

논문 97-6-5-07

초음파 전동기용 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 유전 및 압전특성

김진수*

Dielectric and Piezoelectric Properties of 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ
Ceramics for Ultrasonic Motor Applications

Jin-Soo Kim*

요 약

본 연구에서는 0.125Pb(Mg_{1.2}Nb_{2.3})O₃-0.435PbTiO₃-0.44PbZrO₃의 조성을 갖는 hard계 압전 재료에 0.5 wt%의 MnO₂를 첨가하였으며, 이 시편으로 초음파 전동기를 제작하고자, 소결 온도에 따른 시편의 유전 및 압전특성에 대하여 연구하였다.

실험 결과, 1270°C의 소결 온도에서 다음과 같이 가장 우수한 압전특성을 나타냈다. 즉 시편의 밀도는 7.72 g/cm³, 유전상수는 570, 유전손실은 0.82 %, 잔류분극 Pr은 19.18 μC/cm², 항전계 Ec는 9.63 kV/cm, 전기기계 결합계수 kp는 55.1%, 기계적 품질계수 Qm은 886이 되었다.

또한 1270°C에서 소결된 시편의 유전상수 및 유전손실을 주파수 변화와 온도 변화에 따라 조사하였다.

Abstract

In this study, the effect of the sintering temperature on the dielectric and piezoelectric properties of 0.5 wt% MnO₂-doped 0.125Pb(Mg_{1.2}Nb_{2.3})O₃-0.435PbTiO₃-0.44PbZrO₃ ceramics were investigated aiming at ultrasonic motor applications.

From experimental result, it was found that the optimal sintering temperature condition was at 1270 °C. The sample sintered at 1270°C had density of 7.72 g/cm³, dielectric constant of 570, dielectric loss of 0.82%, remanent polarization of 19.18 μC/cm², coercive field of 9.63 kV/cm, electromechanical coupling factor of radial mode of 55.1%, mechanical quality factor of 886.

Temperature and frequency dependence of dielectric constant and dielectric loss of the sintered sample at 1270°C was also investigated.

1. 서 론

Jaffe 등에⁽¹⁾ 의하여 Pb(Zr·Ti)O₃ 세라믹이 발견된 이후로 많은 연구자들에 의하여 2성분계 및 3성분계 압전 세라믹스의 조성 및 압전특성에 관하여 폭넓게 연구되어 왔다.

Smolenskii 등에⁽²⁾⁽³⁾ 의하여 서로 다른 원자 조성을 갖는 perovskite 구조가 발견되었는데, 그 중에서 Pb(Mg_{1.2}Nb_{2.3})O₃은 -15°C의 Curie 온도에서 12600의 최대 유전상수를 나타냈다.

그러나 상온 이상에서 압전체로 응용하기 위하여 -15°C의 Curie 온도는 너무 낮기 때문에, H. Ouchi 등은⁽⁴⁾ 높은 큐리 온도를 갖고 더 우수한 압전특성을 갖는 재료로써 xPb(Mg_{1.2}Nb_{2.3})O₃-yPbTiO₃-zPbZrO₃

* 한국교원대학교 기술교육과 (Korea Nat'l Univ. of Education, Dept. of Technology Education)
<접수일자 : 1997년 3월 4일>

($x+y+z=1$) 조성에 대하여 연구하였다.

이 PMN-PT-PZ 조성에 대하여는 각종 원소를 치환한 조성 변화와 압전특성에 대하여 연구가 많이 되고 있으며, 특별한 목적의 용도에 따라 조성을 바꾸거나 치환 및 MnO_2 , Fe_2O_3 , Nb_2O_5 , Cr_2O_3 등의 원소를 소량 첨가함으로써 각종 용도에 맞는 재료를 만들고 있다.^{(5), (10)}

Ouchi 등은⁽⁵⁾ 0.125PMN-0.875PZT 조성에서 높은 큐리 온도, 높은 경방향 결합계수, 높은 유전상수, 낮은 기계적 품질계수를 갖는 재료를 만들었다. 그때의 소결 온도는 $1310^{\circ}C$ 이었으며, 시편의 밀도는 $7.49 g/cm^3$ 이며, 유전손실은 1.65%이며, 기계적 품질계수는 101이 되었다.

그러나 초음파 전동기에 사용되는 압전 세라믹의 특성은 유전손실 ($\tan \delta$) 값이 작아야 되고, 기계적 품질계수 (Q_m) 값이 크며, 전기기계 결합의 에너지 변환 효율 (kp)이 높고, 고전력 대전폭 진동시에 특성 열화가 작아야 하는 것등이 요구된다.

