

이동 통신용 Microwave 유전체

이 영 회*

(*광운대학교 공과대학 전자재료공학과 교수)

1. 서 론

최근 전자, 통신 및 정보 산업의 발전에 따라 Microwave를 이용한 육상 이동통신(1~3GHz), 위성통신(4~11GHz) 및 위성방송(12GHz) 등의 무선 통신 산업이 급속하게 성장되고 있으며, 고부가가치 무선통신 단말기 및 위성방송 수신기용 부품의 개발은 향후 신기술 입국을 위한 중요한 개발 과제중의 하나로 지적되고 있다.

과거 Microwave대역의 필터는 Resistor, Capacitor 및 Inductor를 이용한 RLC 공진회로가 사용되었다. 그러나 전자 산업의 발전에 따라 현재에는 전송선(Transmission Line), 유전체 공진기(Dielectric Resonator), Stripline 등이 이용되고 있다. 특히 이 중에서 유전체 공진기를 이용한 소자로는 안테나 공용기(Antenna duplexer), 대역 통과 필터(Band pass filter), 발진기(Oscillator) 등이 있으며, 다른 소자로 구성되는 경우보다 우수한 주파수의 온도 안정성, 저손실, 고신뢰성 등의 장점이 있어 현재 셀룰러(Cellular) 이동통신 단말기의 핵심 부품으로 이용되고 있다.

Microwave 대역에서 사용되는 무선 통신용 유전체 재료에 대해 요구되는 특성은 Microwave의 파장(λ_0)이 재료의 유전율(ϵ_r)에 반비례하여 파장이 짧아지게($\lambda_0 = \lambda / \epsilon_r$)되어, 유전율이 클수록 유전체 재료의 크기를 소형화할 수 있을뿐만 아니라 통신 소자의 compact 화가 가능하여 재료의 유전율은 클수록 좋다. 또한 Microwave 유전체 재료의 Q값은 주파수에 반비례

하므로 높은 주파수 대역에서 이용하기 위해서는 유전체 재료의 손실이 작아야 한다. 또한 공진주파수가 안정화되고 공진회로의 온도 보상이 용이해야 하므로 유전체 재료의 공진 주파수의 온도계수가 작아야 한다.

현재 Microwave 유전체의 가장 큰 시장중의 하나는 이동통신 단말기용 송수신 필터이며, 무선전화기의 소형화는 현재 경쟁적으로 진행되고 있다. 그 중 하나의 관건은 유전체 공진기를 이용하는 duplexer의 소형화이며, 유전체의 고유전율화는 duplexer의 소형화와 직결된다. 따라서 현재 유전체 공진기를 이용한 필터 및 발진기에 대한 연구는 소형화를 위한 부품의 설계 기술과 더불어 고유전율화를 위한 Microwave 세라믹스의 신소재 개발이 병행되고 있다. 특히 미국이나 일본 등에서는 Microwave 유전체의 고유전율화를 위한 연구개발이 활발하게 진행되어 이미 Microwave 유전체에 대한 재료 및 부품 개발은 물론 측정System의 자동화까지 이루고 있으나, 국내에서는 아직 초보단계에 불과한 실정으로 고유전율 재료에 대한 소재 및 부품의 연구개발과 함께 응용을 위한 측정System의 종합적이며, 체계적인 연구 개발 및 국산화를 위한 연구가 시급할 것으로 사료된다. 여기서는 Microwave resonator의 기본적인 특성 변수, 재료, 측정방법 및 응용 분야 등에 관해서 개략적으로 서술하고자 한다.

2. Microwave 유전체의 특성 변수

Microwave 유전체 특성을 결정짓는 중요한 변수는

유전율(ϵ_r), 품질계수(Q), 공진 주파수의 온도계수(τ_f) 등이며, 이들 변수의 중요성에 관해 살펴 보면 다음과 같다.

