

## PZTN Sintered at the Low Temperature by the Glass Phase Transient Processing

金 燦 泳<sup>†</sup>  
(Chan Young Kim)

**Abstract** - This research was a fundamental study for the low temperature sintering of PZTN by glass phase transient processing. To lower the sintering temperature, the glass phase processing was used. Also to improve the electrical properties, the transient processing was utilized. After characterization, the various analytic techniques, such as Archimedes method for the measuring densification, x-ray diffraction patterns for the quantitative analysis of crystalline phases were utilized. Also the dielectric constant, dissipation factor, and piezoelectric coefficients were measured to evaluate the PZTN sintered at the 950°C and 1050°C. This was confirmed that the sintering temperature of PZTN was reduced by 950°C and the electrical properties were improved by the transition processing. Therefore, the glass phase transient processing can be applicable to low the sintering temperature with the dielectric and piezoelectric properties.

**Key Words** : Glass Ceramic Processing, Transient Processing, Low Temperature Sintering, Relative Dielectric Constant

### 1. 서 론

전자 세라믹 공정의 일반적인 소결온도는 약 1,200°C 이상으로 소결온도가 높기 때문에, 에너지 소비가 많고, 소결 중에 산화물이 휘발되어 환경문제를 발생시키며, 휘발에 의한 성분함량이 변화되어 전기적 특성에 영향을 미칠 수 있기 때문에 여분의 산화물을 넣는 불편함이 있으며, 특히 다층 세라믹 캐패시터 소자(MLCC)에는 고가의 전극재료를 사용하고 있다. 따라서 소결온도를 낮춤으로써 위에 열거한 단점들을 개선할 수 있기 때문에, 최근에 많은 연구가 진행되고 있다. 소결온도를 낮추기 위한 방법인, 용융점이 낮은 글래스를 넣는 방법[1-4], 산화물을 첨가하는 방법[5-8], 글래스-세라믹 파우더 공정[9-13], 졸겔법에 의한 방법[14,15], 핫 프레스 소결법[16], 양이온 대체 방법[17, 18] 등의 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 저온소결법은 소결온도가 낮아지는 반면에, 전기적인 특성도 함께 감소되기 때문에 소결온도를 낮추면서 전기적인 특성을 유지하는 것이 중요하다.

본 연구는 글래스 공정에 의한 저온소결방법을 이용하여 저온 소결용 재료를 개발하였다. 그리고 개발된 저온소결용 재료에 산화물을 첨가하여 소결시킴으로써 컴포지션이 천이(transformation)되는 공정을 활용하여 전기적 특성을 향상시켰다. 우선 각 공정에 맞는 컴포지션을 선정하고, 재료를 준비하여 샘플을 제작하였다. 저온소결에 의하여 제작된 샘플은 아르키메데스 방법으로 밀도를 측정하였고, x-선 회절

분석을 통하여 정성적으로 결정상을 관찰하였으며, 정방정(tetragonal)과 3방정(rhombohedral) 결정의 피크를 집중적으로 관찰하여 결정이 천이되는 과정을 관찰하였으며, 이것을 전기적 특성과 관련하여 분석하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 컴포지션 선정

저온소결용 글래스 천이공정을 위한 컴포지션들을 표 1에 나타냈다. SiO<sub>2</sub>는 글래스를 형성하기 위하여, 그리고 추가로 넣은 PbO는 저온소결 공정을 도와준다. 글래스 컴포지션 6은 급냉 후에 비정질을 유지하였고 열처리 후에도 샘플의 형태를 잘 유지하였기 때문에 선택하였다. 0.5 몰 퍼센트의 추가 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 컴포지션 6에 넣음으로써, 컴포지션 7을 만들었다. 일반적으로 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>는 PZT의 입자성장을 억제하고, 전기저항을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 또한 Zr<sup>4+</sup>와 Ti<sup>4+</sup>를 위한 Nb<sup>5+</sup> 도우너 도핑은 PZT의 구조를 전기적으로 완화하여 도메인벽의 움직임을 더욱 쉽게 함으로써, 유전특성을 향상시키기 때문에 이 실험에서 사용하였다.

