

유한요소법을 이용한 고온용 초음파 유량센서의 설계 및 평가

이주희^{1,2}, 김창일¹, 백종후¹, 조정호¹, 정영훈¹, 이영진^{1,a}, 남 산²

¹ 한국세라믹기술원

² 고려대학교 신소재공학부

Design and Evaluation of Ultrasonic Flow Meter for High Temperature by Using Finite Element Method

Joo-Hee Lee^{1,2}, Chang-IL Kim¹, Jong-Hoo Paik¹, Jeong-ho Cho¹, Young-Hun Jeong¹,
Young-Jin Lee^{1,a}, and Sahn Nahm²

¹ Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Seoul 153-801, Korea

² Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 136-701, Korea

(Received September 28, 2011; Revised October 12, 2011; Accepted October 18, 2011)

Abstract: An operation temperature of $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ based piezoelectric ultrasonic flowmeter was generally restricted to below 200°C due to a low depoling temperature of its ceramic material. Thus, a new designed piezoelectric ultrasonic flowmeter was fabricated in order to protect from the extremely hot fluid. Its structure is optimized by a finite element method to effectively stop heat flowing along a waveguide. Various materials such as Cu, Al, SUS were examined as a multi-plate radiation shield to enhance the performance of piezoelectric ultrasonic flowmeter. The SUS was evaluated as the most effective material to enhance the performance of piezoelectric ultrasonic flowmeter. As the number of plates of the radiation shield increased, the temperature at piezoelectric transducer away from the hot fluid was constantly decreased with a ratio of 3.12°C per the plate number.

Keywords: Ultrasonic flowmeter, Piezoelectric, Finite element method

1. 서 론

초음파 유량센서는 각종 배관의 외벽 또는 내부에 부착하여 가스, 스팀, 액체 등 유체의 속도를 측정하여 유량을 검출하는 장치로, 최근에 들어 간편한 설치 및 우수한 정밀성, 이물질에 의한 오동작 및 오차가 없어 유지 보수가 매우 간단한 장점으로 그 사용량이 점점 확대되고 있다 [1,2]. 그러나 초음파 유량계에서 초음파를 발생하고 수신하는 압전세라믹 진동자의 특성 상 200°C 이상의 고온 (TC)에서는 사용이

불가하여, 각종 화학공정, plant, 발전소 등에서는 사용에 한계를 가지고 있다.

현재 국내에 공급되고 있는 고온용 초음파 유량센서는 GE-Panametrics, Flexim 등 외국제품에 한정되어 있으며, 기기 당 수백~수천만원의 고가 정책으로 막대한 고부가가치 품목임에도 불구하고 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다.

국산의 외접형 초음파 유량계는 최근 화학 plant 등 전량 외국제품의 수입에 의존하고 있는 국내 고온용 초음파 유량계 시장으로의 확대를 꾀하고 있으나, 현재 출시되고 있는 초음파 유량계의 사용온도 구간

a. Corresponding author: yjlee@kicet.re.kr

이 120℃에 미치지 않아 제품 대응이 불가능한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 400℃ 이상의 고온에서 사용할 수 있는 압전형 초음파 유량계를 개발하고자 하였으며, 이를 위해 유한요소 해석을 통해 압전 세라믹 등 각 트랜스듀서 구성품의 물성을 설계하고 트랜스듀서의 최적구조를 도출하였다. 또한, 고온용 유량센서를 제작하고 시험 평가를 통하여 이론적 검증을 실시하였다.

2. 실험 방법

2.1 유한요소법을 통한 유량센서 설계

2.1.1 구조설계

초음파 유량계는 초음파가 발생하는 면과 접촉되는 정합층과 초음파를 흡수하는 포팅층으로 구성되어 있다 [3]. 고온의 배관에서 유량계를 사용하기 위해서는 정합층에서의 온도 전달 및 감소가 매우 중요하다. 따라서 유한요소프로그램인 ANSYS를 사용하여 재질과 열전도율에 따른 열해석을 위한 설계를 하였다.

압전소자 앞쪽에 서로 다른 물성의 재료를 넣어 다양한 해석이 가능하도록 3개의 층을 넣어 설계하였다. 또한 symmetric 구조로 2차원으로 모델링을 한 뒤, 회전하였을 시 그림 1의 오른쪽과 같이 3차원 구조물이 되도록 하였다.

