

밀리미터파 대역용 유전체 소재와 자유공간법에 의한 특성평가기술 연구개발 동향

Research Trends of the Dielectric Materials and the Characterization Using Free Space Method in Millimeter Wave Range

전병혁(B.H. Jun)
한진우(J.W. Hahn)
김동영(D.Y. Kim)
이상석(S.S. Lee)

세라믹RF부품팀 위촉연구원
세라믹RF부품팀 선임연구원
세라믹RF부품팀 선임연구원
세라믹RF부품팀 책임연구원, 팀장

최근 정보사회에 따른 전파수요가 높아지고 있으며 이에 따른 주파수의 요구가 점차 고주파화되고 있고 미개척분야인 밀리미터파의 개발이 중요한 과제로 대두되고 있다. 본 고에서는 밀리미터파 대역 수동부품용 세라믹 유전체 소재에 관한 동향을 서술하였으며, 이 대역에서 세라믹 소재의 유전특성을 측정, 평가하는 여러 방법 중에서 자유공간법을 이용한 기술에 관하여 소개하고자 한다.

1. 서론

개인이동통신의 발달과 함께 차세대 무선 이동통신 기술은 보다 개인화되고 멀티미디어화된 정보통신 서비스의 제공과 전송속도를 향상시키기 위한 초고속 광대역 멀티미디어 정보통신 서비스의 형태를 취하게 될 것으로 전망된다. 그러나 현재 사용중인 2GHz 대역의 주파수를 사용할 경우, 활용 가능한 전파자원이 극히 제한적이므로 이런 요구를 수용하기 어렵고, 결국 새로운 주파수 자원의 활용이 불가피하다. 이에 따라 밀리미터파 대역의 초고주파 자원을 이용한 정보통신 서비스의 연구와 개발이 진행되고 있다. 밀리미터파는 주파수 대역이 30~300GHz를 차지하는 전자기파로서 그 파장이 10~1mm이며 마이크로파와 적외선 사이의 주파수 대역을 차지한다.

이 주파수 대역은 30GHz 이하 주파수의 약

10배의 용량을 갖고 있으나 고주파수에 따른 기술적 난점, 수요전망의 불투명으로 1970년대 주로 군수용으로 응용되었다. 그러나 지금에 이르러 민수용으로서의 그 중요성이 재인식되어 이를 이용한 소자, 시스템을 개발하려는 움직임이 활발히 일어나고 있다.

밀리미터파는 파장이 짧아서 각종 소자를 소형화, 경량화시킬 수 있고 넓은 대역폭을 이용하여 많은 양의 정보를 수백 Mbps의 빠른 속도로 전송할 수 있으며, 직진성이 좋아서 목표물 추적 및 탐지 시에 높은 해상도와 정밀성을 얻을 수 있다. 이러한 특성으로 구내통신시스템(B-ISDN, 고속 LAN, 화상전송 등), 차량용 충돌방지시스템, 차량 자동항해, 자동인지시스템 및 위성통신 등 특정한 분야에 대해서 독특한 활용성을 갖는다.

이와 같은 밀리미터파대 정보통신을 실현하기 위하여 그 기반이 되는 부품들의 개발이 이루어져

야 하는데 현재 HPA(High Power Amplifier), LNA(Low Noise Amplifier), Mixer 등과 같은 반도체를 이용한 능동부품들은 개발에 성공한 예들이 보고되고 있으나, 세라믹 유전체를 이용한 수동부품은 아직 기초 연구개발 단계에 머물러 있다. 따라서 밀리미터파대 유전체의 활용을 위해서는 무엇보다도 유전손실이 작으면서 온도특성이 우수한 소재가 요구되며 밀리미터파 대역에서 소재의 유전특성을 측정, 평가할 수 있는 기술의 확보가 필요하다. 본 고에서는 논문, 특허 조사를 통한 밀리미터파대 유전체 소재와 유전특성 측정의 동향에 관하여 서술하고자 한다.