컴포지션 8은 컴포지션 6과 같은 SiO<sub>2</sub>의 양을 유지하면서, 20 몰 퍼센트의 PZT를 적게 넣은 것이다. 이와 같이 적게 넣은 20 몰 퍼센트의 PZT를 보상하기 위하여 20 몰 퍼센트의 PbO를 추가로 넣었다. 따라서 컴포지션 8은 컴포지션 6의 일부 PZT를 PbO로 대체한 컴포지션이다. 컴포지션 9는 컴포지션 8에 0.5 몰 퍼센트의 추가 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 넣어 만들었다.

이 글래스 컴포지션들에 산화물 첨가제(TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, 그리고 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)를 넣어 그림 1과 같이 10개의 컴포지션을 만들어, 글래스 천이공정에 대하여 조사하였다.

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 友石大學 電氣電子工學科 助教授 · 工博

E-mail : kimcy@woosuk.ac.kr

接受日字 : 2004年 10月 20日

最終完了 : 2005年 1月 11日

표 1. 글래스 천이공정을 위하여 개발된 컴포지션(몰 퍼센트)

Table 1. Compositions developed for glass transition phase processing(mole %)

Comp.	글래스 컴포지션				산화물 첨가제		
	PZT*	PZTN*	PbO	SiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
6	60	-	13.3	26.7	-	-	-
6-TZ	60	-	13.3	26.7	6.9	6.4	-
7	-	60	13.3	26.7	-	-	-
7-Z	-	60	13.3	26.7	6.9	-	0.07
7-TZ	-	60	13.3	26.7	6.9	6.4	0.07
8	40	-	33.3	26.7	-	-	-
8-TZ	40	-	33.3	26.7	17.3	16.0	-
9	-	40	33.3	26.7	-	-	-
9-Z	-	40	33.3	26.7	17.3	-	0.17
9-TZ	-	40	33.3	26.7	17.3	16.0	0.17

PZT\* : Pb(Zr<sub>0.52</sub>Ti<sub>0.48</sub>)O<sub>3</sub>

PZTN\* : Pb(Zr<sub>0.52</sub>Ti<sub>0.48</sub>)O<sub>3</sub>-0.05Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

- : None

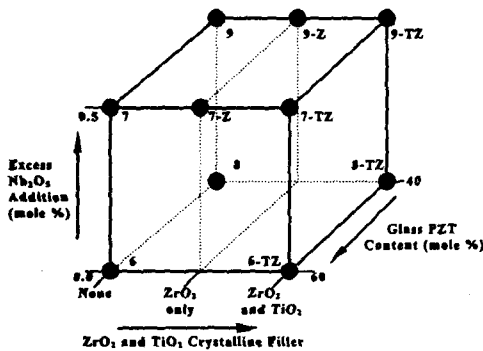


그림 1. 10종류의 컴포지션을 설명하는 다이어그램

Fig. 1. Diagram illustrating the ten compositions

### 2.2 실험방법

모든 컴포지션들은 Aldrich Chemical Company의 Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (99%), TiO<sub>2</sub>(99.9%), ZrO<sub>2</sub>(99%), 그리고 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(99.9%)를 사용하였다.

글래스 컴포지션을 10%의 로덤이 포함된 백금 도가니에 넣고, 1,480℃의 온도에 직접 넣어 40분 동안 용융하였다. 용융된 혼합물은 롤러로 급냉하여 글래스를 만들었다. 이 글래스는 polyethylene 병에 증류수, 지르코니아 볼과 함께 넣어, 24시간 동안 불밀하고 325 메쉬(45 μm)를 통과시켜 건조하여 글래스 분말을 준비하였다.

저온 소결용 글래스 천이공정은 그림 2와 같은 절차에 의하여 준비하였다. 준비된 글래스 컴포지션에 산화물 첨가제를 혼합하였다. 이 혼합물에 2 wt. %의 중량비의 바인더를 넣고 증류수와 함께 4시간 동안 습식 혼합을 하였다. 건조한 후에는 혼합된 파우더를 100 메쉬(150 μm)의 체에 통과시켜 균일한 파우더를 준비하였다. 파우더는 직경 10 mm, 두께는 1 ~ 2 mm의 디스크 타입으로 1,000 kg/cm<sup>2</sup> 압력으로

로 성형하였다. 바인더는 2℃/min. 의 승온속도로 500℃까지 상승시킨 후, 1시간 동안 유지시켜 바인더를 증발시켰다. 그리고 샘플들은 커버가 있는 알루미늄 도가니안의 백금판위에 올려놓아 열처리를 하였다. 또한 PbO의 증발을 감소시키기 위하여, 전기로 안에 PbO-ZrO<sub>2</sub> 파우더를 넣고, 다양한 조건으로 열처리를 하였다.

