

## 와류 유량센서용 압전 바이몰프의 온도변화에 따른 특성

이근택 · 김형순\* · 임종인<sup>†</sup>

요업기술원 시뮬레이션센터  
인하대학교 신소재공학부\*

### Characteristics of Temperature Variation to the Piezoelectric Bimorph for Vortex Flowmeter

Guen Taek Lee, Hyung Sun Kim\* and Jong-In Im<sup>†</sup>

Simulation Center, Korea Institute of Ceramic Eng. & Tech.  
School of Materials Engineering, Inha University\*

(2007년 3월 26일 받음, 2007년 5월 17일 최종수정본 받음)

**Abstract** Although piezoelectric bimorph that is using as the sensor in medical and industrial measurement has large displacement, it has problems including efficiency in generating force, energy convergence, and response. Its application is being limited based on the change in resonance frequency with temperature. In this study, to overcome the disadvantages, PZT piezoelectric ceramics was prepared and produced a parallel type piezoelectric bimorphs. In addition, by using the finite element method, the configuration of piezoelectric bimorph was designed and the displacement of the bimorph based on applied electric pressure and the wave pattern were measured. By analyzing the resonance characteristics of the bimorph in the temperature range of  $-60\sim 80^{\circ}\text{C}$ , an attempt was made to study the operational characteristics and temperature reliability of vortex flowmeter sensor. As a result, the resonance frequency of the bimorph was gradually increased with the temperature from  $-60$  to  $80^{\circ}\text{C}$ . The deflection of the bimorph was found to strongly depend on both the applied electric field waveform and the environmental temperature.

**Key words** piezoelectric, bimorph, temperature dependence, resonance frequency, vortex flowmeter.

### 1. 서 론

최근 의료 및 산업용 계측기로 많이 사용되고 있는 와류형 유량센서는 유관내의 와류를 발생시키는 와류발생부와 유량을 측정하는 압전센서부로 나뉘어진다. 이 같은 압전형 유량센서의 유량측정 방법은 와류발생부를 통해 발생된 카르만 와류(Karman vortex flow)가 압전체에 기계적 힘을 인가하고, 이를 통해 발생된 전기신호로 유량을 측정할 수 있다. 이러한 유량센서는 나일강 흐름의 측정을 위해 시도한 것이 기원이라고 알려져 있으며, 그 후 대도시의 상수도 물의 공급량과 요금의 산출을 위하여 여러 가지 형태의 유량계가 고안되었다. 와류 유량계의 종류로는 초음파 유량계, 질량식 유량계, 로타식 유량계 등 많은 종류가 있으나, 그 중 압전 바이몰프를 이용한 와류형 유량계는 카르만 와류에 의한 유체의 진동을 이용하기에 구조가 간단하고 기계적인 가동부가 필요 없기 때문에 가스나 유속의 측정에 많이 사용되고 있다.<sup>1)</sup>

이러한 압전형 와류유량계의 장점은 액체와 기체 모두 측정이 가능할 뿐만 아니라 측정범위도 비교적 넓다. 또한 와류발생부의 회전부동의 추가적 구조가 필요 없으며, 유지보수가 쉽고 외부로부터 물리적 손상 등의 영향을 거의 받지 않기 때문에 압전형 와류유량계의 사용은 지속적으로 증가하고 있다.

와류유량계의 핵심인 와류 발생체는 넓은 범위의 측정 범위와 정밀도를 가져야 하며, 와류 발생체에 의한 유체의 속도결손이 최소가 되도록 잘 설계해야 한다. 그러나 와류식 유량계는 저유량을 감지하기가 어렵고 소음에 매우 민감하여 유량이 작은 유체에서의 와류압력을 검출하고자 할 때 지극히 고감도의 압전소자가 사용되지 않으면 신호 검출의 어려운 문제점을 가지고 있다.<sup>2)</sup> 또한 와류유량센서부의 압전 바이몰프가 유량용 센서로 이용되기 위해서 요구되는 특성 중 중요한 요소는 온도에 따른 공진주파수의 변화가 작아야 한다는 것이다. 온도에 따른 공진주파수의 변화는 재료의 탄성특성과 열팽창에 의하여 영향을 받음을 알 수 있으며, 재료의 이방성 및 Zr/Ti비에 의해서도 영향을 받는다.<sup>3)</sup> 이와 같은 문제로 인

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-Mail : jongin@kicet.re.kr (J. - I. Im)

해 압전 세라믹 응용부품의 극저온과 고온에서의 사용이 제한되며, 압전 세라믹 응용부품의 성능향상을 위해서 온도안정성에 대한 다양한 연구가 요구된다.