II. 본 론

지금까지 개발된 마이크로파대 세라믹 유전체 소재는 현재 사용중인 2GHz 대역 이하에서 공진기로 이용하기에는 부족함이 없으나, 향후 예상되는 밀리미터파 대역에서의 활용으로는 유전손실에 의한 부품의 손실이 커지기 때문에 마이크로파대 소재를 그대로 사용할 수 없다.

국내에서는 일부 대학과 연구소를 중심으로 지난 10여 년 간 마이크로파 세라믹 유전체에 대한 연구와 개발이 이루어져 왔다. 그러나 지금까지의 연구와 개발은 주로 이미 알려진 유전체 소재에 대해 소결조제 및 특성조제 등을 첨가하여 특성향상을 유도하는 수준에 머물러 있다.

한편 10GHz 이하의 마이크로파 세라믹 유전체 소재에 대한 유전율, 유전손실, 온도계수 등과 같은 유전특성 평가기술은 동축형 케이블, 공진기와 VNA(Vector Network Analyzer)를 사용하여 정확한 측정을 할 수 있다. 그러나 30GHz 이상의 고주파 대역에서 기존의 측정방법으로 유전특성을 평가하는 경우, 상대적으로 시편의 크기나 위치가 에너지의 분포에 영향을 많이 미치게 되어 정밀도의 향상을 위해서는 매우 정밀한 제작이 요구되며, 측정오차의 발생이 심각하게 대두되었다. 현재 알

려진 유전체 소재의 특성평가 방법으로는 공진기 방법(Resonant method), 도파관 방법(Waveguide method), 자유공간 방법(Free space method) 등이 있다.

1. 밀리미터파대 유전체 소재 연구개발 동향

향후 사용될 밀리미터파 대역에서는 전파특성 자체가 감쇠와 손실이 크기 때문에 이를 최대한 보상하기 위하여 유전손실이 매우 작으며, 온도특성이 우수한 유전체 소재 개발에 연구개발 방향이 모아지고 있으며, 이와 관련하여 다음과 같은 극히 제한적인 기초 연구가 보고되고 있다.

일본 Kyocera Corp.는 희토류가 첨가된 cordierite ($7\text{wt}\% \text{Yb}_2\text{O}_3 + 2\text{MgO} - 2\text{Al}_2\text{O}_3 - 5\text{SiO}_2$)에 대하여 18GHz, 59GHz에서 유전특성을 평가하였다[1]. 1355~1420°C에서 소결을 행하였으며 유전특성은 기존의 dielectric resonant method를 사용하여(TE_{011} resonance mode at 18GHz, TE_{021} mode at 59GHz) 측정하였다. 18GHz에서 얻어진 유전상수, 유전손실은 각각 4.9, 1.6×10^{-4} 이었다. 또한 59GHz에서 유전상수, 유전손실은 각각 4.9, 2.6×10^{-4} 이었다. $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$ 재료에 대해서 유전상수와 품질계수(Quality factor: Q, 유전손실의 역수)를 측정하였는데 10GHz, 28GHz에서 유전율 29.5, 품질계수 14,700(at 10GHz), 4,800(at 28GHz)를 나타내었다[2]. 일본 NEC에서는 $\text{Ba}(\text{Mg}, \text{Ta})\text{O}_3$ 계 또는 $\text{Ba}(\text{Zn}, \text{Nb})\text{O}_3$ 계에 $\text{A}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$ (A = Ba, Sr, Ca)를 이용하여 유전율 24, 품질계수 20,000~40,000(at 10GHz) 그리고 0~6ppm/°C의 공진주파수 온도계수를 갖는 유전체를 개발하였는데 측정주파수가 10GHz 이하였다.

