

Design and Resonant Characteristics of the Ultrasonic Sensor for Gas Flowmeter

洪 在 一* · 李 相 喆**
(Jae-Il Hong · Sang-Cheol Lee)

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

Key Words : Ultrasonic sensor, Gas flowmeter, Piezoelectric vibrator, Resonant frequency, simulation

1. 서 론

최근 들어 연료의 다변화에 따라 액체 연료에 비해서 환경오염이 비교적 적은 가스를 많이 사용하게 되었으며 이를 측정하는 계측기의 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 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 제철소에서 발생하는 LDG(Linze Donawitz Gas), COG(Coke Oven Gas), BFG(Blast Furnace Gas) 등의 Gas Line에 적합하다[2-4].

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

경하여 설계 및 시뮬레이션하였으며 그 결과에 따라서 제작을 하였다.

2. 초음파 가스유량계의 원리

전달 시간차에 의한 측정방법은 그림 1에서 나타낸 것처럼 두개의 초음파 센서를 배관 양쪽에 경사지게 설치해두고 상류측 초음파 센서에서 하류측 초음파 센서로 유체를 통과해서 초음파를 전파하고 다시 반대로 하류측 초음파 센서에서 상류측 초음파 센서로 유체를 통과해서 초음파를 전파하여서 그때의 각각의 전달시간 t_{up} , t_{dn} 를 측정하여 유속을 계산한다

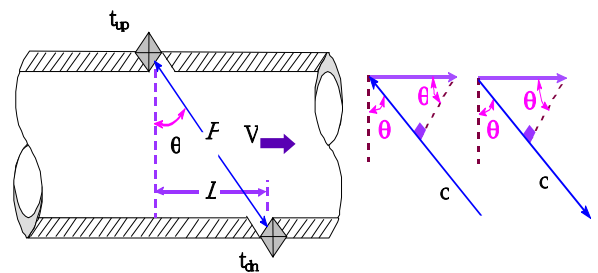


그림 1. 전달 시간차 측정법에 대한 개념
Fig. 1. diagram of transmission time difference method

유체 유동이 없을 경우와 유체유동이 있는 경우에 대한 전달시간 t_{up} , t_{dn} 사이의 상관관계는 다음과 같이 구할 수 있다.

* 正 會 員 : 東 西 京 大 學 電 氣 情 報 制 御 學 科 副 教 授

** 正 會 員 : 東 西 京 大 學 電 氣 情 報 制 御 學 科 教 授

接 受 日 字 : 2002年 10月 23日

最 終 完 了 : 2002年 11月 20日

$$t_{up} = \frac{P}{c} \qquad t_{up} = \frac{P}{c - V \sin \theta}$$

$$t_{dn} = \frac{P}{c} \qquad t_{dn} = \frac{P}{c + V \sin \theta}$$

$$\Delta t = t_{up} - t_{dn} = 0 \qquad \Delta t = t_{up} - t_{dn}$$

유동이 없는 경우 유동이 있는 경우

여기서 t_{up} = 상류측 전달시간
 t_{dn} = 하류측 전달시간
 V = 유체의 유속
 c = 유체의 음속
 t = 전달 시간차
 P = 초음파 진행거리
 L = 축방향 초음파센서 사이 거리
 θ = 초음파센서의 경사각

유체 유동이 있는 경우 유체유속 V 와 전달시간 t_{up} , t_{dn} 사이의 상관관계는 다음과 같다.

$$\therefore V = \frac{P^2 \left(\frac{1}{t_{dn}} - \frac{1}{t_{up}} \right)}{2L \left(\frac{t_{up} - t_{dn}}{t_{dn} \times t_{up}} \right)}$$

배관내의 실제유속 V_{act} 은 초음파 유량계의 전달시간차에 의해서 구한 유속 V 와 차이가 있다. 이런 이유로 시간차에서 구한 유속 V 를 보정하기 위한 계수를 K 라 하여 다음과 같이 나타낸다.

$$K = \frac{V}{V_{act}}$$

그리고 실제 초음파 유량계에서는 검출한 이론적인 유속 V 를 유량 보정계수 K 로 보정하여 여기에다 관 단면적 A 를 곱하여 유량을 구하고 있다.

$$Q_{act} = V_{act} \cdot A = \frac{\pi D^2}{4} \cdot V_{act} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{1}{K} V$$

여기서 Q_{act} = 실제유량 [m³/sec]

그리고 위의 실제 유량으로부터 다음 식에 의해서 표준유량(standard volumetric flow rate)를 구한다.

$$Q_{std} = Q_{act} \times \frac{P_{act}}{P_{std}} \times \frac{T_{std}}{T_{act}}$$

여기서 Q_{std} = 표준유량 [Nm³/sec]

P_{act} = 실제압력 [Pa]

