

Microstrip Resonator를 이용한 LTCC 기판의 특성 평가

박 윤 휘
삼성전기(주) ThinkCera

1. 서 론

최근 급격히 확장되고 있는 무선통신분야에는 0.9~1.8 GHz의 휴대폰, 1.5 GHz의 GPS, 2.4 GHz의 Bluetooth 등 상용통신 뿐만 아니라 수십GHz에 이르는 위성통신 등이 있는데, 이를 위해서는 고주파 active IC뿐 아니라, 고품질의 수동소자 및 IC 패키지가 필요하다. 여기에 사용되는 수동소자로는 inductor, coupler, splitter, diplexer 등 단일부품, Front End Module, Power Amplifier Module 등 복합부품, 그리고 Multi Chip Module 등이 있다.

이러한 고주파부품을 이루는 재료는 크게 PCB계열과 세라믹으로 나눌 수 있는데, 세라믹의 경우 지금까지는 Dielectric Resonator (DR)를 이용한 비교적 단순한 형태의 부품이 주로 사용되어 왔다. 하지만 전자통신기기의 소형화의 추세에 맞추기 위해서는 다양한 기능을 작은 크기의 부품에 집적할 필요가 있으므로, 최근에는 주로 적층기술을 기반으로 한 다양한 형태 및 기능의 세라믹부품들이 출현하고 있다. 이는 LTCC(Low Temperature Cofired Ceramics)기술의 발전에 의해 가능해졌다고 할 수 있는데, 이 기술의 특징으로는 높은 전도도의 은전극 사용, L, C, R의 수동소자의 내재화 등 기존 HTCC(High Temperature Cofired Ceramics)에서 불가능하던 기능의 실현과, Hermeticity, 쉬운 적층공법, 낮은 유전손실 및 다양한 유전율 재료구현 등과 같이 기존 Plastic Package의 한계를 넘어서는 점이라고 할 수 있다.^{1,2)}

LTCC기술은 앞에서 설명한 고주파대역의 부품들에

주로 응용되어 그 장점이 발휘될 수 있으므로, 이의 고주파특성을 평가하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 하지만 지금까지 고주파세라믹 부품들의 주요 응용형태인 DR(Dielectric Resonator)의 평가에 대해서는 많은 방법들이 제시되었고 실제로 어느 정도 표준화가 되어 있지만, 현재 LTCC처럼 도체가 포함된 planar type의 세라믹재료의 평가방법은 아직까지 표준화된 방법이 개발되어 있지 않은 상태이다.

LTCC가 적용되는 회로형태는 transmission line, filter 등이 대표적인데, 이의 가장 중요한 것은 정확한 유전율과 적은 신호 감쇄 특성이다. 특히 신호 감쇄 특성은 유전체 자체의 손실, 전극의 손실 및 방사(radiation)에 의한 손실로 나뉠 수 있는데, 이의 종합적인 평가를 위해서는 특정한 test pattern을 이용할 필요가 있다.

본 고에서는 먼저 LTCC를 포함한 유전체재료의 고주파특성 측정법을 간단히 언급한 다음, 도체를 포함한 평판형 LTCC기판의 고주파특성을 평가하는 방법에 대해서 주로 설명하고자 한다.

2. Dielectric Material의 특성 측정법

유전재료의 가장 중요한 평가항목은 유전율과 유전손실(tan δ)인데, 이는 측정주파수에 따라 다음과 같이 서로 다른 평가방법을 사용해야 한다.

1) Parallel Plate Method(0-1 MHz)

DC 및 1 MHz 이하의 저주파의 유전율을 평가하기 위

한 방법으로, 실제로 많은 LTCC 재료업체에서는 이 데이터를 기본적으로 제공하고 있다. 측정기기는 LCR meter나 impedance analyzer를 사용하며, capacitance와 loss tangent를 측정하여 다음의 식으로부터 유전율을 계산한다.

