

강유전체를 이용한 이동통신주파수 대역용 박형 전파흡수체의 제조 및 특성

이영종 · 윤여춘 · 김성수†

충북대학교 공과대학 재료공학과, 컴퓨터 정보통신 연구소

Fabrication and Properties of Thin Microwave Absorbers of Ferroelectric Materials Used in Mobile Telecommunication Frequency Bands

Young-Jong Lee, Yeo-Choon Yoon and Sung-Soo Kim†

Department of Material Science and Engineering

Research Institute for Computer and Information Communication

Chungbuk National University, Chungju 361-763

(2002년 1월 31일 받음, 2002년 2월 19일 최종수정본 받음)

Abstract High-frequency dielectric and microwave absorbing properties have been investigated in ferroelectric materials (BaTiO_3 (BT), $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ (PMN-PT), $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (PMN-PZN)) for the aim of thin microwave absorbers in the frequency range of mobile telecommunication. The specimens are prepared by conventional ceramic processing and complex permittivity has been measured by transmission/reflection method. The ferroelectric materials show high dielectric constant and dielectric loss in the microwave range and their dominant loss mechanism is considered to be domain wall relaxation. The microwave absorbance of BT, 0.9PMN-0.1PT, and 0.8PMN-0.2PZN specimen (determined at 2 μm) are found to be 99.5% (at a thickness of 4.5 mm), 50% (2.5 mm), and 30% (2.5 mm), respectively. It is suggested that PMN-PT or PMN-PZN ferroelectrics are good candidate materials for the spacer of $\lambda/4$ absorber. The use of ferroelectric materials is effective in reducing the thickness of absorber with their advantage of high dielectric constant.

Key words : ferroelectric, microwave, absorbers, mobile telecommunication

1. 서 론

최근 PCS (Personal Communication System) 와 같은 이동통신시장은 양적으로나 질적으로 대단한 급성장을 하고 있다. 그러나 이동통신단말기로부터 나오는 전자파가 인체에 유해할 수 있다는 문제가 제기되면서 국내는 물론 전 세계가 전자파의 인체영향 연구 및 그 대책 마련에 골몰하고 있다. 현재까지 인체유해 여부가 확실히 규명된 바는 없으나, 있을 수 있는 가능성에 대비해 각국에서는 인체보호 기준을 고시해 그 규제를 강화하고 있다.

따라서 이동통신단말기에서 전자파의 누설을 방지하고 인체유해 영향을 최소화하기 위한 여러 가지 방안들이 검토되고 있다. 재료적인 측면에서 이에 대한 대처방안 중의 하나가 전파흡수체의 사용이다. 현재 시판되고 있는 이동전화의 경우 케이스 내부를 금속 피막으로 코팅하여 전파누설을 최소화하고 있으나, 반사된 전파가 내부 회로 또는 부품에 전파장해를 발생시킬 수 있다는 점에서 전자파 차폐재보다는 전파 감쇠 기능 및 반사 억제 기능을 동시에 겸비한 전파흡수체가 보다 효과적인 방안으로 제안되고 있다.¹⁾

이동통신단말기에 들어가는 전자파 감쇠용 흡수체로서 요구되는 가장 중요한 특성은 통신주파수 (셀룰러폰 : 800 MHz, PCS : 1.8 GHz, IMT-2000 : 2.2 GHz) 에서 전자파 흡수율이 커야함은 물론, 무엇보다도 두께가 박형이어야 한다. 그러나 기존의 페라이트 자성체나 탄소 분말을 가지고 흡수체를 구성하였을 경우 상기 주파수 대역에서 두께가 6-10 mm에 달하기 때문에 박형화에 필요한 새로운 소재의 사용이 검토되어야 한다.²⁾

정합형 전파흡수체에서 전파흡수율은 두께가 파장 (λ) 의 1/4일 때 최대가 되고, 이 정합 두께는 구성 재료의 투자율 및 유전율의 제곱근에 반비례한다. 따라서 흡수체의 두께를 줄이기 위해서는 고투자율 또는 고유전율 재료의 선택이 중요하다. 스피넬 페라이트 자성체의 경우 Snoek 한계주파수 (일반적으로 1 GHz 미만) 를 넘어서면 비투자율이 급격히 감소하여 2 GHz에서 투자율은 20-30 정도에 불과하다.³⁾ 고주파대역용 흡수체로 사용되고 있는 육방정 페라이트의 경우에도 2 GHz에서 투자율은 20 정도에 불과하다.⁴⁾