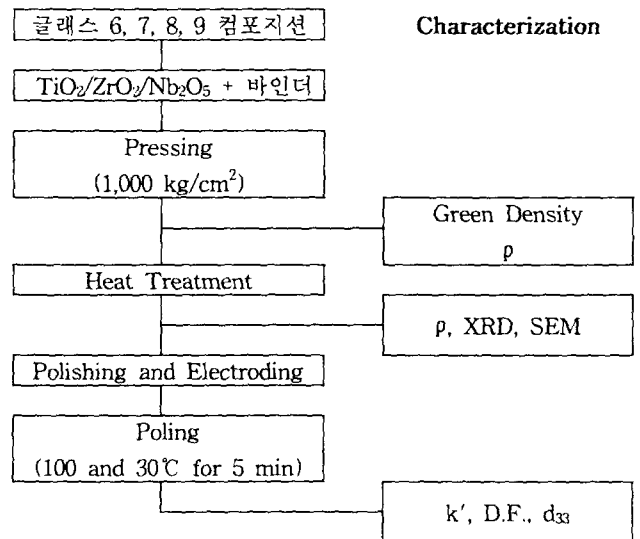


그림 2. 저온소결을 위한 글래스 천이공정

Fig. 2. Flow chart of the experimental procedure for the glass phase transition processing

### 3. 결과 및 고찰

글래스 천이공정에 대한 밀도, X-선 회절의 정성분석, 유전특성과 압전특성에 대하여 분석하였다.

#### 3.1 X-선 회절분석

그림 3은 PZT(PZTN)-PbO-SiO<sub>2</sub> 시스템의 컴포지션 6, 7, 8, 9에 대한 X-선 회절패턴이다. 물리로 급냉한 글래스 리본을 육안으로 관찰하였을 때 모두 투명하였지만, x-선 회절 패턴에는 작은 ZrO<sub>2</sub> 피크가 관찰되었다. 따라서 컴포지션에는 amorphous phase에 소량의 ZrO<sub>2</sub> 결정으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

#### 3.2 밀도

그림 4에는 컴포지션 6, 6-TZ, 7, T-TZ, 8, 8-TZ, 9, 9-TZ의 명목상 밀도 및 직경의 수축률을 나타냈다. 열처리 온도가 800℃ 이상에서 컴포지션 6과 7 그리고 컴포지션 8과 9 사이의 밀도차이가 비슷한 것으로 나타났고, 명목상 밀도는 거의 100 % 이다. 이들 컴포지션들은 글래스 파우더에 소량의 ZrO<sub>2</sub> 결정이 존재하더라도 조밀화가 잘 되었음을 의미한다. 또한 바인더를 태워 없애는 온도인 500℃에서도 약간의 조밀화가 진행된 것으로 나타났다. 이것은 샘플직경의 수축에서 알 수 있었다. 이 조밀화는 글래스 천이온도(≒ 450℃) 이상에서의 글래스의 연화(softening) 때문인 것으로 판단된다.

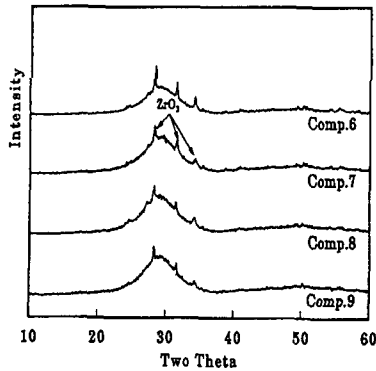


그림 3. 급냉 후의 컴포지션 6, 7, 8, 9의 x-선 회절 패턴  
 Fig. 3. X-ray diffraction patterns of compositions 6, 7, 8, 9 after quenching and grinding

