

홍재일, 이상철  
 동서울대학 전기정보제어과

Development of the Ultrasonic Sensor for Gas Flowmeter

Jae-Il Hong, Sang-Cheol Lee  
 Dept. of Electrical Information Control, Dong Seoul College

**Abstract** - In this paper, the ultrasonic sensor for gas flowmeter was simulated, fabricated and measured with assembly step and piezoelectric vibrator layers. The simulated resonant frequency and the measured resonant frequency were similar except sensor 2. The simulated resonant frequency of sensor 3 was 48 kHz and the measured resonant frequency of sensor 3 was 45.2 kHz. From the results, the ultrasonic sensor for flowmeter could be designed and expected without fabrication.

1. 서 론

초음파센서를 이용한 기체유량계는 초음파를 이용한 새로운 방식의 유량계로서 가스의 정밀한 유량을 측정하는데 적합한 유량계이다. 측정원리는 두개의 초음파 센서를 배관양쪽에 설치하여 양쪽에서 송수신을 반복하여 초음파의 도달하는 시간차를 이용하여 유속을 구하며 이를 체적유량으로 환산하여 표현한다. 초음파 유량계는 차압식 유량계에 비해 압력손실이 없으며 유량측정 범위가 넓고 설치 및 정비가 용이한 장점이 있다[1].

초음파 기체유량계의 특징으로는 다른 기체유량계에 비하여 높은 정밀도 유지가 가능하고 설치 및 정비가 용이(On-Line중 센서정비 가능)하며 비접촉식이므로 압력손실이 발생하지 않으며 유량의 측정범위가 넓어서 제철소의 LDG, COG, BFG, Gas Line에 적합하다[2,3].

본 연구에서는 기체유량계용 센서의 체계적인 설계 및 제작을 위해 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 초음파센서의 조립단계별로 압전진동자, 정합층(matching layer), 하우징(housing), 포팅(potting), 캡(cap)의 변화에 따라 특성 해석을 하였다. 또한 다양한 용도의 센서 제작을 위하여 압전진동자의 적층수를 1층, 2층, 3층으로 변경하여 설계 및 시뮬레이션하였으며 그 결과에 따라서 제작을 하였다.

2. 실 험

2.1 유한요소해석

(1) 조립단계별 해석

기체유량계용 센서의 유한요소해석을 하기 위하여 먼저 그림 1과 같이 2차원 구조를 설계한다. 구체적으로 설명하면 3개의 압전세라믹(16Φ×8.5mm)을 분극하여 병렬로 적층하고 초음파가 발생하는 면에 정합층(6.0mm)을 붙이고 뒷부분에는 초음파를 흡수하는 포팅층(12.45mm)을 두고 스테인레스스틸 재질로 된 하우징을 하고 캡(29.7mm)을 씌운다.

표1의 각 재료정수를 입력하여 적절하게 유한요소로 나눈 후 압전방정식이 내장된 ANSYS 프로그램으로 시뮬레이션하여 공진주파수를 구하였다[4].

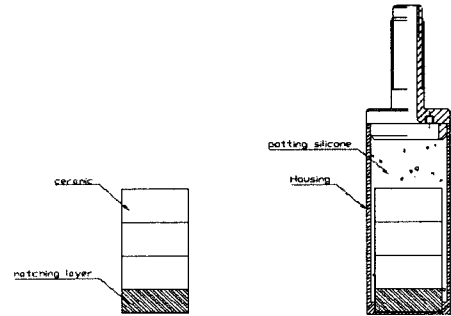


그림 1. 기체유량계용 초음파센서의 모델  
 Fig. 1. Ultrasonic sensor model for gas flowmeter

표 1. 기체유량계용 초음파센서의 재료정수  
 Table 1. Material constants of ultrasonic sensor for gas flowmeter

