

Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PZT와 PLZT를 경사 조성으로 하는 경사기능 압전액츄에이터의 제조와 물성

김 한 수 · 최 승 철 · 최 진 호*

아주대학교 재료공학과
*서울대학교 화학과

Processing and Properties of FGM Piezoelectric Actuator with Gradient Composition of Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PZT and PLZT

Han Soo Kim, Seung Chul Choi, and Jin Ho Choy*

Dept. of Materials Science and Engineering, Ajou University

*Dept. of Chemistry, Seoul National University

초 록 : 4.5Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-40.5Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-55PZT 와 PLZT(10/70/30, 11/60/40)를 경사조성으로 하여 경사기능 재료를 제조하였으며, 그 유전 특성과 압전 변형률 특성을 조사하였다. 경사기능재료는 A/B/A의 세층으로 성형하고 소결한 후 한 층을 연마해내어 제작하였다. 닥터블레이드 용 슬립에는 acrylic계 유기 결합제가 34~36 wt% 혼합되었으며, 건조 후 균열이 없는 양호한 thick film을 제조하였다. 1250°C, 2시간의 소성에 의해 경사기능화된 시편은 Nb와 La 등의 조성 차이에 의한 구배를 이루었으며, 구배영역은 약 30µm 정도였다. 경사기능재료에서 유전상수나 큐리온도와 같은 유전특성은 조합한 조성층의 특성들사이의 값을 나타내었다. 인가 전압에 따른 변형률 특성은 단일 조성의 시편보다 현저하게 증가하였다. 실제로 경사기능 압전액츄에이터를 제조한 결과 약 3µm/100V 정도의 변위량을 나타내었다.

Abstract : Functionally Gradient Materials(FGM) of 4.5Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-55PZT and PLZT(10/70/30, 11/60/40) were prepared. Its dielectric and piezoelectric strain properties were investigated. The FGM were pressed into A/B/A configuration using two kinds of films, one layer(A) was eliminated from FGM by polishing after sintering at 1250°C, 2 hrs. The acrylic binder system was successfully applied for crack free film through doctor blade method. The thickness of gradient layer in FGM was about 30 µm. Dielectric properties of FGM show the average value of each side layer. The strain-electric field characteristics of FGM were significantly improved comparison with the other single compositions. The prepared FGM piezoelectric actuator shows about 3 µm/100V displacement.

1. 서 론

압전 바이몰프 액츄에이터는 미소 위치의 조절과 변위 센서 등에 관련된 분야에서 널리 사용되고 있다¹⁾. 이러한 압전 액츄에이터는 일반적으로 계면에 수직한 분극 방향을 가지고, 급속판(shim)을 사이에 두어, 서로 접합된 두개의 얇은 세라믹 층으로 구성되어 있다. 압전 바이몰프 액츄에이터는 다른 액츄에이터에 비하여 상대적으로 큰 전압 감도(voltage sensitivity)를 가져서 작은 인가 전압하에

서 큰 변위를 일으킬 수 있다는 특징이 있다.

이러한 변위소자의 성능을 보다 향상시키기 위하여 세라믹층이 2개 이상으로 구성되는 multimorph 액츄에이터^{2,3)}, 강유전 relaxor 재료를 사용한 monolithic bimorphous 액츄에이터⁴⁾, 변위는 증가시키고 소자의 체적을 소형화한 domain 바이몰프 액츄에이터⁵⁾ 등이 제작되었다.

그러나 이와 같은 액츄에이터들의 대부분은 세라믹 층 사이에 접착제를 사용하여 접합되어 접합면이 존재하므로, 그 계면에는 온도에

따라서 열응력의 축적으로 인한 균열이나 파괴가 일어난다. 따라서 최근에 복수의 재료사이에 조성 등의 요소를 서서히 연속적으로 변화시켜 명확한 계면을 없게 하는 경사 기능재료의 개념을 응용하게 되었다. 경사기능재료는 모든 특성이 일정한 균일재료나 특성의 격차를 가지는 복합재료와 달리 역학적, 열적, 화학적인 모든 기능이 연속적으로 변화하고 있다⁶⁾. 이러한 경사기능재료는 큰 온도차를 완화시키기 위한 항공·우주용 소재로서 연구가 시작되었지만, 그 특성을 이용하기 위해서 다양한 분야에서의 광범위한 응용이 기대된다⁷⁾.

1989년 kawai 등은 3성분계 세라믹스인 Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Pb(Zr·Ti)O₃ 조성에서 조합조성을 선택하여 경사기능재료를 제작하였다^{8~10)}.

본 연구그룹에서는 여러 결정상을 가지고 있는 PLZT계 세라믹스의 조성내에서 조합조성을 선택하여 경사기능재료를 제조하였으며, 그 전기적 특성을 측정하고 분석하여 액튜에이터의 응용에 관한 연구를 보고하였다^{11,12)}. 경사기능압전액튜에이터에서 그 조합 조성은 열팽창율의 차이가 작고 각각 압전성과 유전율이 우수한 조성을 택하여야 한다. 그러므로 경사기능 압전액튜에이터의 경사 재료를 구성하기 위해서는 양단의 재료를, 여러 물성을 참고하여 재료 설계를 할 필요가 있다. 압전특성이 우수한 Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PZT 계는 페로브스카이트의 B site를 Zn⁺² 이온으로 치환하면 압전 특성이 저하되지 않고 큐리 온도가 향상된다¹³⁾. 이 재료는 PLZT 계와 열팽창율이 유사하며 적당한 유전율의 조성을 선택하여 경사기능 압전 액튜에이터를 제작할 수 있다.

