

中·低氣壓 壓力計의 國產化에 관한 研究

論 文
29-8-2

A Study on Medium-Low Pressure Gauge for Domestic Production

白 龍 鉉*
(Yong-Hyun Paek)

Abstract

The traditional mechanical manometer is improved to develop more convenient and precise manometer in continuous measurement of the gas pressure in medium-low vacuum range ($1 \times 10^{-1} \sim 10$ Torr). Glass (solid) is used as a detector material of the improved manometer. Using the strain gauge adhered to thin glass board, mechanical strain corresponding to variation of pressure in measurement system is converted into quantity of electricity, and the quantity of electricity is amplified. Experiments have also shown that the improved manometer have more advantages in reproducibility, measured sensibility, and responsible velocity than traditional one.

1. 緒 論

眞空技術은 眞空蒸着, 管·球排氣 및 潤滑油의 蒸溜 乾燥 등 각종 공업분야에서 널리 活用되고 있다. 더 나아가서는 原子核物理, 宇宙科學 등 최선의 과학분야에 까지 미치고 있다. 따라서 최근에는 眞空技術에 관한 研究가 眞空工學으로써 하나의 學問體系를 이루고 있고 진공장치의 제작법, 측정법 및 진공중의 여러 현상에 대하여 많은 연구가 행하여지고 있다.

그런데 현재 진공기술에 사용되고 있는 기체의 압력 측정기에는 종류가 많은데 대부분이 低眞空 또는 超高眞空用 진공계이고 가장 많이 사용되는 中·低眞空領域($1 \times 10^{-1} \text{Torr} \sim 10 \text{Torr}$)의 기체의 압력을 측정하는 진공계로서는 原理의이고 絕對值를 얻는데 가장 신뢰할 수 있는 液柱를 이용한 마노미터(Manometer) 또 기체의 성질을 써서 간접적으로 측하는 電離眞空計, 熱傳對眞空計, 알파트론(Alphatron)등⁽¹⁾의 진공계 정도일 뿐이다. 前者는 기준압력이 변동하고⁽²⁾ 後者는 사용하는 기체에 따라서 각각 校正⁽²⁾할 필요가 있다는 것이 결점이라 하겠다. 또한 이들 기압계는 그다지 精度를 필요로 하지 않는 定常的인 기압을 측정하는데

는 대단히 간편하지만, 時時刻刻으로 변화하는 기압을 측정하여 기록하는 것은 불가능⁽²⁾하다고 생각된다.

筆者는 中·低眞空領域의 기체의 압력을 측정하는데 있어서 압력변화의 연속측정이 가능하고 既存의 각종 中·低眞空壓力計의 특징도 살려서 간편하고 精度가 극히 높은 압력계를 개발할 목적으로, 기압계 素材에 薄板 硝子(固狀)을 사용하여, 여기에 부착시킨 스트레인 게이지(Strain Gauge)⁽³⁾에 의하여 測定系內의 압력변화에 對應한 초자의 기계적인 스트레인을 電氣量으로 變換, 增幅시켜 기압을 측정하는 機構를 고안하였다.

이때 檢出管(氣壓計) 素材에 초자를 택한 것은 금속과 달라서 초자는 破壞直前까지 應力과 스트레인이 정비례하는 완전탄성체이고 열전도율 선행차계수가 적다는 것, 전기절연성도 좋고, 耐腐蝕性도 다른 素材에 비하여 우수할 뿐 아니라 加工製作이 비교적 용이하다는 이유 때문이다.

2. 檢出管의 形狀 및 原理

기압을 電氣量으로 변환시키는 방법으로는 여러가지가 있으나 여기서는 스트레인 게이지를 이용한 變換器를 사용하였다.

