

論文99-36D-8-1

테이퍼형 마이크로 스트립 선로에서 디지털 펄스 신호의 시간 영역 전송 특성 해석

(Transmission Characteristics Analysis of Digital Pulse Signal on Tapered Microstrip Line in Time Domain)

金紀來 *

(Gi-Rae Kim)

요 약

MCM 또는 MIC등에서 광대역 임피던스 정합을 위해 테이퍼 선로를 이용할 때 주파수 영역의 전송 특성만을 고려하는 경향이 있다. 본 논문에서는 테이퍼형 비균일 전송선로에서 디지털 펄스가 전송될 때 시간 영역에서 분산과 반사에 의해 나타나는 신호의 왜곡 특성을 해석하였다. 삼각형과 지수분포형 테이퍼에서 입력과 부하임피던스의 비에 따라 상승/하강 시간을 갖는 펄스를 입력 했을 때 지연과 왜곡 특성을 비교하였다. 위상 정수의 분산 모델은 정확도가 우수한 Kirchning-Jansen의 것을 사용하였으며, 삼각형 테이퍼가 지수형 테이퍼에 비해 시간 지연특성은 좋게 나타났으나 왜곡이 심하게 나타났다. 그리고 시간 영역에서 펄스의 반사 신호의 진폭을 계산하여 나타내었다.

Abstract

The only transmission characteristics in frequency domain is considered when using the tapered transmission line for wide-band impedance matching in MCM and MIC designs. 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. A dispersion model of the phase constant proposed by Kirchning -Jansen is used to meet the frequency, accuracy and microstrip parametric requirements. The triangular tapered line shows both shorter delay time and higher distortion rate than those of the exponential tapered line. Furthermore, the amplitude of signal reflected from load point is calculated in time domain.

I. 서 론

마이크로 스트립 선로는 일반적인 M(M)IC 뿐만 아니라 최근에는 클럭 주파수가 높아지고 회로의 집적도가 증가함에 따라 고속 컴퓨터와 같은 고속 집적회로 등에도 사용되고 있다. 고속 정보 기기에서 디지털

신호의 전송속도가 높아지면서 전송 선로의 종류와 특성에 따라 분산에 의한 신호의 왜곡을 일으키고 있다. 단일 전송선로에서 분산 특성은 마이크로스트립 선로 상에서 위상속도는 주파수에 의존하기 때문에 펄스 파형의 다른 주파수 성분들은 다른 위상속도로 전파하게 되며, 결국 마이크로스트립 선로의 중단점에서 펄스 파형의 왜곡을 야기시킨다. 기하학적 구조상으로 볼 때 전자계가 도파로, 동축선로, 스트립선로에서는 하나의 매질에 한정되는 반면, 마이크로스트립 선로는 펄스가 부분적으로는 공기 중에 있고, 부분적으로 유전

* 正會員, 新羅大學校 情報通信工學科

(Department of Information & Communications Engineering, Silla University)

接受日字:1999年4月19日, 수정완료일:1999年7月20日

체에 존재하도록 되어있다. 이러한 선로 구조에서 공기와 유전체의 경계면에서는 순수한 TEM 모드 외에 고차모드가 발생하게 된다. 따라서 위상상수는 주파수의 선형함수가 아니므로 선로의 분산특성으로 인해 파형의 분산을 야기시킨다^[1]. 낮은 주파수에서 파의 전파는 TEM으로 근사화되고 분산은 실제적으로 거의 무시할 수 있다. 그러나 높은 주파수 성분을 갖는 펄스형태의 신호는 펄스의 고차 고조파 성분이 저차 고조파 성분보다 더 느린 속도로 진행하기 때문에 분산될 수 있다. Veghte 와 Balanis^[2]는 마이크로 스트립 모드의 non-TEM(TE 와 TM 모드) 특성을 고려하여 구해진 기존의 closed-form 실효유전상수 근사 모델 중 Pramanick 와 Bhartia^[3]의 모델을 이용하여 마이크로스트립 선로의 고정된 기하학적 구조에 대해 펄스신호의 분산 현상만을 보여주었다.