본 연구에서는 압전 특성이 우수한 4.5Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-40.5Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-55PZT (이하 4.5PZN-40.5PNN-55PZT)조성과 유전율이 비교적 높은 PLZT 조성(10/70/30, 11/60/40)을 사용하여 새로운 경사기능압전 액튜에이터를 제조하는데 목적을 두었다. 이를 위해 경사기능화된 조성의 분석과 각 조성의 유전 및 압전 특성을 측정하였으며, 닥터블레이드법으로 경사기능 압전 액튜에이터를 제조하여 그 변위 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편의 제조

2.1.1 적층성형에 의한 경사기능재료

본 실험에서 사용한 원료 시약은 순도 99% 이상의 고순도 시약이었으며, 일반적인 혼합 산화물 합성법에 의해 단일 시편을 제작하고 FGM 시편은 성형과정에서 적층 성형하므로서 제조하였다. 그리고 닥터 블레이드법에 의하여 직접 FGM 압전 액튜에이터를 제작하였다. 조성식은 PZN-PNN-PZT와 PLZT의 조성과 FGM 재료로 제조하기 위한 접합 조성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Composition of Specimens

| Specimen | Composition |
|-----------------------|--|
| A | 4.5Pb(Zn _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ -40.5Pb(Ni _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ -36PbTiO ₃ -19PbZrO ₃ (4.5PZN-40.5PNN-36PT-19PZ) |
| B1 | Pb _{0.9} La _{0.1} (Zr _{0.7} Ti _{0.3}) _{0.975} O ₃ (10/70/30) |
| B2 | Pb _{0.89} La _{0.11} (Zr _{0.6} Ti _{0.4}) _{0.9725} O ₃ (11/60/40) |
| Laminated Composition | |
| FGM A/B1 | (4.5PZN-40.5PNN-36PT-19PZ)/(10/70/30) |
| FGM A/B2 | (4.5PZN-40.5PNN-36PT-19PZ)/(11/60/40) |

각각의 조성비에 따라 칭량한 원료 분말을 습식 혼합하고 900°C에서 2시간 하소하여, 직경 18mm 금형에서 1 ton/cm²의 압력으로 성형하였다. 특히 FGM은 이때 접합조성중 한 조성의 하소분말을 먼저 약간의 압력으로 성형한 다음 다른 조성을 동일한 양만큼 그 위에 적층하여 1 ton/cm²의 압력으로 성형하였다. 소결은 알루미늄 도가니를 사용하여 5°C/min으로 1250°C의 온도에서 2시간씩 행하였다. 소결된 시편은 연마기(Speed FAM 4B6-L)를 사용하여 두께 1 mm로 상·하면을 균일하게 연마하여 스크린 인쇄법으로 은전극(Dupont 7095)을 부착하였다. 분극 처리는 상온(25°C)의 실리콘 오일내에서 3.5 kV/mm의 직류 전압으로 15분 동안 행하였다.

2.1.2 닥터블레이드법에 의한 경사기능재료

FGM 압전 액튜에이터 소자의 제작은 닥터블레이드법에 의하여 제작되었다. 슬러리 제조용 유기 결합제는 아세톤과 Trichloroethane

을 용매로 하여 결합제, 가소제를 포함한 acrylic계(Metoram Science, Inc.)를 사용하였다. 제조된 하소 분말의 비표면적과 비중을 측정하여 유기 결합제 혼합량을 다적층용 유전체에 사용되는 식¹⁴⁾에 의하여 구하였다. 구해진 양의 유기 결합제와 하소 분말을 200 rpm으로 20시간 동안 충분히 혼합하여 슬러리를 제조하였다. 슬러리는 탈포 과정을 거쳐, blade의 높이가 750 μ m인 doctor blade 장치(DP-150, Tsugawa Co.)를 사용하여 Mylar film 위에서 1.5 cm/sec의 속도로 Tape casting하였다. 제조된 green sheet는 공기중에서 24시간 건조한 후, 60^l×20^w(mm)의 크기로 절단하여 적층성형(laminating)하였다. 적층은 laminator(Model 150-C, Freds Carver Inc.)를 사용하여 FGM 압전 액튜에이터를 제조하기 위한 각 조성을 5층씩 겹쳐서 10층으로 적층하였다. 이때의 적층 온도, 압력 및 시간은 70°C, 50kg/cm² 및 5분으로 하였다. 적층된 성형체는 소성중에 승온시 잔류 용매, 가소제 및 결합제의 제거를 위하여 500°C에서 2시간 유지하고 1200°C에서 2시간동안 소결을 행하였으며, 이것을 두께 0.9mm로 상·하면을 균일하게 연마하여 스크린 인쇄법으로 은전극을 도포한 후 15^l×5^w(mm)의 크기로 절단하고, 3kV/mm로 15분간 분극 처리를 행하였다.

2.2 측정

시편의 밀도 및 기공율을 측정하고 소결 특성을 평가한 후, 시편의 조성에 따른 파단면의 미세 구조를 SEM으로 관찰하였다. 또한 X선 회절기(Philips 1710 system)를 이용하여 소결한 시편의 조성 변화에 따른 존재상을 분석하였다. FGM 시편의 중간 영역의 조성 분포 변화를 보기 위하여 EPMA로 분석하였으며, 2차상을 EDS로 분석하였다.

닥터블레이드 공정의 슬립 제조시 유기 바인더의 혼합량을 구하기 위하여 하소 분말의 비중을 측정하고, 입도 분포를 X 선법을 이용한 Sedigraph 5000 ET(Micromeritics Co.)로 분석하였으며, 비표면적을 Flowsorb II 2300(Micromeritics Co.)으로 측정하였다. 하소 분말과 유기 바인더와의 혼합 후 점도는 Brookfield Digital Viscometer(Brookfield Engineering Laboratories, Inc.)로 측정하였다.

