研究論文

512. 液体ナトリウム用永久磁石型電磁流量計の研究, (Ⅱ)

実 験

小林清志*, 工藤昭雄*, 古川和男**, 二瓶 勲**, 山本 研**

(1969年 4月3日 受 理)

(1969年 5月26日 再受理)

Study on Permanent-Magnet Flowmeter for Liquid Sodium, (Ⅱ)

Experiment

By Kiyosi KOBAYASI, Akio KUDO,

Kazuo FURUKAWA, Isao NIHEI and Ken YAMAMOTO

Experimental results obtained on a liquid sodium electromagnetic flowmeter are described. Using a calibrating loop, the performance of the electromagnetic flowmeter was measured on the out-put in terms of flow rate, sodium temperature ($200^{\circ}\sim 500^{\circ}\text{C}$) and of sodium purity. The flowmeter output calculated in the previous report was in good agreement with the experiments.

I. ま え が き

液体金属の流量測定には電磁流量計が使用されることが多いが、技術的にはいまだ十分解決されていない問題も残っている。

例えば、流量ゼロの時に測定される雑起電力は、低流量測定の際にかなりの測定誤差を引きおこす原因となる。また、温度によって流量計指示値が異なり、原因不明の不安定現象が観測されることもある。

さらに、流量計指示値に対する磁場端部効果の影響も十分調べられていない。電磁流量計の測定精度、信頼性を向上させるためには以上のような問題が解決されなければならない。

著者らは前報⁽³⁾において、円管横方向磁場型の電磁流量計の磁場端部効果の解析を行なって来た。

本報は、前報の計算結果を用いて求めた流量計理論出力と実験との比較、ならびにこれに先立ち設計、試作された電磁流量計の性能試験結果等をまとめたものである。

Ⅱ. 電磁流量計の設計

1. 設計上の留意点

液体 Na 用電磁流量計を製作するにあたって留意す

べき点は次のようなことである。

- (1) 高温稼動に対する問題: 液体 Na が高温で稼動されることを考慮し、磁石の温度が上昇した場合でも安定した指示値が得られるよう、磁石素材の温度に対する安定化処理をすること。また温度上昇に伴う磁束密度低下の温度係数ができるだけ小さな磁気回路を設計するとともに、磁石素材の温度上昇を抑えるよう工夫すること。
- (2) 雑起電力: 出力電位差に混じる雑起電力の主なものは熱起電力である。これは上下電極間に生じる温度差をできるだけ小さくするとともに、電極材質に配管と同一の材質のものを用いる等の工夫をすることによりかなり除去される。このほかに液体 Na 中の不純物の影響と思われる浮遊電位も多少あるがこれの除去はむずかしい。
- (3) 配管壁の導電性の影響: 出力電位差測定電極は安全上の問題から、外部から配管外壁に直接溶接するのが普通であるが、この場合出力は管壁を流れる短絡電流のため低下する。磁場の端部効果が無視できる場合、前報にも示してあるが、出力は

* 東北大学 工学部(Faculty of Eng., Tohoku Univ.)

** 日本原子力研究所(Japan At. Energy Res. Inst.)

$$K_1 = \frac{2\left(\frac{a}{b}\right)}{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 + \frac{\sigma_w}{\sigma_f} \left\{ 1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2 \right\}} \quad (\leq 1) \quad (1)$$

倍に低下する。 K_1 は配管の内、外径比 a/b 、配管と液体 Na の電気伝導度の比 σ_w/σ_f によって変化するが、 σ_w/σ_f は一般に温度によって異なるため、 K_1 したがって出力が温度の影響を受けることになる。

第1図に配管材質として 304 ステンレス鋼を用いた場合、配管の内、外径比 a/b に対して K_1 がどのように変化するかを、温度をパラメータにして示してある。電気伝導度 σ_f は *Liquid Metals Handbook*⁽¹⁾、 σ_w は T.P.R.C⁽²⁾ から引用した。 a/b が小つまり内径に比して管壁が厚くなるにつれて K_1 の温度による差が大きくなることがわかる。

図中の温度は Na および配管の温度を表わす。

第1図 Elrod's correction factor K_1 の a/b および温度による依存性

したがって、温度による出力差を小さくするには、安全上許しうる限り管壁をうすくすることが必要である。なお、両物性値の比 σ_w/σ_f の値は 200°~500°C で極大値を持つので、第1図にみられるように K_1 の値も温度によって単調に変化はしない。

- (4) 磁場端部効果: 磁場端部効果による出力低下を無視できるようにするには、前報の結果から(磁場幅/管内径) >3 にすることが必要である。しかし、端部効果による出力低下はあっても誘起磁場の影響が小さく流量、出力の直線関係が保たれる場合、これは流量計として十分使用することができ、むしろ経済的である。

この場合、前報の解析結果から速度分布による出力差が無視できるような条件を考慮すると、大

体(磁場幅/管内径) >1.5 程度にとるのが安全と思われる。

- (5) その他: 流量計上流の障害物が出力に及ぼす影響については、データが不十分ではっきりしたことはわかっていない。入口条件はベンチュリーやオリフィス流量計に比べてきびしくないようであるが、入口直管部はできるだけ長くとおいた方がよい(管径の 20 倍程度をすすめているものもある)。

