導電性溶液を用いた二液マノメータ*

段 野 勝^{*1}

Two-Fluid Manometer Using Conductive Solutions

Masaru DANNO

This manometer is made of a glass U-tube filled with two immiscible conductive solutions, with one electrode set on each side of the boundary surface between the two solutions. The solutions are prepared by adding several drops of dilute sulfuric acid each to methyl-ethyl-ketone and distilled water. When a pressure difference is applied to the manometer, the boundary position is moved, and the resistance between the two electrodes varies with the move. An electrical output signal is easily obtained from the variation. This manometer is suitable for use with a pitot tube anemometer, and its advantages over an ordinary U-tube manometer are ease of use, sensitivity to pressure differences, and applicability to continuous recording. This report mainly describes the static and dynamic behaviors of the monometer, which were obtained theoretically, based on physical properties of the two solutions measured experimentally.

Key Words: Measurement, Electromagnetic Measurement, Flow Measurement U-Tube Manometer, Pitot Tube

1. 緒 言

ピトー管で低風速を測定するとき、生ずる動圧は小さく、測定は難しい。このような微小気圧差測定に適した圧力計の一つに二液マノメータがあるが、沈鐘式圧力計などの製品化が進み今日ではほとんど利用されなくなった。本報告はこのマノメータの二液に混ざらない二種類の導電性溶液を用い、気圧差によって生ずる二液の界面の移動を電気信号に変換増幅し、微小気圧差の記録を可能にする計器の研究を行い、本器の性能とその諸特性を明らかにした。

2. 記 号

A : 大きい容器の断面積
 a : U字管部の断面積
 D : ピトー管とマノメータをつなぐ管の内径
 D_p : U字管の内径
 g : 重力の加速度
 h : 二液の界面の変位量
 L : U字管部の全長

l : ピトー管とマノメータをつなぐ管の長さ

p : マノメータに加わる圧力

p_a : 大気圧

p_i : ピトー管に作用する全圧

R : 空気のガス定数

T : 絶対温度

x : U字管の自由面の変位

x_0 : $p=p_a$ のときの液の自由面から測った大きい容器の底面までの深さ

γ : $(\gamma_1 + \gamma_2)/2$

γ_1, γ_2 : 二液の密度 ($\gamma_1 > \gamma_2$)

η : 減衰係数

μ_a : 空気の粘度

μ_m : 二液の平均粘度

ρ_1, ρ_2 : 二液の抵抗率 ($\rho_1 < \rho_2$)

3. 構造並びに原理

二液マノメータの構造を図1に示す。内径78 mmの二つの大きいガラス容器に図1のように内径7.8 mmのU字管が繋がれていて、これに電気伝導度の異なる混ざらない二液が入っている。①, ②, ③および④はU字管に挿入されている白金電極で、二液の界面はこの間にくるように調節されている。マノメー

* 平成5年7月2日 東海支部浜松地方講演会において講演、原稿受付 平成5年12月10日。

^{*1} 正員、福井工業大学工学部 (〒910 福井市学園3-6-1)。

図1 マノメータの構造

タに加わる気圧差 $p - p_a$ によって両界面が上下すると、①～②間の抵抗 R_2 および③～④間の抵抗 R_1 は一方は増加し他方は減少する。これらの抵抗を交流ブリッジの相隣る辺に接続し、温度補償を行うとともにブリッジの出力を直流に変換し記録計に入力した。

導電性二溶液は次のようにして調整した。まず大きい容器にメチルエチルケトン⁽¹⁾ (CH_3COCH_3) と蒸留水をほぼ等量入れる。これに希硫酸数滴を加えてよくかくはんして約24時間放置し、二液が上下に分離して界面ができるのを待つ。その後ピペットを用いて二液の界面がそれぞれ二電極間にくるようにU字管に入れる。U字管の上部をつないでいるコックは差圧零のときでも液面の高さに差ができることがあるので、これを一時開くことによって液面を水平に保たせるためのものである。U字管につながれているポンプは界面の上下位置を微調整するためのものである。電極には太さ1.0 mmの白金線を用い、U字管部に設けられたシリコン栓を通して挿入されている。電源には電気分解を避けるため1000 Hzの交流を与え、出力を直流に変換して記録計に接続した。

