

초음파 음향임피던스 변환기를 이용한 저압 저진공 측정기술 연구

홍승수* · 신용현 · 조승현 · 안봉영 · 임종연 · 최인묵

한국표준과학연구원, 대전 305-340

(2010년 4월 14일 받음, 2010년 6월 18일 수정, 2010년 6월 29일 확정)

초음파 변환기의 기체 음향임피던스 변화를 이용해서 압력진공 측정기술을 연구하였다. 상용화된 한 쌍의 500 kHz 공중 초음파 변환기(air-coupled ultrasonic transducer)를 진공용기에 넣고 초음파 진폭을 측정하였다. 그 결과 6.66 kPa에서 202.65 kPa (약 2기압)까지 4회 반복 측정값으로부터 계산된 표준편차는 0.0093에서부터 0.3325 사이에 있었으며, 표준편차를 압력으로 나누어서 백분율로 나타낸 값은 133.32 kPa에서 0.018%이었고 202.65 kPa에서는 0.164%이었다.

주제어 : 초음파, 임피던스변환기, 반복성, 압력진공센서

I. 서 론

진공도 즉 저압 측정기술은 제조업 생산 설비를 비롯한 다양한 산업에서 뿐만 아니라 반도체 제조 등 첨단산업에도 필수적인 기반기술이다. 기체의 압력 측정방법에는 크게 기계적 물성인 압력을 직접 측정하는 방법과 열, 전기, 기계적인 힘 등 다른 물리적 특성을 이용하여 압력을 추정하는 간접측정 방법이 있다. 예를 들어 압력 변화에 따라 격막의 변위가 달라지는 원리를 이용한 용량형 격막게이지(capacitance diaphragm gauge, CDG)는 대표적으로 압력을 직접 측정하는 방법을 이용한 것이다 [1-4]. 특히 저압 저진공에서 많이 사용되는 CDG는 하나의 센서로 측정이 가능한 사용범위가 넓지 않기 때문에 넓은 압력 구간에서는 여러 개의 게이지를 사용해야 한다는 단점도 있다.

초음파(ultrasonic wave)는 1960년대부터 기체나 액체의 각종 물리량을 측정하는데 폭넓게 사용되어 왔다. Rosenkrantz는 초음파로 핵연료 봉 내부의 혼합기체의 압력과 기체의 성분을 측정하는 연구를 진행하였다 [5]. H. Toda는 초음파를 이용하여 기체의 농도와 자기장을 측정하는 연구를 진행한 바 있다 [6]. 초음파를 이용한 연구는 대부분 400 kPa 이상의 압력조건에서 진행되었으며, 용기 외부에 초음파센서를 부착하여 사용하였다. 초음파센서를 이용해서 압력을 측정할 수 있는 기술을 요약해서 설명하면 다음과 같다. 첫

째, 음향임피던스(acoustic impedance) 정합층(matching layer)을 이용하여 압력 측정을 위해서 효율적으로 초음파를 전달시키는 것이다. 이 기술은 용기 벽에 손상을 주지 않고도 용기에 정합층을 부착하여 용기 내부나 외부에서 초음파를 전파시킬 수 있는 획기적인 기술로 생각된다 [7-9]. 둘째, 압력용기 내부에서 초음파를 발생하고 검출하여 용기 내의 압력을 측정하는 방법이다. 이 방법은 압력에 따라서 기체의 음향 임피던스가 변하는 원리를 응용한 것으로서 기체를 전파하는 초음파의 특성 즉 세기, 감쇠, 위상변화 등을 이용하여 압력을 측정한다. 이 기술은 효율적인 측정을 위한 트랜스듀서 및 음파 반사판의 배치, 초음파 형성 등 어려운 기술들이 해결되어야 한다. 그러나 이 기술은 압력 측정 대역, 분해능, 정확도 면에서 기존의 방법과는 다른 성능을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 설치 및 유지 보수가 경제적이고 효율적이라는 장점이 있다 [10]. 셋째, 자기변형변환기(magnetostrictive acoustic transducer)를 이용하여 압력용기 내부에서 초음파를 발생하고 측정하는 방법이다. 이 방법은 자기장이 용기를 잘 통과하는 성질을 이용한 것으로서 초음파 변환장치는 용기 내부의 초음파 진동판, 외부의 자기장 발생 및 감지 장치로 구성된다. 이 기술은 비파괴(non-destructive) 방법으로 용기 내에 초음파를 전달할 수 있으므로 별도의 변형 없이 장치의 구성이 가능하고 설치가 용이하다는 특징이 있으므로 초음파를 이용한 압력 측정에 효과적으로 응용

