

CeO₂을 첨가한 Pb(Mg, Te, Mn, Nb)O₃-PZT계 세라믹스의 물리적 성질과 압전트랜스의 출력특성

박순태 · 정수태* · 이종현**

부산전문대학 전자과

*부산공업대학교 전자공학과

**동아대학교 전자공학과

(1993년 7월 1일 접수)

Physical Properties and Out-put Characteristics of Piezoelectric Transformer of Pb(Mg, Te, Mn, Nb)O₃-PZT Ceramics with Addition of CeO₂

Soon-Tae Park, Su-Tae Chung* and Jong-Hyeon Lee**

Dept. of Electronic Eng., Pusan Junior College

*Dept. of Electronic Eng., National Pusan University of Technology

**Dept. of Electronic Eng., Dong-A University

(Received July 1, 1993)

요 약

Pb(Mg, Te, Mn, Nb)O₃-PZT계 세라믹스의 CeO₂ 첨가량(0~0.3 wt%)에 대한 전기적, 기계적 성질을 조사하고 압전트랜스를 제작하여 출력특성을 검토하였다. CeO₂의 첨가량이 증가함에 따라 소결체의 입경은 감소하고, 입자형태는 더욱 균일하였다. CeO₂을 0.2 wt% 첨가한 시료는 항전계(9500 V/cm), 기계적 품질계수(2500), 격임강도(1065 kg/cm²)가 향상되었고, 압력(2000 kg/cm²)을 반복해서 인가하여도 압전상수의 저하가 거의 없었다. 그리고 압전트랜스의 승압비(V_{dc}/V_{rms} ; 2배압 정류, 부하저항이 100 M·ohm)는 선형영역에서 약 950의 비교적 높은 값을 보였다.

ABSTRACT

Electrical and mechanical properties of Pb(Mg, Te, Mn, Nb)O₃-PZT ceramics are investigated as a function of CeO₂ addition (0 to 0.3 wt%), and the output characteristics of piezoelectric transformer are also presented. The grain size decreased and the shapes of particles were more uniform with the addition of CeO₂. The coercive electric field (9500 V/cm), mechanical quality factor (2500) and bend strength (1065 kg/cm²) were improved by addition of CeO₂ 0.2 wt%. After repetition of a number of stress cycles, the degradation of k_{33} was not found in this sample. The voltage step-up ratio (V_{dc}/V_{rms}) of piezoelectric ceramic transformer (half wave-voltage doubler, load resistor 100 M·ohm) was about 950 in a linear region, its value was relatively higher than other materials.

1. 서 론

압전트랜스는 전계-압전효과를 이용한 소전력용 고전압발생소자로서 종래의 권선형트랜스에 비교해서 소형, 정량이면서 승압비가 높고 구조가 간단하므로 직류 고

전압전원에 응용되고 있다^{1,2}. 압전트랜스의 이론적인 고찰은 Rosen³ 이후로 Berkum⁴, 祐⁵ 등 많은 연구자들에 의해서 보고되었다. 그러나 압전세라믹트랜스는 공진시 강력한 에너지변환을 하기때문에 재료의 물리적 특성이 매우 중요함에도 불구하고, 이에 대한 보고는

Ichinose⁶⁾를 제외하고 거의 없다. 압전트랜스용 재료는 전기기계결합계수(k_{31} , k_{33})와 기계적품질계수(Q_m)가 높아야 한다. 전기기계결합계수를 높이기 위해서는 상경계 조성의 $Pb(Zr, Ti)O_3[PZT]$ 계 세라믹스가 좋고, 기계적 품질계수를 크게 하기 위해서는 $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3[PMN]$ 을 고용시킨 PZT-PMN계가 잘 알려져 있다⁷⁾. 한편 $Pb(Mg_{1/2}Te_{1/2})O_3[PMT]$ 계⁸⁾를 고용시킨 PZT-PMT계가 보고된 바가 있는데, 이 조성의 시료는 응력인가에 대한 압전상수의 열화나 전기적 열화가 적다⁹⁾.

본 실험에서는 입출력전압의 승압비가 높고, 기계적-전기적 열화가 적은 압전트랜스용 재료의 개발에 중점을 두고자 PZT계에 복합페로스카이트 화합물인 PMN계와 PMT계를 고용시킨 $Pb(Mg, Te, Mn, Nb)O_3$ -PZT계 세라믹스에 대하여 CeO_2 의 첨가량에 따른 소결성, 압전특성 및 압력을 인가한 횟수에 대한 압전상수의 저하, 기계적 적임강도 등을 조사하였고, 이들의 물리적 성질을 미세구조의 관점에서 비교 검토하였다 또한 이 조성의 재료로 압전트랜스를 제작하여 입출력의 승압비 및 주파수특성을 조사하였다. 그 결과 CeO_2 을 0.2 wt% 첨가함으로써 시료의 물리적특성이 향상되었고, 압전세라믹트랜스의 승압비가 다른 연구자^{2,10)}에 비하여 높았다.

