전자기 토모그래피를 이용한 액체 금속 속도장 측정

최상호† · 안예찬* · 김무환**

(2004 년 6 월 15 일 접수, 2004 년 8 월 12 일 심사완료)

Measurement of Velocity Profile in Liquid Metal Flow Using Electromagnetic Tomography

Sang-Ho Choi, Yeh-Chan Ahn and Moo Hwan Kim

Key Words : Electromagnetic Flowmeter(전자기유량계), Velocity Profile(속도장), Tomography(토모그래피), Liquid Metal Flow(액체 금속 유동)

Abstract

In order to measure non-intrusively velocity profile in liquid metal flow, a modified electromagnetic flowmeter was designed, which was based on electromagnetic tomography technique. Under the assumption that flow is fully-developed, axisymmetric and rectilinear, the velocity profile was reconstructed after the flowmeter equation, the first kind of Fredholm integration equation, was linearized. In reconstruction process Tikhonov regularization method with regularization parameter was used. The reconstructed velocity profile had the nearly same as turbulent flow profile which was approximately represented as log law. In addition, flowmeter output for a fixed magnet rotation angle was linearly proportional to flow rate. When magnet rotation angle was 54°, axisymmetric weight function was nearly uniform so that the flowmeter gives a constant signal for any fully-developed, axisymmetric and rectilinear profile with a constant flow rate.

기호설명

a_k : 속도장 기본함수의 계수
$\mathbf{A}$: 기본함수의 계수 행렬
b_l : 자기장 급수 계수
$\mathbf{B}$: 자속밀도벡터
$f_k(r)$: 기본함수(basis function)
G : 가상포텐셜, $\mathbf{j}=\nabla G$
$\mathbf{I}$: 단위 행렬
$\mathbf{j}$: 유체를 정지시킨 상태에서 전극으로 1A의 전류를 흘릴 때 유체에 발생하는 가상 전류밀도
R : 관 반경
$\mathbf{S}$: 시스템 특성 행렬
ΔU : 두 전극 사이의 포텐셜 차이
v : 속도의 크기
$\mathbf{v}$: 속도벡터
$\mathbf{W}$: 가중벡터 $(\mathbf{B}\times\mathbf{j})$
ϕ : 영구자석과 전극사이의 각도
δ : 델타 함수
$\mathbf{\Lambda}$: 출력 전압 행렬
μ : Tikhonov 정규화 변수

† 책임저자, 회원, 한국항공우주연구원 열공력그룹
E-mail : sahchoi@kari.re.kr
TEL : (042)860-2567 FAX : (042)860-2697
* 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 포항공과대학교 기계공학과

1. 서 론

액체 금속은 철강 제조 회사, 원자력 발전소(LMFBR), MHD 발전 등에서 널리 사용된다. 액체 금속의 속도장을 측정하는 것은 유체를 펌핑하는 데 필요한 펌프 압력을 알 수 있기 때문에 발전소 및 철강 제조 시설 설계시 매우 중요하다. 하지만 물이나 공기 등의 속도장을 측정하는 것에 비하여 액체 금속의 속도장을 측정하는 것은 많은 어려움이 따른다. 이는 액체 금속이 불투명하고 대부분

의 경우 금속을 고온에서의 액상으로 만들어 화학적으로 매우 뛰어난 반응성을 지니기 때문이다. 따라서 물이나 공기 등의 유체 속도 측정에 사용되는 피토튜브나 열선, LDV, PIV 등의 기법을 액체금속에 적용하기가 불가능하거나 그 범위가 극히 제한되어 있다.

이러한 이유로 전기 프로브나 자기 프로브 등을 관내에 삽입한 후 프로브를 이동시켜가면서 속도를 측정하는 방법을 사용하여 왔다. 하지만 프로브를 관내에 삽입하여 측정하는 방법은 속도장을 교란시키며 프로브 자체의 크기로 인해 관벽쪽에서의 속도를 측정할 수 없는 단점을 지닌다.

한편 전자기 토모그래피(tomography) 방법으로 액체 금속의 속도장을 측정하는 것은 현재까지 이론적으로는 다소 연구가 진행되었지만 실제 실험을 통해 속도장을 측정한 결과는 극히 미비한 실정이다. 본 실험에서는 전자기 유량계를 응용한 장치와 토모그래피 기법을 이용하여 비침투적 방법으로 관내 액체 금속의 속도장을 측정하는 기법을 개발하고자 계획하였다.

