

論文98-35D-8-1

고속/고밀도 디지털 회로를 위한 누설 기판을 이용하는 무왜곡 전송 구현 및 해석

(Dispersionless Transmission Line and the Characterization Using Leaky Circuit Board for High Speed and High Density Digital Circuits)

李 仲 鎬 * , 尹 尙 基 * , 李 海 英 *

(Joong-Ho Lee, Sang-Ki Yun, and Hai-Young Lee)

요 약

최근 회로의 고속/고밀도화로 인해 도체 신호선의 단면적이 크게 제한됨으로써 그에 따른 도체 저항이 증가하는 추세이다. 이는 수 MHz전후의 저주파 영역에서 전송 속도를 감소시키는 slow-wave효과에 기인한다. 이 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 손실 무 왜곡 조건($RC=LG$)인 선형 위상 요소를 이용하는 방법을 이용하였다. 먼저, 전형적인 마이크로 스트립 전송 선로의 L , C 그리고 R 을 구한 다음 최적의 G 값을 계산하였다. G 는 기판의 유전체 손실에 관계하는 파라미터이므로 이 값을 조절하기 위해서 기판에 도전율을 높이는 방법을 사용하였다. 기판의 유효 도전율이 $0.0001S/m$ 일 때 무 왜곡 전송 조건을 만족함을 확인하였다.

Abstract

This paper reports a dispersion compensation technique to implement the distortionless transmission line by satisfying the Heaviside condition. Because of the skin depth for a conductor, compensation condition is dependent on the frequency variation. For this reason, first, the resistance have been characterized in a wide range of frequencies, and then found the effective conductivity of the substrate which satisfied the Heaviside condition. The phase velocity and the characteristic impedance are presented nearly constant over a wideband frequency range.

I. 서 론

현대 정보화 사회는 정보 처리 용량의 확대 및 전달 시간의 단축을 전제로 하고 있다. 이에 많은 정보 통신 방식 및 신호 처리 소자 기술이 고속화, 디지털

화 되면서 정보 신호의 대역폭이 광대역화 되고, 주파수의 사용 범위가 크게 넓어지고 있다. 또한 반도체 소자 기술의 급속한 발달은 회로의 고밀도 집적화로 이어지고 있으며, 특히 단일기판 집적회로 (MMIC) 등은 이러한 고속 대용량 정보처리 통신 소자의 발전을 가속화시키고 있다.

이러한 광대역 고주파수 이용은 수백 MHz에서 수 GHz주파수 대역의 기술개발을 유도하고 있다. 광대역, 고주파 대역의 신호 전송 특성은 복합적 특성을 갖게 되어 시스템의 성능 유지 및 개선을 위하여 광대역 전

* 正會員, 亞洲大學校 電子工學部

(School of Electronics Engineering, Ajou University)

※ 이 연구는 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호 : 95-0100-05-01-3)에 의한 결과임

接受日字:1998年4月8日, 수정완료일:1998年5月27日

송 특성 해석이 필요하게 된다. 이 광대역 신호 전송 특성은 반도체 소자의 고집적화 및 고속화에 따른 전송선의 두께와 폭 간격이 매우 미세해짐으로써 그 효과가 더욱 크게 나타난다. 주요한 예로서 고속 고집적 반도체 소자의 내부 배선, 반도체 소자들 간을 연결하는 고속 PCB 전송 선로, 각종 정보 시스템간의 고속 전송선 설계 등으로 그 범위가 다양하다.

고속 디지털 신호 전송선의 경우에는 일반적 광대역 특성을 부여하기 위해 도체 접지면을 갖는 신호 전송선을 이용하며, 진행 방향에 수직인 단면상에 전장과 자장이 존재하는 특징을 지닌다. 이것은 도체면과 신호선 사이에 전기 신호를 제한함으로써 타 신호선 간의 간섭을 배제하고 진행 방향으로 일정한 구조를 유지하여 광대역 균일 전송 특성을 갖도록 설계된다.