반면 세라믹 강유전체 (BaTiO_3 , PZT 등) 의 경우 마이크로파 대역에서 100 이상의 유전율을 갖고 분역 분극

† E-mail: sskim@trut.chungbuk.ac.kr

(domain wall polarization)에 의한 유전손실이 크기 때문에 박형 전파흡수체의 기본 소재로 관심을 갖게 한다.⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 상온에서 강유전 특성을 갖고 고주파에서 유전상수 및 손실계수가 높을 것으로 예상되는 BaTiO₃, (1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-xPbTiO₃, (1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-xPb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃을 흡수손실재료로 선정하고, 이들 재료의 고주파 유전특성 및 전파흡수특성에 대해 조사하고자 하였다. Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃은 완화형 강유전체의 대표적인 재료로 BaTiO₃에 비해 유전상수가 매우 큰 장점이 있으나, 상전이 온도가 -15°C에 불과해 상온에서 강유전 특성을 갖는다.⁶⁾ 여기에 PbTiO₃ 또는 Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃을 고용시킴으로써 상온에서 강유전 특성을 얻을 수 있고⁷⁾, 따라서 고주파 대역에서 분역분극에 의한 손실특성이 기대되기 때문에 상기 조성의 완화형 강유전체를 BaTiO₃와 함께 연구 대상재료로 선정하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시편 제조

본 실험에 사용된 시편의 종류는 BaTiO₃ (약칭 BT), Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃ (약칭 PMN-PT), Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃ (약칭 PMN-PZN)이었다. BT 시편 제조에 사용된 원료분말은 시약급의 BaCO₃와 TiO₂이었다. 불밀에서 24시간 혼합한 분말을 1100°C에서 3시간 하소하였다. 하소된 분말에 PVA 결합재를 0.5 wt% 첨가한 후 toroidal 형태 (내경 3 mm, 외경 9 mm)의 성형체를 제조하였다. PVA 결합재를 500°C에서 2시간 동안 제거한 후 1300°C에서 4시간 동안 소결하였다. 소결 시편을 APC-7 beadless airline 치구에 맞도록 내경 3 mm, 외경 7 mm로 정밀하게 가공하였다.

PMN-PT 시편 제조에 사용된 원료분말은 시약급의 PbO, MgO, Nb₂O₅, TiO₂이었다. 시편의 조성은 (1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-xPbTiO₃이었고, PbTiO₃의 몰비 x는 0.0-0.3 범위에서 조절하였다. 먼저 MgO와 Nb₂O₅를 혼합하여 MgNb₂O₆ columbite 상을 형성하였다. 이때 MgO의 경우 3 wt%를 과량 첨가하여 columbite 상의 형성을 촉진하였다.⁸⁾ 혼합 분말을 750°C에서 4시간 하소하여 MgNb₂O₆ columbite 상을 합성하였다. MgNb₂O₆ columbite와 PbO (과량 1 wt%), TiO₂ 분말을 칭량하여 다시 24시간 동안 습식혼합하였다. 혼합 분말을 900°C에서 2시간 하소하였고, 하소한 분말을 다시 습식방법으로 분쇄한 후 건조하였다. 성형은 BT 시편 제조시와 동일하게 하였다. 성형체를 500°C에서 2시간 유지하여 PVA 바인더를 제거하였으며 1200°C에서 2시간 소결하였다.

PMN-PZN 시편 제조에 사용된 분말은 PbO, MgO, ZnO, Nb₂O₅ 및 TiO₂이었다. 시편의 조성은 (1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-xPb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃이었고, Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃의 몰비 x는 0.0-0.3 범위에서 조절하였다. 먼저 MgO와 Nb₂O₅를 혼합하여 MgNb₂O₆ columbite 상을 합성하고, ZnO와 Nb₂O₅를 혼합하여 ZnNb₂O₆ columbite 상을 합성하였다. 이때 columbite 상의 형성을 촉진 위해서 MgO를

3 wt% 과량 첨가하였다. 불밀에서 혼합한 750°C에서 2시간 동안 하소하여 MgNb₂O₆ columbite 상과 ZnNb₂O₆ columbite 상을 합성하였다. MgNb₂O₆ columbite와 ZnNb₂O₆ columbite, 그리고 PbO (과량 1wt%) 분말을 불밀에서 혼합한 후 900°C에서 2시간 하소하여 PMN-PZN 분말을 제조하였다. 이후 성형조건은 PMN-PT 제조 시와 동일하다. 성형체는 500°C에서 2시간 유지하여 PVA 바인더를 제거하였으며, 이후 5°C/min로 승온한 후 1000°C에서 3시간 동안 소결하였다. PMN-PT와 PMN-PZN 성형체를 소결할 때 PbO의 휘발을 억제하기 위해 시편을 동일 조성의 분말로 덮고 알루미늄 도가니로 다시 밀봉하는 방법을 채택하였다.

