

압전 세라믹스의 저온 소결

글 _ 안철우, 남산 || 고려대학교 재료공학과
snahm@korea.ac.kr

1. 서 론

1880년 프랑스의 Pierre와 Jacques Curie 형제가 전기 석에 응력을 가하였을 때 표면에 전하가 발생하는 압전 현상을 최초로 발견하였고, 압전 재료에 대한 본격적인 연구는 1947년 미국의 Roberts가 고전압으로 분극 처리된 BaTiO₃ 세라믹스에서 압전효과를 발견하면서 본격적으로 시작 되었다. 특히 1954년 Jaffe가 T_c가 300°C 이상으로 높고, BaTiO₃ 보다 월등히 우수한 압전성을 가지는 Pb(Zr,Ti)O₃ (PZT) 세라믹스를 개발하면서 압전 세라믹스의 산업에의 응용은 비약적으로 증가하였다.

압전재료는 초기에는 주로 어군탐지기의 초음파 진동자에 이용되었고 나아가 pick-up용 진동자, 스피커, 압전 착화소자, Mechanical Filter 등에 응용 되었다. 압전재료의 응용제품은 민생용 전기제품이나 통신기기 등과 같은 전자산업의 발전에 크게 공헌하게 되었다. 최근에는 전자산업이 급속히 발전함에 따라, 경박/단소형의 쾌적성, 편리성, 에너지 절약화 등과 같은 사회적 요구에 대응하기 위해서 자동제어기술이 중요하게 되었고, 그로 인해

센서, 액츄에이터, 모터와 같은 압전제품의 이용이 급등하였다. 현재는 MEMS(Micro Electro-Mechanical System) 기술과 함께 마이크론 크기의 액츄에이터 및 센서 등의 제작이 가능해지고 있고, 또한 전기/기계 에너지에서 기계/전기 에너지로의 변환을 이용하는 단방향의 압전 세라믹스와 함께 두 가지 변환을 동시에 이용해 새로운 기능을 보이는 쌍방향성 제 2세대 압전 세라믹스가 개발되어 이에 따른 활용범위도 확대되고 있다. 압전 세라믹스가 이용되는 다양한 분야를 Table 1에 나타내었다.

이와 같이 여러 분야에 사용되고 있는 압전재료의 특성을 나타내는 상수는 기계적품질계수(Q_m), 전기기계 결합계수(k), 압전변형계수(d), 전압출력계수(g), 압전응력계수(e), 전압응력계수(h), 유전율(ε), 유전손실(tanδ), 온도특성, 주파수 정수, 탄성계수, poisson ratio, 밀도(ρ), Curie 온도(T_c) 등이 있다. 그 중에서 기본적으로 압전 특성의 평가를 위해 가장 널리 이용되는 상수는 d, k, 그리고 Q_m 세가지이다. Table 2에 이 상수들과 상수 값에 따른 응용 가능한 소자들을 나타내었다.

Table 2에서 알 수 있듯이, 압전 소자는 각각 그 특성

Table 1. 압전 세라믹스의 응용 분야 및 응용제품

구 분	응용 소자 및 제품
통신기기	레조네이터, 필터, 디스크리미네이터, 압전스피커, delay line, 광가변필터용 미세변위기 등
의료기기	초음파진단용 탐촉자, 초음파 혈류계, 초음파 시척기 등
센서기기	가속도센서, 충격센서, 압력센서, knock 센서, 자동차용 거리센서 등
전자기기	오디오용 필터, 초음파 가습기, 안정기(ballast), buzzer 등
정밀제측기기	압전 마이크로미터, straingage, positioner 등
디스플레이	LCD backlight용 트랜스포머, 비디오 자동초점용 압전모터, 비디오-카메라용 떨림 방지용 actuator (vibration suppressor) 등
군수용	military vehicle, space structure 등
actuator	광간섭 AC dilatometer, 가변형 mirror, 가변광회절격자, 현미경용 stage, 절삭오차보정용 device, 유공압제어용 serve valve, VIR head, printer head, ultrasonic knife, 압전 pump 등