* [전자우편] sshong@kriss.re.kr

될 수 있다는 장점이 있다 [11,12].

본 연구에서는 압력에 따라 기체의 음향 임피던스가 변하는 원리에 기초하여 한 쌍의 초음파 변환기 사이의 초음파 전달효율을 구하여 압력을 측정하였다. 이 기술은 비파괴(non-destructive) 방법으로 용기 내의 압력측정에 관한 원천기술로서 기술이 연구단계를 거쳐 상용화되면 수십 년 동안 사용되어온 기존의 저압 저진공 측정기술의 획기적인 변화가 있을 것으로 기대된다.

II. 이 론

기체 압력과 초음파 전달효율에 관한 이론은 다음과 같다. Fig. 1과 같이 송수신 초음파 변환기가 기체를 사이에 두고 마주보고 있는 경우 송수신변환기 사이에서 초음파의 투과효율 T_r 은 송신 변환기와 기체 사이의 투과효율 T_1 과 기체와 수신 변환기 사이의 투과효율 T_2 의 곱으로 표현된다. 변환기와 기체의 경계를 투과하는 초음파의 투과율은 두 매질의 음향임피던스로 나타낼 수 있으므로 송수신 변환기 사이의 초음파 투과효율 T_r 은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$T_r = T_1 T_2 = \frac{4Z_{gas} Z_T}{(Z_T + Z_{gas})^2} \quad (1)$$

이때 Z_T, Z_{gas} 는 각각 변환기 및 기체의 음향 임피던스를 말한다. 기체의 고유음향임피던스는 음파가 전파될 때 전파물질의 밀도와 음속의 곱 $Z_{gas} = c_{gas} \cdot \rho$ 로 나타내는데 일반적으로 고체 재료인 변환기의 음향 임피던스는 기체의 음향 임피던스보다 월등히 커서 $Z_T \gg Z_{gas}$ 관계가 성립하므로 식 (1)은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

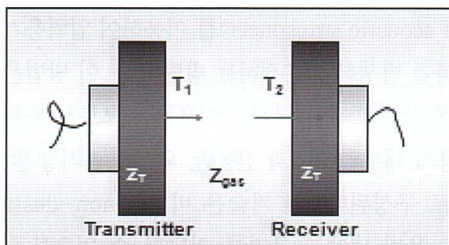


Figure 1. Schematic diagram of the transmission of ultrasonic waves from transmitting transducer to a receiving one through gas.

$$T_r \approx \frac{4Z_T \cdot c_{gas} \cdot \rho}{Z_T^2} \quad (2)$$

식 (2)에 기체의 상태방정식을 대입시키면 음파의 전달 함수와 기체의 압력의 상관관계를 나타내는 다음 식 (3)을 얻을 수 있다. 기호 P, T, R 은 각각 기체의 압력, 온도 및 기체상수(=일반기체상수/분자량)를 나타낸다.

$$T_r = \frac{4 \cdot c_{gas} \cdot P}{R \cdot T \cdot Z_T} \quad (3)$$

기체에서 초음파의 속도는 식 (4)와 같이 비열(γ)로 표현할 수 있다.

$$c_{gas} = \sqrt{\gamma K \rho' / \rho} = \sqrt{\gamma R T} \quad (4)$$

따라서 식 (4)와 식 (3)으로부터 압력과 초음파전달효율 사이의 관계를 얻을 수 있고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_r = \frac{4 \cdot P \cdot \sqrt{\gamma}}{Z_T \cdot \sqrt{R \cdot T}} \quad (5)$$

