

論文95-32A-3-9

유전체 원주공진기법에 의한 고주파 유전특성 측정에 관한 연구

(Study on the Microwave Dielectric properties in the Dielectric Rod Resonator Method)

金敬龍*, 金旺燮*, 崔煥*

(Kyung Yong Kim, Wang Sup Kim, and Hwan Choi)

요약

유전손실이 작을 경우 ($\tan\delta \leq 10^{-4}$) 유전손실에 영향을 주는 측정 변수들에 대하여 양단 단락형 유전체 공진기법(Hakki-Coleman 방법)으로 조사하였다. 평행도체판의 비도전율 (σ_r) 값을 5% 이내로 제어하여야 유전율의 표준편차는 0.07 이하, $\tan\delta$ 의 표준편차는 0.06×10^{-4} 를 얻을 수 있다. 평행도체판의 표면조도는 $0.07 \mu\text{m}$ 이하로 제어해야 주파수에 따른 표면저항 (R_s)를 줄일 수 있다. 측정 probe 루프의 크기에 관계없이 유전율의 경우 $\pm 0.02\%$ 의 오차를 가진다. Q값은 probe의 크기가 4mm 이하가 되어야 하며 Q값이 클수록 probe의 크기를 작게 할수록 신뢰성 있는 측정값을 얻을 수 있다. probe 루프와 시편과의 거리는 공진주파수의 삽입손실이 $-15\text{dB} \sim -30\text{dB}$ 되어야 정확한 측정값을 얻을 수 있다.

Abstract

Measurement factors for the dielectric properties of low dielectric loss materials ($\tan\delta \leq 10^{-4}$) were investigated using the dielectric rod resonator method. It was shown that the relative conductivity (σ_r) should be controlled within a 5% to obtain the standard deviations of less than 0.07 for permittivity ϵ_r and 0.06×10^{-4} for $\tan\delta$ respectively. Surface resistivity (R_s) could be reduced when the surface roughness of parallelled conducting plate was less than $0.07 \mu\text{m}$. Measurement error for the permittivity was $\pm 0.02\%$ independent of probe loop size, whereas the error in Q value was reduced with the decrease in probe loop size and also with the increase in the absolute values of Q. Reliable Q values were determined with the probe loop size of less than 4mm. The accurate measurement for the distance between the measuring probe loop and the sample could be obtained when the insertion loss of resonant frequency ranged $-15\text{dB} \sim -30\text{dB}$.

I. 서론

정보화 사회의 발전과 더불어 마이크로파 통신 시스템의 역할이 중요해짐에 따라 마이크로파를 이용한 민

생용 기기의 이용이 활발해져 위성방송 시스템(10~12GHz)과 휴대전화(800MHz~1GHz)등에 사용되는 각종 마이크로파 소자의 개발이 진행되고 있다. 세라믹 유전체 재료들은 UHF대 및 SHF대의 고주파용 부품인 필터와 발진기의 소형화에 많이 응용되고 있다. 고주파 유전체 재료에 요구되는 특성으로는 (1) 비유전율(ϵ_r)이 클것 (2) 유전체 손실($\tan\delta$)이 작을것 (3) 공진주파수 온도계수(τ_f)가 안정할것 등이다. 세라믹

* 正會員, 韓國科學技術研究院
(Ceramic Processing Center, KIST)
接受日字: 1994年 10月 19日

유전체 재료의 개발 및 응용을 위해서는 고주파대역에서 정확하고 신뢰성 있는 유전특성 측정 방법을 확립하는 것이 매우 중요하다. 고주파대역에서 유전특성을 측정하는 방법으로는 coaxial line을 이용한 S-parameter 방법과 cavity resonator 를 이용하는 섭동법(perturbation method) 및 유전체 공진기법(dielectric rod resonator method)등이 있다. S-parameter 방법은 유전율의 주파수 분산을 연속적으로 구할수 있으며 특히 유전손실이 0.1 이상의 높은 손실을 갖는 유전체 재료 측정에 사용되나 시료와 선로의 접촉도에 따라 측정 정밀도가 크게 변하기 때문에 고주파용 유전체의 정밀한 측정에는 적합하지 않다. 섭동법은 공진기내에 작은 시편을 넣어 공진특성의 변화를 측정 하는 방법으로서 1) 측정주파수의 범위가 한정되어 있으며 2) 유전율의 측정 정밀도가 낮으며 3) 시료를 공진기의 크기에 맞추어 가공 하기 어려운 점이 있다. 따라서 섭동법은 유전체 재료 개발의 초기 단계의 소량 다품종 측정 및 상온에서 보통의 유전손실(Q : 50~5000) 을 갖는 유전체를 필요한 주파수 영역에서 측정하기에 적당하나 저손실 유전체의 정밀한 측정에는 적합하지 않다. 유전체 공진기법은 측정 시편의 크기에 제한을 적게 받으며 낮은 유전체 손실과 높은 유전율 측정에 있어서 정밀 측정이 가능하기 때문에 고주파 대역에서 유전특성을 측정하는 정확한 방법으로 많이 사용되고 있으며 IEC (International Electrotechnical Commission)에서 표준 측정방법으로 추천되었다. 유전체 공진기법은 유전율 $\epsilon_r = 5 \sim 500$, 유전체 손실 $\tan \delta = 10^{-2} \sim 10^{-5}$ 측정주파수 $f_0 = 2 \sim 20GHz$ 범위에서 사용 가능하나 유전특성의 정확한 측정이 공진주파수 f_0 와 공진주파수의 Q로부터 구하여 지기 때문에 Q값 손실의 대부분인 평행단락판의 손실 및 측정 Jig 의 구조적 손실을 줄일수록 유전체의 정확한 손실이 측정 가능하다. 일반적으로 양단 단락형 유전체 공진기법으로 유전체 측정시 오차의 범위는 유전율이 $\pm 0.1\%$, 도체 표면저항 R_s 는 약 1.2%, $\tan \delta \leq 10^{-5}$ 일 경우에는 약 $\pm 12\%$ 오차를 갖는다고 보고 되었다^[1]

본 연구에서는 $\tan \delta < 10^{-4}$ 일 경우 측정시 $\tan \delta$ 에 영향을 주는 다음의 측정 변수들에 대한 검토를 통하여 측정시 최적 조건을 구하고자 하였다.