Table 2. 압전 특성과 응용 소자의 관계

구 분		High d ($\geq 300\text{pC/N}$)	Middle d ($\geq 100\text{pC/N}$)	Low d ($\leq 100\text{pC/N}$)
High Q_m (≥ 1300)	High k (≥ 0.6)	Transformer Ultrasonic motor	Ultrasonic humidifier, Filter Transducer Resonator	
	Middle k (≥ 0.3)	Transformer Ultrasonic motor	Resonator	Ultrasonic sensor Knock sensor
	Low k (≤ 0.3)		Resonator	
Middle Q_m (≥ 400)	High k	Actuator	Ladder filter	
	Middle k	TV VCO용 resonator	Ultrasonic cleaner Actuator for high power	
	Low k			Fisher finders Sonar sensors
Low Q_m (≤ 400)	High k	Buzzer, speaker Actuator (multi-layer type)	Ultrasonic delay lines	
	Middle k	Actuator		
	Low k			

값에 따라 사용 분야가 여러 가지로 구분되지만, 압전 재료는 일반적으로 기계적 품질계수(Q_m)가 크고 압전계수(d_{33} 등)가 작은 hard 계열재료와 Q_m 이 작고 d_{33} 및 유전율이 큰 soft 계열의 재료로 나눌 수 있다.

PZT 세라믹스는 그 뛰어난 압전 특성으로 인해 가장 광범위하게 사용되고 있다. 하지만 휘발성 공해물질인 PbO를 함유하고 있어 여러 가지 환경문제를 유발한다. 그러므로 최근에는 PZT를 대체할 수 있는 Non-Pb계 압전 세라믹스 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이와 더불어 PZT의 인체 및 환경에 대한 유해성을 줄일 수 있는 세라믹스 공정 개선도 많이 연구되고 있다. 세라믹스 공정 개선의 대표적인 방법은 PZT 세라믹스의 저온 소성이며, 또한 적층형 압전부품을 만들기 위해서도 압전세라믹의 저온소결이 이루어져야 한다. 뿐만 아니라 소결 온도를 낮춤으로써 제품의 제조단가가 절감되는 장점도 있어 저온 소결에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 본고에서는 대표적인 압전재료인 PZT 세라믹스의 soft 계열과 hard 계열의 지금까지 알려진 저온 소결방법에 대해 소개하고자 한다.

2. 압전 세라믹스의 저온 소결

2.1 저온 소결의 필요성 및 여러 가지 저온 소결

압전 시장이 성장을 거듭하면서 하이파워용 압전 소자

를 비롯한 대부분의 압전 세라믹스의 소형화가 요구되고 있고, 이로 인하여 압전 및 유전 특성이 우수한 적층형 압전 소자가 필요하게 되었다. 기본적으로 압전체의 압전 및 유전 특성은 조성과 결정구조에 의해 좌우되며, 현재 사용되고 있는 압전 세라믹스는 morphotropic phase boundary (MPB) 근처의 조성이 대부분이다. 적층형 압전 소자는 적층 시 전극과 함께 동시 소성되는 세라믹스가 높은 소결성과 우수한 압전 특성을 보여야 한다. 일반적으로 전극으로는 전도성이 좋은 Ag나 Cu를 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 PZT 계열의 압전 세라믹스는 소결온도가 1200°C 정도로 높아서, 용융점이 961°C인 Ag 또는 1050°C 정도인 Cu 전극을 사용할 경우 소결 도중에 전극이 녹아버린다. 이와 같은 이유로 Pd가 매우 고가임에도 불구하고 용융점이 높은 Ag/Pd 합금이 전극으로 사용된다. 따라서 압전 세라믹스를 900°C 이하의 저온에서 소결을 하면 전극으로 Ag 또는 Cu를 사용하게 되므로, 제작 단가를 월등히 낮출 수 있다. 나아가 압전 세라믹스를 저온에서 소결하게 되면 PbO의 휘발이 고온 소결에 비해 월등히 감소하여, PZT 세라믹스의 인체 및 환경에 대한 유해성을 줄일 수 있고 나아가 조성 조절도 용이하다.