2. 실험

본 실험의 조성은 $0.1Pb(Mg_a, Te_b, Mn_c, Nb_d)O_3-0.9Pb(Zr_x, Ti_y)O_3-zCeO_2$ 에서 $a=b=0.125$, $c=0.25$, $d=0.5$, $x=y=0.5$, $z=0\sim 0.3$ wt%이다. 제조공정은 일반적인 세라믹스의 방법을 따랐으나, 초기 분말의 혼합방법은 원료의 균일한 조성과 소결온도를 낮추기 위하여 ABO_3 페로스카이트상의 B-site에 속하는 ZrO_2 , TiO_2 , $MnCO_3$, MgO , Nb_2O_5 , TeO_2 을 혼합하여 1차 열처리(약 950°C, 3 시간) 후에 미세하게 분쇄하여 PbO 와 소정의 CeO_2 량을 조합하는 방법으로 압전세라믹스를 제조하였다. 하소를 820°C에서 2시간 행한 후에 분쇄하였다. 이 분말에 PVA 결합제를 첨가하고, 1000 kg/cm²을 가하여 직경 15 mm, 두께 약 2.5 mm로 성형하였다. 소결은 1100°C에서 2시간 유지하였다. 시료의 미세구조는 SEM으로 조사하였고, 결정상은 XRD 분석하였다. 원판형 시편은 직경 13.8 mm, 두께 1 mm로 연마하였고, 길이방향시편은 길이 10 mm, 폭 3 mm, 두께 1 mm로, 막대형 시편은 8 mm, 폭 1.8 mm, 두께 15 mm로 잘라서 각각 은전극을 붙였다. 이 시편에 30 kV/cm의 전계로 분극처리를 하여 24시간 이상 방치후, IRE 공진법에 따라 압전상수를 계산하였다. 그리고 응력인가횟수에 대한 전기기계결합계수(k_{33})의 저

하를 조사하기 위하여 실리콘 오일이 담겨진 고무주머니에 막대형 시료를 넣고, 이 고무주머니를 직경 20 mm의 성형틀에 넣어 2000 kg/cm²의 압력을 2회 인가한 후에(매회 압력유지 시간은 2분) 끄집어 내어 IRE 공진법에 따라 k_{33} 를 계산하였고, 이러한 과정을 반복하여 모두 4번 시행하였다. 또한 적임강도를 조사하기 위하여 막대형시료(8×1.8×1.5 mm³)를 10개 준비하였고, 이 시료를 3점적임강도법에 따라 시험하였다¹⁰⁾. 이때 시편의 지지 간격은 6 mm이고, 시험결과에서 얻은 계산값 중에 최대값과 최소값은 제외하였다. 한편 압전세라믹트랜스는 32×6×1 mm²의 크기를 갖는 장방향으로 제작하여 출력특성을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소결특성

시료의 물리적특성에 미치는 요인 중에 밀도, 결정입경 등 소결성이 중요하다. Fig. 1은 시료의 파단면 사진을 나타낸 것이다. CeO_2 을 0.2 wt% 첨가한 시료는 무첨가 시료보다 평균입경이 감소하였고, 입자가 조밀하면서



Fig. 1. SEM micrographs of specimens.

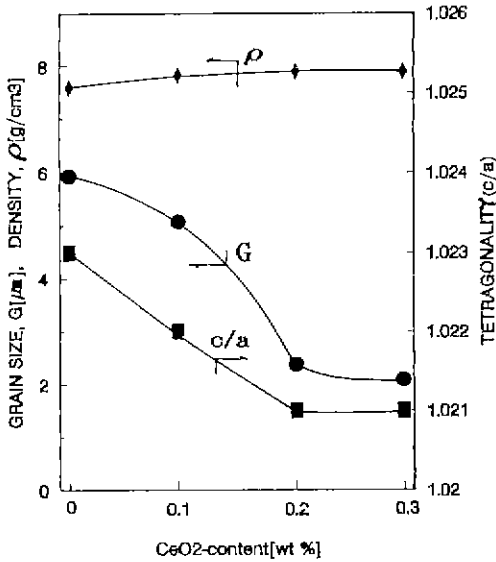


Fig. 2. Grain size, density and tetragonality vs. CeO₂ contents.