- 1) TE_{011} , TE_{013} 모드를 이용한 도체판의 정확한 상대 도전율(σ_r) 계산
- 2) 도체판의 표면 조도에 따른 영향
- 3) 시편과 측정 probe loop size에 의한 영향

4) 반응표면 분석법에 의한 측정 연구

II. 이론적 배경 [1~3]

측정에 사용한 유전체 원주 공진기의 구조를 그림 1에 나타내었다.

직경이 d 이고 높이가 h 인 원주형 유전체를 직경이 d보다 적어도 3배 이상 되는 두 평행 도체판 사이에 넣고 밀착하여 TE_{0m1} 모드를 측정하여 유전율 및 유전손실 $\tan \delta$ 를 구한다.^[1]

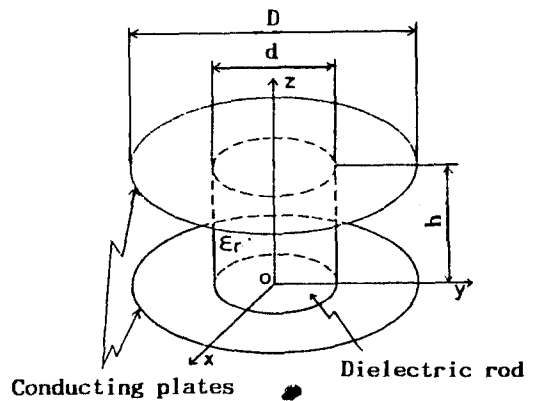


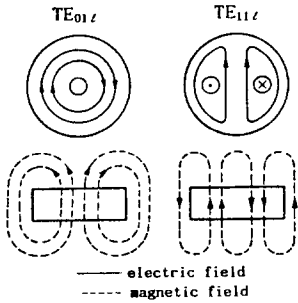
그림 1. 평행 도체판을 이용한 유전체 원주 공진기 구조

Fig. 1. Configuration of a cylindrical dielectric rod resonator short-circuited at both ends by two parallel conducting plates.

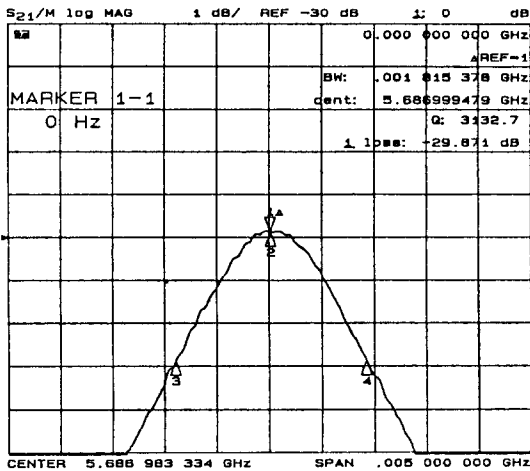
d/h 크기의 비는 공진모드의 혼합을 피하기 위하여 1.0~1.3, 1.9~2.3 및 3.0~3.3 이 되게 하여야 TE_{0m1} 모드가 인접 모드에 의하여 간섭 받는것을 줄일 수 있다 [1]. 임의의 공진주파수에서 유전체 공진기의 크기 및 공진주파수의 모드 확인은 일반적으로 모드 차트를 이용한다 [2]. 유전체의 유전율 ϵ_r 과 유전손실 $\tan \delta$ 는 TE_{0m1} 모드의 공진주파수 f_0 와 무부하 Q_u 를 측정하여 계산할 수 있다. 측정에는 TE_{011} 공진모드를 사용한다. (m=1)

그림 2에는 원주형 유전체 공진기의 TE_{011} , TE_{111} 모드와 측정에 사용하는 TE_{011} 모드의 공진주파수를 나타내었다.

TE_{011} 공진모드의 f_0 로부터 λ_0 , λ_g 와 v_2 가 계산된다.^[1]



(a)



(b)

그림 2. a) 원주형 유전체 공진기의 TE_{01z} , TE_{11z} 모드

b) TE_{01z} 공진모드의 주파수 특성
($\epsilon_r=38$, $d=12.7\text{mm}$, $h=5.6\text{mm}$)

Fig. 2. a) TE_{01z} , TE_{11z} mode of dielectric rod resonator

b) Frequency response of TE_{01z} mode resonance
($\epsilon_r=38$, $d=12.7\text{mm}$, $h=5.6\text{mm}$)

$$v^2 = \left(\frac{\pi d}{\lambda_0}\right)^2 \left[\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g}\right)^2 - 1 \right] \quad (1)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}, \quad c = 2.9979 \times 10^{11} \text{ [mm/sec]}$$

$$\lambda_g = \frac{2h}{l}, \quad (l = 1, 2, 3, \dots)$$

λ_0 는 공진파장, λ_g 는 유전체 전송선로의 유도 파장

이다.

v_2 값을 다음의 관계식에 이용하여 u_2 의 값을 결정한다.

$$u \frac{J_0(u)}{J_1(u)} = -v \frac{K_0(v)}{K_1(v)} \quad (2)$$

$J_n(u)$ 는 1종 Bessel 함수이고, $K_n(v)$ 는 수정된 2종 Bessel 함수이다. 여기서 유전율 ϵ_r 은 다음의 식으로 나타내어진다^[1].

$$\epsilon_r = \left(\frac{\lambda_0}{\pi d}\right)^2 (u^2 + v^2) + 1 \quad (3)$$

Q_u 의 값은 TE_{01z} 모드 공진주파수 f_0 와 출력이 1/2 되는 지점의 대역폭 Δf 를 측정하여 계산한다.

$$Q_u = \frac{f_0 / \Delta f}{1 - At} \quad (4)$$

$$At = 10^{-IL_0 \text{ [dB]} / 20}$$

$IL_0 = f_0$ 에서의 삽입손실 이 때 $\tan \delta$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \frac{A}{Q_u} - BR_s \quad (5) \\ &= \frac{A}{Q_u} - \frac{B'}{\sqrt{\sigma_r}} \end{aligned}$$

R_s 는 평행 도체판의 표면 저항으로서

$$\begin{aligned} R_s &= \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma}} \\ &= \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_0 \sigma_r}} \quad (6) \\ &= 0.825 \times 10^2 \sqrt{\frac{f_0 \text{ [GHz]}}{\sigma_r}} \text{ [} \Omega \text{]} \end{aligned}$$

σ : 평행 도체판의 도전율

σ_0 : 국제 표준 연동의 도전율 (=5.8x107 S/m at 25°C)

σ_r : $\frac{\sigma}{\sigma_0}$ 상대 도전율로 표시한다.