2.2. 특성분석

합성한 분말의 결정구조를 조사하기 위해 X-선 회절 분석을 하였다. 소결 시편의 복소투자율 및 복소유전율을 반사/투과법 (일명 S-parameter법)에 의해 측정하였다. 측정된 반사산란계수 (S_{11})와 투과산란계수 (S_{21})로부터 복소투자율 및 복소유전율을 계산하였다. 전파흡수능에 대한 실측은 시편의 배면을 금속 도체로 단락시킨 후 반사계수를 측정함으로써 행하였다. 이때 사용한 장비는 HP (Hewlett Packard)사의 8722D Vector Network Analyzer이고, 측정주파수 대역은 0.5~18 GHz이었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 결정구조 및 상분석

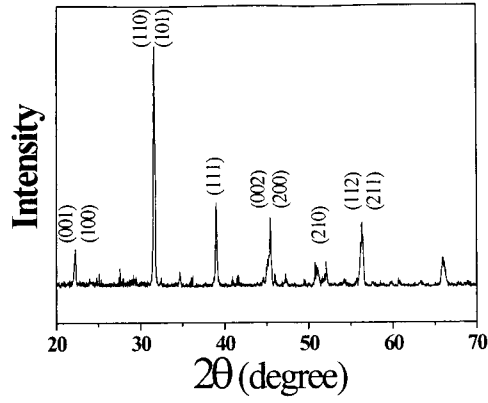
Fig. 1은 하소한 BT, PMN-PT, PMN-PZN 분말의 X-선 회절시험 결과이다. BT, PMN-PT시편의 경우 perovskite상의 합성이 완전히 이루어진 것으로 판단된다. PMN-PZN시편의 경우, 29° 부근에서 pyrochlore peak가 미약하게 나타나는 것으로 보아 약간의 2차상이 존재하는 것으로 보인다.

3.2. 복소유전율의 주파수 분산특성

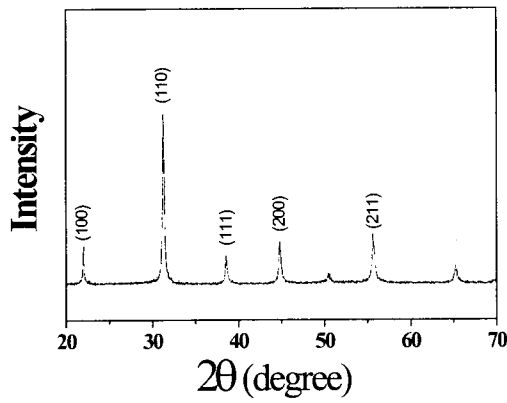
Fig. 2는 BT 시편에서 측정된 복소유전율 ($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$)의 주파수 분산 특성이다. 0.5-4 GHz 범위에서 복소유전율의 실수 (ϵ')는 50 정도의 값을 가지나, 급격히 감소하여 6 GHz 이상의 주파수에서는 30 정도의 일정한 값을 유지한다. 유전손실에 해당하는 ϵ'' 은 6 GHz 부근에서 최대치 (약 25)를 갖고 비교적 넓은 주파수 분산특성을 보이고 있다.

Fig. 3은 (1-x)PMN-xPT 계에서 PT 함량 변화에 따른 유전율과 유전손실의 주파수 분산특성을 나타낸 것이다. 이 시편에서도 ϵ' 은 특정 주파수대역에서 급격히 감소하며, 그 주파수에서 ϵ'' 은 최대치를 보이고 있다. PT의 몰비 x=0.1인 시편에서 가장 큰 유전율 (0.5-2 GHz에서 180)과 유전손실 (4 GHz에서 110)이 관찰되었다. PT 함량이 0.1 이상으로 증가할수록 유전율과 유전손실은 감소하였다.