균일한 분포를 나타내었다. Fig. 2는 CeO₂ 첨가량에 대한 밀도, 입경 및 tetragonality(c/a)를 나타낸 것이다. 여기서 입경은 대각선법으로 구하였고, 결정구조적인 관점에서 X선 회절분석 결과, 본 조성의 시료가 모두 perovskite 구조를 갖는 tetragonal상을 나타내었으므로, tetragonality는 (002)와 (200)의 피크 각도에서 구하였다. 그림에서 CeO₂의 첨가량이 증가함에 따라 밀도는 증가하였고, 입경과 tetragonality는 감소하였는데, 0.2 wt% 이상에서는 그 감소가 적음을 보였다. Li¹³는 modify PZT 시료에서 CeO₂을 0.2 wt% 첨가하므로써 입경은 감소하고 tetragonality는 증가함(1.8%)을 보고하였다. 입경의 변화는 Li의 결과와 일치하였으나, tetragonality의 변화는 매우 적지만(0.2%) Li의 결과와는 다름을 보였다 이러한 차이는 재료의 조성에 따라 차이가 있을 수 있으며, Ce-TZP에서 CeO₂의 함량이 증가함에 따라 tetragonality가 감소함이 보고된 바도 있다¹⁴. 그리고 밀도가 증가한 이유는 CeO₂

의 량이 증가함에 따라 tetragonality가 감소하였기 때문에 소결이 용이하였을 뿐만 아니라, 입경이 감소하였기 때문이다. 따라서 CeO₂을 0.2 wt% 첨가한 시료는 밀도가 7.85 g/cm³, 평균입경이 약 2 μm이며 균일한 입자를 갖고 있으므로, 기계적 특성이 우수함을 예견할 수 있다.

3.2. 압전특성

Table 1은 본 실험조성의 시료에 대하여 CeO₂ 첨가량에 따른 압전상수를 나타낸 것이다. 여기서는 압전세라믹트랜스용 재료로서 중요한 및가치의 압전상수에 대하여 설명을 하기로 한다.

압전세라믹트랜스는 탄성진동시에 발생하는 열과 출력부에 나타나는 높은 전압이 유기되므로 시료의 큐리온도 및 항전계는 중요한 특성중의 하나이고, 이러한 값들은 비교적 높아야 한다. 즉 큐리온도가 낮으면 시료의 열적 분극풀림현상이 일어나거나 압전상수의 온도 의존성이 크고, 항전계가 작으면 전기적 분극풀림현상이 일어나거나 압전상수의 전체의존성이 크다^{12,15}. Fig. 3은 CeO₂ 첨가량에 따른 시료의 큐리온도와 항전계를 나타낸 것이다. 여기서 큐리온도는 유전율이 최대가 되는 지점의 온도이고, 항전계는 실온부근에서 히스테리시스 곡선의 포화가 일어나지 않았기 때문에 150°C의 실리콘 오일 중에서 측정 한 값이다. CeO₂의 첨가량이 증가함에 따라 큐리온도는 완만하게 감소함을 보였다. 항전계는 증가함을 보였다. 큐리온도가 감소한 이유는 Yamamoto¹⁶의 보고와 같이 tetragonality가 감소하였기 때문이다. 그리고 항전계의 증가 이유는 결정구조의 변화와 미세구조로 나누어 생각할 수 있다. 일반적으로 PZT계에는 tetragonality가 감소하면 항전계가 감소하나, 본 실험에서는 전술한 바와 같이 tetragonality의 변화가 아주 작으므로 그 영향을 무시할 수 있다. 한편 Okazaki¹⁵는 입경이 증가하면 항전계가 감소함을 보고하였고, 또한 세라믹 자성체에서도 입경이 증가하면 항자계가 감소함이 보고된 것이 있다¹⁶. 그러므로 CeO₂가 증가함에 따라 항전계가 증가한 이유는 입경의 감소에 기인한다. 본 실험