P_{std} = 표준압력 [Pa]

→ ($P_{std} = 1$ [atm] = 14.7 [psi] = 1013 [mbar])

T_{act} = 실제온도 [K]

T_{std} = 표준온도 [K]

$$\rightarrow (T_{std} = 273.15 \text{ [K] 유럽}$$

$$T_{std} = 293.15 \text{ [K] 미국}$$

$$T_{std} = 277.15 \text{ [K] POSCO 기준온도)}$$

표준유량 Q_{std} 를 계산할 때에 표준온도나 압력이 지역별로 차이가 있기 때문에 주의를 해야만 한다. 위에서 나타낸 것과 같이 POSCO에서는 표준상태를 1 atm, 277.15 K(4C)로 하여 사용하고 있다. 따라서 표준유량을 계산할 때 이 값을 기준으로 계산한다.

3. 실험

3.1 유한요소해석

(1) 조립단계별 해석

기체유량계용 센서의 유한요소해석을 하기 위하여 먼저 그림 2의 좌측과 같이 2차원 구조를 설계한다. 구체적으로 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. 2차원으로 설계된 것을 기초로 3차원으로 만든 후 적절하게 유한요소로 나눈 모양을 그림 2의 우측에 나타내었다.

표 1의 각 재료정수와 경계 조건(입력 220[V])을 입력한 다음 압전 방정식이 내장된 ANSYS 프로그램으로 시뮬레이션하여 공진 주파수를 구하였다[5].

(2) 압전진동자의 적층수에 따른 해석

일반적으로 압전진동자를 적게 적층함에 따라서 공진주파수가 높아진다. 주위의 여러 가지 주파수 간섭 등을 피하기 위해서는 높은 주파수의 초음파센서가 필요하므로 본 연구에서는 압전진동자의 적층수를 1층에서 2층과 3층으로 변경하며 시뮬레이션 하였으며 그 구조 및 모델은 그림 3과 같다.

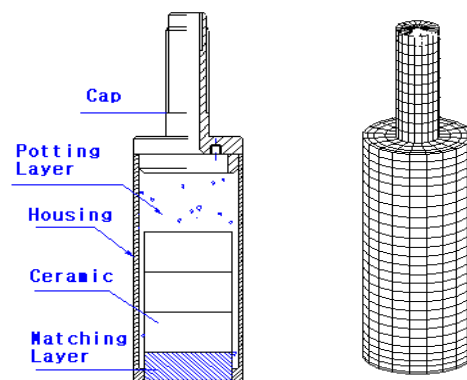
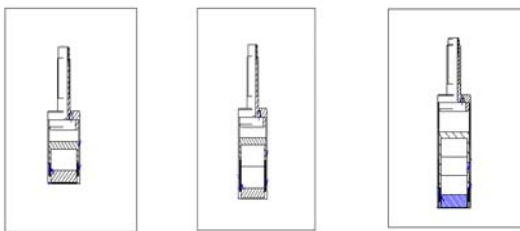


그림 2. 기체유량계용 초음파센서의 모델
 Fig. 2. Ultrasonic sensor model for gas flowmeter

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)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	7750
	$\epsilon_{33}^T (10^{-8})$	1.51
	F/m	1.53
	$\epsilon_{11}^T (10^{-8})$	12.1
	F/m	7.54
	$c_{11}^E (10^{10} \text{ N/m}^2)$	11.1
	$c_{12}^E (10^{10} \text{ N/m}^2)$	7.52
	$c_{33}^E (10^{10} \text{ N/m}^2)$	2.11
	$c_{13}^E (10^{10} \text{ N/m}^2)$	2.26
	$c_{44}^E (10^{10} \text{ N/m}^2)$	15.8
	$c_{66}^E (10^{10} \text{ N/m}^2)$	-5.4
	$e_{33} (\text{C/m}^2)$	12.3
	$e_{31} (\text{C/m}^2)$	
$e_{15} (\text{C/m}^2)$		
Epoxy	$\rho(\text{kg/m}^3)$	2139
	영률 E(N/m ²)	4.17×10^9
	G(N/m ²)	1.52×10^9
	ϵ_r	2.3
Air	$\rho(\text{kg/m}^3)$	1.293
	영률 E(N/m ²)	1.49×10^5
	G(N/m ²)	1×10^{-5}
	ϵ_r	1.0
Stainless Steel	$\rho(\text{kg/m}^3)$	8470
	영률 E(N/m ²)	21.5×10^{10}
	G(N/m ²)	8.39×10^{10}



(a) S1 (b) S2 (c) S3

그림 3. 압전진동자의 적층수에 따른 초음파센서 모델

Fig. 3. Ultrasonic sensor model with the piezoelectric vibrator layers

3.2 초음파 센서의 제작

- (1) 평량 : 전자저울을 이용하여 EC-65(PZT 5계) 압전 세라믹 분말을 일정하게 평량한다.
- (2) 성형 : 유압프레스를 이용하여 원통형 금속몰드에 넣어 1 ton/cm²의 압력으로 일축 성형한다.
- (3) 소성 : 성형된 압전세라믹을 1200℃의 전기로에서 2시간 동안 소성한다.
- (4) 분극 : 소성된 압전진동자의 상하면에 은전극을 도

포하여 120℃의 실리콘유 속에서 전계 30 [kV/cm]로 분극하여 압전성을 갖게 한다.