논리 연산이 수행되는 펄스파는 그 자체의 광대역 특성으로 인해 누화, 지연, 펄스 왜곡, 혼신 등과 같은 신호 왜곡 현상이 발생하게 된다. 특히 전송 선로 구조로 많이 사용되는 microstrip 전송선은 수 MHz 전후의 저주파수 영역에서 전송 속도를 감소시키는 slow-wave 효과가 나타나므로 전송 신호를 왜곡시킨다. slow-wave 효과는 전송선의 외부 인덕턴스 효과보다 도체 손실 저항 성분 효과가 두드러져서 전송 속도가 감소되어 나타나며, 전송 길이가 길어질 경우 펄스 왜곡의 주요 원인이 된다.

본 논문에서 이와 같은 PCB 전송 선로에서 고속 디지털 신호의 펄스 왜곡 특성을 개선하기 위하여 손실 무왜곡 전송선의 조건인 선형 위상 요소 (linear phase factor)를 이용하였다. 선형 위상 요소에 맞는 전송 선로 파라미터를 설계할 때, 전송 선로의 L과 C는 주파수에 대해 거의 일정하지만, R은 주파수 함수이므로 도체 저항의 정확한 해석이 무왜곡 조건 구현에 중요하다. 본 논문에서는 광대역에서 도체 침투 효과를 정확히 모델하고 해석할 수 있는 PEM (Phenomenological Loss Equivalence Method) [1][2]을 이용하여 R을 계산하고 이를 전송선 모델에 적용하여 최적 G를 구하였다.

대표적인 마이크로스트립 구조에 대하여 해석결과, 유효 도전율 (σ_d)이 0.0001 S/m일 때 계산이 고려된 전체 주파수 영역에서 위상속도가 거의 일정하며, 이때 특성 임피던스의 실수부는 약 48.7 Ω 정도로 전체 주파수 영역에서 거의 일정함을 확인하였다. 또한, 손실 무왜곡 조건에서 추가된 유효 도전율로 인한 감쇄

정도는 무시할 정도로 매우 작음을 확인하였다. 이로써, 기판의 유효 도전율을 적절하게 조절하므로써 고속 디지털 선로에 적합한 무왜곡 전송 특성을 얻을 수 있어, 전력의 반사손실없이 펄스 신호를 최적으로 전달할 수 있음을 확인하였다. 이상의 무왜곡 전송 특성 결과는 다른 규격의 광대역 회로 및 고속 디지털 회로 전용 기판의 제조 및 선택시 기초 자료로서 유용하게 이용될 수 있다.

II. FR-4 Glass 마이크로스트립 전송선 모델 및 무왜곡 조건

1. FR-4 Glass 기판 및 대표적인 마이크로스트립 전송선 구조

FR-4는 매우 저가이고 가공성이 뛰어난 뿐만 아니라, 적절한 전기적 특성과 재료적 신뢰성이 우수하여 널리 사용되는 회로 기판이다. 디지털 회로용 기판의 경우, 펄스 신호를 이용하므로 경우에 따라 DC에 가까운 매우 낮은 주파수 성분으로부터 수 GHz에 이르는 주파수 성분까지 복합적으로 전송하게 된다. FR-4 기판의 경우, 1 GHz 이상의 높은 주파수에서 유전체 손실로 인하여 펄스의 침예한 부분이 제한되는 문제 및 저주파 영역에서의 도체손실로 인한 펄스신호 왜곡에 관한 연구가 보고되었다. 그러나, 이러한 펄스 왜곡을 개선하기 위한 이론 및 방법은 현재까지 발표되지 않고 있어, 최근 급격히 동작 속도가 증가된 디지털 IC용 기판 설계에 관한 기초자료로서 그 연구가 시급하다.

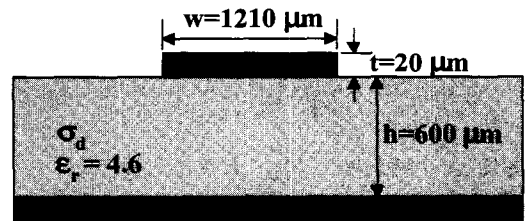


그림 1. FR-4 기판의 Microstrip 전송선 구조
Fig. 1. Microstrip transmission line on the FR-4 substrate.

