

## 기체분자의 MAC를 이용한 압력 게이지의 제작 및 특성 평가 연구

권 명 회

인천대학교 물리학과  
(1994년 10월 11일 접수)

### The Properties of Newly Designed Pressure Gauge using MAC of Gas Molecules

Myeung Hoi Kwon

Department of Physics, University of Incheon  
(Received October 11, 1994)

**요 약** - 본 연구에서는 LRDC 트랜스듀서를 장착한 변형된 회전 진자를 제작하여,  $1 \times 10^{-2}$  Torr에서  $1 \times 10^{-5}$  Torr 사이의 Ar 압력을 측정하였다. 비구동 회전 진자의 진폭은 기체 분자와의 충돌에 의한 감쇄가 일어난다. 회전 진자의 감쇄에 의한 특성 함수를 측정하여, 본 연구팀은 일반적인 진공 측정 장비로는 측정이 어려운  $1 \times 10^{-2}$  Torr에서  $1 \times 10^{-5}$  Torr 사이의 Ar 압력을 정확하게 측정할 수 있었다.

**Abstract** - In this study, we measure the Ar pressure between  $1 \times 10^{-2}$  Torr and  $1 \times 10^{-5}$  Torr using modified torsion balance with LRDC transducer. The motion of the undriven torsion pendulum is one in which the amplitude of oscillation decreases with time because of dissipation by the collisions of gas molecules. By measuring the damping constant(log decrement), we have been able to measure the pressure of the system fairly accurately, even in pressure ranges of difficulty for many common manometers.

#### 1. 서 론

저 진공 진공도 측정을 위한 진공 계기는 낮은 기압에서 기체의 이온화를 이용한 ionization gauge나 mass spectrometer 등을 사용하고, 이보다 높은  $10^{-4}$  Torr에서 1 Torr 정도의 진공에서는 thermocouple gauge, Mcleod gauge, quartz spiral gauge, pirani gauge, capacitance diaphragm gauge 등이 많이 사용되고 있다. 이중 thermocouple gauge, pirani gauge 등은 기체의 열 전도도가 기체 압력에 따라 변화하는 특성을 이용한 계기이고, Mcleod gauge, quartz spiral gauge 등은 수은을 사용하거나, 축전 용량의 변화, 진동수의 변화 등을 이용하여 저 진공을 측정하는 계기이다.

많은 연구 분야 또는 산업 현장에서는 고진공 처리 후 MFC를 통하여, 특수 기체를 주입한  $10^{-5}$  Torr에서  $10^{-2}$  Torr 정도의 진공도에서 박막의 증착, 불순물의 확산[1, 2] 등의 실험을 수행하는 경우가 많다. 이러한 영역의 진공도 측정은 앞에서 언급한 진공계기가 주로 사용되고 있는데, 이들 계기는 사용 기체의 종류와 사용 정도에 따른 출력 특성의 변화가 크고, 센서 내부의 오염과 변형이 생기는 정도가 심해 신뢰성이 크게 떨어지고 있다. 더욱이 값이 싸고, 크기도 작은 열 전대 진공계가 가장 보편적으로 사용되는데, 열 전대 진공계는 출력 전기 신호 값과 진공도 사이의 관계가 비선형적이어서, 수 %의 출력특성 변화는 계기상의 지시 값으로는 수십 %로부터 수십 배의 오차에 해당하는 오차 요인을 갖고 있다[3]. 이렇듯 진공도가

$10^{-5}$  Torr에서  $10^2$  Torr 사이의 정확한 진공도의 측정에는 많은 어려움이 있다. 특히 몇몇 단원자 기체의 경우 이 진공대 영역에서의 측정은 가장 신뢰도가 높은 ionization gauge나 Mcleod gauge를 사용하여도 50% 이상의 큰 에러를 수반하고 있어[4], 보다 간편하고 정확한 진공측정 장비의 개발을 위한 노력이 계속되고 있다.