2. 製作した電磁流量計

製作した電磁流量計の磁極は矩形であり、大きさは縦30mm、横(流れ方向)18mmである。

磁極の間隔はネジにより変えることができるようになっていいる。また電位差測定電極は断面が 2 mm × 2 mm の 304 ステンレス鋼で、熱起電力を除去するため配管をけずり出したものを用いてあり、これは配管外壁に溶接してある。磁石素材は ALNICO-V を用い、一度磁化させたものを約 10% 交流減磁させ、さらに 150°C で約 2 hr 熱枯らしを行なって磁束密度に変化のないことを確かめてから使用した。Na 導管部は内径15mm、外径19mmの 304 ステンレス鋼で、内面はエメリーでよくみがいてある。

流量計上流の直管部は1,580mmにとっており、上流の攪乱の影響がないようにしてある。測定部全体には

写真1 使用した電磁流量計

磁気シールドをほどこした。

写真1に、使用した電磁流量計を示す。また実験に先立って行われた磁束密度分布の測定結果を第2図に示す。ここで B_1 は縦30mm, 横18mmの時の測定値で, B_2 は縦横を逆にした時の測定値である。

第2図 磁束密度分布測定結果

Ⅲ. 実験

1. 実験装置および方法

実験は日本原子力研究所 Na 研究室の Na ループを用いて行われた。ループのフローシートは第3図に示してある。第3図において太線部が流量計校正ループになっている。まず試作した電磁流量計の性能を調べるために1連の校正試験を行なった。校正試験は次の方法で行なった。

第3図 Na ループのフローシート

計量タンクに一時貯蔵した液体 Na を流量測定部, バルブ FV-1, FV-7 を通して貯蔵タンクまで自然落下, もしくは Ar ガスの圧力で強制落下させた。落下した液体 Na の量を計量タンクに取りつけた触針式液面計で, また落下に要した時間をストップウォッチで測り, これからこの間の絶対流量を求めた。

同時に流量測定電磁流量計の出力を自動平衡式記録

計に記録させた。さらに, 計量タンク, 配管の熱膨脹補正および磁束密度の温度補正を行うため, 計量タンク, 液体 Na, 磁石の温度測定を行なった。

2. 校正結果

(1) Na 温度の影響

Na 温度200°, 350°, 500°Cにおいて流量計校正を行い, 出力に及ぼす Na 温度の影響を調べた。結果を第4図に示す。出力は1%以内の範囲で直線性, 再現性も満足されていることがわかる。なお, この温度範囲では雑起電力は±0.1 mV 以下であった。

また, この温度範囲では温度による出力の差は, はっきりとは認められなかった。

B_{10} は磁束密度分布 B_1 の $z=0$ における値

第4図 校正結果, Na 温度の影響

(2) コールド・トラップ温度の影響

コールド・トラップの温度を調節してループ内の Na 純度を変えて行なった校正結果を第5図に示す。不純物濃度の詳細は不明であるが第5図によると, 出力のコールド・トラップ温度による影響は無視できることがわかる。

B_{10} は磁束密度分布 B_1 の $z=0$ における値

第5図 校正結果, コールド・トラップ温度の影響

(3) 配管内壁汚れの影響

これは1連の実験を通して確認されたことである

が、ループ運転開始後初期の段階の流量計出力は十分時間を経過した場合より幾分低目に出ることがあった。これを第6図に示す。この原因は次のように考えられる。本測定を行う少し前にループの一部が解体されたが、その時配管内に幾分空気が入り込み、配管内壁が酸化物の薄膜で被われ、これが接触抵抗として働いた。そしてこの酸化物はループの運転時間が経過するにつれて徐々にNa中に溶け込んで取り除かれたものと考えられる。したがって、流量測定は管内壁が十分清浄な状態で行うよう留意する必要がある。

B_0 は $z=0$ における値

第6図 校正結果、配管内壁汚れの影響

(4) 電極位置による流量計出力の変化

出力測定電極が磁場中央部からずれて、端部の磁束密度変化の大きい所におかれた場合、出力電位差がどのように変化するかを確かめるため磁場中央の電極から上、下流に5 mm間隔に各2本ずつ電極を取り付けて行なった測定結果を第7図に示す。本実験の範囲内では、磁場端部の影響の大きい端部付近の電極の出力も中央の電極に比して低下はまぬがれないが、出力-流速の直線性は良好であることが確認された。

B_{10} は磁束密度分布 B_1 の $z=0$ における値

第7図 校正結果、電極位置による出力変化

IV. 理論出力と実験値との比較

電磁流量計の出力電位差は、理想的には $2B\bar{v}a(B$: 磁束密度, $\bar{v}$: 流体の管断面平均速度, $2a$: 管内径)であるが、前報で述べたように、実際は導体配管を流れる短絡電流や磁場端部で生ずる渦電流のため低下する。