유전체 손실보다 낮은 주파수 영역에서의 도체손실이 펄스 왜곡에 미치는 영향이 우세하다. 따라서, 도체손실로 인한 펄스 왜곡 문제를 다루는 것이 필요하므로, 이에 대한 정량적인 연구를 위하여 아래에 FR-4

기판에 quasi-TEM microstrip 구조로 구현된 고속 전송 선로를 보였다. 600 μm높이 FR-4 D-Glass기판에 구리(copper : 58S/μm)로 이루어진 strip의 폭과 두께를 각각 1210 μm, 20μm로 정하여 특성 임피던스가 50 Ω이 되도록 하였으며, 접지평면은 strip과 동일한 재질인 구리로 이루어졌다.

2. 무왜곡 조건 및 활용방안

아래 그림에 보인 전송선 등가 모델로부터 복소 전송 상수 (γ)와 복소 특성 임피던스 (Z₀)는 각각 다음과 같이 정리된다.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (1)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2)$$

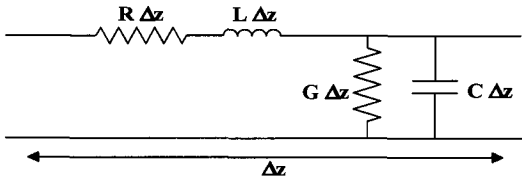


그림 2. Quasi-TEM 전송선로의 등가 회로 모델
Fig. 2. Equivalent circuit model of a transmission line due to field penetration.

본래 quasi-TEM 전송선의 위상 속도 ($v_p = \omega / \beta$)는 주파수 변화에 관계없이 일정하나, 손실이 있는 전송선에서는 위상 속도가 주파수의 함수가 된다. 따라서, 손실 전송선의 경우, 광대역 신호를 구성하는 주파수 성분들이 각각 다른 위상 속도로 진행하므로, 신호의 수신단에 도달 시각이 각각 다르게 되어 펄스 신호의 분산 (dispersion) 또는 왜곡(distortion)을 발생시켜 전송속도를 크게 제한한다.

그러나 일반적인 손실 선로에서도 저주파 영역에서 각 주파수 성분들의 위상 속도가 근사적으로 일치하게 되는 Heaviside Condition^[3]으로도 알려진 다음 식의 무왜곡 조건이 존재한다.

$$RC = LG \quad (3)$$

이 조건을 식 (1)-(2)에 대입하면 복소 전송 상수와 복소 특성임피던스는 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$\gamma = \sqrt{RG} + j\omega\sqrt{LC} = \alpha + j\beta \quad (4)$$

$$Re(Z_0) = \frac{\sqrt{RG + \omega^2 LC}}{\sqrt{G + \omega^2 C^2}}, \quad Im(Z_0) = 0 \quad (5)$$

여기서 위상 상수 β는 각주파수의 선형 함수이므로 주파수에 관계없이 위상 속도가 일정하게 되고, 감쇄 상수 α 역시 주파수의 함수가 아니므로 신호의 왜곡을 일으키지 않는다. 이처럼 식 (3)을 만족하는 무왜곡 선로는 손실은 다소 존재하나 왜곡없이 펄스 또는 변조 포락선(envelope) 전송이 가능하다. 그림 1에 보인 마이크로스트립 전송선 구조에 식 (3)의 무왜곡 조건을 만족하기 위해서는 G (leaky conductance)를 증가시켜야 한다. 이는 L (inductance)과 C(capacitance)는 주파수에 따라 거의 일정한 반면, R은 표피 저항을 느끼는 주파수 이상에서는 √f에 비례하여 증가하므로, 이에 대한 보상을 위해서이다. 이를 위한 방법으로 FR-4 기판 자체의 도전율은 10⁻⁹ S/m로 매우 작으나 기판에 카본 블랙 등의 이온 불순물을 첨가함으로써 도전율을 1~10⁻⁷S/m의 범위에서 조절하여 인위적으로 G 성분을 증가시킬 수 있다 [4]

III. 해석 방법

전송선 모델에서 L, C는 주파수에 따라 크게 변하지 않으며, R, G는 주파수 함수이므로 Heaviside 조건을 성립하는 G를 구하기 위해서는 광대역 저항 해석이 필요하다.

