

초고주파 대역에서의 기판의 유전상수 및 손실계수 측정

이선하, 한상민, 김영식
고려대학교 전자공학과 전자기술연구소

Measurements of Dielectric constant and Loss tangent of Microwave Substrates

Seon-Ha Lee, Sang-Min Han, Young-Sik Kim
Dept. of Radio Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

In this paper, the method for dielectric constant and loss tangent measurements of microwave substrates using a microstrip line is presented. The two samples of an open-ended line and a short-ended line are made and complex propagation constant is evaluated from the one-port scattering parameter measurements. This method has been automated fully using a personal computer and a vector network analyzer.

1. 서론

최근 마이크로파 대역에 사용되는 반도체 소자의 증가와 함께 송신기나 수신기 내부의 전송 선로에 도파관을 이용하는 것은 적당하지 않다. 도파관은 차단 주파수가 있기 때문에, 넓은 동작 주파수 범위를 갖는 선로로는 적절하지 못하다. 반면에 마이크로파 반도체 소자와 함께 사용되는 소형이면서 경량인 요구 조건을 만족하는 선로가 마이크로스트립 선로이다. 마이크로스트립 선로는 도파관과 비교해서 전송 손실이나 전송 전력 특성이 떨어진다. 그러나 마이크로스트립 선로는 소형, 경량이며 구조가 간단하고 프린터 배선이 가능할 뿐만 아니라, 마이크로파 반도체 소자와의 결합에 용이한 이점을 갖는다. 따라서 송수신기 내의 전송 선로는 물론 마이크로파 대역 회로의 IC화에 없어서는 안 되는 선로이다. 이러한 마이크로스트립 라인을 설계, 제작하는데 있어서 제작에 사용된 기판의 유전특성을 알아야 하는 것은 필수적이다.

이러한 기판의 유전 특성을 측정하기 위한 방법에 대한 연구가 최근 수년간에 걸쳐 활발하게 진행되었다. 전송선로 법, 섭동법, 반사계수 측정법 그리고 공진기법 등 기판이나 유전체의 유전 특성 측정에 대한 많은 연구가 진행되었다. 하지만 전송선로 법은 도파관 내에 측정할 시료 절편을 만들어야 하는 어려움이 있고, 섭동법은 공동 공진기 내에 유전 물질을 증착 시켜야 하므로 기판의 유전 특성을 측정하는 데에는 적합하지 않다[1], [2]. 반사계수 측정법은 도파관과 측정할 기판 사이의 접합이 힘들고, 두께가 얇은 기판의 특성 측정에 어려움이 있다[3]. 유전 특성 측정에 가장 많이 사용되고 있는 공진기법은 정확한 데이터를 얻을 수 있지만, 각 주파수에 대한 기판의 유전 특성을 측정하기 위해 각 주파수 대역별로 공진기를 만들어야 하는 제작상의 어려움과, 얻어낸 데이터를 일일이 정리하여야 하는 번거로움이 있다[4].

본 논문에서는 마이크로스트립 라인으로 개방 선로와 단락 선로를 제작한 다음, 간단히 두 선로의 S-파

라미터 값을 측정함으로써, 기판의 유전상수와 손실 계수를 계산할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 방법으로 프로그래밍 과정을 통하여 간단하면서도 정확하게 기판의 유전 특성을 측정할 수 있을 것이다.

2. 기판의 유전 특성 측정

2.1 종단되어진 전송선로 이론

부하 Z_L 로 종단되어, 거리 l 만큼 떨어진 전송 선로에서 바라본 입력 임피던스는

$$Z_m = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh \gamma l}{Z_0 + Z_L \tanh \gamma l} \quad \Omega \quad (1)$$

과 같이 주어진다. 이때 부하 Z_L 이 개방 되었거나 단락 되었다면 입력 임피던스는 다음과 같이 주어진다.

$$Z_m = Z_0 \coth \gamma l, \quad (Z_L \rightarrow \infty) \quad (2)$$

$$Z_m = Z_0 \tanh \gamma l, \quad (Z_L \rightarrow 0) \quad (3)$$

식(2), (3)으로부터, 주어진 마이크로스트립 선로의 특성저항 Z_0 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Z_0 = \sqrt{Z_m Z_n} \quad \Omega \quad (4)$$

그리고 복소 전파상수 γ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \frac{1}{l} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{Z_n}{Z_m}} \quad \text{m}^{-1} \quad (5)$$

위의 식(4), (5)를 통해서 마이크로스트립 선로의 특성 임피던스(Z_0)와 감쇄 상수(α) 및 전파상수(β)를 구할 수 있다[5].

2.2 마이크로스트립 선로 이론

두께가 d 인 기판 위에, 폭이 w 로 만들어진 마이크로스트립 선로의 구조도가 그림 1에 주어졌다.

