□ 特輯 : 新電氣電子材料

壓電세라믹스

朴 昌 燁
(延世大 工大 敎授)
韓 得 永
(建國大 工大 敎授)

■ 차 례 ■

1. 서 언
2. 압전세라믹스의 기본적인 특성
3. 압전세라믹스의 제조방법
4. 압전세라믹스의 주요재료
5. 압전세라믹스의 응용분야
6. 결 언
참고문헌

1 서 언

압전효과란 어떤 결정체에 기계적인 응력을 가하면 그에 비례하여 전기적인 변위가 발생(정효과)하고, 역으로 전계를 가하면 그에 비례하여 기계적인 변형(strain)이 발생(역효과)하는 현상으로서, 1880년 J. Curie 및 P. Curie 형제가 수정에서 처음 발견하였다.

압전효과가 세라믹스와 연관지어진 것은 1946년 MIT의 von Hippel 등이 $BaTiO_3$에서 강유전성을 발견한 직후인 1947년으로서, S. Roberts[1]가 $BaTiO_3$ 세라믹스에 높은 직류전압을 가하면 현저한 압전현상이 나타나고, 그 직류전압을 제거한 후에도 그 현상이 존속하는 사실을 발견한 뒤부터이다.

그후 W.P. Mason의 연구에 의하여 $BaTiO_3$세라믹스가 압전재료로서 확고한 위치를 차지하게 되자, 고온에서의 $BaTiO_3$ 구조인 perovskite 형 결정을 갖는 ABO_3형의 물질들에 관한 연구가 집중적으로 이루어졌다.

그중에서 $PbZrO_3$는 강유전체와는 달리 이중의 이력현상을 나타내는 반강유전성(antiferroelectricity)이 있다는 사실이 발견되었다.

그러나 이러한 압전세라믹스 중에서 가장 많이 사용되던 $BaTiO_3$의 경우, 강유전성에서 상유전성으로 변하는 온도인 Curie점이 120℃ 부근으로서 비교적 낮고, 온도에 따라서 공진주파수가 약간씩 변하는 단점이 있었다.

그러한 문제는 1954년 B. Jaffe등[2]에 의하여 강유전성의 $PbTiO_3$와 반강유전성의 $PbZrO_3$로 만든 고용체(solid solution)인 PZT가 개발됨으로써 극복되었다. 이 PZT는 Curie점이 300℃이상으로서 온도안정성이 우수할 뿐만아니라 압전성도 $BaTiO_3$ 보다 우수하였다.

이에 자극을 받아 PZT의 기본구조에 미량의 다른 원소들을 치환하거나 첨가하여 사용목적에 맞는 여러가지의 재료들이 개발되었다.

특히 1971년 G. H. Haertling 등[3]이 PZT에 La를 첨가하여 hot press법에 의해 개발한 PLZT는 광투과성이 우수하여 광학소자로서 각광을 받고있다.

한편 1978년 펜실바니아 주립대학의 Newnham 등이 connectivity 개념을 발표한 이후 PZT 분말과 PVDF등 압전성이 있는 고분자물질을 복합하여 만든 복합압전재료의 연구가 활발해지고있다.[4]

우리나라에서도 과학원, 연세대등을 비롯한 몇몇의 대학과 가전제품회사등에서 상당한 연구가 진행되고 있다.

여기서는 압전세라믹스에 관한 기본적인 물성과 많이 사용되고 있는 제조방법, 그리고 지금까지 개발된 주요한 압전세라믹스의 특성과 그들의 응용분야를 간단히 소개하고자 한다.

2 압전세라믹스의 기본적인 특성

강유전체는 극성결정체 중의 극히 일부분으로서 모두 압전특성을 나타내고, 결정구조적으로 자발적인 전기분극을 가지고 있으며, 그러한 물질에 응력을 가하면 전기분극이 약간 변하여 그 변화분이 압전효과로 나타난다. 또한 외부에서 인가한 높은 전계에 의하여 미세한 결정내에 있는 분역(domain)의 c축이 전계의 방향으로 정렬하며 전계의 방향을 반대로 하면 c축의 방향도 역전되는 특성이 있고, 그 전계를 제거하여도 그 방향이 대부분 유지되는 이력현상이 있으며, 또 온도의 변화나 상경계(morphotropic phase boundary) 부근에서 결정구조나 여러가지 물리적인 특성들이 민감하게 변하는 특성도 있다.

한편, 강유전체와 비슷한 물질인 반강유전체는 그 전기분극이 이웃한 것끼리 서로 상쇄되어 전체적으로는 극성이 나타나지 않지만 높은 전계를 가하면 분극이 한 방향으로 정렬하는 반면에 전계가 약해지면 강유전체와는 달리 분극의 방향이 원상으로 회복되는 이중의 이력현상이 나타나고, 온도에 따라서 유전율이 변하는 특성이 있다.

