研究論文

差圧式漏れ計測装置の再現性に対する温度回復時間の影響*

ハルス ラクサナ グントル**, 蔡 茂 林***
川 嶋 健 嗣***, 香 川 利 春***

The Effect of Temperature Recovery Time on the Repeatability of a Differential Pressure Type Air Leak Tester

Laksana Guntur HARUS, Maolin CAI, Kenji KAWASHIMA, Toshiharu KAGAWA

Differential pressure type air leak testers are widely used in industry due to their suitability for automation, low manufacturing cost, accuracy of 2% FS and applicability for leaks as small as $1.7 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$. We developed a differential pressure type leak tester, modified the circuit and investigated its characteristics. In the previous differential type air leak tester, the temperature recovery time was set to be constant for various test pressures and volumes. We found that different test pressure and volume required a different temperature recovery time to obtain the expected repeatability and accuracy. Detailed investigation showed that the higher the test pressure and the bigger the volume, the longer temperature recovery time was required to obtain the expected repeatability and accuracy. We also demonstrated the effect of temperature recovery time on repeatability by comparing the normal chamber and copper wire stuffed isothermal chamber. The result showed that the copper wire stuffed isothermal chamber suppressed uncertainty.

Key words : Leak Tester, Leak, Temperature Recovery Time, Repeatability, Accuracy

1. 緒 言

漏れ検出は産業分野において大変重要な課題である。例えばガスパイプライン、压力容器や真空機器等において、漏れの検出は必要不可欠であり、種々の方法が提案され、実用化されている¹⁾。

主な計測方法としては、超音波を用いる方法^{2),3)}、ヘリウムガスをトレーサガスとして用いる方法⁴⁾、漏れ流量を流量計で測定する方法⁵⁾や差圧センサを用いる差圧式^{6),8)}などがある。漏れ検出方法の中で差圧式は、その簡便さ、低コスト、自動化に適している等の理由により広く用いられている⁹⁾。現状では分解能が $\pm 2\%$ FS及び漏れ流量が $1.7 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ 以上において計測が行われている。

差圧式の漏れ計測は、漏れの無いマスター容器と被測定容器の間の差圧を測定して漏れの検出を行うものである。通常0.1MPa以下で計測する事が多い。漏れ計測を開始する前に2つの容器に同時に空気を充填する。压力容器に気体を充填する際に、壁面との熱交換によって容器内の圧力応答が変化する事をすでに著者らは明らかにしている

^{10),11)}。圧力を高くすればそれだけ温度回復に時間がかかり、容器容積が大きければ温度回復の時間が長くなる。

差圧式の漏れ計測において、マスター容器と被測定容器の2つの容器に同時に気体を充填した際、容器内空気の壁面との熱交換のわずかな不均衡によって、温度回復に差異が生じ、結果として漏れに起因しない差圧が発生する。つまり、温度が安定する前に測定を開始すると測定誤差を生じる。精度の高い漏れ検出のためには、十分な温度回復時間を与えることが必要となる。しかし、差圧式の漏れ検出において、温度回復時間について十分な考察は行われていない。また、1MPaまでの高圧に対応可能でかつ計測時間の短縮化の要求がある。

そこで、本研究では1MPaまでの高圧下においても計測可能でありかつ計測時間の短縮化を実現できる測定回路を提案し、差圧式の漏れ計測における温度回復時間に対する考察を行う。

主 な 記 号

h	: 熱伝達率	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
P	: 圧力	$[\text{Pa}]$
ΔP	: 差圧	$[\text{Pa}]$
Q_L	: 漏れ量	$[\text{m}^3/\text{s}]$
Q_{LG}	: 発生された漏れ量	$[\text{m}^3/\text{s}]$
R	: 空気のガス定数	$[\text{m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})]$
S_h	: 空気と外部間の熱伝達面積	$[\text{m}^2]$

*平成18年7月24日 原稿受付

**東京工業大学大学院メカノマイクロ工学専攻

E-mail: harus@k-k.pi.titech.ac.jp

***東京工業大学精密工学研究所

(所在地 〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

T_h	：熱平衡時定数	[s]
T_r	：温度回復時間	[s]
T_{rr}	：必要な温度回復時間	[s]
V	：体積	[m ³]
W	：空気質量	[kg]
θ	：温度	[K]
ρ	：空気密度	[kg/m ³]

