

Pb(Co_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃-PbZrO₃계 압전세라믹의 조성에 따른 압전 착화 소자의 특성 및 경시변화특성

The Characteristics of Ignitor and Degradation Phenomena
on Pb(Co_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃-PbZrO₃

정우환*·박인철*·김진호*·조상희*

(Woo-Hawn JUNG· In-Chul PARK· Jin-Ho KIM·Sang-Hee CHO)

요 약

본 연구는 Pb(Co_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃-PbZrO₃계 압전세라믹스의 조성에 따른 착화소자특성과 기계적응력 인가시의 압전열화현상에 대하여 조사 하였다. 그 결과 상경계 조성에서 소결밀도, K₃₃ 및 출력전압이 최고치를 나타내었으며 능방정계조성에서는 조성의 변화에 따른 소결 및 전기적특성의 변화는 정방정계조성에 비하여 작았다. 기계적 응력 인가시의 압전퇴화현상은 분역의 재배열로 설명할 수 있었다.

ABSTRACT

The sintering, dielectric, piezoelectric properties and degradation phenomena of the Pb(Co_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃-PbZrO₃ system were investigated. As a result, the sintered density, electromechanical coupling factor(K₃₃) and output voltage showed the highest values in MPB composition. The electrical and sintering properties of specimens were nearly constant regardless of composition change in the rhombohedral composition region. The degradation phenomena of poled PZT specimens under mechanical shock was explained by domain rearrangement.

*경부대학교 무기재료 공학과

1. 서 론

1947년 BaTiO₃ 세라믹스에서 압전성이 발견된 이래 다수의 페로브스카이트계 세라믹스의 압전성에 관한 연구가 활발히 이루어왔으며,¹⁾ 근래에와서 각종 전자회로용 소자의 고성능화 및 소형화가 절실히 요구됨에 따라 조성의 개선 및 제조 기술의 진보를 통하여 세라믹스의 압전 특성은 꾸준히 향상 되어왔다. 이에 따라 압전 세라믹스 응용분야도 넓어지게 되어 현재 발전자, 공진자와 같은 전기적 응답을 응용한 압전진동자에서 점화장치, 센서 등에 이르기까지 매우 폭넓게 응용되고 있다. 이러한 압전소자중 가장 대중화 된 것이 압전착화 소자이다. 압전 착화 소자용 재료로써 요구되는 특성은 작은 힘으로 보다 큰 전압을 발생시킴과 동시에 방전에너지가 크고 반복되는 충격에 대하여 전기적 특성치가 열화되지 않아야 한다는 것이다. 따라서 압전소자의 전기적 물성인자인 전기계결합계수(k_{33}) 및 그에 따른 출력전압계수(g_{33})가 되도록 높아야 하며, 또한 전압을 발생시키기 위하여 기계적 응력에 대해 기계적 강도가 커야할 필요가 있다.

대표적인 압전세라믹스 재료로는 PZT계가 있는데 PZT계는 BaTiO₃에 비하여 전기계결합계수가 커서 압전세라믹스 재료로서의 물성에 관한 연구가 주종을 이루어왔으며²⁾ 그 특성을 향상시키기 위하여 PZT 2 성분계에 제 3 성분 및 첨가물을 첨가시키는 방법³⁾이 진행되어 왔다. 그중 제 3 성분을 첨가한 PZT 압전세라믹스는 PZT 2 성분계보다 PbO의 휘발량이 일반적으로 적고 제 3 성분의 첨가량을 조절함으로써 그 특성을 크게 향상시킬 수 있으며, 용도에

따른 재료조성의 선택 범위가 넓다는 장점이 있다.⁴⁾ 3성분계 재료중 가장 대표적인 재료는 Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})을 주성분으로 하는 PMN-PT-PZ계인데 이의 유전 및 압전 특성에 대하여서는 1965년 Ouchi⁴⁾의 연구 보고를 들 수 있다. 이외에 Pb(Co_{1/3}Nb_{2/3})O₃를 제 3 성분으로 한 PCN-PT-PZ 세라믹스의 유전 및 압전특성에 관하여서는 1969년 Kudo⁵⁾의 연구보고를 들 수 있는데, 최근 압전소자의 수요급증 및 원료 국산화라는 공업적 측면에서 PCN-PT-PZ 3 성분계에 관한 관심이 높아지고 있다.

본 연구에서는 Pb(Co_{1/3}Nb_{2/3})O₃을 제 3 성분으로 하는 PCN-PT-PZ계압전세라믹을 제작하여 조성에 따른 소결, 유전 및 압전 특성의 변화를 조사함으로써 압전착화에 유망한 조성을 선정함과 동시에 기계적 응력인가시 압전퇴화 현상을 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 조성식은 $x\text{Pb}(\text{Co}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - y\text{PbTiO}_3 - z\text{PbZrO}_3 (x+y+z=1.0 \text{ mol})$ 이다. 선택한 조성비 및 그 약칭을 표1에 나타내었으며, PCN-PT-PZ 삼원상태도상에서의 조성을 그림 1에 나타내었다. 각 조성을 칭량시에 하소 및 소결 중 발생하는 PbO휘발을 보상함과 아울러 소결성을 높이기 위하여 3 mol%의 PbO를 과잉 첨가하였다. 각 조성식에 따라 칭량한 원료분체를 일반적인 습식 불밀법으로 혼합 후 800°C에서 2시간 하소하였다. 하소 분말을 분쇄후 건식성형법에 의해 1.2ton/cm²의 압력으로 두께가 12mm, 직경이 6.2mm인 원주형 성형체를 제작하였다. 성형체를

