

압전 세라믹 공진자를 이용한 점도 센서

옥윤포², 강진규¹, 홍창효¹, 이재신^{1,a}

¹ 울산대학교 첨단소재공학부

² 한국전기연구원 전지연구센터

Viscosity Sensor Using Piezoelectric Ceramic Resonators

Yun-Po Ok², Jin-Kyu Kang¹, Changhyo Hong¹, and Jae-Shin Lee^{1,a}

¹ School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

² Korea Electrotechnology Research Center, Battery Research Center, Changwon 642-120, Korea

(Received March 21, 2012; Revised March 23, 2012; Accepted March 26, 2012)

Abstract: A bolt-clamped ultrasonic viscometer was designed and fabricated using a pair of ring-shaped piezoelectric ceramic resonators. For its compactness and low operation frequencies, simulation of piezoelectric resonators was carried out using an ATILA program. Ring-shaped resonators using $0.05\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.95\text{Pb}(\text{Zr}_{0.475}\text{Ti}_{0.525})\text{O}_3$ ceramics were prepared by a conventional ceramic processing, which were then clamped with a pair of metal caps. The fabricated sensor module with a small volume of less than 1 cm^3 and an operation frequency as low as 26.5 kHz showed a good relationship between its quality factor and the viscosity of oil.

Keywords: Ultrasonic sensor, Viscometer, Engine oil management, Piezoelectric ceramics

1. 서론

물질의 특성이나 액체의 유동성을 알기 위해 그 물질의 점도를 알아보는 것은 중요하며 이는 산업 전반에 걸쳐 중요한 역할을 차지하고 있다. 특히 식품, 출판, 제약, 화장품 산업 등에서는 점도 관리를 통하여 제품의 품질관리와 공정을 제어하며, 제품의 연구개발에 이용하기도 한다. 현재 회전점도계 [1]나 모세관 점도계 [2]와 같은 전통적인 형태의 기계식 점도계가 점도 측정에 널리 쓰이고 있지만, 검사 환경의 변화가 점도 측정의 정확성에 문제를 야기할 수 있다.

초음파를 이용한 유체 점성 측정은 1949년 Mason 등 [3]에 의해 처음 제안되었으며, 유체, 필름, 재료의 비파괴검사에 유망한 기술이다. 그들은 초음파 영역

에서의 수정의 진동을 이용하여 비틀림 모드와 전단 모드에서 폴리이소부틸렌 유체의 점도와 고주파 탄성을 연구하였다. 그 이후 최근 압전 소재에 고주파 전계를 인가하여 발생하는 초음파를 이용한 점도센서 연구가 세계적으로 활발하게 진행되고 있다 [5-9].

여러 유체 중 윤활유는 산업이 발달함에 따라 그 사용량이 증가하고 있다. 특히, 자동차의 내연기관 내에서 사용되는 윤활유는 각종 환경 규제와 맞물려 그 관심도가 높아지고 있다. 내연기관에 사용되는 윤활유는 작동 환경, 연료품질, 주행 조건 및 윤활유 자체의 변질과 관련된 변수에 노출되어 있으며, 엔진의 손상을 방지하기 위해서는 윤활유는 한계점에 이르기 전에 교체되어야 한다. 저가의 마이크로 센서기술과 그에 관련된 전자장치가 보편화됨에 따라, 자동차 산업 분야에서 윤활유의 상태를 감시하기 위한 센서를

a. Corresponding author: jslee@ulsan.ac.kr

내장하려는 시도가 이루어지고 있다 [4-7].

엔진오일의 관리를 위해서 점도센서는 소형화와 내구성을 비롯하여 동작주파수가 낮은 것이 바람직하다. 그 이유는 구동회로의 동작주파수가 높을수록 부품의 가격이 급상승하기 때문이다. 본 연구에서는 가격이 저렴하면서 부피가 1 cm³ 이하인 소형 점도센서를 개발하고자 하였다. 특히 기존의 초음파 센서의 경우 동작주파수가 1 MHz로 높아서 구동회로의 가격이 상승하는 단점이 있어서 [7-9], 동작 주파수를 100 kHz 이하로 낮추기 위한 방법들을 시도하였다. 마지막으로 제조한 센서의 실용성을 확인하기 위하여 윤활유의 점도를 변화시키면서 전기적 반응 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 유한요소 해석법을 이용한 시뮬레이션