지금까지 나온 특허를 알아보면, 대부분 밀리미터파 주파수 대역 이하의 마이크로파 대역에서 제조된 소재들이 언급되고 있다. 고주파수 영역을 위한 재료로서 '96년에 특허 출원된 $x(\text{Li}_{1/2}\text{Nd}_{1/2})$

$TiO_3 - yCaTiO_3 - zBa(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ ($0.6 \leq x \leq 0.8, 0.04 \leq y \leq 0.38, 0.02 \leq z \leq 0.16$)가 언급되었는데, 주파수 2~4GHz, 온도 20~80°C 범위에서 유전특성을 측정하였다[3]. 유전율(ϵ_r), Q, 온도계수(Temperature Coefficient of resonant Frequency: TCF) 측정을 위해서 기존의 공진기 법인 Hakki-Coleman method를 사용하였는데 측정 결과값들은 그리 좋은 편은 아닌 것으로 판단된다. $(1-x)[Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3] + xBaWO_4 + 0.1xMnO_2$ ($0.01 \leq x \leq 0.09$)의 재료 조성을 제시한 특허의 경우, x와 소결 온도를 변화시켜 가며 10.5GHz에서 ϵ_r , unloaded Q(Q_U), TCF를 측정하였다[4]. $x = 0.05$ 와 소결온도 1,650°C에서, ϵ_r 24.2, Q_U 15,500 그리고 TCF 3ppm/°C를 나타내었다. 한편 '95년 일본 Kyocera에서는 $xBaO yMgO zWO_3 + Sn, Mn, Ca$ 등의 3a 또는 4a group 원소 [$40 \leq x \leq 60, 13 \leq y \leq 40, 20 \leq z \leq 30$ ($x + y + z = 100$)]를 특허로 제시하였으며 10 GHz에서 유전특성이 측정되었다[5]. 같은 회사에서 '97년에 마이크로파 대역과 밀리미터파 대역에서 높은 품질계수와 우수한 온도계수를 갖는 소재로서 ZnO가 첨가된 $BaO_x(Ti_{1-a}Zr_a)O_2$ ($3.5 \leq x \leq 4.5, 0.1 \leq a \leq 0.2$)[6]와 $x[(1-a)BaO aCaO] yMgO zWO_3$ ($0.04 \leq x \leq 0.55, 0.15 \leq y \leq 0.3, 0.2 \leq z \leq 0.3; x + y + z = 1$ 그리고 $0 < a < 1$)를 제시하였다[7].

이상에서와 같이 밀리미터파용 유전체 소재에 관한 문헌 보고는 매우 미비한 것을 알 수 있다. 밀리미터파대 신소재 기술분야는 세계적으로도 소수 몇 개국에서 연구되고 있으며, 관련된 기술의 이전을 기피하는 첨단기술 분야로 자체 기술확보가 요구된다.

2. 자유공간법에 의한 유전특성 측정기술 연구개발 동향

기존에 개발되어 사용되고 있는 평판형 유전체 공진기법과 개방형 공진기 공동법과 같은 마이크

로파 유전특성 평가방법은 밀리미터 대역에서는 상대적으로 큰 측정오차를 발생시키므로 유전특성 측정에 그대로 적용할 수 없다. 밀리미터파대 신소재의 개발과 평가를 위해서는 유전체 특성 측정기술의 확립이 필수적이다.

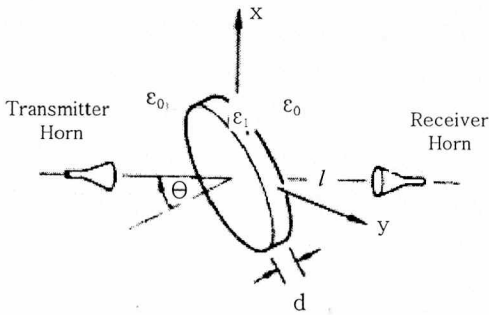
유전체 특성 측정방법에는 크게 다음과 같이 세 가지로 분류할 수 있다. 먼저 공진기 방법(Resonant method)으로 시료는 closed 또는 open resonator로 삽입되어 측정되어진다[8]. 비자성 시료의 유전상수와 유전손실이 비교적 정확히 측정되어지지만 단가가 비싸며 시료의 위치에 민감하다는 단점이 있다.