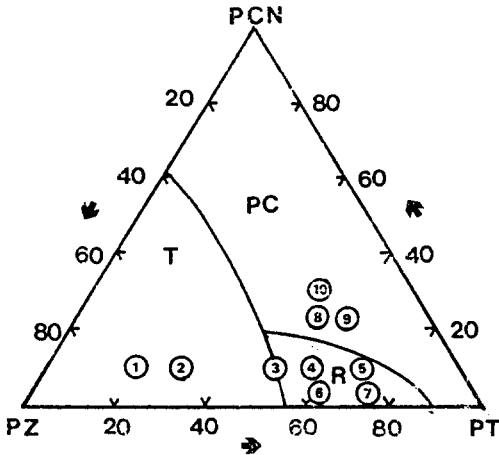


Fig.1. Ternary phase diagram of PCN-PZ-PT

그림.1. PCN 조성의 3성분계 상태도

Table. I. Composition and crystal structure.
표. 1. 조성 및 결정구조

Sample	Batch composition(mole%)			Phase
	PCN	PbTiO ₃	PbZrO ₃	
PCN-1	10	70	20	Tetragonal
PCN-2	10	60	30	
PCN-3	10	40.5	49.5	M P B
PCN-4	10	30	60	Rhombohedral
PCN-5	10	20	70	
PCN-6	5	33	62	
PCN-7	5	22.5	72.5	
PCN-8	25	22	53	Pseudocubic
PCN-9	25	12.5	62.5	
PCN-10	30	20	50	

MgO 도가니에 넣고 밀폐후 1150°C에서 2시간 소결 하였으며 분위기 조절을 위하여 PbZrO₃ 분체를 이용하였다.

소결 시편을 두께가 9.8mm, 직경이 5mm인 원주형으로 가공한 후 양면에 은전극을 부착하였다. 시료의 분극처리는 실리콘 오일 속에서 130°C로 항온유지 시키면서 2.5kV/mm의 직류전계를 인가하여 행하였다. 분극처리된 시료는 공기중에서 24

시간 방치후 Impedance Gain-Phase Analyzer(HP4194A)로 압전계정수를 측정 EMAS⁶⁾ 규정에 따라 압전계정수를 계산하였다. 시편의 미세조직은 화학 에칭후 광학 현미경에 의하여 관찰을 하였고, 상분석은 X-선 회절 분석을 행하였다. 소결체의 결정립의 크기는 선형교차법으로 구하였다.⁷⁾ 분극된 시료의 출력전압 및 경시변화를 관찰하기 위하여 그림 2와 같은 낙구식 장치를 부과한 측정회로를 이용하였다. 경시변

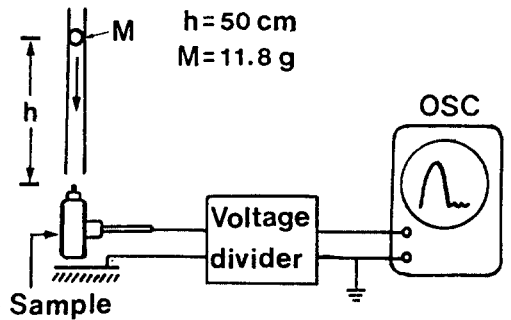


Fig 2. Mechanical shocking system and resultant out put voltage measuring circuit.

그림.2. 낙구식장치 및 출력전압측정회로.

화는 시료로 부터 50cm 높이에서 11.8g의 강구를 소정의 횟수만큼 낙하시킨 후 출력전압을 측정하였으며, 소자의 퇴화현상을 규명하기 위하여 Vickers경도기를 이용하여 Okazaki⁸⁾등이 제안한 방법으로 내부응력을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 3에는 조성에 따른 시편의 소결 밀도의 변화를 나타내었다. 소결 조건은 1150°C에서 2시간으로 하였다. PCN-3은

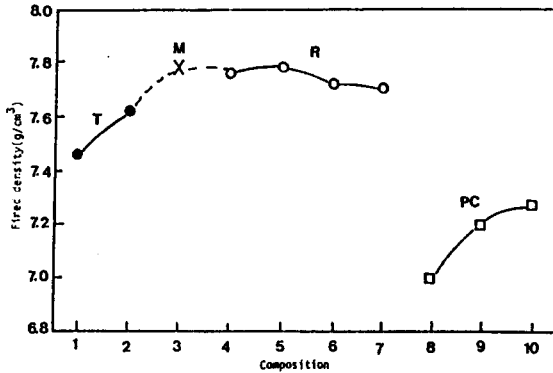


Fig. 3. Sintered density as function of composition.