일반적으로 R_s 대신에 σ_r 을 사용하는데, σ_r 은 도체표면의 조도가 표피 두께(skin depth)에 비하여 무시할 수 있는 주파수 영역에서는 주파수에 무관하기 때문이다.

식(5)의 A, B, B'는 다음과 같이 주어진다.

$$A = 1 + \frac{W}{\epsilon_r} \quad (7)$$

$$B = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^3 \frac{1+W}{30 \pi^2 \epsilon_r l},$$

$$B' = B \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma_0}} \quad (8)$$

여기서 W는 다음의 함수로 표시된다.^[3]

$$W = \frac{J_1^2(u) K_0(v) K_2(v) - K_1^2(v)}{K_1^2(v) J_1^2(u) - J_0(u) J_2(u)} \quad (9)$$

$\tan \delta \leq 10^{-4}$ 인 저손실 유전체에서는 평행 도체판의 σ_r 값이 측정값에 많은 영향을 준다. 따라서 정확한 σ_r 값을 구하기 위하여 그림 3에 나타난 것같이 직경이 같고 길이가 정수배 (일반적으로 3배, $l=3$)인 유전체를 사용한다.

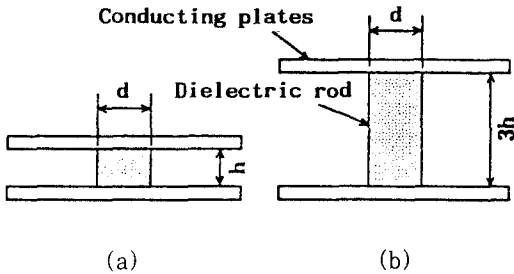


그림 3. 도체판의 도전율을 측정하기 위한 유전체 시편

(a) TE_{011} 모드 (b) TE_{013} 모드

Fig. 3. Configurations of dielectric rod resonators for measurement of conductivity of conducting plates.

(a) TE_{011} mode (b) TE_{013} mode

TE_{011} 모드의 공진주파수를 f_{01} , 무부하 Q를 Q_{u1} 이라 하고 TE_{013} 모드의 공진주파수를 f_{03} , 무부하 Q를 Q_{u3} 이라고 하면 유전체의 길이가 정확히 3배 $f_{01} = f_{03}$ 이 되며 Q_{u3} 은 Q_{u1} 보다 크게 된다.

유전체의 유전율 및 $\tan \delta$ 가 같다고 보면 식(5)에서

$$\frac{A_1}{Q_{u1}} - B_1 R_s = \frac{A_l}{Q_{ul}} - \frac{B_l}{l} R_s \quad (l=3) \quad (10)$$

이 된다. 이때 R_s 와 σ_r 을 구하면

$$R_s = 30\pi^2 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^3 \frac{\epsilon_r + W}{1+W} \frac{l}{l-1} \left(\frac{1}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{ul}} \right) \quad (11)$$

$$\sigma_r = \frac{(0.825 \times 10^{-2})^2 \cdot f_0 [\text{GHz}]}{R_s^2} \quad (12)$$

이 된다. (12) 식의 σ_r 을 이용하여 TE_{011} 모드의 $\tan \delta$ 를 계산한다. 고주파 대역에서 유전 손실은^[4]

$$\tan \delta \approx \gamma(2\pi f) / (2\pi f_0)^2$$

으로 표시하며, 고주파 재료에서의 유전손실은

$$Q = \frac{1}{\tan \delta}$$

로 정의 하여 Q 값을 이용 하지만

$$Q \cdot f = (2\pi f_0)^2 / (2\pi \gamma) = \text{constant}$$

가 성립하여 특정 주파수에서 $Q \cdot f$ 의 값이 유전재료의 유전손실을 평가하는 지수로 사용된다.

III. 실험 방법 및 결과

1. 평행 도체판의 비도전율 σ_r 측정

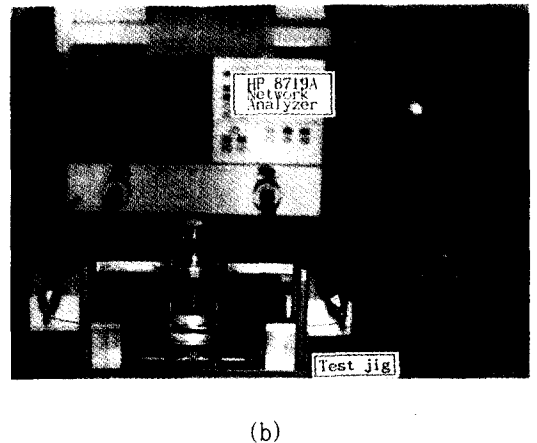
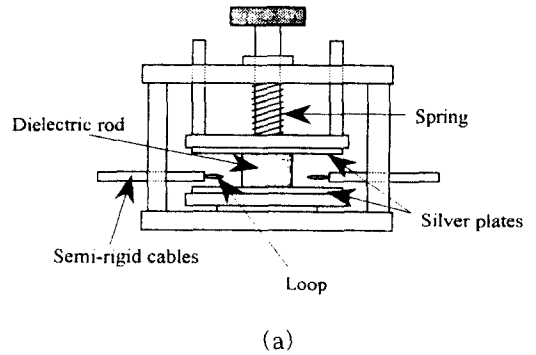


그림 4. 측정 지그의 개략도 및 측정 시스템

Fig. 4. Configuration of measurement jig system.

그림 4에는 실험에 사용한 측정 지그의 개략도 및 측정 시스템을 나타 내었다. 평행 도체판의 비도전율을

정확하게 측정하기 위하여 99.9%의 은판(silver plate)을 사용하였다. 은판은 매회 경면 연마하여 측정에 사용하였으며 표준 시편은 6~7GHz 에서 우수한 고주파 유전특성을 나타내는 BaTi₄O₉계 마이크로파 유전체(유전율 $\epsilon_r = 36 \sim 37$, $Q \cdot f = 40000 \sim 50000$ ^[5,6])를 일반적인 세라믹스 제조방법으로 TE₀₁₁, TE₀₁₃의 2개의 유전체를 제작하여 측정하였다.