本章では、これらの効果を計算によって補正し、理論的に求めた電磁流量計の出力と実験との比較について述べる。なお、補正の基本的方法は前報の検討をふまえた上で *Liquid Metals Handbook* と同様に行なった。

1. 補正の方法

補正は次のようにして行なった。

$$\Delta U = 2B\bar{v}a \times K_1 K_2 K_3 \quad (2)$$

ただし、 ΔU : 出力電位差

K_1 : 磁場端部効果のない場合の導体配管を流れる短絡電流の効果の補正係数

K_2 : 磁場端部で生ずる渦電流の効果の補正係数

K_3 : 磁石の温度上昇に伴う磁束密度低下の補正係数

次に、 K_1, K_2, K_3 の詳細について述べる。

(1) K_1

K_1 は前報にも示してあるが、前出の(1)式で書き表わされる。ただし、 $2a, 2b$ はおのの配管内、外径、 σ_w, σ_f は配管と液体Naの電気伝導度を表わす。実際使用した配管は $2a=15\text{ mm}$, $2b=19\text{ mm}$ の304ステンレス鋼である。

(2) K_2

磁束密度の測定結果を第2図に示したような簡単な誤差関数的なもので近似し、前報の計算結果を利用して求めた。なお、磁束密度分布の近似関数は前報の計算結果より、磁場中心から管内半径の3倍程度の範囲で整合すれば十分である。

(3) K_3

磁石の温度上昇による熱膨張の効果を無視して(3)式を用いた。

$$K_3 = 1 + \alpha(T - 25) \quad (3)$$

ただし、 T は磁石素材の温度($^{\circ}\text{C}$)で、 α はあらかじめ測定してあって本実験に使用した磁石では次のような値である。

$$\alpha = -0.00023/^{\circ}\text{C}$$

なお、実測によると、磁石素材の温度上昇は室温以上 $4^{\circ}\sim 8^{\circ}\text{C}$ で 40°C を越えることはなかった。

2. 実験との比較

以上、 K_1, K_2, K_3 の値を Na 温度 $200^{\circ}, 350^{\circ}, 500^{\circ}\text{C}$ の場合について示すと、第1表のようになる。

第1表 各温度に対する補正係数の値

Na 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	σ_w/σ_f	K_1	$K_2(B_1)$	$K_2(B_2)$	K_3
200	0.157	0.938	0.969	0.990	0.999
350	0.200	0.930	0.969	0.990	0.999
500	0.191	0.931	0.969	0.990	0.998

また、これらの値を用いて計算した電磁流量計の理論出力と実験値との比較を第8, 9図に示した。

B_{10} は磁束密度分布 B_1 の $z=0$ における値
第8図 理論出力と実験との比較

B_{20} は磁束密度分布 B_2 の $z=0$ における値
第9図 理論出力と実験との比較

図において理論出力を表わす実線は実は 200°C のも

のであるが、 $350^{\circ}, 500^{\circ}\text{C}$ の値もこれから $0.7\sim 0.8\%$ 下がるだけで、図上ではよく区別できない程度である。理論と実験の両者はよく一致している。

なお、*Liquid Metals Handbook* の Michel⁽¹⁾ による磁場端部効果補正係数 K'_2 を用いた計算結果を参考のためにのせておいたが、第8図のようにあまりよく合わない。

Michel の補正係数は実験に基づくものであるが、これは(磁極幅/管内径)の関数として求められている。しかし、この変数は実際の磁束密度分布と正確には対応しないので、補正係数も磁極の作り方により差が出てくるのが予想され、これが第8図のように実験と合わなくなる原因となったと考えられる。

V. 結 論

これまでの実験から、次のことが結論される。

- (1) 試作した電磁流量計は熱起電力等の影響も小さく安定した出力を得ることができた。
- (2) 流量計出力は Na 温度 $200^{\circ}\sim 500^{\circ}\text{C}$ 、Na 流速約 $0\sim 9.0\text{ m/sec}$ の範囲内では、Na 温度にほとんど影響されず 1% 以内で直線性、再現性も十分満足されていた。
- (3) 流量計出力は普通の使用範囲の Na 純度変化には影響されないが、配管内壁が汚れている時は幾分低目に出ることがあるから、測定は配管内壁が十分清浄な状態で行う必要がある。
- (4) 本実験範囲内では、電極が磁場端部の磁束密度変化の大きい所におかれても、出力-流速の直線関係は十分満されていた。
- (5) 理論出力⁽³⁾と実験値とは良好な一致を示しており、較正試験を経ずして電磁流量計を使用することの可能性を立証することができた。

— 参 考 文 献 —

- (1) JACKSON, C.B.: "Liquid Metals Handbook". (Soudim, NaK Supplement), TID-5277, (1955).
- (2) TOULOUKIAN, Y.S.: "Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials", (1967), Mac Millan Co., New York.
- (3) 小林清志, 工藤昭雄: 液体ナトリウム用永久磁石型電磁流量計の研究, (I), 磁場端部効果に関する理論的考察, 本誌, 11[11], 669 (1969).