따라서, 본 연구자는 $0.125Pb(Mg_{1.2}Nb_{2.3})O_3-0.435PbTiO_3-0.44PbZrO_3$ 의 조성에 MnO_2 를 0.5 wt% 첨가하여, 소결 온도에 따른 시편의 유전 및 압전특성 등에 대하여 조사한 후, 최적의 소결 온도 조건에서 준비된 시편을 사용하여 새로운 모델의 풍차형 초음파 전동기(ultrasonic motors of wind-mill type)를 제작하여 특성을 분석하였는데,⁽¹⁷⁾ 본 논문에서는 초음파 전동기 제작에 사용된 시편의 유전 및 압전 특성에 대한 결과만 보고하고자 한다.

2. 실험

(1) 시편 제조

0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 조성을 갖는 압전 세라믹 시편을 제조하기 위하여 $PbO(99.9\%)$, $MgO(99.998\%)$, $Nb_2O_5(99.9\%)$, $TiO_2(99\%)$, $ZrO_2(99\%)$ 의 출발 원료에 $MnO_2(99\%)$ 를 첨가물로 사용하였다.

평량된 분말을 지르코니아 불을 사용하여 PE병 내에서 증류수와 함께 불 밀링한 후, $150^{\circ}C$ 의 오븐 내에서 건조시킨 후, $850^{\circ}C$ 에서 1시간 동안 하소 과정을 거친 후, 알루미늄 유발에서 분쇄하여 80mesh Al 시브로 체가름 하였다. PVA결합제를 5 wt% 첨가하여 섞은 후 $1000 kg/cm^2$ 의 압력으로 성형하였다. $600^{\circ}C$ 에서 2시간 동안 결합제를 burn-out 시킨 후, 1210, 1240, 1270,

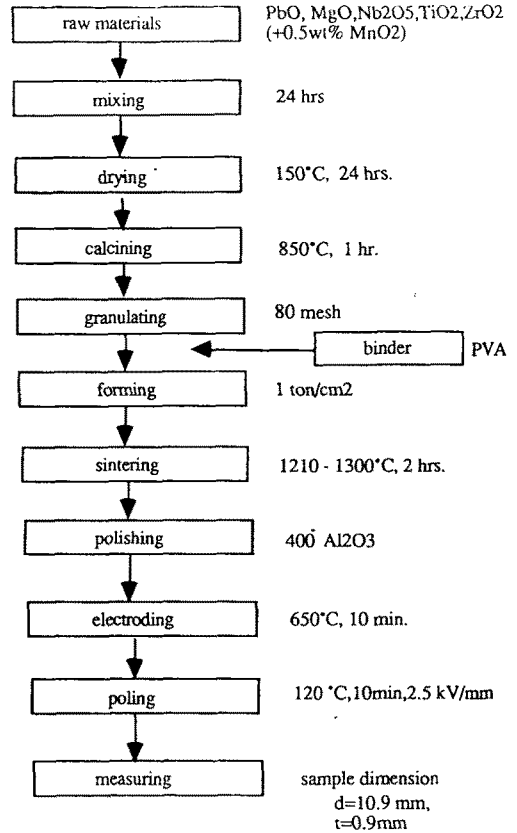


그림 1. MnO_2 첨가된 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 제조 공정도.

Fig. 1. Flow chart for sample preparation of 0.5 wt% MnO_2 -doped 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics.

$1300^{\circ}C$ 의 여러 온도에서 2시간 동안 각각의 시편을 소결하였다.

전기로 내에서 서냉시킨 후, 400grit SiC 분말을 사용하여 유리판 위에서 시편의 양면을 연마한 후, 초음파 세척을 하였다. $650^{\circ}C$, 10분의 조건으로 silver paste를 사용하여 시편의 양면에 전극 처리를 하였다.

시편에 압전특성을 부여하기 위하여 실리콘 오일의 $120^{\circ}C$ 온도에서 2.5 kV/mm의 직류 전계를 10분 동안 인가하였으며 24시간 후에 물리적 성질을 측정하였다.

측정에 사용된 시편은 직경이 10.9 mm, 두께는 0.9 mm이며, 그림 1에 시편 제조과정을 나타냈다.

(2) 측정

LCR메타(SR715)를 사용하여 주파수 1 kHz, 1 volt

하에서 상온에서의 유전상수 및 유전손실을 측정하였다. 경방향 및 두께 방향의 공진-반공진 주파수를 측정하기 위하여 임피던스 분석기(HP4194A)를 사용하였고, 공진 저항값을 측정하여 기계적 품질계수를 구하였다.