그림. 3. 조성에 따른 소결밀도변화

상경계 조성으로 소결밀도가 7.7g/cm³으로 최고치를 나타내었다. 능방정(Rhombohedral)의 시료에서는 소결밀도가 조성에 그다지 영향을 받지않고 일정하였다. 그러나 의사정계(Pseudocubic) 조성에서는 소결밀도가 7.0g/cm³~7.2g/cm³으로 다른 조성에 비하여 작은값을 나타내었다. Kakegawa 등⁹⁾에 의하면 2θ가 42°~46° 부근에서의 (002)와 (200)면의 존재는 정방정 혹은 상경계조성을 의미하고 (200)면만의 존재는 능방정을 의미하게 된다. 본 실험에서도 X-선 분석결과 정방정 조성에서는 (002)와 (002)면이 공존하며 능방정에서는 (200)면만 존재하였으며 상경계조성에서는 정방정과 능방정이 공존함이 확인되었다.

그림 4는 조성에 따른 소결체의 미세조직을 나타낸 것이다. 상경계조성, 정방성(Tetragonal)조성 및 능방정조성에 비하여 의사정계조성은 기공의 잔류가 많음을 알 수 있었으며 또한 입경의 크기도 평균 2.3~3.6μm으로 나타났고, 상경계, 정방정 및 능방정의 평균 입경의 크기는 각각 13.7μm, 9~12μm, 11~13.7μm로 상경계로 접

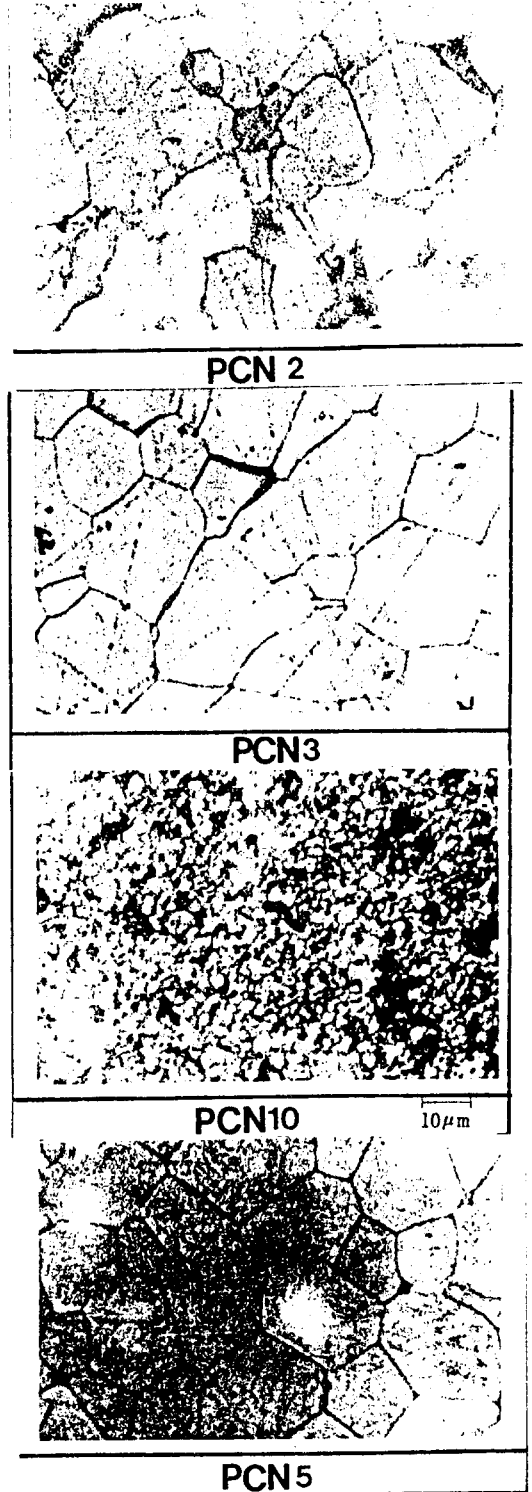


Fig. 4. Optical micrographs of sintered body.
그림. 4. 소결체 미세구조

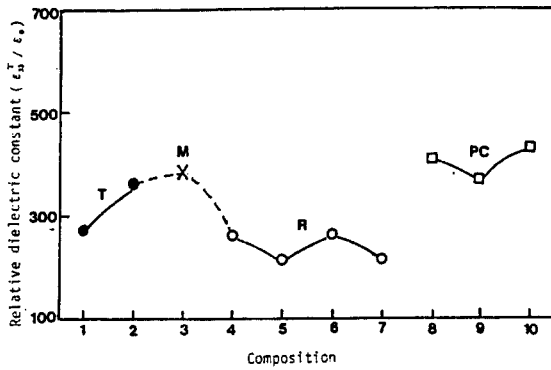


Fig. 5. Relative dielectric constant as function of composition.
그림. 5. 조성에 따른 비유전율 변화

근할수록 입자의 크기가 증가함을 알 수 있었다.