이러한 진공도 측정에 있어서의 에러는 연구 성과의 신뢰성은 물론 제품의 재현성 등에 영향을 미치고 있어, 보다 정확한 절대 진공도를 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 자체 개발한 LRDC 트랜스듀서를 장착한 변형된 회전 진자를 제작하여, 기체 분자와 금속 표면의 선 운동량 결합계수를 이용한 회전 진자의 진폭 감쇄를 이용하여, 일반적으로 측정하기 어려운 영역의 진공도와 단원자 기체의 정확한 진공도의 측정을 시도하였다.

## 2. 이론적 배경

회전진자의 운동방정식은 잘 알려진 아래의 방정식으로 묘사된다.

$$\frac{I_m d\theta}{dt^2} + \frac{Rd\theta}{dt} + K\theta = 0$$

이 식에서  $I_m$ ,  $R$ ,  $K$ 는 회전진자의 관성능률, 감쇄상수 및 힘상수이다. 회전진자의 감쇄상수는 두 종류의 물리적 원인으로 구분하여 생각할 수 있는데, 하나는 진자를 지탱하는 화이버의 내부 마찰에 의한 효과이고, 다른 하나는 주변 기체 분자와의 충돌에 의한 효과이다. 이중 화이버 자체의 내부 마찰에 의한 감쇄효과는 작은 회전진폭의 대역에 있어서 거의 일정한 크기를 지니고 있어, 회전진자의 진폭 변화는 주변 기체 분자와의 충돌에 의한 효과에 크게 영향을 받는다.

기체 분자와 고체 표면간의 상호 작용은 진공분야, 표면분야, 전기화학 분야 및 항공, 우주 분야에 중요한 고려 요소로서 지난 수십 년간 많은 연구가 이루어져 왔다. 미시적인 관점에서 주변 기체 분자는 Maxwell 분포에 의한 물체의 표면과 충돌을 하는데, 이중 가장 큰 효과는 에너지 전달 및 선 운동량 전달 현상을 들 수 있다. 기체와 물질 표면에서의 선 운동량 전달은 충돌 기체 분자가 표면 물질과의 에너지교환에 의한

비 탄성 충돌과 에너지 교환이 없는 탄성충돌을 통하여 이루어진다. 이 현상은 energy 와 momentum accommodation coefficient(EAC, MAC)로 묘사되는데, 이중 MAC는 1960년대에 R. E Stickney에 의하여 연구가 시작되었다[5, 6]. 기체분자 충돌에 의한 선 운동량의 전달은 기체와 표면의 MAC값  $\alpha_n$ 으로 설명이 되는데, 선 운동량은 표면의 접선 방향과 법선 방향으로 구분되며, 접선 방향은 상쇄되어 법선 방향의 성분만 나타난다. 법선 방향의 MAC는 아래 식으로 표시된다.

$$\alpha_n = \frac{P_i - P_r}{P_i - P_s}$$

이 식에서  $P_i$ ,  $P_r$ ,  $P_s$ 는 각각 충돌 기체분자, 산란 기체분자 및 표면 분자의 선 운동량을 의미하며, 충돌 기체분자의 분포함수  $F(\theta, \phi)$ 를 이용하여 아래 식으로 묘사된다. 여기서  $\theta$ ,  $\phi$ 는 표면에 대한 충돌 기체 분자의 polar축과 azimuthal 축의 각도이다.

$$P_i = \int m v_i \cos\theta_i f(\theta_i, \phi_i)$$

기체 분자와 표면간의 선 운동량 교환에 의하여 표면에 주어지는 힘은 Maxwell 분포를 이용하여 정리하면 단위 면적당 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$F = \frac{1}{2} P_{\mu} \alpha_n$$

즉 진공 안에서 회전진자의 운동은 진공도에 비례하는 힘  $F$ 에 의한 감쇄력을 지속적으로 받게 된다. 이때 주어지는 MAC값  $\alpha_n$ 은 기체분자의 종류 및 표면 물질에 의존하는데, 본 연구에서 사용한 boom의 물질 Al과 Ar 기체분자 사이의  $\alpha_n$ 은 실내온도 300K에서 약 0.94의 값으로 주어진다[7, 8]