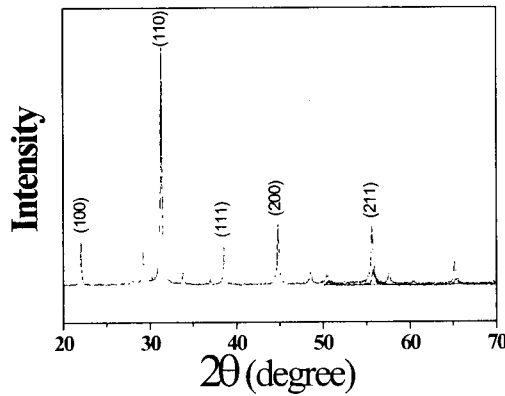
Fig. 4는 (1-x)PMN-xPZN 계에서 PZN 함량 변화에 따른 유전율과 유전손실의 변화를 나타낸 것이다. 가장 큰 유전율과 유전손실은 x=0.2인 시편에서 관찰되었다. 이 시편의 경우 0.5 GHz에서 ϵ' 은 270 정도의 값을 보이고,



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of calcined powders ; (a) BT, (b) PMN-PT, and (c) PMN-PZN.

ϵ_r'' 은 2 GHz에서 최대치 (약 150)를 보인다. PZN의 함량이 0.2 이상으로 커지면 유전율과 유전손실은 감소하였다.

PMN에서 PT 또는 PZN의 치환에 따른 유전율 및 유전

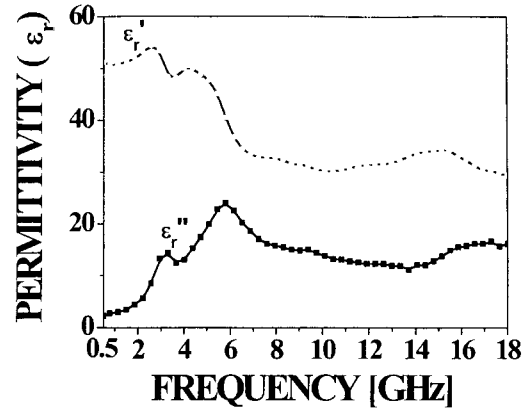
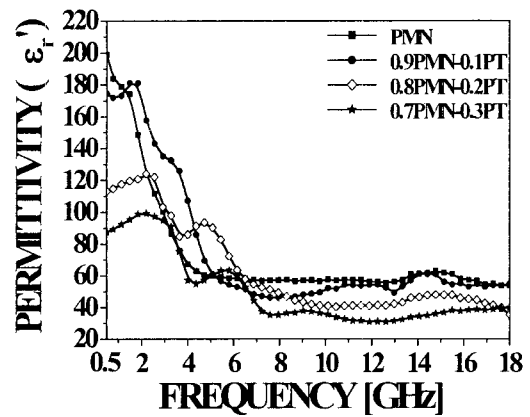
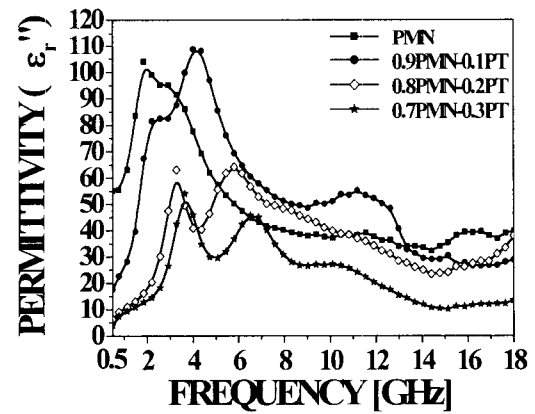


Fig. 2. Complex permittivity of BaTiO₃.