1. 도체 저항 해석

도체 저항 (R)은 도체 내부에서 전류 침투 효과에 의하여 저주파에서 포화되고 고주파에서 표피 효과를 따르기 때문에 주파수 변화에 따라 광범위하게 변하게 된다. 그러므로, 이러한 주파수 변화에 따른 도체 저항 변화의 정확한 해석이 무왜곡 조건 구현에 매우 중요하다.

본 논문에서는 광대역에서 도체 침투 효과를 정확히 모델하고 해석할 수 있는 현상학적 도체 손실 등가 기법 (Phenomenological Loss Equivalence Method:PEM)을 이용하여 저항값을 계산하였다. PEM은 Quasi-TEM 전송선의 전류가 도체 내부를 침투함에 따라 도체 내부에서의 전류 분포 현상을 관찰함으로써 간소화된 등가적 모형을 만든후, 광대역 전송 특성을 쉽게 분석하는 방법에 기초하고 있다 [5] [6]

2. 누설 컨덕턴스에 미치는 유전체 손실 모델

일반적으로 유전체 손실은 시간에 따라 변하는 전계에 대하여 유전체 분극의 지연 효과로부터 이완 현상(relexation phenomena)에 의해 생기는 열 손실과, 누설 전류에 의한 옴(ohm) 손실이다. 즉 유전체 손실에 가장 일반적인 정의인 손실 탄젠트(loss tangent)는 다음과 같다.

$$\tan \delta = \frac{\omega \epsilon'' + \sigma}{\omega \epsilon} = \frac{\sigma_d}{\omega \epsilon} \quad (6)$$

회로 기판으로 사용되는 유전체의 누설 도전을 σ (conductivity)는 매우 작으므로 누설 전류로 인한 전송 손실은 무시할 수 있다. 그러나 실리콘 반도체 기판과 같이 불순물이 첨가될 경우, 누설 전류에 의한 손실이 증가하므로 낮은 주파수에서 누설 컨덕턴스가 증가한다. 본 논문에서는 분극(polarization)에 의한 유전 손실(ϵ'')과 누설 손실(σ)을 모두 포함한 유효 도전을 (σ_d : total effective conductivity)로 정의하였다.

IV. 해석 결과

실제 기판 제조 공정시, 불순물을 첨가하여 전도율을 증가시킬 수 있는데 1 GHz 이하의 낮은 주파수 영역에서는 이 불순물에 의한 전도 손실이 유전체의 분극 손실에 비하여 주요하므로 σ_d 를 σ 로 근사할 수 있으며, 이 누설 전도율은 주파수에 따라 그 변화가 매우 작으므로 상수로 가정하여 최적 컨덕턴스를 구하였다.

기판의 유효 도전을 변화에 따른 위상 속도를 주파수 변화에 따라 계산하여 그림 3에 나타내었다. 유효 도전을 (σ_d)이 0.0001 S/m일 때 계산이 고려된 전체 주파수 영역에서 거의 일정한 위상 속도가 존재함을 관찰하였다. 이 때의 유효 도전을 σ_{st} 로 표시하였다. σ_d 가 σ_{st} 보다 작은 경우, 1 MHz 이하에서 위상 속도의 변화가 심하며, 두 유효 도전을($\sigma_d = 0, 10^{-5}$)의 경우 모두 동일하게 8 MHz 이상부터 주파수에 따라 일정한 위상속도를 보이고 있다. 이는 위상속도에 미치는 도체 손실의 영향이 누설 손실보다 우세하기 때문이다. σ_d 가 σ_{st} 보다 크면 누설 손실이 도체 손실보다 우세하게 되며, 유효 도전율이 클수록 일정한 위상속도로 수렴하는 주파수가 커지게 되고 위상속도

의 변화가 급격한 주파수 영역에서 신호의 왜곡이 크게 증가한다.