## 3. 실험 장치

일반적인 회전 진자는 화이버를 이용하여 회전체를 매달은 형태를 취하고 있다. 이 경우 화이버의 힘상수는 재료의 탄성률  $\mu$ , 반경  $D$ , 길이  $L$ 과 다음과 같은 관계식을 지니, 물체의 회전에 Hooke의 법칙에 의한 restoring force를 형성한다.

$$K_{\text{fiber}} = \frac{\pi \mu D^4}{32 L}$$

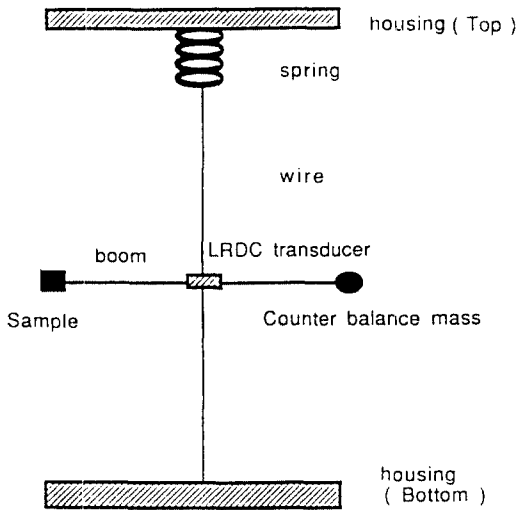


Fig. 1. Modified Torsion Balance.

대부분의 회전 진자를 이용한 연구에서, 부수어지기 쉬운 화이버의 특성과, 회전운동 이외의 진동운동을 내포한 문제점에 의한 중심축의 이진, 힘 상수의 변화 및 화이버의 교체시 비 정상적인 실험결과 등의 어려움을 보고하고 있다[9].

진자의 회전 운동을 감지하기 위한 센서로는 광학적 장치에 의한 interference를 이용하는 방법[10] 및 축전 용량의 변화에 의한 공명 진동수 측정 방법[11] 등이 사용되고 있는데 이들 방법은  $10^{-9}$  radian의 변위를 측정할 수 있는 분해능을 지니도록 제작할 수 있는 반면, 측정 대역이 좁고 출력 신호가 비선형적인 문제점을 내포하고 있다.

회전 진자를 이용한 진공도를 측정하기 위하여는 안정된 주기 및 진폭을 지닌 진자를 제작하여야 하는데, 이를 위하여 본 연구에서는 회전 진자를 변형한 그림 1의 변형된 회전진자를 제작하고, 변위의 측정을 위하여 LRDC 트랜스듀서를 이용하였다[12]. 제작된 회전 진자는 텅스텐 줄을 이용하여 위, 아래를 고정시키고, boom을 줄의 중심에 부착시켰다. 이 경우 boom의 운동은 초기에 회전 운동과 진동을 동시에 나타내고 있으나, 진동의 경우 주기가 회전 운동의 경우보다 약 100배 이상의 짧은 주기를 지니고 있어 급격한 감쇄에 의하여 손쉽게 제거할 수 있어, 변형된 회전진자는 이상적인 회전 운동을 손쉽게 얻을 수 있다. 변형된 회전 진자는 아래의 운동방정식으로 묘사되는데, 이 식에서  $I_m$ ,  $m$ ,  $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $R$ ,  $d$ 는 각각 회전

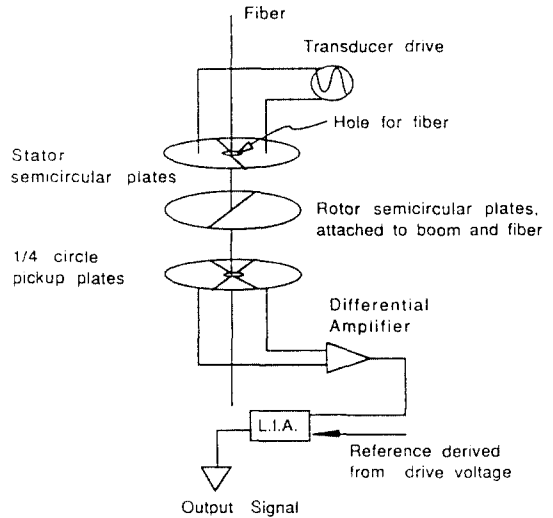


Fig. 2. Alternative form of LRDC Transducer.