2.1 유전율(ϵ_r)

유전율은 유전체 공진기의 공진 주파수와 밀접한 연관을 갖고 있다. 예를 들어 이동 통신용 Duplexer나 대역 통과 필터 등에 사용되는 동축형(Coaxial)공진기는 TEM mode 공진을 하며, TEM mode 유전체 공진기의 공진 주파수(f_r)는 식 (1)에 나타난 바와 같이 유전율(ϵ_r)과 공진기의 길이(L)에 반비례한다. 따라서 유전율이 클수록 공진기의 소형화가 가능하다.

$$f_r = \frac{C}{[4L(\epsilon_r)]^{1/2}} \quad (1)$$

또한 유전체 공진기를 소형화하기 위해서는 유전율이 높아야 하지만 동시에 공진 주파수의 온도계수(τ_f)가 작고, 품질계수 Q가 높은 것이 바람직하다.

일반적으로 유전율이 큰 재료에서 유전율의 온도계수(τ_ϵ)는 (-A)이며, 유전율이 클수록 유전율의 온도계수 변화율도 크다. 그림 1은 Harrop이 제시한 유전율(ϵ_r)과 정전용량의 온도계수(τ_c)의 관계를 나타낸 것이다[1]. 그림중의 (■)로 표시한 제도와 같이 높은 유전율(ϵ_r)을 갖고 있으면서 정전용량의 온도계수(τ_c)가 0에 가까운 재료의 개발이 필요하다.

2.2 품질계수(Q)

Q값은 유전체의 손실계수 $\tan \delta$ 의 역수로서 정의된다. 유전체의 $\tan \delta$ 값은 부품의 신호 손실과 직접적인

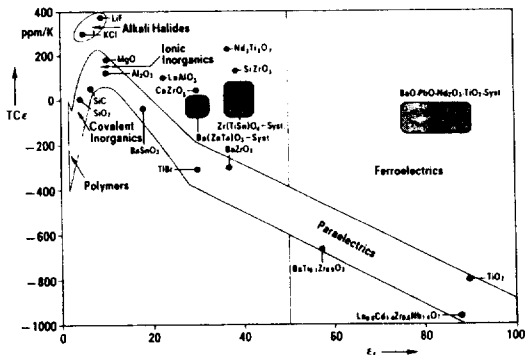


그림 1. Microwave 유전체 세라믹의 ϵ_r 과 τ_c 의 관계

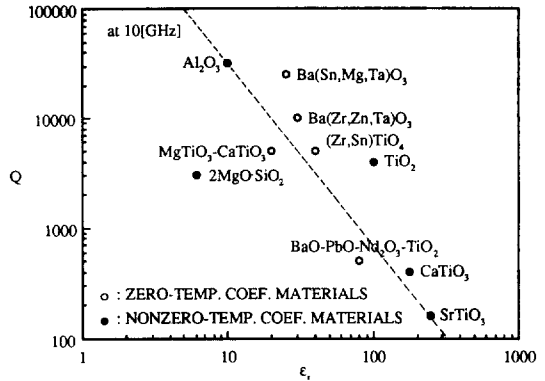


그림 2. Microwave 유전체의 유전율과 Q값의 상관도

관련이 있으며, 유전 손실이 작을수록 Q값이 크고 부품의 삽입 손실(Insertion loss)을 감소시켜 전력손실을 줄이게 된다.

이온 결정에서 고전분산이론[2]에 의하면 유전율은 식(2)로 표현된다.

$$\epsilon(\omega) - \epsilon(\infty) = \sum_j \frac{4\pi\phi_j \omega_j}{\omega_j^2 - \omega^2 + j\gamma\omega} \quad (2)$$

여기서 ϕ_j = 각 진동자의 Power

ω_j = 원적외선 격자 진동 mode의 공진 주파수

γ = 감쇄상수

$\epsilon(\omega)$ = 전자 분극에 의한 유전 상수

$\omega^2 < \omega_j^2$ 인 조건에서 식(2)는 식(3)과 식(4)로 나눌 수 있다.