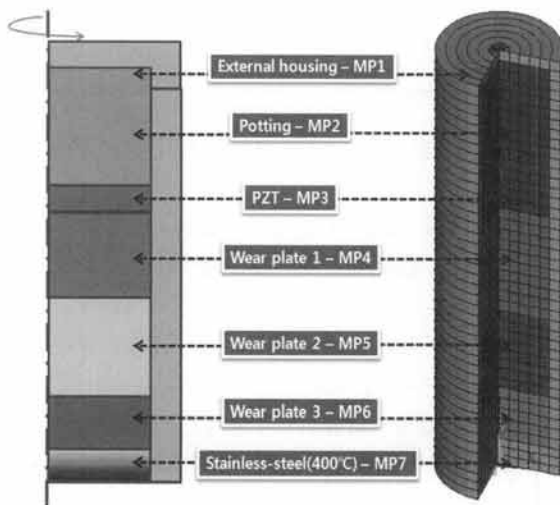


Fig. 1. Model of symmetric structure.

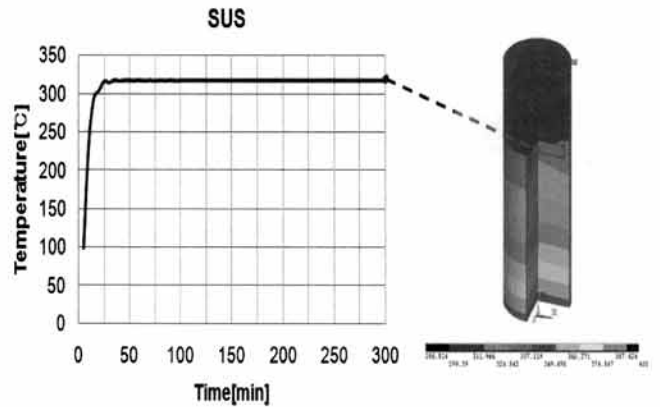


Fig. 2. Result of transient analysis by temperature.

도파봉은 금속재료로 재질을 변경한 뒤, 층을 나누지 않고 하나의 재질로써 시뮬레이션을 하였다. 그림 2는 SUS를 사용하였을 때의 온도 전달 특성을 해석한 모습이다. 물성 값은 표 1의 값을 사용하였으며, 외부 온도는 30℃로 설정하였고, 대류열전달 계수는 10 kcal/m²·hr·℃, 배관에 접촉되는 부분을 아래쪽으로 가정하여 400℃를 인가하는 조건으로 해석을 실시하였다. 그 결과 짧은 시간 동안에 온도가 320℃ 정도까지 급격히 올라가는 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 초음파유량계에 사용되는 압전세라믹 대부분은 300℃ 내외의 depoling 온도를 가지기 때문에 현재 대다수의 유량계 구조는 고온 사용에 적합하지 않음을 확인할 수 있었다 [5,6].

2.1.2 구조의 개선

금속재료의 특성상 열전도율이 높기 때문에 온도 전달을 억제하기 위한 방안으로써 그림 3과 같이 방열판 구조를 설정하였다. 방열판의 재질은 몸체 부분과 같은 재질을 사용하였고, 개수와 길이 변화에 따른 온도 변화를 보고자 하였다.

Table 1. Properties of materials.

Material	Density kg/m ³	Modulus of Elasticity GPa	Poisson's Ratio	Thermal conductivity W/m-K	Specific Heat Capacity J/kg-K	Emissivity	Melting Temperature ℃
SUS	7850	195	0.3	15.2	498	0.9	1400-1420
Al	8930	110	0.343	385	385	0.15	660.37
Cu	8930	110	0.343	210	900	0.05	1083.2-1083.6

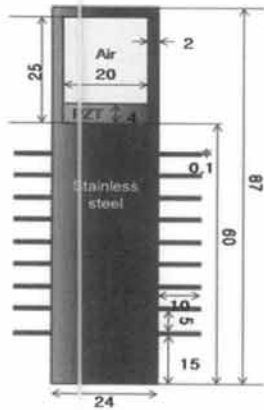


Fig. 3. FEM model designed ANSYS.