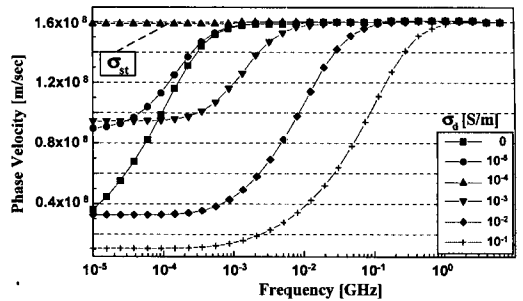
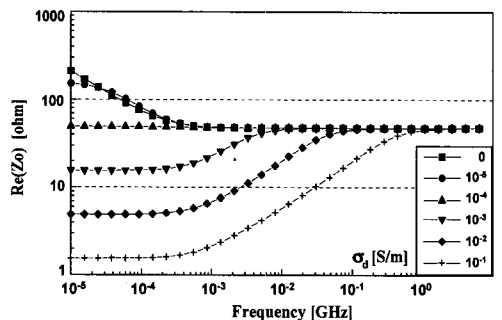
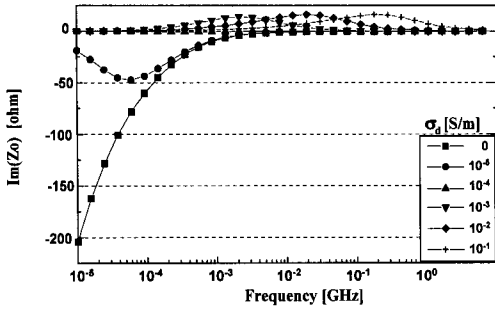


그림 3. 유효 도전율에 따른 위상속도 변화
Fig. 3. Phase velocity to various total effective conductivities.

그림 4는 그림 3과 동일한 조건에서 계산한 특성 임피던스이다. 유효 도전율이 무왜곡 전송 특성을 보인 σ_{st} 일 때 그림 4(a)에 보인 특성 임피던스의 실수부는 약 48.7Ω 정도로 전체 주파수 영역에서 거의 일정하다. 그러나 유효 도전율이 σ_{st} 이외의 경우, 주파수에 따라서 임피던스가 크게 변화함을 볼 수 있다. 이와 같이 주파수에 따른 특성 임피던스의 큰 변화는 신호 입력단과 선로간의 임피던스 부정합(mismatch)을 발생시킨다. 즉, 펄스 신호를 인가할 경우, 낮은 주파수 영역에서 신호 입력단으로 재반사되어 원 신호에 간섭을 일으킨다. 이는 전송 선로상의 왜곡 뿐만 아니라 입력단과 선로간의 전력 전달의 효율성을 크게 저하시킨다. 그림 4(b)에 보인 허수부 특성 임피던스로부터, 10 MHz 이상의 높은 주파수에서 임피던스가 0으로 수렴함을 볼 수 있다. 이는 주파수가 증가하여 $G \ll \omega C, R \ll \omega L$ 의 조건을 만족할 때 특성임피던스는 실수부인 $\sqrt{L/C}$ 로 근사되기 때문이다.



(a)



(b)

그림 4. 유효 도전율 변화에 따른 (a) 실수 특성 임피던스 및 (b) 허수 특성 임피던스

Fig. 4. (a) Real and (b) imaginary characteristic impedance to various total effective conductivities.

또한 유효 도전율이 σ_{st} 일 때 허수부 특성임피던스는 식 (5)에 보인 바와 같이 거의 0에 일치함을 볼 수 있으나, 500kHz 부근에서 15 정도의 값을 보이는데 이는 계산과정 중 매우 작은 값을 처리하면서 발생한 것으로 예측된다.