Table 1. Piezoelectric Constant of 0.1Pb(Mg, Te, Mn, Nb)O₃-0.9PZT+z wt% CeO₂

z wt%	ε ₁₃ T/c ₀	Tc °C	Ec V/cm	kp	Q _m	k ₃₁	s ₁₁ ^T 10 ⁻¹² m ² /N	d ₃₁ 10 ⁻¹² m/V	g ₃₁ 10 ⁻³ Vm/N	k ₃₃	s ₃₃ ^T 10 ⁻¹² m ² /N	d ₃₃ 10 ⁻¹² m/V	g ₃₃ 10 ⁻⁴ Vm/N
0.0	1315.9	330	7543	0.55	1219	0.33	14.1	-133.8	-11.5	0.63	16.8	311.0	21.4
0.1	995.2	327	8043	0.50	1650	0.29	14.1	-102.2	-11.6	0.61	14.0	248.4	20.7
0.2	690.0	325	9428	0.55	2641	0.32	13.1	-90.5	-14.8	0.62	13.7	249.8	20.8
0.3	613.0	324	10158	0.47	2587	0.28	11.7	-70.6	-13.0	0.59	13.7	239.2	19.9

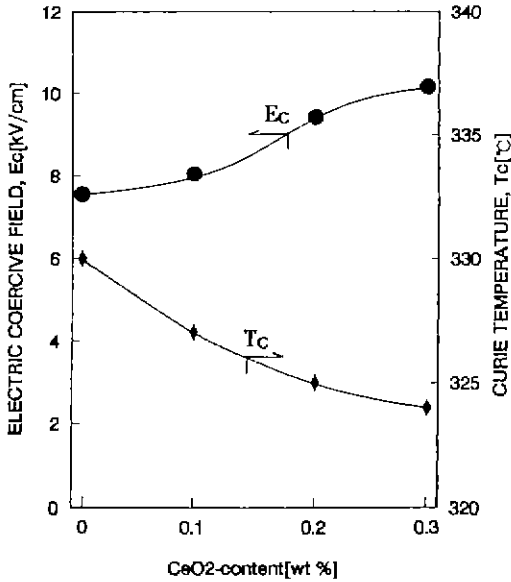


Fig. 3. Electric coercive field and curie temperature vs. CeO₂ contents.

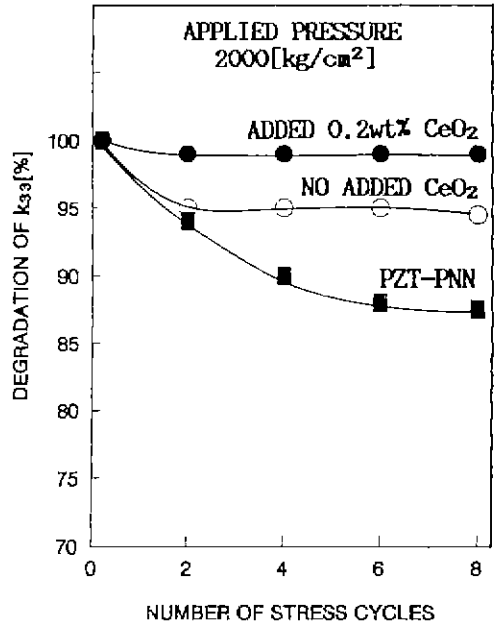


Fig. 5. Degradation of k_{33} vs. number of stress cycles. PZT-PNN: $0.5\text{Pb}(\text{Zr}_{0.4}\text{Ti}_{0.7})\text{O}_3\text{-}0.5\text{Pb}(\text{Ni}_{1.3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$

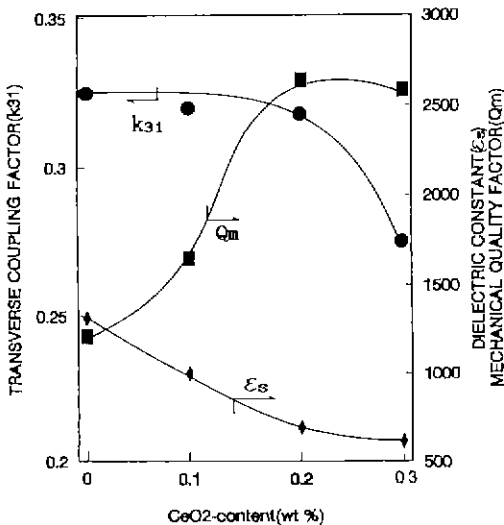


Fig. 4. Transverse coupling factor, dielectric constant and mechanical quality factor vs. CeO₂ contents.