그림 5는 시료의 조성에 따른 비유전율의 변화를 나타낸 것이다. 상경계, 정방정 및 능방정 조성들에서 비유전율의 변화는 조성의 변화에 따라 상경계 조성에서 최고 있으며 정방정 및 능방정 조성으로 이동시 비유전율은 저하하여 종래의 시험 결과^{4,5)}와 잘 일치하고 있었으나, 의사정계 조성은 소결밀도가 낮고 입경이 작음에도 불구하고 비유전율은 400전후로 다른 조성에 비하여 높게 나타났다. 조¹⁰⁾ 등에 의하면 의사정계상에서는 비유전율은 높은 반면, 절연 저항은 낮은 것으로 보고되었다. 등가적으로분때 소자를 캐패시트(C)로 두고 방전에 대한 절연성은 출력단자간의 절연저항(R)으로 대치시켰을 때 압전착화소자는 RC transient circuit로 간주된다.¹¹⁾ 이때 방전현상은 발생 전압(V)이 소자출력단자의 절연 저항(R)에 의해서 소멸되는 과정으로 생각할 수 있다. 이 때 방전시 시정수(τ)는 $R \times C$ 로 주어지며, 그 크기는 소자의 방전에너지와 밀접한 관계가 있으므로 방

전에너지와 출력전압이 높아야 점화율이 높아지게 된다. 따라서 의사정계조성은 비유전율 즉 등가회로상의 C는 크나 절연저항(R)의 저하로 방전 에너지가 저하되므로 실용화에 문제가 있을 것으로 사료된다.

그림 6은 조성의 변화에 따른 k_{33} 와 Q_m 의 변화를 나타낸 것이다. k_{33} 는 상경계조

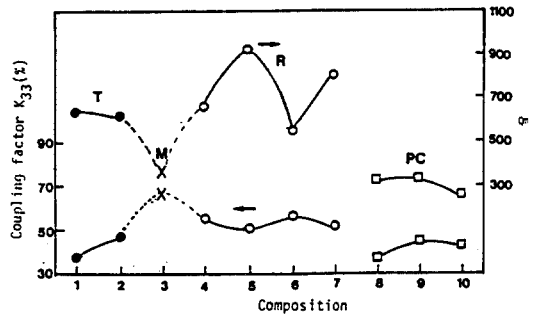


Fig. 6. K_{33} and Q_m as function of composition.

그림. 6. 조성에 따른 K_{33} and Q_m 변화

성에서 최고치를 나타내며 정방정, 능방정 및 의사정계에서는 상경계에서 멀어짐에 따라 저하 되는 경향을 나타내었다. 한편 k_{33} 와 Q_m 의 반대 경향은 종래의 실험결과^{4,5)}와 일치하고 있었다. 한편 의사정계조성에서의 k_{33} 및 Q_m 이 타 조성에 비하여 특히 낮은 이유는 명확하지 않으나 k_{33} 저하원인은 타조성에 비하여 소결체의 기공율이 높고 또한 입경의 크기가 작기 때문이라 사료된다.¹³⁾

그림 7은 조성에 따른 출력전압계수의 변화를 나타낸 것이다. 출력전압계수는 상경계 조성에서 최고치를 나타내고 있으며 능방정, 정방정 및 의사정계의 순으로 저하되는 것을 알 수 있다. 또한 능방정 조성에서는 k_{33} , 유전율 및 Q_m 등에서의 마

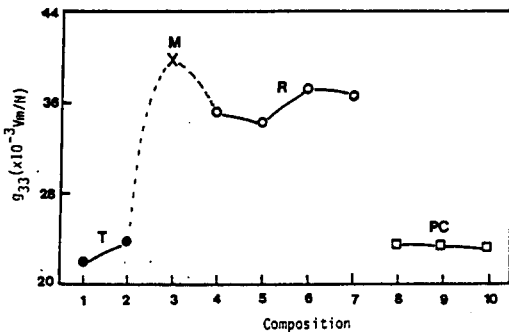


Fig.7. g_{33} as function of composition.
 그림. 7. 조성에 따른 g_{33} 변화

참가지로 조성에 따른 변화가 적었다.

압전 착화 소자는 원주형 소자(단면적 S, 두께 L)의 양단면에 은전극을 소성시켜 높이 두께 방향으로 분극처리한 것으로서 분극 방향으로 힘(F)을 가하면 그 양단에 발생하는 전압(V)은 다음과 같이 표현된다.

$$V = g_{33} \times F \times \frac{L}{S} \dots\dots\dots(1)$$

소자의 물성이 일정하면 출력전압계수 g_{33} 는 일정하고 일정한 힘으로 큰 전압을 얻으려면 L/S, 혹은 외력이 커야 한다. 그러나 L/S가 크거나 외력이 증가하면 소자가 파괴 되기 쉽기 때문에 작은 응력으로 높은 전압을 발생시키려면 g_{33} 가 높아야 한다. 실례로서 L/S 및 g_{33} 가 일정한 시료에 (PCN-3)그림 2와 같은 장치를 이용하여 강구의 낙하 높이를 변화 시킴으로써 소자에 인가되는 응력을 변화 시켰을 때 실제 오실로스코프상에 나타나는 출력전압은 강구의 낙하 높이가 50cm일때 17.7KV로 최고치로 나타내었으며 80cm이상의 높이에서 낙하시 소자의 파괴가 발생하였다. 따라서 각 조성의 출력전압의 특성을 50cm

높이에서 강구를 낙하시 오실로스코프상에 나타나는 파형으로 측정하였다. 그림 8에는 실제 측정예를 나타내었다.