산업용 유한 요소법 (finite element method, FEM) 구조해석 프로그램인 ATILA (Cedrat Recherche, ATILA, version 5.2.4, France)를 이용하여 압전 공진기의 임피던스 특성을 계산하였다. 압전 구조체의 모델링은 2D 와이어 모델의 기초로 하여 3D 모델의 제조로 확장하였다. 프로그램에 내장된 PZT-5H 소재의 상수를 이용하여 시뮬레이션을 시작하였으나, 실제 제조된 원판형 공진자 측정치와 차이가 커서 재료상수를 변화시키면서 실제 측정치에 가장 근접한 재료상수를 찾아 이용하였다. 본 연구의 시뮬레이션에 이용된 재료 상수를 정리하여 표 1에 나타내었다.

Table 1. Material constants used in simulation.

Density (kg/cm ³)	Piezoelectric coefficient (pm/V)			Relative permittivity	
	d_{31}	d_{33}	d_{15}	ϵ_{11}/ϵ_0	ϵ_{33}/ϵ_0
7,500	-128	289	496	1,475	1,300
Stiffness coefficient ($\times 10^{-12}$ m ² /N)					
S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{33}	S_{44}	
12.3	-4.05	-5.312	15.5	39.0	

본 연구에서 시도한 원판형과 환형의 공진자의 그물망 형상을 그림 1에 나타내었다. 전극 양면이 고정되지 않고 자유로운 진동을 할 수 있는 경계조건을

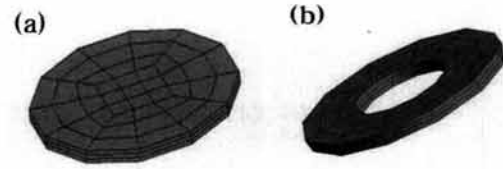


Fig. 1. Finite element mesh of (a) disk-type and (b) ring-shaped piezoelectric resonator.

적용하였으며, 시뮬레이션 시간을 단축하기 위하여 사변형 (quadrilateral) 그물망 형상을 적용하였다.

2.2 세라믹 시편 제조

본 연구에서 제조한 세라믹 시편의 화학적조성은 0.05Pb(Mn_{1/3}Sb_{2/3})O₃-0.95Pb(Zr_{0.475}Ti_{0.525})O₃ (PMS-PZT)이었으며, 압전 특성에 유해한 pyrochlore 상의 생성을 억제하기 위하여 2단계 하소를 거치는 columbite precursor 방법을 이용하여 합성하였다. 첫 단계에서는 MnO₂, Sb₂O₃, ZrO₂, TiO₂ 분말을 상기 화학식에 따라 평량 후 혼합하여 24시간 동안 볼밀링하였다. 혼합된 분말을 24시간 동안 건조한 다음 820℃에서 2시간 동안 하소하여 MnSb₂(Zr,Ti)O₆ columbite 상을 합성하였다.

두 번째 단계에서는 하소분말에 화학당량의 PbO를 첨가하여 역시 볼밀링 방법으로 24시간 동안 다시 혼합하였다. 그 다음 건조 후 850℃에서 2시간 동안 2차 하소를 하였다. 이와 같이 얻어진 하소 분말을 이용하여 1축 가압성형법을 이용하여 원판형과 환형의 시편을 성형한 다음, 1,200℃의 온도에서 2시간 동안 대기 중에서 소결하였다. 소결한 시편의 양단을 연마한 후 은 페이스트 전극으로 양면을 스크린 인쇄법으로 도포한 다음, 110℃로 가열된 절연유 조에서 20분간 3 kV/mm의 전기장을 가하여 분극 처리하였다.

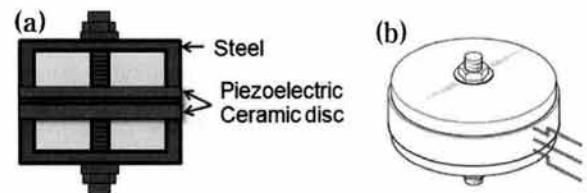


Fig. 2. Schematic of (a) cross-sectional view and (b) assembled ultrasonic viscosity sensor.

