

닥터블레이드법에 의한 PLZT계 경사기능 압전 액츄에이터의 제조와 압전 변위 특성

김한수* · 최승철** · 이진국 · 정형진

*아주대학교 공과대학 재료공학과

한국과학기술연구원 광전세라믹스실

+동경대학교 첨단과학기술연구센터 미래화학연구실

(1992년 7월 9일 접수)

Fabrication and Piezoelectric Strain Characteristics of PLZT Functionally Gradient Piezoelectric Actuator by Doctor Blade Process

Han Soo Kim*, Seung Chul Choi**, Jun Kuk Lee and Hyung Jin Jung

* Dept. of Materials Science and Engineering, Ajou University
Electro-Optic Ceramics Laboratory, KIST

+Frontier Chemistry Lab., RCAST, The University of Tokyo

(Received July 9, 1992)

요 약

(Pb, La)(Zr, Ti)O₃계 세라믹스 조성내에서 경사기능재료를 제조하여 유전 및 압전변형을 특성을 조사하였으며, 닥터블레이드법에 의해 경사기능압전 액츄에이터를 제작하여 변위 특성을 조사하였다. 1300°C, 2시간의 소성에 의해 경사기능화된 PLZT는 약 20 μm 정도의 중간층을 형성하는 미세구조를 나타내었다. 경사기능재료에서 인가전압에 따른 변형을 특성은 전반적으로 단일시편의 경우보다 증가하였으며, 특히 고압전-저유전성 조성과 저압전-고유전성 조성을 경사기능화 하였을 경우에 변형율이 더욱 증가되었다. 닥터블레이드용 슬러리는 acrylic계 유기 결합제를 34~36 wt% 혼합하였으며, 슬러리내에서 입자의 응집을 제거하기 위하여 초음파 처리를 하여 균열이 없는 균일한 sheets를 제조하였다. 70°C, 50 kg/cm²으로 5분 유지하여 적층성형한 후 닥터블레이드법에 의하여 제조된 FGM 압전 액츄에이터의 전압 인가시의 변형율은 금형 제조법과 비슷한 값을 나타내었다.

ABSTRACT

In (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ ceramic system, the functionally gradient material (FGM) was developed, and its processing and properties were investigated. The FGMs were successfully prepared through doctor blade method with acrylic binder system as well as mold stacking press method. The ultrasonic treatment was very effective for particle dispersion in slurry, and it lead to form clack-free green films. The strain-voltage characteristics of the FGM system was significantly improved which fabricated between a high piezoelectric-low dielectric and a low piezoelectric-high dielectric composition layer.

1. 서 론

미소 변위 소자인 압전 세라믹 액츄에이터를 비롯한 각종 제어 계측 소자들은 급속한 기술의 진보에 따라 극한 환경하에서의 내구성이나 물성적 측면에서 다양한

특성이 요구되고 있다. 이러한 여러가지의 요구를 충족시키기 위해서는 균질 재료만으로는 한계가 있으므로 복수의 재료의 조합을 필요로 하게 된다. 종래에 복수의 재료를 조합하여 사용하는 전자부품의 경우, 접착제 사용 등의 방법으로 접합되지만 모두 접합면이 존재하여, 그

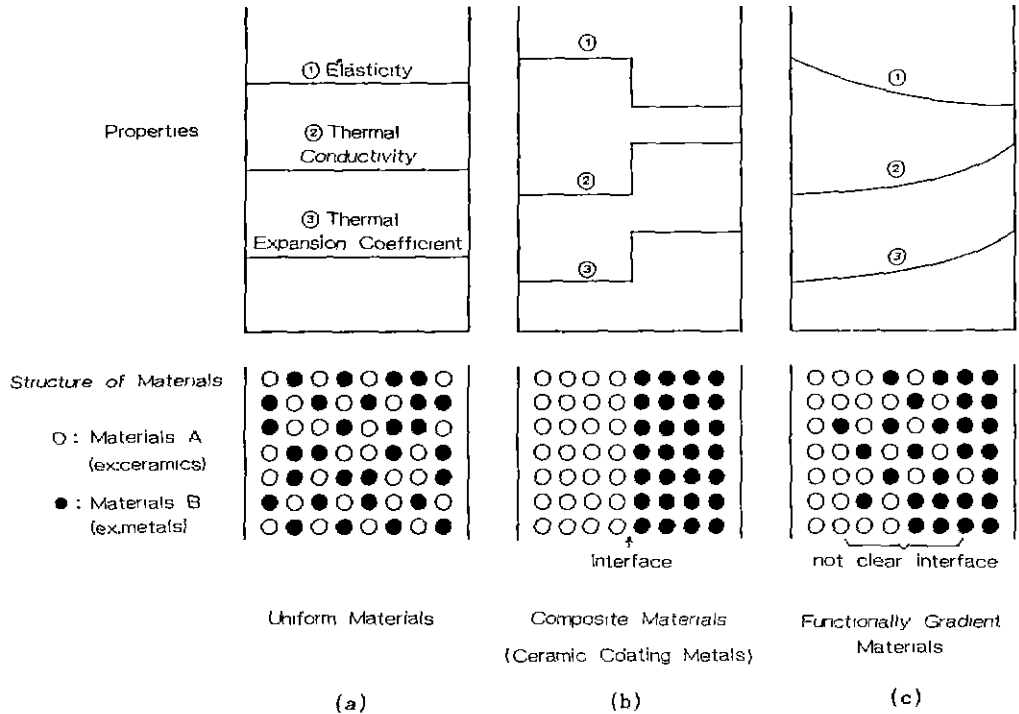


Fig. 1. Comparison of (a) uniform, (b) composite, (c) functionally gradient materials⁵⁾.

계면에는 온도에 따라서 열응력이 축적되어 균열이나 박리가 일어난다. 따라서 복수의 재료 사이에 조성 등의 요소를 서서히 연속적으로 변화시켜 명확한 계면을 없게 하는 경사 기능 재료(Functionally Gradient Material, FGM)가 제안되었다¹⁻⁴⁾.