과거 PZT 세라믹스의 저온 소결을 위하여 여러 가지 방법이 이용되었다. 가장 대표적인 방법은 첨가제의 첨가이다. 이러한 첨가제의 첨가는 고상 소결성을 향상시

Table 3. Soft Material의 저온 소결 연구 동향

구분	조성	소결온도(°C)	압전/유전 특성	계재지(년도)
Soft Material	0.875PZT-0.125PMN + 0.2wt%4PbO · B ₂ O ₃	1150	k _p =0.67, Q _m =88, ε ₃ ^T /ε ₀ =1640	JJAP (1993) ref.(8)
	PbZn _{1/3} Sb _{2/3} O ₃ -PbNi _{1/2} Te _{1/2} O ₃ -PbZrO ₃ -PbTiO ₃ +(0.38mol%Li ₂ CO ₃ -0.12mol%Bi ₂ O ₃ -0.50mol%CdCO ₃)	980	k _p =0.719, d ₃₁ =288, Q _m =58, ε ₃ ^T /ε ₀ =3428	JJAP (2000) ref.(9)
	PZT-PNN (NiO or PbO · NiO excess)	900	k _p =0.66	JJAP (2000) ref.(10)
	0.6PZT-0.4PZN	880	k _p =0.6, d ₃₃ =460pC/N, ε ₃ ^T /ε ₀ =1780	JACS (2004) ref.(11)
	0.59PZT-0.41PNN+3mol%ZnO	950	k _p =0.53, d ₃₃ =525pC/N, Q _m =60, ε ₃ ^T /ε ₀ =3400	JJAP (2003) ref.(12)
	0.59PZT-0.41PNN+3mol%ZnO+x mol%CuO	900 850	k _p =0.55, d ₃₃ =575pC/N, ε ₃ ^T /ε ₀ =3900 k _p =0.5, d ₃₃ =463pC/N, ε ₃ ^T /ε ₀ =3300	JJAP (2004) ref.(13)

키기 위한 것과 액상 소결을 위해 낮은 melting point를 가지는 oxide와 compound를 첨가하는 것으로^{1,4)} 나누어진다. 그 외에 다른 방법으로는 hot-pressing으로⁵⁾ 비활성 분위기에서 소결하는 방법과 fine starting powder를 사용하는 방법^{6,7)} 그리고 organic reagent의 분산에 의한 방법 등이 있으나 이러한 방법들은 그 공정비용이 고가이며 노동 집약적이고 특수한 공정으로 일반적인 고상소결 세라믹 공정에 비해 그 효율가치가 매우 떨어진다. 따라서 일반적으로 가장 많이 쓰이는 방법은 첨가제를 이용한 방법이다. 첨가제의 첨가 중에서도 고상 소결을 원활하게 하기위하여 이용하는 첨가제의 경우, 압전 특성의 감소가 적은 장점이 있지만 소결온도를 낮추는데 한계를 보이고 있다. 그러므로 가장 유력한 방법은 melting point가 낮은 oxide나 compound를 이용하여 900°C 보다 조금 낮은 온도에서 액상 소결을 유도하는 방법이다. 그러나 이러한 액상 소결은 소결 온도를 낮추는 데에는 장점이 있지만, 일반적으로 압전특성이 현저하게 저하되는 단점이 있으므로, 압전 특성의 저하를 최소화하는 첨가제를 찾는 것이 대단히 중요하다.

2.2 Soft material의 저온 소결

Soft material은 압전 계수(d₃₃ 등) 및 유전상수가 높은 재료로서 Table 2에서 알 수 있듯이, actuator, buzzer 또는 speaker와 같이 고 변위를 필요로 하는 곳에 주로 사용된다. 압전 재료에서 높은 압전 계수를 얻기 위해서는 MPB 근처의 조성이면서 자체의 압전 계수가 높은 soft

재료에 donor를 첨가하는 것이 가장 일반적인 방법이다. 하지만 저온 소결의 경우 이러한 softening effect 보다는 낮은 소결온도에서 높은 소결성을 보이고 k_p와 압전 계수의 저하가 적은 첨가제를 선택하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이러한 이유로 낮은 melting point를 가지는 여러 가지 산화물이 첨가제로 이용되어 왔으며, 그 종류와 이용된 압전체 조성을 Table 3에 나타내었다.