그림 5는 유효 도전율 변화에 따른 감쇄 상수이다. σ_d 의 증가에 따라 감쇄 상수가 증가함을 볼 수 있다. 유효 도전율이 손실 무왜곡 조건을 만족하는 σ_{st} 일 때 10 MHz 영역까지 -29.0 dB/cm의 매우 낮은 값으로 일정한 감쇄 상수를 보여 다른 유효 도전율의 경우에 비하여 균일한 감쇄 특성을 보임을 알 수 있다. 이 결과는 손실 무왜곡 선로일 때 저항과 누설 컨덕턴스가 효과적으로 보상되기 때문이며, 또한 10 MHz 이후부터는 표피효과에 의한 도체 저항의 증가로 감쇄 상수가 증가함을 볼 수 있다.

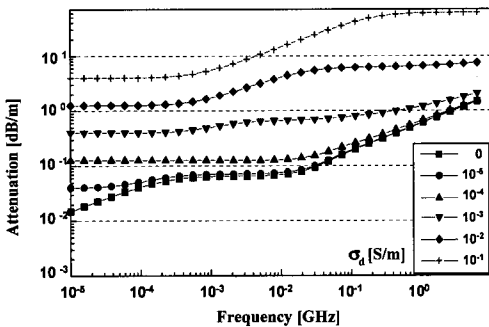


그림 5. 유효 도전율 변화에 따른 감쇄 상수

Fig. 5. Attenuation to various total effective conductivities.

이상의 해석 결과, 기판의 유효 도전율이 σ_{st} 일 때 고속 디지털 선로에서의 무왜곡 전송 특성을 보장할 수 있으며 광대역에서 일정한 특성 임피던스로 전력의 반사손실없이 신호를 최적으로 전달할 수 있음을 확인하였다. 또한, 기판의 추가된 유효 도전율에 의하여 증가된 감쇄 특성은 무시할 정도로 작아 펄스 신호 전송시 미치는 영향이 매우 작다. 이러한 무왜곡 전송 특성 결과는 다른 기판의 경우에도 유효 도전율을 적절하게 조절하여 얻을 수 있다.

V. 무왜곡 전송선로 구현 방안

본 논문의 무왜곡 전송선로 구현 방법을 흐름도로 정리하여 그림 6에 보였다.

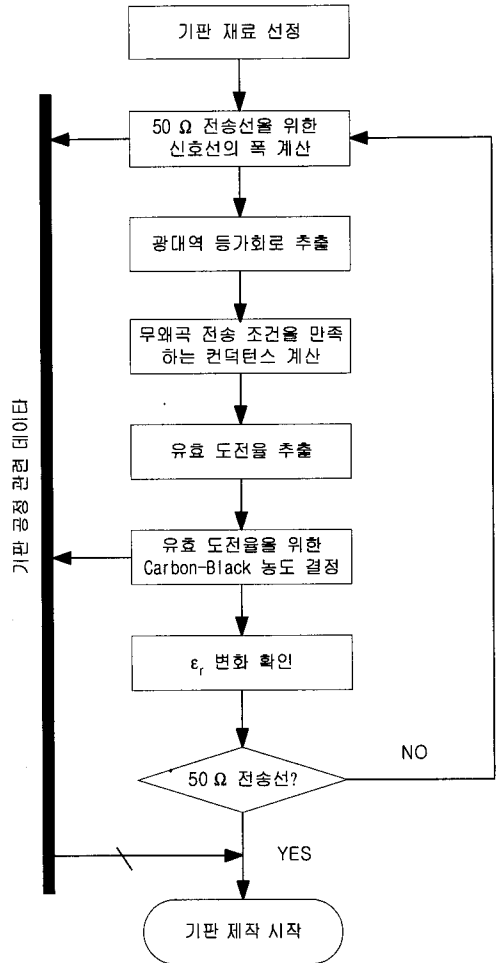


그림 6. 무왜곡 전송선로 구현 방법

Fig. 6. Fabrication flow chart for dispersionless transmission line.