균일분산재료, 복합재료, 경사기능재료의 구조와 특성을 비교하여 Fig. 1에 나타내었다⁵⁾. 종래의 재료는 Fig. 1(a)와 같이 입자분산합금 등 2종 이상의 혼합체로 있어도 균일 분산시키는 것이 문제시되었다. 이와같은 재료는 역학적 특성은 물론 열저항, 열팽창계수 등의 특성이 그림과 같이 내부에서 균일하다. Fig. 1(b)와 같이 금속에 세라믹을 접합하여 피복한 접합체는 내부에 이상계면(異相界面)이 존재한다. 이 계면에는 그림과 같이 물리적, 화학적 특성이 큰 편차를 가지므로, 가열되는 경우 그들의 열팽창계수의 차이로부터 큰 열응력이 일어나 박리, 균열 등의 문제가 일어난다. 그러나 경사기능재료는 미시적 구성요소를 연속적으로 제어하여, Fig. 1(c)와 같이 명확한 이상계면이 존재하지 않으므로 계면으로 인한 문제점을 해결한다. 이 재료에는 그림과 같이 역학적, 열적, 화학적인 모든 기능이 재료의 표면(表面)으로부터 이면(裏面)까지 연속적으로 변화하고 있다. 따

라서 경사기능재료는 열응력을 완화시킴과 함께, 열차단성, 고열전도율 등의 성능을 부여한다.

경사 기능 재료는 큰 온도차를 해결하기 위한 항공 우주용 소재로서 연구가 시작되었다. 이러한 경사 기능의 개념은 계면에 기인된 많은 문제의 해결 수단으로서, 또한 경사 조성 자체가 기능의 경사화와 함께 새로운 기능을 발휘하는 재료로서 무한한 가능성을 가지고 있어, 항공 우주용 재료에 제한되지 않고, 전기적·광학적인 특성이 요구되는 electronics 분야, 접합 기능이 요구되는 기계·구조 재료 분야 및 의료 분야 등에서 광범위한 응용이 기대되며, 고성능화에 크게 기여할 것으로 고려된다.

실제로 이와같은 열응력 완화를 위한 목적 이외에, 1989년 Kawat 등은 압전 세라믹 액츄에이터에서 접착제를 사용함으로써 인한 단점을 해결하기 위하여, 3성분계 세라믹스인 $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbZrO_3-PbTiO_3$ 조성내에서 조합 조성을 선택해서 경사기능재료를 제작하여 압전 액츄에이터로 연구하였다⁶⁻⁸⁾.

본 연구에서는 경사 기능의 개념을 압전 액츄에이터에 응용할 목적으로 압전 세라믹스인 $(Pb, La)(Zr, Ti)O_3$ (PLZT) 계를 이용하여 경사 기능 재료를 제작하였다.

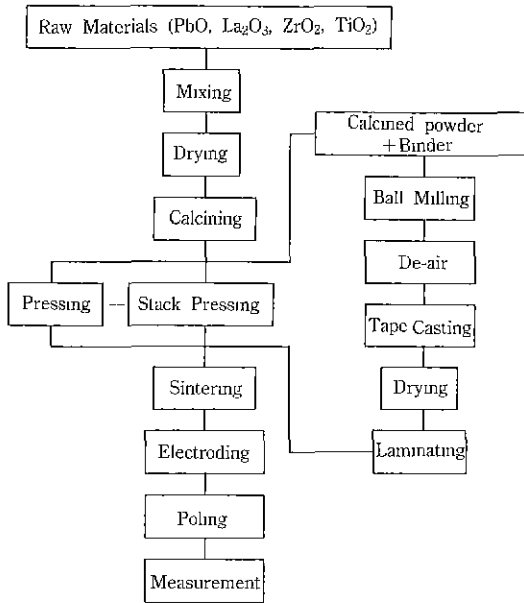


Fig. 2. Flow diagram of specimen preparation.

경사 기능 재료를 제조하기 위해서는 소결 특성이 유사하며 열팽창율이 차가 작아야 한다⁹⁾. PLZT는 $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$ 고용체에 La_2O_3 를 첨가한 재료로서 조성 변화에 따라 정방정, 능면정, 입방정 등의 상들을 가지므로 전기적인 특성과 소결 특성이 변화한다^{10,11)}. 따라서 PLZT는 기본 성분의 함량으로 조성 변화를 시켜 소결 및 전기적 특성을 조절하여 경사 기능 재료로 제조할 수 있기 때문에 이 재료를 선택하였다. 그리고 PLZT계 내의 서로 다른 상영역에서의 조성으로 경사 기능 재료를 제조하여 액츄에이터로서 응용하기 위한 변위를 증대시키고, 경사 기능 압전 액츄에이터를 제작하고자 유전 및 압전 특성을 조사하였으며, 금형과 닥터블레이드법에 의하여 경사기능 압전 액츄에이터를 제조하여 변위 특성을 비교 검토하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편의 제조

본 실험에서 사용한 원료 시약은 순도 99% 이상의 고순도 시약이었으며, Fig. 2와 같이 일반적인 금속 산화물 합성법에 의해 PLZT 시편을 제작하고 FGM 시편은 성형과정에서 적층 성형하므로써 제조하였다. 그리고 금형과 닥터블레이드법에 의하여 직접 FGM 압전 액츄에이터를 제작하였다. 조성식은 $Pb_{1-x}La_x[(Zr_yTi_{1-y})_{1-(x/4)}]O_3$

Table 1. Composition of the PLZT Series Specimens

Specimen No.	Batch Composition (mole ratio)			
	PbO	La ₂ O ₃	ZrO ₂	TiO ₂
A (7/60/40)	0.93	0.07	0.60	0.40
B (11/60/40)	0.89	0.11	0.60	0.40
C (7/65/35)	0.93	0.07	0.65	0.35
D (7/70/30)	0.93	0.07	0.70	0.30
E (10/70/30)	0.90	0.10	0.70	0.30