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon(\infty) - \sum_j 4\pi\phi_j = \text{Constant} \quad (3)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} = \frac{\sum (4\pi\phi_j \gamma \omega / \omega_j^2)}{\epsilon(\infty) + \sum 4\pi\phi_j} \quad (4)$$

식(3)에 의해 유전체의 유전율은 Microwave대역에서 일정한 값을 나타내고, 유전 손실은 주파수가 증가할수록 증가하는 경향을 나타낸다. 또한 Microwave대역에서 유전 손실이 작은 유전체를 제조하기 위해서는 감쇄상수(Damping constant) γ 를 작게 하여야 한다.

완전 결정에서의 감쇄상수 γ 는 격자 진동의 비조화성(Anharmonic oscillation)에 의해 형성되지만, 다결정체(Polycrystalline)의 경우에는 결정 입계, 불순물, 격자 결함 등이 감쇄상수를 증가시킨다. 따라서 Microwave 유전체 재료는 고순도의 원료를 사용하고 제조과정에서의 불순물의 혼입을 방지하여 격자 결함이 작은 균질한 재료로 제작하여야 한다.

그림 2는 여러가지 Microwave 유전체의 유전율과 Q값과의 관계를 나타낸 것이며[3] Microwave 유전체의 Q값은 일반적으로 유전율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다.

2.3 공진 주파수의 온도계수(τ_f)

Microwave 유전체에 있어서 실제 중요한 변수는 공진 주파수의 온도계수 τ_f 이다. Microwave대역에 사용되는 유전체 공진기 소자, 즉 필터나 진동자는 온도의 변화에도 중심주파수의 변화가 없어야 하기 때문이다. Microwave 유전체가 실용성이 있으려면 τ_f 가 0에 가까워야 하고 또한 $\pm 100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 전후로 가변할 수 있으면 더욱 바람직하다. 유전체 공진기의 τ_f 는 물리적으로 식(5)와 같이 소재의 유전율의 온도계수와 열팽창계수에 관계된다.

$$\tau_f = -\frac{\tau_\epsilon}{2} - \alpha_1 \quad (5)$$

윗 식에서 τ_ϵ 과 α_1 은 각각 유전율의 온도계수와 열팽창계수이다. 실험적으로 τ_f 는 두 온도에서 측정된 공진 주파수로 부터 식 (6)으로 계산된다.

$$\tau_f = \frac{1}{f_1} \cdot \frac{f_2 - f_1}{T_2 - T_1} \quad (6)$$

세라믹의 열팽창계수는 대략 $6 \sim 14\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 이며, τ_f 를 0으로 조정하기 위해서는 τ_ϵ 을 $-10 \sim 20\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 으

로 제어하여야 한다.

이러한 요구 조건중에서 유전율 및 유전율의 온도계수는 기본적으로 재료 조성에 의해 결정되지만, 유전손실은 결정의 격자진동의 비조화함에 기인하는 물질 고유의 요인과 결정의 불완전성등 2차 구조에 기인하는 외적인 요인에 의해 영향을 받기 때문에 유전손실을 제어하고 균질하며 재현성있는 Microwave 유전 재료를 제조하기 위해서는 유전손실에 관한 체계적인 연구가 필요하다. 그러나 현재 Microwave 유전 재료의 요구 조건을 만족하는 물질에 대하여 제조 공정의 개선 및 고용 범위를 조절함으로써 제 특성을 향상시키려는 보고는 많지만 실험 결과적 보고로서 제 특성 향상의 원인 및 메카니즘을 규명하지 못하고 있는 실정이다.