그림 9에는 전술한 방법으로 측정한 출력전압을 조성의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 상경계조성에서 출력전압이 최고치를 나타내고 있으며 능방정조성, 정방정조성 및 의사정계조성의 순으로 저하됨을 알 수 있는데, 이는 전술한 대로 소자의 크기 및 응력이 일정할 때 g_{33} 가 클수록 출력전압이 높게 나타난다는 사실을 뒷받침하는 결과이다. PCN-1 조성에서는 소자의 파괴로 측정 하지 못하였다. 따라서 압전착화 소자는 제반 압전 정수뿐 아니라 강도, 경도등의 기계적 성질도 우수하여야 할 필요가 있는데 비해, 상경계 조성에서는 우수한 전기적 특성을 나타낸다 할 지라도, 정방정 및 능방정에 비하여 기계적 성질이 상당히 저하되는 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾ 특히 압전 착화 소자와 같이 기계적 충격이 인가되는 소자에서는 상경계조성이 실용화에 문제가 있는것으로 사료되나 제조 공정의 개발 및 첨가제¹⁵⁾에 의해 기계적성질의 향상이 가능하다.

한편 소자의 실용성에 있어서 중요한 평가 항목으로 고려되는 것이 경시 압전 열화 현상이다. 압전 열화 현상은 분극이 시간의 경과에 따라서 강유전체에서 상유전체로 전이되거나 또는 일시적인 열, 전기, 혹은 기계적 충격에 의하여 재료의 물성이 변화하는 것을 말하며¹⁶⁾ 압전착화소자를 사용시 기계적 충격에 의해 발생하는 압전 열화 현상은 실용성에 있어서 매우 중요하며, 열화기구의 해석 또한 매우 중요하다고 사료된다. 따라서 본 실험에서 사용한 조성 중 압전 제반 물성 및 출력전압이 비

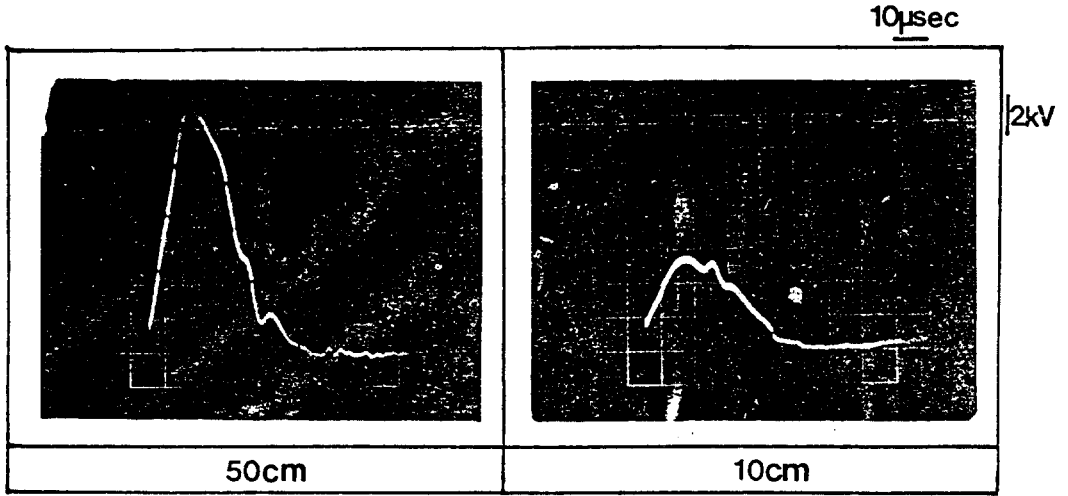


Fig.8. Out put voltage characteristics as function of height.
그림.8. 높이의 변화에 따른 출력전압특성

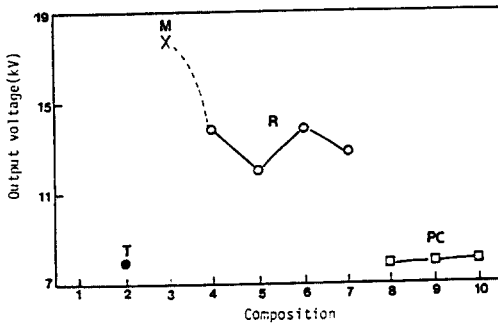


Fig.9. Out put voltage as function of composition.

그림.9. 조성에 따른 출력전압특성

교적 우수하고 조성에 따른 제반 물성의 변화가 적으며, 기계적 특성물성이 우수한 능면체정조성(PCN-4)을 선택하여 반복적인 기계적 충격을 인가시의 압전열화 현상에 대하여 조사하였다.