식 (5)에 따르면 기체의 압력과 한쌍의 변환기와 기체 사이의 초음파 전달효율은 비례한다. 따라서 동일한 초음파를 가진할 경우 수신되는 초음파의 크기를 측정하면 기체의 압력을 알 수 있다. 이 때 비례상수는 기체 상수, 변환기의 음향임피던스, 온도 및 기체의 비열에 따라 다른 값을 갖는다 [13,14]. 위의 초음파 전달효율에 관한 식들은 대기압 이상의 압력측정 연구에 사용되었으나 이를 기체밀도가 낮은 진공범위까지 확장하기 위한 연구가 필요하다.

III. 실험장치

실험장치는 크게 압력진공용기(pressure vacuum chamber), 배기장치(pumping system), 미세유량조절이 가능한 리크밸브(leak valve), 압력측정용 이온게이지 및 CDG, 펄스 발생기(모델: DPR 300, 제조회사: JSR Ultrasonics) 및 수신기(모델: 5307 differential amplifier, 제조회사: NF corporation), 오실로스코프(모델: LeCroy 424, 제

조회사: Iwatsu Instruments) 등으로 구성되어 있다. 용기는 스테인레스 스틸로 가공되었으며, 사전에 용기의 리크를 헬륨 리크검출기로 검사하였다. 고진공 배기장치로는 터보분자펌프(turbomolecular pump)가 사용되었고 배후펌프로는 로터리펌프가 사용되었다. 진공용기와 펌프사이의 게이트 밸브를 닫았을 때 용기의 탈가스나 리크 때문에 생기는 압력증가가 측정에 지장을 주지 않는지 사전에 확인하였다. Fig. 2는 실험장치 개략도이다.

펄스 발생 및 수신에 쓰이는 2개의 초음파 센서는 4.5 inch CFF (conflat flange)의 내부에 놓여 있다. 한 쌍인 두 개의 변환기는 첫 번째 실험에서는 주파수 100 kHz인 air-coupled형이었고 두 번째 실험 때는 500 kHz air-coupled

형을 사용하였으며, 하나는 초음파를 발생하는 용도 즉 송신기로 쓰이고 다른 하나는 초음파 수신기로 사용되었다. 실험 초기에는 두 개의 변환기를 4.5 inch CFF 플렌지 진공용기에 직접 넣었으나 초음파 신호에 잡음신호가 검출되어 측정에 지장을 주었으므로 Fig. 3 실험개략도의 우측 하단에 보이는 것과 같이 덮개에 변환기를 넣고 접지하여 잡음신호를 줄였다. 변환기의 송신기와 수신기의 간격은 2 mm이며, 예비실험을 통해서 얻은 결과로 보면 수 mm 근처에서는 그 간격이 실험결과에 미치는 영향이 크지 않았다. 펄스 발생기는 펄스 주기(duration)를 10~70 ns, 펄스 크기(amplitude)를 100~900 V까지 조절이 가능하다.