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot t}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (C: \text{capacitance, } A: \text{area, } t: \text{thickness})$$

2) Closed Cavity Resonator and Dielectric Resonator Method (0.5~20 GHz)³⁻⁵⁾

RF 및 microwave 영역에서 현재 가장 많이 사용되고 있는 방법으로, 여러 가지 유사 방법들도 계속 제안되고 있다. Split-cylinder(Kent dielectrometer), tuned split-post, cavity perturbation과 Haaki-Coleman type resonator method들이 이 범주에 포함된다. 공진주파수와 3dB bandwidth로부터 유전율과 loss tangent를 계산할 수 있다. 자세한 사항은 문헌에 설명되어 있으므로 여기에서는 생략하기로 한다.

3) Open Resonator Method (20~100 GHz)^{6, 7)}

이 방법은 millimeter wave 영역인 20-300 GHz에서 저 손실의 유전체를 평가하기 위하여 개발된 것으로서 매우 높은 정밀도를 보인다고 한다. 가장 많이 사용되는 구조로는 두 개의 구형 거울이 Fabry-Perot cavity를 형성하는 Confocal type과, 하나의 평판거울과 또 하나의 구형거울로 이루어진 Hemispherical type이 있다. 공진 주파수와 Q factor로부터 유전율 및 tanδ을 측정할 수 있게 되어 있다.

3. Microstrip Resonator를 이용한 LTCC/도체의 특성 평가법

실제로 가장 응용이 많은 형태인 단관형 및 적층형 구조물은 전극이 개재되면서 복잡한 회로를 작은 면적에 구현할 수 있도록 되어있다. 하지만 소자의 특성값에는 유전체 자체의 특성(유전손실 등) 뿐 아니라, 전극의 전도도, 계면의 roughness 및 전극의 diffusion으로 인한 유전체의 손실 증가 등 전극에 의한 손실영향이 상당히

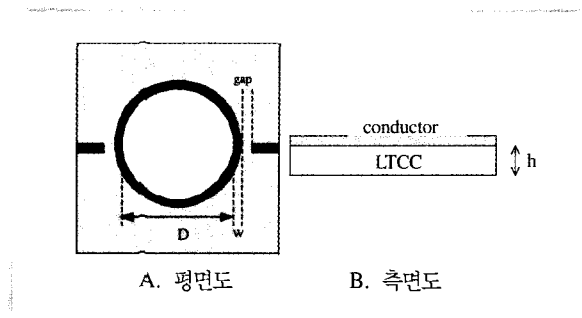


Fig. 1. Ring resonator layout.

작용하게 된다. 따라서 고주파회로설계에 필요한 parameter들을 정확히 도출하기 위해서는 유전체 자체의 특성 뿐 아니라, 전극이 포함 되었을 때의 system적인 특성치를 알아내는 것이 매우 중요하다.

이를 위하여 사용되는 테스트 구조는 microstrip이나 stripline 중에서 선택할 수 있는데, 실제 재료 평가에 있어서는 제작이 용이한 장점이 있는 microstrip 형태의 테스트 pattern을 주로 이용하게 된다. 그리고 패턴은 ring resonator, T-resonator, line resonator 등 공진형과 meander line type이 있는데, 이 중 공진기형은 신호가 증폭되어 나타나므로 측정기구나 jig 등 외부요소에 의한 간섭에도 비교적 정확한 재료특성을 추출하는데 유리하므로 많이 사용된다.

본 고에서 설명하고자 하는 ring resonator는 최근 들어 가장 많은 신뢰성을 인정 받고 있는 방법으로⁸⁻¹⁰⁾ Fig. 1에서 보듯이 gap coupling을 이용하고, ring perimeter의 정수배에서 공진이 일어나도록 설계된 직렬형 공진기이다. 이 구조는 T-resonator나 meander line에서 나타나는 end effect나 bend effect가 없다는 장점이 있으나, curvature effect를 고려해주어야 하는 단점도 있다. 이제부터 자세히 이 ring resonator를 이용한 평가방법을 설명하고자 한다.