압전세라믹스란 강유전체 또는 반강유전체의 이러한 성질을 이용하여 세라믹스에 압전특성을 부여시켜서 만든 미세한 결정들의 집합체인 다결정체이다.[5]

이러한 압전세라믹스를 이용하여 제조한 압전진동자의 등가회로는 일반적으로 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 그 등가회로로부터 직렬공진주파수 f_s는

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

의 관계가 있고, R_1을 무시할 경우 병렬공진주파수 f_p는

$$f_p = f_s \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_0}}$$

의 관계가 있음을 알 수 있다.

한편 주파수의 변화에 따른 어드미턴스의 변화는 그림 2와 같다.[6]

그림 2에서 f_m, f_n은 각각 어드미턴스가 최대및 최소일 때의 주파수이고, f_r 및 f_a는 써셉턴스가 0일 때의 주파수로서 각각 공진주파수, 반공진주파수라 한다. 이중에서 f_s, f_p는 전기기계 결합계수를 구하는데 중요한 값들이다.

또 압전진동자는 기계적인 탄성을 이용하는 것으로서 그 기계적인 손실을 고려하면, 기계적인 품질

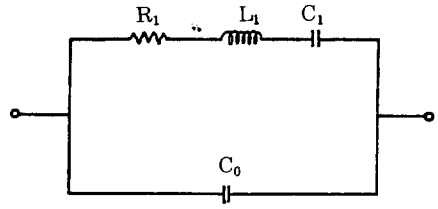

그림 1. 압전진동자의 등가회로

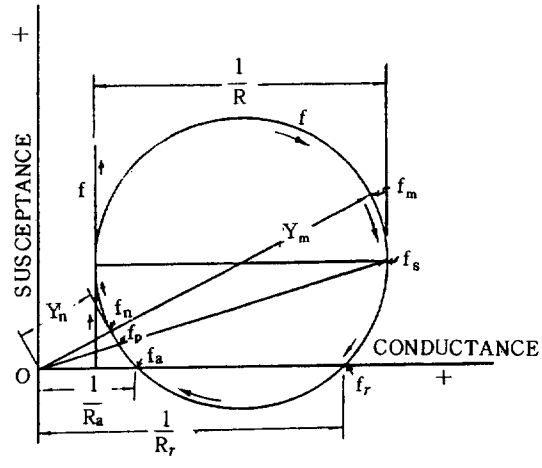

그림 2. 압전진동자의 어드미턴스 특성

계수 Q_m은

$$Q_m = \frac{2\pi f_s L_1}{R_1}$$

으로 표현된다.

이러한 압전진동자에 외부에서 비교적 약한 전계 E와 응력 T를 가하면 그로인해 발생되는 변형 S와 전기적 변위 D는 다음과 같이 선형적인 관계로 표현할 수 있다.

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \quad (1)$$

$$D_n = d_{nj} T_j + \varepsilon_{mn}^T E_m \quad (2)$$

$(m, n = 1, 2, 3 ; i, j = 1, 2, \cdots, 6)$

여기서 s_{ij}^E는 E가 일정할 때의 탄성compliance, ε_{mn}^T는 T가 일정할 때의 유전률, d_{mi} 및 d_{nj}는 압전정수이다.

식(1)과 (2)에서 독립변수와 종속변수를 교환하면 다음과 같은 식들을 구할 수 있다.

$$T_i = c_{ij}^E S_j - e_{mi} E_m$$

$$D_n = e_{nj} S_j + \varepsilon_{mn}^S E_m$$

$$S_i = s_{ij}^D T_j + g_{mi} D_m$$

$$E_n = -g_{nj} T_j + \beta_{mn}^T D_m$$

$$T_i = c_{ij}^{D} S_j - h_{mi} D_m$$
$$E_n = -h_{nj} S_j + \beta_{mn}^{S} D_m$$

위의 식들에서 e, g, h 등은 d와함께 압전정수들이고, c는 stiffness, β는 역유전율을 나타내며, 그들 상호간에는 서로 연관이 되어있다.[4]

또 한쌍의 식들에 포함된 정수들 중에서 독립적인 것의 갯수는 결정구조의 대칭성이 증가함에따라 감소하며, 대표적인 경우로서 6mm의 결정구조는 식(1)과 (2)의 정수들이 s_{11}^{E}, s_{12}^{E}, s_{13}^{E}, s_{33}^{E}, s_{44}^{E}; d_{15}, d_{31}, d_{33}; ε_{11}^{T}, ε_{33}^{T}의 10개 뿐이며, 나머지는 이들로부터 구할 수 있거나 0이다.[5]