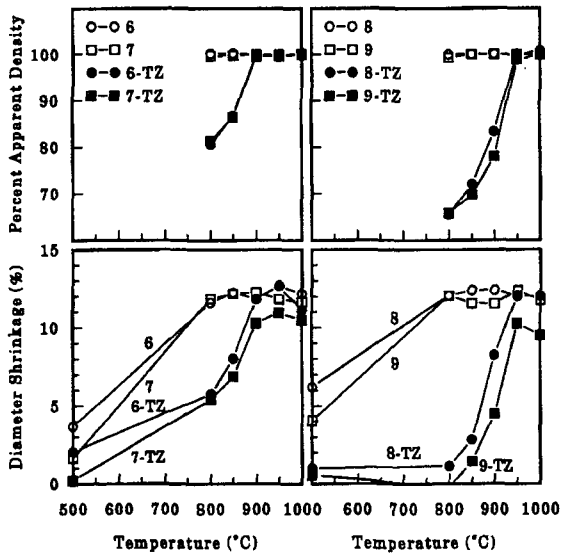


그림 4. 컴포지션 6, 6-TZ, 7, 7-TZ, 8, 8-TZ, 9, 9-TZ의 명목상 밀도 및 직경의 수축률  
 Fig. 4. Parent apparent density and diameter shrinkage of compositions 6, 6-TZ, 7, 7-TZ, 8, 8-TZ, 9, 9-TZ

컴포지션 6-TZ와 8-TZ는 컴포지션 6과 8에  $ZrO_2$ 와  $TiO_2$ 를 넣음으로써 만들었다. 또한 컴포지션 7-TZ와 9-TZ는 컴포지션 7과 9에 각각  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ , 그리고  $Nb_2O_5$ 를 넣어서 만든 것이다. 이 산화물 첨가제들은 그림 4에서처럼 글래스 파우더의 조밀화를 억제하였다.

컴포지션 6과 7은 컴포지션 8과 9보다 적은 양의  $PbO$ (13.3 mole %)를 함유하고 있기 때문에 컴포지션 6-TZ와 7-TZ에는 상대적으로 적은 양의 산화물 첨가제를 넣었다. 따라서 컴포지션 6-TZ와 7-TZ는 900°C에서 좋은 조밀화를 나타냈다. 그러나 컴포지션 6-TZ와 7-TZ에 비하여 상대적으로 많은 양(33.3 mole %)의 산화물 첨가제를 넣은 컴포지션 8-TZ와 9-TZ는 조밀화가 더디게 진행되었다. 950°C에서 이들 컴포지션들은 최대의 밀도치를 가졌다. 컴포지션

8-TZ와 9-TZ의 온도에 따른 조밀화는 850°C에서 950°C 사이에 급격히 진행되었다.

그림 5는 컴포지션 7과 9에 각각  $ZrO_2$ 과  $Nb_2O_5$ 를 넣어 만든 컴포지션 7-Z와 9-Z의 밀도를 나타내고 있다. 명목상 밀도가 컴포지션 7과 9의 명목상 밀도와 차이가 없음을 알 수 있다.

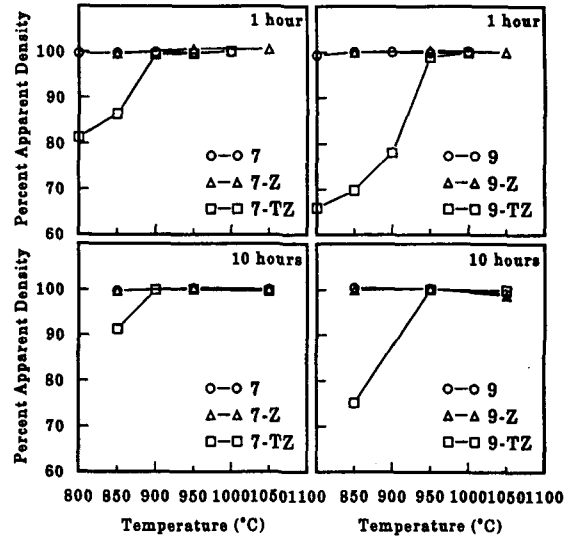


그림 5. 컴포지션 7, 7-Z, 7-TZ, 9, 9-Z 9-TZ의 명목상 밀도  
 Fig. 5. Parent apparent density of compositions 7, 7-Z, 7-TZ, 9, 9-Z 9-TZ

### 3.3 X-선 회절의 정성적 분석

그림 6과 7은 950°C에서 10시간 동안 열처리된 컴포지션 9와 9-Z의 x-선 회절 패턴이다. 또한 JCPDS 카드의  $ZrO_2$ 와  $Pb_2SiO_4$ 의 패턴을 함께 그려 검출된 x-선 회절 패턴과 비교할 수 있도록 하였다. 가장 주요 결정인 PZT의 피크는 밀리지수를 괄호 안에 표시하였고 표시하지 않은 피크는  $ZrO_2$ 와  $Pb_2SiO_4$  결정의 피크다.