유전 특성은 분극 처리 전·후에 LF Impedance Analyzer(HP 4192)를 이용하여 상온에서의 capacitance와 tan δ 를 1kHz에서 측정하였다. 또한 분극 처리된 시편의 압전 특성은 공진-반공진 방법에 의하여 Network Analyzer(HP 3677A)로 측정하였으며, 변위 및 변형을 특성은 비접촉 정전 용량형 gap sensor를 사용한 Accumeasure System 1000(Division of Mechanical Technology Inc.)으로 인가 전압에 대한 변위를 측정하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 중간층 분석

본 실험에서 사용된 A, B1, B2 조성의 소결체에 대한 X선 회절 분석 결과를 Fig. 1에 나타내었다. X선 회절 분석 결과에서 능면정 및 정방정 구조를 나타내는 X선 회절 피크는 43-46°의 2 θ 범위에서 존재하며, 정방정 구조는 (002)면과 (200)면이 공존하며 (200)면만의 존재는 능면정 구조의 존재를 나타내고, 이들 피크의 강도비에 의하여 상경계 조성

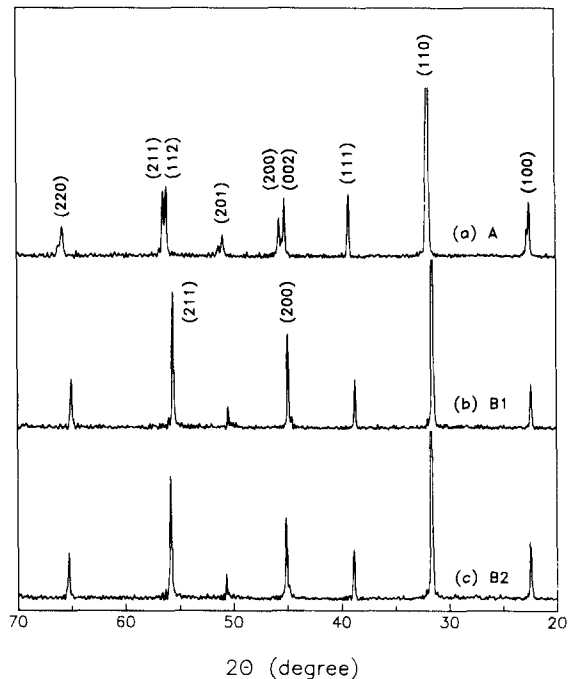


Fig. 1. XRD patterns for the (a) A, (b) B1 and (c) B2 specimens sintered at 1250°C

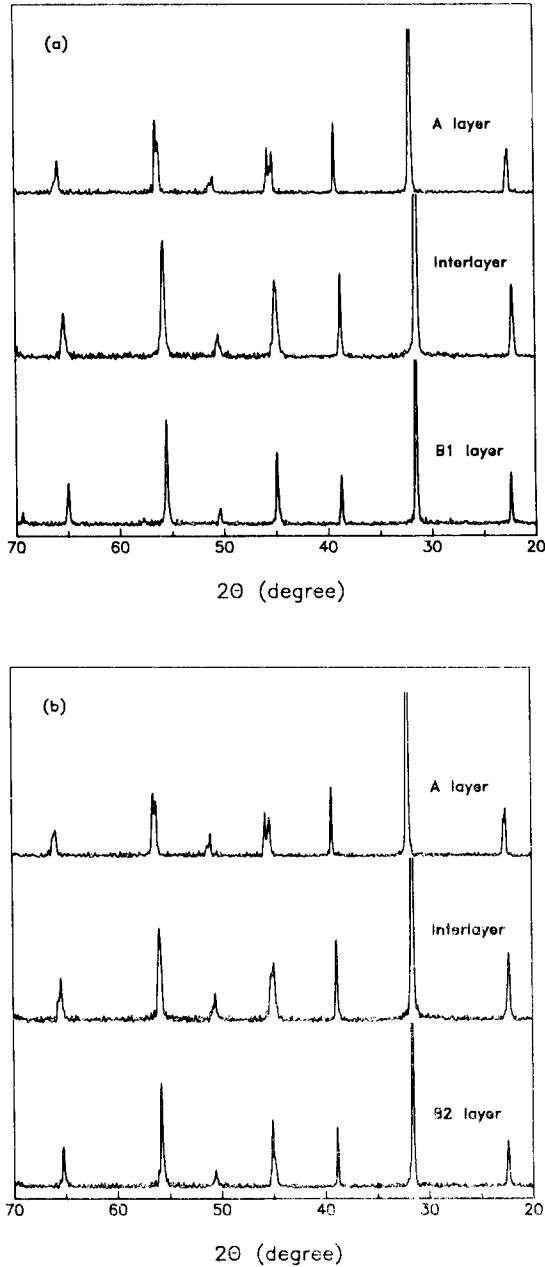


Fig. 2. XRD patterns of each layer in FGM specimens; (a) A/B1 and (b) A/B2

을 판단할 수 있다. A 조성은 (002) 피크가 나타나기 시작하는 상경계(morphotropic phase boundary) 조성으로서, 즉 조성변화에 따라 고용체가 정방정과 능면정으로 결정구조상 변화를 일으키는 경계 부근이며, 이 상경

계에서 전기적인 특성을 살펴보면 유전율이 높고 압전 특성(d 정수, K_p)이 우수하다. B1과 B2의 조성은 PLZT의 상태도¹⁵⁻¹⁶)에도 나타나 있지만 입방정 구조로 전이하는 중간상을 나타내고 있다.

이들 조성을 경사기능화한 A/B1, A/B2 소결체에서 양측 표면의 조성과 이를 연마한 중간층 분석에서 X선 회절 분석을 행하여 이를

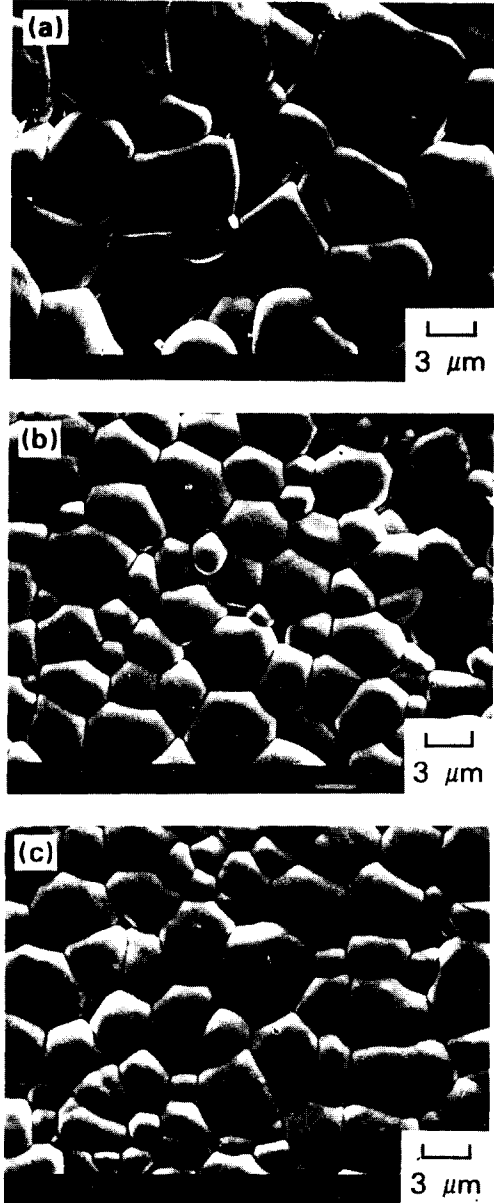


Fig. 3. SEM photographs of thermally etched surface for the (a) A, (b) B1 and (c) B2 specimens