본 논문에서는 MCM 및 MIC 등에서 광대역 임피던스 정합을 위해 사용되는 테이퍼형 마이크로 스트립 선로의 분산을 해석하기 위해 분산 모델 중 Kirchning-Jansen 모델을 적용하였다. 테이퍼형 비균일 마이크로 스트립 선로에서, 펄스를 일반화하기 위해 일정한 상승시간과 하강시간을 갖는 비이상(non-ideal) 구형 펄스를 입력했을 경우에 대해 분산 특성을 나타낸다. 실제 모든 구형파는 비이상 펄스이기 때문에 이에 대한 해석이 필요하며, 비이상 구형 펄스가 테이퍼 마이크로 스트립 선로를 따라 전송 될 때 분산 특성을 해석하며, 테이퍼는 지수형과 삼각형의 두 가지를 중심으로 해석하였다.

II. 전송 특성 해석

선로의 길이가 L 인 균일 전송선로에서 x=L인 부하점에서의 신호는 식(1)과 같이 되며, 주파수에 의존하는 전파상수는 식(2)와 같다.

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

$$\gamma(w) = \alpha(w) + j\beta(w) \quad (2)$$

여기서 $\alpha(w)$ 와 $\beta(w)$ 는 각각 감쇄상수와 위상상수이다. 마이크로스트립 선로의 길이가 짧고, 선로의 금속 전도도가 높을 경우 감쇄량은 매우 적기 때문에 주파수에 의존하는 감쇄상수 $\alpha(w)$ 는 무시할 수 있으므로, 식(1)은 식(3)으로 표현된다.

$$V(w, x=L) = V(w, x=0) e^{-j\beta(w)L} \quad (3)$$

식(3)에서 비균일 전송선로인 경우는 선로의 전달함수를 고려하여 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V(w, x=L) = V(w, x=0) |T(w)| e^{-j\theta(w)} \quad (4)$$

여기서 $T(w)$ 는 테이퍼형 비균일 전송 선로의 전달함수로서 식(5)와 같이 표현된다^[4].

$$T(w) = \sqrt{1 - \frac{1}{4} \left[\ln \left(\frac{Z_L}{Z_0} \right) F(\theta(w)) \right]^2} e^{-j\theta(w)} \quad (5)$$

여기서 $F(\theta(w))$ 는 선로의 임피던스 분포 형태에 따라 결정되며, 본 논문에서 사용될 지수형 테이퍼 (exponential taper) 선로와 삼각형 (triangular) 테이퍼 선로에 대해서는 다음과 같다^[4].

① 지수형 테이퍼 선로에서

$$F(\theta(w)) = \frac{\sin(\theta(w))}{\theta(w)} \quad (6)$$

② 삼각형 테이퍼 선로에서

$$F(\theta(w)) = \left[\frac{\sin(\theta(w)/2)}{\theta(w)/2} \right]^2 \quad (7)$$

여기서 $\theta(w) = \int_0^L \beta(w, x) dx$ 이고, $\beta(w, x)$ 는 선로의 전송계수의 위치에 따른 분포를 나타낸다. 식(4)를 시간 영역에서 나타내기 위해 역 푸리에 변환을 하면 식(8)과 같이 된다.

$$V(t, L) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} V(w, x=0) |T(w)| e^{j\omega t - \theta(w)} dw \quad (8)$$

식(8)에서 주파수에 대한 $\theta(w) = \int_0^L \beta(w, x) dx$ 이므로 적분식으로 구할 수 있다. 여기서 위상 정수는 다음과 같다.

$$\beta(w, x) = \frac{w}{c} \sqrt{\epsilon_{eff}(w, x)} \quad (9)$$

여기서 c는 공기 중에서 빛의 속도이고 주파수의 함수인 실효 유전 상수, $\epsilon_{eff}(w)$ 는 일반적으로 정확함이 인정된 Closed-form 식은 M. V. Schnider^[5], M. Kobaysshi^[6], Kirschning-Jansen^[7], Pramanick-Bhartia^[8]에 의한 모델식이 있으나, 본 논문에서는 정확도가 Jansen^[7]의 Closed-form 모델식을 사용하였다.