添字

m	：マスターチャンバー
t	：テストチャンバー
i	：充填
o	：放出

2. 開発した差圧式漏れ計測装置

2.1 計測装置の回路及び特性

開発した差圧式漏れ計測装置の構成回路図を図1に示す。計測装置はPLC (Programmable Logic Controller)、差圧センサ及びバルブから構成されている。PLCは検出プロセス、電磁弁の開閉の順番および充填から計測開始までの時間（温度回復時間） T_r を制御する。図1のA～Dは電磁弁を、1から5は電磁弁によって開閉が可能な空気操作弁を表している。PLCから電磁弁A、B、C及びDに指令電圧が印加され、それにより空気操作弁1、2と3及び4と5の空気操作弁が切り換わる。

図1に示されるように空気操作弁2、3、4及び5の間のメインラインにバイパスラインを付け、充填—放出がこのバイパスラインで行われることでメインラインに設置さ

れた差圧センサが安定する。それにより開発された漏れ計測装置の高压対応が可能となった。漏れ計測装置の高压対応が可能となったことで、測定レンジが高くなった。また測定終了時に差圧センサ部の空気を大気へ放出することなく、中の温度がほぼ変化しないので、測定時間の短縮化が図れる。なお、詳細については後述する。

開発した差圧式漏れ計測装置は、測定レンジ0–200Pa、分解能 $\pm 2\%$ FSの長野計器社製差圧センサを用い、最小検出可能値は $1.7 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ で最大テスト圧力は1MPaである。

2.2 計測装置の操作順序

計測装置の各電磁弁のON-OFFの順序を図2に示し、その詳細を以下に述べる。

電磁弁A ON：

差圧センサが設置された空気操作弁2と4及び3と5を結ぶメインラインならびにマスター及びテストチャンバーに対して同時に加圧空気が充填される。2つの容器へはバイパスラインを通して容器内に速やかに空気が充填される。

電磁弁C ON：

バイパスラインが遮断され、各容器と差圧センサが配置されているメインラインが接続される。

電磁弁D ON： 2つの容器が導通する。

電磁弁B ON： 供給圧が遮断される。

電磁弁D OFF： 両容器が遮断され計測が開始される。

つまり、電磁弁AのONから電磁弁DのOFFまでの時間が容器内の空気の充填から計測開始までの時間であり、温度回復時間 T_r に相当する。

Fig. 1 Diagram of the developed leak tester

Fig. 2 Valve ON-OFF sequences

次に、

電磁弁C OFF:

容器がメインラインから遮断されバイパスラインと接続される。

電磁弁A OFF:

空気操作弁1を通してバイパスラインから両容器内加圧空気が放出される。

電磁弁B ON:

電磁弁BをONの状態に保つことで、メインライン内の加圧空気は放出されることなく維持される。

以上のように、メインライン内の加圧状態を維持するようにバイパスラインと空気操作弁4, 5を付加し、高圧対応および計測時間の短縮化を実現している。

3. 漏れ計測の結果

3.1 漏れ流量と差圧の関係

漏れ流量と差圧の関係式を以下に示す。はじめに気体の状態方程式は次式で表される。

$$PV = WR\theta \quad (1)$$

状態方程式(1)からを求めて時間で微分し、(2)、(3)式を得る。

$$\frac{dW_m}{dt} = \frac{V_m}{R\theta_m} \frac{dP_m}{dt} - \frac{P_m V_m}{R\theta_m^2} \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dW_i}{dt} = \frac{V_i}{R\theta_i} \frac{dP_i}{dt} - \frac{P_i V_i}{R\theta_i^2} \frac{d\theta_i}{dt} \quad (3)$$

マスターとテストチャンバー内に空気の質量変化は(2)と(3)式に示される。漏れ流量は次式により計算される。

$$\rho Q_L = \frac{dW_i}{dt} - \frac{dW_m}{dt} \quad (4)$$

(2)と(3)式を(4)式に入れると次式が導かれる。

$$\rho Q_L = \frac{V_i}{R\theta_i} \frac{dP_i}{dt} - \frac{V_m}{R\theta_m} \frac{dP_m}{dt} - \frac{P_i V_i}{R\theta_i^2} \frac{d\theta_i}{dt} + \frac{P_m V_m}{R\theta_m^2} \frac{d\theta_m}{dt} \quad (5)$$

2つの容器の温度および容積が等しければ、(5)式より次式の漏れ流量が得られる。

$$Q_L = \frac{1}{\rho} \left(\frac{V}{R\theta} \frac{d\Delta P}{dt} - \frac{\Delta P V}{R\theta^2} \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (6)$$