3-1. 설계

1) Ring의 지름

먼저 원하는 기본공진주파수를 설정하고, 다음 식에 따라 ring의 지름을 선정한다. 예를 들면 기본공진주파수를 1 GHz로 하고, 실효유전율을 4.5로 가정할 경우,

ring의 둘레는 141.4 mm이고, 지름은 45.0 mm로 설정하면 되는 것이다.

$$Lg = c / f \sqrt{\epsilon_{eff}}$$

f : 기본공진주파수

Lg = lowest order resonance wavelength = ring의 perimeter = π (diameter)

2) 기판 두께 및 선 폭

기판의 두께(h)와 선 폭(W)은 실효유전율(ϵ_{eff})과 함께 transmission line의 특성 임피던스를 결정하는 인자이고, 이의 관계는 다음과 같다.¹¹⁾

$$Z_o = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln\left(\frac{8h}{W} + 0.25\frac{W}{h}\right) \quad \left(\frac{W}{h} \leq 1\right)$$

$$Z_o = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left\{ \frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W}{h} + 1.444\right) \right\}^{-1} \quad \left(\frac{W}{h} \geq 1\right)$$

where $\eta = 120\pi\Omega$

이때 실효유전율은 예상되는 유전율과 기판두께 및 선폭으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} F(W/h)$$

where,

$$W/h = (1 + 12h/W)^{-1/2} + 0.04(1 - W/h)^2 \quad \left(\frac{W}{h} \leq 1\right)$$

$$W/h = (1 + 12h/W)^{-1/2} \quad \left(\frac{W}{h} \geq 1\right)$$

기판의 두께는 제작이 용이한 범위에서 선정을 하는 것이 필요하므로, 적당한 두께를 먼저 선정하고(예를 들면 0.6 mm) 이에 따라 50 ohm impedance를 맞추기 위한 선폭을 계산하는 것이 좋다.

3-2. 제작

평가를 원하는 LTCC powder를 적절한 바인더와 용제를 이용하여 얇은 tape를 제작하고, 이중 한 tape위에 스

크린 프린터를 이용하여 설계 제작된 패턴을 인쇄한다. 다음 특성임피던스(50)에 맞게 계산된 두께를 닳추어 tape를 여러 층 적층 및 압착한 후 이를 소성한다. 소성된 기판의 뒷면에 ground로 전면전극을 인쇄하고 재소성하여 microstrip ring resonator 기판을 완성한다.

3-3. 측정

완성된 기판은 측정을 위해서 양단의 Port를 Network Analyzer에 연결해야 하는데, 이를 위해서는 SMA connector를 납땜하거나 universal test fixture 같은 jig를 이용하게 된다. 미리 calibration된 network analyzer에 기판을 연결한 후, S21 mode에서 공진주파수, 3 dB bandwidth 및 insertion loss를 측정한다.

3-4. 계산 및 평가

1) 실효유전율 (ϵ_{eff})

실효유전율이라 함은 microstrip에서 EM(Electro-Magnetic) field의 일부가 유전율이 1인 공기층을 지나 감으로써 trace line과 ground간의 유전율이 기판차체보다 그 만큼(filling factor 영향) 낮아진 값을 의미하며, microstrip 형태의 기판설계에서 매우 중요한 parameter이다. 또한, 이를 이용하여 기판의 실제 유전율을 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{eff} = (nc/fL)^2$$

n : 공진모드수(n=1,2,3...)

f : 공진주파수

c : Speed of light

2) 유전율 : ϵ_r

기판의 유전율은 위에서 계산한 실효유전율과 EM filed가 공기층을 지나가는 정도를 계산한 Filling factor로부터 다음과 같이 계산되어질 수 있다. 이때, 주파수에 따라 유전율이 변하는 dispersion effect가 있을 수 있으므로 첫째 mode와 higher mode는 구분하여 계산해야 한다.