도파관 방법(Waveguide method)은 시료가 hollow guide안으로 삽입되고 산란 파라미터가 측정된다[9]. 이 방법은 10GHz까지는 상당히 정확한 복소 유전율(Complex permittivity), 투자율(permeability)을 측정할 수 있지만 더 높은 주파수에서는 hollow guide의 크기가 감소하기 때문에 재현성 있는 측정이 어렵다.

자유공간 방법(Free space method, Quasi-optical method 라고도 불림)은 평판형 시료가 송수신 안테나 사이에 자유공간 투과경로에 놓이게 된다[10-12]. 투과계수(Transmission coefficient: T)가 입사각의 변화에 따라서 측정된다. 시료준비가 간단하고 비파괴적이며 측정값이 매우 정확하다는 장점이 있다. 이 방법에 있어서 시료의 위치 조정이 매우 중요하다.

그 외에 간섭원을 갖는 Michelson 또는 Mach-Zehnder interferometer를 이용하여 유전율을 측정하는 방법[13, 14]과 interferometer를 갖는 넓은 대역을 이용한 Fourier transform spectrometry로써 물질의 유전율을 유도하는 방법[15]이 있다.

본 조사에서는 30GHz 이상의 초고주파 대역에서 복소 유전율, 투자율의 광대역 동시측정이 가능한 자유공간 방법에 의한 유전특성 측정에 관하여 언급하고자 한다. 이 방법이 갖는 장점으로



(그림 1) 수직 편광된 파가 각 θ 를 갖고 유전체 판에 입사되는 모양을 보여주는 측정구조

$$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cos\theta$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_r \epsilon_0 \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right)$$

그리고 ϵ_0 는 자유공간에서의 유전율, ϵ_r 는 상대유전율, σ 는 전도도, λ_0 는 자유공간내 파장, $\frac{\sigma}{\omega \epsilon_r \epsilon_0} = \tan\delta = \text{loss tangent}$ 그리고 d 는 판두께이다.

r 은 유전체 경계에 입사되는 평면전자기파의 반사계수이다. 평행분극에 있어서

$$r = r_{||} = \frac{\beta_1 - (\epsilon_1/\epsilon_0)\beta_0}{\beta_1 + (\epsilon_1/\epsilon_0)\beta_0}$$

수직 분극에 대해서는

$$r = r_{\perp} = \frac{\beta_0 - \beta_1}{\beta_0 + \beta_1}$$

는 먼저, 세라믹과 같은 재료는 제조상 조성이 불균질하게 분포될 수 있는데 이는 도파관이나 공진기 방법으로 측정 시 원하지 않는 높은 차수의 모드를 발생시킬 수 있다. 두 번째로 도파관 방법에서와 같이 시편을 단면적에 정확히 맞게 가공해야 하는 번거로움이 없다. 마지막으로 이 방법은 비파괴적이고 비접촉식이기 때문에 고온 측정 시 적절하다. 이 기술은 여러 입사각, 주파수, 시료두께에 대한 평판형 시료의 투과계수 또는 반사계수의 측정에 기초한다. 재료의 유전특성은 최소자승에 측법과 측정 사이에 반복분석을 통해서 이루어진다. 이 방법은 고체뿐만 아니라 기체, 액체를 포함하는 넓은 재료 범위에서 응용될 수 있다고 알려져 있다.