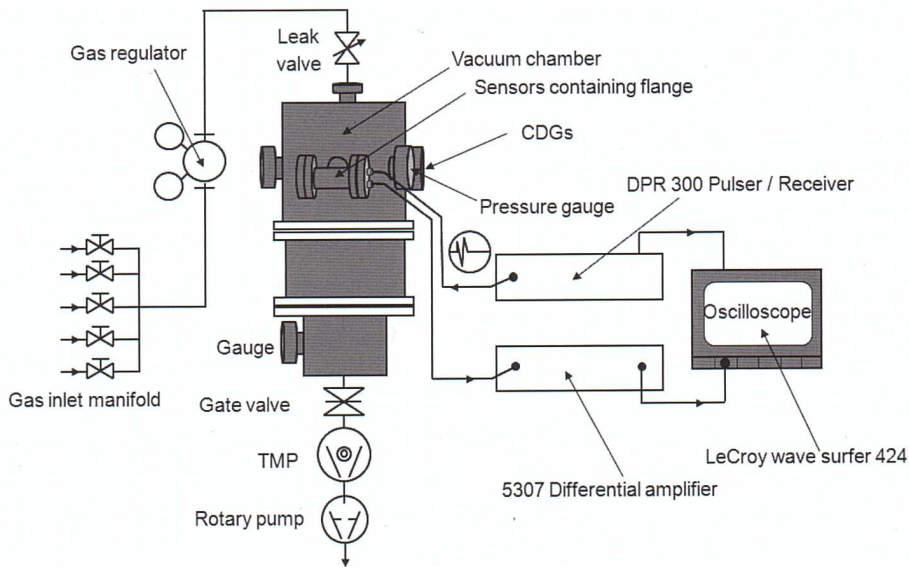


Figure 2. Schematic diagram of experimental system by using ultrasonic acoustic transducer.

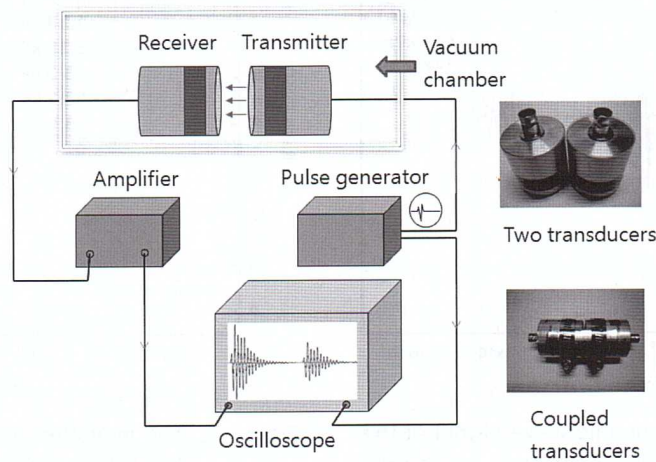


Figure 3. Experimental arrangement for the pressure measurement using ultrasonic waves.

IV. 결과 및 논의

진공용기 내에 순도 99.9% 이상인 질소기체를 주입시켜 압력을 변화시키면서 상용화된 한 쌍의 100 kHz 공중 초음파 변환기(air-coupled ultrasonic transducer)를 진공용기 내부에 넣고 93.3 Pa에서부터 133 kPa까지의 압력에서 초음파 변환기의 출력신호를 측정하였다. 진공용기 내부 압력은 용량이 각각 1.33 kPa과 133 kPa인 두 개의 MKS CDG로 측정하였다. 1.33 kPa CDG로는 93.3 Pa에서 1.33 kPa 구간에서, 133 kPa CDG로는 5.33 kPa에서 133 kPa까지 압력을 측정하였다. 실험에 사용된 CDG는 장치에 부착하기 전에 저진공 국가표준기인 초음파간섭수주압력계(ultrasonic interferometer manometer, UIM)에서 교정하였다 [15,16].

초음파를 가진 후 압력 93.3 Pa에서 133 kPa 구간에서 수신 초음파 변환기와 증폭기를 거쳐서 측정된 첫 번째 실험에서 신호의 파형은 Fig. 4와 같다. 여기에서 수평축은 오실로스코프의 스캔 시간이고 수직축은 수신된 초음파 신호가 증폭기를 거친 파형의 진폭이다. 앞에서 언급한 바와 같이 압력은 초음파 전달효율과 비례하므로 압력이 높아지면 신호의 진폭이 커짐을 관찰할 수 있었는데 최대 진폭 $\pm 35 \text{ mV}_{P-P}$ 값이 압력 133 kPa에 해당된다. 또한 신호의 진폭을 제외하고는 신호의 파형이 동일하게 유지됨을 볼 수 있었는데 이는 기체의 압력과 초음파 속도는 서로 무관함을 의미한다.