P-E 루프와 S-E 커브는 자동화된 분극 측정 시스템을 사용하여 측정하였는데, 구성 계기로는 DSP lock-in 증폭기(SR830), 고전압 DC증폭기(TREK 609C-6), IBM PC 등이다.

분극된 시편은 pieze-d₃₃ 메타(ZJ-2)를 사용하여 압전상수 d₃₃을 측정하였다. 또한, 시편의 유전상수와 유전손실의 온도 의존성을 측정하기 위하여 온도 조절기(Delta 9010), 멀티 주파수 LCR메타(HP 4274A), PC(HP9121)을 사용하였는데, 측정 주파수는 0.1, 1, 10, 100 kHz로 하였으며, 시편의 측정 온도 상승률은 2°C/min 정도로 하여 20~350°C 범위에서 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 2는 850°C에서 하소된 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ분말의 X-ray 회절 패턴을 나타낸 것으로 perovskite구조가 잘 형성되어 있음을 알 수 있다.

그림 3은 1270°C에서 2시간 동안 소결한 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 시편의 주사 전자 현미경 사진이다. 이를 위하여 소결된 시편의 표면을 잘 연마한 후 1200°C에서 30분 동안 열 에칭 하였다.

이 사진에서 알 수 있듯이 시편의 그레인 크기는 약 4 μm 정도가 되었다. Ouchi 등의⁽¹¹⁾ 연구 결과에 의하

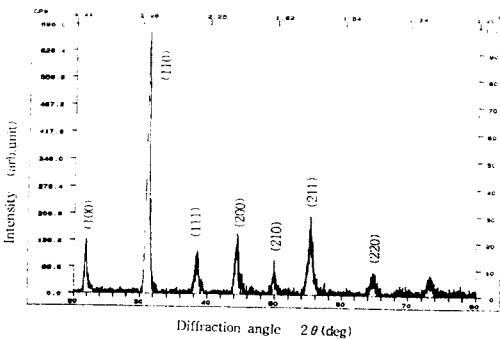


그림 2. 850°C에서 하소된 분말의 X선 회절 모양.
Fig. 2. X-ray diffraction pattern of 0.5 wt%-doped 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics calcined at 850°C for 1 hr.

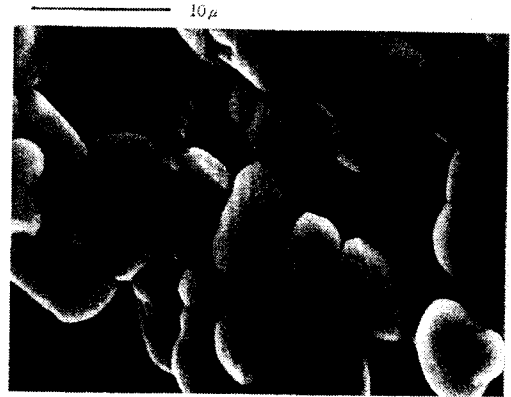


그림 3. 1270°C에서 소결된 시편의 SEM 사진.

Fig. 3. SEM photograph of 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ with doping 0.5 wt% MnO₂ after sintered at 1270°C for 2 hrs.

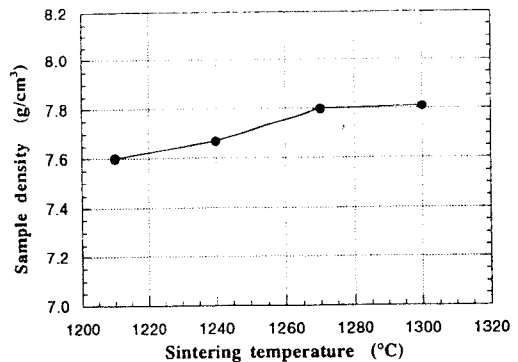


그림 4. 소결 온도에 따른 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 밀도.

Fig. 4. Density of 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics with sintering temperature.

면, 0.375PMN-0.375PT-0.25PZ 세라믹스의 SEM사진에서 MnO₂를 첨가시 그레인 크기는 MnO₂ 첨가량에 비례하여 증가하였으며 0.5 wt% MnO₂ 첨가시 그레인 크기는 약 3 μm 정도가 되었다.

그림 4는 소결 온도에 따른 시편의 밀도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 1270°C 이상의 소결 온도에서는 시편의 밀도가 7.72 g/cm³의 높은 값으로 거의 포화됨을 알 수 있다. 이는 Ouchi의⁽⁴⁾ 실험 결과에 비하여 더 낮은 소결 온도에서 더 높은 시편 밀도

를 얻을 수가 있었으며, 이 온도에서 소결된 시편으로 초음파 전동기를 제작하여야 할 것으로 생각되며, 본 논문의 연구 초점도 주로 1270°C의 시편에 대하여 나타내고자 한다.