진자의 관성 능률, 붐의 무게, 붐의 무게 중심과 텅스텐 줄 사이의 거리, 기구 자체의 기울기각, 트랜스듀서의 반경 및 떨어진 거리이다.

$$I_m \frac{d^2\theta}{dt^2} + \left( \frac{\pi\mu D^4}{8L} + \omega_{\epsilon_0} R^2 \langle V_i^2 \rangle - mg\lambda \sin\alpha \right) \theta = 0$$

회전각 측정을 위한 LRDC 트랜스듀서는 그림 2의 형태를 취한 Alternative form으로 제작, 사용하였다. 이 경우 트랜스듀서의 방출 신호는 회전각의 크기에 따라 아래의 식으로 주어지는데, 이 식에서  $V_i$ 와  $V_0$ 는 입력 신호 및 출력 신호이다.

$$V_0 \propto \frac{\theta}{\pi} V_i$$

입력 신호  $V_i$ 는 파형 발생기의 사인파로서 신호 입력판의 두 반원형 판에 180도의 위상 차이로 주어지며, 출력 신호  $V_0$ 은 선 미분 증폭기를 통하여 lock in amplifier를 지나 가운데 회전판의 회전각에 비례하는 증폭된 직류 신호를 만든다. 이와 같이 입력 신호와 출력 신호를 동시에 사용하는 synchronized detection에서는 filtering을 이용하여 신호대 잡음의 효율을 크게 증대시킬 수 있다. 증폭된 신호는 DAS interface를 내장한 컴퓨터를 이용하여 수집, 분석된다. 이상의 장치로 구성된 진공 측정 장비는 그림 3의 형태를 지닌다.

그림 4는 진자의 운동 방정식에 대하여, 제작된 회전

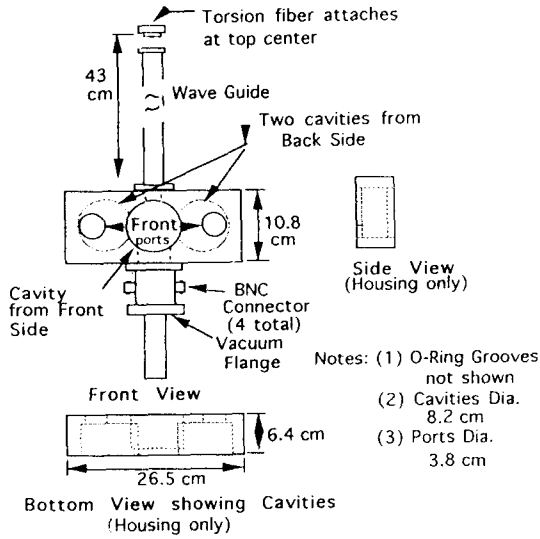


Fig. 3. A Schematic Diagram of Newly Designed Pressure Gauge.

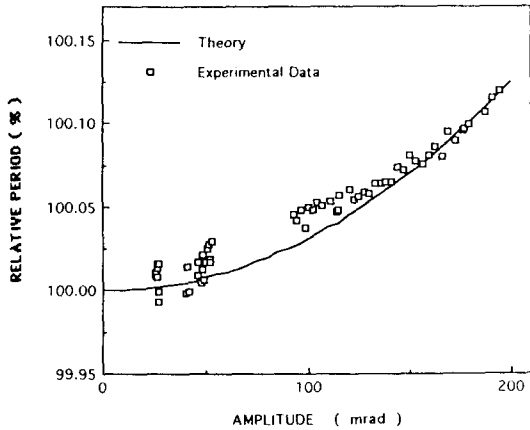


Fig. 4. Period Dependence on Amplitude of the New Balance.