재 료	항 목	정 수
EC-65 (PZT-5A)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7750
	$\epsilon_{33}^T$ (10 <sup>-8</sup> F/m)	1.51
	$\epsilon_{11}^T$ (10 <sup>-8</sup> F/m)	1.53
	$c_{11}^E$ (10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> )	12.1
	$c_{12}^E$ (10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> )	7.54
	$c_{33}^E$ (10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> )	11.1
	$c_{13}^E$ (10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> )	7.52
	$c_{44}^E$ (10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> )	2.11
	$c_{66}^E$ (10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> )	2.26
	$e_{33}$ (C/m <sup>2</sup> )	15.8
	$e_{31}$ (C/m <sup>2</sup> )	-5.4
	$e_{15}$ (C/m <sup>2</sup> )	12.3
	Epoxy	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
영률 E(N/m <sup>2</sup> )		4.17×10 <sup>9</sup>
G(N/m <sup>2</sup> )		1.52×10 <sup>9</sup>
	$\epsilon_r$	2.3
Air	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.293
	영률 E(N/m <sup>2</sup> )	1.49×10 <sup>5</sup>
	G(N/m <sup>2</sup> )	1×10 <sup>-5</sup>
	$\epsilon_r$	1.0
Stainless Steel	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	8470
	영률 E(N/m <sup>2</sup> )	21.5×10 <sup>10</sup>
	G(N/m <sup>2</sup> )	8.39×10 <sup>10</sup>

(2) 압전진동자의 적층수에 따른 해석

일반적으로 압전진동자를 적게 적층함에 따라서 공진 주파수가 높아진다. 주위의 여러 가지 주파수 간섭 등을 피하기 위해서는 높은 주파수의 초음파센서가 필요하므로 본 연구에서는 압전진동자의 적층수를 3층에서 2층과 1층으로 감소하여 시뮬레이션 하였으며 그 모델은 그림 2와 같다.

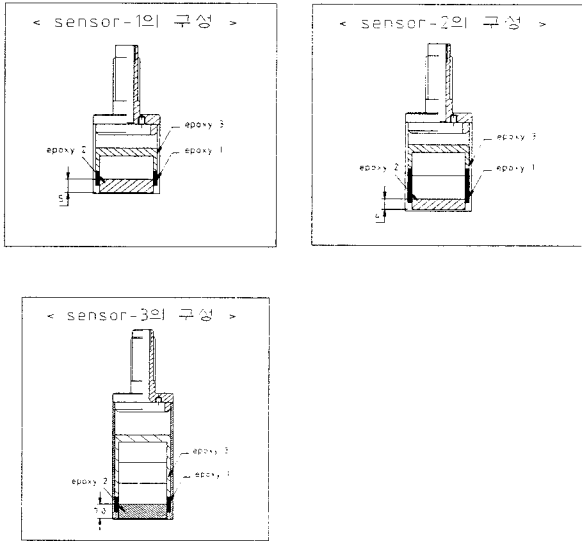
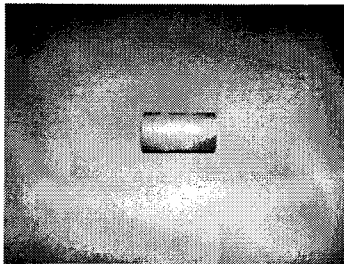


그림 2. 압전진동자의 적층수에 따른 초음파센서 모델  
Fig. 2. Ultrasonic sensor model with the piezoelectric vibrator layers

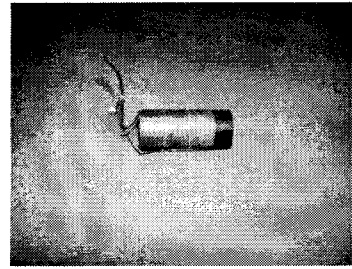
2.2 초음파센서의 제작

- (1) 평량 : 전자저울을 이용하여 EC-65 압전세라믹 분말을 일정하게 평량한다.
- (2) 성형 : 유압프레스를 이용하여 원통형 금속몰드에 넣어 1 ton/cm<sup>2</sup>의 압력으로 일축 성형한다.
- (3) 소성 : 성형된 압전세라믹을 1200℃의 전기로에서 2시간 동안 소성한다.
- (4) 분극 : 소성된 압전진동자의 상하면에 은전극을 도포하여 120℃의 실리콘유 속에서 전계 30kV/cm로 분극하여 압전성을 갖게 한다.
- (5) 압전진동자 적층 : 압전진동자 3개를 분극 방향 반대로 하여 도전성 접착제로 가압하여 적층한다.
- (6) 센서 조립 : 압전진동자에 전면의 에폭시류 정합층(matching layer)을 붙인 다음 리드선을 연결하여 스텐레스 하우징속에 넣고 후면을 에폭시류 포팅층(potting layer)으로 채우고 캡을 씌워서 완성한다.