그림 5는 소결 온도에 따른 시편의 유전상수와 유전손실 값을 나타낸 것이다. 1270°C의 온도에서 소결된 시편의 유전상수는 570이며, 소결 온도가 증가할수록 유전상수가 증가하는 것은 시편의 밀도와 그레인 크기가 증가하기 때문이라 생각된다.

또한 시편의 소결 온도가 증가할수록 유전손실이 작아지고 있는 것은 시편의 밀도가 증가하였기 때문이라 생각되며, 1270°C에서 소결된 시편의 유전손실 값은 0.82%로 매우 낮게 나타났다. 초음파 전동기의 제작시 고정자에서 초음파 진동에 의하여 내부에서 열이 발생하므로 유전 손실값이 작은 재료가 요구되며⁽¹²⁾, Ouchi 등의 연구 결과 값인 1.65%에 비하여 절반 이하로 매우 작은 값을 얻을 수 있었다.

그림 6은 1270°C에서 소결된 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 시편의 온도에 따른 유전상수와 유전손실 값을 나타낸 것인데, 측정 주파수는 0.1, 1, 10, 100 kHz로 하였다. 그림 6(a)에서 알 수 있는 바와 같이 시편의 Curie 온도는 307°C로 매우 높게 나타났으며, 일반적인 압전재료와 마찬가지로 측정 주파수가 증가함에 따라 유전상수의 최대값은 감소하고 있음을 알 수 있다.

Curie온도에서의 최대 유전상수 값은 19520이 되었다. 그리고 그림 6(b)는 1270°C에서 소결된 시편의 유전 손실

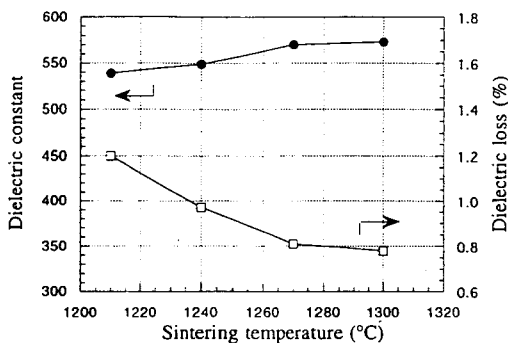
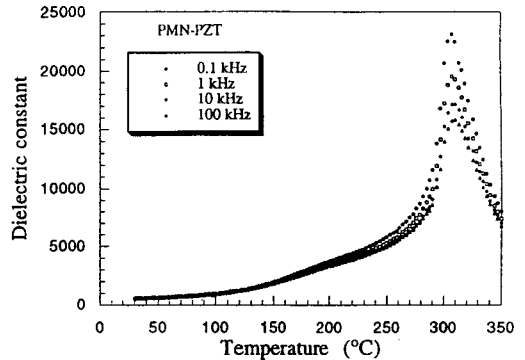
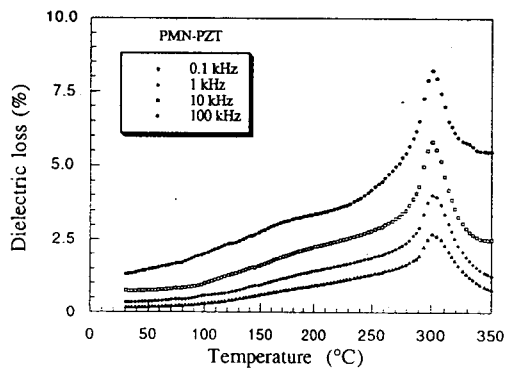


그림 5. 소결 온도에 따른 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 유전상수와 유전손실.
Fig. 5. Dielectric constant and dielectric loss of 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics with sintering temperature.



(a)



(b)

그림 6. 주파수 변화에 따른 유전상수와 유전손실의 온도의존성.

Fig. 6. Temperature dependence of the dielectric constant and dielectric loss as a function of frequency.

값을 나타내고 있는데 측정 주파수가 증가함에 따라 유전손실의 최대값은 감소하고 있음을 알 수 있다. Curie 온도에서의 최대 유전손실 값은 5.9%가 되고 있다.

Ouchi의⁽¹⁴⁾ 실험 결과에서 0.125PMN-0.375PT-0.5PZ 세라믹스의 큐리 온도는 275°C 정도가 되었으며, 그때의 최대 유전상수는 6200이며, 0.25PMN-0.375PT-0.375PZ 세라믹스의 큐리 온도는 225°C 정도가 되었으며 그때의 최대 유전상수 값은 10500이 되었다.