A. 1st mode의 경우

$$\epsilon_{r1} = \frac{2 \epsilon_{eff1} - (1 - x)}{(1 + x)}, \quad x = \left(1 + \frac{10h}{w}\right)^{0.555}$$

B. Higher mode (n = 2,3,4....)

주파수가 증가함에 따라 TEM field 는 strip 아래에 더욱 집중되므로, ϵ_{eff} 는 주파수에 따라 증가한다(이 주파수에 무관할 경우). 따라서, 이 경우 우리는 ϵ_{eff} 값을 주파수에 따라 계산할 수 있는데, 이 예측 실효유전율이 실제 공진기로부터 측정된 값보다 낮은 경우, 가정과 다르게 ϵ_r 이 주파수에 따라 감소했음을 의미한다. 이런 경우 이를 보정하여 다음과 같이 유전율을 계산해야 한다.

먼저 Dispersion을 고려한 실효유전율을 구하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{eff}'' = \left(\frac{\epsilon_{eff} (measured)}{\epsilon_{eff} (predicted)} \right) \times \epsilon_{eff1}$$

여기서 (eff(predicted))는 Txline12 등 계산기를 이용하여 구할 수 있다. 이로부터 higher mode의 유전율을 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\epsilon_r = \frac{2 \epsilon_{eff}'' - (1 - x)}{(1 + x)}$$

3) Quality Factor : Q

공진기내에 축적되는 에너지와 손실되는 에너지의 비를 의미하는 parameter인 quality factor(Q)는 filter를 구현할 때 insertion loss 및 attenuation에 직접적으로 영향을 미치는 요소이며, 재료 및 설계구조에 영향을 받는다. 같은 설계 pattern에서는 유전체, 도체 및 방사손실의 영향을 받으며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r}$$

where,

- Qu : unloaded Q
- Qd : dielectric Q
- Qc : conductor Q
- Qr : radiation Q

Network Analyzer에서 찾은 각 공진주파수에서의 Q는 다음과 같이 계산할 수 있는데, 이때의 Q 값은 공진기 뿐 아니라 측정기 및 jig의 영향을 포함한 QL(loaded Q) 이다.

$$Q_L = \frac{f}{\Delta f_{3dB}}$$

공진기 자체의 Qu(unloaded Q)는 다음식과 같이 공진에서의 insertion loss를 측정하여 계산 가능하다.

$$\frac{Q_u}{Q_L} = \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{P_r}{P_i}}} = \frac{1}{1 - 10^{\frac{dB1 - dB2}{20}}}$$

dB1 : Insertion loss through resonator at resonance frequency

dB2 : Insertion loss of the circuit w/o resonator

4) Total Loss(Attenuation Constant) : α_t

Transmission line에서 입력 power가 진행방향으로 단위 길이 당 감쇄하는 비율인 attenuation constant는 LTCC/conductor 시스템의 loss 특성을 대변해 주는 값으로써, 서로 다른 유전율의 재료의 비교에도 유용하므로, Du Pont이나 Ferro 등 LTCC 재료업체에서 자사제품의 특성을 소개할 때 주로 사용된다. 이는 앞에서 측정한 Qu, ϵ_{eff} , 공진주파수로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\alpha_t = \frac{\pi f \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c Q_u} \text{ (nepers / length)}$$

5) Conductor Loss : α_c

EM field가 감쇄되는 주요 요인 주 하나인 Conductor 손실은 다음과 같이 계산할 수 있다.¹³⁾

$$\alpha_c = 7.02 \times 10^{-6} R_s A Z_o \epsilon_{eff} \left[\left(\frac{w}{h^2}\right) + \frac{0.667 \left(\frac{w}{h^2}\right)}{\left(\frac{w}{h}\right) + 1.444} \right]$$

when, $W \geq h$

Zo : measured characteristic impedance of trace

Rs : surface resistivity

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi \mu f}{\sigma}}$$

$$A = 1 + \left(\frac{h}{w}\right) \left(1 + \frac{1.25}{\pi} \ln\left(\frac{2h}{t}\right)\right)$$