표 1과 그림 5에는 측정결과를 나타내었다. 3회반복 측정한 결과 유전율의 표준편차($\Delta \epsilon_r$)는 0.05~0.07 이고, σ_r 의 측정오차가 5% 발생하면 $\tan \delta$ 는 0.06×10^{-4} 정도의 차이가 생긴다.

표 1. 평행 도체판의 상대 도전율(σ_r) (BaTi₄O₉ 유전체)

Table 1. Measured σ_r valve of silver parallel plate (BaTi₄O₉ dielectric).

	Resonant Mode	
	TE ₀₁₁	TE ₀₁₃
d + Δd (mm)	2.58 ± 0.002	12.58 ± 0.005
h + Δh (mm)	5.61 ± 0.001	16.83 ± 0.005
f ₀ + Δf_0 (GHz)	5.913 ± 0.005	5.913 ± 0.015
Qu + ΔQu	3169 + 20	5237 + 50
v ²	11.799	11.797
u ²	9.461	9.461
$\epsilon_r \pm \Delta \epsilon_r$	36.1 ± 0.05	35.9 ± 0.07
w	0.060035	0.066035
$\tan \delta \pm \Delta \tan \delta$	$(1.26 \pm 0.02) \times 10^{-4}$	
R _s (25°C)(Ω)	$(2.2129 \pm 0.04) \times 10^{-2}$ at 5.9 GHz	
σ_r (25°C)(%)	82.27 ± 3.0	

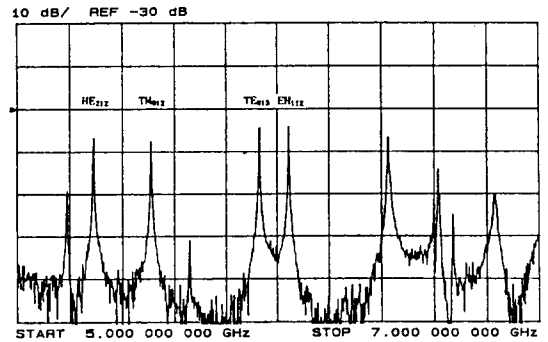


그림 5. TE₀₁₁, TE₀₁₃모드 공진 주파수 측정 (BaTi₄O₉ 유전체)

- (a) TE₀₁₁, d=12.58mm h=5.61mm
- (b) TE₀₁₃, d=12.58mm h=16.8mm

Fig. 5. Measured resonance frequency of TE₀₁₁, TE₀₁₃ mode.(BaTi₄O₉ dielectric)

- (a) TE₀₁₁, d=12.58mm h=5.61mm
- (b) TE₀₁₃, d=12.58mm h=16.8mm

2. 평행 도체판의 표면조도에 따른 영향

공기중에 전자계가 존재할 경우에 금속과 공기와의 경계면에서 도체 표면의 도전전류 I_c는^[7]

$$I_c = I_0 e^{-x/d - j \cdot x/d}$$

$$d = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \text{ (skin depth)}$$

로 표시되며, 전류 밀도에 따른 손실 P_c는

$$P_c = \int_0^\infty \frac{|I_c|^2}{\sigma} dx = \frac{I_0^2}{\sigma} \int_0^\infty e^{-2x/d} dx = \frac{d \cdot I_0^2}{2\sigma}$$

가 되며 전체 전류를 I 라 하면

$$I = \int_0^\infty I_c dx = \frac{d \cdot I_0}{1 + j}$$

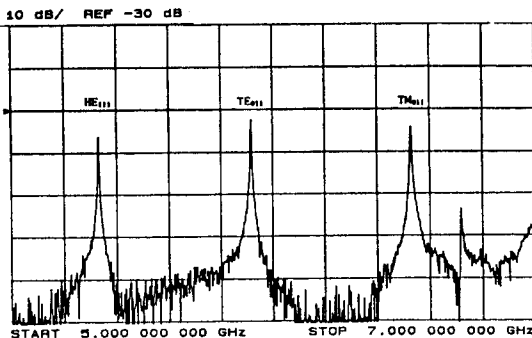
$$|I| = \frac{d \cdot I_0}{\sqrt{2}}$$

가 되어 발생하는 손실은

$$\frac{d}{\sigma} \cdot \left(\frac{I_0}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{d \cdot I_0^2}{2\sigma}$$

이 된다.

이를 mks 단위로 계산한 저항값 R_s (표면저항 : surface resistivity)는 다음의 식으로 계산한다.



(a)

$$R_s = \frac{1}{\sigma d} [\Omega]$$

그림 6에는 은판의 주파수에 따른 d 와 R_s 의 관계를 나타내었다.

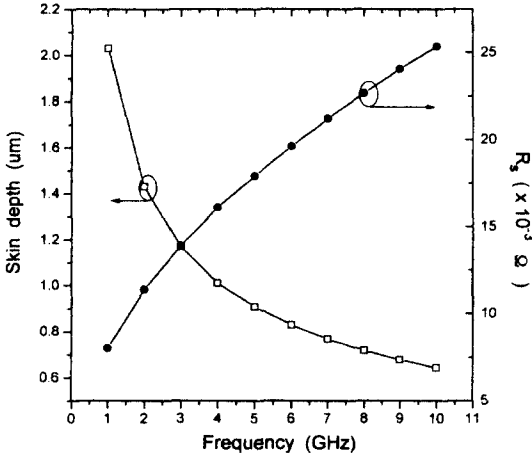


그림 6. 주파수에 따른 은판의 표피 침투 깊이 (d) 와 표면저항 (R_s)

Fig. 6. Skin depth(d) and surface resistivity (R_s) of silver plate as a function of frequency.

표 2. 평행 도체판의 조도에 따른 유전특성
Table 2. Dielectric properties as a function of paralleled silver plate roughness.