950°C에서 10시간 동안 열처리된 컴포지션 9의 주요 결정상은 정방정과 3방정 결정이 공존하는 페로브스카이트 결정상이고, 마이너 결정은 JCPDS card # 30-723인  $Pb_2SiO_4$ 만이 존재하였다. 컴포지션 9-Z의 주요 결정상은 정방정과 3방정이 공존하는 페로브스카이트 결정상이고, 마이너 결정은  $Pb_2SiO_4$ 와  $ZrO_2$  결정이 함께 존재하였다.

그림 8과 9는 컴포지션 9와 9-Z의 x-선 회절패턴 중에서 PZT 페로브스카이트 결정의 {200}피크를 컴퓨터 피팅하여 자세하게 관찰한 것이다. 그림에서와 같이 컴포지션 9와 9-Z는 모두 정방정과 3방정 결정이 함께 존재하고 있음을 알 수 있다. 그러나 컴포지션 9에  $ZrO_2$ 와  $Nb_2O_5$ 를 넣은 컴포지션 9-Z는 3방정계의 피크가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 이것은 컴포지션 9-Z가 정방정에서 3방정으로의 컴포지션이 상전이(phase transformation)되었기 때문으로 판단된다.

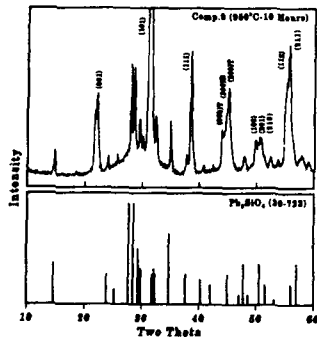


그림 6. 950°C에서 10시간 동안 열처리된 컴포지션 9의 x-선 회절 패턴

Fig. 6. X-ray diffraction patterns of composition 9 heat-treated at 950°C for ten hours

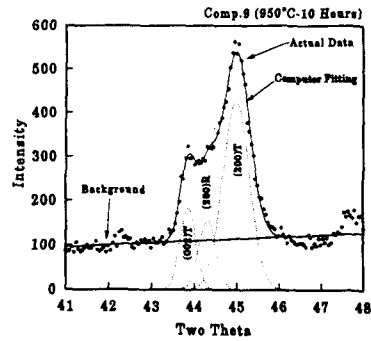


그림 8. 950°C에서 10시간 동안 열처리된 컴포지션 9의 PZTN 결정상의 {200} 피크의 분석

Fig. 8. Computer fittings of the {200} peaks of the perovskite PZTN phase of composition 9 heat-treated at 950°C for ten hours

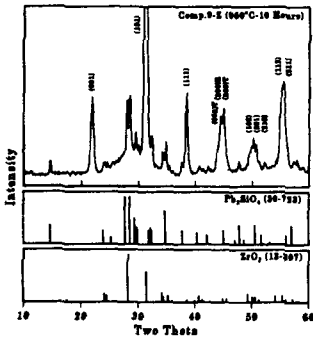


그림 7. 950°C에서 10시간 동안 열처리된 컴포지션 9-Z의 x-선 회절 패턴

Fig. 7. X-ray diffraction patterns of composition 9-Z heat-treated at 950°C for ten hours

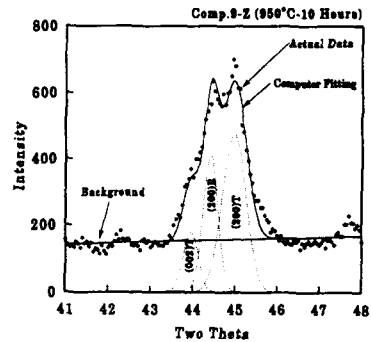


그림 9. 950°C에서 10시간 동안 열처리된 컴포지션 9-Z의 PZTN 결정상의 {200} 피크의 분석

Fig. 9. Computer fittings of the {200} peaks of the perovskite PZTN phase of composition 9-Z heat-treated at 950°C for ten hours

3.4 유전특성과 압전특성

950°C 및 1050°C에서 열처리된 샘플의 비유전상수, 유전 정접, 압전특성을 표 2에 나타냈다. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>가 첨가된 컴포지션(7과 9)은 첨가되지 않은 컴포지션(6과 8)과 비교하여 유전상수가 증가되었다. 이것은 Nb<sup>5+</sup> 도우너 도핑으로 PZT의 구조를 전기적으로 완화시켜 도메인 벽(domain wall)의 움직임을 더욱 쉽게 함으로써, 유전특성을 향상시킨 것으로 판단된다.