2.3 초음파 점도 센서 제작

상기와 같이 제조된 한 쌍의 환형의 PMS-PZT 압전세라믹 공진자를 이용하여 그림 2와 같은 구조를 가지는 볼트 체결형 초음파 변환기를 제조하였다. 환형의 세라믹 공진자 가운데에 절연체를 삽입하고 세라믹 공진자 외측으로 금속 캡을 씌운 다음 전체를 볼트를 체결하여 구조적인 안정성을 도모하였다. 제조된 센서의 지름과 높이는 모두 약 10 mm였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PMS-PZT 세라믹 공진자의 압전 특성

그림 4는 1,200°C의 온도에서 2시간 동안 소결하여 얻은 PMS-PZT 세라믹스의 전자현미경 사진이다. 치밀한 미세 구조를 나타내었으며, 평균 입도가 2 μm 정도이다. X-선 회절 분석 결과, 2차상이 발견되지 않았고, 정방정계 페로브스카이트 단일상만 존재함을 알았다.

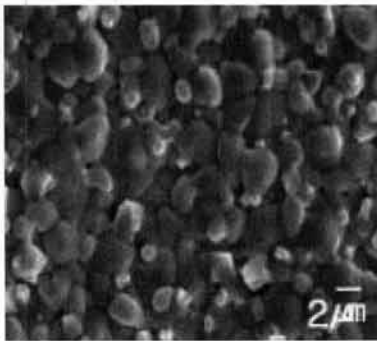


Fig. 3. Surface micrograph of PMS-PZT ceramics sintered at 1,200°C for 2 h in air.

시편의 유전율과 압전 특성을 측정하여 표 2에 정리하여 나타내었다. 상대유전율과 유전손실이 1,750과 0.46%로 나타났다. 또한 큐리온도가 330°C로 비교적 높아서 자동차 엔진오일의 온도가 150°C인 점을 감안하면 온도안정성 면에서 문제가 없을 것으로 판단되었다. 또한 기계적 품질계수 Q_m 과 전기기계결합계수 k_p 가 각각 900과 43.3%로 나타나서 초음파 센서로 적용하는데 적합한 것으로 판단되었다. 그러나 이 결과는

Table 2. Dielectric and piezoelectric properties of PMS-PZT ceramics prepared in this work.

Density (g/cm ³)	ϵ_r	$\tan\delta$ (%)	T_c (°C)	Q_m	k_p (%)	d_{33} (pC/N)
7.5	1,750	0.46	330	900	43.3	310

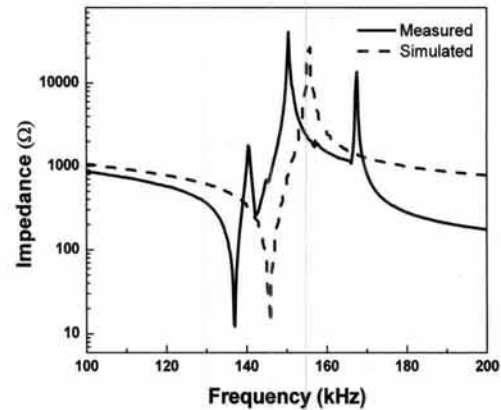


Fig. 4. Impedance spectra of a ring-shaped piezoelectric resonator fabricated with PMS-PZT ceramics.

Zhu 등 [10]이 PMS-PZ-PT에 대해 보고한 값들 ($k_p=0.6$, $Q_m=1,250$)과 비교하면 개선의 여지가 많이 남아있는 것으로 보인다.

초음파 센서의 경우 동작주파수를 낮추는 것은 저가격화를 실현하는데 있어서 매우 중요하다. 그 이유는 센서의 동작주파수가 낮을수록 구동회로와 감지회로의 저주파화가 가능하고 따라서 회로 가격이 낮아지기 때문이다.

ATILA를 이용하여 형태와 직경의 변화에 따른 PMS-PZT 공진기의 임피던스 특성을 시뮬레이션 하였다. 직경이 10 mm이고 두께가 1 mm인 원판형의 압전공진자는 공진주파수 (f_r)가 220 kHz였다. 그러나 외경은 같고 내경은 5 mm인 환형 공진자의 경우 그보다 낮은 공진주파수인 147 kHz를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 작은 크기에도 불구하고 낮은 동작주파수를 가지는 공진자의 모양이 환형이라고 판단하여 PMS-PZT 세라믹스를 이용하여 환형 공진자를 제조하였다.

제조된 공진자의 임피던스 특성을 측정한 다음 시뮬레이션 결과와 비교하여 그림 5에 나타내었다. 실제 제조된 세라믹 공진자의 경우 공진 및 반공진 피크 외에도 원치 않은 피크가 두 개 더 나타났는데,

이러한 불요복사파는 Hu 등[11]과 Li 등 [12]이 보고한 PZT를 이용한 환형 공진자의 연구 결과에서도 관찰된 바가 있다. 이러한 불요복사파의 원인은 환형 공진자 내에 경방향 모드 (radial mode), 벽 두께 모드 (wall-thickness mode), 두께 모드 (thickness mode), 기타 여러 가지 복합모드가 공존하기 때문인 것 같다 [12].