Table 2. Composition of the FGM Specimens

Specimens No.	Laminated Composition (La/Zr/Ti mole ratio)
A/B	7/60/40-11/60/40
A/C	7/60/40- 7/65/35
A/D	7/60/40- 7/70/30
D/E	7/70/30-10/70/30

O_3 이며, 선택된 단일 조성과 FGM 재료로 제조하기 위한 접합 조성은 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

각각의 조성비에 따라 칭량한 원료 분말을 습식 혼합하고 900°C에서 2시간 하소하여, 직경 18 mm 금형에서 1 ton/cm²의 압력으로 성형하였다. 특히 FGM은 이때 접합조성 중 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 1200~1325°C의 온도 범위에서 2시간씩 행하였다. 소결된 시편은 연마기 (Specd FAM 4B6-L)를 사용하여 두께 1 mm로 상·하면을 균일하게 연마하여 스크린 인쇄법으로 은전극(Du-pont 7095)를 부착하였다. 분극 처리는 상온(25°C)의 실리콘 오일내에서 35 kV/mm의 직류 전압으로 15분 동안 행하였다.

FGM 압전 액츄에이터 소자의 제작은 성형 공정에서 금형과 닥터블레이드법에 의하여 제작되었다. 금형에 의한 제작은 50×15 mm의 사각 금형을 사용하여 위의 FGM 시편 제작과 같은 방법으로 성형한 후 소결은 1200°C에서 2시간 동안 행하였고, 두께 1 mm로 상·하면을 균일하게 연마하였다. 스크린 인쇄법으로 은전극을 도포한 후, 35×10 mm의 크기로 절단하고, 3 kV/mm로 15분간 분극 처리를 하였다. 닥터블레이드법에 의한 소자의 제조공정을 Fig 2의 우측에 나타내었다. 슬러리 제조용 유기 결합제는 아세톤과 Trichloroethane을 용매로 하여

결합제, 가스제를 배합한 acrylic계(Metoramic Sciences, Inc.)를 사용하였다. 제조된 하소 분말의 비표면적과 비중을 측정하여 유기 결합제 혼합량을 다적층용 유전체에 사용되는 다음식에 의하여 구하였다¹²⁾.

$$(\text{wt}\% \text{ of powder}) = \frac{1}{0.01 + \frac{D}{C \times A} \times \left(\frac{100}{55 - 2(B-3)} - 1 \right)}$$

where, A : Ceramic Specific Gravity, g/cc
 B : Ceramic Specific Surface Area, m²/g
 C : Binder Solid wt%=18.85
 D : Binder Solid Specific Gravity, g/cc(acrylic binder=1)

윗 식으로부터 구해진 양의 유기 결합제와 하소 분말을 200 rpm으로 20시간 동안 충분히 혼합하여 슬러리를 제조하였다. 슬러리는 탈포 과정을 거쳐, blade의 높이가 750 μm인 doctor blade 장치(DP-150, Tsugawa Co.)를 사용하여 Mylar film 위에서 1.5 cm/sec의 속도로 Tape casting하였다. 제조된 green sheet는 공기 중에서 24시간 건조한 후, 60×20 mm의 크기로 절단하여 적층성형(laminating)하였다. 적층은 laminator(Model 150-C, Freds Carver Inc.)를 사용하여 FGM 압전 액츄에이터를 제조하기 위한 각 조성을 5층씩 겹쳐서 10층으로 적층하였다. 이때의 적층온도, 압력 및 시간은 70°C, 50 kg/cm² 및 5분으로 하였다. 적층된 성형체는 소성 중에 승온시 잔류용매, 가스제 및 결합제의 제거를 위하여 500°C에서 2시간 유지하고 1200°C에서 2시간 동안 소결을 행하였으며, 이것을 두께 1 mm로 상·하면을 균일하게 연마하여 스크린 인쇄법으로 은전극을 도포한 후 35×10 mm의 크기로 절단하고, 3 kV/mm로 15분간 분극 처리를 행하였다.

2.2. 측정

시편의 밀도 및 기공율을 측정하고 소결 특성을 평가한 후, 시편의 조성에 따른 과단면의 미세구조를 SEM(ETEC Co.)으로 관찰하였다. 또한 X선 회절기(Rigaku, D/MAX-3A)를 이용하여 열처리한 시편의 조성 변화에 따른 존재상을 분석하였다.

닥터블레이드 공정의 슬립 제조시 유기 바인더의 혼합량을 구하기 위하여 하소 분말의 비중을 측정하고, 입도 분포를 X선법을 이용한 Sedigraph 5000 ET(Micromeritics Co.)로 분석하였으며, FlowSorb II 2300(Micromeritics Co.)로 비표면적을 측정하였다. 하소 분말과

Table 3. Bulk Density of the PLZT Specimens

Sintering Temp.(°C)	Bulk Density (g/cm ³)				
	A	B	C	D	E
1200	6.70	7.24	7.08	7.17	6.96
1225	6.85	7.27	7.17	7.18	7.07
1250	7.35	7.33	7.36	7.26	7.43
1275	7.34	7.39	7.43	7.33	7.42
1300	7.31	7.47	7.49	7.51	7.41
1325	7.28	7.43	7.45	7.46	7.38

유기 바인더와의 혼합 후 점도는 Brookfield Digital Viscometer(Brookfield Engineering Laboratories Inc.)로 측정하였다.

유전 특성은 분극 처리 전·후에 LF Impedence Analyzer(HP 4192)를 이용하여 상온에서의 capacitance와 tanδ를 1 kHz에서 측정하였다.

분극 처리된 시편의 압전 특성은 공진-반공진 방법에 의하여 Network Analyzer(HP 3577A)로 측정하였다. 또한 변위 및 strain 특성은 비접촉 정전 용량형 gap sensor를 사용한 Accumasure System 1000(Division of Mechanical Technology Inc.)으로 인가전압에 대한 변위를 측정하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소결 특성

PLZT 시리즈인 A(7/60/40), B(11/60/40), C(7/65/35), D(7/70/30), E(10/70/30) 조성(Table 1 참조)을 1200~1325°C의 온도 범위에서 소결밀도의 변화를 조사하여 최적 조건인 1250~1300°C에서 최적 소결밀도를 나타내었다. 이때의 소결밀도는 Table 3과 같다.