Murata 조성	Spec.	유전 특성	은판표면조도				
			0.325 μ m	0.245 μ m	0.117 μ m	0.069 μ m	0.019 μ m
UH	38.9 + 0.5	Er	39.0	39.1	38.7	38.7	38.7
	7158	Q	5153	5337	6225	7709	7988
	at 5.685 GHz	f_c	5.685				
	42000 min.	Q · f	9174	30200	35397	43824	45415
MF	38.3 + 0.5	Er	38.8	39.1	39.1	38.8	38.7
	8492	Q	6050	6410	8353	9907	10132
	at 5.685 GHz	f_c	5.686				
	49000 min.	Q · f	34362	36231	47383	56345	57622
SC	28.6 + 0.5	Er	28.9	28.9	28.8	28.8	28.8
	11789	Q	7738	8102	11559	14079	16083
	at 6.582 GHz	f_c	6.582				
	84000 min.	Q · f	50868	53248	76021	92689	105881
BPNT	87.0 ± 1.0	Er	86.9	86.4	86.4	86.4	86.5
	987	Q	1055	1100	1131	1194	1213
	at 4.05 GHz	f_c	4.05				
	4000 min.	Q · f	4277	4473	4600	4853	4930

평행 도체판의 조도에 따른 유전 특성의 영향을 측

정하기 위하여 현재 상품화된 일본 Murata 의 세라믹 유전체 3종류 (UH, MF, SC Series)와 자체 제작한 고유전율 유전체 (Ba, Pb) O-Nd₂O₃-TiO₂^[8] (이하 BPNT 라 칭함)를 사용하였다.

표 2와 그림 7에는 은판조도에 따른 측정 결과를 나타내었다.

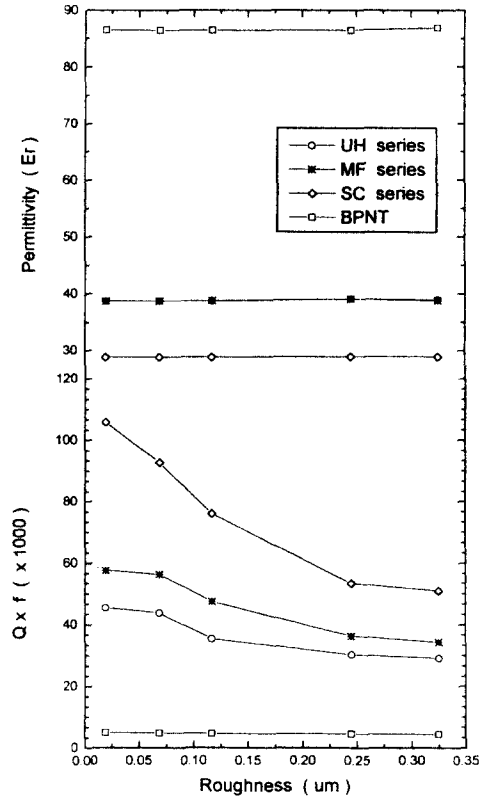


그림 7. 평행 도체판의 조도에 따른 Murata 유전체의 유전율 과 Q · f 값

Fig. 7. Permittivity and Q · f of value Murata dielectrics as a function of paralleled silver plates roughness.

Hakki-Coleman 방법으로 고주파용 유전체 측정시 상하 도체가 시편과 밀착하게 된다. 따라서 측정주파수에서의 도체 표면 조도와 표피 침투 깊이(skin depth)의 비가 증가 할수록 도체 표면 저항(R_s) 이 증가하게 되어 유전 특성에 영향을 주게 된다. 그림 7에 나타난 것 처럼 Murata의 UH, MF, SC series 유전체가 유전율은 표면의 조도에 관계없이 일정하나 Q · f 값은 표면조도가 0.07 μ m 이하가 되어야 Murata에서 제시한 사양에^[8] 일치하게 된다.

따라서 Hakki-Coleman 측정방법 사용시 측정 주파수가 고주파로 올라갈때 즉 시편의 크기가 작을수록

표면조도 관리가 매우 중요함을 알 수 있다.

3. 시편과 측정 probe loop 에 의한 영향

직경이 2.2mm인 semi-rigid cable의 결합 loop size 를 1, 2, 4, 6, 8, 10mm 로 하였을때의 공진 주파수 f_0 , 유전율 ϵ_r , $\tan\delta$, $Q \cdot f$ 를 표 3에 나타내었다. 측정 유전체는 Murata에서 시편중인 유전체 공진기를 사용하였으며 Murata에서 제시한 사양과 비교하였다.

표 3. 결합 loop size 에 따른 유전특성 (Murata dielectrics)
Table 3. Measurement of dielectric properties as a function of loop size (Murata dielectrics).

시편	loop size (mm)	f_0 (GHz)	ϵ_r	σ	$\tan\delta$ ($\times 10^{-4}$)	$Q \cdot f$
Murata spec.			38.3 ± 0.5	$700 >$ at 7GHz	1.428	$49000 \geq$
DRD127 MF056A	1	5.676	38.8	10244	0.976	58152
	2	5.679	38.8	10911	0.916	58412
	4	5.677	38.8	8192	1.220	46516
	6	5.666	39.0	8070	1.239	45727
	8	5.675	38.8	8581	1.165	48705
	10	5.670	38.9	8906	1.122	50503
			28.6 ± 0.5	$8400 >$ at 10GHz	1.190	$84000 \geq$
DRD127 SF056B	1	6.569	28.9	14639	0.683	96166
	2	6.566	29.0	11650	0.858	76500
	4	6.564	29.0	11895	0.840	78090
	6	6.565	29.0	5528	1.809	66781
	8	6.565	29.0	9145	1.093	60047
	10	6.562	29.0	9549	1.047	62666

표 4. Murata 유전체 공진기 특성
Table 4. Properties of Murata dielectrics.

series	UH	MF	SC	RF
ϵ_r	38.9 ± 0.5	38.3 ± 0.5	28.6 ± 0.5	31.3 ± 0.5
$Q \cdot f \geq$	42000	49000	84000	120000

그림 8에는 측정 probe loop size 변화에 따른 유전율 및 $Q \cdot f$ 의 변화를 측정된 결과를 나타내었다. 유전율은 loop size 의 크기에 관계없이 일정하게 측정되며, Q 값이 적은 유전체는 loop size에 영향을 거의 받지 않으나 Q 값이 큰 유전체일수록 loop size를 작게 하여야 표 4의 Murata 사양^[8]과 일치함을 알 수 있다.