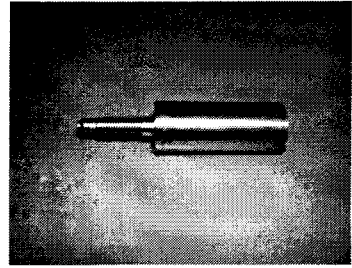
그림 3은 센서 조립 공정에서 단계별로 찍은 사진이다. 그림 3(a)는 적층된 압전진동자이며 그림 3(b)는 압전진동자와 정합층이 결합하여 리드선을 연결한 상태이며 그림 3(c)는 스텐레스 하우징속에 넣고 캡을 부착하여 완성한 상태이다.



(a) 압전진동자



(b) 압전진동자+정합층



(c) 완성된 센서

그림 3. 초음파센서의 조립 단계  
Fig. 3. Assembly step of ultrasonic sensor

그림 4는 압전진동자의 적층수에 따라서 종류별로 제작한 초음파센서이다. 그림 3에서 완성된 센서는 그림 4의 가장 우측에 있으며 가운데 것은 압전진동자 2개를 적층하여 만든 것이고 좌측 것은 압전진동자 한 개로 만든 것이다.

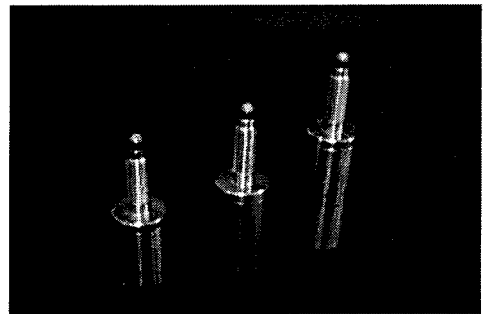


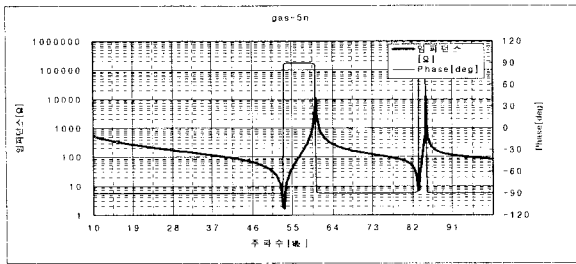
그림 4. 압전진동자의 적층수에 따라 제작된 초음파센서  
Fig. 4. Fabricated ultrasonic sensor with the piezoelectric vibrator layers

3. 결과 및 고찰

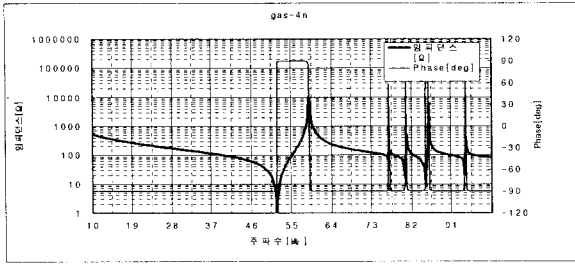
3.1 조립단계별 해석

유한요소해석법에 따라서 ANSYS 프로그램을 이용하여 2차원 모델로 해석한 결과 공진 주파수는 세라믹, 정합층, 하우징, 포팅층, 캡에 따라서 변화하는 것을 알 수 있었으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

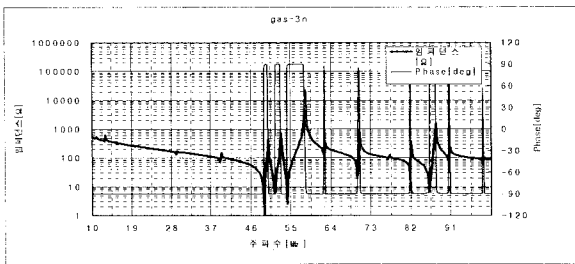
압전진동자만을 3개 적층한 경우 공진주파수는 53.2 kHz이었으며 세라믹과 정합층이 결합되었을 경우 51.85 kHz이었고 세라믹과 정합층과 하우징을 한 경우 49.15 kHz이었다. 그리고 뒷부분에 포팅층을 넣었을 경우 47.125 kHz, 마지막으로 캡까지 씌워 완성된 센서의 경우 47.8 kHz이었다.