$$\epsilon_{eff}(f) = \epsilon_{eff}(0) \frac{1 + K_3 P_1 P_2 [(0.1844 + P_3 P_4) 10 \cdot F]^{1.5763}}{1 + P_1 P_2 [(0.1844 + P_3 P_4) 10 \cdot F]^{1.5763}} \quad (10)$$

$$K_3 = \epsilon_r / \epsilon_{eff}(0)$$

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

$$P_1 = 0.27488 + [0.6315 + 0.525 / (1 + 0.157F)^{20}] (w/h) - 65683 \exp(-8.7513(w/h))$$

$$P_2 = 0.93622 [1 - \exp(-0.0344 \epsilon_r)]$$

$$P_3 = 0.0963 \exp(-4.6(w/h)) \times [1 - \exp(-(F/3.87)^{4.97})]$$

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

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

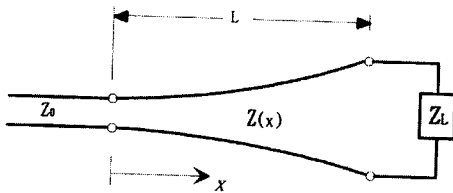


그림 1. 테이퍼 전송 선로
Fig. 1. Tapered Transmission line.

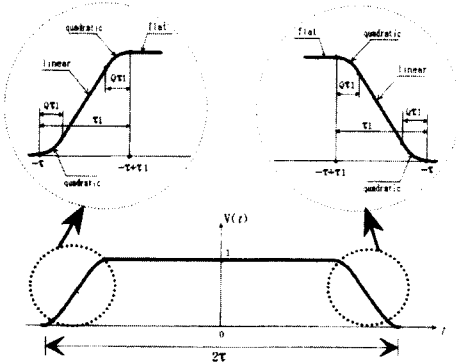


그림 2. 비이상 (non-ideal) 구형 펄스
Fig. 2. Non-ideal square pulse.

그림 2와 같은 linear-square-linear 특성을 갖는 비이상 구형 펄스의 시간 영역에서의 함수를 다음과 같이 표현하자.

$$V(t, x=0) = \begin{cases} 1 & 0 < t < T_1 \\ 1 - a(t - T_1)^2 & T_1 < t < T_1 + q\tau_1 \\ bt + e & T_1 + q\tau_1 < t < \tau - q\tau_1 \\ a(t - \tau)^2 & \tau - q\tau_1 < t < \tau \\ 0 & t > \tau \end{cases} \quad (11)$$

여기서 $T_1 = \tau - \tau_1$, $\tau_1 < \tau$, $0 < q < 0.5$

그리고

$$a = \frac{-1}{2a(1-q)\tau_1^2} \quad b = \frac{-1}{(1-q)\tau_1} \quad e = \frac{2\tau - q\tau_1}{2(1-q)\tau_1}$$

식(11)의 시간 영역의 펄스를 푸리에 변환을 하면 다음과 같이 된다^[9].

$$V(w, x=0) = \frac{8}{q(1-q)\tau_1^2} \times \frac{\Psi(w)}{w^3} \quad (12)$$

여기서

$$\Psi(w) = \sin\left[\left(\tau - \frac{\tau_1}{2}\right)w\right] \sin\left[\frac{q\tau_1 w}{2}\right] \sin\left[\frac{(1-q)\tau_1 w}{2}\right]$$

식(8)에서 적분구간은 $-\infty < f < \infty$ 이지만 어떤 주파수 f_L 이상에서 적분 값은 무시될 수 있다. 아주 폭이 좁은 펄스는 높은 주파수 성분을 갖기 때문에 더 높은 f_L 을 필요로 한다. f_L 은 다음과 같이 표현된다.

$$f_L = \zeta / \tau \quad (13)$$

여기서, ζ 는 파형에 따른 상수이고 τ 는 펄스 폭이다.