본 연구에서는 와류 유량센서용 압전 바이몰프의 온도 변화에 따른 특성을 고찰하기 위하여 PZT 압전 세라믹스를 병렬형 압전 바이몰프로 제작을 하여,  $-60^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$  온도 구간에서의 바이몰프의 공진특성과 공진저항, 정전용량의 변화를 분석하였다. 또한 유한 요소법(FEM)을 이용하여 압전 바이몰프의 형상을 설계하여 임피던스 해석을 관찰한 후 인가 전압과 파형에 따른 바이몰프의 변위와 발생력을 측정하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서는 산화물 혼합법을 이용하여 시편을 제작하였으며, 분말은  $\text{PbO}$ (Aldrich, 99%, USA),  $\text{ZrO}_2$ (Aldrich, 99%, USA),  $\text{TiO}_2$ (Aldrich, 99%, USA)를 가지고 PMN-PT 계열(Hard-PZT)과 PZT 계열(Soft-PZT)의 조성을 평량하였다. 이 시료를 지르코니아 불을 이용하여 24시간동안 ethyl alcohol을 이용하여 혼합 하였으며, 혼합된 시료는  $90^{\circ}\text{C}$ 로 유지된 건조기 속에 24시간 유지시켜 완전 건조한 후 알루미늄 유발로 재분쇄 후  $850^{\circ}\text{C}$ 에서 3시간 열처리 하였다. 이후 하소된 분말을 지르코니아 불을 이용하여 플라스틱 통에서 24시간 습식 혼합하였으며, 혼합된 시료를 완전히 건조한 후 알루미늄 유발로 분쇄하여 체가름을 하였다. 이렇게 준비된 파우더를 1 ton의 압력으로 사각기동형으로 성형을 하였으며,  $1,230^{\circ}\text{C}$ 에서 2시간 동안 소결하여 PZT 소결체를 제작하였다.

단일 압전체 시편을 만들기 위해 소결체의 상하부를 연마하여 각각 1 mm, 2 mm의 두께를 갖는 사각의 평판형 시편으로 제작을 하였으며, 형상비에 맞게 정밀 절단기로 단일 시편을 준비하였다. 준비된 바이몰프는 Table 1에 나타낸 것과 같이 조성에 따라 Hard-PZT(H)와 Soft-PZT(S)로 나누었으며, 각각의 준비된 샘플은 형상에 따라 A, B, C, D type으로 구분하였다. 이러한 시편의 표면을 연마한 후 실크스크린을 이용하여 Silver paste를 입혔으며, 전극이 입혀진 시편을  $120^{\circ}\text{C}$ 에서 시료의 두께 1 mm당 3 kv의 직류를 30분간 인가하여 제작된 2개의 압전체를 병렬로 연결하여 압전형 바이몰프 소자를 제작하

Table 1. Dimension of PZT bimorphs. [Unit : mm]

Sample*	Length	Width	Thickness
HA, SA	20	4	1.0
HB, SB	20	2	1.0
HC, SC	10	1	2.0
HD, SD	10	1	1.0

\* H(Hard-PZT), S(Soft-PZT)