3. Microwave 유전체 재료

1968년 Cohn 등에 의해 rutile(TiO_2) 세라믹을 이용하여 최초로 유전체 공진기 필터가 제작되었다. 그러나 rutile은 높은 유전율(100) 및 Q(10,000)값을 나타내었으나, τ_f 가 $+400\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 이상이어서 실용성이 없었다. 따라서 Microwave 대역에서 사용하기 위한 유전체 재료에 대한 연구는 높은 유전율, 품질계수 및 안정한 공진 주파수의 온도계수 특성을 갖는 재료 개발에 대한 활발한 연구가 진행되어 왔으며, 표 1에 최근까지 개발된 Microwave 유전체 재료의 종류를 나

표 1. Microwave 유전체의 유전 특성

종 류	재 료	ϵ_r	Q	τ_f (ppm/ $^\circ\text{C}$)	측정주파수 (GHz)
BaO-TiO ₂ 계	BaTi ₄ O ₉	38	2,600	15	4
	Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀	40	8,000	2	4
(Zr, Sn)TiO ₄ 계	(Zr _{0.8} , Sn _{0.2})TiO ₄	38	7,000	0	7
A(B _I , B _{II})O ₃ 계	Ba(Zn _{1/3} , Ta _{2/3})O ₃	30	14,000	0	12
	Ba(Zn _{1/3} , Nb _{2/3})O ₃	40	10,000	28	11
	Ba(Ni _{1/3} , Ta _{2/3})O ₃	23	7,100	-18	7
	Ba(Mg _{1/3} , Ta _{2/3})O ₃	25	10,200	5	7
BaO-Ln ₂ O ₃ -TiO ₂ 계	BaO-Sm ₂ O ₃ -TiO ₂	70~90	4,000	0	2
	BaO-Nd ₂ O ₃ -TiO ₂	81	3,500	93	3
	(Ba _{1/2} Pb _{1/2})O-Nd ₂ O ₃ -TiO ₂	90	1,900	55	3

타내었다.

3.1 BaO-TiO₂계 유전체

BaO-TiO₂계 세라믹은 잘 알려진 바와 같이 BaTi₃O₉와 BaTi₄O₉ 등 많은 중간 화합물이 존재하며, Ba₂Ti₉O₂₀의 조성 부근에서 τ_r가 0[ppm/°C]에 가까운 소재가 얻어진다.

Ba₂Ti₉O₂₀은 고상반응법에 의해 형성되기 때문에 분해 온도가 높고(1420°C), 중간 생성물의 형성이 용이하여 제조 공정상의 문제점이 많다. 또한 비교적 환원되기 쉬운 성질을 가지고 있으며, 이로 인해 Q값이 떨어지는 문제가 발생한다. 따라서 소결시 환원을 방지해야 하며, 이를 위해 소결 후 냉각시 서냉하는 방법과 1100~1200°C에서 재산화하는 방법이 보고되고 있다.

3.2 (Zr, Sn) TiO₄계 유전체

(Zr, Sn) TiO₄계 유전체는 높은 유전율(40)과 Q(7,000)값을 갖고 있으며, (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄의 조성에서 τ_r가 0ppm/°C의 값을 얻을 수 있다. 특히 (Zr, Sn)TiO₄ 소재의 특징은 공진주파수의 온도변화율이 다른 소재에 비해 양호한 직선성을 나타내는 점이다.

3.3 BaO-Ln₂O₃-TiO₂계 유전체

산화바륨과 산화티타늄에 란타늄(Lanthanide) 산화물을 첨가하여 제조한 유전체 재료는 유전율이 80~90의 높은 값을 얻을 수 있어, 최근 주파수가 비교적 낮은 RF대역(800~900MHz)의 이동 통신용 부품으로 각광받고 있다. 란타늄 원소로는 Nd, Sm 등이 대표적이며, BaO의 일부를 PbO로 치환하면 소결 온도를 감소시키고 유전율을 증가시키는 효과를 가져올 수 있다.