전자기 유량계는 전도성을 지니는 유체의 유량을 측정하는데 있어 다른 유량계에 비해 매우 정밀하게 측정을 할 수 있으며 추가적 압력강하가 없다는 장점을 지니고 있다. 그런데 작동유체가 물과 같은 유전성을 지닌(dielectric) 물질일 경우 관내에 삽입된 전극에서 전기화학 반응을 일으켜 분극화(polarization) 현상이 일어난다. 이를 피하기 위해서는 교류자기장을 걸어 주어야 한다. 하지만 교류자기장을 사용하는 경우 실험에서 측정하고자 하는 유도기전력 외에 자기장의 시간에 따른 변화로 발생하는 자체유도기전력이 발생한다. 자체유도기전력은 유도기전력에 비해 크기가 매우 크기 때문에 이를 측정하고자 하는 유도기전력과 분리를 해야 하는 어려움을 지닌다.

본 연구에서는 이러한 문제를 피하기 위해 전극에서 전기화학 반응을 하지 않으며, 상온상태에서 유일하게 액체 상태로 존재하는 수은을 작동 유체로 선택하였으며, 시간에 따른 자기장의 변화가 없는 영구자석을 사용하기로 하였다. 또한 레이놀즈수가 약 60,000 ~ 130,000 범위의 난류 유동 하에서 관내 수은 유동의 속도장을 측정하였으며 연구범위는 완전 발달, 정상 상태, 축대칭이며 관과 평행한 성분만을 가지는 유동의 경우로 한정하였다.

2. 기존연구

2.1 기존 액체금속 속도장 측정 방법

기존에는 액체 금속의 속도장을 측정하기 위하여 관내부에 프로브를 삽입한 후, 프로브를 이동시켜 가며 국부 속도를 측정하는 방법이 널리 사용되었다. 또한 프로브를 소형화하고 정밀하게 국부 속도를 측정할 수 있도록 개선시키는 방향으로 연구가 진행되어 왔다.

Gibbs et al.[1]은 열선이나 LDV 등의 기법을 사용할 수 없는 광학적으로 불투명한 유체에 대하여 라디오 주파수하에서 MRI 방법을 이용하여 젤상태 혹은 고분자가 용해 되어있는 에멀전 상태의 유체 속도장을 측정하였으며, Axcell 과 Walton[2]은 소형의 영구자석으로 만들어진 프로브를 이용하여 액체 나트륨 대류 유동의 속도장을 측정한 바 있다. Eckert et al.[3]은 액체 금속같이 불투명한 유체의 국부 속도를 측정하기 위하여 유동과 센서와의 상호작용으로 작동하는 기계-광학적 프로브를 이용하였다. 센서 끝부분이 유동에 의해 변형된 것을 광학기계를 이용하여 확대한 후, 센서 끝부분의 변형으로부터 유체의 국부 속도를 구한다. 개발된 프로브는 가열부, 펌프 및 전원 공급 장치에 의해 발생되는 전기적 잡음의 영향을 받지 않으며 350℃의 고온 상태에서도 측정이 가능한 장점을 갖는다. Eckert et al.[4]은 고온으로 용융된 나트륨의 난류 상태에서의 속도장 및 난류 강도를 측정하기 위하여 두 개의 전극으로 구성된 포텐셜 프로브를 사용하였다. 프로브의 두 전극사이에 발생되는 포텐셜 차이는 국부 속도에 비례해서 증가한다.

2.2 전자기 토모그래피를 이용한 속도장 측정

전자기 유량계는 같은 유량일 경우라도, 속도장의 형태에 따른 출력신호의 변화가 존재하므로, 속도장의 형태에 따른 출력신호의 변화를 최소화하려는 방향으로 연구가 진행되었다. 하지만 같은 유량하에서도 속도장 변화에 따른 출력신호가 다른 점을 주목하여 전자기 유량계에 보다 많은 쌍의 전극을 설치하거나 자기장을 관 주위로 회전시키며 다수의 출력신호를 받아 유체의 속도장에 대해 정보를 얻으려는 토모그래피 연구가 행하여져 왔다.

Honda 와 Tomita[5]는 전자기 유량계가 유동의 속도 분포에 영향을 받는 것에 주목하고, 역으로 이러한 점을 이용하여 유체의 속도장 측정 가능성을 언급하였다. 2차원상의 점자극을 관내벽 주위를 따라 회전시키면서 한 쌍의 전극에서 나타나는 유도기전력을 측정하여 속도장을 재구성하는 과정을 이론적으로 연구하였다.

Horner et al.[6]는 한 쌍의 전극을 사용하여 유량

을 측정했던 것과는 달리, 다수의 전극을 설치하여 속도장이 축방향 대칭성을 지니지 않을 때에 발생하는 측정 오차를 줄이려는 시도를 하였다. 또한 다수의 전극에서 발생되는 유도기전력으로부터 관 내부의 속도장 정보를 얻을 수 있다고 제안하였다.

Trächtler 와 Wernsdörfer[7]는 다수의 전극을 설치한 후 각각의 전극에서 얻은 출력신호를 가지고 속도장을 예측하는 방법을 체계적으로 정리하였다. 측정된 데이터가 매우 부족한 경우 재구성된 속도장이 실제의 경우와 크게 차이가 나는 문제를 해결하기 위해 실험 데이터로부터 정확한 속도장을 예측하기 위하여 DAR(Direct algebraic reconstruction) 방법을 제안하였으며, 이를 시뮬레이션한 바 있다.