使用法の 一例로써 鋼材 등에 荷重을 가하여 굽힘

* 正會員: 仁荷大 工大 電氣工學科 教授·工博
接受日字: 1980年 6月 12日

(Bending)을 측정하는 경우 荷重에 의한 歪形은 스케일이나 현미경 등으로서는 측정이 불가능하리 만큼 적어서 굽힘 측정이 곤란하다. 이러한 경우에 鋼材 上下에 스트레인 게이지를 부착시켜 놓고 荷重을 가하면 위의 게이지에는 압축력, 아래 게이지에는 장력이 걸리므로 그 歪形은 스트레인 게이지의 저항치의 변화⁽³⁾로 쉽게 굽힘을 측정할 수가 있다.

물론 이 경우 스트레인 게이지의 저항치의 변화는 대단히 적지만 변화는 電氣量으로 변환되므로 增幅器를 이용하므로써 수천배 수만배로 증폭시킬 수가 있다. 따라서 總合의인 感度로써는 대단히 우수하다고 말할 수 있다.

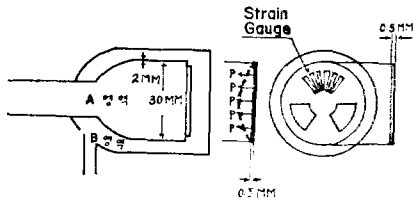


그림 1. 檢出管(M)

Fig. 1. Detector tube (M)

그림 1에 표시한 것이 본장치에 사용한 기압계의 검출관이다. 검출관으로써는 硝子曲管의 내부압력의 변화에 따라서 曲管의 屈伸⁽⁴⁾을 검출하는 것, 圓筒의一端에 薄板硝子を 부착시키고 그 초자의 歪形을 검출하는 것 등 두가지 경우를 試作하였는데, 0기압에서 대기압까지 加壓시키고, 이와 반대로 대기압에서 0기압으로 排氣시키는 방법등으로 10수회 되풀이 하여 歪形을 검출한 결과 검출관의 再現性, 零點復歸, 感度, 耐壓, 直線性으로 보아 원통형의 것이 우수하여 검출관의 형상은 원통형으로 정하였다.

초자검출관의 검출부는 대기압의 변동이나 외부의 온도변화를 방지하고 또 스트레인 게이지를 보호하기 위하여 二重構造로 하였다. 스트레인 검출용 硝子圓板의 두께는 支持圓筒의 두께에 비하여 충분히 얇고, 또 동작자의 곡률반경과 비교하여 충분히 적은 조건을 만족시키도록 두께 0.5mm로 하였다.

그림 1에서 A領域의 기압이 떨어지면 0.5mm의 초자원판은 주위가 고정되어 있으므로, 중심이 A領域 방향을 향하여 偏位한다. 이와같은 스트레인을 받는 硝子에 A領域이 아닌 초자 뒷면에 게이지를 부착시켜 놓으면 초자의 벤딩(Bending)에 의해서 게이지에 압축력이 걸려 저항치가 감소하는 방향으로 변화된다. 이

저항치의 변화는 A領域의 기압이 떨어지면 따라 초자의 벤딩도 커지며, 따라서 저항치의 변화도 커지므로 기압의 변화와 저항치의 변화는 一次⁽⁵⁾의 관계로 변하여 기압의 변화를 電氣的인 量으로 측정할 수가 있다.

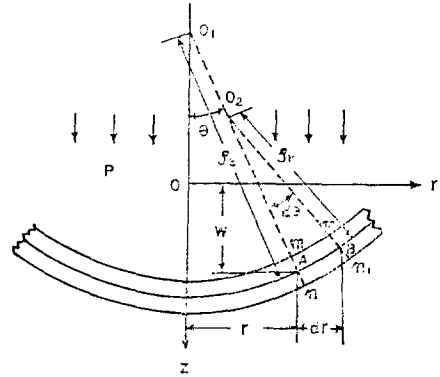


그림 2. 檢出用薄板硝子圓板

Fig. 2. Disk of thin glass for detector

이것을 理論的으로 설명하기 위하여 먼저 스트레인 검출용 초자 薄板圓板의 壓力歪形을 解析한다. 그림 2에서 周邊을 고정시킨 박판원판이 被測定 압력에 의해서 等分布荷重 P를 받아서 원판이 중심에 대하여 대칭적으로 굽어지는 경우를 생각한다. 원판의 중심 0로부터 임의의 방경방향에 r축을, 그리고 0를 지나 板面에 수직으로 Z축을 잡는다. 그림 2는 이와 같은 하나의 子午面을 표시한다. 중심 0에서 r의 거리에 있는 임의의 점 A에 있어서 撓量(Deflection)을 W라 하고 이것을 미분하면 A점에 있어 撓量角 theta는