이 계는 단일상으로 존재하는 것이 아니라 BaLn₂Ti₅O₁₄, BaTi₄O₉, TiO₂ 등의 혼합상이 존재하는 것으로 알려지고 있다. 따라서 온도특성은 혼합상의 특성을 합성한 것으로 되기 때문에 변화가 직선적이 아닌 경우가 많다. 이 계가 실용적이라면 τ_r가 20[ppm/°C] 이하이고, Q값이 1,000이상 되어야 하는데, 현재까지 연구 결과에 의하면 유전율은 90 정도가 최고이다.

3.4 복합 Perovskite 계유전체 : A(B₁, B₂)O₃계

1977년 Kawashima 등에 의해 처음 Ba(Zn, Nb)O₃-Ba(Zn, Ta)O₃계 재료가 Microwave 대역에서 높은 Q값을 나타낸다고 보고된 후 복합 Perovskite 세라믹에 대한 연구 개발이 활발하게 진행되어 왔으며, 표1에 나타낸 바와 같이 Ba계 복합 Perovskite인 Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O₃와 Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃가 대표적인 재료이다. 이러한 재료는 유전율이 30~35정도로 비교적 낮지만, 10GHz에서 10,000 이상의 매우 높은 Q값을 갖고 있어 위성 방송의 down-converter나 고주파 통신기기에 많이 이용되고 있다. 이러한 재료가 높은 Q값을 나타내는 것은 B-격자의 원소가 1:2 비율로 규칙적으로 배열하여 초격자 구조(Superlattice structure)를 형성하기 때문으로 보고되고 있다.

4. Microwave 유전체의 유전 특성 측정 방법

Microwave 대역에서 사용되는 유전체 재료의 특성 평가는 유전체 공진기의 원리에 기초한 측정 방법이 사용되고 있다. 이 방법은 1960년에 Hakki 등[4]에 의해 제안된 후, 최근에 Kobayashi 등[5]에 의해 수정된 것으로, 저손실 유전체 재료의 유전특성을 고정밀도로 측정하는 것이 가능하다.

Microwave대역에 있어서 유전특성의 측정법으로는 섭동법(Perturbation method), 공동공진기법(Cavity resonator method), 유전체 공진기법(Dielectric resonator method) 등이 있으며, 그림 3은 측정방법에 따른 유전율과 유전손실의 측정범위를 나타낸 것이다[6]. 이 중에서 유전체 공진기법(Dielectric resonator method)은 post resonator법과 open cavity법으로 구별되며, 낮은 유전율의 재료로 부터 높은 유전율 재료가

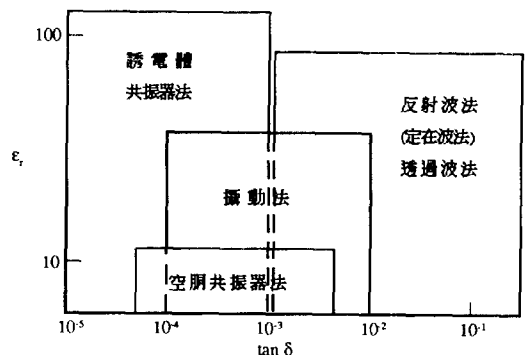


그림 3. 측정 방법에 따른 유전율과 유전손실의 측정 범위

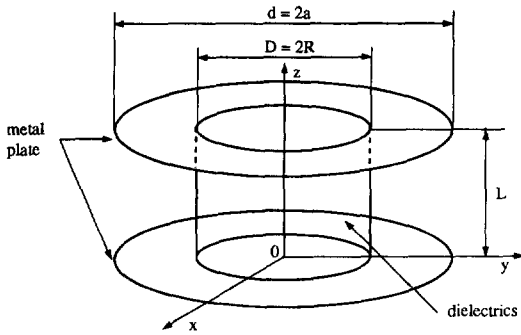


그림 4. Post resonator법의 구성도

지 측정이 가능하고, 또한 $\tan \delta$ 가 10^3 의 저손실 특성도 측정 가능한 장점이 있다.