에서 CeO₂을 0.2 wt% 첨가한 경우는 시료의 큐리온도가 약 325°C 이고, 항전계는 약 9500 V/cm 값을 가졌다. 한편 지류전계인가에 대한 압전상수(d_{11})의 저하는 항전계의 1/4전계 이하에서 매우 적다¹⁷⁾. 따라서 본 시료의 경우에는 인가전계가 항전계 9500 V/cm의 1/4에 해당하는

값인 약 1600 V/cm 이내이면 압전상수의 저하가 적으므로, 압전세라믹트렌스의 출력단(출력단 소자의 길이는 16 mm)에 나타나는 교류전압은 최대 2500 Vrms(1600 V/cm × 1.6 cm)까지 가능함을 예견할 수 있다.

Fig. 4는 CeO₂ 첨가량에 대한 유전율, 압전변위상수(k_{31}) 및 기계적품질계수(Q_m)를 나타낸 것이다. CeO₂ 첨가량이 증가함에 따라 유전율은 감소하였고, CeO₂가 0.2 wt%까지는 k_{31} 의 변화는 적었으나, 그 이상에서는 크게 감소하였다. 유전율의 저하는 전술한 바와 같이 CeO₂의 첨가량이 증가함에 따라 일정이 감소하였기 때문이다. 그리고 Q_m 은 CeO₂첨가량이 증가함에 따라 크게 증가하였고, 0.2 wt%일 때 최대값을 나타내었다.

압전세라믹트렌스는 에너지 변환시 강한 응력이 가해 지므로 압전상수의 열화가 적어야 한다. Fig. 5는 막대형시료의 응력인가횟수에 대한 전기기계결합계수(k_{33})의 저하를 나타낸 것이다. 그림에서 PZT-PNN계¹⁸⁾(tetragonal ; soft) 시료는 열화(k_{33} 의 저하)가 큼을 나타낸 반면에, 본 실험의 시료(tetragonal ; hard)는 CeO₂의 첨가에 관계없이 초기에 압전상수가 조금 감소하고, 그 이후로는 거의 일정하였다. 이것은 Ichinose⁹⁾가 언급한 바와 같이 복합페로스카이트 화합물인 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{Te}_{1/2})\text{O}_3$ 을 PZT계에 고용시켰기 때문이라 사료된다. 압전상수가 열화하는 원인은 분극처리한 시료에 강한 응력을 가하면 도메인의

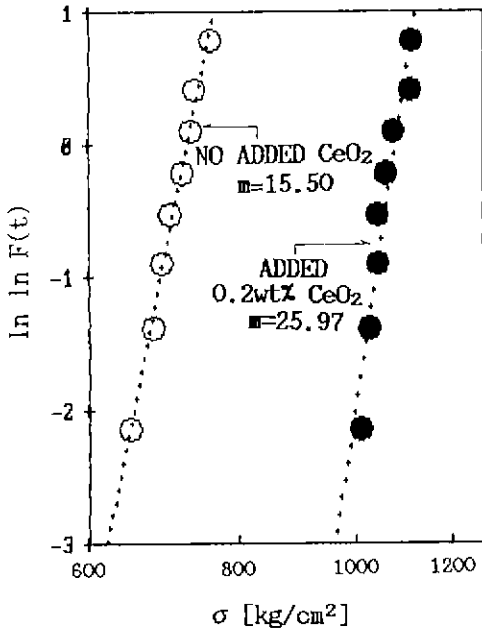


Fig. 6. Weibull diagram of bend strength.

배열이 원래의 상태로 이동하기 때문이다. PZT계에 있어서 응력인가치수에 대한 압전상수의 열화현상은 Krueger¹⁹⁾에 의해서 관찰되었다. 그는 soft 시료가 hard 시료보다, 또한 rhombohedral상의 시료가 tetragonal상의 시료보다 압전상수의 열화가 큼을 보고하였다. 따라서 응력인가치수에 따른 압전상수의 열화는 Krueger의 결과와 일치한다. 그리고 CeO₂을 0.2 wt% 첨가한 시료는 무첨가 시료보다 k₃₃의 변화가 극히 적음을 나타내었다. 이것은 CeO₂을 첨가한 시료가 무첨가 시료보다 입경이 작기 때문이라 사료된다. 그러므로 본 실험에서 압전세라믹스의 응력인가치수에 대한 압전상수의 열화는 Pb(Mg_{1/2}Te_{1/2})O₃을 고용시킴으로써 개선되었고, 그 영향은 CeO₂를 첨가하므로써 감소시킬 수 있었다.