따라서, 본 연구에서 준비된 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스에 MnO₂를 0.5 wt% 첨가하였을 때 Curie 온도는 307°C로 훨씬 높으므로 전기기계 트랜스듀서로 사용할 때 훨씬 높은 온도 범위까지 사용이 가능하다고 생각된다.

PMN-PZT 시편에 MnO₂를 첨가하면 그 양에 비례하여 큐리 온도는 감소하는 것이 일반적이며, Ouchi의 경우에 0.375PMN-0.375PT-0.25PZ 세라믹스의 큐리 온도는 227°C 정도가 되고, MnO₂를 0에서 5 wt%까지 첨가할수록 Curie 온도는 170°C까지 크게 감소함을 보였다. 따라서, 본 연구에서는 초음파 전동기 제작시 고정자에서의 heat generation이 중요한 문제이므로 Curie 온도가 높게 나타나는 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 조성에 MnO₂를 0.5 wt% 첨가하여 1270°C에서 소결한 시편을 풍차형(wind-mill type) 초음파 전동기 제작에 사용하였다.

그림 7은 1270°C에서 소결된 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 분극 대 전계, 변형 대 전계 특성을 나타낸 것이다. 분극 대 전계의 측정은 주파수 1.0 Hz에서 one-shot excitation의 조건으로 측정하였으며, 질연과피가 발생되지 않게 충분한 분극 포화가 일어나도록 전계를 가한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시편의 잔류분극 Pr은 19.18 μC/cm²이고, 항전계 Ec는 9.63 kV/cm가 되었다.

한편, 시편의 두께 방향으로 전계를 가했을 때 횡방향으로 발생된 변형 S를 그림 7에 동시에 나타냈으며, 이는 상온에서 1.0 Hz의 driving주파수 하에서 측정하였다.

이때 47 kV/cm의 전계하에서 strain 값은 약 1.332 × 10⁻³이 되었으며, 이 값은 PMN보다 약 7배 정도 큰 값을 나타내고 있다.⁽¹⁰⁾

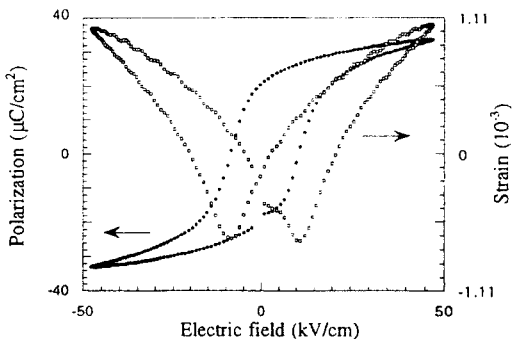


그림 7. 상온에서 측정된 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 분극 대 전계, 변형 대 전계의 특성.
Fig. 7. P-E and S-E curve of 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics at room temperature at 1.0 Hz.

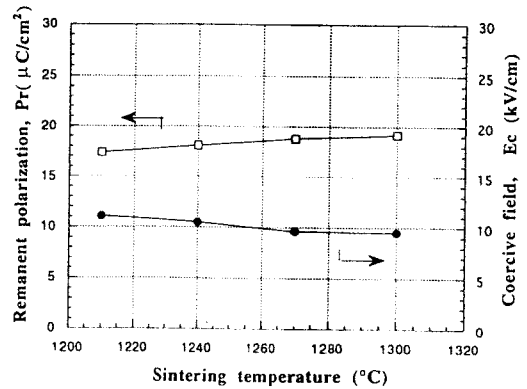


그림 8. 소결 온도에 따른 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 잔류 분극 및 항전계.
Fig. 8. Remanent polarization and coercive field of 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics with sintering temperature.

결국 그림에서 보는 바와 같이 시편에 가한 전계가 증가할수록 변형 대 전계의 히스테리시스는 더 커지게 되며, 인가 전계값이 항전계 Ec를 넘게 되면 버터플라이 대칭형으로 변형이 발생된다. 이는 전계를 가한 상태에서 각 그레인 내의 강유전 도메인이 reorientation되어 분극의 극성 변화가 발생되기 때문으로 생각된다.⁽¹³⁾

그림 8은 각 온도에서 소결된 시편의 잔류분극 Pr 값과 항전계 Ec 값을 나타낸 것이다. 소결 온도가 증가함에 따라 잔류분극 값은 증가함을 알 수 있으며 항전계 Ec 값은 약간 감소함을 알 수 있다. 항전계 값은 약 10 kV/cm 정도로 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹은 hard계 압전체이므로 초음파 전동기 등의 액츄에이터 재료로 적합하다고 생각된다.