한편 압전효과의 척도로서 가장 중요한 계수인 전기기계결합계수 k는

$$k^2 = \frac{\text{변환된 에너지}}{\text{입력된 에너지}}$$

로 정의되며, 진동자의 형상과 진동모오드에 따라 여러가지의 형태로 표현된다. 원판형의 진동자에서 두께방향의 진동모오드일 때의 결합계수 k_t는

$$k_t = \sqrt{\frac{\pi f_s}{2 f_p} \tan\frac{\pi (f_p - f_s)}{2 f_p}} = \frac{h_{33}}{\sqrt{c_{33}^{D} \beta_{33}^{S}}}$$

으로 표현되지만, 방사상방향의 진동모오드일 때의 결합계수 k_p는

$$k_p = d_{31} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_{33}^{T} (s_{11}^{E} + s_{12}^{E})}}$$

로 표현되며, 원주형에서 길이방향의 진동모오드일 때의 결합계수 k_{33}은

$$k_{33} = \sqrt{\frac{\pi f_s}{2 f_p} \tan\frac{\pi (f_p - f_s)}{2 f_p}} = \frac{d_{33}}{\sqrt{s_{33}^{E} \varepsilon_{33}^{T}}}$$

으로 된다.[7]

3 압전세라믹스의 제조방법

압전세라믹스의 제조방법에는 보통소성법, hot press법, hot isostatic press법등이 있다. 보통소성법[4]에 의한 주요제조과정은 다음과 같다.

순도가 적어도 98%이상인 주원료및 첨가물을 mole 비및 중량비로 조합하여 순수한 물과함께 ball mill에 넣고 알루미나 등으로 만든 ball을 이용하여 충분히 혼합분쇄한 후, 보통 800℃~900℃에서 calcination 한다.

열처리된 시료를 다시 ball mill에 넣어 혼합분쇄한 후 중량비로 0.5% 이하정도의 PVA용액을 결합제로 혼합하여 수백 Kg/cm²에서 1.5 ton/cm²의 압력으로 가압성형하고, 성형된 시편을 전기 또는 가스가열식 로에 넣고 1200℃~1300℃정도의 온도에서 1~3시간정도 유지하여 소성(sintering)시킨다. 이때 PbO가 원료인 경우는 PbO의 증발을 억제하도록 해야하며, 이상의 과정에서 철분이 함유되지 않도록 주의해야 한다.

소성된 세라믹스를 요구되는 형상으로 절단하여 요구되는 크기(길이, 두께, 폭, 반경)가 되고 표면이 매끄러워지도록 충분히 연마한 후, silver paste등과 같은 도전성 전극물질을 도포하고 500℃~800℃에서 열처리하거나, 도금, 증착, 또는 sputtering에 의하여 필요한 부분에 전극을 부착한다.

이렇게 만들어진 세라믹스 소자는 그 내부의 분극방향이 무질서하여 전체적으로는 압전성이 나타나지 않으므로, 그 소자를 80~100℃의 절연유 속에 넣고 2~5 KV/mm정도의 직류전계를 인가하여 수십분에서 수시간 정도 유지시켜 분극의 방향을 일치시킨다. 이러한 과정을 분극과정(poling)이라고 하며, 이 과정을 거침으로써 압전세라믹스 소자가 완성된다.

한편 광학소자인 PLZT계의 제조에는 hot press법, hot isostatic press법, 다단소성법 등이 많이 이용되고 있다. 그중에 Motorola사에서 개발한 hot press법[9]을 소개하면 다음과 같다.

우선 원료인 PLZT분말을 만들기 위하여 요구되는 양의 PbO분말, $La(CH_3CO_2)_3$용액, $Zr(OC_4H_9)_4$용액, $Ti(OC_4H_9)_4$용액을 45분간 혼합한 후 80℃에서 16시간 건조하고 500℃에서 16시간 열처리한다. 그후 약 20시간 분쇄하고 80℃에서 4시간정도 건조하여 PLZT분말을 만든다.

이렇게하여 얻어진 PLZT분말을 그림 3과 같은 금형에 넣고 그림 4와 같은 hot press장치를 이용하여 가압성형한다. 이때 시간에 대한 압력과 온도 및 분위기를 그림 5와 같이 되도록 조정한다.

이와같이 하여 얻어진 소자를 요구되는 형상으로 절단하여 충분히 연마한 후 증착및 에칭방법 등으로 전극을 부착하고 분극과정을 거쳐서 PLZT압전세라믹스 소자를 제조한다.