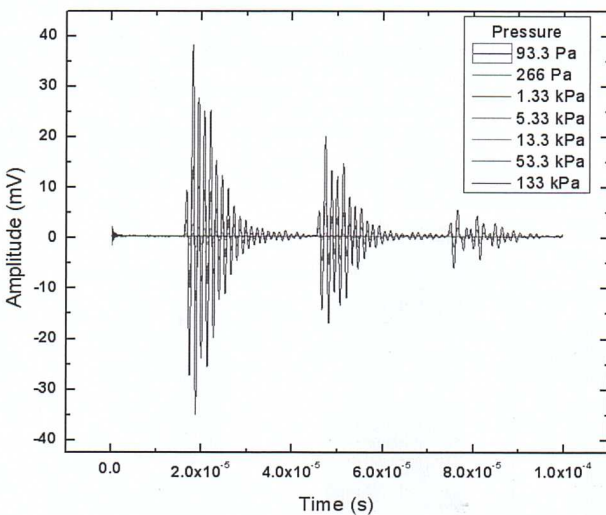


Figure 4. The measured ultrasonic wave signal at the 100 kHz receiving transducer at several pressures.

Fig. 5는 각 압력구간에서 진공용기의 내부압력을 수평축으로 각각의 압력에서 초음파의 최대값(peak value)을 수직축으로 놓고 그린 것이다. 그림을 보면 93.3 Pa에서 5.33 kPa까지는 압력증가에 따른 진폭의 변화가 보이지 않았으나 압력 13.3 kPa에서 133 Pa 사이에서는 압력에 따라 진폭이 같이 증가하였다. 따라서 초음파 변환기가 대기압 근방에서 압력진공 센서로서의 사용 가능성을 확인했지만 낮은 압력까지 측정하기 위해서는 다른 적합한 변환기가 필요한 것으로 판단된다.

위에 설명된 초기 실험결과에서 13.3 kPa 이상의 압력에서는 어느 정도 직선성이 있는 것이 확인 되었으므로 사용이 가능한 압력구간을 넓히기 위해서 가진 주파수가 500 kHz인 초음파 변환기를 이용해서 Fig. 2의 실험장치에 변환기 센서만 500 kHz용으로 교체하고 전과 같은 방법으로 실험하였다. Fig. 6은 Fig. 5와 같은 방법으로 4회 반복 실험한 결과를 각 압력구간에서 용기의 내부압력을 수평축으로 각 압력에서의 초음파의 최대값을 수직축으로 놓고 그린 것이다. 여기에서는 1.33 kPa과 2.66 kPa 사이의 일부 구간을 제외하고 전 실험 구간에서 압력의 증가에 따라 진폭도 증가할 뿐만 아니라 반복성도 있는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 Fig. 6의 결과에서 반복성이 좋지 않은 1.33 kPa과 2.66 kPa에서의 측정값을 제외하고 그린 것이다. 압력 6.66 kPa에서 133.32 kPa 구간까지는 직선성이 매우 좋은 편이었으나 202.65 kPa에서는 전압이 약간 낮아져서 선이

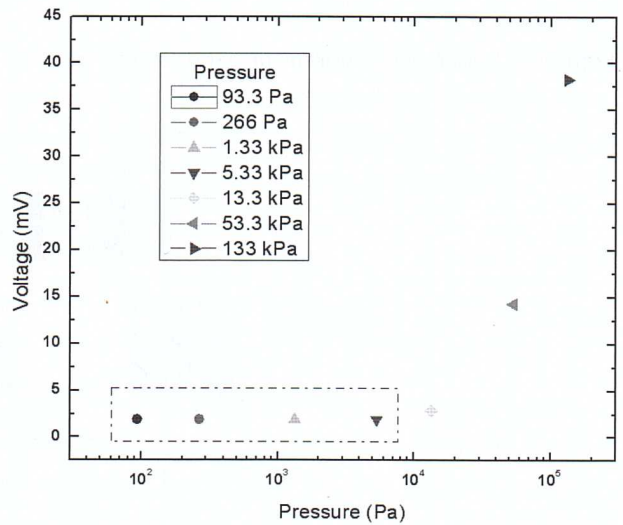


Figure 5. The measured ultrasonic wave signal at the 100 kHz receiving transducer up to 133 kPa.