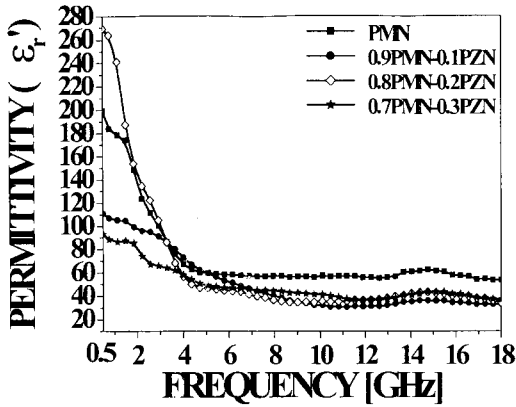
(a)



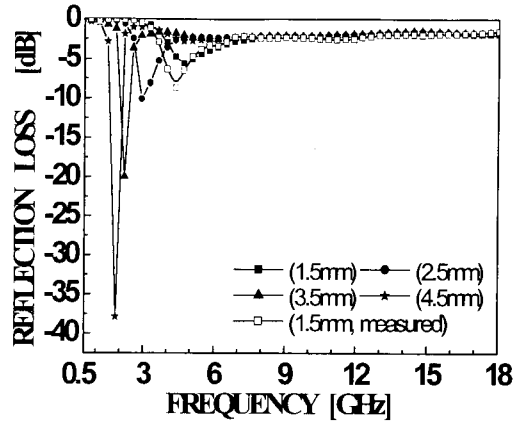
(b)

Fig. 3. Complex permittivity of $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PtTiO}_3$; (a) ϵ_r' , (b) ϵ_r'' .

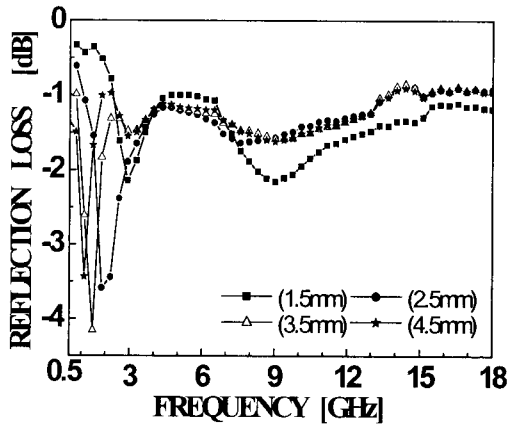
손실의 변화는 상전이 온도와 관련이 크다. 상전이 온도가 -15°C 인 PMN에 큐리온도가 490°C , 140°C 인 PT와 PZN을 첨가하면 상전이 온도는 첨가량에 비례하여 증가한다. 상전이 온도가 실온 근방에 위치할 때 가장 큰 유전율을 얻을 수 있으며, 이에 해당하는 PT, PMN의 첨가량은



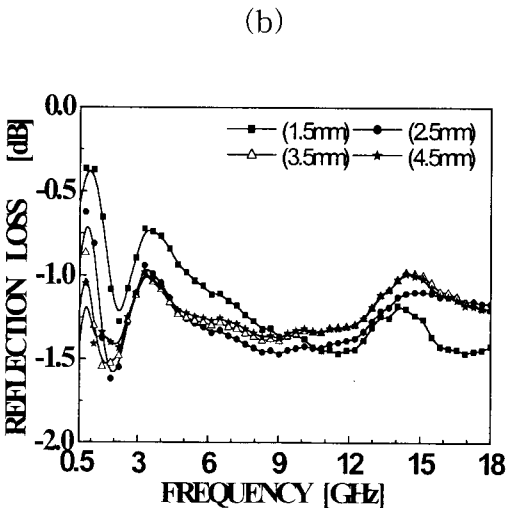
(a)



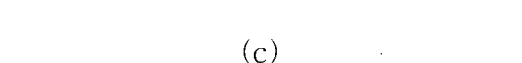
(b)



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Complex permittivity of $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$; (a) ϵ' , (b) ϵ'' .

각각 10 mol%, 20 mol%로 보고되고 있다.^{6,7)} Fig. 3와 Fig. 4에 제시한 바와 같이, 마이크로파 대역에서도 가장 큰 유전율과 유전손실은 상전이 온도가 실온에 해당하는 조성에서 관찰되고 있다.

마이크로파 주파수 영역에서 강유전체의 주된 분극 및 유전손실 기구로는 분역 분극 (domain polarization) 이 제시되고 있다.^{5,9)} 일반적으로 전자분극 (electronic polarization) 의 경우 유전상수는 5 이하의 값을 보이고, 이온분극 (ionic polarization) 에 의한 유전상수는 20을 넘지 못하기 때문에, Fig. 3에 제시한 60-200 정도의 높은 유전상수 (ϵ') 는 주로 분역 분극에 기인하는 것으로 판단된다. 분역벽 진동의 완화 주파수 (relaxation frequency) 가 마이크로파 대역에 위치함으로¹⁰⁾, Fig. 2-4에서와 같이 강유전체는 높은 유전손실 (ϵ'') 을 나타내고 최대손실 주파수는 1 GHz 이상의 마이크로파 대역에 존재한다. 유전상수는 분역벽 (domain wall) 의 이동속도에 비례하여 증가하며 분역벽 진동의 완화시간은 그 이동속도에 반비례하기 때문에, 유전율이 큰 재료일수록 (따라서 BT, PMN -

Fig. 5. Microwave absorbing properties of ferroelectric materials; (a) BT, (b) 0.9PMN-0.1PT, (c) 0.8PMN-0.2PZN.