그림 9에는 측정 probe size를 5mm로 고정 하였

을때 시편과 loop와의 거리에 따른 $Q \cdot f$ 의 값을 나타내었다. 그림에서 나타나듯이 Q 가 낮은 UH, MF series에서는 loop가 시편으로부터 1mm 이상만 떨어지면 Q 값이 거의 일정하게 나타나지만 Q 가 높은 SC, RC series에서는 거리가 멀어지면 $Q \cdot f$ 값이 증가하다가 일정거리 이상에서는 다시 감소하기 시작한다.

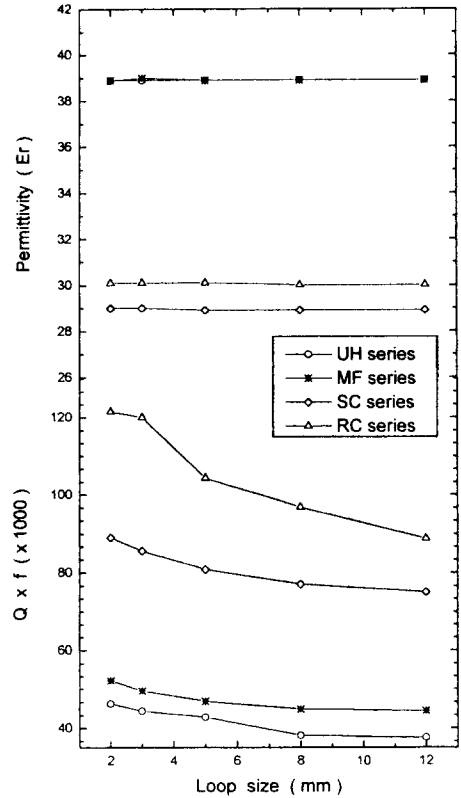


그림 8. 측정 probe loop 크기에 따른 유전특성 (Murata dielectrics)

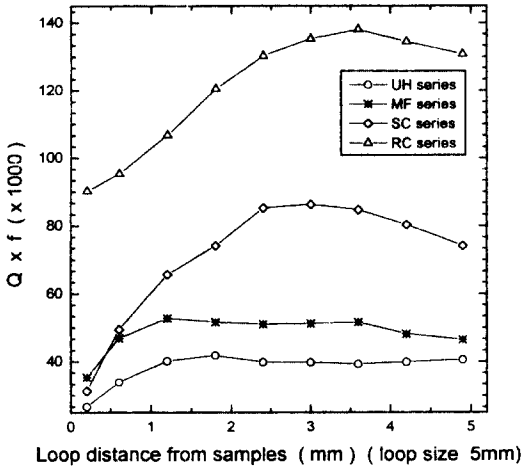
Fig. 8. Dielectric properties as a function of probe loop size. (Murata dielectrics)

따라서 그림 8에서의 loop size에 의한 영향과 그림 9에서의 시편과 probe loop 와의 거리에 따른 영향을 고려하여 측정시편의 유전 특성에 적합한 측정 조건을 구하여야 한다. 본 실험에서는 이러한 측정 조건을 다음의 반응표면 분석법을 이용하여 구하였다.

4. 반응 표면 분석법 (Response Surface Methodology)에 의한 측정 연구^[9,10]

여러가지 유전체 표준시료를 사용하여 Hakki-Coleman 법으로 유전율 및 Q 를 측정하고 측정 jig 와 시편과의 상호작용의 영향과 그 정도를 고찰하였다.

Hakki-Coleman 측정 방법의 다음의 측정 항목들을 변수로 놓아 최적의 측정 조건을 구하는 방법을 반응 표면 분석법을 이용하여 계산하였다.



Loop distance from samples (mm) (loop size 5mm)

그림 9. 시편과 측정 probe loop 와의 거리에 따른 Q·f 값 (Murata dielectrics) (probe loop size : 5mm)

Fig. 9. Q·f value as a function of probe loop distance from sample (Murata dielectrics) (probe loop size : 5mm).

측정방법	측정항목(변수)
Hakki-Coleman	1) 공진주파수 f_o [GHz]
	2) 삽입손실 IL_o [dB]
	3) 결합 loop size [mm]
	4) 유전율 ϵ_r
	5) Q·f
	6) 도체판의 표면조도

반응표면분석은 여러개의 변수 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수 η 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다. 일반적으로 반응표면 분석법을 통하여 얻을 수 있는 정보는 다음과 같다.

- 1) 독립변수들 ($\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_k$)과 종속변수 η 간의 함수관계를 데이터로부터 추정하여 독립변수들의 값의 변화에 따라서 반응량(종속변수의 값)이 어떻게 변화하는 가에 대한 정보.
- 2) 종속변수의 값을 최적화시킬 수 있는 독립변수의 값 및 범위 통상은 독립변수의 값을 선형변환하

여 변수의 범위가 -1에서 1 사이에 위치하도록 새로운 독립변수(이하에서는 변환변수라 칭함)를 설정한다. 또한 회귀모형도 여러가지를 선택할 수 있으나 반응표면이 곡선으로 표시될 것이라고 예측하는 경우는 2차 회귀모형을 많이 사용한다. 실험계획법은 중심합성계획법을 사용하였다. 측정 변수의 영향을 조사하기 위하여 세가지 시편(일본 Murata사의 MF, SC series 및 자체제작한 BPNT)을 선정 하였다. 각각의 시편은 유전율과 Q값의 차이가 있기때문에 이에 대한 영향도 파악할 수 있으리라고 판단된다. (표2참조)

반응표면분석을 행하기 위하여 Hakki-Coleman 측정 방법의 loop size 와 IL_o 값을 변수로서 선택하였다. 각 변수들은 홍미영역이 -1에서 1까지에 위치하도록 다음의 식에 의해서 변환하였다.

$$\text{변환 loop size}(X_1) = (\text{loop size} - 6) / 4$$

$$\text{변환 } IL_o(X_2) = (IL_o + 20) / 10$$

표 5에 나타낸 것이 이와 같이 변환된 실험조건이다.

표 5. Hakki-Coleman 방법의 측정조건
Table 5. Measurement conditions of Hakki-Coleman method.