$$\theta = -\left(\frac{dW}{dr}\right) \text{이므로}$$

$$\frac{1}{\rho_r} = -\frac{d^2W}{dr^2} = -\frac{d\theta}{dr} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho_t} = \frac{\theta}{r} = -\frac{1}{r} \frac{dW}{dr} \quad (2)$$

여기서

ρ_r : A점에서의 交線의 곡률반경

ρ_t : A점에서 子午面에 수직인 방향의 곡률반경로 주어진다.

또한 重直荷重에 의하여 板의 橫斷面에 생기는 剪斷力의 미소한 영향을 생략하면 斷面의 단위길이에 해당하는 굽힘 모멘트(Bending Moment)는 각각

$$\begin{aligned} M_r &= D\left(\frac{1}{\rho_r} + \nu \frac{1}{\rho_t}\right) = -D\left(\frac{d^2W}{dr^2} + \nu \frac{1}{r} \frac{dW}{dr}\right) \\ M_t &= D\left(\nu \frac{1}{\rho_r} + \frac{1}{\rho_t}\right) = -D\left(\nu \frac{d^2W}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW}{dr}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

단, $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ 로써 撓曲剛性係數(Flexural

rigidity)라 한다.

여기서

E : young's modulus

ν : poisson ratio

h : 圓板의 높이 (두께)

따라서 굽힘 모우먼트에 의한 굽힘 응력(Bending stress)는 다음식과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{12Z}{h^3} M_r = -\frac{E_z}{1-\nu^2} \left(\frac{d^2W}{dr^2} + \nu \frac{1}{r} \frac{dW}{dr} \right) \\ \sigma_t &= \frac{12Z}{h^3} M_t = -\frac{E_z}{1-\nu^2} \left(\nu \frac{d^2W}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW}{dr} \right) \end{aligned} \right) \quad (4)$$

여기서 Z 는 中立面에서 임의의 면까지의 거리이고, σ_r 는 반경 r 에 생기는 반경응력, σ_t 는 원주응력을 표시한다.

그리고 Z 축 방향의 撓量 W 는 다음의 미분 방정식 (5)(6)으로 표현된다.

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left[r \cdot \frac{d}{dr} \left\{ \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \frac{dW}{dr} \right) \right\} \right] = \frac{P}{D} \quad \dots\dots(5)$$

여기서 박판원판의 有效半徑을 a 라 하면 i) 周邊이 고정되어 있으므로 $r=a$ 에서 $W = \frac{dW}{dr} = 0$ ii) 원판에 가해지는 全荷重은 주변에 작용하는 支持力과 平衡을 이루어야 하고, iii) 撓量 W 는 중심 $r=0$ 에 있어서도 有限이어야 한다는 조건을 고려한다면

$$W = \frac{1}{D} \left(\frac{P}{64} r^4 - \frac{Pa^2}{32} r^2 + \frac{Pa^4}{64} \right) = \frac{P}{64D} (a^2 - r^2)^2 \quad \dots\dots(6)$$

응력 σ_r , σ_t 와 외형 ϵ_r , ϵ_t 과의 관계는 다음식으로 표시된다. (7)

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_t &= \frac{1}{E} (\sigma_t - \nu \sigma_r) \\ \epsilon_r &= \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_t) \end{aligned} \right) \quad (7)$$

따라서 (7)식에 (4)식, (6)식을 대입하면

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{ZP}{16D} (a^2 - 3r^2) \\ \epsilon_t &= \frac{ZP}{16D} (a^2 - r^2) \end{aligned} \right) \quad (8)$$

로 된다.