漏れ検出は容器内の温度回復後に開始することから温度変化は0と見なせる。よって、(6)式は次式のように書き直することができる。

$$Q_L = \frac{V d\Delta P}{\rho R \theta dt} = \frac{V \Delta(\Delta P)}{\rho R \theta \Delta t} \quad (7)$$

ただし、図3に示すようにとしてを用いた。

3.2 実験結果

容器容積 $V=140 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ のマスターチャンバーを用いて実験を行った。被測定容器は同体積の容器に可変絞りを接続し、漏れ流量 $5 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ があるものとして実験を行った。図1に示したように漏れ流量はバブル検知式の漏れ計測計で確認した。

図3は供給圧力 500kPa で、 T_r を 10 秒とした場合の差圧の測定結果を示している。測定開始となる 10 秒から差圧が一定の傾きで増加している。(7)式を用いて漏れ流量を計算した結果 $4.98 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ となり、精度良く計測できることが確認された。

4. 容器内温度変化の影響

4.1 温度回復時間と測定再現性の関係

温度回復時間が短い場合には容器内の状態が安定しておらず、安定した計測が実現できない。このことを実験によって示す。図4と図5は T_r をそれぞれ 6 秒と 10 秒に設定して実験を行った場合の結果である。再現性と T_r の関係を明らかにするために、各々の T_r について測定を 5 回繰り返した。 T_r が 6 秒である図4の結果を見ると、測定開始からの差圧の波形に大きなばらつきがあることがわかる。これは容器内の温度回復が十分に安定していないためである。

Fig. 3 Differential pressure change due to $5 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ generated leak ($P=500\text{kPa}$ and $V=140 \times 10^{-6} \text{ m}^3$)

Fig. 4 Repeatability of the differential pressure responses within 5 repetition ($T_r=6s$, $P=500kPa$, $V=140 \times 10^{-6}m^3$ and $Q_{LG}=5 \times 10^{-9}m^3/s$)

Fig. 5 Repeatability of the differential pressure responses within 5 repetition ($T_r=10s$, $P=500kPa$, $V=140 \times 10^{-6}m^3$ and $Q_{LG}=5 \times 10^{-9}m^3/s$)

次に、温度回復が測定結果に及ぼす影響を調べるために、全く漏れない容積が同じ容器をマスターと被測定用として用いて、温度回復時間と差圧の関係を計測した。実験条件としては、2つの異なる容積 ($140 \times 10^{-6}m^3$ と $400 \times 10^{-6}m^3$)、3種類の供給圧力 (200kPa, 500kPa, 800kPa) 及び4つの温度回復時間 T_r (6 s, 10s, 14s, 18s) について、それぞれの組み合わせで実験を行った。なお、計測は同じ条件で5回連続して行い、測定間のばらつきを調べた。

図6は供給圧力 500kPa, T_r を 6 秒とした場合の結果であり、図7は供給圧力 500kPa において、 T_r を 10 秒とした場合の結果である。 T_r が 6 秒である図6の結果を見ると、差圧のばらつきが大きいことがわかる。これは容器内の温度回復が十分に整定していないためである。一方、 T_r を 10 秒とした図7に示される結果を見ると、差圧のばらつきが小さいことがわかる。これは容器内の温度回復が十分に整定しているためである。

図8は各実験における最大差圧のばらつきをプロット

Fig. 6 Repeatability of the differential pressure responses of leak-tight normal chambers within 5 repetition ($T_r=6s$, $P=500kPa$ and $V=140 \times 10^{-6}m^3$)

Fig. 7 Repeatability of the differential pressure responses of leak-tight normal chambers within 5 repetition ($T_r=10s$, $P=500kPa$ and $V=140 \times 10^{-6}m^3$)

したものである。図8より、圧力が高いほど温度回復時間が長くなることが明らかである。図8中の時間軸と平行な実線は漏れ計測の分解能 $1.7 \times 10^{-11}m^3/s$ を満たす最大差圧である。この差圧以下であれば漏れ計測において必要とされる分解能を満たし、計測が可能である。従って図より各条件において必要とされる最短の温度回復時間 T_r を得ることができる。

4.2 容器内温度変化の抑制効果

前節では、容器内の温度回復の不確実性が差圧にばらつきを生じることを実験的に示した。温度回復のばらつきを押さえる一つ的手段として、著者らが提案している等温化圧力容器¹²⁾を適用した。