$$V(t, L) = \frac{1}{2\pi} \int_{-f_L}^{f_L} V(w, x=0) |T(w)| e^{j[\omega t - \theta(\omega)]} df \quad (14)$$

식(14)에서 실수부만 관계되므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(t, L) = \frac{1}{2\pi} \int_{-f_L}^{f_L} V(w, x=0) |T(w)| \cos(\omega t - \theta(w)) df \quad (15)$$

식(15)의 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.

$$V(t, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} V(w, z=0) |R(w)| e^{j(\omega t - \theta(w))} d\omega$$

$$R(w) = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{Z_L}{Z_0}\right) F(\theta(w)) e^{-j\theta(w)} \quad (16)$$

III. 결과 및 검토

그림 1과 같은 테이퍼 선로에서 선로의 임피던스가 지수형(*exponential*)과 삼각형(*triangular*) 임피던스 분포를 갖는 테이퍼 전송 선로에서 그림 2와 같은 quadratic-linear-quadratic 특성을 갖는 비이상 구형 펄스를 입력했을 때의 분산 특성을 해석하여 나타내었다. 그림 4에는 주파수에 따른 실효유전율의 closed-form 분산모델식의 결과를 그래프로 나타내었다. 본 논문에서는 그림 4의 결과에 나타낸 바와 같이 4가지 분산 모델중에서 w/h 가 1보다 큰 경우와 적은 경우 양쪽에서 정확도가 우수한 Kirchning-Jansen 모델을 이용하였다. 그림 5에는 $h=0.635\text{ mm}$, $\epsilon_r = 10.5$, $L=25.4\text{mm}$ 인 지수형 과 삼각형 테이퍼선로에서 각각 Z_L/Z_0 의 비를 변화시키면서 분산 특성을 비교하였고 <표 1>에 결과를 비교하여 나타내었다. <표 1>의 지연시간(delay time)에 대한 괄호 안의 데이터는 그림 3과 같은 방법으로 측정된 결과를 이론치와 비교하기 위하여 나타냈다.

표 1. 테이퍼선로의 전송 특성 비교
Table 1.

parameter \ rate		$Z_L/Z_0=1$	$Z_L/Z_0=2$	$Z_L/Z_0=3$
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 %

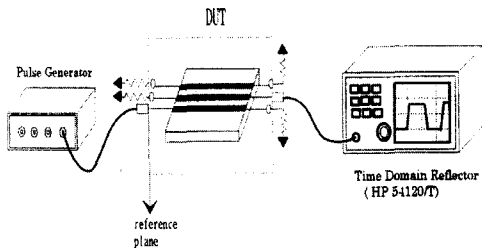
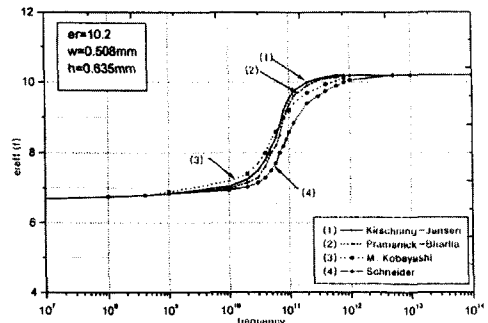


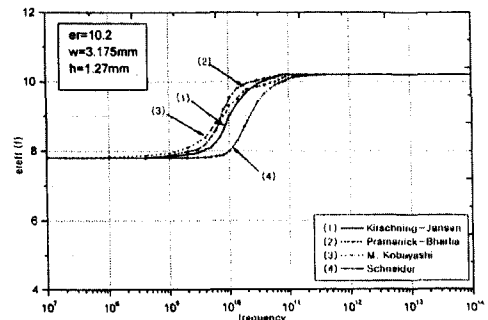
그림 3. 전송 특성 측정을 위한 실험장치 구성도
Fig. 3. Configuration of Test Equipments.