Fig. 2에 나타내었다. 우선 A/B1 소결체의 회절 분석인 Fig. 2 (a)는 양측 표면의 분석 결과는 Fig. 1과 같이 단일 시편인 A와 B1의 분석 결과와 일치함을 알 수 있으며, 중간층 부근의 분석 결과에서는 43-46° 피이크 강도나 위치가 A와 B1 사이로 되어 있어 서로 혼합된 피이크를 나타냄을 알 수 있다. Fig. 2 (b)에서의 A/B2 소결체도 동일한 결과를 나타내며 중간층 부근의 피이크에서 약간 피이

크가 달라지는데 이는 중간층에서 어느층으로 치우쳐서 연마되었는가의 연마 정도 차이로 인한 결과라고 할 수 있다.

A, B1 및 B2 조성의 소결체를 1230°C에서 30분간 thermal etching하여 관찰한 미세구조 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 선형교차법에 의해 평균 입경을 조사한 결과 A, B1 및 B2가 각각 $6.9\mu m$, $3.72\mu m$ 및 $3.82\mu m$ 였다. Fig. 4에는 이들을 경사기능화한 A/B1, A/B2의 중간

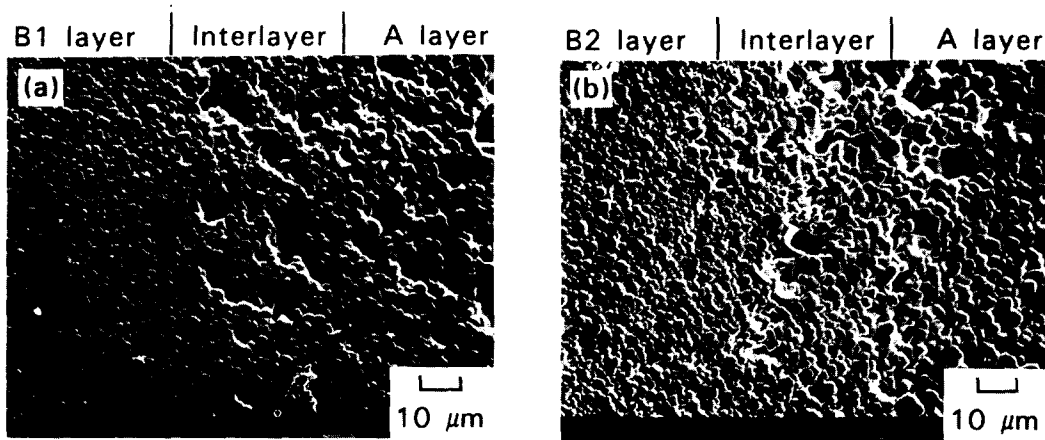


Fig. 4. SEM photographs of thermally etched surface for the FGM specimens; (a) A/B1 and (b) A/B2.