(8)식에서 얻어진 ϵ_r 및 ϵ_t 를 스트레인 검출용원판에 부착시킨 스트레인 게이지의 裨에 따라서 적분하면 피 측정압력 P 에 대한 게이지의 總스트레인 T_d 는 다음식으로 구해진다.

$$T_d = \int_r \epsilon_r dr + \int_t \epsilon_t dt \quad (9)$$

다음으로는 이 스트레인 T_d 를 電氣量으로 검출해야겠는데 기준압력 P_0 에 있어서의 게이지 스트레인 T_{p0} 에 의한 전기저항 $R(T_{p0})$ 가 이미 알려져 있다면 이 $R(T_{p0})$ 와 피 측정압력 P 에 있어서의 게이지 스트레인 T_p 에 의한 전기저항 $R(T_p)$ 과의 差는 다음식으로 표시할 수 있다.

$$|R(T_p) - R(T_{p0})| = C|P - P_0| \quad (10)$$

윗식에서 $R(T_p)$ 와 $R(T_{p0})$ 를 측정하므로써 P 를 알 수가 있다. 단 C 는 비례정수이다.

3. 測定系의 構成 및 實驗方法

그림 3은 硝子歪形을 이용한 기압계의 구성도이고

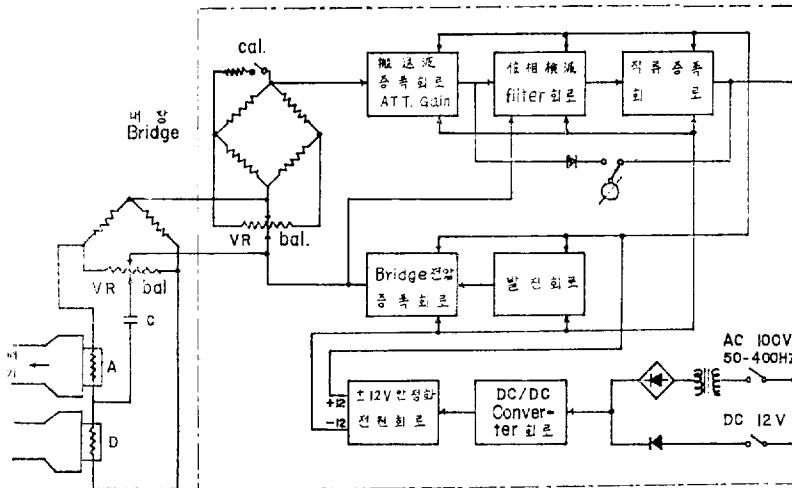


그림 3. 氣壓計의 構成圖
Fig. 3. Organization diagram of manometer

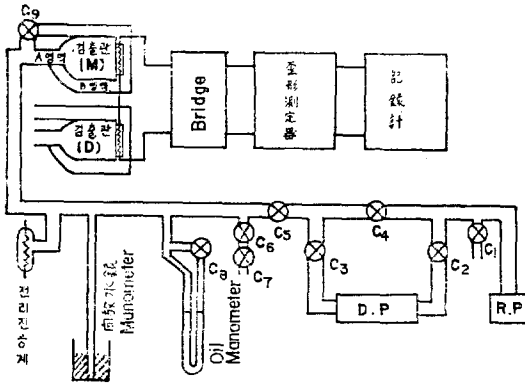


그림 4. 測定回路의 概略圖
Fig. 4. Outline diagram of measuring circuit

그림 4는 실험장치의 개략을 표시한 것이다. 그림 4에서 검출관 M, D는 동일한 형상을 갖는 초자 의형압력계이고 M의 스트레인 검출용원판에는 측정용 스트레인 게이지(일제, KFC-2-D6-11, 게이지물 2.1)를 또 D의 원판에는 온도 보상용 스트레인 게이지를 각각 부착시켰다. 그리고 이 두 스트레인 게이지를 브리지 회로로 구성시킨 다음 歪形測定器(일제, DPM-IN(52 dB))에 접속시키고, 피측정 압력 P에 대한 스트레인 게이지의 저항변화(10식)을 스트레인 전압 Vr로 측정하였다.