였다. 추가적으로 단일소자의 특성도 함께 측정하여 Bimorph와 비교하려 하였다. 특성평가 방법으로는 레이저 변위 측정기(Microtrak 7000, MTI Instruments)를 통해 인가 전압의 세기와 파형에 따른 바이몰프의 변위를 측정하였다. 또한 바이몰프의 온도에 따른 Impedance 특성과 정전용량을 측정하기 위하여 저온조 챔버와 Agilent 4294A를 사용하였다. 이때 온도는  $-40^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ 까지  $20^{\circ}\text{C}$ 간격으로 해당온도에서 1시간의 보정 후 측정을 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Hard-PZT와 soft-PZT로 만들어진 압전 바이몰프에 대하여 20~100V까지 가변시키면서 전압을 인가하였을 경우 자유단 끝에서의 변위를 레이저 측정기를 통해 측정하였다. (Fig. 1) 그 결과 인가전압에 따른 변위는 다르나 전압의 증가에 따라 변위가 커진다. Hard-PZT, A type 샘플이 100 V DC 에서 바이몰프의 자유단에서  $15.8 \mu\text{m}$ 의 최대 변위특성을 나타내었으며, 이는 바이몰프의 형상에 따른 유효길이가 중요한 요인이 되었다. 또한 Soft-PZT, C type 샘플에서 가장 적은 미소변위가 발생하였다.

전압 인가에 따른 바이몰프의 자유단 끝에서 발생한 발생력은 Fig. 2에 나타내었다. 인가전압에 따른 바이몰프의 발생력 측정 결과, Hard-PZT, A type 샘플에서 가장 큰 발생력이 나타나는 것을 볼 수 있었으며, 이는 발생력에 있어서 두께에 비해 길이가 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. Hard-PZT, D type 샘플에서 가장 적은 발생력을 나타내었으며, 모든 샘플에서 변위량과 같은 형태로 발생력이 전압에 따라 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 압전소자의 특성 및 압전소자의 크기, 개수, 그리고 기타 구성품의 재질 및 치수에

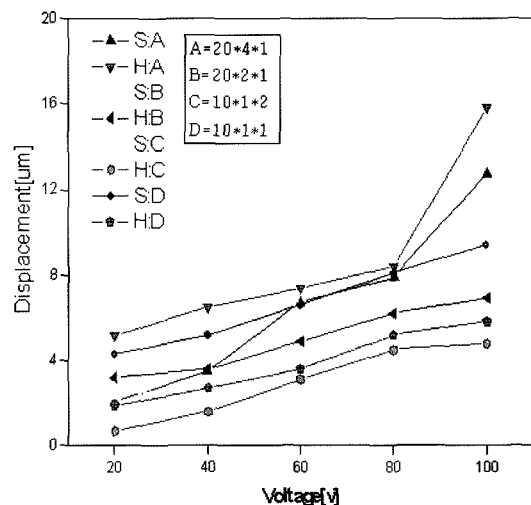


Fig. 1. Displacement variation of fabricated piezoelectric bimorph with the applied voltages.

의해 바이폴프의 동작 특성을 향상시킬 수 있으므로 필요한 용도에 따라 압전 액추에이터로 적용시킬 수 있다. 정밀한 위치 제어의 용도로 사용되는 압전 바이폴프의 경우 구동 시 과도한 이동과 떨림현상의 방지가 중요하다. 이런 현상들은 바이폴프 소자에 인가되는 전압의 파형에 의해 영향을 받으므로 인가전압의 형태 결정이 매우 중요하다.

바이폴프에 인가전압 파형 변화에 따른 변위를 Fig. 3에 나타내었으며, 20, 50, 100 V의 전압을 Sine wave(정현파), square wave(사각파), triangle wave(삼각파)를 인가하였다. 그 결과 Hard-PZT, A type 샘플에서 가장 큰 변위가 발생하였으며, B-type 샘플의 Soft-PZT와 Hard-PZT에서는 거의 같은 경향을 보이고 있다. 또한, 모든 샘플에서 삼각파의 변위가 가장 적게 일어나는 것을 확인하였으며, 사각파에서 가장 큰 변위가 일어나는 것을 볼 수 있었다. 이것은 바이폴프에 급격한 전압을 인가함에 따른 과도이동현상의 영향이 포함된 것으로 판단된다. 이로 인해 압전 바이폴프 소자에서 정현파와 삼각파를 사용하는 것이 떨림 현상 및 과도 이동방지 제어에 효과적이라고 사료된다.