4 압전세라믹스의 주요재료

(1). $BaTiO_3$계[9]

$BaTiO_3$ 압전세라믹스는 온도안정성이 나쁘지만

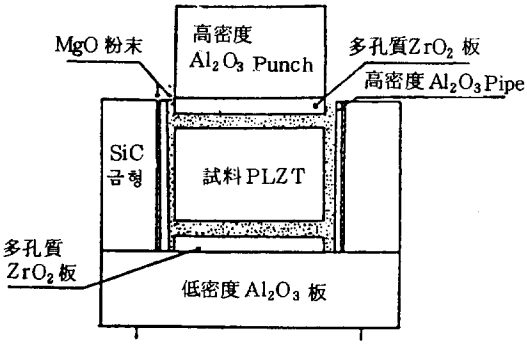

그림 3. Motorola 사의 hot press 용 금형

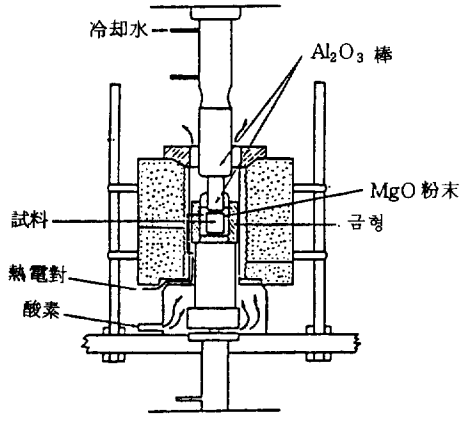

그림 4. hot press 장치

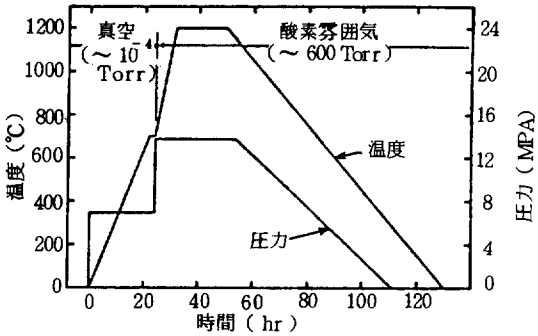

그림 5. 시간에 대한 온도, 압력, 분위기 제어 process

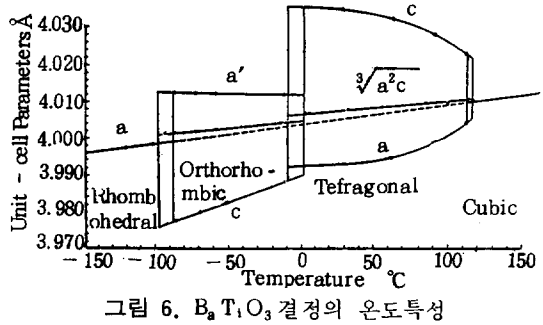

그림 6. $B_aT_iO_3$ 결정의 온도특성

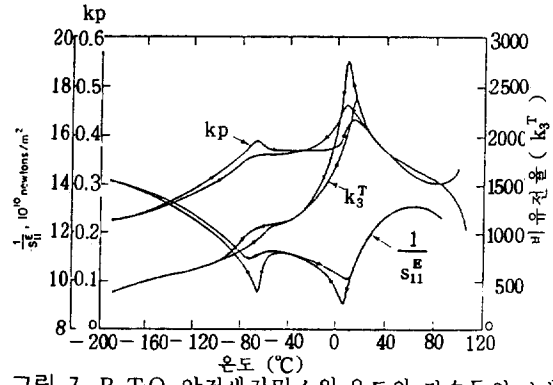

그림 7. $B_aT_iO_3$ 압전세라믹스의 온도와 정수들의 관계

제조가 간단하고 양산이 용이하여 값이 쌀 뿐만아니라 중금속인 Pb 를 쓰지않기 때문에 현재도 많이 사용되고 있다.

$B_aT_iO_3$가 온도에 대하여 비교적 불안정한 것은 그림 6과 7에서 알 수 있듯이 온도의 변화에 따라 그 결정구조가변하고, 그 변태점에서 물리정수들이 극대, 극소를 보이기 때문이다.

한편 B_a^{2+}를 P_b^{2+}로 치환한 $PbTiO_3$는 분극과정이 어렵고 상온에서 유전율이 낮으며 압전특성은 나쁘지만 Curie 점이 490℃ 부근으로 높고 경시변화(aging)가 적은특징이 있으며 고주파용으로 많이 연구되고 있다.

또 B_a^{2+}의 일부를 20원자% 정도까지의 C_a^{2+}로 치환한 (B_a, C_a) TiO_3는 유전율이 낮은 반면 분극과정이 쉽고 Curie 점은 거의 변하지 않으나 제 2 변태점이 낮아지는 특징이 있다.

위의 두 성질을 조합한 (B_a, C_a, P_b) TiO_3는 Ca 또는 Pb의 단독치환보다 온도특성이 개선되고 비교적 높은 교류전계로 구동시켜도 감극(depoling)이 적으며 경시변화도 적은 특징이 있다.

또 $(Pb_{0.76}Ca_{0.24})[(Co_{1/2}W_{1/2})_{0.04}Ti_{0.96}]O_3$에 소량의 MnO 또는 NiO를 첨가시킨 세라믹스는 k_t, k_{33}은 0.5 이상이지만 k_{31}, k_P 등은 거의 관측되지 않는 특징이 있으며 초음파센서나 표면파소자용으로 사용되고 있다.