3.2 초음파 점도센서의 특성

위와 같이 얻어진 한 쌍의 환형 압전 세라믹 공진자 사이에 환형의 절연성 세라믹을 삽입한 다음, 금속 캡을 양측에 씌어 그림 5와 같은 대칭형 구조를 가지는 초음파 센서 모듈을 제작하였다. 제작된 센서의 지름과 높이가 1 cm 미만이고 부피 또한 1 cm³ 이하여서 자동차 엔진 바닥부의 오일 저장실에 실장하는데 문제가 없을 것으로 보인다.

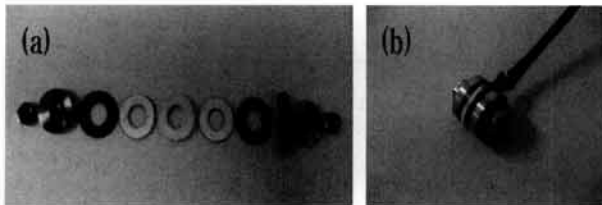


Fig. 5. Photos of (a) disassembled and (b) assembled ultrasonic viscosity sensor.

그림 5와 같은 초음파 센서 모듈의 공진 특성을 측정하여 그림 6에 나타내었다. 환형의 세라믹 공진자의 공진주파수는 그림 4와 같이 147 kHz였으나 그림 5와 같이 양쪽에 금속 캡을 체결한 센서 모듈의 공진 주파수는 그림 6과 같이 26.5 kHz로 크게 낮아졌다. 이러한 주파수 저하는 금속 캡이 진동자에 질량부하 (mass loading) 효과를 가져왔기 때문으로 사료된다 [13]. 이와 같이 100 kHz 이하의 비교적 낮은 주파수에서 동작이 가능하다는 점은 구동 및 감지회로의 저가격화 측면에서 매우 유리한 조건이다.

센서 모듈의 공진주파수에서 이득을 측정하면 그림 7과 같은 피크를 얻을 수 있다. 이러한 이득의 변화로부터 품질계수를 Q_s 를 구할 수 있다. Q_s 는 공진주파수를 3 dB 저감되는 주파수 폭으로 나누면 된다. 윤활유의 점도를 변화시키면서 센서 모듈의 Q_s 값의 변화를 측정하였다. 점도가 서로 다른 윤활유를 혼합하여 윤활유의 점도를 변화시켰다.

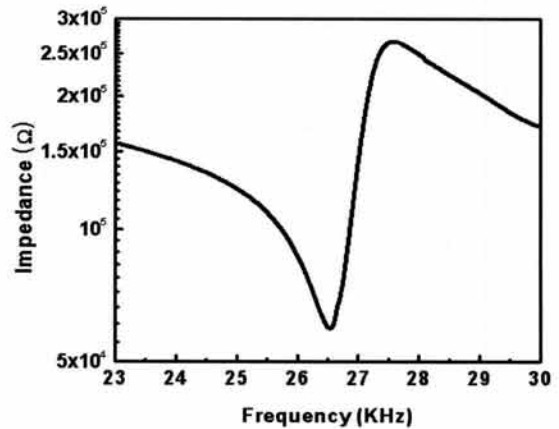


Fig. 6. Impedance characteristics of ultrasonic viscosity sensor module.

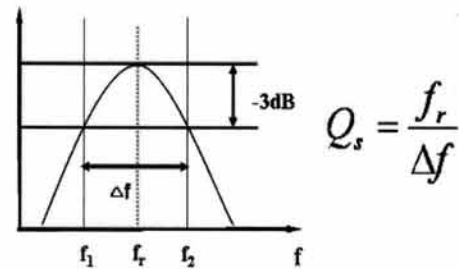


Fig. 7. Gain curve and quality factor at resonance frequency.