또한, PZT 세라믹스의 주된 응용 분야로는 필터나 센서와 같은 주파수 소자 분야이며, 이와 같은 분야의 응용시 동작 주파수의 온도에 대한 안정성이 매우 중요한 변수로 작용된다. 따라서, 본 연구에서는  $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 까지  $20^{\circ}\text{C}$ 간격으로 1시간의 온도 보정 후 압전 바이폴프의 온도에 따른 임피던스 특성을 분석하였으며, Soft-PZT와 Hard-PZT의 형상에 따른 공진 주파수와 반공진 주파수 특성을 Fig. 4에 나타내었다. 그 결과로 Soft-PZT와 Hard-PZT는 저온으로 갈수록 임피던스가 상승하는 것을 볼 수 있으며, 온도가 올라갈수록 임피던스 특성이 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이것은 극저온과 고온에서 압전 바이폴프의 수축과 팽창에 의한 것으로 생각된다. 그러나  $-60^{\circ}\text{C}$ 와  $+80^{\circ}\text{C}$ 에서는 공진주파수와 반공진 주파수가 급격히 상승하는 것을 볼 수 있는데 이것은 결정의 불완전성과 분극구조의 재배열, 그밖에 급냉과 해동으로 인한 바이폴프의 접착상태의 영향으로 압전특성이 점차 소멸되는 것으로 추정된다. 또한, 단일소자의 특성

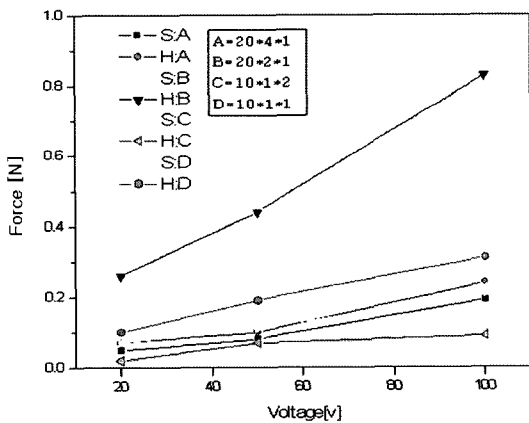


Fig. 2. Generated force of the piezoelectric bimorph with the applied voltages.

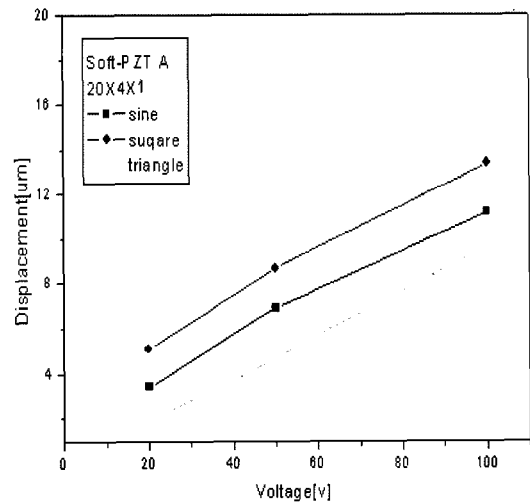
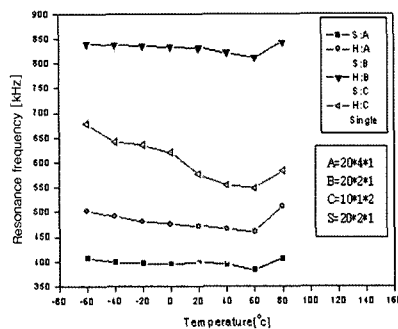
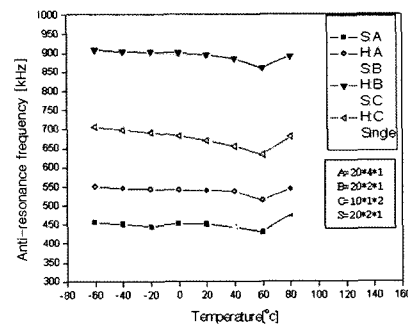


Fig. 3. Displacement variation of the soft PZT bimorph with various waveforms of the applied voltages.



(a)



(b)

Fig. 4. Temperature dependence of (a) the resonance frequency (fr) and (b) the anti-resonance frequency of the piezoelectric bimorph.