B_aTiO_3계압전세라믹스의 주요한 물리정수들은 표 1과 같다.

(2), PZT계[9),10)]

PZT계는 중금속인 Pb가 포함되어 있고, 제조과정에서 PbO의 증발에 의한 소성의 어려움이 있으나 온도안정성이 좋고 압전특성도 B_aTiO_3보다 우수하여 압전세라믹스의 대표적인 재료로 뽑히고 있다.

특히 PZT계는 $PbTiO_3$와 $PbZrO_3$의 조성비에

표 1. $BaTiO_3$ 압전세라믹스의 주요정수[9]

구　　분	단　위	$BaTiO_3$	95w% $BaTiO_3$ 5w% $CaTiO_3$	80w% $BaTiO_3$ 12w% $PbTiO_3$ 8w% $CaTiO_3$	98w% $BaTiO_3$ 2w% ZrO_2
Curie 점	℃	≃120	115	150	108
제 2 변 태 점	℃	≃ 0	− 35	< − 150	< − 100
비유전율 ($\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$)		1900	1200	450	1075
결 합 계 수 (k_p)		0.354	0.33	0.19	
〃 (k_{33})		0.493	0.48	0.34	
압 전 정 수 (d_{32})	10^{-12}C/N	191	149	60	
〃 (g_{33})	10^{-3} Vm/N	11.4	14.1	15.0	
〃 (h_{33})	10^8 V/m	14.8	16.7		
〃 (e_{33})	C/m^2	18.6	13.5		
탄 성 정 수 (s_{11}^E)	10^{-12}m^2/N	8.55	8.6	7.8	
〃 (s_{11}^D)	〃	8.18	8.3	7.7	

의하여 구조가 바뀌며, 그 상경계부근에서 우수한 압전특성이 발견된다.

PZT의 상도 (phase diagram)인 그림 8에서 알 수 있듯이, PZT는 $Pb\,Zr\,O_3$의 조성비가 52 ~ 53%부근에서 온도의 변화에 거의 관계없이 강유전성 rhombohedral구조 (고온)와 강유전성 tetragonal구조의 상경계를 이루며, 그림 9, 10, 11에서 볼 수 있듯이 그 상경계부근에서 우수한 압전특성이 나타남을 알 수 있다. 그림 12는 $Pb\ (Zr_{.53}\ Ti_{0.47})\ O_3$의 경우, 온도에 따른 중요한 정수들의 변화를 보인 것이다.

한편 Pb^{2+}의 일부를 Sr^{2+}로 치환하면 Sr의 매 원자%마다 약 9.5℃씩 Curie 점이 낮아지지만 상온에서의 유전율이 높아지며 감극현상이 적어지는 특성이 있고, Ba^{2+}로 일부 치환해도 Curie 점은 낮아지나 상온에서 유전율이 높아지고 상경계부근에서 결

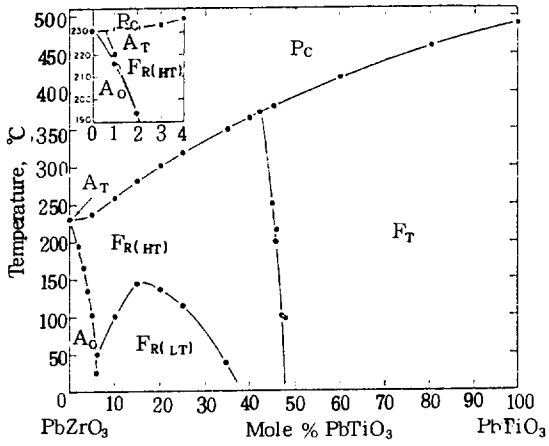

그림 8. PZT의 상도

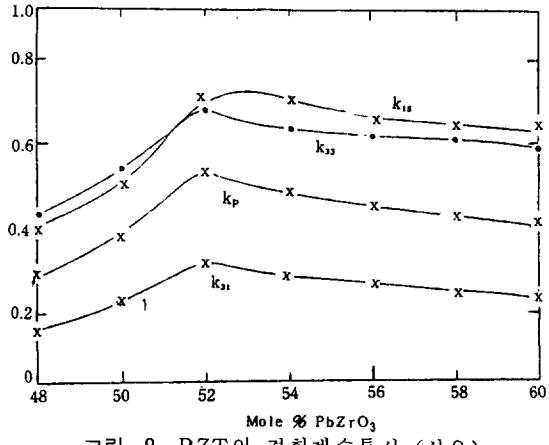

그림 9. PZT의 결합계수특성 (실온)

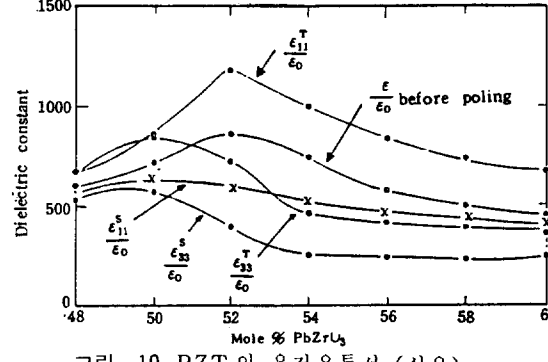

그림 10. PZT의 유전율특성 (실온)

합계수가 커진다. 또 Mg^{2+}로 일부 치환하면 기계적 품질계수는 개선할 수 있으나 소결이 어려운 단점이 있다.