4.1 Post resonator 법

유전체 공진기의 전자계 해석의 한 방법으로 그림 4과 같이 무한대의 금속판 사이에 원주상의 시료를 삽입한 구조가 Hakki에 의해 제안되었다.[4]. 즉, TE_{0n1} mode에 있어서 공진 주파수를 f_0 로 하면 유전율 ϵ_r 은 식(7)로 주어진다.

$$\epsilon_r = \left(\frac{\lambda_0}{\pi D}\right)^2 (u^2 + v^2) + 1 \quad (7)$$

여기서 u, v 는

$$v^2 = \left(\frac{\pi D}{\lambda_0}\right)^2 \left[\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g}\right)^2 - 1\right] \quad (8)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}, \quad c = 2.9979 \times 10^{11} [\text{mm/sec}] \quad (9)$$

$$\lambda_g = \frac{2L}{\ell} \quad (10)$$

$$u \frac{J_0(u)}{J_1(u)} = -v \frac{K_0(v)}{K_1(v)} \quad (11)$$

로 주어진다. J_n, K_n 은 각각 제1종 Bessel 함수, 제2종 변형 Bessel 함수이다. D, L, f_0 을 알고 있다면, 식(8-10)으로부터 v 를 계산할 수 있고, 식(11)의 관계로부터 u 를 구할 수 있기 때문에 식(7)에 의해서 ϵ_r 을 구하는 것이 가능하다.

유전손실 $\tan \delta$ 는 무부하 Q와 금속판의 표피저항 R_s 를 이용하여 식(12)로 주어진다.

$$\tan \delta = \frac{A}{Q} - BR_s \quad (12)$$

여기서 A, B 는 다음식으로 주어진다.

$$A = \frac{W}{\epsilon_r} \quad (13)$$

$$W = \frac{J_1^2(u)}{J_1^2(u) - J_0(u)J_2(u)} \cdot \frac{K_0(v)K_1(v) - K_1(v)^2}{K_1^2(v)} \quad (14)$$

$$B = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g}\right) \frac{1+W}{30\pi^2 \epsilon_r l} R_s \quad (15)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu_0}{\sigma}} \quad (16)$$

σ 는 금속판의 전기 전도도, μ_0 는 진공의 투자율($4\pi \times 10^{-7} [\text{H/mm}]$)이다.

Post resonator법에 있어서는 금속판이 무한대의 크기로 가정하여 계산하였으나, 실제의 경우 유한한 크기이기 때문에 측정 오차가 발생한다. 그러나 실제 측정에 있어 금속판의 직경이 시편 직경의 3~4배 이상되면 오차는 무시 가능하다.

4.2 Open cavity 법

그림 5는 Open cavity법의 구성도를 나타낸 것이다.

유전체 공진기와 주위의 금속벽과의 거리를 충분히 분리하면 금속벽상의 전도손실을 무시 가능하다. 금속 용기의 내경을 변화시켜 그때의 Q값을 측정하면 용기의 내경이 시료 직경의 5배 이상으로 될때 Q_0 와 f_0 가 내경의 크기에 의존하지 않게 되고, 그때의 Q_0 가 Post resonator법으로 구한 재료의 Q와 같게 된다. 이 측정법은 공진계의 전자계 해석이 곤란하여 오차에 대한 이론적인 평가가 나와 있지 않는 결점이 있지만, 15,000이상의 Q측정도 용이하고 또한 재현성이 좋은 장점을 갖고 있어, 많은 시료의 Q값의 상대적인 차이를

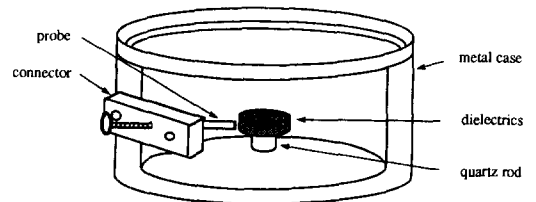
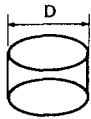