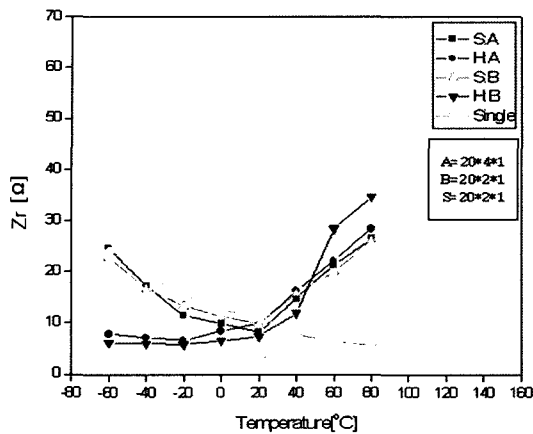


Fig. 5. Variations of the resonance resistance( $Z_r$ ) of the bimorph with the temperature.

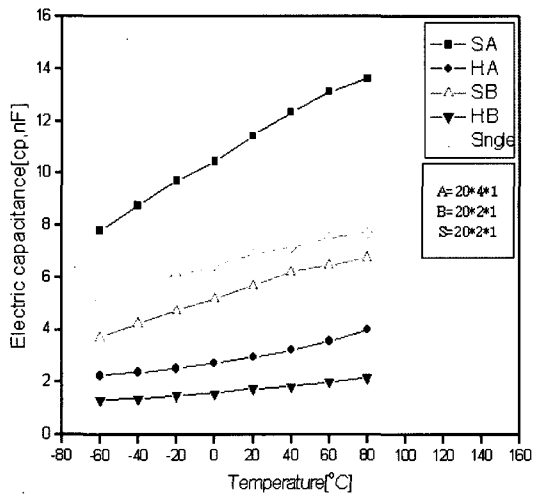


Fig. 6. Electric capacitance( $C_p$ ) variation of the piezoelectric bimorph.

특성이 좋게 나타남을 알 수 있었다. 압전소자의 Q값에 영향을 미치는 공진저항은 Fig. 5과 같은 특성을 보였으며,  $-60\sim 80$ 의 범위에서 공진저항이 상승하는 것을 볼 수 있다. 이것은 재료의 탄성특성과 열팽창에 의한 영향으

로 온도가 상승 할수록 내부의 자유전자의 운동이 활발해지므로 전자의 흐름이 원활하지 못하게 되며, 그로 인해 Q값의 감소를 나타낸다.

마지막으로, Fig. 6에 온도에 따른 정전용량 값의 변화를 나타내었다. 저온에서 상온으로 갈수록 정전용량이 상승하는 것을 보여주고 있는데, 이것은 자유전자의 흐름이 방해를 받아 전하의 양이 압전 세라믹에 축적되는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

Soft-PZT와 Hard-PZT 모두 저온으로 갈수록 임피던스가 상승하였고, 온도가 올라갈수록 임피던스 특성이 낮아졌다. 또한  $-60^\circ\text{C}$ 와  $+80^\circ\text{C}$ 에서 공진주파수와 반공진주파수가 급격히 상승하였으며, 이것은 결정의 불완전성과 분극의 재배열, 그리고 급냉과 해동으로 인한 바이볼프의 물리적 결합의 영향으로 압전특성이 점차 소멸되는 것을 알 수 있었다. 바이볼프의 변위와 발생력 측정 결과 비교적 대변위와 적은 발생력을 보여 주고 있어 적은 힘에 큰 적기적 출력을 얻을 수 있다. 또한 압전 바이볼프의 구동시 과도한 이동과 떨림현상은 사각파에서 가장 크게 나타났으며, 이로 인해 정현파와 삼각파를 인가하는 것이 떨림현상 및 과도 이동방지를 효율적으로 제어할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. K. Uchino, Piezoelectric/Electrostrictive Actuator, Morikita Publishers, Tokyo, Japan (1986).
2. N. D. Patel and P. S. Nicholson, Am. Ceram. Soc. Bull., **65**(5), 783 (1986).
3. B. Jaffe, W. R. Cook, and H. Jaffe, Piezoelectric ceramics, p.140, Academic Press, London (1971).
4. J. Im, Y. Roh and S. Kim, J. Kor. Ceram. Soc., **34**(4), 337 (1997).