진자의 진폭과 주기를 비교한 결과이다. 실험은 진공도  $10^{-6}$  Torr의 진공도에서 진자를 약 200 mrad의 진폭으로 회전시킨 뒤 약 10시간 정도에 걸쳐 진폭의 감쇄 및 주기를 측정된 결과이다. 진자 회전 운동의 진폭은 10시간 동안 지수 함수적으로 감쇄하고 있음을 보여준다. 아울러 약 100 mrad의 진폭 부근에서의 주기를 분석하여 보면, 평균 주기가  $9.35979 \pm 0.00085$  초의 주기를 갖고 있어, 에러 범위가 0.01% 로서 변형된 회전 진자가 일반적인 회전진자의 경우보다 안

정성이 높고, LRDC 트랜스듀서도 만족하게 작동함을 알 수 있다.

#### 4. 실험 결과 및 토의

이론적 배경에서 언급하듯이 기체 분자와의 충돌에 의한 회전 진자의 감쇄는 진공도에 비례하는 기체의 viscosity로 표현할 수 있으며, 진공도와 회전 진자 진폭의 관계는 다음 식으로 나타난다.

$$\sum P_i M_i^{\frac{1}{2}} = \frac{B}{T_{0.5}} - C$$

이 식에서 상수 B, C는 제작된 회전 진자의 특성 상수이고,  $P_i$ ,  $M_i$ 는 기체 분자 종류에 의한 부분 압력 및 질량이다. 만일  $A_1$ ,  $A_2$ 를 시간 t에서의 진폭과 바로 다음진동의 진폭이라고 하면, 이들은 아래 식으로 묘사하는데, 이 식에서 T,  $\lambda$ 는 주기 및 logarithmic decrement를 나타낸다.

$$\frac{A_2}{A_1} = \epsilon^{-\frac{RT}{T_{0.5}}} = \epsilon^{-\lambda}, \lambda = T \ln \frac{2}{T_{0.5}}$$

이식은 보다 간결한 형태의 아래 식으로 주어지고, 회전 진자의 특성 상수 B'과 C를 구하면 기체의 진공도를 얻을 수 있다.

$$\sum P_i M_i^{\frac{1}{2}} = B'\lambda - C$$

그림 5는 제작된 회전 진자의 자유 감쇄를 보여주고 있다. 그림 5-a는 진공도가  $1 \times 10^{-2}$  Torr에서의 진폭 변화를 보여주며, 그림 5-b는  $1 \times 10^{-4}$  Torr에서의 진폭 감쇄를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 회전 진자의 진폭 감쇄는 일반적으로 정확한 측정이 어려운 진공도에서 큰 변화를 보여주고 있어, 이의 활용은 기존 장비로 측정이 어려운  $1 \times 10^{-2}$  Torr에서  $1 \times 10^{-5}$  Torr 사이의 진공도에 대한 정확한 측정이 가능하다. 그림 5-a 경우의 log decrement는  $-0.0032365$ , 그림 5-b의 log decrement는  $-0.00012995$ 를 보여주고 있다. 그림 6은  $1 \times 10^{-6}$ 에서  $1 \times 10^{-1}$  사이의 진공도에서 회전 진자의 Log decrement를 측정된 결과를 보여 주고 있다. 이 그래프의 절대압력 x 축은  $10^{-4}$ 에서  $10^{-6}$  Torr영역에서는 BA형 ion gauge를 사용하였고, 그 이상의 진공도에서는 수은 주입 구형 Mcleod 절대 압력계를 사용한 결과이다. 그림에서와 같이 회전

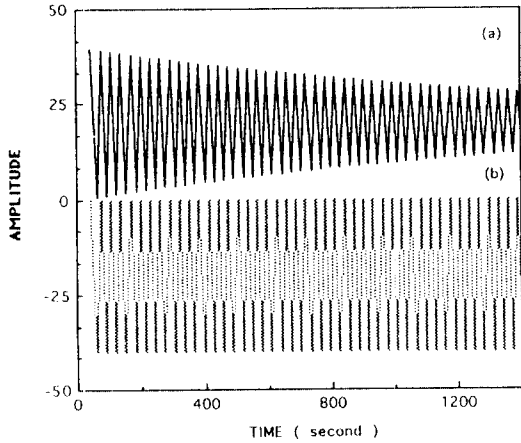


Fig. 5. Damping of New Balance at Two different Pressure.