PT, PMN-PZN 순으로) 최대손실 주파수는 저주파 대역으로 이동하는 것으로 보인다.

3.3. 전파흡수특성

배면이 도체로 단락된 유전체의 경우 유전체 표면에서 입

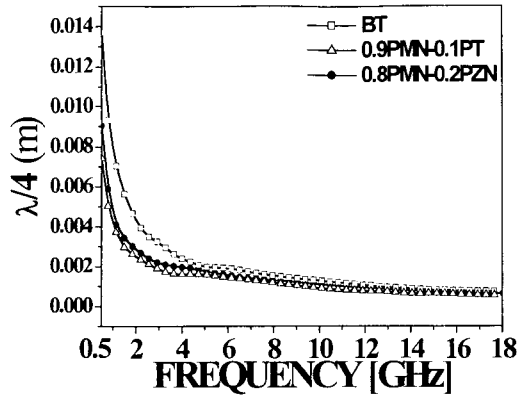


Fig. 6. $\lambda/4$ calculated from the material parameters of ferroelectric materials.

력임피던스 (Z_{in})는 식 (1)과 같이 표시된다.¹¹⁾

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\epsilon_r} \tanh \left[\frac{j2\pi f d}{c} \sqrt{\epsilon_r} \right] \quad (1)$$

여기서 Z_0 는 자유공간에서의 파동임피던스 ($=376.7 \Omega$), $j = \sqrt{-1}$, f 는 주파수, d 는 유전체의 두께, c 는 광속도이다. 반사손실 (reflection loss)은 식 (2)와 같이 Z_{in} 과 Z_0 의 차이에 비례함으로

$$\text{reflection loss (dB)} = 20 \log \left[\frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right] \quad (2)$$

복소유전율이 주어지면 반사손실을 주파수 및 두께의 함수로 계산할 수 있다.

Fig. 5는 BT, 0.9PMN-0.1PT, 0.8PMN-0.2PZN의 복소유전율로부터 계산된 반사손실이다. BT시편의 경우 (Fig. 5(a)), 두께를 4.5 mm로 고정하였을 때 약 2 GHz에서 -25 dB의 반사손실 (99% 전파흡수율)을 보였다. 두께를 줄임에 따라 최대흡수율은 감소하면서 흡수 주파수 대역은 고주파 대역으로 이동하였다. 두께를 1.5 mm로 가공한 시편에서 반사손실을 실측한 결과 이론치와 거의 유사한 값을 보이고 있다. 0.9PMN-0.1PT 시편의 경우 (Fig. 5(b)), 반사손실은 2 GHz에서 -3.5 dB (50% 전파흡수율) 수준으로 전파흡수율은 하락하였으나, 흡수체의 두께를 2.5 mm 수준으로 줄일 수 있다는 점이 중요하다. 0.8PMN-0.2PZN 시편의 경우 (Fig. 5(c)), 반사손실이 -1.5 dB (30% 흡수율) 수준으로 전파흡수율은 더욱 하락하였다. 이와 같이 PMN-PT, PMN-PZN 강유전체에서 전파흡수율이 크게 하락한 것은 유전상수가 너무 높아 표면에서 전파의 반사율이 커진 데 기인한다.

유전손실 매체에서 전파의 파장은 식 (3)과 같이 유전상수에 비례하여 감소한다.¹²⁾

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\left[\frac{1}{2} \epsilon_r' \sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1 \right]^{1/2}} \quad (3)$$

여기서 λ_0 는 자유공간에서 전파의 파장, $\tan \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r'$ 이다. 따라서 유전상수가 클수록 매질 내의 파장을 줄일 수

있고, 이를 $\lambda/4$ 형 전파흡수체¹³⁾에 적용하여 박형화 가능성을 타진할 수 있다. 따라서 식 (3)을 이용하여 $\lambda/4$ 를 계산하였다.