950°C에서 열처리된 컴포지션 6, 7, 8 그룹의 압전특성은 나타나지 않았다. 글래스 공정에 의해 제작된 이 컴포지션들의 압전특성을 나타내기가 무척 어렵다는 것을 알 수 있었다. 소결온도를 950°C에서 1050°C로 올리니 컴포지션 7에 압전특성이 나타났다.

컴포지션 9에 ZrO<sub>2</sub>와 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 넣은 컴포지션 9-Z의 유전상수가 증가하였다. 이것은 앞의 x-선 회절분석에서 언급한 바와 같이 정방정보다는 3방정 결정의 피크가 큰 것과 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉 ZrO<sub>2</sub>를 넣음으로써, 정방정에서 3방정으로 결정이 천이되어 자발분극이 증가하였기 때문으로 판단된다.

표 2. 열처리된 컴포지션의 유전특성과 압전특성(정전용량과 유전정접은 1 KHz에서 측정됨)

Table 2. Dielectric properties and piezoelectric coefficient of each composition(measured at 1KHz)

컴포지션	조건	k'	D.F.(%)	d <sub>33</sub>	g <sub>33</sub>
	6		80	0.45	0
950°C	6-TZ	68	1.59	0	0
	7	99	0.88	0	0
	7-Z	99	0.92	0	0
	7-TZ	86	0.97	0	0
	8	143	0.49	0	0
	8-TZ	65	1.14	0	0
	9	159	0.97	15	12.8
	9-Z	164	1.33	20	10.3
	9-TZ	104	1.00	0	0

표 2. 계속

Table 2. Continuous

조건		k'	D.F.(%)	d <sub>33</sub>	g <sub>33</sub>
컴포지션					
1050°C	6	-	-	-	-
	6-TZ	-	-	-	-
	7	106	0.78	17	18.1
	7-Z	107	0.81	17	17.9
	7-TZ	93	0.89	0	0
	8	-	-	-	-
	8-TZ	-	-	-	-
	9	198	1.23	29	16.5
	9-Z	206	1.51	45	24.7
	9-TZ	98	0.98	0	0

d<sub>33</sub>(pC/N): 60 kV/cm의 전계강도로 분극시킨 후 측정된 값  
 g<sub>33</sub> : x10<sup>-3</sup> Vm/N  
 - : not measured

그림 10은 컴포지션 9와 9-Z의 d<sub>33</sub> 압전계수를 전계강도의 함수로 그린 그래프이다. 그림에서와 같이 일반 PZT계의 분극전계보다 매우 높게 인가한 것을 알 수 있다. 이것은 컴포지션에는 글래스가 쉽게 되도록 glass former인 SiO<sub>2</sub>가 추가되었다. 따라서 컴포지션을 용융시키고 급냉시켜, 글래스 형태로 만든 다음, 산화물을 넣어 소결시켰기 때문에, 컴포지션에는 SiO<sub>2</sub>와 같은 glass former에 의한 amorphous phase도 존재한다. 이 amorphous phase는 유전율이 매우 낮고 절연내력이 PZT 보다 높다. 또한 이 아몰퍼스상 격자내에 PZT의 perovskite 결정들이 직·병렬로 배열되어 있을 것으로 판단된다. 따라서 분극을 위한 인가전계를 55kV/cm~125kV/cm로 하였지만, PZT 결정에 실제로 인가된 전계는 이보다 낮았을 것으로 판단된다.

d<sub>33</sub> 압전계수도 산화물 첨가제가 첨가된 컴포지션에서 더 증가하였다. 이것은 앞에서 설명한 것과 같이 정방정에서 3방정으로 컴포지션이 천이되어 자발분극이 증가하였기 때문으로 판단된다.