4. 静 特 性

マノメータに加える気圧差 $p - p_a$ によって生ずる界面の移動 h は式(1)によって与えられる。

$$p - p_a = 2g(\gamma_2 - \gamma_1)(A - a)/A h \quad \cdots (1)$$

界面の移動 h による電極間抵抗 R_1 および R_2 は上の電極から気圧差零のときの界面の距離を C および電極間隔を l_m とし、管内の電流分布が一様であると仮定すれば、

$$R_1 = \{\rho_1 C + \rho_2(l_m - C) + (\rho_2 - \rho_1)h\}/a \quad \cdots (2)$$

表1 マノメータの諸元

A	48.0 cm ²	γ_1	810 kg/m ³
a	0.48 cm ²	γ_2	1000 kg/m ³
ρ_1	10 Ωm	l_m	10 cm
ρ_2	1000 Ωm		

γ and ρ are the values at 15 °C

図2 マノメータの特性

図3 マノメータの実用特性

$$R_2 = \{\rho_1 C + \rho_2(l_m - C) - (\rho_2 - \rho_1)h\}/a \quad \cdots (3)$$

式(1)、(2)および(3)から気圧差とブリッジの出力電圧の関係を求めることができる。図2は図1に示す C の値を30 mm および47 mm とし、表1に示すマノメータの諸元を用いて求めた気圧差と出力の関係を示す。実線は実験結果である。図2のように測定範囲が大きくなると曲線の線形性が悪くなるとともに実験と計算結果に差が生ずるようになる。特に $p - p_a$ が大き

くなり二液の界面が電極に近くなると著しく感度が上昇して不安定となり、界面が電極を通過すると測定は不能となる。本器の目的とする測定範囲を差圧 10 Pa 以内とすると、出力電圧と差圧の関係は図 3 のように直線となり、実験結果と計算結果はよく一致し、良好な特性を示す。

気温変化によって生ずる液の抵抗変化の影響は前述のように補償されているが、液の密度は温度変化ともに変化するので、1°C 当たり指示値に 0.38% 程度の影響が現れる。

5. 過 渡 特 性

本器をピトー管に接続したとき、接続する管路が長く、内径が小さいと応答が悪くなる。応答の遅れは空気がピトー管から管路を通して圧力に応じて補給あるいは排除されなければならないために起こる。この時間遅れを空気の状態変化が等温的で、管路の応答を一次遅れとみなして解析する⁽²⁾。管内流れを発達したポアズイユ流れとし、ピトー管入口圧力が p_a から p_i に突変したとすると、マノメータ内気相圧力 p と管内空気の体積流量 Q との間には式(4)に示す関係がある。

$$Q = \pi D^4 (p_i - p) / (128 \mu_a l) \quad (4)$$

いま微小時間 dt の間に流れる空気に質量を dw 、空気の密度を γ_a とすれば、

$$dw = (p_i - p) / R_w \cdot dt \quad (5)$$

ここで $R_w = 128 \mu_a l / (\pi D^4 \gamma_a)$ である。この空気量 dw による容積 V なるマノメータ内の空気の圧力と体積増加は、

$$V dp + p dV = RT dw \quad (6)$$

マノメータ液面変位による気相の体積増分 dV は、

$$dV = A dx \quad (7)$$

で与えられるので、マノメータの気相および圧力の初期値をそれぞれ $V = V_0$ および $p = p_a$ とすれば、

$$V = \alpha (p - p_a) + V_0 \quad (8)$$

ここで、

$$\alpha = A / \{2g(\gamma_1 - \gamma_1 A/a + \gamma_2 A/a)\}$$

である。式(6)に式(8)を代入し、 $RT/R_w = b$ とおくと、

$$(V_0 - \alpha p_a + 2\alpha p) dp = b(p_i - p) dt$$

あるいは、

$$(V_0 + \alpha p_a - 2\alpha p_a + 2\alpha p) dp = b(p_i - p) dt$$

ここで、 $2\alpha p_a = 2\alpha p$ と近似すると、

$$\tau dp/dt + p = p_i \quad (9)$$

式(9)の τ は時定数であり、 $\tau = (V_0 + \alpha \cdot p_a) / b$ で与えられる。 $t=0$ のとき、 $p = p_a$ であるので、式(9)は、

$$p_i - p = (p_i - p_a) \exp(-t/\tau) \quad (10)$$

で与えられ、時定数は

$$\tau = \frac{128 \mu_a l}{\pi D^4 \gamma_a R T} \{A p_a / [2g(\gamma_1 - \gamma_1 A/a + \gamma_2 A/a)] + V_0\} \quad (11)$$

式(11)から τ は l に比例し、 D^4 に反比例することがわかる。 τ を小さくするには管径 D を太くすることが効果的である。表 2 に示す諸元を与えて時定数 τ を求めると、 $\tau = 0.13$ s となる。