그림 9는 시편의 소결 온도에 따른 압전상수 d₃₃과 압전 전압 상수 g₃₃ 값을 나타낸 것이다. 1270°C에서 소결된 시편의 압전상수 d₃₃은 222 pC/N 정도가 되었으며, 전압 상수 g₃₃는 44 × 10⁻³ V·m/N 정도가 되었다.

그림 10은 시편의 소결 온도에 따른 경방향 진동의 전기기계 결합계수를 나타낸 것이다. 1270°C의 소결 온도에서, kp값은 가장 높게 나타났으며 그 값은 55.1%가 되었고, 이 값은 Ouchi의 실험 결과인⁽¹¹⁾ 52.7%보다 약간 높은 값으로 생각된다. 실제로 초음파 전동기 제작시 중요한 압전 특성은 전기기계결합계수 kp와 기계적품질계수 Qm이며, 본 연구에서의 kp값은 적당하다고 생각한다.

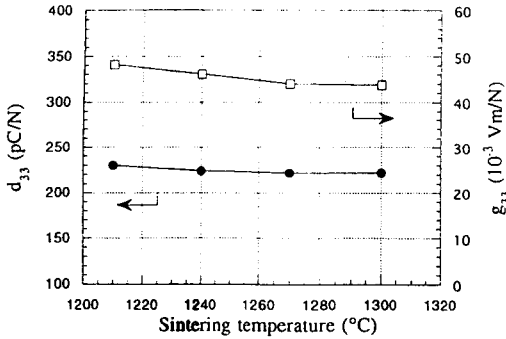


그림 9. 소결 온도에 따른 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 압전상수 및 전압상수.
Fig. 9. Piezoelectric constant and voltage constant of 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics with sintering temperature.

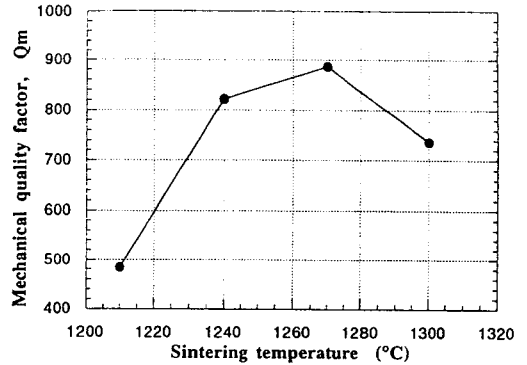


그림 11. 소결 온도에 따른 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 기계적 품질계수.
Fig. 11. Mechanical quality factor of 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics with sintering temperature.

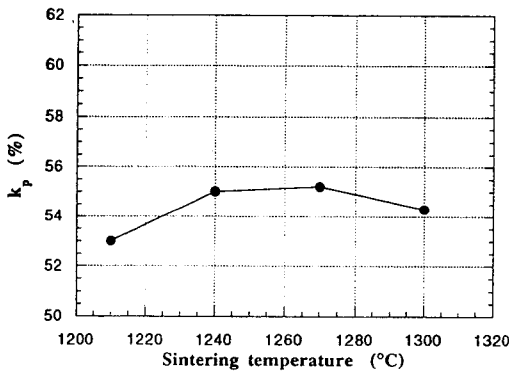


그림 10. 소결 온도에 따른 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 전기기계 결합계수.
Fig. 10. Electromechanical coupling factor of 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics with sintering temperature.

그림 11은 시편의 소결 온도에 따른 기계적 품질계수를 나타낸 것이다. 기계적 품질계수 Q_m 은 경방향 진동 모드에 대하여 일본 전자 재료 공업회 표준 규격 EMAS-6001에 따라 다음 식에 의하여 구하였다.

$$Q_m = 1/2 \pi f r R_1 C_f \left\{ 1 - \left(\frac{f_r}{f_a} \right)^2 \right\}$$

단, R_1 은 공진 주파수에서의 저항값이고, C_f 는 1klz에서의 시편의 정전용량값이다. 그림에서와 같이 1270°C의

소결 온도에서 Q_m 값은 최대 886으로 매우 높게 나타났다. 이보다 높은 온도인 1300°C에서는 Q_m 값이 736이 되었는데 이는 과도한 소결온도라고 생각된다.