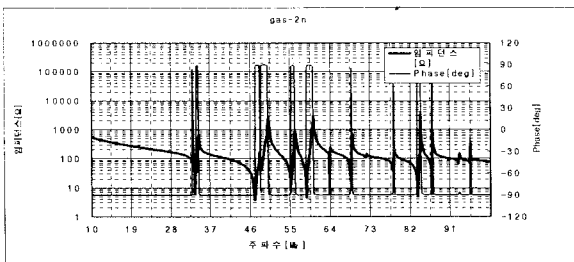
(a) 세라믹만의 해석 결과(fr = 53.2 kHz)



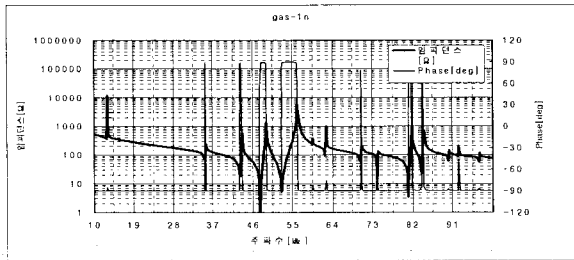
(b) 세라믹+정합층의 해석 결과(fr = 51.85 kHz)



(c) 세라믹+정합층+하우징의 해석 결과(fr = 49.15 kHz)



(d) 세라믹+정합층+하우징+포팅층의 해석 결과(fr = 47.125 kHz)



(e) 세라믹+정합층+하우징+포팅층+캡의 해석 결과(fr = 47.8 kHz)

그림 5. 조립단계별로 시뮬레이션한 공진 특성  
Fig. 5. Simulated resonant characteristics with assembly step

실제로 제작하여 측정한 결과를 그림 6에 나타내었으며 조립단계별로 시뮬레이션한 결과와 측정결과를 표 2에 정리하였다. 그림 6에서 c는 세라믹만을 3개 적층한 경우이며 공진주파수는 46.2 kHz이었으며 mc는세라믹과

정합층이 결합되었을 경우이며 44.5 kHz이었고 hmc는 세라믹과 정합층과 하우징을 한 경우이며 44.0 kHz이었다. 그리고 hmcp는 뒷부분에 포팅층을 넣었을 경우이며 44.7 kHz, 마지막으로 sensor는 캡까지 씌워 완성된 센서의 경우이며 45.9 kHz로 시뮬레이션 결과와 다소 차이가 있었으나 유사한 경향을 나타내었다. 즉 압전진동자에 여러 가지의 부속물이 붙게 될수록 공진주파수가 감소됨을 보여주고 있다.

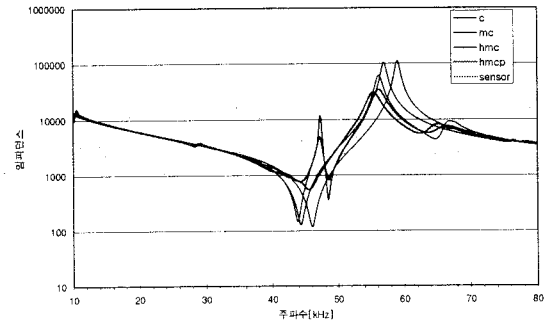


그림 6. 조립단계별로 측정된 공진특성

Fig. 6. Measured characteristics with assembly step

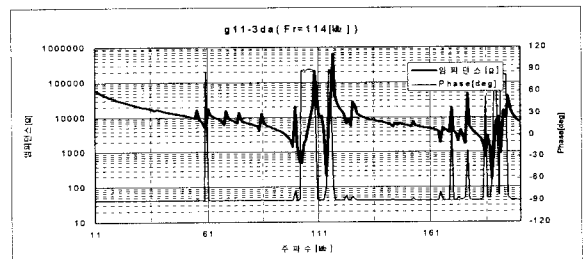
표 2. 조립단계별 공진주파수

Table 2. Resonant frequency with assembly step

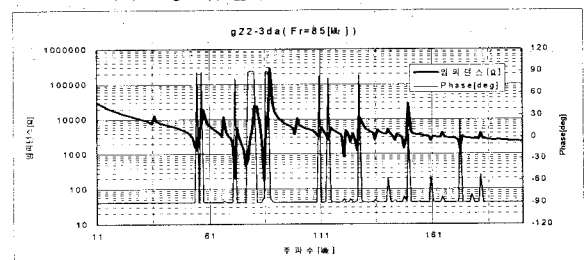
기호	시뮬레이션결과 fr[kHz]	측정 결과 fr[kHz]
c	53.2	46.2
mc	51.85	44.5
mch	49.15	44.0
mchp	47.125	44.7
sensor	47.8	45.9