주어진 마이크로스트립 선로에서의 선속도와 전파상수는 다음과 같다.

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

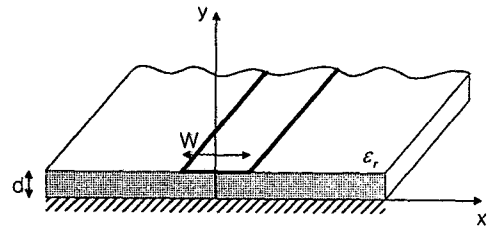


그림 1. 마이크로스트립 선로 구조도

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_r} \quad (7)$$

여기에서 ϵ_r 는 마이크로스트립 선로의 유효 유전상수이고, 식(5)에서 구해진 전파상수와 식(7)을 통해서 유효 유전상수를 구할 수 있다. 그리고 식(8)을 통해 유전상수를 구할 수가 있다[6].

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (8)$$

2.3 프린팅 보상

식(5)에 개방 회로나 단락 회로로 종단되어 부하로부터 떨어진 거리 l 을 대입할 때, 프린징에 의한 영향을 고려하여야 한다. 선로의 길이가 프린징에 의한 영향으로 실제 길이보다 Δl 만큼 늘어나 보이기 때문에, 마이크로스트립 선로의 길이를 대입할 때 프린징을 보정한 값을 대입하여야 한다[4], [7].

논문에서는 RT/duroid 5880 기판을 10mm, 15mm, 25mm 길이로 3개의 개방된 선로를 임의로 제작하여 프린징 보상을 해 주었다. 실험에 사용된 선로는 한쪽만 개방되어 있고 다른 한쪽은 커넥터와 몰려 있으므로, 한쪽의 프린징만 보상해 주면 된다. 표 1은 RT/duroid 5880 기판에 대한 프린징 보상 데이터를 보여주고 있다. 표 1에는 3개 선로의 S-파라미터 값을 통해 각각의 선로의 길이가 $\lambda_g/4$ 로 보이는 주파수를 보여주고 있다. 이 때 마이크로스트립 선로의 파장은 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_g = 4(l + \Delta l) = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

표 1에서는 또한 식(9)를 통해 구한 유효 유전상수(ϵ_r)와 프린징 보상값(Δl)을 보여주고 있다. 여기에서 구한 유효 유전상수는 실험 과정에서 식(7)을 통해 구한 유효 유전상수와 같은 값을 갖는다.

표 1. 프린징 보상 데이터

Line length (mm)	Freq. (GHz)	ϵ_r	Δl (mm)
10	4.6685	1.93	1.53
15	3.2565	1.87	1.79
25	2.0410	1.89	1.65

TLX-9 기판에서의 프린징 보상값도 같은 방법을 통해 구했다.

2.4 유전 상수 및 손실계수의 측정

마이크로스트립 선로상에서의 도체에 의한 손실은

$$\alpha_c = \frac{R_s}{Z_0 W} \text{ Np/m} \quad (10)$$

위 식에서 $R_s = \sqrt{\omega \mu_0 / 2\sigma}$ 는 도체의 표면 저항을 나타낸다. 여기 표면 저항에 기판 도체의 표면 거칠기를 고려하게 되면, 도체의 표면 저항은 다음과 같이 주어진다[8].

$$R_{s, roughness} = R_s (1 + \alpha) \quad (11)$$

$$\alpha = \{[(0.280652(\xi - 1.67) - 0.389282)(\xi - 1) + 0.26] [\xi - 0.5] + 0.48\} \xi$$

$$\xi = \Delta l / \delta, \quad 0 \leq \xi \leq 2$$

식(11)에서 $\delta_s = \sqrt{2l\omega\mu\sigma}$ 는 표피 두께이고, Δ 는 표면 거칠기를 나타내는 지표로, 실험에 사용한 RT/duroid 5880 기판과 TLX-9 기판에서의 이 수치는 $1.4 \mu\text{m}$ 를 갖는다. 이 식을 통해 얻은 $R_{s, roughness}$ 를 식(10)의 R_s 와 대체함으로써, 표면 거칠기에 의한 표면 저항값을 보정할 수 있다. 이 과정을 통해서 표면 저항은 표면 거칠기에 의해 50MHz에서 1.65배, 8GHz에서 1.8배 증가하게 된다.