Table 3에 나타낸 바와 같이 PZT-PMN의 경우 첨가제로 PbO-B₂O₃가 알려져 있다. SEM 분석에 의하면 glassy phase가 grain boundary에 석출되며 PbO-B₂O₃의 양이 증가함에 따라 glassy phase의 양도 증가하는 것을 발견하였다. 그리고 glassy phase에 의해 액상 소결이 일어나며 이로 인하여 소결 온도를 1310°C에서 1150°C로 낮출 수 있다고 알려져 있다. 특히 0.2wt%의 PbO-B₂O₃를 첨가하였을 때, k_p=0.67, Q_m=88, ε₃^T/ε₀=1640의 높은 압전 및 유전 특성을 보인다고 알려져 있으나, 압전계수의 크기는 발표되지 않았고, 소결온도가 1150°C로 다소 높다.⁸⁾

PZT-PZS-PNS 세라믹스의 소결온도를 낮추기 위해서는 Li₂O-Bi₂O₃-CdO가 첨가제로 사용되었다. Li₂O-Bi₂O₃-CdO를 첨가 할 경우 PZT-PZS-PNS 세라믹스가 980°C에서 소결되었고, k_p=0.719, d₃₁=288, Q_m=58, ε₃^T/ε₀=3428의 높은 압전 및 유전 특성을 보였다. 또한 Fig. 1과 같이 미세구조를 SEM으로 분석하여 액상을 발견하였고(화살표 참조), 낮은 온도에서 소결이 잘 일어나는 이유를 액상소결에 의한 것으로 발표하였다. 그러나 Li₂O-Bi₂O₃-CdO 소결조제는 대표적인 발암물질인 CdO를 포함하고

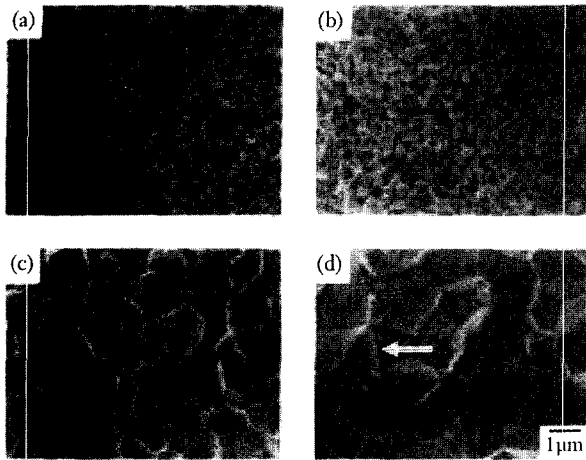


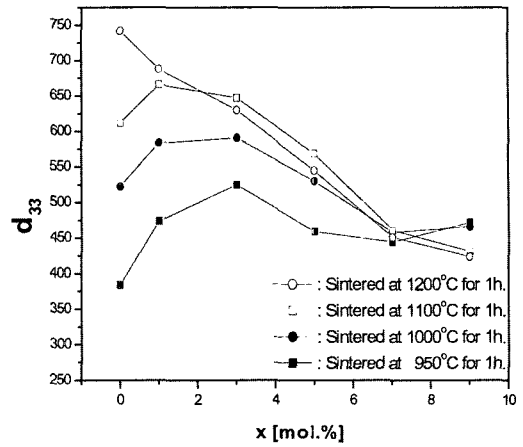
Fig. 1. 980°C에서 소결된 PZT-PZS-PNS + Li₂O-Bi₂O₃-CdO 세라믹스의 소결 시간에 따른 SEM images: (a) 2분, (b) 10분, (c) 30분, (d) 60분.