실험번호	X1	X2
1	1.0	1.0
2	1.0	-1.0
3	-1.0	1.0
4	-1.0	-1.0
5	0.0	0.0
6	0.5	0.0
7	-0.5	0.0
8	0.0	0.5
9	0.0	-0.5

표 6은 전술한 실험계획에 의해 loop size 와 IL_o 값을 변화시키며 측정된 결과이다. 유전율의 경우, 측정 변수의 변화에 대하여 비교적 둔감하며 제시한 spec. 과 거의 일치하는 경향을 보이고 있으나 Q값이 클수록 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서 신뢰성 있는 Q값을 측정하기 위해서는 loop size 와 IL_o 값을 적절히 제어하여야 함을 알 수 있다.

그림 10은 Q값이 가장 작은 BPNT의 경우로서 loop size가 작아질수록, IL₀값이 크기(IL₀값의 절대값)가 감소할 수록 측정 Q·f 값이 증가한다. 또한 측정변수의 변화에 의한 영향에 비교적 둔감하여 비교적 넓은 실험범위에서 제시된 유전체의 유전특성 이상의 측정치를 나타내고 있다.

표 6. Hakki-Coleman 방법으로 측정 결과
Table 6. Measurement results by Hakki-Coleman method.

실험	MF series		SC series		BPNT	
	유전율	Q·f	유전율	Q·f	유전율	Q·f
1	38.9	5040	29.0	62666	*	*
2	38.9	41231	29.0	65314	86.9	4319
3	38.8	56283	29.0	76500	87.1	5015
4	38.8	52253	29.0	61073	87.0	4469
5	39.0	45727	29.0	65356	86.9	4718
6	39.8	48705	29.0	70152	87.1	4004
7	38.8	46516	29.0	79558	87.0	4540
8	39.0	49746	29.0	66781	87.0	3962
9	38.9	46555	29.0	53658	86.9	4648

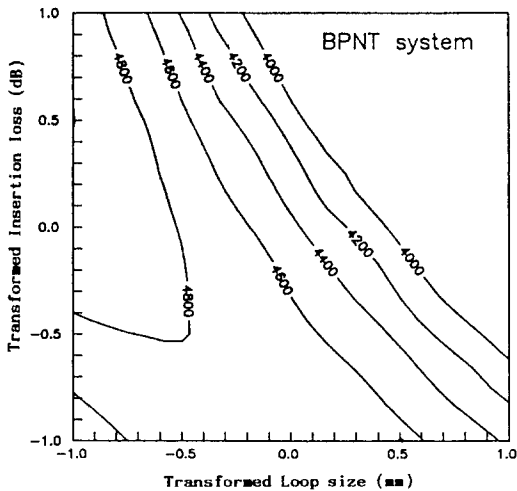


그림 10. BPNT의 loop size와 삽입손실에 따른 Q·f 값

Fig. 10. Q·f value as a function of loop size and insertion loss in BPNT system.

그러나 유전체의 Q값이 증가됨에 따라 유효실험범위는 축소되게 된다. 그림 11과 12는 Murata사의 MF series와 SC series의 경우로서 표 2에 나타난 유전체의 spec. 이상 측정될 수 있는 조건에 관한 것이다.

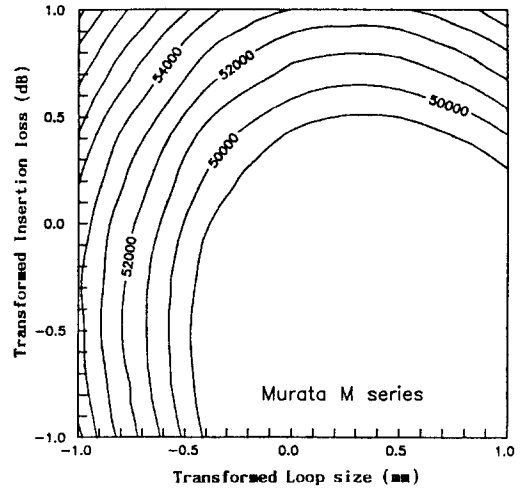


그림 11. Murata MF series 시편의 loop size와 삽입손실에 따른 Q·f 값

Fig. 11. Q·f value as a function of loop size and insertion loss in Murata MF series.

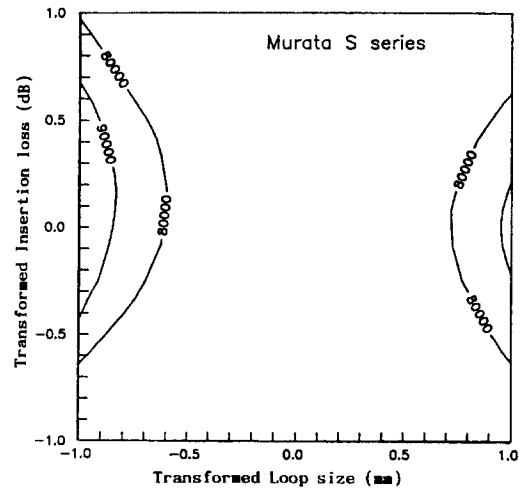


그림 12. Murata SC series 시편의 loop size와 삽입손실에 따른 Q·f 값

Fig. 12. Q·f value as a function of loop size and insertion loss in Murata SC series

MF series의 경우 loop size가 작을수록, IL₀값의 크기가 증가할 수록 측정 Q값이 증가하며 SC series의 경우 loop size가 아주 크거나 작은 두 경우에 이러한 영역이 발생된다. IL₀값의 효과는 일반성이 없으나 loop size의 경우는 어느 경우나 작을 수록 측정

Q값이 증가하는 경우를 나타내고 있다. 따라서 물질이 갖고 있는 고유 Q값에 상관없이 신뢰성있는 측정 Q값을 얻기 위해서는 loop size는 4mm 이하, 더욱 바람직하기는 2mm 이하가 적당하며 IL₀값의 크기는 15 dB 이상 (-15 dB ~ -30 dB)이 바람직하다고 판단된다.(그림 13)

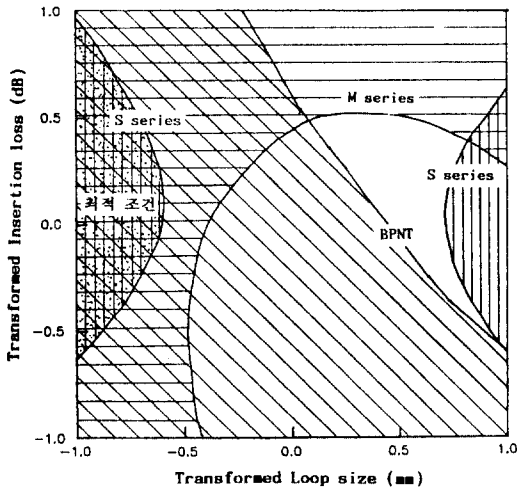


그림 13. Hakki-Coleman 방법의 최적 측정 조건
Fig. 13. The optimum measuring conditions of Hakki-Coleman method.