마이크로스트립 선로의 유전체에 의한 손실은 다음과 같이 나타낸다.

$$\alpha_d = \frac{k_0 \epsilon_r (\epsilon_r - 1) \tan \delta}{2\sqrt{\epsilon_r} (\epsilon_r - 1)} \text{ Np/m} \quad (12)$$

마이크로스트립 선로의 방사손실은 다음과 같다[9].

$$\alpha_r = \frac{60}{8.686} \left(\frac{2\pi d}{\lambda_0} \right)^2 F(\epsilon_r) \text{ Np/m} \quad (13)$$

$$F(\epsilon_r) = \frac{\epsilon_r + 1}{\epsilon_r} - \frac{(\epsilon_r - 1)^2}{2\epsilon_r^2} \log \left(\frac{\sqrt{\epsilon_r + 1}}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \right)$$

위 식(11), (12), (13)과 앞의 식(5)에서 구한 감쇄 상

수와의 관계를 살펴보면 기판의 손실계수를 측정할 수 있다. 도체에 의한 손실과 방사에 의한 손실은 수식적인 계산에 의해 구할 수 있고, 이 결과를 다음에 있는 식(14), (15)에 대입하여 유전체의 손실계수를 구할 수 있다.

$$\alpha_d = \alpha - \alpha_c - \alpha_r \quad (14)$$

$$\tan \delta = \frac{2\alpha_d \sqrt{\epsilon_r} (\epsilon_r - 1)}{k_0 \epsilon_r (\epsilon_r - 1)} \quad (15)$$

2.5 실험결과

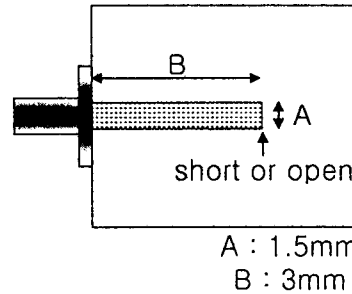


그림 2. 마이크로스트립 선로 제작 패턴

실험에는 RT/duroid 5880 ($d=0.508\text{mm}$, $\epsilon_r=2.2$, $\tan \delta=0.0009$)기판과 TLX-9 ($d=0.635\text{mm}$, $\epsilon_r=2.5$, $\tan \delta=0.002$)기판을 사용하였다. 실험에 사용된 패턴은 그림 2와 같이 $1.5\text{mm} \times 3.0\text{mm}$ 크기로 제작하였다. 측정에 사용되는 선로의 길이가 길게 되면, 그 때의 선로의 길이가 높은 주파수 대역에서 $\lambda_g/4$ 의 값을 갖게 된다. 이때 S-파라미터가 단락되는 위치에 존재하게 되므로, 이는 그 주파수 범위에서 계산값이 크게 틀려지는 결과를 가져오게 된다. 따라서 가능한 짧은 선로를 제작하였다.

지금까지 설명한 방법을 통해 기판의 특성을 측정 한 결과는 그림 3에서 그림 6까지에 나타내었다. 그림 3과 그림 4은 RT/duroid 5880 PTFE 기판에 대한 유전상수와 손실계수의 측정값을 보여주고 있다. 측정된 결과는 유전상수와 손실계수 모두 2GHz이상의 주파수 범위에서 주어진 기판 특성에 잘 맞는

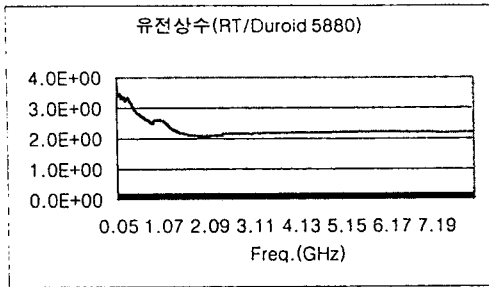


그림 3. RT/duroid 5880 기판의 유전상수

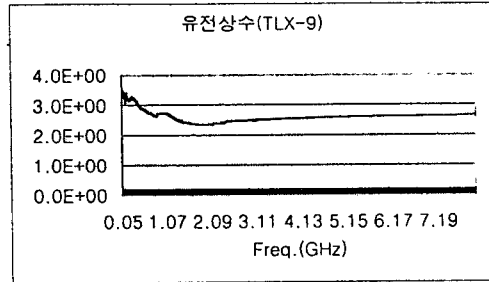


그림 5. TLX-9 기판의 유전상수

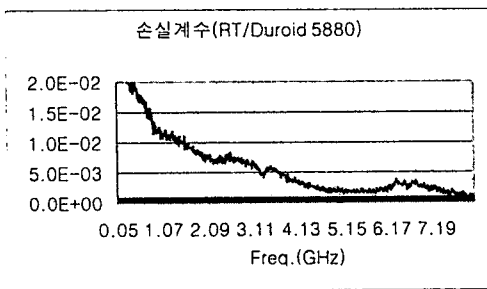


그림 4. RT/duroid 5880 기판의 손실계수

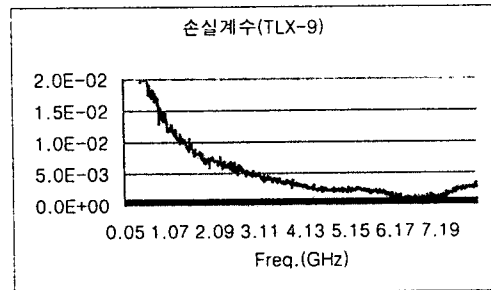


그림 6. TLX-9 기판의 손실계수

것을 알 수 있다. 그림 5와 그림 6은 TLX-9 기판에 대한 유전상수와 손실계수의 측정값을 나타내고 있다. 이 결과 역시 2GHz 이상의 주파수 대에서 기판 특성과 같은 것을 알 수 있다. 하지만 2GHz 이하의 주파수 대에서는 저주파 쪽으로 갈수록 유전상수나 손실계수 모두 점점 커지게 되는 것을 볼 수 있다.