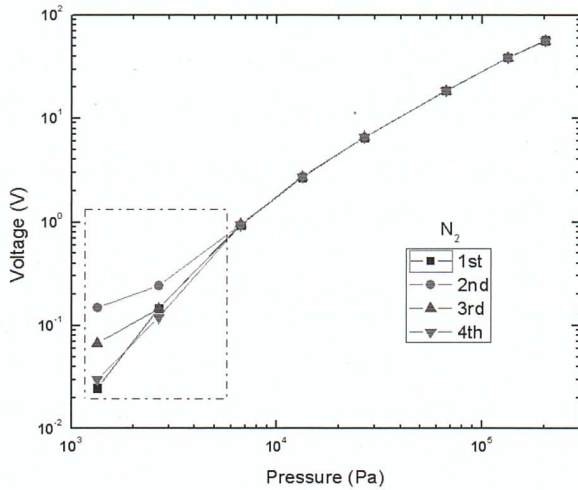


Figure 6. The measured ultrasonic wave signal at the 500 kHz receiving transducer from 1.33 kPa to 202.65 kPa.

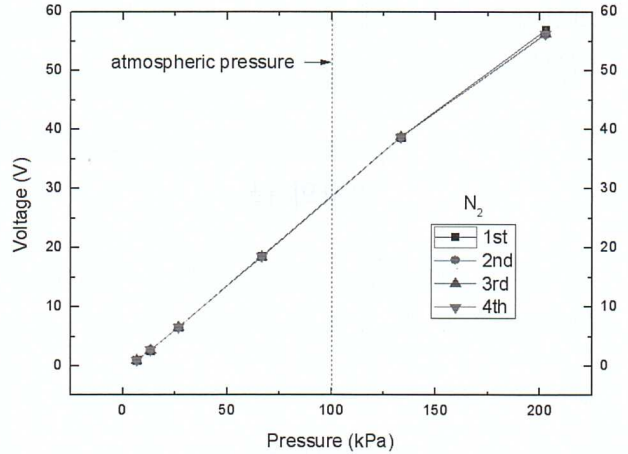


Figure 7. The measured ultrasonic wave signal at the 500 kHz receiving transducer from 6.66 kPa to 202.65 kPa.

Table 1. The measured ultrasonic wave signal at the 500 kHz receiving transducer from 6.66 kPa to 202.65 kPa.

Pressure (kPa)	Number of measurements (V)				Average voltage (V)	Standard deviation	(Standard deviation /pressure)×100 (%)
	1	2	3	4			
6.666	0.9362	0.9415	0.9568	0.9383	0.9432	0.0093	0.139
13.332	2.6922	2.7426	2.7078	2.7089	2.7129	0.0212	0.159
26.664	6.5556	6.5350	6.5753	6.5539	6.5549	0.0164	0.061
66.661	18.5916	18.4867	18.4481	18.4939	18.5051	0.0610	0.091
133.322	38.7645	38.7243	38.7191	38.7069	38.7287	0.0249	0.018
202.649	56.9454	56.2468	56.3485	56.2638	56.4511	0.3325	0.164

약간 구부러지는 특성을 보였다. Table 1은 각각 압력에서 4회 반복 측정해서 얻은 결과와 평균값 및 표준편차를 정리한 것이다. 4회 반복 측정값으로부터 계산된 표준편차는 0.0093에서부터 0.3325 사이에 있었으며, 표준편차를 압력으로 나누어서 백분율로 나타낸 값은 0.018%에서 0.164%로 202.65 kPa에서 가장 컸다. 본 실험 결과에서는 500 kHz용 초음파 변환기가 대기압 근방의 압력에서 직선성 및 반복성이 좋은 것으로 나타났으므로 압력진공 센서로 사용이 가능하다는 것을 실험으로 확인할 수 있었다.