각 조성의 시료들을 미세 연마한 후, 1230°C에서 30분간 Thermal etching한 미세구조 사진을 Fig.3에 나타내었다. Linear intercept method에 의해 grain의 평균 입경을 조사한 결과, Zr/Ti ratio 변화에 따라서는 A, C, D 조성이 각각 1.6 μm, 1.8 μm, 1.9 μm로서 Zr ratio 증가에 따라 약간 커지는 경향이 있었으나 거의 유사하였으며, La 함량 변화에 따라서는 A와 B 조성이 각각 1.6 μ와 2.5 μm, D와 E 조성이 각각 1.9 μm와 2.6 μm로서 La 함량 증가에 따른 입경의 증가를 명확히 알 수 있었다. 이는 La 함량 3 mol%를 경계로 해서 멀어질수록 입경이 증가한다는 Jyomura 등의 보고¹³⁾와 부합하는 결과이다. 이 결과는 La 함량 3 mol% 이하에서는 La 함량이 감

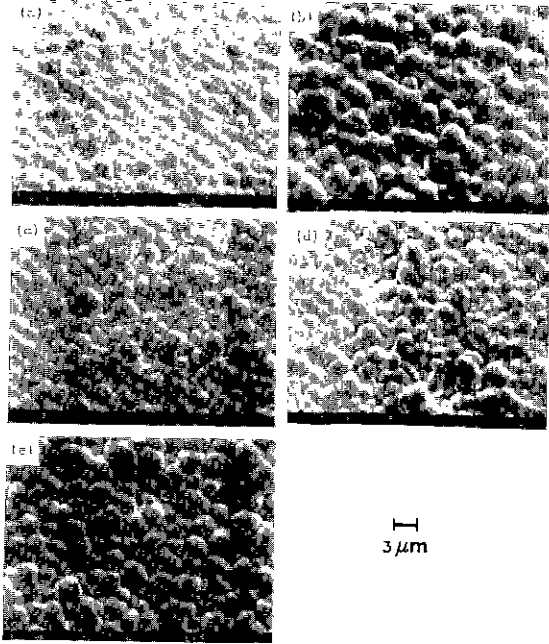


Fig. 3. SEM Micrograph of thermally etched surface for the PLZT specimens; (a) A (7/60/40) (b) B(11/60/40) (c) C (7/65/35) (d) D (7/70/30) (e) E (10/70/30).

소할수록 양이온의 확산이 향상되므로 입경이 커지며, 3 mol% 이상에서는 La 함량이 증가할수록 입계에서 La 이온 농도 구배가 증가하고 그에 의한 공공(vacancy)의 농도구배가 커져 확산을 향상시키므로 입경이 커지는 것으로 생각된다. 또한 La 함량 3 mol%일 때 가장 작은 입성장 속도를 이루어 평균 입자 크기가 가장 작아지는 현상은 양이온의 확산과 공공의 확산이 평형을 이루기 때문이라고 고려된다.

Fig. 4는 각 조성을 1300°C 에서 2시간 소결한 소결체의 X선 회절분석 결과이다. X선 회절분석 결과에서 능면정 및 정방정 구조를 나타내는 X선 회절 피이크는 43~45° 의 2θ 범위에서 존재하며, 정방정 구조는 (002)면과 (200)면이 공존하며 (200)면만의 존재는 능면정 구조의 존재를 나타내고, 이들 피이크의 강도비에 의하여 상관계 조성을 판단할 수 있다. Zr/Ti 비의 변화에 따라서 D, C, A 조성으로 갈수록 (200)면 피이크가 감소하며 A 조성에서 (002)면 피이크가 나타나기 시작하여 상관계 부근의 조성임을 나타내고 있다. 또한 B 조성은 정방정과 입방정의 경계부근에 있으며, E 조성은 입방정 구조임을 알 수 있다.

FGM은 A와 B, A와 C, A와 D, D와 E의 조성으로

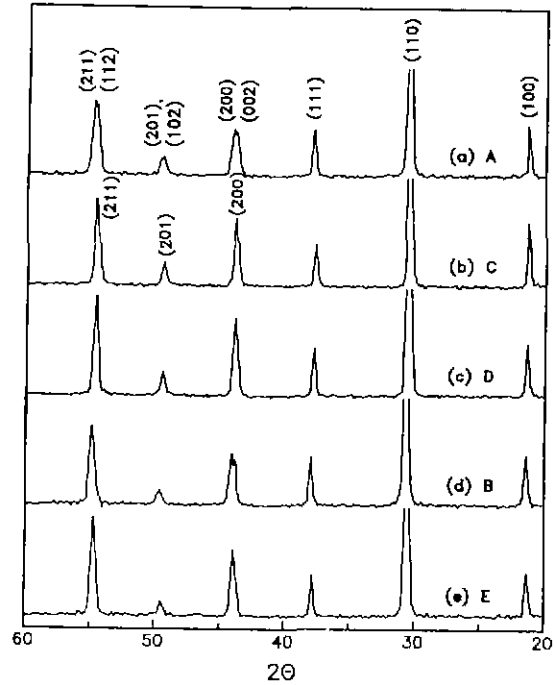


Fig. 4. XRD patterns for the PLZT specimens sintered at 1300°C; (a) A (7/60/40) (b) C (7/65/35) (c) D (7/70/30) (d) B (11/60/40) (e) E (10/70/30).

Table 4. Bulk Density of the FGM Specimens

Sintering Temp.(°C)	Bulk Density (g/cm ³)			
	A/B	A/C	A/D	D/E
1200	6.96	7.03	7.11	7.20
1225	7.21	7.17	7.17	7.26
1250	7.35	7.34	7.33	7.40
1275	7.41	7.41	7.40	7.44
1300	7.47	7.48	7.47	7.48
1325	7.42	7.44	7.43	7.42

조합하여 제작하였으며(Table 2 참조), 소결온도에 따른 소결밀도의 변화를 Table 4에 나타내었다. 전반적으로 비슷한 소결 특성을 보였으며 1300°C 에서 가장 좋은 소결 밀도를 나타내었다.