그림 10는 낙구식 장치를 이용하여 그림 9에서와 같은 조건으로 1만회까지 연속으로 강구를 낙하시키면서 측정한 비유전율과 K_{33} 의 변화를 나타내었다. 충격횟수가 증가할수록 K_{33} 는 저하하였으며 최종 1만

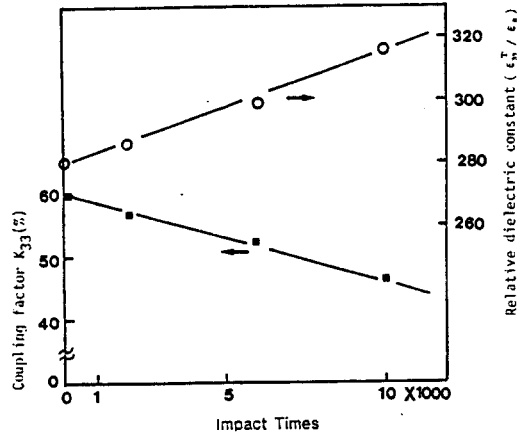


Fig.10. Variation of relative dielectric constant and K_{33} with impact number in PCN system.

그림.10. 기계적충격에 따른 K_{33} and Q_m 의 변화

회 인가시 23% 정도 감소하였으나 비유전율은 28% 증가하였다. 그림에는 나타내지 않았지만 출력전압도 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 최근 손¹⁷⁾등이 보고한 실험결과와 일치하고 있는데 이 현상을 손 등

은 분역 재배열현상으로 설명하였다. 만약 반복적인 기계적충격에 의하여 시료내부에 미세균열이 발생하였다면 Okazaki¹³⁾등의 보고에 의해 미세균열에 의한 공간 전하의 축적으로 비유전율이 저하되어야 하나, 본 실험에서는 비유전율이 상승하였으므로 미세균열은 발생하지 않은 것으로 사료된다. Webster¹⁶⁾의 보고에 의하면 능면체정의 조성에서는 분극후의 비유전율이 분극전보다 낮아진다. 따라서 기계적 충격에 의해서 열화처리시 발생한 비유전율의 증가는 손¹⁷⁾등의 보고에 따르면 분역의 재배열에 의하여 분극전의 분역 상태로 되돌아가는 과정에서 야기되는 현상으로 사료된다. 강유전체 세라믹스는 상유전체에서 강유전체로 전이시, 혹은 직류 전계 인가시에 생성된 내부응력이 시간의 경과와 함께 점차 감소하게 된다. 이 현상은 경시변화가 내부 응력해소 과정 즉 분역의 재배열(Rearrangement)을 포함하고 있음을 나타내는 것이다. 따라서 압전 착화 소자에서 기계적 응력인가시 발생하는 열화현상을 내부 응력 해소과정과 연관시켜 해석하기 위하여 Okazaki⁹⁾등이 제시한 다음과 같은 방법을 사용하였다.

시료의 연마면에 Vickers경도기의 압자로 찍은 압흔(indentation)을 관찰하면 4개의 방사형 균열이 발생함을 알 수 있다. 압자를 통해 시료에 가하는 압력을 변화시키면서 다수의 압흔을 생성시켜 각각의 균열의 평균길이(c)를 측정후 이 균열의 평균길이에 평방근(\sqrt{c})을 취한다. 그리고 임계응력확대계수 K_{Ic} 를 계산하여 \sqrt{c} 의 함수를 그래프상에 도시하면 1차 비례관계가 얻어지는데 이 때 기울기 K_{Ic}/\sqrt{c} 가 시료의

내부응력에 비례하게 된다. 능방정계 조성은 정방정계 조성에 비하여 결정왜곡(crystal distortion)이 적기 때문에 내부 응력의 발생이 정방정계에 비하여 적을 것으로 사료된다.⁸⁾

그림 11에는 그 대표적인 압흔을 나타내었다. 분극 직후 비대칭의 균열이 기계적 응력인가시 분극 방향과 수직방향의 균열이 감소하고 분극방향의 길이는 증가하였다. 분극전의 처너시료에 형성되는 4개의 균열은 그 길이가 동일한 대칭으로 형성되나 분극처리 후는 분극 방향 및 이와 수직 방향으로 각각 압축 및 인장의 비등방성 내부응력이 생성되므로 분극방향의 균열길이는 감소하고 수직방향의 균열길이는 증가 비대칭으로 형성된다. 그러나 열화과정중 비대칭의 균열길이는 대칭으로 변화되어간다.

그림 12에는 분극 직후와 1만회 기계적 충격을 인가하여 열화처리후 전술한 Okazaki의 방법에 의해 각각 분극 방향 및 이와 수직방향으로 발생한 균열의 길이와 K_{Ic} 의 관계를 나타내었다. 비교를 위하여 분극전의 시료에 대한 결과도 함께 나타내었다. 분극전의 시료에 비하여 분극후의 분극 방향의 균열 길이는 감소하고 수직방향의 길이는 증가하여 각각의 방향으로 압축 및 인장응력이 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 그래프의 기울기로 부터 추정된 분극직후의 내부 응력은 분극방향에 대하여서는 증가하였으나 분극축의 수직 방향에 대하여서는 감소하였는데, 이는 분극시 분역의 정렬에 의한것으로 추정된다. 한편 분극 시료를 공기중에서 1만회 연속적으로 기계적 충격을 인가한 경우 분극방향의 균