3.3. 기계적 특성

압전세라믹진동자에 교류전압을 가하면 수축과 팽창의 탄성진동에 의해서 시료의 내부균열이 발생하여 파괴의 원인이 되므로 강력 진동을 하는 압전트랜스용 시료의 기계적 강도는 매우 중요하다. Fig. 6은 무첨가 시료와 CeO₂을 0.2 wt% 첨가한 시료에 대한 격임강도의 계산 값을 Weibull 확률지에 나타낸 것이다. 여기서 각 시료의 직선은 최소사승법으로 구하였다. 직선의 기울기 m은 Weibull 계수이며, 그 값이 클수록 격임강도의 균일성이 높아진다. 그리고 이 직선이 종축 $\ln \ln F(t)=0$ 를 지나는

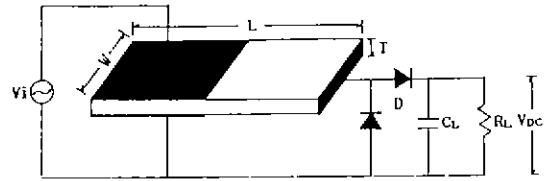


Fig. 7. Transverse-type transformer and its circuits.

점에 대한 횡축의 값은 특성격임강도를 나타낸다. 그림에서 무첨가 시료의 Weibull 계수가 15.5인 반면에 CeO₂를 첨가한 시료는 25.97로써 훨씬 높은 격임강도의 균일성을 보였다. 또한 CeO₂를 첨가한 시료의 특성격임강도는 1065 kg/cm²로써 무첨가시료의 720 kg/cm²보다 약 15배로 증가하였다. 따라서 CeO₂을 0.2 wt% 첨가한 시료의 격임강도가 우수한 것은 전술한 바와 같이 소결체의 입경이 작고, 균일하였기 때문이라 사료된다.

3.4. 압전트랜스의 출력특성

기본적이고 가장 많이 연구된 Rosen형²⁰⁾ 압전세라믹트랜스의 구조는 입력부인 두께방향과 출력부인 길이방향에 각각 분극처리를 한 것이다. 입력부에 길이방향의 L에 해당하는 고유 공진주파수의 입력전압을 인가하면 전왜효과에 의해서 길이방향에 강한 기계적 진동이 일어나고, 이것에 의해서 출력부에는 압전효과로서 전하가 발생하여 교류의 고전압이 얻어진다. 압전세라믹트랜스의 진동형태는 기본공진 및 전파장공진이 있는데, 송압비가 높고 특성이 양호한 전파장공진¹⁹⁾에 대하여 기술하였다. Fig. 7은 압전세라믹트랜스의 구조와 정류회로를 포함한 측정회로이다. RL은 출력단의 부하저항이고, CL은 콘덴서이다. 시편의 크기는 32×6×1 mm³이고, 실험실형편상 분극처리진계는 20 kV/cm로 하였다. 입력전압은 실효값이고, 출력전압은 2배압 정류회로를 통하여 부하저항에 가해지는 직류의 전압값이다.

압전세라믹트랜스의 가장 중요한 특성은 출력전압이 입력측의 구동주파수 의존성이다. Fig. 8은 CeO₂가 0.2 wt% 첨가한 시료에 대하여 부하저항에 따른 출력전압의 주파수 의존성을 나타낸 것이다. 최대출력전압은 공진주파수에서 나타나고, 부하저항이 증가함에 따라 최대 출력전압은 급격히 증가하였다. 이러한 결과는 다른 연구자의 결과와 일치하였다²¹⁾. 또한 부하저항이 증가함에 따라 완만한 공진특성에서 예리한 공진특성을 나타내었고, 그 때의 공진주파수도 부하저항의 증가에 따라 증가함을 보였다. 이러한 현상은 압전세라믹트랜스의 탄성진동에 기인한다⁵⁾. 그림에서와 같이 압전트랜스의 최

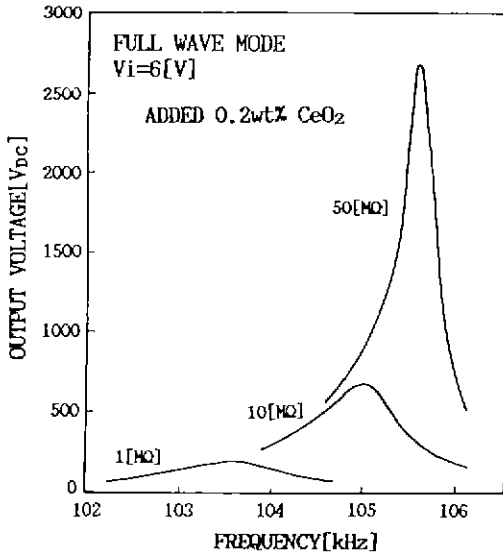


Fig. 8. Frequency dependence of output voltage as a function of road resistor.