Fig.5에서 A와 B의 중간 확산 영역을 보여주는 FGM 파단면의 미세구조 사진을 나타내었다. A와 B의 단일 조성의 에칭 표면 사진(Fig.3)에서 관찰한 것처럼 입경 크기의 차이를 나타내며 La 함량이 많은 B 조성측에서 더 큰 입경을 보였다. 그 중간층의 영역은 20~30 μm 정도로 확산되어 있음을 알 수 있다.

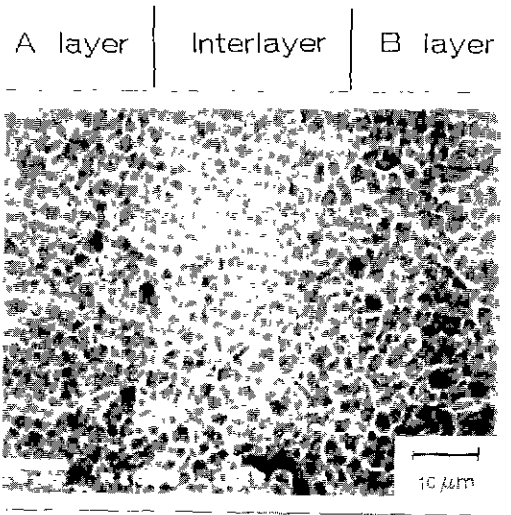


Fig. 5. SEM Micrograph of fracture surface for the FGM specimen, A/B.

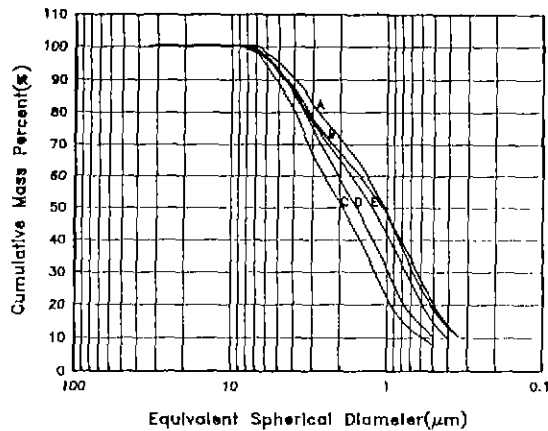


Fig. 6. Particle size distribution for the PLZT calcined powders; (a) A (7/60/40) (b) B (11/60/40) (c) C (7/65/35) (d) D (7/70/30) (e) E (10/70/30).

3.2. Green Sheet의 특성

닥터 블레이드법에 의한 테이프 캐스팅에서는 분말과 바인더의 혼합시에 분말의 비중과 비표면적 등의 분말 특성이 중요하다¹⁴⁻¹⁶⁾. Fig. 6에 각 조성의 하소 분말에 대한 입도 분포의 분석 결과를 나타내었다. 각 하소 분말의 입도 분포는 유사한 경향을 나타내었으며, 평균 입경은 1~2 μm 사이에 존재하고 있었다. Table 5에 각 조성의 하소 분말에 대한 밀도와 비표면적 및 평균 입자크기를 나타내었다. 이를 토대로 다적층 유전체에 적용되는 식¹²⁾에 대입하여 혼합할 유기 바인더 함량을 계

Table 5. Density, Specific Surface Area and Average Particle Size of the PLZT Calcined Powder

Properties Sample	Density (g/cc)	Specific Surface Area (m ² /g)	Average Particle Size (μm)
A	6.96	1.52	1.05
B	8.20	1.85	1.08
C	7.59	1.58	1.95
D	7.42	1.98	1.59
E	7.16	3.13	1.25

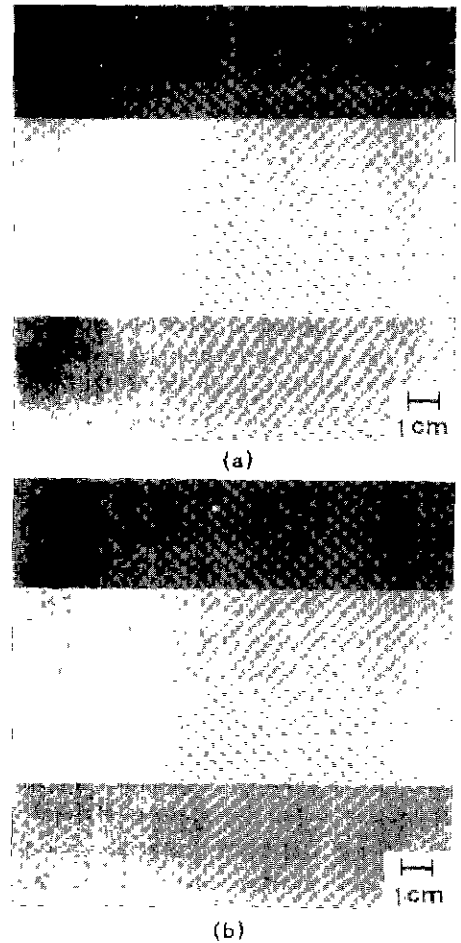


Fig. 7. Green sheets for the PLZT A; (a) without ultrasonic treatment. (b) with ultrasonic treatment.

산하여 혼합한 결과 0.5 rpm에서 7000 cps 정도의 점도를 가지고 있었다.