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

6에 $h=0.635\text{mm}$, $\epsilon_r = 10.5$, $L=25.4\text{mm}$ 인 지수형과 삼각형 테이퍼 선로에서 Z_L/Z_0 의 비가 각각 2와 3일 때 분산 특성을 비교하였다. 삼각형 분포의 테이퍼 보다 지수형 테이퍼의 펄스 지연이 더 크게 나타났으며, 그림 6(a)에서 $Z_L/Z_0=2$ 일 때는 두 테이퍼의 펄스의 전송 지연 차이가 거의 없었으나, 그림 6(b)에서는 $Z_L/Z_0=3$ 일 때는 두 테이퍼의 펄스의 전송 지연 차이가 9ps 정도로 나타났다. Z_L/Z_0 의 비가 2일 때는 진폭이 0.96V, 3일 때는 0.91V로 비가 증가할수록 전송된 펄스의 진폭이 줄어들었다. 이것은 테이퍼의 동일한 길이에 대해 Z_L/Z_0 의 비가 클수록 테이퍼의 주파수 특성에서 통과 대역의 리플이 크게되어 부정합 특성이 나타나 반사파가 증가되어 부하에서 펄스의 진폭이 줄어든 것이며, 부정합에 의해 반사되는 신호의 진폭은 식(16)으로 계산할 수 있다. 그림 7에는 지수형 과 삼각형 임피던스 분포의 테이퍼 선로에서 반사된 펄스를 나타내었다. 여기서 $Z_L/Z_0=2$ 일 때는 두 테이퍼의 펄스의 왜곡 차이가 거의 없지만 $Z_L/Z_0=3$ 일 때는 차이가 크게 나타난다.

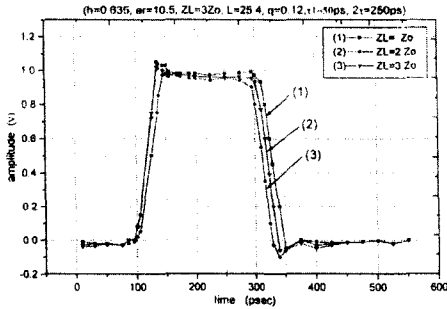


(a) Effective Dielectric constant($\epsilon_r=10.2$, $w/h<1.0$)

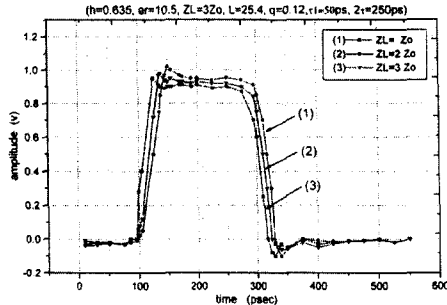


(b) Effective Dielectric constant($\epsilon_r=10.2$, $w/h>1.0$)

그림 4. 주파수에 따른 유효유전율의 변화 (a) $w/h<1$ (b) $w/h>1$
Fig. 4. Effective dielectric constant according to frequency.

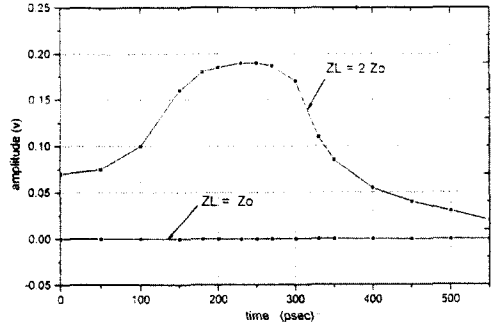


(a) Distorted Pulse in Exponential Tapered line

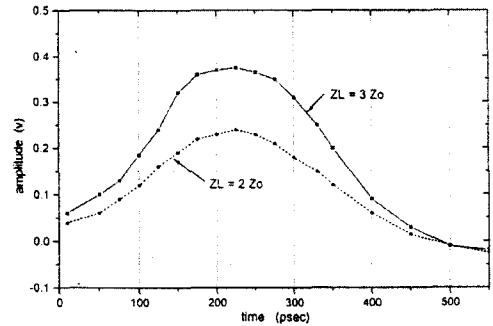


(b) Distorted Pulse in Triangular Tapered line

그림 5. 지수형 및 삼각형 테이퍼의 펄스 왜곡
Fig. 5. Pulse Distortion in Exponential and Triangular tapered line.