### 3.2 압전진동자의 적층수에 따른 해석

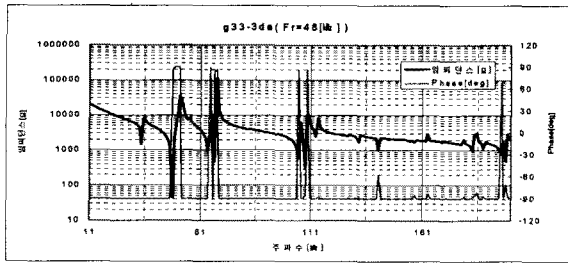
시뮬레이션 결과를 그림 7에 나타내었으며 이 결과에 따라서 실제로 제작하여 만든 센서의 공진주파수를 측정 한 결과를 그림 8에 나타내고 두 가지를 서로 비교한 것을 표 3에 나타내었다.



(a) 1층 압전진동자(fr = 114 kHz)



(b) 2층 압전진동자(fr = 85 kHz)



(c) 3층 압전진동자(fr = 48 kHz)

그림 7. 압전진동자의 적층수에 따라 시뮬레이션한 공진 특성

Fig. 7. Simulated resonant characteristics with the piezoelectric vibrator layers

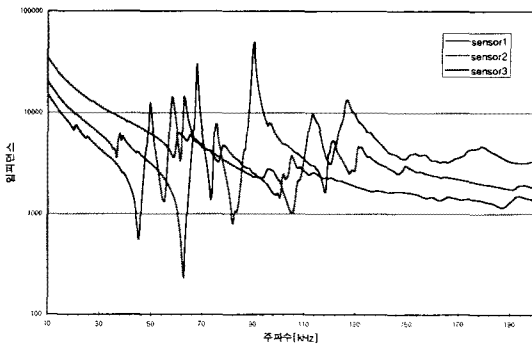


그림 8. 압전진동자의 적층수에 따라 측정된 공진 특성  
Fig. 8. Measured resonant characteristics with the piezoelectric vibrator layers

표 3. 압전진동자의 적층수에 따른 공진주파수  
Table 3. Resonant frequency with the piezoelectric vibrator layers

기호	시뮬레이션결과 fr[kHz]	측정 결과 fr[kHz]
sensor1	114	105.5
sensor2	85	62.7
sensor3	48	45.2

#### 4. 결 론

본 과제에서는 기체유량계용 센서의 체계적인 설계 및 제작을 위해 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 초음파센서의 조립단계별로 압전진동자, 정합층(matching layer), 하우징(housing), 포팅(potting), 캡(cap)의 변화에 따라 특성 해석을 하고 실제로 제작하여 공진특성을 측정하였다. 또한 다양한 용도의 센서 제작을 위하여 압전진동자의 적층수를 1층, 2층, 3층으로 변경하여 설계 및 시뮬레이션하였으며 그 결과에 따라서 제작을 하였다.

그 결과, 시뮬레이션한 공진주파수와 센서를 제작하여 측정된 공진주파수는 sensor2를 제외하고 거의 일치하였으며 압전진동자가 1개인 경우 공진주파수가 114 kHz, 2개인 경우 85 kHz, 3개인 경우 48 kHz이었다. 따라서 유한요소법을 이용하여 원하는 주파수대에 따른 기체유량계용 초음파센서의 설계·제작이 가능하게 되었으며 sensor3의 경우는 이미 생산하고 있다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 아이에스텍(주), Ultrasonic gas flowmeter(sondar 6000) 매뉴얼, 2001
- [2] Lynnworth, L.C., Ultrasonic Flowmeters, Chap.5, in Physical Acoustics-Principles and Methods, pp.407-525, Academic Press, 1979
- [3] Lynnworth, L.C., Ultrasonic Measurement for Process Control, Theory, Techniques, Applications, Academic Press, 1989
- [4] 홍재일, "GIS 부분방전검출용 결합진동모드 AE센서의 특성", 전기학회 논문지, 제50P권, 제2호, pp.71-76, 2001