그림 11은 d<sub>33</sub> 압전계수와 소결온도와와의 관계를 그린 것이다. 낮은 온도에서 보다 높은 온도에서 d<sub>33</sub> 압전계수가 크게 증가되었다. 이것은 소결온도가 높을수록 첨가된 ZrO<sub>2</sub>가 쉽게 반응하여 3방정으로 결정이 용이하게 천이되었기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결 론

글래스의 연화(softening) 효과를 이용하여 PZTN의 소결 온도를 낮추고, 천이공정을 활용하여 유전특성 및 압전특성을 향상시키는 글래스 천이공정 활용성을 제시하였으며, 그 연구결과는 다음과 같다.

가. 글래스 공정에 의해 제작된 컴포지션 9의 소결온도를 800°C까지 낮출 수 있었고, 950°C에서 소결된 샘플의 비유전상수는 159, d<sub>33</sub> 압전계수는 15 pC/N로 나타났다. 또한 글래스 천이공정에 의해 제작된 컴포지션 9-Z의 소결온도도 역시 800°C까지 낮출 수 있었고, 950°C에서

소결된 샘플의 비유전상수는 164, d<sub>33</sub> 압전계수는 20

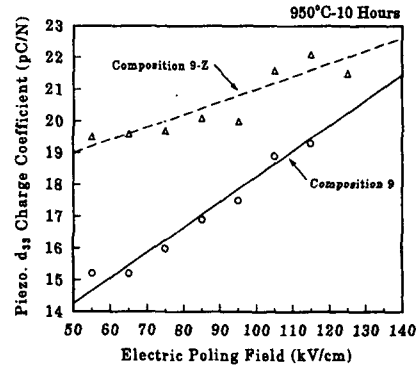


그림 10. 분극 전계강도에 따른 컴포지션 9와 컴포지션 9-Z의 d<sub>33</sub> 압전계수

Fig. 10. Piezoelectric d<sub>33</sub> charge coefficient of compositions 9 and 9-z plotted versus applied electric poling field

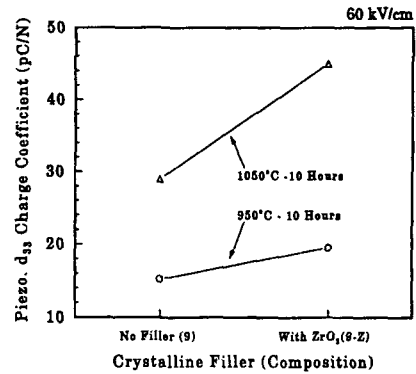


그림 11. 산화물 첨가제에 따른 컴포지션 9와 컴포지션 9-Z의 d<sub>33</sub> 압전계수

Fig. 11. Piezoelectric d<sub>33</sub> charge coefficient plotted versus crystalline filler(ZrO<sub>2</sub>)

pC/N로, 컴포지션 9에 비하여 증가하였다. 이것은 x-선 회절 분석 결과로부터, 정방정에서 3방정으로 컴포지션이 천이(transformation)되었기 때문으로 판단된다.

나. 950°C에서 1050°C로 소결온도를 높였을 때, 컴포지션 9보다는 컴포지션 9-Z의 유전상수 및 압전계수가 더 크게 증가하였다. 이것은 첨가된 산화물인 ZrO<sub>2</sub>가 반응하여 결정이 정방정에서 3방정으로 더욱 많이 천이되었기 때문으로 판단된다.

다. 950°C에서 열처리된 컴포지션 6, 7, 8 그룹의 압전특성은 나타나지 않았다. 그러나 소결온도를 950°C에서 1050°C로 올린 컴포지션 7에서 압전특성이 나타났다.

이 연구에서는 특히 PZT를 글래스로 만들어 결정화시키고 압전특성까지 나타난 것은, 향후 글래스 천이공정의 활용 가능성을 보여주고 있다.

감사의 글

본 연구 2002년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력기술기초연구(R-2002-B-054)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] Chan Young Kim, "Low Temperature Sintering of PZTN by the Liquid Phase Transient Processing," Trans. KIEE. Vol. 50C, No, 12, DEC. 2001.

[2] Boen Houng, Chan Young Kim, Michael J. Haun "Densification, Crystallization, and Electrical Properties of Lead Zirconate Titanate Glass-Ceramics," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 47, No. 4 July 2000.

[3] S. Takahashi, "Sintering Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> Ceramics at Low Temperature", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 19, No.4, pp 771-772, 1980.