측정에 들어가지 전에 검출관 M의 A領域은 油擴散 펌프와 回轉펌프를 사용하여 1×10^{-5} (Torr)의 진공도로 배기시키고, 이것을 가지고 기준압력 P₀로 정하였다. 동시에 B領域은 760(Torr)로 하였다. 여기서 壓力밸브 C₉를 조작하여 B領域의 압력을 임의로 조절할 수 있으므로 A, B 領域의 압력차로 스트레인량을 크게 검출할 수가 있다.

측정압력은 최소 0.5 Torr부터 최대 760 Torr까지 50수점을 10수회 올렸다 내렸다 하여 되풀이 측정하였다.

그리고 리이크 밸브(Leak Valve) C₆, C₇에서 공기 및 다른 기체의 임의량을 導入하여 수 10 Torr 以下の 압력범위에서는 油마노미터(Oil Manometer)를, 또 그것보다 高壓인 경우는 開放水銀 마노미터를 각각 사용하여 壓力校正을 하였다.

4. 實驗의 結果 및 考察

그림 5는 충분히 배기(10^{-5} Torr)시킨 기압점을 0기압으로 하고, 공기를 수시로 일정한 量 도입시켜, 피측정압력 P를 파라미터로 한 歪形出力電壓의 經時變化

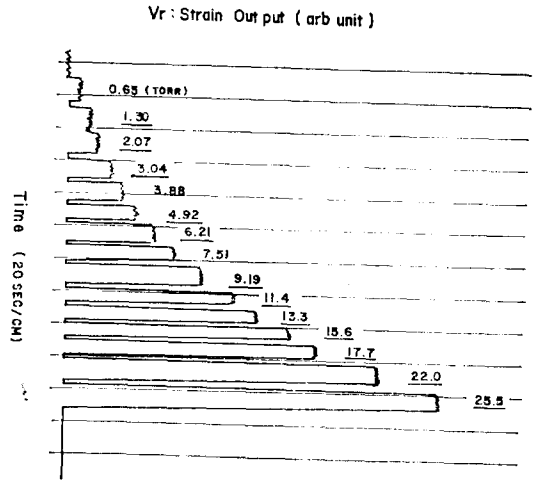


그림 5. 壓力에 대한 歪形電壓의 測定例
Fig. 5. Experimental strain voltage for pressure

예를 0.65 Torr부터 25.5 Torr까지 펜 記錄計로 기록한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 기압이 0 Torr에서 어느 기압으로 변화하면 즉시 기압계가 그 변화된 기압을 指示하고 있는 것으로 보아 應答速度가 대단히 빠르다는 것을 알 수 있다.

또 여기서는 高利得(52dB)인 歪形測定器를 사용하였는데 그림으로 보아서는 雜音의 영향도 볼 수 없고

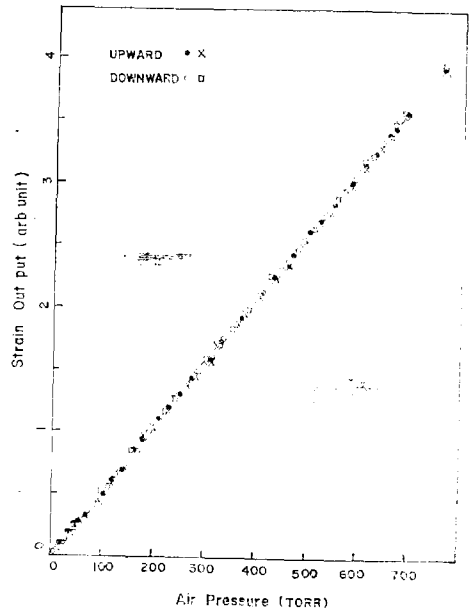


그림 6. 壓力에 대한 歪形出力(感度曲線)
Fig. 6. Strain output for pressure (sensitivity curve)

요가 없다는 것을 알 수 있다.