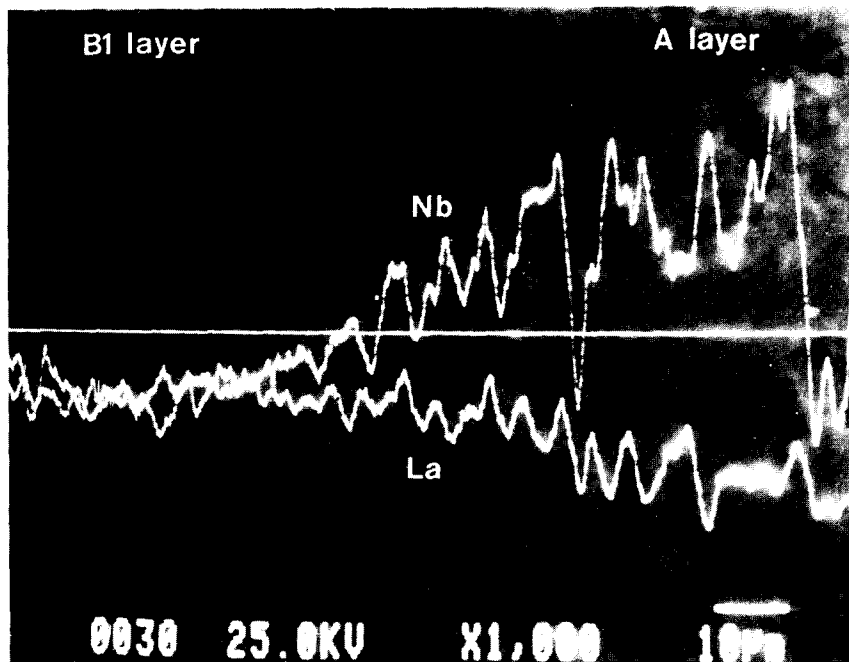


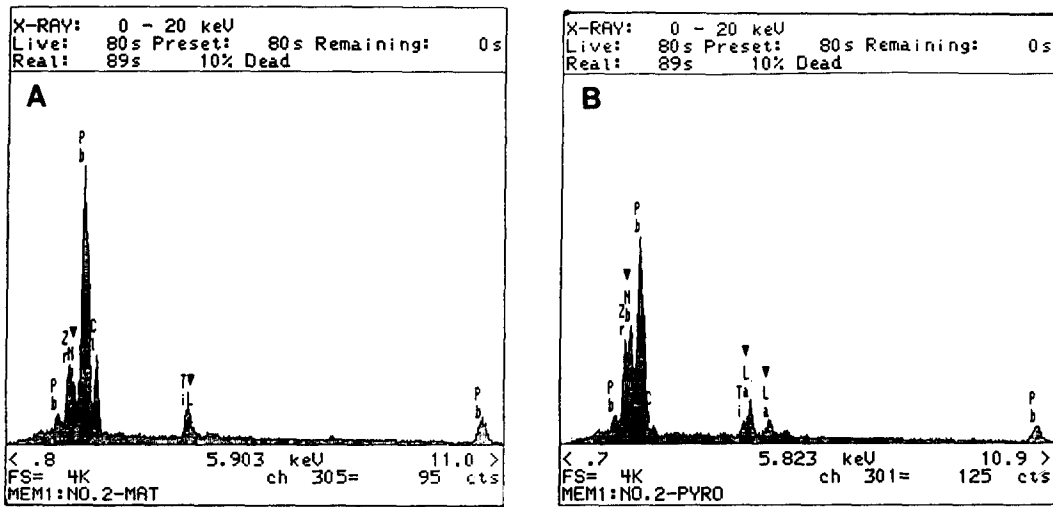
Fig. 5. EPMA Analysis of La and Nb concentration distribution across A-B1 interface.

부근을 1230°C에서 30분간 thermal etching 한 미세구조 사진을 나타내었다. Fig. 3과 같이 A, B1과 B2의 단일 조성의 미세구조 사진에서 관찰한 것처럼 좌우 양측에서 입경 크기와 치밀화에 있어서 차이를 나타내며, 입경이 큰 쪽이 A, 입경이 작은 부분이 B1, B2 조성층임을 알 수 있다.

Fig. 5는 A/B1 시편의 중간 영역의 조성분포를 EPMA로 분석한 결과이다. 중앙부에서 양쪽으로 갈수록 Nb와 La가 서로 감소하고 있으며, 조성이 서서히 변화하고 있음을 알 수 있다. 이것은 소성중에 상호확산이 일어난 것으로 생각되며, 그 중간층의 영역은 대략 30 μ m 정도로 확산되어 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 FGM A/B1의 중간 부근의 영역에서

제 2차상의 존재여부를 보기 위해 thermal etching 한 표면을 관찰한 미세구조 및 EDS spectra를 나타낸 것이다. 중간층에서 PLZT 층으로 약 20 μ m 들이간 지점에서 경계와 일렬로 제 2차상인 거대 입자상이 나타났으며, 이 부분을 확대한 미세구조에서 matrix인 grain A와 제 2차상으로서 거대 입자인 grain B의 EDS 분석 결과는 La 및 Nb 피이크에서 큰 차이를 관찰할 수 있다. 즉 grain A에 비하여 grain B는 Nb 및 La가 고용된 조성임을 알 수 있다.

이것은 La 이 PMN 계에서 pyrochlore 상의 안정성과 관련되어 있다는 보고¹⁷⁾가 있지만 여기서의 거대 입자는 PMN 계에서 octahedral 형태의 pyrochlore 입자와 유사한 것으



| | Grain A | Grain B |
|---------|---------|---------|
| Element | Atom. % | Atom. % |
| PbM | 41.474 | 38.159 |
| ZrL | 12.538 | 22.925 |
| NbL | 2.149 | 18.503 |
| TiK | 9.748 | 5.122 |
| LaL | 1.744 | 12.292 |

Fig. 6. SEM photographs and EDS spectra of FGM A/B1 interlayer.

Table 2. Density, Specific Surface Area and Average Particle Size of the A, B1 and B2 Calcined Powder

| Sample | Properties | Density (g/cc) | Specific Surface Area(m ² /g) | Average particle Size (μm) |
|--------|------------|----------------|--|----------------------------|
| A | | 7.13 | 1.61 | 2.60 |
| B1 | | 7.16 | 3.13 | 1.25 |
| B2 | | 8.20 | 1.85 | 1.08 |

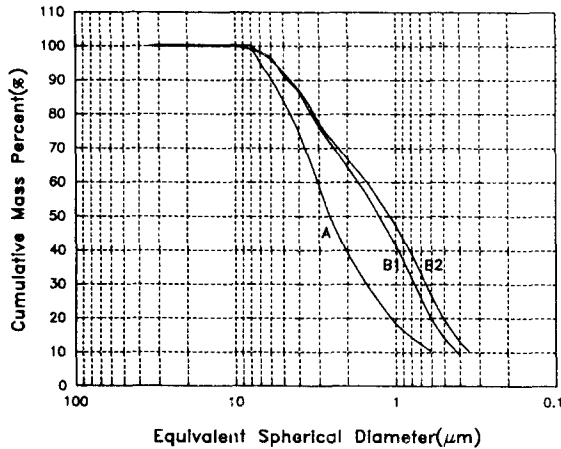


Fig. 7. Particle size distribution of the calcined A, B1 and B2 powders.

로 보여지며, Pb site가 La로 치환된 Pb-La-Nb-O 계의 pyrochlore 상으로 생각된다.

3.2 Green Sheet의 특성

다터 블레이드에 의한 테이프 캐스팅에서는 분말과 바인더의 혼합시에 분말의 비중과 비표면적 등의 분말 특성이 중요하다¹⁸⁻¹⁹⁾. Fig.7에 각 조성의 하소 분말에 대한 입도 분포의 분석 결과를 나타내었다. A 조성의 하소 분말의 입도 분포는 B1, B2 조성보다 더 고른 분포를 가지고 있고 그 평균입경은 약 2.6μm임을 알 수 있다. B1과 B2 조성의 입도 분포는 서로 유사한 경향을 나타내었으며, 평균입경은 각각 1.25μm와 1.08μm이었다. Table 2에 각 조성의 하소 분말에 대한 밀도와 비표면적 및 평균 입자 크기를 나타내었다. 이를 토대로 하여 유기 바인더를 혼합한 결과 0.5 rpm에서 7000 cps 정도의 점도를 가지고 있었다. 또한 성형성을 조사하기 위하여 70°C의 온도에서 성형압에 따른 green density를 Fig. 8에 나타내었다. 모든 sheets가 50kg/cm²