[4] L. Longts, D. Weiti, C. Jinghe, G. Zhilun, and Z. Xiaowen, "Lead Zirconate Titanate Ceramics and Monolithic Piezoelectric Transformer of Low firing Temperature", Ferroelectrics, Vol-101, pp. 193-200, 1990]

[5] D. E. Wittmer and R. C. Buchanan, "Low Temperature Densification of Lead Zirconate Titanate with Vanadium Pentoxide Additive", J. Am. Ceram. Soc., 64[8], pp. 485-490, 1981

[6] G. Zhilun, L. Longtu, G. Suhua, and Z. Xiaowen, "Low-Temperature Sintering of Lead-Based Piezoelectric Ceramics", J. Am. Ceram. Soc., 70[3], pp. 486-492, 1989

[7] G. Zhilun, L. Longtu, L. Hongqing, and Z. Xiaowen, "Low Temperature Sintering of Lead Magnesium Nickel Niobate Zirconate Titanate (PMN-PNN-PZT) Piezoelectric Ceramic with high Performances", Ferroelectrics, Vol-101, pp. 93-99, 1990.

[8] D. Dong, M. Xinog, K. Murakami, and S. Kaneko, "Lowing of Sintering Temperature of Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> Ceramics by the Addition of BiFeO<sub>3</sub> and Ba(Cu<sub>0.5</sub>W<sub>0.5</sub>)O<sub>3</sub>", Ferroelectrics 145, pp.125-133, 1993.

[9] M.J.Haun, B.Houng, C.Y.Kim, and Y.D.Kim, "Piezo electric Lead Zirconate Titanate Glass-Ceramics," Proceedings of the Seventh US-Japan Seminar on Dielectric and Piezoelectric Ceramics, Tsukuba, Japan, Nov. 14-17, pp.161-164, 1995.

[10] M.J.Haun, C.Y.Kim, R.E.Chinn, D.B.Price, M.W. Krutyholowa, and N.W.Chen, "Transient Glass Phase

Processing of Alkaline-Earth Aluminosilicate Phases," The Ceramic Microstructures '96, University of California, Berkeley, California, June 24-27, 1996.

[11] W. K. Park and M. Tamane, "Glass-Ceramics of the System Pb(Zr<sub>0.5</sub>Ti<sub>0.5</sub>)O<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub>", Glastech. Ber., 62, pp. 187-189, 1989.

[12] R. J. Brandmayr and S. DiVita, "Method of Processing Ferroelectric Devitrifiable Glass Ceramics", U.S. Patent No. 3,862,829, Jan. 28, 1975.

[13] B. Hong and M. J. Haun, "Lead Titanate and Lead Zirconate Titanate Piezoelectric Glass-Ceramics", Ferroelectrics, 154, pp. 107-112, 1994

[14] K. D. Budd, S. K. Dey and D. A. Payne, "Sol-gel Processing of PbTiO<sub>3</sub>, PbZrO<sub>3</sub>, PZT, and PLZT thin films", British Ceramic Proceedings, 36, pp. 107-121, 1985

[15] W. H. Gemmill, "Sol-gel Driven PZT with Additions of Silica and Lead Silicate", M. S. Thesis, Colorado School of Mines, Golden Colorado, 1996.

[16] N. D. Patel and P. S. Nicholson, "Comparison of Piezoelectric Properties of Hot-Pressed and Sintered PZT", Am. Ceram. Soc. Bull., 65 [5] pp783-787, 1986.

[17] P. G. Lucuta, F. Constantinescu, and D. Barb, "Structural Dependence on Sintering Temperature of Lead Zirconate Titanate Solid Solutions", J. Am. Ceram. Soc., 68[10], pp. 533-537, 1985.

[18] R. B. Atkin, R. L. Holman, and R. M. Fulrath, "Substitution of Bi and Nb Ions in Lead Zirconate Titanate", J. Am. Ceram. Soc., 54[2], pp 113-115, 1971.

저 자 소 개



김 찬 영(金 燦 泳)

1962년 9월 6일생  
 1989년 인하대 공대 전기공학과 졸업  
 1994년 미국 Colorado School of Mines  
 재료공학 졸업(석사)  
 1997년 동 대학원 재료공학 졸업(공박)  
 1997년-2001년 전력연구원 선임연구원  
 2001.3 ~ 현재 : 우석대학교 전기전자공학과  
 조교수  
 E-mail : kimcy@woosuk.ac.kr