그림 7은 Rogers사에서 제공하고 있는 자료로, 여러 물질의 정규화된(@5GHz) 유전상수와 주파수에 대한 관계를 나타낸 것이다. 여기에는 RO3000, RO4003, RO4350, TLC30, 25N, GML1000, RF35, FR4와 같이 Rogers사에서 판매하고 있는 기판과 시중에서 흔히 구할 수 있는 기판 등에 대한 정규화된 유전상수와 주파수와의 관계를 보여주고 있다. 그림 7을 보면 물질의 유전상수가 저주파 대역으로 갈수록 값이 커지게 되는 것을 볼 수 있다. Rogers사에서 제공한 자료에는 RT/duroid 5880 기판이나 TLX-9 기판에 대한 자료가 없기 때문에, 이들 기판에 대한 정확한 값은 알 수 없지만, 각 기판의 유전상수와 주파수와의 관계가 저주파 대역에서 주파

수에 반비례하게 된다는 것을 알 수 있다. 이는 그림 3과 그림 5에서 볼 수 있는 결과와 일치한다.

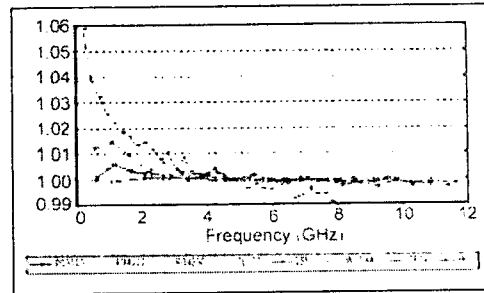


그림 7. 여러 가지 유전체의 정규화된 유전상수

3. 결론

이 논문에서는 공진기법 및 기타 다른 측정법에 비해 간단하고, 보다 효율적으로 기판의 유전 특성을 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법은 단순한 마이크로스트립 선로를 제작하는 것만으로 넓은 주파수 대역에서의 기판 특성을 측정할 수 있으므로, 많은 패턴을 제작해야 했던 공진기법에 비해, 하나

의 패턴만으로도 원하는 주파수 대역에서의 기판 유전 특성을 측정할 수 있다.

본 논문에서 사용된 방법으로 단순하게 S-파라미터를 측정하고, 나머지 모든 계산 과정은 컴퓨터를 이용하여 유전상수와 손실계수를 구할 수 있다. 또한 마이크로스트립 선로 제작 시에 정밀도를 높이고, 측정 과정을 보다 정확하게 개선한다면, 정확한 측정값을 얻을 수 있을 것이다.

논문에서는 이번에 제시한 측정법의 타당성을 2가지 기판의 유전 특성 측정으로 보여주고 있다. 따라서 향후 다양한 기판에 대한 측정을 통하여 본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 증명하고, 측정 오차에 대한 보정도 가능할 것이다.

참고문헌

- [1] R. A. York and R. C. Compton, "An Automated Method for Dielectric Constant Measurements of Microwave Substrates," *Microwave Journal*, pp. 115-122, March 1990.
- [2] H. Sobol and J. J. Hughes, "Measurement of the Permittivity of Insulation Films at Microwave Frequencies," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Technique (Correspondence)*, pp. 377-378, June 1967.
- [3] Arthur R. Von Hippel, *Dielectric Materials and Applications*, The Technology Press of M.I.T., pp. 13-18, 1954.
- [4] James D. Woermcke, "Soft Substrates Conquer Hard Design," *Microwave Journal*, January 1982.
- [5] David K. Chen, *Field and Wave Electromagnetics*, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 449-471, 1989.
- [6] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 104-178, 1998.
- [7] Murray Olyphant, JR. and James H. Ball, "Strip-Line Methods for Dielectric Measurements at Microwave Frequencies," *IEEE Trans. of Electrical Insulation*, vol. EI-5, no. 1, pp. 26-32, March 1970.
- [8] 이주섭, *초고주파 대역에서의 원통형 및 링 유전체 공진기의 특성*, 석사 학위 논문, 고려대학교 전자공학과, 서울, 1998. 12.

[9] Brian C. Wadell, *Transmission Line Design Handbook*. Artech House, pp. 93-111, 1991.