 가우시안 펄스에 비해 왜율이 크게 나타났다. $w/h=2.5, \epsilon_r=2.33$, 펄스폭이 100ps 일 때 선로의 길이를 각각 0.05m, 0.1m로 했을 때 가우시안 펄스의 경우는 왜율이 각각 2.4%, 3.4%이고, 구형펄스의 경우는 각각 12.4%, 17.9%로 나타났다. 구형 펄스의 경우 가우시안 펄스보다 더욱 더 높은 고차 고조파 성분을 가지고 있기 때문에 이에 따른 저차 고조파 성분과의 위상 속도 차이가 선로를 따라 급격히 나타나서 분산이 심하게 일어나게 된다.

References

- [1] H. A. Wheeler, "Transmission line properties of parallel wide strips separated by a dielectric sheet," *IEEE Trans, Microwave Theory Tech.*, **MIT-13**, pp. 172-185, 1965.
- [2] 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.
- [3] T. Itoh and R. Mittra, "Spectral-domain approach for calculating the dispersion characteristics of microstrip lines," *IEEE Trans, Microwave Theory Tech.*, vol. **MIT-21**. No. 7, pp. 496-499, July, 1973.
- [4] M. P. Forrer, "Analysis of milli-microsecond RF pulse transmission," *Proceeding IRE*, vol. 46, pp. 1830-1835, Nov., 1958.
- [5] R. S. Elliott, "Pulse waveform degradation due to dispersion in waveguide." *IEEE Trans Microwave Theory*

- and Tech., Vol. **MTT-5**, No. 10, pp. 254-257, Oct. 1957.
- [6] A. Papoulis, *The Fourier Integral and its Applications*, New York, MacGraw-Hill, ch. 7, pp. 120-143, 1962.
- [7] M. V. Schneider, "Microstrip dispersion," *IEEE Trans, Microwave Theory Tech.*, vol. **MTT-20**. No. 1, pp. 144-146. 1972.
- [8] 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.
- [9] P. Pramanick and P. Bhartia, "An Accurate description of dispersion in microstrip," *Microwave J.* pp. 89-92, Dec, 1983.
- [10] M. Kirdchning 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.



김기래(Gi-Rae Kim)

중신회원
신라대학교 전자공학과 교수
한국정보통신학회 논문지 제17권 제7호 참조