W : effective electrical width of trace

$$W = W_o + \frac{1.25t}{\pi} \left(1 + \ln\left(\frac{2h}{t}\right)\right)$$

그런데, 고주파에서의 skin effect로 인하여 도체와 LTCC 간의 roughness가 있을 경우 위에서 계산한 것보다 큰 loss가 발생하므로 다음과 같이 이를 고려해주어야 한다.

$$\alpha_c' = F_{sr} \times \alpha_c$$

Fsr : Surface roughness correction factor

$$F_{sr} = 1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left\{ 1.4 \left[\frac{\Delta}{\delta_s} \right] \right\}$$

Δ : mean surface roughness(Ra)

δs : skin depth

$$\delta_s = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \sigma f}}$$

6) Radiation Loss : αr

대기 중으로의 방사손실은 다음과 같이 계산할 수 있지만, 그 크기가 도체나 유전체손실에 비해 충분히 작으므로 보통은 무시할 수 있다.

$$\alpha_r = \frac{\pi f \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c Q_r}$$

$$Q_r = \frac{Z_o}{480 \pi \left(\frac{h}{\lambda_o}\right)^2 R}$$

where,

$$R = \frac{\epsilon_r + 1}{\epsilon_r} + \frac{(\epsilon_r - 1)^2}{2 \epsilon_r^{3/2}} \ln \left(\frac{\sqrt{\epsilon_r} + 1}{\sqrt{\epsilon_r} - 1} \right)$$

7) Dielectric Loss(αd) and tanδ

위에서 계산한 total loss(at), conductor loss(ac) 및 radiation loss(ar)로부터 다음과 같이 dielectric loss를 계산할 수 있다.

$$\alpha_d = \alpha_t - \alpha_c - \alpha_r$$

이로부터 유전체의 고유 물성인 loss tangent(tan)를 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\tan \delta = \frac{\alpha_d c \sqrt{\epsilon_{eff}}}{\pi (\epsilon_{eff} - 1) \epsilon_r (\epsilon_{eff} - 1)}$$

3-5. 측정사례

여기에서는 실제로 서로 다른 LTCC 재료를 대상으로 ring resonator 기판을 제작하여 측정된 결과를 제시하려 한다.

본 test 기판은 3가지 서로 다른 유전율의 LTCC 재료를 이용하여, 특성임피던스 50Ω, 공진주파수 0.9 - 1 GHz가 되도록 제작하였다. 이때, line width는 일정하게 하였고, 두께를 조정하여 특성임피던스를 맞추는 방법을 사용하였다. 또한, 도체는 같은 Ag 전극을 사용하였다.

제작된 기판을 HP8722D를 이용하여 6 GHz까지의 공진주파수, 3dB bandwidth 및 insertion loss를 측정한 뒤, 유전율, Q, Attenuation 및 loss tangent을 계산하였고, 이를 Table 2-5에 나타내었다.

Attenuation 값을 비교해보면 측정주파수 영역에서

Table 1. 설계 Parameter

재 료 명	εr(1MHz)	tanδ(1MHz)	D(mm)	h(mm)	W(mm)	Gap(mm)
Dupont 951	8.0	0.0030	43.5	0.75	0.97	0.15
ThinkCera LTCC A	6.3	0.0015	43.5	0.63	0.97	0.15
ThinkCera LTCC B	7.0	0.001	43.5	0.67	0.97	0.15

Table 2. 유전율

주파수 (GHz)	Du Pont 951	ThinkCera LTCC A	ThinkCera LTCC B
1	8.069	6.48	6.979
2	8.038	6.394	6.926
3	7.97	6.33	6.865
4	8.006	6.311	6.77
5	7.987	6.291	6.791
6	7.977	6.292	6.781