Fig. 6은 BT, 0.9PMN-0.1PT, 0.8PMN-0.2PZN 시편의 복소유전율로부터 계산된 $\lambda/4$ 이다. 2 GHz를 기준으로 $\lambda/4$ 는 BT의 경우 5 mm, 0.9PMN-0.1PT와 0.8PMN-0.2PZN의 경우 약 2.5 mm의 값을 보였다. 이들 재료를 $\lambda/4$ spacer로 활용하고 표면에 376.7Ω 의 면저항을 갖는 박막을 코팅함으로써 $\lambda/4$ 형 전파흡수체를 구성한다면 전체 두께를 상기 수준으로 낮출 수 있다. 따라서 PMN-PT, PMN-PZN과 같은 고유전율 재료는 $\lambda/4$ 형 전파흡수체의 spacer 재료로 그 활용이 가능할 것으로 사려된다.

4. 결 론

마이크로파 대역에서 박형 전파흡수체의 구현을 목적으로 유전손실이 큰 강유전체 (BT, (1-x)PMN-xPT, (1-x)PMN-xPZN)의 복소유전율 및 전파흡수특성에 대해 조사하였다. 세 종류 시편 모두 1 GHz 이상의 고주파 대역에서 높은 유전율 및 유전손실특성을 보였으며, 주된 분극 및 손실 기구는 분역벽 이동에 의한 완화현상으로 해석되었다. 따라서 BT, PMN-PT, PMN-PZN 순으로 초기유전율 및 유전손실은 증가하고 최대손실 주파수는 감소하였다.

복소유전율로부터 반사손실을 계산한 결과 BT 시편의 경우 두께를 4.5 mm로 잡았을 때 2GHz에서 99%의 전파흡수율을 보였다. 0.9PMN-0.1PT 시편의 경우 동일 주파수에서 전파흡수율은 50% 정도로 감소하였으나 두께를 2.5 mm 수준까지 낮출 수 있었다. 0.8PMN-0.2PZN 시편의 경우 전파흡수율은 30% 정도로 더욱 하락하였으나, 이 재료의 고유전율 특성을 이용하여 $\lambda/4$ 형 흡수체의 spacer 재료로 그 응용 가능성을 제안하였다. 기존의 페라이트 흡수체의 경우 2 GHz에서 흡수체의 두께가 6 mm 이상이 되어야 하는 점을 감안하면 전파흡수체의 박형화에 강유전체의 응용 가능성은 충분하다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 정보통신부에서 지원하는 대학기초 연구지원사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 内勝善之, 電波吸收体, 才ム社, 1987.
2. S.S. Kim, D.H. Han and S.B. Jo, IEEE Trans. Mag. 35 (6), 4554 (1994).
3. J. Smit and H.P.J. Wijn, *Ferrites*, Philips Technical Library, Eindhoven, Netherlands, 1959.
4. M. Matumoto and Y. Miyata, J. Appl. Phys., 79(8), 5486 (1996).
5. L.P. Pereverzeva, Y.M. Povlavko and Y.S. You, ISAF '96., Proceedings of the Tenth IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 2, 841 (1996).

6. S. L Swartz, T.R. Shrout, W.A. Schulze, and L.E. Cross, J. Am. Ceram. Soc., **57** (5), 311 (1974).
7. *Dielectric Ceramics*, Short Course Book of 95th Annual Meeting of the American Ceramic Society, (1993).
8. H.C. Wang and W.A. Schulze, J. Am. Ceram. Soc., **73**, 825 (1990).
9. R.E. Newnham, S.J. Jang, M. Xu and F. Jones, pp. 51-67 in Ceramic Transactions Vol. 21, Microwaves : Theory and Application in Materials Processing, Edited by D.E. Clark and F.D. Gac, The American Ceramic Society, Inc.
10. Y.M. Poplavko and Y.S. You, J. Kor. Phy. Soc., **32**, S1737 (1998).
11. Y. Naito and K. Suetake, IEEE Trans. MTT, **19**(1), 65 (1971).
12. A.R. von Hippel, *Dielectrics and Waves*, p.28, John Wiley & Sons, Inc., New York (1954).
13. 橋本修, 花澤理宏, 守田幸信, 信學枝報, EMCJ 98-32 (1998).