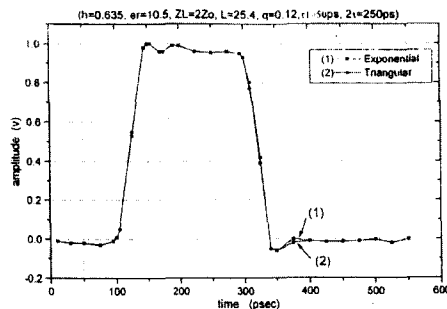


(a) Reflected Pulse in Exponential Taper line

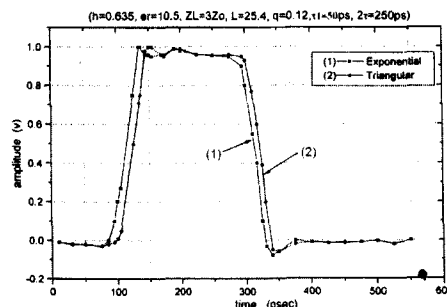


(b) Reflected Pulse in Triangular Taper line

그림 7. 테이퍼 선로에서 반사된 펄스의 분산
Fig. 7. Dispersion of Reflected Pulse in tapered line.



(a) in case of $Z_L=2 Z_o$



(b) in case of $Z_L=3 Z_o$

그림 6. 테이퍼 선로의 분산특성 비교 (a) $Z_L/Z_o=2$
(b) $Z_L/Z_o=3$

Fig. 6. Dispersion characteristics in Exponential and Triangular tapered line.

IV. 결론

테이퍼형 비균일 전송선로에서 디지털 펄스가 전송될 때 시간영역에서 분산과 반사에 의해 나타나는 신호의 왜곡 특성을 삼각형과 지수분포형 테이퍼를 중심으로 입력과 부하임피던스의 비에 따라 해석한 결과, 삼각형 분포의 테이퍼 선로보다 지수형 테이퍼 선로의 경우가 펄스 지연이 더 크게 나타났고, 왜곡은 반대로 삼각형 테이퍼 선로가 크게 나타났다. Z_L/Z_o 의 비가 1 일 때는 왜곡이 거의 생기지 않으며 Z_L/Z_o 의 비 커질수록 왜곡 현상이 심해진다.

또한 Z_L/Z_o 의 비가 증가할수록 전송된 펄스의 진폭이 줄어들었으며, 이것은 부정합 특성이 나타나 반사파가 증가되어 부하에서 펄스의 진폭이 줄어든 것이다. 식(16)의 계산 결과와 일치하였다. 본 논문의 결과는 MCM 또는 MIC등에서 디지털 신호의 광대역 임피던스 정합을 위해 테이퍼 선로를 사용할 때 임피던스 분포에 따라 다르게 나타나는 시간영역 전송 특성을 고려하여 설계하면 디지털 신호의 왜곡을 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] J. P. K. Gilb and C. A. Balanis, "Pulse distortion on multilayer coupled microstriplines," *IEEE Trans, Microwave Theory Tech.*, Vol. **MTT-37**. no.10 pp. 1620-1628. 1989.
- [3] P. Pramanick and P. Bhartia, "An Accurate description of dispersion in microstrip," *Microwave J.* pp. 89-92, Dec, 1983.
- [4] R. E. Collin, *Foundation for Microwave Engineering*, New York: McGraw Hill, 1966.
- [5] M. V. Schneider, "Microstrip dispersion," *IEEE Trans, Microwave Theory Tech.*, vol. **MTT-20**. No. 1, pp. 144-146. 1972.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] P. Pramanick and P. Bhartia, "An Accurate description of dispersion in microstrip," *Microwave J.* pp. 89-92, Dec, 1983.

저 자 소 개

金紀來(正會員) 第36卷 D編 第1號 參照

현재 신라대학교 컴퓨터정보공학부 정보통신공학과. 주관심분야는 전파 모델링, MMIC, 초고주파회로