대출력전압은 구동주파수의 의존성이 크고, 부하저항에 따라 공진주파수가 변화하므로 압전트랜스용 구동회로는 출력측의 전압을 피드백 시켜서 공진주파수를 안정화시킨 발진기가 필요하다.

Fig. 9는 입력전압에 대한 출력전압을 나타낸 것이다. 여기서 최대출력전압은 공진주파수를 가변시켜 얻은 수치이다. 부하저항이 100 M·ohm일 때 선형영역에서 CeO₂을 0.2 wt% 첨가한 시료의 승압비는 약 950을 나타내었고, 무첨가시료는 약 700을 나타내었다. 이러한 승압비의 차이는 전술한 바와 같이 기계적품질계수의 차이 때문이다. 한편 그림에서 입력전압이 증가함에 따라 출력전압의 증가율이 감소되었고, 부하저항이 작아지면 그러한 경향도 적었다. 입력전압에 비례적으로 출력전압이 증가하지 않는 이유는 다음과 같다. Nakamura²⁰⁾ 등은 세라믹스와 같이 분극처리를 하지 않아도 자발분극이 일정한 방향으로 배열되어 있는 LiNbO₃의 단결정을 가지고 압전트랜스를 제작한 결과, 단결정에서는 기계적품질계수의 저하가 적기 때문에 입력전압에 대한 출력전압의 저하가 거의 없음을 보고하였다. 그러나 Belding²¹⁾은 PZT 시료에 고전계를 인가하면 시료가 고전계의 스트레스를 받아 기계적 품질계수가 감소함을 보고하였다. 그러므로 압전세라믹스계 트랜스에서 나타나는 입력전압에 대한 승압비의 감소현상은 출력부에 유기되는 높은 전압에 의해서 탄성적 진동손실이 증가되고, 이로 인한 온도상승이나 탄성적 응력에 의해서 기계적

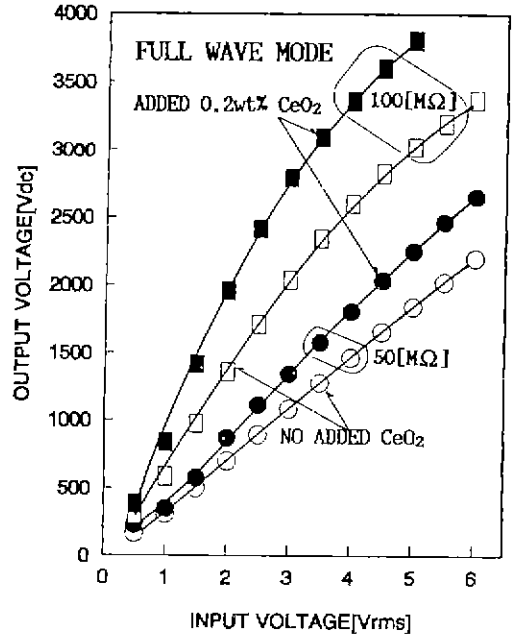


Fig. 9. Output voltage (DC) vs. Input voltage.

품질계수가 저하하기 때문이라 사료된다. 그리고 본 실험에서 제작한 Pb(Mg, Te, Mn, Nb)O₃-PZT계 압전세라믹트랜스는 Li⁹⁾ 등이 제작한 Pb(Sr, Mn, Sb)O₃-PZT계나 Knang²⁾ 등이 제작한 Pb(Mg, Nb)O₃-Pb(Mn, Nb)O₃-PZT계 압전세라믹트랜스보다 치수가 작음에도 불구하고 비교적 높은 승압비를 나타내었다.

4. 결 론

0.1 Pb(Mg, Te, Mn, Nb)O₃-0.9PZT계 세라믹스에 CeO₂ 0.2 wt%을 첨가함으로써 물리적 성질과 압전트랜스의 승압비가 향상되었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 시료의 밀도는 증가하였고(7.9 g/cm³), 입자의 크기가 작고(2 μm) 균일하였기 때문에 꺾임강도는 1.5배로 증가하였다(1065 kg/cm²).

2) 유전율은 감소하였고, 이로 인하여 기계적품질계수(2500)는 증가하였으며, 압전상수의 저하는 매우 적었다(k₃₁=0.32).

3) 항전계가 증가하였고, 2000 kg/cm²의 높은 압력을 가하였음에도 불구하고 압력인가횟수에 대한 압전상수의 저하가 거의 없었다. 따라서 전기적-기계적 열화가 적으므로 압전트랜스용 재료에 적합하다.