V. 결 론

상용화된 한 쌍의 100 kHz 공중 초음파 변환기(air-coupled ultrasonic transducer)를 진공용기 내부에 넣고 93.3 Pa에서부터 133 kPa까지의 압력대역에서 초음파 변

환기의 출력신호를 측정하였다. 그 결과 13.3 kPa 이상의 압력에서는 어느 정도 직선성이 있었으나 낮은 압력에서는 직선성이 없었다. 가진 주파수가 500 kHz인 초음파 변환기로 바꾸어서 실험한 결과 1.33 kPa에서 202.65 kPa(약 2기압)까지 전 구간에서 압력변화에 따라 진폭이 증가하고 반복성도 좋은 것으로 나타났다. 그러나 일부 구간에서는 진폭은 증가하였으나 반복성이 좋지 않았다.

500 kHz인 초음파 변환기로 압력을 측정하여 6.66 kPa에서 202.65 kPa(약 2기압) 구간까지 4회 반복 측정값으로부터 계산된 표준편차는 0.0093에서부터 0.3325 사이에 있었으며, 표준편차를 압력으로 나누어서 백분율로 나타낸 값은 133.32 kPa에서 0.018%로 최소이었고 202.65 kPa에서는 0.164%로 최대이었다. 본 연구에서는 500 kHz용 초음파 변환기가 대기압 근방의 압력에서 직선성 및 반복성이 우수하여 압력진공 센서로서의 사용이 가능함을 확인하였다. 향후 가진 주파수가 각각 다른 초음파 변환기의

기체별 반응실험을 통해 압력대별로 적합한 특성을 갖는 진공센서로 개발하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 연구비 지원으로 수행되었음 (10031812-2008-11).

참고문헌

- [1] S. S. Hong, Y. H. Shin, K. H. Chung, and K. Jousten, *Journal of the Korean physical society* **44**, 1364 (2004).
- [2] 홍승수, 신용현, 정광화, I. Arakawa, *한국진공학회지* **14**, 103 (2005).
- [3] 홍승수, 신용현, 정광화, I. Arakawa, *한국진공학회지* **12**, 151 (2003).
- [4] 홍승수, 신용현, 정광화, 임인태, 우삼용, 최상철, *한국진공학회지* **10**, 173 (2001).
- [5] E. Rosenkrantz, J. Y. Ferrandis, J. Mahieu, and G. Leveque, 19th International congresson acoustics, 2 (2007).
- [6] H. Toda and T. Kobayakawa, *Sensors and actuators A* **144**, 1 (2008).
- [7] 홍승수, 신용현, 안봉영, 조승현, 김기복, *미국특허 출원번호* 12/190350 (2008).
- [8] 안봉영, 홍승수, 신용현, 정광화, *미국특허 출원번호* 12/192,595 (2008).
- [9] 안봉영, 조승현, 홍승수, 신용현, 정광화, *한국특허 출원번호* 10-2008-0041715 (2008).
- [10] 홍승수, 신용현, 정광화, *미국특허 등록번호* US 7,228,742 B2 (2007).
- [11] 조승현, 안봉영, 홍승수, 신용현, *한국특허 출원번호* 10-2008-0041717 (2008).
- [12] 조승현, 안봉영, 홍승수, 신용현, *미국특허 출원번호* 12/190,901 (2008).
- [13] Lianji Jin, 조승현, 안봉영, 신용현, 홍승수, 2009년 추계비파괴학회 (2009).
- [14] Lianji Jin, S. H. Cho, and B. Y. Ahn, 신용현, 홍승수, BIEN2009 (2009).
- [15] S. S. Hong, Y. H. Shin, and K. H. Chung, *J. Vac. Sci. Technol.* **A24**, 1831 (2006).
- [16] 홍승수, 신용현, 정광화, *한국진공학회지* **5**, 181 (1996).