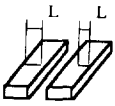


그림 5. Open cavity법의 구성도

표 2. 유전체를 이용한 각종 공진기

종 류	형 상	치 수	모-드	적용주파수	용 도
유 전 체 공 진 기		$D = \frac{C}{f\sqrt{\epsilon_r}}$	TE ₀₁₀	SHF대 (>3GHz)	위성방송 위성통신 지상통신
동 축 형 공 진 기		$L = \frac{C}{4f\sqrt{\epsilon_r}}$	TEM	UHF대 (>2GHz)	자동차 전화 휴대전화 Cordless 전화 CATV
스트립라인 공 진 기		$L = \frac{C}{2f\sqrt{\epsilon_w}}$ $L = \frac{C}{4f\sqrt{\epsilon_w}}$ $\epsilon_w = 0.6 \sim 0.9\epsilon_r$	TEM	UHF 대 SHF 대	MIC 발진기 VCO SHF converter

고찰하는 경우 유용한 방법이다. 공진주파수의 온도변화율을 측정하는 경우에 있어서 Post resonator법을 이용하면 Q가 작게 되어 분해능이 떨어지는 반면 Open cavity법에서는 Q가 높은 재료를 이용하면 공진계의 Q도 높게 되어 고정밀도의 측정이 가능하다.

5. 응용 분야

Microwave resonator는 i) TE₀₁₀ mode를 사용하는 유전체 공진기 ii) (1/4)λ형으로, 내외부에 전극을 형성시킨 동축형 공진기 iii) 표면은 어-스 전극으로, 평면상의 Microwave stripline형 공진기 등 3종류의 형태가 있다.

표 2는 유전체를 이용한 각종 공진기의 특징 및 응용 분야를 나타낸 것이다[7].

6. 결 론

유전체 공진기는 1970년대에 실용적인 소재 및 부품 개발이 시작되었으나, 본격적인 개발은 이동 및 위성 통신에 대한 관심이 높아진 1980년대에 들어서 이루어지고 있다. 현재 일본, 미국 등 기술 선진국에서의 Microwave 유전체에 대한 연구는 고도 정보화 사회를 여는 무선 통신장치에 없어서는 안될 중요한 부품의

하나로 인식되어 연구개발에 박차를 가하고 있으며, 이에 대한 응용분야가 과거 군사 및 특수분야에서 자동차 전화, 위성통신 등 민생분야로 확대되어 고부가가치성이 인식되면서 세계 각국의 연구소 및 기업체 등에서 실용화를 위한 많은 연구가 추진되고 있다.

현재 국내의 연구소, 기업 및 대학에서도 Microwave 유전체 재료에 대한 관심이 높아가고 있으며, 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나 우리가 직면한 제반 문제는 Microwave 유전체의 기초 연구를 통한 소재 및 부품 개발을 서둘러야 하며, 고신뢰성 확보, 생산성 향상 및 원가 절감 등의 문제점을 해결해야 할 것으로 사료된다. 또한 특성 측정의 체계화 및 자동화를 위한 측정 system의 개발에 관한 연구도 병행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] P.J. Harrop, J. Mater. Sci., Vol.4, pp.370~374, 1969.
- [2] W. G. Spitzer, Phys. Rev., Vol.126, pp.1710~1721, 1962.
- [3] K. Wakino, J. Microwave, Vol.6, pp.137~150, 1987.
- [4] B. W. Hakki et al., IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques, pp.402~410, 1960.

-
- [5] Y. Kobayashi et al., IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-33, No.7, pp.586~592, 1985.
- [6] 河島俊一郎, エレクトロニクセラミクス, Vol.1, pp.50~55, 1986.
- [7] 西垣 進, エレクトロニクセラミクス, Vol.3, pp.56~61, 1988.



이영희(李永熙)

1951년 9월 23일생. 1973년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1985~86년 Penn. State MRL 객원연구원. 현재 광운대 공대 전자재료공학과 교수.