Table 3. Quality Factor

주파수 (GHz)	Du Pont 951	ThinkCera LTCC A	ThinkCera LTCC B
1	93	122	132
2	123	154	165
3	113	153	166
4	121	170	186
5	129	182	190
6	123	183	205

Table 4. Attenuation(dB/inch)

주파수 (GHz)	Du Pont 951	ThinkCera LTCC A	ThinkCera LTCC B
1	0.0546	0.0415	0.0382
2	0.0826	0.0654	0.0611
3	0.135	0.0992	0.0915
4	0.1679	0.1189	0.1084
5	0.1972	0.1388	0.1326
6	0.2475	0.1651	0.1480

Table 5. Loss Tangent(%)

주파수 (GHz)	Du Pont 951	ThinkCera LTCC A	ThinkCera LTCC B
1	0.488	0.230	0.168
2	0.370	0.204	0.164
3	0.510	0.312	0.228
4	0.491	0.249	0.201
5	0.458	0.237	0.216
6	0.468	0.252	0.200

LTCC B재료가 이보다 loss tangent가 상대적으로 큰 Du Pont 951이나 LTCC B재료에 비해 낮은 값을 보이고 있고, 주파수가 증가 할 수록 그 차이는 커짐을 알 수 있는데 이로부터 이 실험에 사용된 도체를 적용할 경우, total loss는 LTCC 유전체 loss에 의해 지배된다고 할 수 있다.

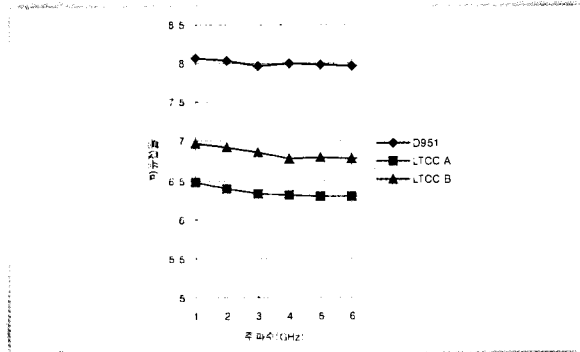


Fig. 2. Dielectric C.

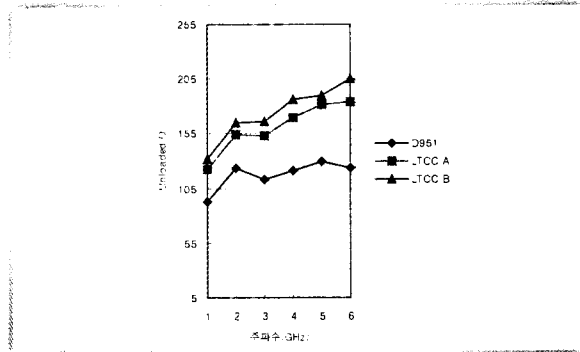


Fig. 3. Unloaded Q.

4. 결 론

Microstrip ring resonator를 이용하여 LTCC 기판 및 도체의 특성을 평가하는 방법에 대하여 알아보았다. resonant cavity법이 LTCC 기판과 같은 유전체 자체의 유전율 및 loss tangent의 평가에는 정확한 방법이기는 하나, 실제 LTCC 부품이나 module에는 동시소성하는 Ag 나 Cu 도체가 포함되므로, 전체의 performance는 LTCC 자체 특성 뿐 아니라 도체의 특성 및 상호작용에 의하여 지배된다. 즉, 아무리 좋은 loss 특성의 LTCC 유전체를 사용하더라도 도체특성이 나쁘면 전체 시스템의 특성도 안 좋게 되는 것이다. 따라서, LTCC를 이용한 효과적인 RF 및 microwave circuit 설계를 위해서는, 본 고에서 제시한 것과 같은 테스트 기판을 이용하여 LTCC system의 Q 및 attenuation loss특성 등 실제 설계에 필요한 데이터를 추출할 필요가 있다고 판단된다.