Shimabukuro et al.은 93.788GHz에서 자유공간법에 의한 유전특성을 측정하였다[10]. (그림 1)과 같이 y 축을 중심으로 회전가능한 시편의 경우 (그림 1)에서, 각 θ 로 유전체 판을 통과하는 평면전자기장의 투과계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

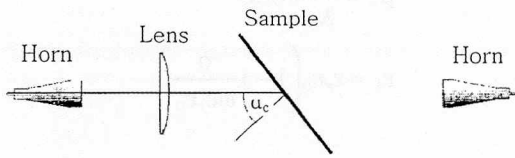
$$T = \frac{(1-r^2)e^{-j(\beta_1-\beta_0)d}}{1-r^2e^{-2j\beta_1d}}$$

여기서 $\beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_1/\epsilon_0 - \sin^2\theta}$

예측되는 유전율과 유전손실 값으로부터 power transmission ($|T_{\perp}|^2$)을 계산하고 그것을 실제로 측정된 값과 비교하는 방법을 사용했다.

Nitsche et al.은 투과계수에 반사측정법 또는 분극측정을 추가 이용하여 이전의 값들보다 one order 높은 정확성을 갖는 측정법을 제시하였다 [11]. 이 방법을 사용하여 94GHz에서 여러 재료에 유전특성을 조사하였다. Signal source로는 phase-locked IMPATT oscillator를 사용하였고 투과 및 반사계수 측정을 위해 HP8510 network analyzer를 사용하였다. 투과계수의 측정에 있어서 시료의 위치에 그리 민감하지 않지만 반사계수의 경우에는 상당히 민감하므로 여기서는 optical interferometer를 사용하여 조정하였다. 비자성 물질에 있어서는 반사측정법이 없어도 충분히 정확한 유전율을 얻을 수 있다.

기존의 자유공간법은 시료 가장자리에서 일어나는 회절효과와 horn antennas 사이에 다중반사가 문제 시 되어왔다. Friedsam et al.은 이러한 가



(그림 2) 복소투과계수 측정을 위한 Quasioptical Setup

장자리에서의 회절 효과를 없애주기 위하여 (그림 2)와 같이 horn-lens 조합을 사용하여 회절효과를 최소화시켰다. 또한 다중 반사는 time domain gating technique을 이용하여 제거시킬 수 있다고 보고하였다[12]. 사용된 horn antennas의 개구반지름과 flare 각은 각각 13.5mm, 10.11°이다. 그리고 초점거리($F=210\text{mm}$) 대 렌즈지름($D=131\text{mm}$)비는 1.6이었다. Collimated beam의 3dB beamwidth 측정치와 이론치 사이의 오차는 0.5° 미만이었고 75~95GHz 대역에서 1.7° 이하의 값을 갖고 있었다. 회절효과를 최소화시키기 위하여 시편크기는 빔 반경의 8배 이상이었고, 시편 홀더의 위치는 모터로 정밀하게 조절된다. 신호수신을 분석하기 위하여 자동 네트워크 분석기 HP8510이 사용되었으며 데이터의 측정은 컴퓨터 프로그램으로 조정된다. 이러한 setup으로 유리시편에 대하여 여러 각도에서 투과계수의 크기(Magnitude)와 상(Phase)을 측정함으로써 75~95GHz 범위에서 복소 유전율을 결정하였다.

III. 결론

향후에 전개될 차세대 광대역 정보통신 기술은 필연적으로 밀리미터 대역의 주파수 자원을 사용하게 될 것이고, 이에 따라 이 주파수 대역에서 활용 가능한 정보통신부품용 기본 신소재의 개발과 특성평가 기술의 확보가 요구되어 진다.

현재까지 밀리미터파 대역에서 활용될 세라믹 유전체 소재에 관한 연구 발표는 거의 전무한 상

황이며, 이에 따른 신소재 개발이 필수적이라고 판단된다. 밀리미터파 소재는 기존 소재에 비해 더 작은 유전손실과 우수한 온도안정성 그리고 낮은 소결온도 등의 특성을 갖추어야 하며, 이를 만족하는 신조성의 유전체 소재 개발을 위하여 다양한 물리, 화학적 접근방법과 재료설계 기술이 개발되어야 할 것이다. 즉, 선정된 기본조성의 유전체 소재를 중심으로 재료에 대한 설계기술(소결조제, 특성조제 등의 부조성 첨가물질 탐색, 공정조건의 최적화, 미세구조의 균일화 등)과 분석기술(XRD, SEM/TEM, FTIR 등)을 통하여 유전소재의 유전특성을 결정하는 주요 인자를 도출하고, 그들의 조절을 통해서 유전체 소재의 재료설계 기법을 확립하여야 할 것이다.