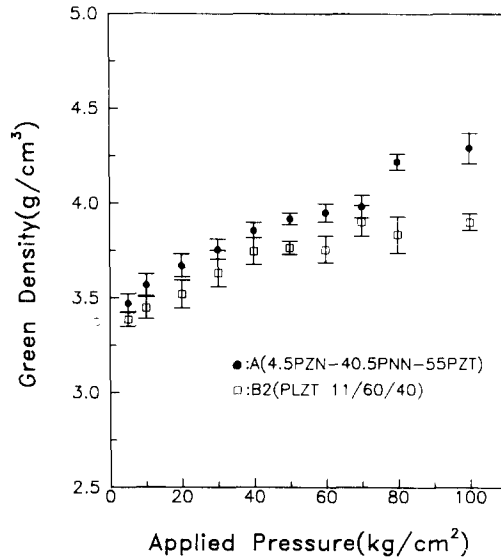


Fig. 8. Green density vs. applied pressure for the A, B1 and B2 specimens at 70°C.

압력까지 증가하다가 거의 일정해져서 포화값을 나타내었으며, 이 압력에서 적층성형도 양호한 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서 적층성형조건인 온도, 압력, 시간은 70°C, 50 kg/cm², 5분으로 하였다.

3.3 유전 및 압전 변형율(strain)특성

단일 조성들과 이를 경사 기능화하였을 경우의 유전 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 9에 각각의 접합 조성 및 FGM의 온도에 따른 유전 상수를 나타내었다. Fig. 9(a)는 단일 조성 A, B1과 FGM A/B1의 유전 특성이며, Fig. 9(b)는 단일 조성 A, B2와 FGM A/B2의 유전 특성으로서 두 경우에 모두 유사한 경향을 보이고 있다. 즉 FGM 시편의 유전 특성은 그 접합 조성의 특성들 사이의 값을 나타내었으며, 온도에 따른 유전 상수는 전반적으로 broad 해지고 Curie 온도는 높은 층의 조성이 가까운 특성을 나타내었다. 유전 특성이 그

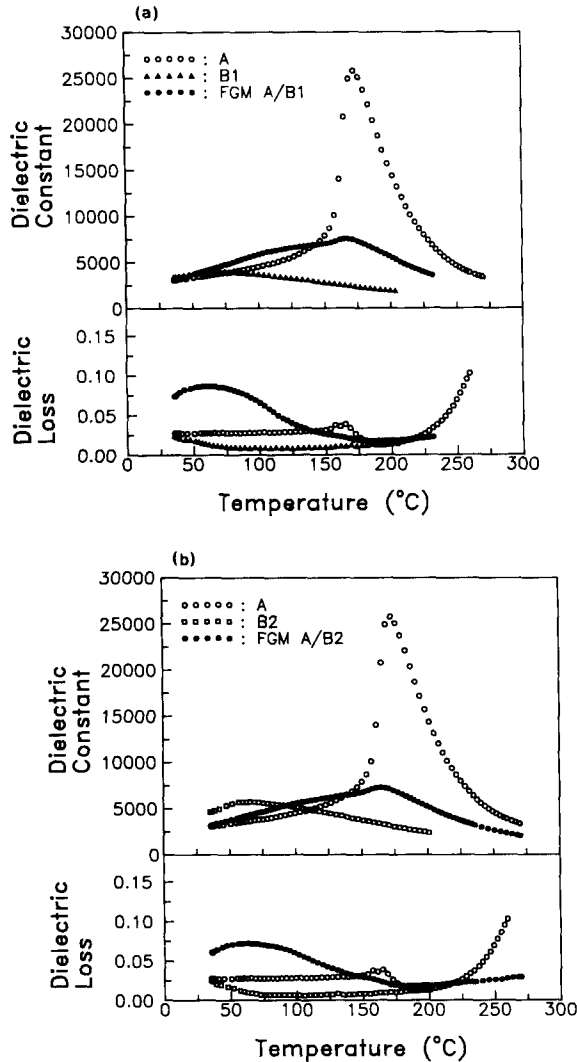


Fig. 9. Dielectric constant and dielectric loss vs. temperature for the specimens; (a) A, B1 and FGM A/B1 and (b) A, B2 and FGM A/B2.

접합 조성의 특성들 사이의 값을 나타내는 것은 이미 PLZT 경사기능재료에서 보고¹¹⁾된 바와 일치하는 결과로서 서로 다른 조성들을 조합하므로써 중간 조성층의 물성이 경사화되어 일체화되기 때문에 접합된 조성들이 각각 고유전 특성에 기여하게 되어 나타난 결과라고 생각된다.

Fig. 10은 인가전계에 따른 변형률 특성을 나타낸 것으로 단일 조성 A, B1 및 FGM A/B1의 결과이다. A 조성은 압전성이 우수한

조성으로서 인가 전계에 따른 변형률이 큰 것을 알 수 있으며(Fig. 10(a)), 반면에 B1 조성은 다소 작은 변형률 특성을 가지고 있다(Fig. 10 (b)). 이를 조합한 FGM A/B1의 특성은 Fig. 10(c)와 같으며 A와 B1의 단일 조성을 경사화하므로써, 더욱 더 큰 변형률을 나타내어, 변형률이 증가되는 결과를 가져왔다. Fig. 11에는 단일 조성 A, B2 및 FGM A/B2의 변형률 특성으로 Fig. 10과 유사한 결과를 나타내었다. 즉 A와 B2 조성을 경사기능화한 FGM A/B2가 A와 B2의 단일 조성보다 훨씬 더 큰 변형률 특성을 나타내었다. 이는 경사기능화한 재료의 양측 조성에서 전압을 인가함에 따른 변위의 형태가 Fig. 10의 (a)와 (b)나 Fig. 11의 (a)와 (b)의 경우와 같이 다르기 때문에, 이것이 하나의 변위 증가 기구로서 작용하여 더욱 변형률이 증가되어 나타나는 결과로 생각된다. 또한 B1 과 B2 조성과 같이 변형률 특성이 작은 고유전율 조성이 변위에 기여하는 압전성이 우수한 A 조성에 상대적으로 더 많은 전압을 부여하므로써 변형률을 증가시킨 것으로 사료된다. 따라서 경사 기능 압전 액츄에이터의 조성으로서는 고압전성 재료와 고유전율 재료와 같이 서로 다른 변위 특성과 전기적 물성이 변형률을 증기시키는데 기여함을 알 수 있다.