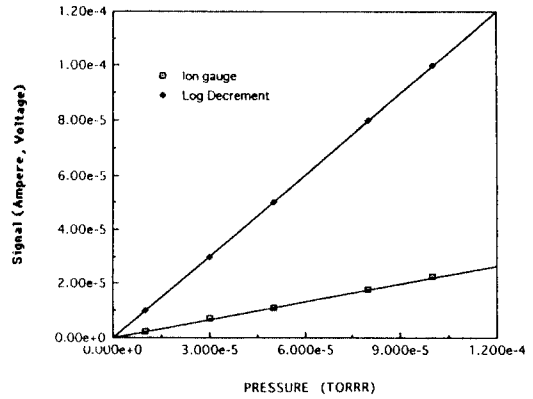


Fig. 7. The Signals from Ion Gauge and Log Decrement Depend on Pressure of Ar Molecules.

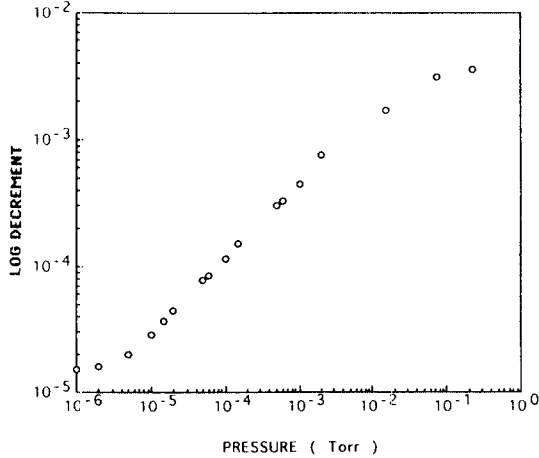


Fig. 6. Log Decrement dependence on the Pressure.

진자의 log decrement는  $10^{-6}$  Torr에서  $10^{-1}$  Torr 사이에서 진공도와 선형적 관계를 지니며, 이를 이용한 제작된 회전 진자의 특성 상수인 B'와 C의 값이 각각  $-9.4151223$ 과  $0.0001614$ 으로 주어진다.

회전 진자의 특성 함수를 이용한 Ar 기체 분자의 진공도 측정 결과를 진공 영역별로 ionization gauge와 Mcleod gauge를 사용하여 얻은 측정 결과와 비교한 결과는 그림 7, 8과 같다. 그림 7의 경우는  $10^{-4}$ 에서  $10^{-6}$  Torr 영역에서의 ion gauge와 제작된 장비의 진공도 측정 결과이다. 이 경우 제작된 장비의 민감도를 강조하기 위하여 Log decrement 크기를 축으로하여 비교하였다. 그림 8의 경우는  $10^{-3}$  Torr

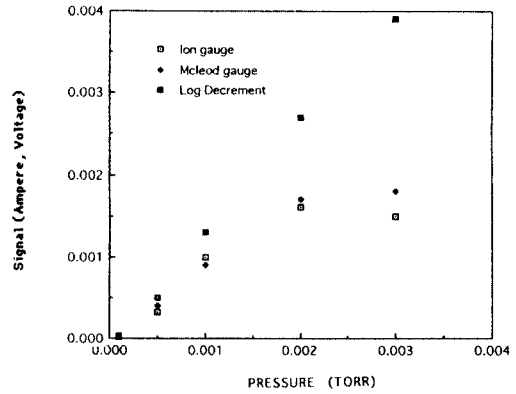


Fig. 8. The Signals from Ion Gauge, Mcleod Gauge and Log Decrement Depend on Pressure of Ar Molecules.