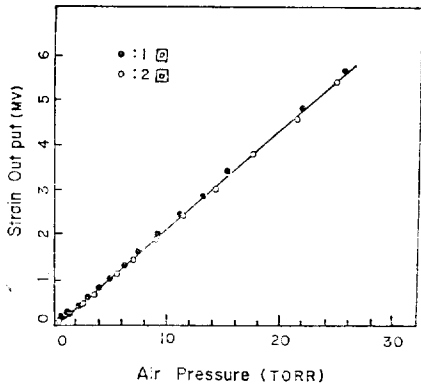


그림 7. 그림 6의 低壓部의 擴大圖
Fig. 7. Magnifying graph of locality of low pressure in Fig. 6.

SN比도 문제가 없다는 것을 알 수 있다.

또한 게이지의 온도보상에 충분히 배려하였는데 실내온도(25°C)를 중심으로 하여 $\pm 3^\circ\text{C}$ 의 온도변화에서는 스트레인 게이지의 온도 의존성은 볼 수 없었고 또 스트레인 게이지의 부착으로 인한 經時特性에도 변화가 없는 것을 확인하였다.

그림 6은 0 Torr에서 760 Torr까지 10수회 되풀이하여 昇降測定을 한 결과를 측정압력에 대한 歪形出力電壓(感度曲線)형으로 그린 것이다. 그림 7은 그림 6에서 0~30 Torr간의 측정범위를 확대시켜 그린 것이다. 두 그림에서 0점에 復歸할 때 전혀 변동이 없는 것으로 보아 歪形出力電壓은 昇降壓力 경로에는 의존하지 않고 측정압력에 비례하여 直線的으로 변화되는 것을 알 수 있다.

즉 이것은 이 압력계의 動作原理가 피압력변화에 따르는 원판의 스트레인을 여기에 부착시킨 스트레인 게이지로 검출하는 것이므로 신속히 압력변화를 傳達시킬 수 있기 때문이다. 결국 이 압력계는 압력 변화를 직접 電氣的으로 검출할 수 있으므로 종래의 압력계와 같이 측정기체에 따라서 압력에 관계되는 二次的 物理量을 측정하고, 이것을 다시 압력에 대하여 校正할 필

5. 結 論

이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 0.1~100 Torr 정도의 압력을 측정하는 장치로써는 精度가 높고, 측정치가 전압치로 얻어지므로, 指示記錄이 용이하고 취급이 간단하다.
 2. 變換器는 측정하는 기체와 접하는 부분이 초자판이므로 기체의 종류에 따라서 劣化 등의 영향을 받을 우려가 없다.
 3. 압력변화에 대한 應答速度가 빠르고 과도적인 압력 변화의 측정이 가능하다.
 4. 電離真空計, 熱傳對真空計 등에서 필요로 하는 기체정수의 교정이 불필요하다.
- 끝으로 본 연구는 産學財團 學術研究費로 이루어진 것을 부언하며 謝意를 표한다.

參 考 文 獻

1. 中川: 眞空技術實務讀本 오름社, p.170 (1976)
2. 熊谷外: 眞空の物理と應用 裳華房, p.315 (1975)
3. 共和電業: 게이지와 그取扱法 (1974)
4. 石井: 眞空技術 コロナ社 p.250 (1975)
5. 鶴戶口外: 材料力學下卷 裳華房 p.126 (1976)
6. S.P. Timoshenko and J.N. Goodier; "Theory of Elasticity, McGraw-Hill" p.350 (1970)
7. Timoshenko: Strength of Material, McGraw-Hill p.167 (1975)
8. S. Dushman and J.M. Lafferty; "Scientific Foundation of Vacuum Technique, JohnWiley and Sons" p.806 (1972)
9. J. Yarwood and M. Pirani; "Principles of Vacuum Engineering, Chapman and Hall" p.578 (1971)
10. 中島外: 眞空工學 Hand Book 朝倉書店 p.885 (1970)