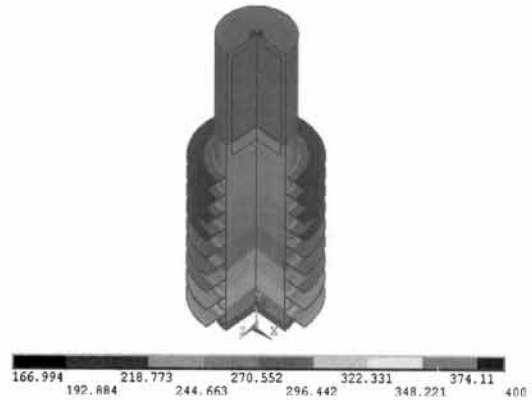


Fig. 4. Result of transient analysis by temperature.

Table 2. Result of simulation by condition.

#	Distance (mm)	Thickness (mm)	Radius (mm)	Plate Num.	Length (mm)	Temp. (°C)	Material
#1	5	0.1	10	7	50	265.6	SUS
#2			10	4	50	295.7	SUS
#3			5	7	50	294.0	SUS
#4			10	9	50	243.1	SUS
#5			10	9	100	135.7	SUS
#6			10	9	50	225.9	Cu
#7			-	-	-	-	100

표 2는 방열판의 개수와 판의 너비, 배관과 방열판까지의 도파관의 길이를 변화를 주어 얻은 결과표로 온도는 압전소자에 도달되는 온도이다. 방열판의 간격은 5 mm로 동일하게 주었고, 너비는 10 mm로 고정하였다. 일반적으로 도파관의 길이가 길어질수록 도달온도는 감소하게 되지만 측정감도가 낮아지기 때문에 길이 증가의 한계가 있다. 또한 방열판의 개수가 늘어날수록 도달 온도가 점차 낮아지는 모습도 볼 수 있었으며, #5와 #7을 비교해보면 동일 조건에서 방열판의 유무에 따라 100°C 정도 온도 차이가 나는 것을 볼 수 있었다.

그림 4는 400°C 온도를 하부에 가해 주었을 때, 4시간 후의 온도 분포를 나타낸 열 해석 결과이다. 방열판의 온도 분포를 보면 하부에서 상부로 올라갈수록 온도차를 확연히 구분할 수 있었다. 또한 그림 2와 비교하여 볼 때, 그림 4는 방열판이 없는 경우 소자 부분의 온도가 316°C까지 올라간 것에 비해 방열판을 추가한 것은 243°C의 결과가 나오므로써 방열판으로 인한 열감소가 크다는 것을 볼 수 있었다.

2.2 도파관의 길이 선정

유량센서로 사용하기 위한 최적의 도파관의 길이를 선정하기 위해, 사용 주파수인 500 kHz에서의 도파관의 길이에 따른 진동자의 변위 특성을 시뮬레이션 하였다. 변위는 도파관 끝단의 노드를 지정하여 결과를 출력하였으며, 그 결과를 표 3에 나타내었다. 각 60, 64, 70, 75 mm의 길이일 때 변위 값이 큰 것을 볼 수 있었다.

Table 3. Result of displacement by simulation.

[mm]	60	62	64	66	68	70	72	75
[mm]								
Displacement	0.18	0.16	0.18	0.12	0.09	0.12	0.08	0.11
	5	4	5	7	7	1	9	5

시뮬레이션 결과 값이 이론적으로 맞는지 검증하기 위해 식 1을 이용하여 최적 길이를 계산하였다 [4].

여기서 파동수 k 는 $k = \frac{\omega}{c_0}$ 이며, c_0 : 위상속도, ω : 주파수 이다.

$$L = \frac{(2n-1)\pi}{2k} \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (1)$$

Table 4. Result of displacement by calculation.

[mm]	1	2	3	4	5	6	7	8
Length	1.8	2.9	54.3	60.1	65.8	71.5	77.2	80.1

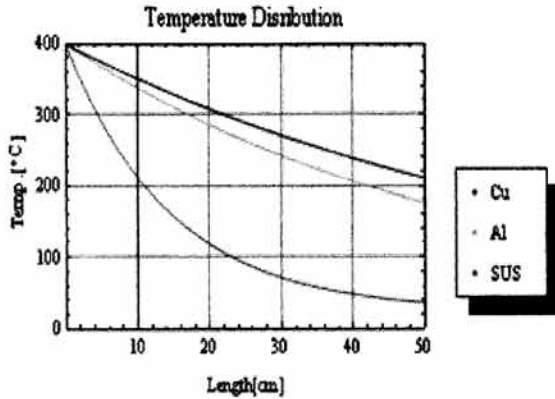


Fig. 5. Temperature distribution.