있어서 실제 생산에 적용하기에는 어려움이 있다.⁹⁾

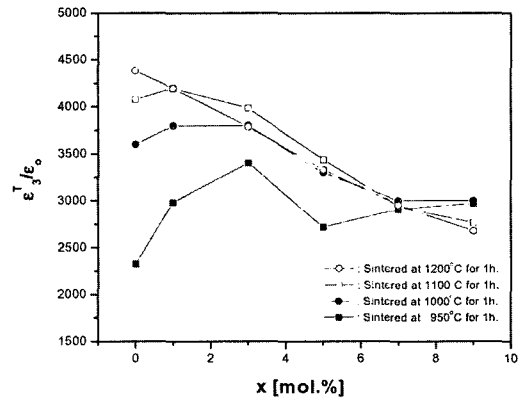
PZT-PNN 세라믹스의 경우는 첨가제를 첨가하지 않고 소량의 여분의 NiO 또는 PbO · NiO를 첨가하여 소결온도를 800°C까지 낮출 수 있으며, 900°C에서 0.66의 높은 k_p 값을 얻을 수 있다고 보고되었다. 그러나 소결 메카니즘에 대해서는 자세히 알려지지 않았고, k_p 이외의 압전 및 유전 특성에 대해서도 보고된 바가 없어서 현재는 NiO 및 PbO · NiO 저온소결 효과가 자세히 알려지지 않고 있다.¹⁰⁾

PZT-PZN 세라믹스는 PZN의 비율이 40% 이상일 경우 첨가제를 사용하지 않고 880°C까지 그 소결 온도를 낮출 수 있으며 0.6PZT-0.4PZN의 조성에서 $k_p=0.6$, $d_{33}=460\text{pC/N}$, $\epsilon_3^T/\epsilon_0=1780$ 의 높은 압전 및 유전 특성을 얻을 수 있다고 발표되었고, PZT-PZN 세라믹스 자체가 저온 소결이 가능한 재료로 알려져 있다.¹¹⁾

PZT-PNN 세라믹스의 경우 CuO와 ZnO를 첨가하면 소결 온도를 850°C까지 낮출 수 있다고 발표되었다. 이 조성에서 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 ZnO는 높은 소결 온도에서는 hardening effect를 보이지만 낮은 소결 온도(950°C)에서는 급격한 밀도의 증가로(Fig. 3) 인해 압전 및 유전 특성을 향상시키는 첨가제로 발표되었다. 소결성의 증가는 Zn 이온의 B site 치환으로 인해 발생하는 산소 공공의 증가에 의해 확산이 용이해져서 소결성이 증



(a)



(b)

Fig. 2. PZT-PNN + x mol% ZnO의 소결 온도에 따른 압전 계수(d_{33})와 유전율의 변화: (a) d_{33} , (b) 유전율.

가한다고 알려져 있다. 또 다른 첨가제인 CuO의 경우 PbO-CuO에 의해 형성되는 액상으로(Fig. 4) 인한 액상 소결에 의해 저온소결이 일어나는 것으로 밝혀졌다. 결론적으로, 두 첨가제가 모두 첨가되었을 경우에 PbO - CuO에 의해 형성되는 액상으로 인한 소결성의 증가와 Zn 이온의 B site 치환으로 인해 발생하는 산소 공공에 의한 소결성의 증가로 낮은 소결 온도에서의 높은 밀도를 갖는 압전체가 만들어지고 900°C에서 소결한 경우 $k_p=0.55$, $d_{33}=575\text{pC/N}$, $\epsilon_3^T/\epsilon_0=3900$ 의 대단히 높은 압전 및 유전 특성을 얻어진다고 보고 되었다.^{12,3)}

이와 같이 현재까지 발표된 soft 계열의 압전 세라믹스의 소결에 대한 여러 가지 연구 결과를 살펴보면, PZT

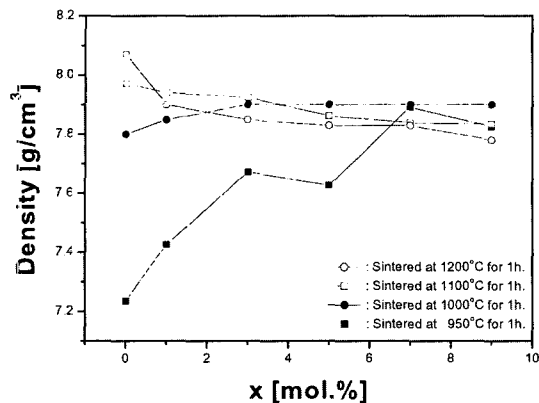


Fig. 3. PZT-PNN + x mol% ZnO의 소결 온도에 따른 밀도의 변화.