(5) 압전진동자 적층 : 압전진동자 3개를 분극 방향을 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 4는 센서 조립 공정에서 단계별로 찍은 사진이다. 그림 4(a)는 적층된 압전진동자이며 그림 4(b)는 압전진동자와 정합층이 결합하여 리드선을 연결한 상태이며 그림 4(c)는 스텐레스 하우징속에 넣고 캡을 부착하여 완성한 상태이다.



(a) 압전진동자



(b) 압전진동자+정합층



(c) 완성된 센서

그림 4. 초음파센서의 조립 단계

Fig. 4. Assembly step of ultrasonic sensor

그림 5는 압전진동자의 적층수에 따라서 종류별로 제작한 초음파센서이다. 그림 4에서 완성된 센서 S3는 그림 5의 가장 우측에 있으며 가운데 것은 압전진동자 2개를 적층하여 만든 S2이고 좌측 것은 압전진동자 한 개로 만든 S1이다.



그림 5. 압전진동자의 적층수에 따라 제작된 초음파센서

Fig. 5. Fabricated ultrasonic sensor with the piezoelectric vibrator layers

3. 결과 및 고찰

4.1 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 6에 나타내었다.

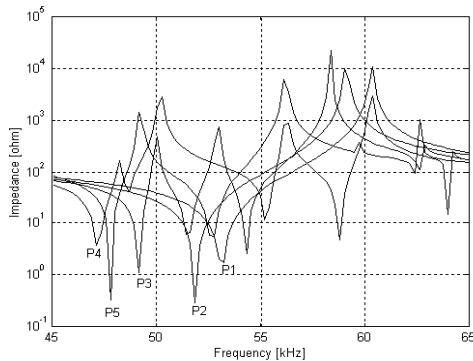


그림 6. 조립단계별로 시뮬레이션한 공진 특성
Fig. 6. Simulated resonant characteristics with assembly step

압전진동자만을 3개 적층한 경우 P1의 공진주파수는 53.2 kHz이었으며 세라믹과 정합층이 결합되었을 경우 P2의 공진주파수는 51.85 kHz이었고 세라믹과 정합층과 하우징을 한 경우 P3의 공진주파수는 49.15 kHz이었다. 그리고 뒷부분에 포팅층을 넣었을 경우 P4의 공진주파수는 47.125 kHz, 마지막으로 캡까지 씌워 완성된 센서의 경우 P5의 공진주파수는 47.8 kHz이었다.

실제로 제작하여 측정한 공진 특성을 그림 7에 나타내었으며 조립단계별로 시뮬레이션한 결과와 측정결과를 표 2에 정리하였다. 그림 7에서 P1은 세라믹만을 3개 적층한 경우이며 공진주파수는 46.2 kHz이었으며 P2는 세라믹과 정합층이 결합되었을 경우이며 44.5 kHz이었고 P3는 세라믹과 정합층과 하우징을 한 경우이며 44.0 kHz이었다. 그리고 P4는 뒷부분에 포팅층을 넣었을 경우이며 44.7 kHz, 마지막으로 P5는 캡까지 씌워 완성된 센서의 경우이며 45.9 kHz로 시뮬레이션 결과와 다소 차이가 있었으나 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 압전진동자에 여러 가지의 부속물이 부착될수록 공진주파수가 감소됨을 보여주고 있다.

4.2 압전진동자의 적층수에 따른 해석

압전진동자의 적층수에 따른 시뮬레이션 결과를 그림 8에 나타내었다. 압전진동자를 1개 사용한 S1의 공진주파수가 114 kHz이었고 압전진동자를 2개 사용한 S2의 공진주파수가 85 kHz이었고 압전진동자를 3개 사용한 S3의 공진주파수가 48 kHz이었다.