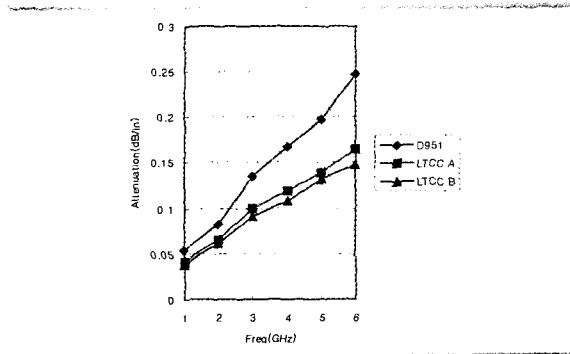


Fig. 4. Attenuation.

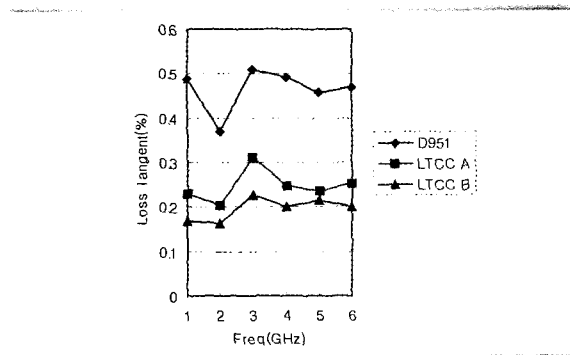


Fig. 5. Loss tangent.

참고 문헌

1. D. L. Wilcox, Sr., Rong -Fong Huang and Steve Xunhu Dai, "Enabling Materials For Wireless Multilayer Ceramic Integrated Circuit(MCIC) Application," *Ceramic Transaction*, **97**, 201-213 (1999).
2. J. Y. Hsu, et. al., "LTCC Materials For High Density Multilayer Interconnect," *Int. J. of Microcircuits and Electronic Packaging*, **23**(3), 280-285 (2000).

3. F. Horner, T. A. Taylor, R. Dunsmuir, J. Lamb and W. Jackson, "Resonance Methods of Dielectric Measurement at Centimeter Wavelengths," *J. IEE*, **93**, Pt. III, 53-68 (1946).
4. R. J. Cook, "Microwave Cavity Methods," in *High Frequency Dielectric Measurement*(Conf. Proc., March 1972), J. Chamberlain and G. W. Chantry, Eds. Guildford, U. K., 12-27, IPC Science and Technology Press, 1973.
5. A. J. Estlin and M. D. Janezic, "Improvement in Dielectric Measurements with a Resonant Cavity," *1991 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 573-579 (1991).
6. A. L. Cullen and P. K. Yu "The Accurate Measurement of Permittivity by Means of an Open Resonator," *Proc. R. Soc. Lond.* **A325**, 493-509 (1971).
7. B. Komiyama, M. Kiyokawa and T. Matsui, "Open Resonator for precision Dielectric Measurements in the 100 GHz Band," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **39**(10), 1792-1796 (1991).
8. P. Pruna, R. D. Gardner, D. L. Hankey and S. P. Turvey, "Microwave Characterization of LTCC," *International Symposium on Advanced Packaging Materials*, 134-137 (1998).
9. S. Vasudevan and A. Shaikh, "Microwave Characterization of LTCC," *International Symposium on Advanced Packaging Materials*, 152-157 (1997).
10. D. I. Amey and S. J. Horowitz, "Microwave Material Characterization," *ISHM '96 Proceedings*, 494-499.
11. E. O. Hammerstad, "Equations for Microstrip Circuit Design," *Proc. European microwave Conf.*, 268-272 (1975).
12. Txline, Applied Wave Research Inc.
13. K. C. Gupta, Ramesh Garg, Inder Bahr, Prakash Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines*, 2nd ed. Artech House, 1996.