Fig. 4. 900°C에서 소결된 PZT-PNN + 3mol%ZnO+2mol%CuO의 TEM bright field image.

계열의 압전 세라믹스는 CuO와 ZnO가 가장 유력한 첨가제이다. 또한 액상 소결과 함께 A 혹은 B site의 치환이나 nonstoichiometry를 통한 lattice diffusion의 증가를 동시에 이용하는 것이 좋은 저온 소결 방법 중에 하나인 것으로 판단된다.

2.3 Hard material의 저온 소결

Hard material은 Q_m 이 높은 재료로서 Table 2에서 알 수 있듯이, transformer, ultrasonic motor, transducer 등에 사용되며, 특히 transformer나 ultrasonic motor 같은 응용에는 high Q_m 뿐만 아니라 높은 d_{33} 까지 동시에 요구된다. 압전 재료에서 Q_m , k_p 등의 압전 특성을 얻기 위해서는 MPB 근처의 조성에서 acceptor를 첨가하는 것이 가장

일반적인 방법이다. 하지만 저온 소결의 경우 hardening effect 뿐만 아니라 soft 압전체의 저온 소결과 마찬가지로 낮은 소결온도에서 높은 소결성을 보이고 압전 특성의 저하를 최소화하는 첨가제를 이용하는 것이 바람직하다. 이러한 이유로 낮은 melting point를 가지면서 hardening effect도 보이는 여러 가지 산화물이 첨가제로 사용되어 왔으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 PZT의 저온소결을 위한 첨가제로 $Li_2O+Na_2O+Bi_2O_3$ (또는 V_2O_5)가 사용되었다. 그러나 압전 및 유전 특성이 $k_p = 0.55$, $Q_m = 548$, $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 803$ 으로 다소 낮고, 소결 온도 또한 1070°C로 높다.4 그에 비해 $MnO_2 + B_2O_3 + Bi_2O_3 + CdO$ 의 경우는 소결 온도도 960°C로 낮고 압전 및 유전 특성도 $k_p = 0.58$, $d_{33} = 250$, $Q_m = 1000$, $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 1100$ 로 대단히 높다. 이 첨가제를 PZT에 첨가하면 액상 소결이 발생하여 낮은 온도에서도 소결성이 증가 한다고 알려져 있다. PZT-PNN 세라믹스에는 $MnO_2 + SiO_2 + Pb_3O_4 + CdO$ 를 첨가하면 액상이 형성되어 900°C에서 소결이 가능해지고, $k_p=0.61$, $d_{33}=400pC/N$, $Q_m=1000$, $\epsilon_3^T/\epsilon_0=2020$ 의 높은 압전 및 유전 특성을 보였고, 860°C에서도 $k_p=0.58$, $d_{33}=330pC/N$, $Q_m=1000$, $\epsilon_3^T/\epsilon_0=1600$ 의 뛰어난 압전 및 유전 특성을 보였다. 그러나 이 첨가제 역시 대표적 발암물질인 CdO를 포함하고 있어서 실제로 생산에 적용하는데 문제가 있다.³⁾

CdO를 포함하지 않은 저온 소결 조성인 PZT + $MnO_2 + Ba(Cu_{0.5}W_{0.5})O_3 + BiFeO_3$ 의 경우, 소결 온도를 935°C까지 낮추는 데는 성공하였으나, 압전 및 유전 특성이 $k_p = 0.41$, $d_{33} = 201$, $Q_m = 670$, $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 847$ 로 비교적 낮았다. 이 첨가제가 저온소결의 가능하게 하는 이유도 액상 소결에 의한 것으로, 액상은 PbO-CuO을 포함하고 있다고 알려져 있다.⁸⁾