일반적으로 Nb_2O_5, Ta_2O_5, La_2O_3, Bi_2O_3등을 1 중량% 정도 PZT에 첨가하면 P_b의 위치에 결함이 생기며, 유전율, 결합계수, 저항율은 커지고

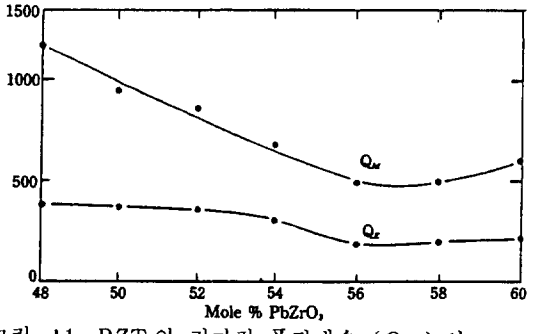

그림 11. PZT의 전기적 품질계수 (Qz)와 기계적 품질계수 (Q_m) 특성 (실온)

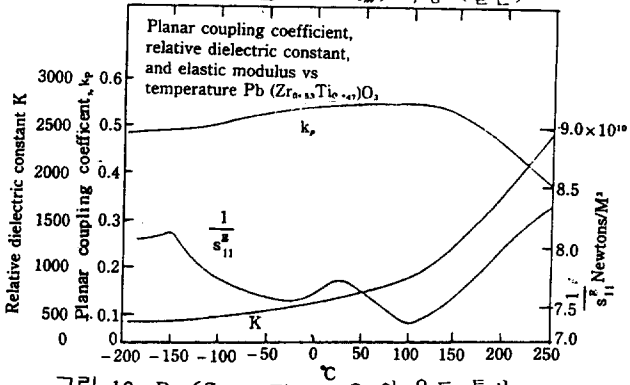

그림 12. P_b $(Zr_{0.53}\ Ti_{0.47})O_3$의 온도 특성

stiffness, 기계적 품질계수는 저하하는 반면, 경시변화가 적어진다. 그러나 MgO, Fe_2O_3, K_2O등을 첨가하면 O의 위치에 결함이 생기며 P_b의 결함과는 달리 유전율과 저항율은 저하하고 기계적 품질계수는 증대하는 경향이 있다.

또 기본구조인 PZT에 Cr을 1중량%정도 첨가하면 분극과정은 어렵지만 감극이 적고 경시변화도 적으며, 공진주파수와 결합계수의 온도안정성이 우수하고, MnO_2는 기계적 품질계수를 크게 개선시킨다.

몇종류의 PZT계 압전세라믹스의 특성들을 표 2에 보인다.

(3) PLZT계[8),11)]

투명세라믹스는 종류에 따라 1차전기광학효과 (linear electrooptic effect ; LEO), 2차전기광학효과(quadratic electrooptic effect ; QEO), 기억효과, 광산란효과가 있으며, 특히 LEO 효과는 복굴절의 변화가 인가한 전계에 비례하는 현상으로서 선형응답이 요구되는 광변조기 등에 이용되고, QEO 효과는 복굴절의 변화가 전계의 자승에 비례하는 현상으로서 광차단기와 같은 ON-OFF 동작이 요구되는 장치에 이용되며, 기억효과는 영상저장및 display에 응용된다.

이러한 투명세라믹스의 대표적인 것이 $P_{b1-x}L_{a_x}(Z_r, T_i)_{1-\frac{x}{4}}O_3$의 구성비를 갖는 PLZT로서 실온에서의 상도는 그림 13과 같다.

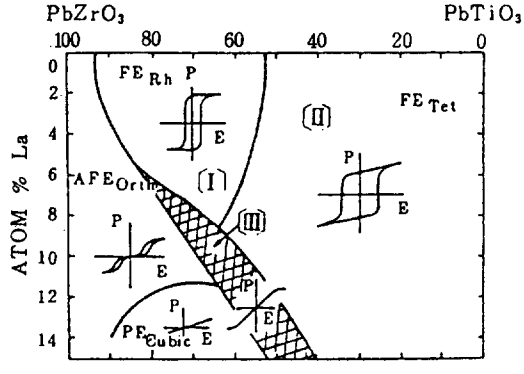

그림 13. PLZT의상도와 hysteresis곡선

표 2. PZT계 압전세라믹스의 정수 (25℃)[10)]