Ouchi의 연구 결과에서⁽⁴⁾ 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스를 1310°C에서 소결했을 경우, 경방향 전기기계 결합계수 k_p 는 49.2%, 기계적 품질계수 Q_m 은 101에 불과했다. 그러나, 본 연구에서는 초음파 전동기용 재료로 사용하기 위하여 Q_m 값을 높여야 하므로 MnO_2 를 0.5 wt% 첨가했으며, 이에 따라 Q_m 값은 886까지 올릴 수 있었다.

따라서, high-power 특성이 요구되는 초음파 전동기 (ultrasonic motors)나 압전 변압기 (piezoelectric transformers)의 경우 실제 작동시 vibration level이 매우 높으므로, 내부에서 열이 발생됨은 물론이고 손실 메커니즘도 달라지기 때문에 이에 관하여는 Uchino⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾, Takahashi⁽¹⁶⁾ 등에 의하여 연구가 진행되는 중이다.

표 1은 0.5 wt% MnO_2 가 첨가된 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 소결 온도에 따른 유전 및 압전특성을 요약한 것이다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 유전손실 ($\tan \delta$) 값이 작고 기계적 품질계수 (Q_m)와 전기기계 결합계수 (k_p)가 큰 시편을 얻기 위하여는 1270°C의 소결 온도가 최적이라고 생각되며, 이 시편을 이용하여 기존의 디스크형 (disk type) 및 링형 (ring type) 초음파 전동기와는 구조가 다른 풍차형 (wind-mill type) 초음파 전동기를 제작하여 그 회전 특성을 분석한 결과는 후후 발표할 예정이며,⁽¹⁷⁾ 여기서

는 초음파 전동기용 PMN-PT-PZ 시편의 유전 및 압전 특성에 대한 결과만을 나타낸 것이다.

표 1. MnO₂가 첨가된 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ 세라믹스의 유전 및 압전 특성.

Table 1. Dielectric and piezoelectric properties of 0.5 wt% MnO-doped 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics.

	sintering temperature(°C)			
	1210	1240	1270	1300
density (g/cm ³)	7.47	7.70	7.71	7.76
dielectric constant	539	549	570	573
dielectric loss (%)	1.38	0.97	0.82	0.78
kp (%)	52.0	54.7	55.1	54.3
Qm	484	822	886	736
d ₃₃ (pC/N)	238	224	222	222

4. 결 론

MnO₂가 0.5 wt% 첨가된 0.125Pb(Mg_{1.2}Nb_{2.3})O₃-0.435PbTiO₃-0.44PbZrO₃ 세라믹스의 소결온도에 따른 유전 및 압전특성에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시편의 최적 소결 온도는 1270°C가 되었다.
- (2) 시편의 밀도는 7.72 g/cm³, 유전상수는 570, 유전손실은 0.82%가 되었다.
- (3) 1.0 Hz에서 측정된 잔류분극 값은 19.18 μC/cm², 항전계 값은 9.63 kV/cm가 되었다.
- (4) 경방향의 전기기계 결합계수는 55.1%, 기계적 품질계수는 886이 되었다.
- (5) 1270°C에서 소결된 시편의 유전상수와 유전손실은 온도 변화에 따라 측정된 결과, 큐리 온도는 307°C가 되었고, 최대 유전상수는 19520이 되었다.

이상의 결론에서 보는 바와 같이 본 시편의 유전 손실값이 매우 낮고(0.82%), 기계적 품질계수 값이 매우 높으므로(886), 초음파 전동기용 고정자로 적합하다고 생각되며, 실제 디바이스로 작동할 때에는 vibration-level이 높기 때문에, 이에 대한 재료의 high-power 특성과 메커니즘 규명이 차후 연구되어야 할 것으로 생각된다. 특히, 초음파 전동기나 압전 액츄에이터 등에 사용되는 세라믹 재료는 고전력 대전폭 진동의 조건하

에서 사용되는데, 이러한 조건에 대한 재료 연구는 Hirose와 Takahashi 등에⁽¹²⁾⁽¹⁶⁾ 의한 논문만이 2년전부터 발표되고 있는 실정이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지원에 의하여 Pennsylvania State University의 Material Research Laboratory에서 96.1~97.1까지 이루어진 것으로 깊이 감사드리는 바이다.