영역에서의 실험 결과인데, 절대압력의 측정이 용이하지 않아 ionization gauge와 Mcleod gauge와 함께 MFC를 사용하여 상호 비율에 따른 임의의 절대압력을 계산하여 제작된 장비의 선형성 및 민감도를 강조하였다. 그림에서 보듯이 Ionization gauge는  $10^{-5}$  Torr 이하에서는 정확한 진공도의 측정이 가능하고,  $10^{-4}$ 과  $10^{-5}$  Torr 에서는 약간의 오차를 보이고 있으며,  $10^{-3}$ 에서  $10^{-4}$  Torr 사이에서는 Mcleod와 유사한 경향을 보이나 두 경우 모두 비 선형적이며, 큰 오차를 보이고 있다. Mcleod gauge의 경우  $10^{-3}$  Torr 이상의 진공도에서는 정확한 진공도 측정이 가능하나, 수은 사용에 의한 불순물 주입 및 기기 운용의 어려움을 지녀, 많이 사용하고 있지 못한 실정이다. 이에 반하여 log decrement를 이용한 진공 측정 방법은

$10^{-5}$ 에서  $10^{-2}$  Torr 영역에서 좋은 선형도를 보여주고 있으며, 진공도의 변화에 따른 기울기 값이 다른 기기에 비하여 큰 장점을 지니고 있어, 이의 활용 가능성이 큰 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 LRDC 트랜스듀서를 장착한 변형된 회전 진자를 제작하여, 측정이 비교적 어려운 진공도 영역의 압력을 측정하였다. 측정 방법은 기체 분자와 표면의 선 운동량 교환에 의한 회전 진자의 log decrement를 이용한 진자의 특성 함수를 사용하였는데,  $1 \times 10^{-2}$  Torr에서  $1 \times 10^{-5}$  Torr 사이의 진공도 영역에서 좋은 선형성을 보여, 절대 압력계로서의 활용 가능성을 보여주었다. 특히 회전 진자의 특성 함수에 의한 압력 측정 방법은 현재 사용하고 있는 여러 종류의 압력계와 비교하여 첫째, 절대 압력을 측정할 수 있으며, 둘째  $1 \times 10^{-2}$  Torr에서  $1 \times 10^{-5}$  Torr 사이의 상대적으로 넓은 대역 압력을 측정할 수 있으며, Mcleod 등과 같은 압력계에 비하여 손쉽게 활용할 수 있는 장점을 지닌 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. T. Shiosaki, K. Harada and A. Kawabata, *Japanese J. of Appl. Phys.*, **21**, 69 (1982).
2. M. K. Bhan, L. K. Malhotra, and S. C. Kashyap, *J. of Appl. Phys.*, **65**(1), 241 (1988).
3. 신용현, 홍승수, 이상길, 정광하, 제 6 회 학술발표회 논문개요집, 115 (1994).
4. W. Kreisel, *Vacuum*, **26**(8), 339 (1976).
5. M. Knudsen, *Annals of Physics* **34**, 6 (1930).
6. R. E. Stickney and F. C. Hurburt, *Rarified Gas Dynamics*, Academic Press, New York (1963).
7. 권명회, 인천대학교 기초과학 논문집 **3**, 47 (1992).
8. 권명회, 박인호, 김남춘, 서동만, 최성을, 한국진공학회지, 3권 3호, (1994).
9. H. deBoer, Proc. 2nd International Conf. on Precision Measurements of Fundamental Constants II, Taylor & Phillips, ed., NBS (USA) SP 617, 561 (1984).
10. L. M. Metz, *Rev. Sci. Instrum.*, **62**(5), 1356 (1991).
11. R. G. Green and R. W. Taylor, *J. of Phys. E, Sci. Instrum.*, **19**, 110 (1986).
12. R. D. Peters, *Rev. of Sci. Instrum.*, **60**(8), 2789 (1989).