계산된 결과는 표 4와 같으며, 시뮬레이션으로 도출된 값과 비교해보면 유사한 길이에서 최대 변위 진폭을 가지는 것을 알 수 있었다.

도파관의 최소 길이를 알아보기 위하여 길이에 따른 온도 분포를 식 2를 통해 계산해보았다.

$$T_{(x)} = T_{\infty} + (T_b - T_{\infty})e^{-mx} \quad (2)$$

(T_{∞} : 주위 공기 온도 T_b : 도파관의 열원에서의 온도, $m = \sqrt{\frac{4h}{\beta D}}$, β : 재료의 열전도율, D: 도파관의 단면지름, h: 대류 열전달 계수)

계산 결과 그림 5와 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 도파관의 재질로써 Cu와 Al의 경우는 온도 감소가 SUS의 경우보다 감소폭이 적음을 알 수 있었고, SUS 재질을 사용할 때 소자가 안정적으로 작동되기 위해서는 길이가 최소 15 cm 이상이어야 한다는 것을 나타내고 있다. 하지만 도파봉의 길이가 길어질수록 초음파의 감도가 감소될 수 있다는 단점과 방열판 구조를 추가함에 따라 보다 짧은 길이에서 온도 감소 효과를 얻을 수 있기 때문에 표 4에 계산된 길이 중 71.5 mm의 길이를 선택하여 최종 설계를 하였다.

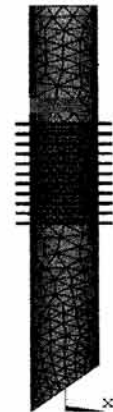


Fig. 6. Newly designed piezoelectric ultrasonic flowmeter.

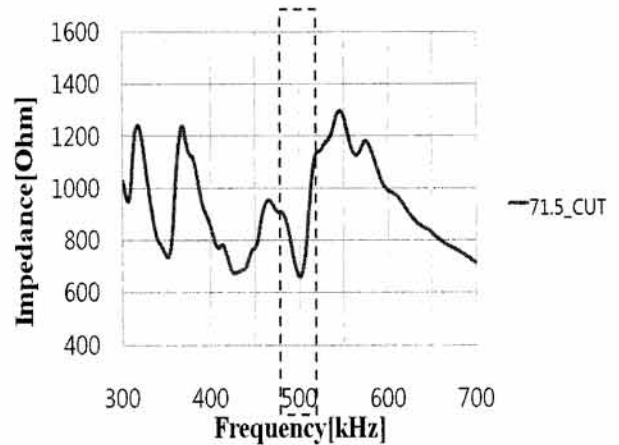


Fig. 7. Result of harmonic analysis.

그림 6과 7은 위의 결과들을 바탕으로 주파수 특성을 최종적으로 시뮬레이션한 결과를 나타내고 있다. 주파수 특성을 알아보기 위한 하모닉 해석 결과 4 mm 압전소자의 두께 모드인 500 kHz 근처에서 공진 그래프가 얻어짐을 확인할 수 있다.

2.3 시제품의 제작

그림 8은 시뮬레이션의 결과와 이론값을 바탕으로 제작한 샘플의 모습이다. 도파관 상단부에 두께 4 mm의 압전소자가 들어가며 폴리머 재료로 backing 하였다. 도파봉의 하단부분은 초음파 시차법의 특성상 배관에 부착할 때에 각도를 주기 위하여 45°각도로 커팅을 하였으며, 방열판 하단에서부터 맨 끝단의 중심부까지의 길이는 71.5 mm이다. 방열판은 각각 9개

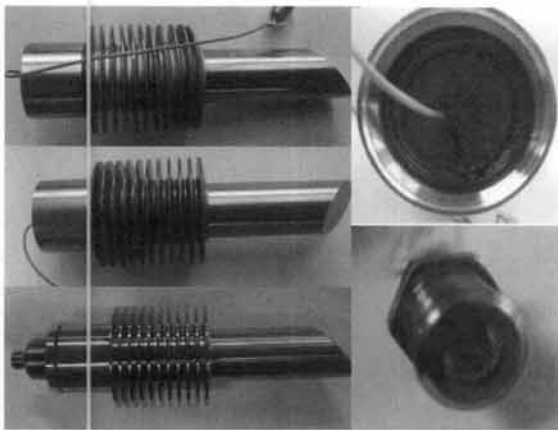


Fig. 8. The produced ultrasonic flowmeter.