IV. 결 론

1. Hakki-Coleman 방법으로 고주파용 세라믹스 유전체의 유전특성 측정시 상하 도체판의 도전율을 TE_{011} , TE_{013} 모드를 이용하여 구하였으며 이때 도체판을 경면 연마하여 비도전율 σ_r 값을 5% 이내로 하여야 유전율의 표준편차 ($\Delta \epsilon_r$)는 0.07 이하 $\tan \delta$ 의 표준편차 ($\Delta \tan \delta$)는 0.06×10^{-4} 이하를 얻을 수 있다.
2. Hakki-Coleman 방법으로 유전체 측정시 도체의 표면조도에 따라서 도체 손실(R_s)이 달라지며 Q값의 측정에 영향을 준다. 도체의 표면은 경면 연마할수록 정확한 유전특성 측정이 가능하며 표면조도가 $0.07 \mu m$ 이하가 되어야 본 실험에서 제작 사용한 측정 Jig 에서 신뢰성 있는 Q값을 얻을 수 있다. 또한 유전율은 조도에 관계없이 거의 일정하게 나타난다.
3. Semirigid cable 의 결합 loop size 에 따라서 유전체의 유전율은 $\pm 0.02\%$ 의 오차를 가 지나 거의 일정하며 loop size 가 작을수록 안정된 Q값을 측

정할 수 있다. 따라서 Q값이 적은 유전체는 loop size 에 영향을 거의 받지 않으며 Q값이 큰 유전체일수록 loop size를 작게 하여야 한다.

4. Semirigid cable의 loop size가 일정할때 probe 와 시편과의 거리에 따른 Q값의 변화는 유전체의 Q값에 따라서 차이가 있으나 너무 가깝거나 멀 경우에는 정확한 특성 측정이 어렵다. 본 실험에서 측정결과 3~4mm 의 거리를 유지할때 유전체의 Q값이 가장 좋게 측정 되었다.
5. Hakki-Coleman 방법으로 유전체 측정시 측정하여야 할 모든 항목들을 변수로 놓아 최적의 측정 조건을 반응표면 분석법을 이용하여 계산한 결과 유전체의 Q 값에 상관없이 신뢰성 있는 측정 Q값을 얻기 위해서는 loop size 는 4mm 이하 삽입손실 (il) 값의 크기는 15 dB 이상 (-15dB ~ -30dB) 이 되어야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Kobayashi, Y and Katoh, M., "Microwave measurement of dielectric properties of low-loss materials by the dielectric rod resonator method," IEEE Trans. on MTT, vol., MTT-33, pp. 586~592, Jul, 1985.
- [2] Kobayashi, Y. and Tanaka, S., " Resonant modes of a dielectric rod resonator shot-circuited at both ends by parallel conducting plates," IEEE Trans. on MTT, vol, MTT-28, pp. 1077-1085, Oct, 1980.
- [3] Hakki, B.W. and Coleman, P.D., " A dielectric resonator method of measuring inductive capacities in the millimeter range," IRE Trans, on MIT, vol MTT-8, pp.402-410, 1960.
- [4] G. Rupprecht and R.O.Bell, Phys.Rev., 125, 6, pp.1915-1920, 1962.
- [5] S.G.Mhaisalkan et al., " Microwave dielectric properties of doped BaTi4O9," J. Am. Ceram. Soc., 74(8) pp.1894~1898, 1991.
- [6] H.M.O'Bryan et al, " A new BaO-TiO2 compound with temperature stable high permittivity and low microwave loss," J. Am. Ceram. Soc., 57(10) pp. 450~453,

1974.

[7] 小西良弘, " マイワロ波回路の基礎とその應用" pp. 34-38. 総合電子出版社, 1990.

[8] Microwave Components, Cat.No.O95E-2, pp. 1~12, MURADA MFG.CO.,LTD. 1989

[9] K. Wakino, et, "Microwave characteristics of (Zr,Sn)TiO4 and BaO-PbO-

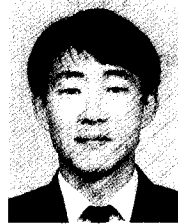
Nd₂O₃-TiO₂ dielectric resonators" *J. Am. Ceram. Soc.*, 67(4) pp. 278~231, 1983.

[10] Draper, N.R., " Ridge analysis of response surface," *Technometrics*, vol.5 pp.469-479 1963.

[11] 박성현, 현대 실험 계획법, pp. 575~623 민영사, 서울 1992

저 자 소 개

金 敬 龍(正會員) 제 28권 제 8호 A편 참조
 현재 한국과학기술연구원 세라믹
 공정센터 책임 연구원



金 旺 變(正會員)
 1957년 12월 31일생. 1985년 고려대학교 공과대학 재료공학과 학사. 1987년 고려대학교 공과대학 재료공학과 석사(무기재료). 1987년 1월 ~ 1990년 9월 삼성종합기술원 주임연구원. 1993년 고려대학교 공과대학 재료공학과 박사. 1990년 10월 ~ 현재 한국과학기술연구원 세라믹 공정센터 선임연구원. 주관심 분야는 고주파용 세라믹 전자부품등



崔 煥(正會員)
 1987년 명지대학교 공과대학 전자공학과 학사. 1994년 고려대학교 공과대학 재료공학과 석사(세라믹스). 1988년 2월 ~ 1993년 11월 한국 쌍신전기 연구소. 1994년 9월 ~ 현재 고려대학교 공과대학 재료공학과 박사과정 재학중. 한국과학기술연구원 세라믹 공정센터 학생연구원 근무중. 주관심분야는 고주파용 세라믹 유전체 제조및 측정, 고주파용 세라믹 전자부품 개발등