Green density는 응집체 크기에 의해 영향을 받으며, 응집체 크기의 감소에 따라 증가한다¹⁷⁾. 응집체의 영향을

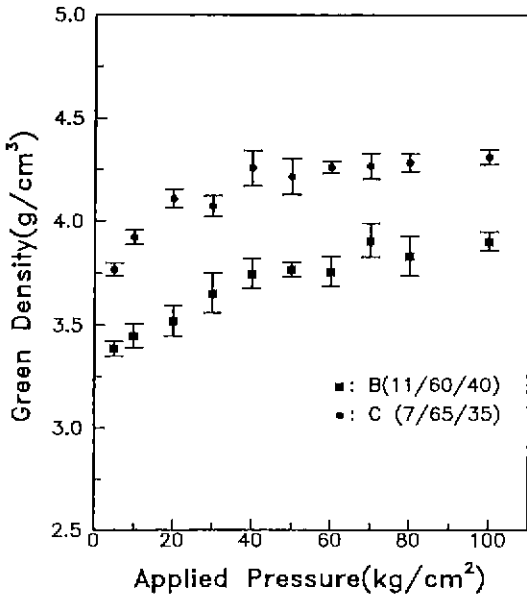


Fig. 8. Green density as a function of applied pressure for the PLZT specimens at 70°C.

줄이기 위하여 하소 분말과 바인더의 혼합 후 초음파를 이용한 효과를 검토하였다. Fig. 7에 초음파 처리를 거쳐 casting한 green sheet와 초음파 처리를 하지 않고 casting한 green sheet의 표면 사진을 보였다. 여기에서 초음파 처리의 유무에 따라 green sheet의 차이를 관찰할 수 있다. 이는 초음파 처리를 하지 않은 경우 응집체가 불균일한 분산을 일으켜 건조 과정에서 sheet내에 균열을 발생시킨 것으로 보이며, 초음파를 이용하여 슬러리를 분산시킨 경우에는 응집된 미세 분말이 용매와 바인더에서 균일 분산을 촉진시켜 균열을 방지했다고 사료된다. 본 실험에서는 균일 분산 촉진을 위해 슬러리를 10분간의 초음파 처리를 하여 균열이나 기포 등이 존재하지 않는 양호한 sheets를 제조하였다. 또한 성형성을 조사하기 위하여 70°C의 온도에서 성형압에 따른 green density를 Fig. 8에 나타내었다. 모든 sheets가 50 kg/cm² 압력까지 증가하다가 거의 일정해져서 포화값을 나타내었으며, 이 압력에서 적층성형성도 양호한 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서 적층성형조건인 온도, 압력, 시간은 70°C, 50 kg/cm², 5분으로 하였다.

3.3. 유전 및 압전 특성

경사 기능 재료에서 A, B의 단일 조성 및 FGM A/B 조성의 disk 시편에서 유전상수와 압전상수 d_{31} , d_{31} 및 전기기계결합계수 K_p 와 기계적 품질계수 Q_m 를 Table 6

Table 6. Dielectric and Piezoelectric Properties of the PLZT and FGM Specimens

Properties Specimen	ϵ/ϵ_0	d_{31} (10^{-12} m/V)	$ -d_{31} $ (10^{-12} m/V)	K_p (%)	Q_m
A	2210	627	369	57.7	55.9
B	5640	40		18.7	29.0
C	2060	435	324	54.6	102.9
D	1840	320	240	45.9	122.1
E	3900	27		16.8	37.7
A/B	3130	502	285	41.8	38.4
A/C	1980	507	335	56.9	77.3
A/D	1960	398	287	51.3	97.3
D/E	2700	124	115	20.0	27.5

에 나타내었다. 표에서와 같이 FGM 적층 시편의 유전 특성은 그 접합 조성의 특성들 사이의 값을 나타내었다. 이는 유전 특성이 서로 다른 조성들을 조합하므로써 중간 조성층의 물성이 경사화되어 일체화되기 때문에, 접합된 조성들이 각각 그 유전 특성에 기여하여 나타난 결과라고 생각된다.

Table 6에서 단일 조성 및 이를 조합한 FGM 시편들의 압전정수 및 전기기계결합계수는 능면정상과 정방정상의 상경계(morphotropic phase boundary) 부근의 조성일 수록 증가하였으며, A 조성에서 d_{31} 은 627×10^{-12} m/V, d_{31} 은 -370×10^{-12} m/V, K_p 는 0.58로서 최대값을 나타내었다. FGM 시편들의 압전 특성은 각각 두 접합 조성의 특성들 사이의 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 유전 특성에서와 마찬가지로 경사 조성층이, 압전 특성이 다른 두 조성을 일체화시킴으로써 나타나는 현상으로 사료된다⁹⁾.

3.4. 변형률(Strain) 특성

본 실험에서는 액튜에이터로서 응용하기에 적합한 변위 특성을 살펴보기 위하여 disk 시편의 인가 전압에 따른 strain 특성을 측정하였다.

A와 D의 조성과 FGM A/D의 특성을 Fig. 9에 나타내었다. A와 D의 조성은 모두 압전성이 우수한 조성인을 Table 6로부터 알 수 있으며, Fig. 9(a), (b)에서와 같이 strain 특성이 양호하다. A와 D 조성을 경사기능화한 FGM A/D의 strain 특성은 Fig. 9(c)와 같이 단일 시편의 특성 형태와 다르며, 인가 전압에 따른 strain은 A와 D의 단일 조성보다 더욱 증가하였다. 이는 경사기능화한 재료의 양측 조성에서 전압을 인가함에 따라 일어나는 변위의 형태가 다르기 때문에, 이것이 하나의 변위 증가