3.4 경사 기능 압전 액츄에이터

FGM A/B1 과 A/B2의 조성으로 직접 사각 소자인 FGM 압전 액츄에이터를 닥터 블레이드법으로 제작하여 인가전압에 따른 변위 특성을 측정하였다. 액츄에이터의 크기는 $15^L \times 5^W \times 0.9^T$ (mm)로서 한 끝은 고정하고 다른 편 선단에서 변위 특성을 측정하여 각각 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. 100V의 전압을 인가하였을 경우 FGM A/B1은 $3.1\mu\text{m}$, FGM A/B2는 $2.5\mu\text{m}$ 의 변위가 일어났다.

이러한 FGM 압전 액츄에이터 소자는 해결해야 할 과제로서 최적 조합 조성의 선택, 합성의 최적 조건의 선택의 어려움, 종래의 평가 기술로 단순히 적용하여 비교할 수 없는 점 등이 있지만, 열응력을 완화시켜 사용 환경 및 온도에 대한 안정성이 우수하고, 변위 특성이 향상되므로 미소 위치의 조절이나 변위 센서에 응용될 수 있다. 따라서 경사조성

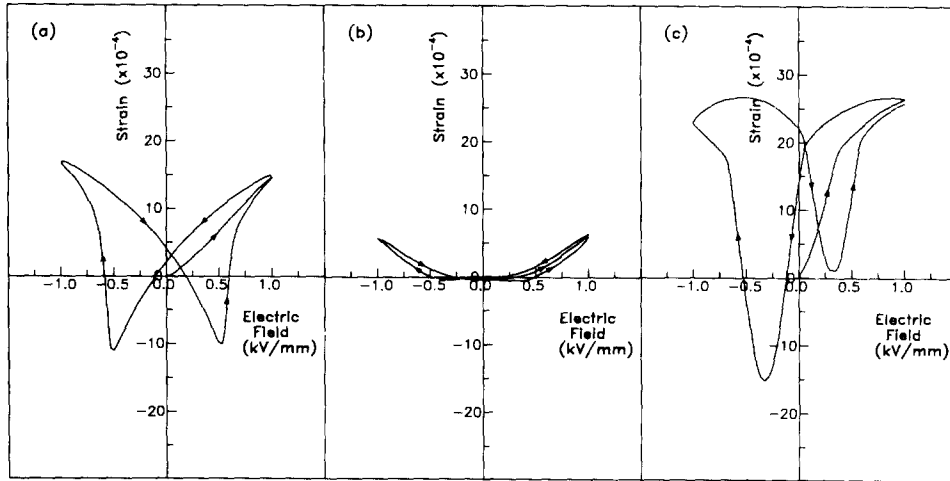


Fig. 10. Strain vs. electric field for (a) A, (b) B1 and (c) FGM A/B1.

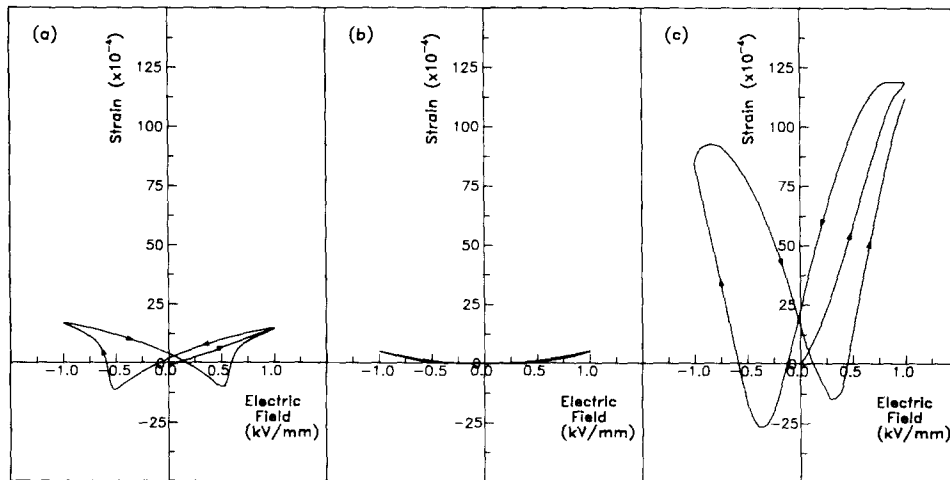


Fig. 11. Strain vs. electric field for (a) A, (b) B1 and (c) FGM A/B1.

의 선택, 구배영역의 조절, 최적 합성 조건의 선택, 평가 기술 개발의 연구를 행하여 응용 목적에 따른 적합한 특성을 얻어야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 A(4.5PZN-40.5PNN-55PZT) 조성과 PLZT 계의 B1(10/70/30), B2(11/60/40) 조성을 경사 기능 재료의 조성으로 하여 제작한 후 소결 특성 및 전기적 특성을 조사하고, 닥터블레이드법에 의하여 경사기능 압전액튜에이터를 제작하여 변위 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 4.5PZN-40.5PNN-55PZT와 PLZT의 FGM화는 두 조성의 소결 특성과 열팽창율이 약간 차이가 있으므로 A/B/A의 세층으로 성형하여 소결한 후 한층을 연마해 내어 휨이나 비틀림이 없는 구조로 제작되었다.

2) 닥터블레이드에 의한 성형에서 슬립의 제조 조건은 acrylic계의 유기 결합체를 34~36 wt% 사용하였으며, 이를 하소 분말과 혼합한 후의 점도는 0.5 rpm에서 약 7000 cps로서 건조 후에 균열 등이 없는 양호한 thick film을 제조하였다.