次にマノメータ内の液の慣性力や粘性力を考慮した遅れを考察する⁽³⁾。U 字管内の液の運動方程式を式(12)のように仮定する。

$$\Delta p = p - p_a = K \frac{d^2 x}{dt^2} + \eta \frac{dx}{dt} + \lambda x \quad (12)$$

式(12)の η および λ は、 $\eta = 128 \mu_m L A / (\pi \cdot D_p^4)$ 、 $K = (2x_0 + L) \gamma$ および $\lambda = 2 \gamma g$ とした。また式(12)は、

$$\Delta p(s) = \lambda \{s^2 X(s) + 2\zeta \omega_n s X(s) + \omega_n^2 X(s)\} / \omega_n^2 \quad (13)$$

本器は U 字管の上部に大きい容器がつながれているので、 ζ や ω_n を理論的に求めるのは無理がある。そこでマノメータの入口にポンプをつなぎ、差圧を与えた後ポンプ近傍に設けたコックを開き、差圧 Δp を零として液柱に自由振動を与え、出力を記録計に記録した。この結果から振動の周期 2.44 秒および対数減衰率 1.18 を得た。この値を用い、式(13)の左辺を零と置いた式から $\zeta = 0.19$ および $\omega_n = 2.62$ を得た。式(10)並びに(13)から、

$$X(s) / A_0 = \omega_n^2 / \{s(1 + \tau s)(s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)\} \quad (14)$$

ただし、

$$A_0 = (p_i - p_a) / \lambda$$

である。式(14)と表 2 に示す値を用いてピトー管入口の圧力が p_a から p_i に突変したときの応答を計算した結果は図 4 の実線のように、破線は実験結果を示す。なお時間領域において

$$x(t) / A_0 = (p - p_a) / (p_i - p_a)$$

である。また τ は $1/D^4$ の値と対応関係にあるので、この値も図中に記入した。実験では $D = 4$ mm および $l = 1.0$ m のゴム管を使ったので、 $\tau = 0.13$ である。結果は図のように強い振動的応答を示すので、実用上望ましくない。 τ を大きく、すなわちピトー管につなぐ管を長くすると振動は小さくなるが、整定時間が長く(7~8 秒)なる。これを改善するため、U 字管の一部の内径を $1/3$ に絞り管内流れに抵抗を与えると、 $\zeta = 1$ となり、図 5 に示すように振動を抑え整定時間を 2 秒程度に短くすることができた。したがって、実用的には U 字管部にコックなどの可変絞りを設けるとよい。

表 2 応答計算に用いた諸元

D	4.0 mm	T	288K
l	1.0 m	V ₀	1.57 cm ³
p _a	1 × 10 ⁵ Pa	R	287J/(kg·K)
γ _a	1.2 kg/m ³	μ _a	18.3 μPa·s
λ	17.6 × 10 ³ kg/(m·s) ²	ω _n	2.62
K	468 kg/m ²	η	0.16 × 10 ⁵ N·s/m ³
x ₀	1.0 cm	ζ	0.19
μ _w	0.001 Pa·s	τ	0.13

図 4 マノメータの過渡特性

6. 結 言

メチルエチルケトンと蒸留水に少量の希硫酸を加えた、互いに混ざらない二液を使ったマノメータを試作し、その特性と実用性について調べた結果は次のようである。

(1) 差圧が 10~30 Pa 程度までは差圧と出力電圧は正比例し、良好な結果が得られた。なお本器はブリッジ出力の交直変換、増幅が行われているため、出力電圧からただちに差圧を求める精度はなく、フルスケール出力を一度検定しておく必要がある。

図 5 改善されたマノメータの過渡特性

(2) 過渡応答は振動的で整定時間は長い(約 9 秒)。U 字管の一部断面を 1/3 程度絞ることによって、振動を抑制し、整定時間を 2 秒程度に縮小することができた。

(3) 気温の影響は U 字管部の二つの抵抗がホイートストンブリッジの相隣る辺に接続されているので電気的には補償されているが、密度変化によって 0.38%/C の影響をうける。

(4) 与えた差圧が大きくなり、二液の界面が電極に近づくと、感度は上昇するが不安定となり、電極を通過すると測定不能となる。

終りに実験の遂行にご協力いただいた福井大学林庄司技官と福井工業大学から特別研究費を受けたことを付記して謝意を表す。

文 献

- (1) 有機合成化学協会編, 溶剤ポケットブック, (1976), 367, オーム社。
- (2) 段野・ほか 3 名, 電空弁ポジショナの動特性の改善(第 1 報, 空気圧信号の伝送遅れ), 機論, 55-512, B(1989), 1124。
- (3) Doebelin, E. O., *Measurement Systems Application and Design*, (1983), 412, McGraw-Hill。