4) 압전트랜스의 승압비(V_d/V_{rms}; 2배압 정류, 부하저

항이 100 M·ohm)는 약 950의 비교적 높은 값을 보였다.

감사의 글

이 논문은 1992년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대 학술성)과제 학술연구조성비에 의하여 연구된 것으로, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. 電子材料工業會, "壓電セラミックスと その 應用," 電波新聞社, 159-175 (1974).
2. A.X. Kngang, L.Y. Chai, G.H. Hu, S.N. Pan and T.S. Zhou, "Piezoelectric Ceramic Transformer High Voltage Power Supply," IEEE, Int. Symp. Appl. *Ferroelectric*, **6th**, 689-692 (1986).
3. C.A. Rosen, "Ceramic Transformer and Filters," Proc. Electronic Comp Symp., 205-211 (1956).
4. P.A. Van Berkum, J.C. Sinclair and K. Raney, "High Voltage Ceramic Transformers," *IRE Trans.*, **BTR-81**, 22-35 (1962).
5. 要 祐一, 伊勢悠紀彦, "壓電セラミックストランス用素子の一考察," 日本音響學會誌, **32(8)**, 470-479 (1976).
6. N. Ichinose and H. Egami, "高安定新壓電材料," セラミックス, **6(10)**, 841-845 (1971).
7. 電子材料工業會, "壓電セラミックスとその應用," 電波新聞社, 113-116 (1974).
8. G. Bayer, "New Perovskite Type Compounds A₂BTeO₆," *J. Amer. Ceram. Soc.*, **46(12)**, 604-605 (1963).
9. Li Long Tu, Yao Yi Jin and Mu Zhen Han, "Piezoelectric Ceramic Transformer," *Ferroelectrics*, **28**, 403-406 (1980).
10. David W. Richerson, "Mordern Ceramic Engineering," Dekker, New York, 86-87 (1982).
11. 김문일, 박정현, 강대석, 문성환, "CeO₂ 안정화 정방정 Zirconia 다결정체 (Ce-TZP)에 관한 연구(I)," 한국요업학회지, **26(5)**, 719-727 (1989).
12. S.T. Chung, K. Nagata and H. Igarashi, "Piezoelectric and Dielectric Properties of PNN-PZN-PZ-PT System Ceramics," *Ferroelectrics*, **94**, 243-247 (1989).
13. 정수태, 조상희, 이우일, "PZT-PNN-PZN계 세라믹스의 물리적 성질," 한국요업학회지, **29(3)**, 183-188 (1992).
14. T. Yamamoto, H. Igarashi and K. Okazaki, "Dielectric, Electromechanical, Optical and Mechanical Properties of Lanthanum-Modified Lead Titanate Ceramics," *J. Amer. Ceram. Soc.*, **66(5)**, 363-366 (1983).
15. K. Okazaki and K. Nagata, "Effect of Grain Size and Porosity on Electrical and Optical Properties of PLZT Ceramics," *J. Amer. Ceram. Soc.*, **56**, 82-86 (1973).
16. 小西郎弘, 辻 俊郎, "エレクトロセラミックス의 基礎と 應用," 오ム社, 日本, 東京, 143 (1986).
17. J.B. Koeneman, "Low-Field Depoling Characteristics of Pb(Zr, Ti)O₃ Ceramics," *J. Amer. Ceram. Soc.*, **59(9-10)**, 396-398 (1976).
18. Helmut H.A. Krueger, "Stress Sensitivity of Piezoelectric Ceramics: Part 1 Sensitivity to Compressive Stress Parallel to the Polar Axis," *J. Acoust. Soc. Am* **42(3)**, 636-645 (1967), "Part 3. Sensitivity to Compressive Stress Perpendicular to the Polar Axis," *ibid*, **43(3)**, 583-591 (1968).
19. 和田利彦, 萩原述史, 三枝武隆, "磁器變壓器의 基礎特性의 三領域表現法と ひずみ波驅動," 電氣學會論文誌 A, **104(4)**, 7-14 (1984).
20. 中村篤良, 安達義徳, "LiNbO₃ 單結晶を用いた 壓電トランス," US 90-38, 15-19 (1991).
21. J.H. Belding and M.G. Mc Laren, "Behavior of Modified Lead Zirconate-Lead Titanate Piezoelectric Ceramics under High Electric Fields," *Ceram. Bull.*, **49(12)**, 1025-1029 (1970).