한편 soft 특성을 가지는 PZT-PZN 세라믹스에 MnO_2 를 첨가하면 Q_m 이 증가하여 hard 특성을 가지게 되며, 동시에 저온 소성을 가능하게 한다. 하지만 PZT-PZN + MnO_2 자체는 소결온도가 1050°C로 다소 높다고 알려져 있다.¹⁴⁾

이와 같이 hard material의 저온 소결은 그 소결온도가

Table 4. Hard Material의 저온 소결 연구 동향

구분	조 성	소결온도(°C)	압전/유전 특성	게재지(년도)
Hard Material	PZT+0.5wt%MnO ₂ +0.5wt%Li ₂ O+ C.A. Bi ₂ O ₃	1070	k _p =0.55, Q _m =548, ε ₃₃ ^T /ε ₀ =803	J. of Mater. Science (1986) ref.(4)
	PZT+0.1~0.4wt%MnO ₂ +(B ₂ O ₃ +Bi ₂ O ₃ +CdO)	960	k _p =0.58, d ₃₃ =250, Q _m = 1000, ε ₃₃ ^T /ε ₀ = 1100	JACS (1989) ref.(3)
	Pb _{1-x} Cd _x (Ni _{1/3} Nb _{2/3}) ₂ Zr ₂ Ti _w O ₃ + g ₁ wt%MnO ₂ + g ₂ wt%SiO ₂ + 1wt%Pb ₃ O ₄	900	k _p = 0.61, d ₃₃ =400pC/N, Q _m = 1000, ε ₃₃ ^T /ε ₀ =2020	
		860	k _p = 0.58, d ₃₃ =330pC/N, Q _m = 1000, ε ₃₃ ^T /ε ₀ =1600	
	0.92(PZT+0.5wt%MnO ₂)+0.05Ba(Cu _{0.5} W _{0.5})O ₃ +0.03BiFeO ₃	935	k _p = 0.41, d ₃₃ = 201, Q _m = 670, ε ₃₃ ^T /ε ₀ = 847	JACS (1998) ref.(8)
	0.8PZT-0.2PZN+0.5wt%MnO ₂	1050	k _p = 0.6, d ₃₃ = 280pC/N, Q _m =820	JACS (2004) ref.(14)
	0.8PZT-0.2PZN+1.0wt%MnO ₂		k _p =0.55, d ₃₃ =210pC/N, Q _m =1041	
0.875Pb(Zr _{0.5} Ti _{0.5})O ₃ -0.125Pb[(Zn _{0.8} Ni _{0.2}) _{1.5/3} Nb _{2/3}]O ₃ +0.5wt%MnO ₂ +0.2wt%CuO+0.3wt%Al ₂ O ₃	920	k _p =0.581, d ₃₃ =345pC/N, Q _m =809, ε ₃₃ ^T /ε ₀ =1345	JJAP (2005) ref.(15)	

Ag나 Cu를 전극으로 사용하기에는 다소 높은 온도이거나, 소결온도가 충분히 낮더라도 대표적인 발암 물질인 Cd을 포함하는 등 성공적인 연구 결과가 발표되지 않았었다. 그러나 Pb(Zr_{0.5}Ti_{0.5})O₃ - Pb[(Zn_{0.8} Ni_{0.2})_{1.5/3}Nb_{2/3}]O₃에 MnO₂, CuO, 나아가 Al₂O₃를 첨가한 경우 소결온도도 충분히 낮고, 그 압전 및 유전 특성이 충분히 높아 바로 응용이 가능하다는 결과가 최근에 발표 되었다. 특히 Pb(Zr_{0.5}Ti_{0.5})O₃ - Pb[(Zn_{0.8} Ni_{0.2})_{1.5/3}Nb_{2/3}]O₃ + MnO₂ + CuO + Al₂O₃ 세라믹스의 경우 acceptor인 MnO₂의 첨가로 Q_m 값이 증가하고, 항상 상전이 조성을 벗어나지 않도록 조성을 조절하여 높은 k_p를 유지하면서 균일한 미세구조와 높은 밀도를 보장하는 저온 소결용 첨가제를 첨가하면 우수한 압전 및 유전 특성을 얻을 수 있다고 보고하고 있다.¹⁵⁾