참고 문헌

- [1] B. Jaffe, J. Appl. Phys., vol. 25, no. 6, pp. 809-810, 1954.
- [2] G. A. Smolenskii and A. I. Agranovskaya, "Dielectric polarization of a number of complex compounds", Soviet Phys-Solid State(English Transl.), vol. 1, no. 10, pp. 1429-1437, 1960.
- [3] G. A. Smolenskii, A. I. Agranovskaya and S. N. Popov, "On the mechanism of polarization in solid solutions of Pb₃NiNb₂O₉-Pb₃MgNb₂O₉", ibid, vol. 1, no. 1, pp. 147-148, 1959.
- [4] H. Ouchi, K. Nagano and S. Hayakawa, "Piezoelectric Properties of Pb(Mg_{1.3}Nb_{2.3})O₃-PbTiO₃-PbZrO₃ solid solution ceramics", J. Am. Ceram. Soc., vol. 48, no. 12, pp. 630-635, 1965.
- [5] H. Ouchi, "Piezoelectric properties and phase relations of Pb(Mg_{1.3}Nb_{2.3})O₃-PbTiO₃-PbZrO₃ ceramics with barium or strontium substitutions", ibid, vol. 51, no. 3, pp. 169-176, 1968.
- [6] F. Bossler, P. Escure, M. Lejeune and J. P. Mercurio, "Dielectric and piezoelectric properties of PbMg_{1.3}Nb_{2.3}O₃-PbTiO₃-PbZn_{1.3}Nb_{2.3}O₃ ceramics", Ferroelectrics, vol. 138, pp. 103-112, 1993.
- [7] L. Wu and C. H. Wang, "The dielectric and piezoelectric properties of 0.125PMN-0.875PZT ceramics doped with 4PbO·B₂O₃", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 32, no. 6A, pp. 2757-2761, 1993.
- [8] H. Ouchi and M. Nishida, "On the origin of piezoelectric activity maximum in Pb(Mg_{1.3}Nb_{2.3})O₃-PbTiO₃-PbZrO₃ ceramics", Ferroelectrics, vol.

- 169, pp. 309-315, 1995.
- [9] S. M. Pilgrim, M. Massuda, J. D. Prodey and A. P. Ritter, "Electromechanical Properties of some $\text{Pb}(\text{Mg}_{1.3}\text{Nb}_{2.3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3\text{-(Ba,Sr)TiO}_3$ ceramics", J. Am. Ceram. Soc., vol. 75, no. 7, pp. 1964-69, 1992.
- [10] H. Takagi, K. Sakata and T. Takenaka, "Electrostrictive properties of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1.3}\text{Nb}_{2.3})\text{O}_3$ -based relaxor ferroelectric ceramics", Jpn. J. Appl. Phys., vol 32, no. 9B, pp. 4280-4283, 1993.
- [11] H. Ouchi, M. Nishida and S. Hayakawa, "Piezoelectric properties of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1.3}\text{Nb}_{2.3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$ ceramics modified with certain additives", J. Am. Ceram. Soc., vol. 49, no. 11, pp. 577-582, 1966.
- [12] S. Takahashi, S. Hirose, K. Uchino and K. Y. Oh, "Electro-mechanical characteristics of lead-zirconate-titanate ceramics under vibration-level change", Proc. of IEEE, pp. 377-382, 1995.
- [13] K. Uchino, Piezoelectric actuators and ultrasonic motors, Kluwer Aca. Publ., Ch3, 1997.
- [14] Y. H. Chen, J. S. Kim and K. Uchino, "High power piezoelectric characteristics and loss mechanisms of PMN-PT based ceramics". '97 Annual Mtg. of Am. Ceram.Soc., May, Ohio, 1997. (submitted).
- [15] J. S. Kim and K. Uchino, "Effect of sintering temperature on piezoelectric properties in 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramics for ultrasonic motor applications", 19th ICAT Smart Actuator Symposium, Oct., 1996.
- [16] S. Takahashi, Y. Sasaki, S. Hirose and K. Uchino, "Stability of $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3\text{-Pb}(\text{Mn}_{1.3}\text{Sb}_{2.3})\text{O}_3$ piezoelectric ceramics under vibration-level change", Jpn. J. Appl. phys., vol. 34, no. 9B, pp. 5328-5331, 1995.
- [17] 김진수, 이덕출 외, "압전 세라믹스를 이용한 풍차형 초음파 전동기의 제작과 특성", 전기전자재료학회지 (투고중) (1997)

 著 者 紹 介



김진수 (金鎭洙)

1960년 9월 6일생. 1986년 2월 인하대학교 공대 전기공학과 졸업, 1988년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 1992년 8월 인하대 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사), 1996년 1월 - 1997

년 1월 미국 Pennsylvania State University의 Materials Research Laboratory에 visiting scholar, 현재 한국교원대학교 기술교육과 조교수. 주관심분야 : 압전 세라믹스, 압전 액츄에이터, 초음파 전동기, 압전센서