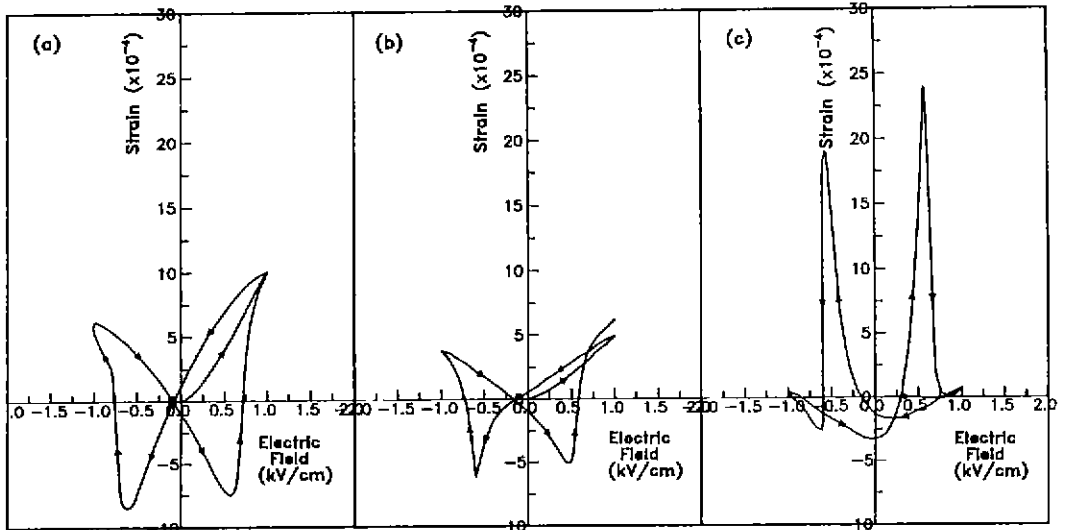


Fig. 9. Strain as a function of electric field for PLZT A, D and FGM A/D; (a) A (b) D (c) A/D.

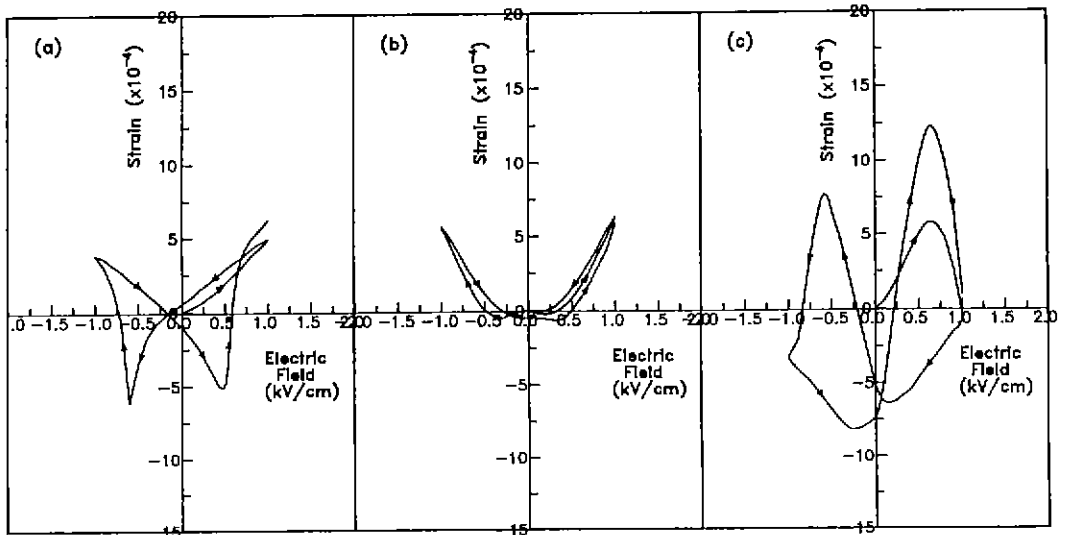


Fig. 10. Strain as a function of electric field for PLZT D, E and FGM D/E; (a) D (b) E (c) D/E.

기구로서 작용하여 더욱 strain이 향상되어 나타나는 결과로 사료된다.

D와 E의 조성과 FGM D/E의 특성을 Fig. 10에 나타내었다. D 조성은 압전성이 비교적 크고 유전율이 낮은 조성으로서 Fig. 10(a)와 같이 strain 특성이 양호하다. E 조성은 압전성이 작고 유전율이 상대적으로 높은 조성으로서 Fig. 10(b)와 같이 strain 특성이 작으며, 이력이 거의 없는 특성을 나타낸다. FGM D/E의 strain 특성은 Fig. 10(c)와 같이 훨씬 더 증가되어 나타난다. 이것은

strain 특성이 작은 고유전율 조성이 bimorph에서의 shim의 역할을 하게 되며 변위에 기여하는 압전성 조성에 상대적으로 더 많은 전압을 부여하므로써 나타난 결과로 생각된다.

3.5. FGM 압전 액츄에이터

FGM A/B의 조성으로 직접 사각 소자인 FGM 압전 액츄에이터를 제작하여 인가 전압에 따른 변위 특성을 측정하였다. 우선 금형에 의해 제작된 FGM 압전 액츄

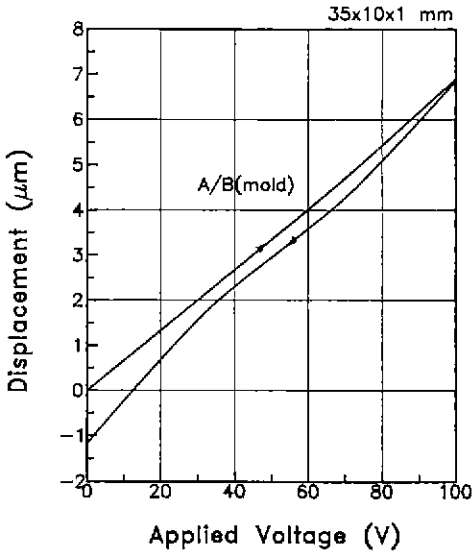


Fig. 11. Displacement as a function of applied voltage for the FGM piezoelectric actuator made by mold pressing.

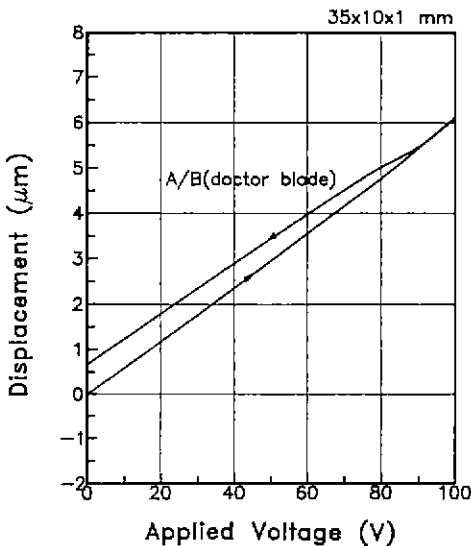


Fig. 12. Displacement as a function of applied voltage for the FGM piezoelectric actuator made by doctor-blade processing.