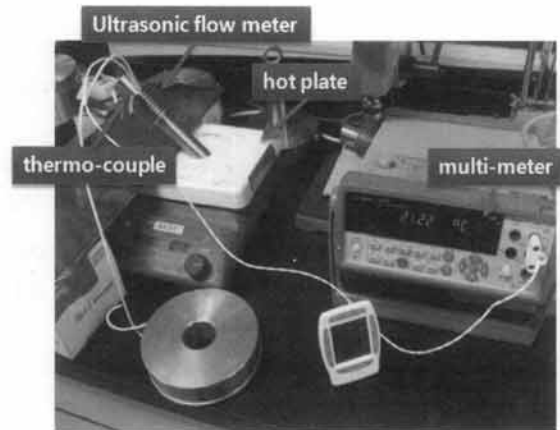


Fig. 9. Measuring equipment of temperature of the ultrasonic flow meter for high temperature.

와 11개의 방열판으로 구성된 샘플을 제작하였다. 또한 도파관의 재질은 SUS로 유지하되, 방열판의 재질을 Al, Cu, SUS로 제작하여 비교 샘플을 만들었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 특성

고온에서의 압전소자의 사용가능 여부를 알아보기 위해 그림 9와 같이 실험 장치를 꾸민 후 매분마다 온도를 측정하였다. 측정 시간은 온도의 평균화가 이루어지는 2시간 동안 측정하였고, 유량계가 배관 외부에 설치된다는 것을 토대로 밀폐된 공간이 아닌 일반 실내에 설치를 하였다. 측정할 때 공기 중의 온도는 실온인 20~25℃ 사이였고, 150℃까지 측정이 가능한 thermo-couple과 multi-meter를 이용하여 온도를 측정하였다. Hot-plate에서 방사되는 열이 thermo-couple 측정에 영향을 주지 않도록 하부에 차단막을 설치하였으며, 측정 위치는 소자가 들어있는 바로 아래쪽인 위쪽 방열판 부분에서 측정을 실시하였다.

그림 10은 hot-plate를 이용하여 하단부분에 400℃의 온도를 가해주면서 압전소자가 들어있는 상단 지점에서의 온도를 측정한 결과이다. 온도 측정샘플은 방열판 11개에 방열판과 하단의 접촉 부분의 중심 길이가 71.5 mm인 것을 사용하였다. 측정 결과 압전소자의 도달 온도가 모두 90℃이하로 측정되어 고온의 배관에서 사용 가능함을 확인할 수 있었다. 사용 재질의 경우 SUS가 도달 온도가 가장 낮았으며, 다음으로

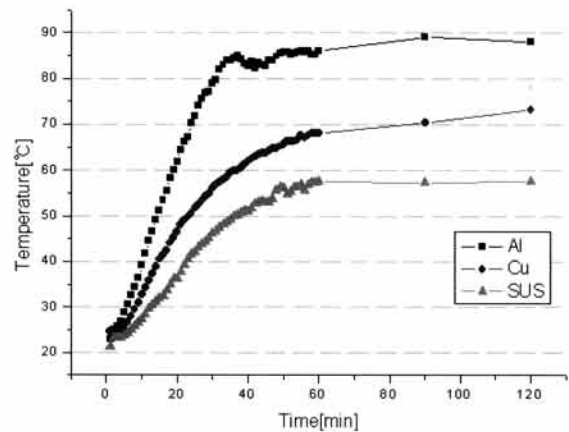


Fig. 10. Results of temperature with changing of the various materials.