구 분	단 위	PZT-4	PZT-5A	PZT-5H	PZT-6A	PZT-6B	PZT-7A	PZT-8	PZT-2
Curie 점	℃	328	365	193	335	~ 350	~ 350	300	370
비유전율 ($\in_{33}^T/\in_0$)		1300	1700	3400	1050	460	425	1000	450
〃 ($\in_{33}^S/\in_0$)		635	830	1470	730	386	235	580	260
결 합 계 수 (k_{33})		0.51	0.49	0.505	0.39	0.30	0.50	0.48	0.51
압 전 정 수 (d_{33})	10^{-12} C/N	289	374	593	189	71	150	225	152
〃 (g_{33})	10^{-3} Vm/N	25.1	24.9	19.7	20.4	17.4	39.8	25.4	38.2
〃 (e_{33})	C/m²	15.1	15.8	23.3	12.5	7.1	9.5	13.2	9.0
탄 성 정 수 (s_{33}^E)	10^{-12} m²/N	15.5	18.8	20.7	13.0	9.35	13.9	13.5	14.8
〃 (s_{33}^D)	〃	7.90	9.46	8.99	9.20	8.05	7.85	8.00	9.00
품 질 계 수 (Qm)		5000	75	65	450	1300	600	1000	680
주파수계수 (N_{3t})	Hz·m	2000	1890	2000	2140	2225	2100	2070	2090

PLZT－10／55／45와 PLZT－12／40／60 은 대표적인 LEO재료이고 PLZT－9／65／35는 대표적인 QEO재료이다.

PLZT계 압전세라믹스의 여러특성들은 그림 14, 15, 16과 같다.

그외의 PLZT계로서 PLNZT〔=(Pb(La, Nb)(Zr, Ti)O3〕, PLZN－PLZN〔=(Pb, La)(Zn, Nb)O3(Pb, La)(Zr, Ti)O3〕, PBLN〔=(Pb, Ba)(La, Nb)2O6〕등의 새로운 투명세라믹스 재료들

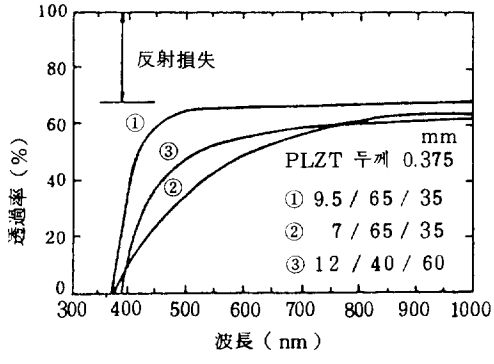

그림 14. PLZT계 압전세라믹스의 투과율

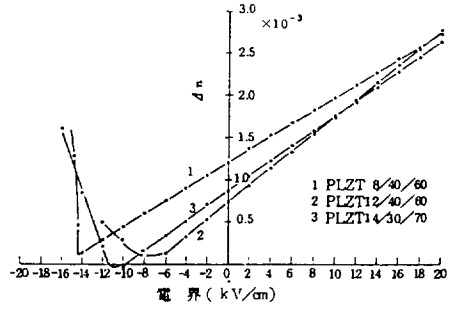

그림 15. PLZT계 압전세라믹스의 1차전기광학효과 (LEO)

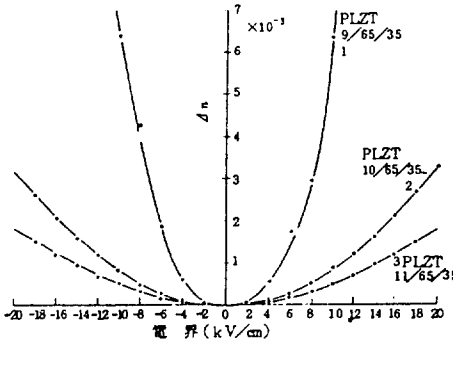

그림16. PLZT계 압전세라믹스의 2차 전기광학효과 (QEO)

이 계속 연구개발되고 있다.

(4). 기타의 압전세라믹스[4]

PZT압전세라믹스의 분말과 PVDF, P(VDF－Tr, FE) 등의 고분자재료를 조합하여 만든 복합압전재료, A(B1B2)O3－PZT계의 복합 perovskite형 압전재료, PZT계가 아닌 (Na, K)NbO3, (Na－Li)NbO3, K(Ta, Nb)O3등의 압전재료와 $Bi_2A_{x-1}B_xO_{3x+3}$형의 Bi층상 산화물, perovskite형 구조가 아닌 $A_xB_2O_6$형의 압전재료등이 연구되었거나 계속 개발중에 있다.

5 압전세라믹스의 응용분야

압전세라믹스의 응용은 압전현상의 정효과, 역효과, 이력현상, 전기광학효과, 기억현상, 공진현상등을 적절히 이용하는 것으로서 그 응용범위는 매우 광범위할 뿐만아니라, 세라믹스의 기본구조에 여러가지의 원소들을 치환 또는 첨가하여 요구되는 특성들을 강화시키거나, 새로운 특성들을 개발함으로써 그범위는 확대되고 있다.