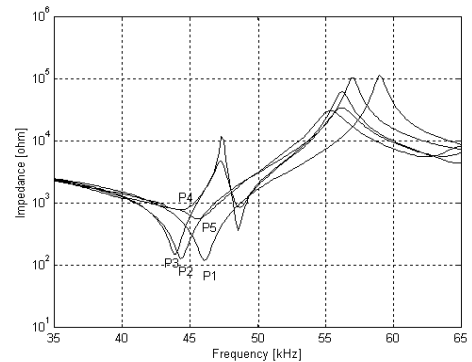


그림 7. 조립단계별로 측정된 공진 특성
Fig. 7. Measured resonant characteristics with assembly step

표 2 조립단계별 공진주파수
Table 2 Resonant frequency with assembly step

기호	시뮬레이션 결과 fr[kHz]	측정 결과 fr[kHz]
P1	53.2	46.2
P2	51.85	44.5
P3	49.15	44.0
P4	47.125	44.7
P5	47.8	45.9

이 결과에 따라서 실제로 제작하여 만든 초음파센서의 공진주파수를 측정된 결과를 그림 9에 나타내고 두 가지를 서로 비교한 것을 표 3에 나타내었다. 실제로 제작하여 측정된 초음파센서의 공진주파수는 S1 : 105.5 kHz, S2 : 62.7 kHz, S3 : 45.2 kHz로서 S2의 경우 오차가 가장 컸으며 전체적인 경향은 압전진동자의 적층수가 증가함에 따라 공진주파수가 감소함을 나타내었다. 이러한 결과로부터 용도에 따라 적절한 주파수의 초음파센서를 설계 시 압전진동자 몇 개를 적층해야 할 지를 예측할 수 있게 되었다

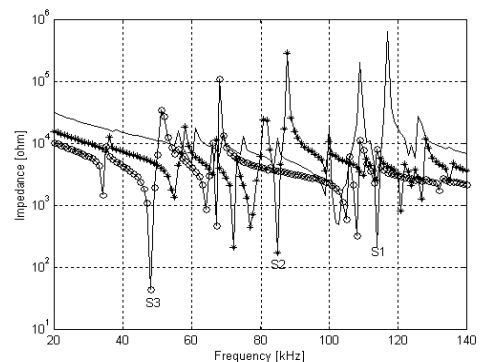


그림 8. 압전진동자의 적층수에 따라 시뮬레이션한 공진 특성
Fig. 8. Simulated resonant characteristics with the piezoelectric vibrator layers

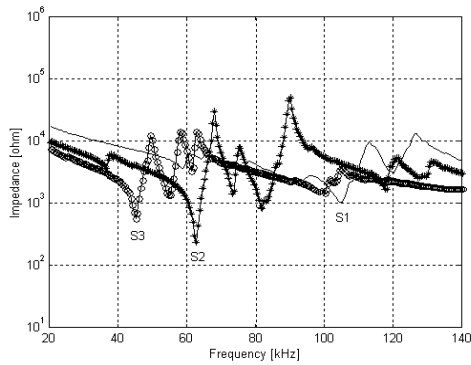


그림 9. 압전진동자의 적층수에 따라 측정된 공진 특성
 Fig. 9. Measured resonant characteristics with the piezoelectric vibrator layers

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

기호	시뮬레이션결과 fr[kHz]	측정 결과 fr[kHz]
S1	114	105.5
S2	85	62.7
S3	48	45.2

3. 결 론

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 하고 실제로 제작하여 공진특성을 측정하였다. 또한 용도에 따른 다양한 주파수의 초음파센서 제작을 위하여 압전진동자의 적층수를 1층, 2층, 3층으로 변경하여 설계 및 시뮬레이션하였으며 그 결과에 따라서 초음파센서를 제작하였다.

그 결과, 시뮬레이션한 공진주파수와 센서를 제작하여 측정된 공진주파수는 2층을 제외하고 거의 일치하였으며 압전진동자가 1층인 경우 공진주파수가 114 kHz, 2층인 경우 85 kHz, 3층인 경우 48 kHz이었다.

따라서 유한요소법을 이용하여 원하는 주파수대에 따른 기체유량계용 초음파센서의 설계·제작이 가능하게 되었다.

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] Lynnworth, L.C., High-Temperature Flow Measurement Using Wetted and Clamp-On Ultrasonic Sensors, Sensors, Vol.16, No.10, pp.36-52, 1999
 [5] 홍재일, "GIS 부분방전검출용 결합진동모드 AE센서의 특성", 전기학회 논문지, 제50P권, 제2호, pp.71-76, 2001

저 자 소 개



홍 재 일 (洪 在 一)

1958년 9월 26일생. 1982년 연세대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~1998년 미국 펜실바니아 주립대 Post-doc. 1991~현재 동서울대학 전기정보제어과 부교수

Tel : 031-720-2067

Fax : 031-720-2262

E-mail : jihong@dsc.ac.kr



이 상 철 (李 相 喆)

1953년 8월 13일생. 1977년 숭실대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1981년~현재 동서울대학 전기정보제어과 교수

Tel : 031-720-2065

Fax : 031-720-2262

E-mail : sclee@dsc.ac.kr