기판 제작중에 Carbon-black 등의 전도성 플라스틱 분말 형태로 균일하게 첨가하여 원하는 누설 기판을 용이하게 제조할 수 있는데, 이는 그림 7에 보인 바와 같이 Carbon-black의 농도(concentration)를 변화시켜면, 도전율을 조절 가능하기 때문이다.

스 신호를 최적으로 전달할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] H-Y. Lee, T. Itoh, "Wideband conductor loss calculation of planar quasi-TEM transmission lines with thin conductors using a phenomenological loss equivalence method," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, pp. 367-370, Long Beach, California, June 1989.
- [2] H-Y. Lee, K.-S. Kong, T. Itoh, "Conductor loss calculation of superconducting microstrip line using a phenomenological loss equivalence method," *Proc. of 19th European Microwave Conference*, London, England, Sep. 1989.
- [3] Josephs, H.J., *Heaviside's Electric Circuit Theory*, London: Methuen, 1946.
- [4] A. R. Blythe, *Electrical Properties of Polymers*, Cambridge University Press, 1979.
- [5] ASM International, *Electronic Materials Handbook*, Volume 1, Packaging, 1989.

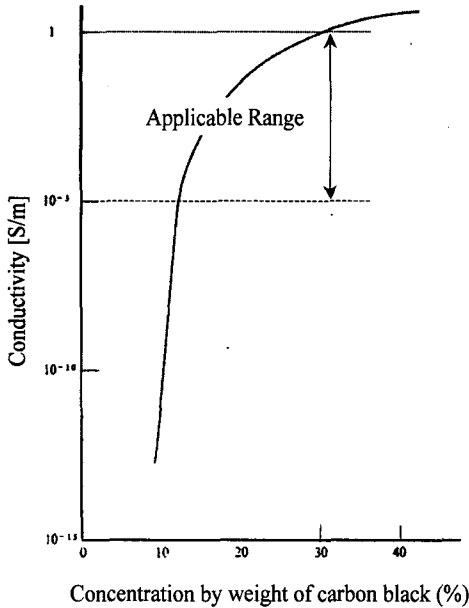


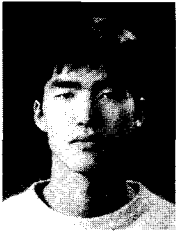
그림 7. Carbon-black 농도에 따른 다중 합성물의 전도율

Fig. 7. The dependence of the conductivity of a poly composite on carbon-black content.

VI. 결 론

무왜곡 전송선로를 얻기 위하여 위상 선형 요소를 이용하는 분산 보상 기법을 제안하고 대표적인 마이크로스트립 전송선에 대하여 해석하였다. 펄스 전송시 저주파 영역에서 도체손실에 기인한 slow-wave 효과로 인하여 펄스 왜곡이 발생한다. 이러한 도체손실에 기인한 저항 성분을 광대역 주파수 영역에서 해석한 다음, 무왜곡 전송 조건을 만족하는 유효 도전율을 찾고, 위상속도 및 특성 임피던스를 계산하였다. 유효 도전율 (σ_d)이 0.0001 S/m일 때 위상속도와 특성 임피던스는 전체 주파수 영역에서 일정하므로 무왜곡 전송 조건을 만족함을 확인하였다. 이 때 추가된 유효 도전율로 인한 감쇄 정도는 무시할 정도로 매우 작음을 관찰하였다. 이로써, 기판의 최적 유효 도전율을 선택하므로써 고속 디지털 선로에서 전력의 반사손실없이 펄

— 저 자 소 개 —



李 仲 鎬(正會員)

1975년 5월 8일생. 1998년 2월 아주대학교 전파공학과 졸업(학사). 1998년 3월 ~ 현재 아주대학교 전자공학부 대학원(석사과정) 재학중. 주 관심 분야는 마이크로파 및 밀리미터파의 전기적 실장 구조 개발과 실장 구조

의 열 해석 등

尹 尙 基(正會員) 第 34卷 D編 第 2號 參照

현재 아주대학교 전자공학부 박사과정

李 海 英(正會員) 第 33卷 A編 第 7號 參照

현재 아주대학교 전자공학부 부교수