현재 가장 많이 생산되는 제품으로서 가스점화장치, 압전재료와 금속을 접착시킨 Langevin형 진동자, 박막형 음파발생기인 압전부저등이 있으며, 최근에는 energy trapping 현상을 응용한 고주파용 필터, 표면파를 응용한 SAW필터, 초음파진

표 3. 압전세라믹스의 정효과응용분야

응 용 분 야	응 용 제 품
측 정 기	압력계, 유량계, 유속계, 액면계, 점도계
픽업 (pick－up)	전축용, Video disk용
마 이 크 로 폰	공중용, 수중용
의 료 기	혈압계, 심음계, 맥박계
센 서	진동, 가속도, 음파, 초음파, 압력
고전압발생장치	점화소자
기 타	touch button switch, key board

표 4. 압전세라믹스의 역효과 응용분야

응 용 분 야	응 용 제 품
가 공 기 기	초음파용접기, 초음파세척기, 정밀가공기, 초음파연마기
의 료 기	초음파가습기, 초음파세안기, 초음파메스, 결석제거기
음 향 기	압전부저, 헤드폰, 스피커
화 공 장 치	유화장치, 분산장치
기 타	압전마이크로스텝모터, 척서기

단기, 초음파 현미경, 광학소자의 응용분야 등이 각광을 받고 있다.

압전세라믹스 소자의 주요한 특성별 응용분야를 기기위주로 분류하면 표3, 4, 5, 6과 같다.

표 5. 압전세라믹스의 정, 역효과 응용분야

응 용 분 야	응 용 제 품
측 정 기	수심측정기, 두께측정기, 액면계
탐 지 기	어군탐지기, 음향탐지기, 비파괴검사기
의 료 기	초음파진단장치
필 터	LF, MF, HF, VHF 용세라믹필터 SAW필터, 압전음차필터
발 진 기	세라믹발진기, SAW발진기
고압발생장치	압전변압기
초음파기기	초음파지연선, 초음파현미경 초음파리모콘, 도난방지기
음 향 기 기	수중음파전화

표 6. 압전세라믹스의 광학효과 응용분야[8),11)]

응 용 효 과	응 용 제 품
LEO 효 과	광변조기, 전압센서, 광조절기
QEO 효 과	섬광보호안경, 스펙트럼필터, 입체안경
기 억 효 과	화상의구성, 축적, 재생장치, 광정보처리장치
광 산란효과	광조절기, 광차단기

6 결 언

이상에서 언급한 바와 같이 외국의 경우 압전세라믹스는 그 재료의 개발은 물론 그 응용분야에 관한 연구가 광범위하게 이루어져 왔다. 우리나라에서도 이미 연구와 개발이 시작되기는 하였으나 대학, 연구소, 기업체등이 협력하여 보다 활성화시켜야 되리라본다.

參考文獻

1) S. Roberts; "Dielectric and Piezolectric Properties of $BaTiO_3$," Phys. Rev., 71, pp.890-895, 1947.
2) B. Jaffe, R.S. Roth," Piezolectric Properties of Lead Zirconate-Lead Titanate Solid-Solution Ceramics," J. Appl. Phys., 25, pp.809-819, 1954.
3) G.H.Haertling & C.E. Land," Hot-Pressed (Pb, La) (Zr, Ti) O_3 Ferroelectric Ceramics for Electrooptic Applications," J. Am. Ceramic Soc., 54, 1, 1971.
4) 塩崎忠；圧電材料の製造と応用, CMC, 東京, pp.1-59, 99-109, 1984.
5) 電子材料工業会；圧電セラミックスとその応用, 電波新聞社, 東京, pp.15-27, 1974.
6) W.P. Mason; Physical Acoustics, Pt. I-A, Academic Press, N.Y., pp.242-245, 1964.
7) "IEEE Standard on Piezoelectricity," IEEE std. 176-1978. IEEE INC., N.Y., 1978.
8) 岡崎清；エレクトロニクス用セラミックス, CMC, 東京, pp.219-262, 1983.
9) B. Jaffe, W.R. Cook, H.Jaffe; Piezoelectric Ceramics, Academic Press, N.Y., pp.53-251, 1971.
10) O.E. Mattiat; Ultrasonic Transducer Materials, Plenum Press, N.Y., pp.100-110, 1971.
11) C.E. Land, P.D. Thacher, G.H. Haertling; Electrooptic Ceramics. Academic Press, N.Y., pp.137-233, 1972.
12) 浜野健也；ファインセラミックスハンドブック, 朝倉書店, 東京, pp.604-697, 1984.
13) 島川正憲；超音波工学, 工業調査会, 東京, pp.1-9, 1975.