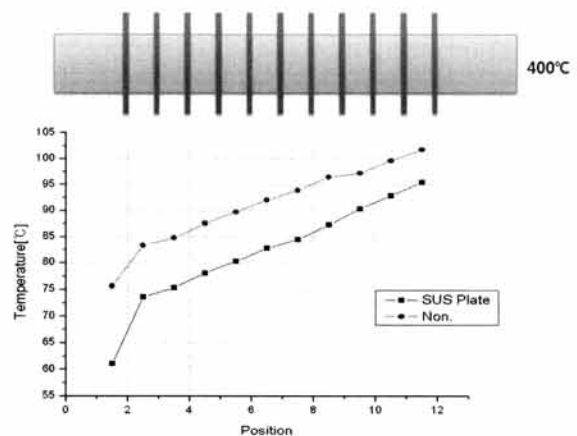


Fig. 11. Temperature of interval by plates of the radiation shield.

Cu<Al 순으로 낮았다. 이러한 결과는 SUS가 열전도도가 15.2 W/m-K 가장 낮으며, 비열 값은 498 J/kg-°C로 다소 높은 값을 가져서 나타난 결과로 보인다.

그림 11은 400°C 온도를 2시간 동안 가해준 뒤, 방열판 사이마다 온도를 측정하여 어느 정도의 감소효과가 있는지를 측정한 결과이다. 이것 또한 thermo-couple를 이용하여 측정하였으며, 방열판 하나 당 약 3.12°C 정도의 감소 효과가 있는 것을 알 수 있었다. 또한 최종적인 도달 온도가 100°C 내외로 측정이 되어 고온에서도 충분히 사용 가능성을 확인할 수 있었다.

3.2 임피던스 특성

다음의 그림 12는 앞서 제작한 방열판을 포함한 샘플의 임피던스를 측정한 결과이다. 측정 결과 SUS재질의 방열판을 가진 샘플이 500 kHz에서 공진특성을 가지는 결과를 볼 수 있었다.

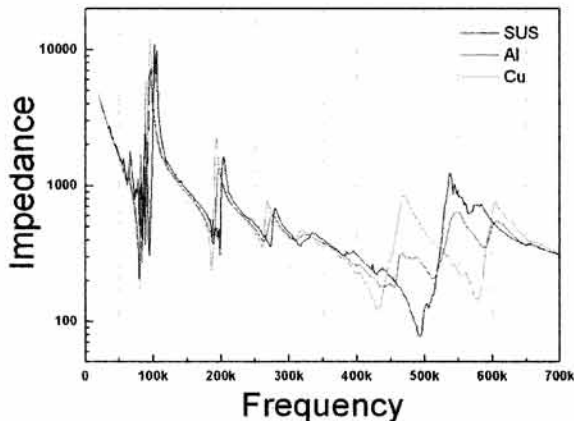


Fig. 12. Resonance frequency of ultrasonic flowmeter.

4. 결론

본 연구에서는 고온에서도 사용가능한 유량계를 제작하기 위해 다음과 같은 단계를 진행하였다.

첫 번째, 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 기존의 외접형의 유량계를 설계하여 취약점을 확인하였으며, 이를 통해 개선된 구조물을 설계하였다.

두 번째, 시뮬레이션을 통해 다양한 금속 재질과 최적의 도파관의 길이, 방열판의 너비 등의 경향을 분석하였고, 최종적으로 도파관의 길이는 71.5 mm, 방열판의 개수는 11개, 방열판의 너비는 5 mm로 선정하였다.

세 번째, 샘플의 제작을 통하여 실험한 결과, 400°C의 온도를 2시간 동안 인가하였을 때 최종 소자에 도달되는 온도는 100°C 근처로 방열판에 의한 온도 감소효과가 매우 탁월함을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] Y. R. Noh, *Journal of Acoustical Society of Korea*, 12, 72 (1993).
- [2] S. Y. Hwang, *Characteristics of the flowmeter market in 2007* (Control & Instrumentation, Korea, 2007), p. 11.
- [3] J. I. Hong and S. C. Lee, *KIEE*, 6, 131 (2002).
- [4] I. S. Choi, H. Y. Chun, J. O. Kim, and I. S. Kim, *Journal of Acoustical Society of Korea*, 22, 545 (2003).
- [5] H. H. Law, P. L. Rossiter, G. P. Simon, and J. Unsworth, *J. Mater. Sci.*, 30, 4901 (1995).
- [6] D. Q. Xiao, J. G. Wu, L. Wu, J. G. Zhu, P. Yu, D. M. Lin, Y. W. Liao, and Y. Sun, *J. Mater. Sci.*, 44, 5408 (2009).