에이터의 인가 전압에 따른 변위 특성을 Fig. 11에 나타내었다. 100 V의 전압을 인가하였을 때 고정된 holder의 반대편 선단의 변위가 6.88 μm였다. 또한 닥터블레이드법에 의해 제작된 FGM 압전 액츄에이터의 인가 전압에 따른 변위 특성은 Fig. 12에 나타내었다. 마찬가지로

100 V의 전압을 인가한 경우에 6.12 μm의 변위를 일으켜 금형으로 제작된 소자와 유사한 특성을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 PLZT계의 A(7/60/40), B(11/60/40), C(7/65/35), D(7/70/30), E(10/70/30) 조성에서 소결특성 및 전기적 특성을 조사하고, A/B, A/C, A/D, D/E의 조합으로 경사기능재료를 제조하여 최적 소결조건과 유전 및 압전특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

PLZT의 FGM화는 최적 소결조건으로 소결하여 힘이 나 비틀림이 없는 구조로 제조되었으며 1300°C, 2 hr의 소결조건에 의해 FGM화된 PLZT는 약 20 μm 정도 이상의 interlayer층을 형성하는 미세구조를 가지고 있었다.

닥터 블레이드법에서 슬러리의 제조조건으로는 acrylic계 유기 결합제를 34~36 wt% 사용하였으며, 이를 하소 분말과 혼합한 후의 점도는 0.5 rpm에서 약 7000 cps였다. 또한 슬러리내에서의 응집체의 영향을 제거하기 위하여 초음파 처리를 한 결과 균열 등이 없는 양호한 sheets를 제조하여 그 유효성을 확인하였다. green sheets의 적층성형체는 70°C에서 50 kg/cm²의 압력으로 5분간 유지한 경우에 양호한 적층 상태를 나타내었다.

경사 기능 재료의 유전 및 압전 특성은 조합 조성층 특성의 사이의 값을 나타내었다. 경사 기능 재료에서 인가 전압에 따른 strain의 특성은 전반적으로 단일 시편의 경우보다 증가하였다. 경사 기능 재료의 조합으로서 압전성이 크고 유전율이 낮은 조성과 유전율이 높고 압전성이 작은 조성을 경사 기능화하였을 경우에 strain이 더욱 증가하였다. 본 실험에서 금형과 닥터블레이드에 의해 PLZT FGM 압전 액츄에이터를 제조한 결과 100 V의 전압을 인가하였을 때 각각 6.88 μm와 6.12 μm의 변위를 나타내었다.

감사의 글

본 연구의 일부는 아주대 교내연구비의 지원을 받아 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Y. Ishikawa, "Stimulated Development of Functionally Gradient Materials," Journal of Mitsubishi Research

- Institute, No. 14. 168-172 (1987).
2. M. Niino, "Development of Functionally Gradient Materials for Thermal Stress Relaxation," *New Ceramics*, **2**(5), 51-53(1989).
 3. K. Yamanaka and S. Akama, "Expectation and Its Application in the Functionally Gradient Materials," *New Ceramics*, **2**(5). 59-63 (1989).
 4. M. Niino, "Development of Functionally Gradient Material," *Pow and Pow. Metall*, **37**(2), 61-64 (1990).
 5. I. Shiota, "Recent Development of Functionally Gradient Materials (FGM) and Their Aspects," *新金屬工業*, Vol. 338, 7-13 (1990).
 6. T. Kawai, "Functionally Gradient Material for Measurement and Instrumentation," *Bull Ceram. Soc Jpn*, **24**(10), 975-979 (1989).
 7. S. Miyazaki, E. Tanaka and T. Kawai, "The development of the FGM actuator," Proceedings of the Annual Meeting of the Ceramics Society of Japan, 2A46, 140 (1989).
 8. T. Kawai and S. Miyazaki. "Development of a Piezo-Ceramic Actuator with Functionally Gradient Material," *J. Ceram Soc Jpn*, **98**(8), 900-904 (1990).
 9. 최승철, 김한수, 손정호, 김현재, 정형진, "PLZT 경사 기능재료를 이용한 세라믹 액츄에이터," *Kor. J. Mat. Res.*, **1**(2), 105-112 (1991).
 10. G.H. Haertling and C.E. Land, "Hot-Pressed (Pb, La) (Zr, Ti)O₃ Ferroelectric Ceramics for Electrooptic Applications," *J. Am. Ceram Soc.*, **54**(1), 1-11 (1971).
 11. G.H. Haertling, "Improved Hot-Pressed Electrooptic Ceramic in the (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ System," *J. Am. Ceram. Soc.*, **54**(6), 303-309 (1971).
 12. Metoramic Sciences, Inc. Technical Report (1991).
 13. S. Jyomura, I. Matsuyama and G. Toda, "Anomalous Grain Growth in PLZT Ceramics," *J. Am. Ceram Soc.*, **64**(3), C-55-C-56 (1981).
 14. J.V. Biggers, T.R. Shroul and W.a. Schulze, "Densification of PZT Cast Tape by Pressing," *Am Ceram Soc. Bull.*, **58**(5), 516-521 (1979).
 15. G.Y. Onoda, Jr and L.L. Hench, *Ceramic Processing Before Firing*, John Wiley & Sons, New York. 411-447 (1978).
 16. J.C. Williams, "Doctor Blade Process," *Treatises on Material Science and Technology*, Vol. 9, 178-182 (1976).
 17. T. Ueyama and N. Kaneko, "Effect of Agglomerated Particles on Properties of Ceramic Green Sheets," *High Tech Ceramics*, 1451-1458 (1987).