4. 결 론

압전 재료 기술은 통신기기, 의료기기, 센서기기, 전자기기, 정밀계측기기, 군수용, 디스플레이, actuator 등 여러 산업의 근간이 되는 기술로서 그 활용범위가 대단히 넓다. 국내 전자산업계는 반도체, 휴대 단말기 등 특정 분야에서 세계를 선도할 만한 수준의 경쟁력을 가지고 있다. 그러나 원천기술 및 융합기술의 확보 미흡으로 압전 세라믹스와 같은 부품 소재 산업분야에서 수입의존도

가 상당히 높은 것으로 알려져 있다. 미래 압전 산업에서는 우수한 압전 특성을 가지는 세라믹 신소재의 개발과 이를 활용하는 마이크로 센서, 액츄에이터, 트랜스듀서, 트랜스포머 등의 소자 개발이 더욱 가속화될 것이다. 또한 미래 압전 산업에서는 환경과 에너지, 자원과 연관되는 분야의 적용이 더욱 확대될 것이다. 이와 같은 시점에서 압전 세라믹스의 저온 소결은 현재 압전 소자의 환경·경제적 문제점을 해결할 수 있는 미래 지향적인 산업으로 그 전망이 매우 밝다. 따라서 이와 같은 기술·산업·시장 환경을 고려해볼 때, 압전 세라믹스 산업, 특히 저온 소결을 비롯한 세라믹스 신소재 개발 등 미래 지향적인 산업에 대한 중점적인 지원 및 기술 개발 환경 개선, 투자확대 등이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. P. G. Lucuta, FL. Constatinescu, and D. Brab: J. Am. Ceram. Soc. 68 533 (1985).
2. S. Takahashi: Jpn. J. Appl. Phys. 19 771 (1980).
3. G. Zhilun, L. Longtu, G. Suhua, and Z. Xiaowen: J. Am. Ceram. Soc. 72 486 (1989).
4. S. Y. Cheng, S. L. Fu, C. C. Wei and G. M. Ke: J. Mater. Sci. 21 571 (1986).
5. N. D. Patel and P.S. Nicholson: Am. Ceram. Soc. Bull. 65 783 (1986).
6. T. Yamamoto: Am. Ceram. Soc. Bull. 71 978 (1992).
7. R. Ral, N. M. Gokhale, R. Krishnan and P.



- Ramakrishnan: J. Mater. Sci. 24 2944 (1989).
8. L. Wu and C.-H. Wang: Jpn. J. Appl. Phys. 32 2757 (1993) .
 9. X. Wang, K. Murakami and S. Kaneko: Jpn. J. Appl. Phys. 39 5556 (2000).
 10. K. Shiratsuyu, etc: Jpn. J. Appl. Phys. 39 5609 (2000).
 11. S. B. Seo, S. H. Lee, C. B. Yoon, G. T. Park and H. E. Kim: J. Am. Ceram. Soc. 87 1238 (2004).
 12. C. W. Ahn, S. Y. Noh, S. Nahm, J. Ryu, K. Uchino, S. J. Yoon and J. S. Song : Jpn. J. Appl. Phys. 42 5676 (2003).
 13. C. W. Ahn, S. Nahm, J. Ryu, K. Uchino, S. Yoon, S. Jung and J. Song, Jpn. J. Appl. Phys. 43 205 (2004).
 14. Y. Hou, etc: J. Am. Ceram. Soc. 87 847 (2004).
 15. C. W. Ahn, H. C. Song, S. H. Park, S. Nahm, K. Uchino and S. Priya: Jpn. J. of Appl. Phys. (in press)

●● 안철우



- * 1997년 수원대학교 전자재료공학과 학사
- * 2002년 고려대학교 재료공학과 석사
- * 현재 고려대학교 재료공학과 박사과정

●● 남 산



- * 1983년 고려대학교 재료공학과 학사
- * 1984년 LG 반도체 사원
- * 1990년 University of Maryland 재료공학 박사
- * 1991년 ETRI 선임연구원
- * 1995년 계명대학교 재료공학과 전임강사
- * 1996년 고려대학교 재료공학과 조교수
- * 2000년 고려대학교 재료공학과 부교수