図9の下に示すように容器内に金属製綿を容器容積に対しておよそ5%封入した。これによって、容器内の状態変化をほぼ等温にできる¹³⁾。

図10は図6と同様の実験条件での結果を示している。約8Paの差圧が生じているが、これは図10からも明らか

Fig. 8 Range of uncertainty in various pressures, volumes and T_r

(a) Empty chamber

(b) Copper wire stuffed isothermal chamber

Fig. 9 Normal and copper wire stuffed isothermal chamber

のように、目標とする測定精度内に収まっている。また、5回の計測におけるばらつきがほとんどないことが確認できる。この結果より、差圧式漏れ計測装置において温度回復による不確かさを減少させ、計測時間の短縮化を図るために、等温化压力容器は有効であることが明らかとなった。ただし、実際の計測において毎回金属製綿を封入することは困難であり、等温化压力容器をサブタンクとして接続することで、温度のばらつきを抑制するなどの方法の検討が必要である。この検討については今後の課題である。

4.3 温度回復時間の目安

容器内の圧縮空気の温度変化は次式の熱平衡時定数で規定できることが知られている¹¹⁾。

Fig. 10 Repeatability of the differential pressure responses of leak-tight isothermal chamber within 5 repetition ($T_r=6s$, $P=500kPa$ and $V=140 \times 10^{-6}m^3$)

Fig. 11 The required temperature recovery time and thermal-time constant

$$T_h = \frac{C_v W}{S_h h} = \frac{C_v P V}{S_h h R \theta} \quad (8)$$

図11の上は設定圧力と必要とされる最短の温度回復時間 T_{rr} の関係を示している。また下の図は最短温度回復時間 T_{rr} と熱平衡時定数 T_h の関係を示している。この結果から、最短温度回復時間 T_{rr} は熱平衡時定数 T_h の5倍となることがわかった。

5. 結 言

本研究では1MPaの加圧に対応可能な差圧式漏れ計測装置を開発し、その特性を検討した。得られた結果を以下に示す。

・開発された装置は1MPaまでの高圧に対応可能で $1.7 \times$

$10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ の漏れ流量が検出可能であることを実験によって明らかにした。

- ・温度回復時間の不足は測定精度の誤差の要因となることを示した。圧力が高いほど、長い温度回復時間を要する。この温度回復時間は熱平衡時定数の5倍以上にすることが望まれることを示した。
- ・容器内に金属製綿を封入した等温化压力容器を用いることで温度回復のばらつきを押さえられることを示した。

参 考 文 献

- 1) (社)日本油空圧学会編, 新版油空圧便覧 (1989)
- 2) Witness Mpesha and Sarah L.Gassman: Leak Detection in Pipes by Frequency Response Method, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.127, 134/147 (2001)
- 3) Pedro J.Lee *et al*: Frequency Domain Analysis for Detecting Pipe Line Leaks, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.131, 596/604 (2005)
- 4) I.D.Lee, O.I.Smith, and A.R.Karagozian: Hydrogen and Helium Leak Rates from Micromachined Orifices, Journal of AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics), Vol.41, 457/464 (2003)
- 5) Steven G. Buchberger and Gayatri Nadimpalli: Leak Estimation in Water Distribution Systems by Statistical Analysis of Flow Readings, Journal of water resources, planning and management, Vol.130, 321/329 (2004)
- 6) G.Wang, D. Dong and C. Fang: Leak detection for transport pipelines based on autoregressive modeling, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.42, 68/71 (1993)
- 7) A.L.Souza, S.L.Cruz and J.F.R.Pereira: Leak Detection in Pipeline through Spectral Analysis of Pressure Signals, Braz. J. Chem. Eng., Vol.17, 4/7 (2000)
- 8) M Taghvaei et al: Leak Detection in Pipelines using Cepstrum Analysis, Measurement Science and Technology, Vol.17, 367/372 (2006)
- 9) Leak tester industry: <http://www.directindustry.com>
- 10) 香川, 清水, 森田: 空気圧容器内壁面対の熱的特性が圧力応答に及ぼす影響, 測自動制御学会論文集, 23-8, 870/872 (1987)
- 11) 香川, 清水: 空気圧抵抗容量系の熱伝達を考慮した無次元圧力応答, 日本油空圧学会, 油圧と空気圧, 19-4, 306/311 (1988)
- 12) 香川, 川嶋, 藤田, 田中, 榊: 等温化压力容器を用いた有効断面積の計測法, 油圧と空気圧, 26-1, 76/81 (1995)
- 13) 川嶋, 藤田, 香川: 容器内圧力変化による圧縮性流体の流量計測法, 計測自動制御学会論文集, 32-11, 1485/1492 (1996)