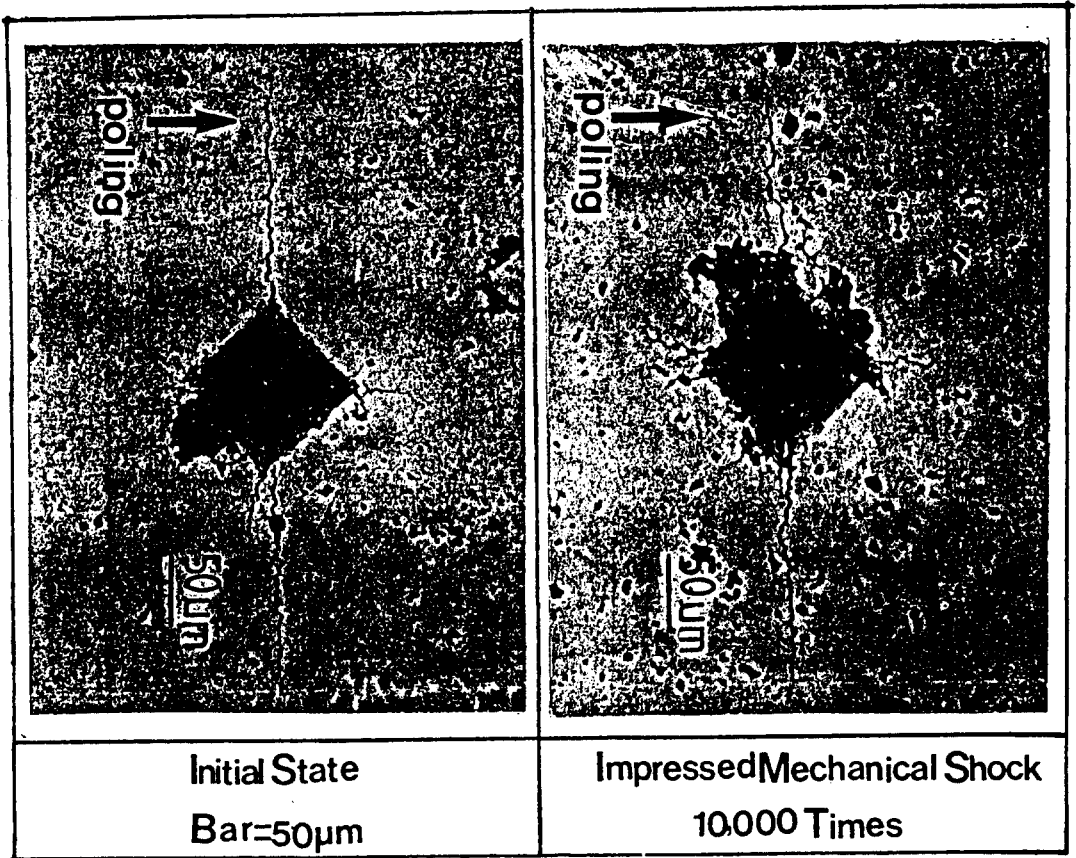


Fig.11. Typical indentation cracks under indent load of 9.8N on polished of PCN system.

그림.11. 시편의 대표적인 압흔

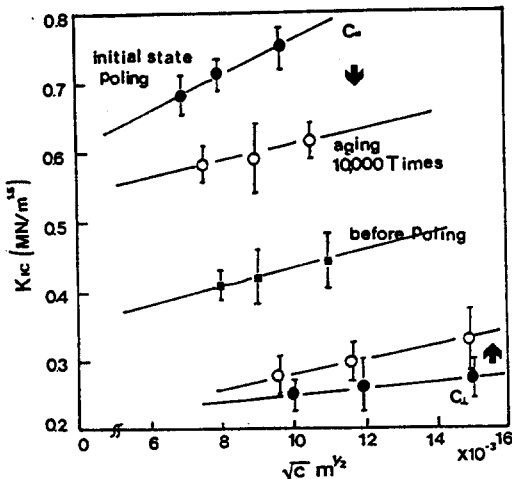


Fig.12. Plot of K_{1c} vs $\sqrt{C_c}$ of PCN system.

그림.12. 파괴인성치와 균열과의 관계

열 길이는 증가하고 수직방향의 균열길이는 감소하였다. 따라서 내부응력은 분극축 방향 및 수직방향으로 각각 감소 및 증가한 것으로 사료된다. 이와 같은 현상들은 큐리온도 이하에서 열처리시 야기되는 응력해소과정(stress-releasing)으로 이해되며 따라서 기계적충격에 의해 발생하는 압전성의 퇴화현상은 분역의 재배열에 의한 것으로 사료된다.