3) 두께 방향으로 중간 부근의 조성 분포

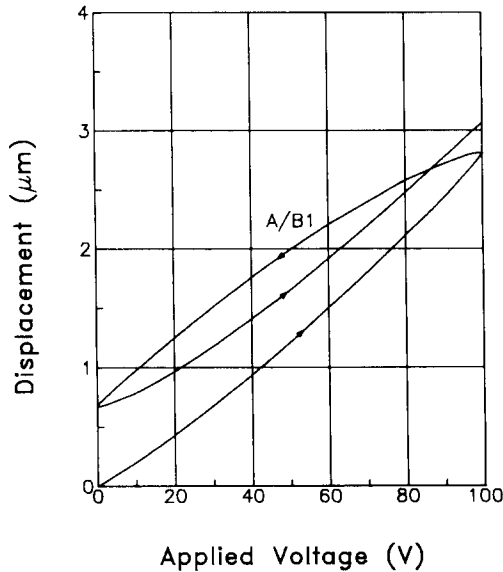


Fig. 12. Displacement vs. applied voltage for the FGM piezoelectric actuator A/B1.

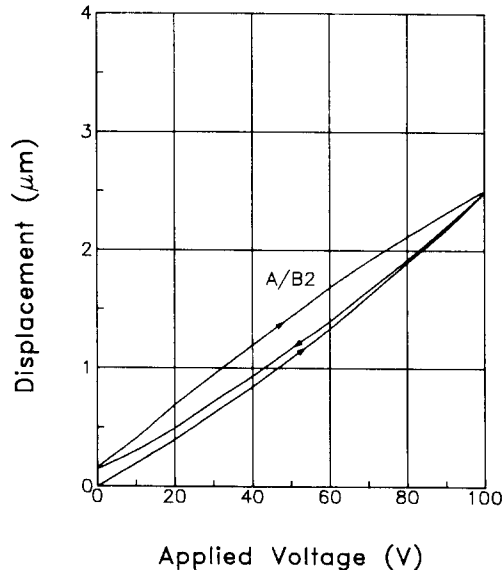


Fig. 13. Displacement vs. applied voltage for the FGM piezoelectric actuator A/B2.

를 분석한 결과 1250°C, 2hr의 소결 조건으로 FGM화된 A/B1, A/B2는 중간 부근에서 Nb와 La 등의 조성 차이에 의한 구배를 이루었으며 구배 영역은 약 30μm 정도의 두께를 가지고 있었다.

4) 인가전압에 따른 변형율의 특성은 단일 시편의 경우보다 증가하였으며, 닥터블레이드에 의해 A/B1과 A/B2 조성의 경사기능압전 액츄에이터를 제조한 결과 100V의 전압을 인가하였을 때 각각 3.1μm와 2.5μm의 변위를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 1992년도 한국과학재단 특정기초연구지원(92-25-00-02)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. J.M. Herbert, "Ferroelectric Transducer and Sensors", Gordon and Breach Science Publishers, N.Y., (1982)
2. Y. Tomikawa, K.Masamura, S.Sugawara and M.Konno, "Fundamental Consideration of Piezoelectric Ceramic Multi-Morph Actuators", *Ferroelectrics*, **68**, 235 (1986)
3. H. Ohuchi, K. Nakano, H. Endoh and K. Uchino, "Electro-Hydraulic Servovalve Using a PMN Multimorph", *Ferroelectrics*, **68**, 257 (1986)
4. T. Ogawa, A. Ando and K. Wakino, "Electrostrictive Properties of Monolithic Bimorphous Actuator", *Ferroelectrics*, **68**, 249 (1986)
5. Q.M. Zhang and L.C. Cross, "BaTiO₃ Domain Bimorph Actuator", *Ferroelectrics*, **98**, 137 (1989)
6. I.Shiota, "Recent Development of Functionally Gradient Materials(FGM) and Their Aspects", *新金屬工業*, **338**, 7 (1990)
7. M.Niino, "Development of Functionally Gradient Materials for Thermal Stress Relaxation", *New Ceramics*, **2**(5), 51 (1989)
8. T. Kawai, "Functionally Gradient Material for Measurement and Instrumentation", *Bull. Ceram. Soc. Jpn.*, **24**(10), 975 (1989)
9. S. Miyazaki, E. Tanaka and T. Kawai, "The Development of the FGM Actuator", *Proceedings of the Annual Meeting of the*

- Ceramics Society of Japan, 140 (1989)
10. T. Kawai and S. Miyazaki, "Development of a Piezo-Ceramic Actuator with Functionally Gradient Material", *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **98**(8), 900 (1990)
 11. 최승철, 김한수, 손정호, 김현재, 정형진, "PLZT 경사기능재료를 이용한 세라믹 액츄에이터", *Kor. J. Mat. Res.*, **1**(2), 105 (1991)
 12. 김한수, 최승철, 이전국, 정형진, "닥터블레이드법에 의한 PLZT계 경사기능 압전 액츄에이터의 제조와 압전 변위 특성", *J. Kor. Ceram. Soc.*, **29**(9), 695 (1992)
 13. 정형진, 손정호, 윤상욱, " $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ -PZT계 세라믹스의 유전 및 압전 특성", *J. Kor. Ceram. Soc.*, **27**(6), 713 (1990)
 14. Metoramic Sciences, Inc. Technical Report (1991)
 15. G.H. Haertling and C.E. Land, "Hot-pressed (Pb, La)(Zr, Ti) O_3 Ferroelectric Ceramics for Electrooptic Applications", *J. Am. Ceram. Soc.*, **54**(1), 1(1971)
 16. A.J. Moulson and J.M. Herbert, "Electroceramics", 353, Chapman and Hall, London, (1990)
 17. J.Chen, H.M. Chan and M.P. Harmer, "Ordering Structure and Dielectric Properties of Undoped and La/Nb-Doped $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ", *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**(4), 593 (1989)
 18. J.V. Biggers, T.R. ShROUT and W.A. Schulze, "Densification of PZT Cast Tape by Pressing", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **58**(5), 516 (1979)
 19. G.Y. Onoda, Jr and L.L. Hench, "Ceramic Processing Before Firing", 411-447, John Wiley & Sons, N.Y., (1978)