유전체 특성평가에 있어서는 30GHz 이상의 초고주파 대역에서 정확히 측정할 수 있는 자유공간법에 의하여 밀리미터파대 유전특성을 해석할 수 있으리라 판단되며, 이를 위한 구체적인 장비구성과 자동 network setup 기술에 관한 연구가 필요하리라 사료된다.

참고 문헌

- [1] T. Okamura *et al.*, "Dielectric Properties of Rare-Earth-Added Cordierite at Microwave and Millimeter Wave Frequencies," *Jan. J. Appl. Phys. Pt. 1*, Vol. 37, No. 9B, 1998, pp. 5364-5366.
- [2] T. Bingqian, "Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O₃ High Q Dielectric Resonator Material and Its Applications in Millimeter-Wave Systems," *Research & Progress of SSE*, Vol. 16, No. 1, 1996, pp. 48-55.
- [3] K.Y. Kim *et al.*, *Dielectric Material for High Frequencies*, Patent US5532197, KIST, Seoul, Korea, 1996.
- [4] H.J. Jung *et al.*, *Composition of High Frequency Dielectric Ceramics*, Patent US5444027, KIST, Seoul, Korea, 1995.
- [5] S. Hirahara *et al.*, *Dielectric Ceramic Composition for High Frequency*, Patent US5432135, Kyocera Corporation, Kyoto, Japan, 1995.

- [6] F. Tatsuji *et al.*, *Dielectric Ceramic Composition*, Patent JP9183653A, Kyocera Corporation, Kyoto, Japan, 1997.
- [7] J.E. Sagara *et al.*, *Dielectric Porcelain Composition for High Frequency*, Patent JP9263449A, Kyocera Corporation, Kyoto, Japan, 1997.
- [8] J.E. Degenford *et al.*, "A Quasi-Optics Perturbation Technique for Measuring Dielectric Constants," *Proc. IEEE*, Vol. 113, 1966, pp. 520-522.
- [9] W.B. Bridges *et al.*, "Measurement of Dielectric Constant and Loss Tangent of Thallium Mixed Halide Crystals KRS-5 and KRS-6 at 95GHz," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-30, 1982, pp. 286-292.
- [10] F.I. Shimabukuro *et al.*, "A Quasi-Optical Method for Measuring the Complex Permittivity of Materials," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-32, No. 7, 1984, pp. 659-665.
- [11] R.G. Nitsche *et al.*, "A Free Space Technique for Measuring the Complex Permittivity and Permeability in the Millimeter Wave Range," *IEEE MTT-S Microwave Symp. Dig.*, 1994, pp. 1465-1468.
- [12] G.L. Friedsam *et al.*, "A Broadband Free-Space Dielectric Properties Measurement System at Millimeter Wavelengths," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-46, No. 2, 1997, pp. 515-518.
- [13] J.E. Chamberlain *et al.*, "Determination of the Refractive Index of a Solid Using a Far Infra-Red Maser," *Nature*, Vol. 206, 1965, pp. 602-603.
- [14] M.N. Afsar *et al.*, "High-Precision Dielectric Measurement on Liquids and Solids at Millimeter and Submillimeter Wavelengths," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-25, 1976, pp. 290-294.
- [15] J.E. Chamberlain *et al.*, "Refractometry in the Far Infra-Red Using a Two-Beam Interferometer," *Nature*, Vol. 198, 1963, pp. 874-875.