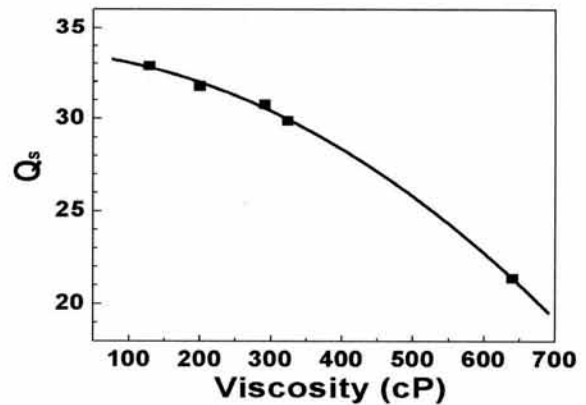


Fig. 8. The quality factor vs. oil viscosity.

그림 8은 윤활유의 점도 변화에 따른 센서 모듈의 Q_s 값의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 윤활유의 점도와 센서 모듈의 품질계수는 상관성이 높음을 나타내었으며, 구체적으로 윤활유의 점

도가 증가할수록 Q_s 가 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 이유는 유체의 점도가 증가함에 따라 유체 중 에 전파하는 음파의 감쇄율이 증가하기 [14] 때문으로 보인다. 실용적인 면에서 보면 센서의 품질계수를 감시하면 유체의 점도를 간접적으로 알 수 있다는 점이다. 따라서 윤활유 교체시기에 해당하는 점도를 미리 알고, 초음파 점도센서를 이용하여 윤활유의 점도의 변화를 감시하면 자동적으로 윤활유 교체시기를 감지할 수 있게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 PMS-PZT 세라믹스를 이용하여 제조한 한 쌍의 환형의 공진자를 금속 캡과 체결하여 센서 모듈을 제조하였다. 그 결과 체적이 1 cm^3 이하로 매우 작고, 동작주파수가 26.5 kHz로 낮은 초음파 점도 센서 모듈을 제작하였다. 제작된 모듈을 이용하여 윤활유의 점도와 센서의 품질계수의 상관성을 측정된 결과, 점도가 증가할수록 품질계수가 낮아지는 우수한 상관도를 나타내었다. 따라서 본 연구결과는 종래의 부피가 큰 기계식 점도센서보다 크기 면에서 훨씬 작고 전자적으로 계측하기 용이한 장점을 가지고 있어서 자동차나 산업용 윤활유의 교체시기를 실시간으로 감시하는 센서로써의 응용 가치가 매우 높다고 판단한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 지자체추도연구개발지원사업 (B0009733)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] P. J. Gilinson Jr., C. R. Dauwalter, and E. W. Merrill, *Trans. Soc. Rheol.*, 7, 319 (1963).
- [2] S. H. Maron, I. M. Krieger, and A. W. Sisko, *J. Appl. Phys.*, 25, 971 (1954).
- [3] W. P. Mason, W. O. Baker, H. J. McSkimin, and J. H. Heiss, *Phys. Rev.*, 75, 936 (1949).
- [4] E. Irion, K. Land, T. Gürtler, and M. Klein, *SAE Technical Paper Series*, 106, 1390 (1997).
- [5] A. Basu, A. Berndorfer, C. Buelna, J. Campbell, K. Ismail, Y. Lin, L. Rodriguez, and S. S. Wang, *SAE Technical Paper Series*, 70847 (2000).
- [6] B. Jakoby, M. Buskies, M. Scherer, S. Henzler, H. Eisenschmid, and O. Schatz, in *Advanced Microsystems for Automotive Applications* (Springer, Berlin, 2001) p. 157.
- [7] A. Agoston, C. Ötsch, and B. Jakoby, *Sensor. Actuat.*, A121, 327 (2005).
- [8] L. V. Markova, N. K. Myshkin, H. Kong, and H. G. Han, *Tribology International*, 44, 963 (2011).
- [9] K. Zhang, S. H. Choy, L. Zhao, H. Luo, H. L. W. Chan, and Y. Wang, *Microelectron. Eng.*, 88, 1028 (2011).
- [10] Z. G. Zhu, B. S. Li, G. R. Li, W. Z. Zhang, and Q. R. Yin, *Mater. Sci. Eng.*, B117, 216 (2005).
- [11] J. H. Hu, H. L. Li, H. L. W. Chan, and C. L. Choy, *Sensor. Actuat.*, A88, 79 (2001).
- [12] H. L. Li, J. H. Hu, and H. L. W. Chan, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 51, 1247 (2004).
- [13] D. A. Buttry and M. D. Ward, *Chem. Rev.*, 92, 1355 (1992).
- [14] S. J. Martin, G. C. Frye, and K. O. Wessendorf, *Sensor. Actuat.*, A44, 209 (1994).