4. 결론

$Pb(Co_{1/2}Nb_{2/3})O_3-PbTiO_3-PbZrO_3$ 계 압전 세라믹을 1150°C에서 2시간 소결제조한 시편에 대하여 압전착화 소자특성 및 경시 변화특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) K_{33} 와 O_m 은 상경계를 중심으로 증가 및 감소하였으며 비유전율 및 출력전압계수는 상경계에서 최고치를 나타내었다. 상경계조성에서 출력전압은 17.7KV로 실험 범위내에서는 최고치를 나타내었다.
- (2) 능면체조성에서는 조성의 변화에 따른 전기적 물성치의 변화가 타 조성에 비하여 적어 압전 착화 소자로서 실용가능하다.
- (3) 기계적응력 인가시 발생한 압전열화현상은 분역재배열에 의한 내부응력해소 과정으로 사료된다.

본 연구는 1987년도 문교부신소재분야 연구지원비에 의하여 이루어졌으며 이에 감사를 드리는 바입니다.

참 고 문 헌

- 1) A. I. Kingon and J. B. Clark "Sintering of PZT Ceramics II, Effect of PbO Content on densification Kinetics", *J. Am. Ceram. Soc.* **66**(4), 356~260(1983).
- 2) S. T. Chung, W. L. Lee and S. H. Cho "Effect of Calcining Temperature on Sintering Characteristics of PZT" *J. Kor. Ceram. Soc.* **22**(1), 40~45(1985).
- 3) S. Takahashi "Effects of Impurity Doping in Lead Zirconate-Titanate Ceramics" *Ferroelectric.* **41**, 143~156(1982).
- 4) H. Ouchi, K. Nagono and S. hayakawa "Piezoelectric Properties of $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbTiO_3-PbZrO_3$ " *J. Am. Ceram. Soc.* **56**(6), 326~328(1969).
- 6) EMAS-6003. *Japan.* 5~7(1977).
- 7) R. L. Fullmann "Measurement of Partical Size in Opaque Bodies" *Trans. AIME.* **3**, 447~452(1953).
- 8) K. Okazaki "Mechanical Behavior of Ferroelectric Ceramics" *Am. Ceram. Soc. Bull.* **63**(9) 1150~1157(1984).
- 9) K. Kagegawa, J. Mori, S. Shirasaki and K. Takahashi "Sluggish Transition Between Tetragonal and Rhombohedral Phases of $Pb(ZrTi)O_3$ Prepared by Application of Electric Field" *J. Am. Ceram. Soc.* **65**(10), 515~519(1982).
- 10) 조상희 "하소온도와 조성이 PZT계 세라믹스의 유전 및 압전특성에 미치는 영향" 85, 국내외 한국과학기술자회의 논문집.
- 11) 壓電セミシクスとその應用 電波新聞社, 148~151 東京(1977).
- 12) Y. D. Ryoo, and S. H. Cho "Effect of Composition Physical Dimension of Specimen and Electrode on Resonant Characteristic of $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbTiO_3-PbZrO_3$ Ceramics" *J. Kor. Ceram. Soc.* **23**(1), 61~66(1986).
- 13) K. Okazaki, and n. Nakata "Effect of Grain Size and Porosity on Electrical and Optical Properties on PLZT Ceramics" *J. Am. Ceram. Soc.* **56**(2) 82~86 (1973)
- 14) H. Igarish, S. Tashiro, N. Arai and K. Okazaki "Piezoelectric, Elastic and Me-

- chanical Properties of Hot Pressed Pb (Zr Ti)O₃ Ceramics” *Memorial. N. D. A. Japan* 22(1) 27~34(1982).
- 15) F. Kulcsar “Electromechanical Properties of PZT Ceramics Modified with Certain Three of Five Valent addition” *J. Am. Ceram. Soc.* 42(7), 343. (1959).
- 16) R. C. Bardt and G. S Ansell “Aging in Tetragonal Ferroelectric Barium Titanate” *J. Am. Ceram. Soc.* 55(1), 57~58 (1972),
- 17) J. H. Shon, W. H. Jung, J. J. Kim J. H. and S. H. Cho “The analysis of Degradation Phenomena in Piezoelectric Ceramic by Equivalent Circuit analysis Method” *J. Kor. Ceram. Soc.* 28(5) 383~389(1991).
- 18) A. A. Webster and T. B. Weston “The Grain Size dependence of the Electro-mechanical Properties in Lead Zirconate-Titanate Ceramics” *J. Canad. Ceram. Soc.* 37 XLI-XLV(1968).
(1991년 9월 19일 접수)

정우환

1964년1월31일생. 1986년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1989년 경북대학교 전자공학과 대학원 졸업공학석사. 1992년 일본 동경공업 대학 박사과정 재

학중



김진호

1958년8월29일생. 1981년 경북대학교 전자공학과 졸업, 공학석사. 1989년 일본경용대학 공학박사. 19989-92년 경북대학교 무기재료공학과.



박인철

1959년11월12일생. 1990년 경북산업대학 전자공학과졸업, 공학사. 1992년 경북대학교 무기재료공학과 조교.



조상희

1941년8월21일생. 1965년 한양대학교 화공학과 졸업. 1975년 일본 경용대학교 대학원 석사. 1978년 일본 경용대학교 대학원, 공학박사. 1978-86년 경북대학교 전자공학과 조교수, 부교수. 1992년경북대학교 무기재료공학과 교수.