Trächtler 와 Mesch[8]는 전자기 유량계의 원리를 응용하여 자기장을 균일한 횡자기장 형태 즉 $\mathbf{B}=(B,0)$ 및 $\mathbf{B}=(Br\cos\theta, Br\sin\theta)$ 의 형태로 인가하고 횡축에 대하여 $\pm 45°$ 위치에 전극을 설치한 후 출력신호를 이용하여 유체의 평균 속도 및 점성을 예측한 바 있다.

현재까지 전자기 유량계 원리를 응용하여 유체의 속도장 측정 가능성을 이론적으로 제시한 연구는 다양하나, 실험을 통해 속도장을 측정한 연구결과는 극히 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 선행되어온 이론 부분을 보완하여 실제적으로 유체의 속도장을 측정할 수 있는 기법을 개발 및 구현하고자 하였다.

3. 속도장 측정 원리 및 실험장치 구성

3.1 개요

본 연구에서는 균일한 자기장을 이용하는 전자기유량계가 전도성 유체의 유량 또는 평균속도를 측정하는 원리를 더 응용하여 점자극을 유체가 흐르는 관 둘레 방향으로 회전시키면서, 각 위치에서 신호를 측정한 후 토모그래피 기법을 이용하여 역으로 속도장을 재구성하는 방법을 취하였다.

EIT(Electric Impedance Tomography)나 ECT (Electric Capacitance Tomography)등의 기법에서는 측정하고자 하는 관 둘레를 따라 8 ~ 16 쌍의 전극을 설치한 후 한 쌍의 전극에 전압을 가한다. 이후 각 전극에서 측정되는 전압분포를 이용하여 관 내부의 저항이나 밀도 분포 등을 역으로 계산하는 방법을 사용한다. 이 경우 공간적인 제약으로 관 주위로 많은 쌍의 전극을 설치하는 것이 어려워 측정을 통해 얻을 수 있는 데이타가 제한되는 단점을 지닌다. 이는 전자기 유량계를 이용한 토모그래피법에 있어서도 마찬가지다. 따라서 보다 많은 측정 데이터를 얻기 위해 고정된 영구자석의 위치에 대해 다수의 전극을 설치하는 방법을 배제하고, 고정된 한 쌍의 전극에 대해 영구자석의 위치를 바꾸면서 측정 데이터를 얻는 방법을 선택하였다. 본 연구에서 사용된 자기장 및 전극의 배치는 Fig. 1 과 같다.

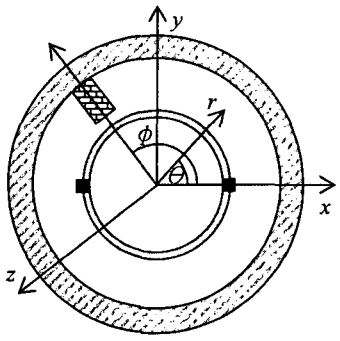

Fig. 1 Schematic diagram of magnet and electrodes; Permanent magnet, Steel, Electrodes, Polycarbonate flow tube

3.2 속도장 측정 원리

3.2.1 유도기전력(flow induced emf)

관에서 유체가 흐르는 방향에 수직인 위치에 전극을 설치하고 외부에서 자기장을 가하게 되면 유동과 자기장의 상호작용에 의해 전극 양단에서는 유도기전력 ΔU 가 발생하게 되는데 이는 식 (1)과 같이 나타난다.

$$\Delta U = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{0}^{2\pi}\int_{0}^{R} \mathbf{v}\cdot\mathbf{W} r\,dr\,d\theta\,dz \qquad (1)$$

여기서 R 은 유체도관의 반경이고 $\mathbf{W}$는 관내 각 지점에서의 유체속도 $\mathbf{v}$ 가 출력유도기전력에 공헌하는 정도를 나타내는 가중벡터 이며 $\mathbf{B}\times\mathbf{j}$로 표현된다. $\mathbf{j}$는 가상전류밀도를 의미하고 자세한 것은 3.2.3 절에서 설명될 것이다.

3.2.2 자기장

본 실험을 위해 설계된 자기장은 영구자석을 링형태의 투자율이 높은 스틸에 고정시킨 것으로 관내부의 자기장은 전자기 해석 소프트웨어인 Maxwell을 이용하여 해석하였다. 또한 F.W.Bell 사의 가우스미터를 이용하여 자속밀도벡터의 크기를 측정하

여 Maxwell 해석 결과와 비교하였다. Fig. 2 는 관 반경으로 표준화(normalization)된 위치에서 두 결과를 관 중심에서의 자기장의 세기로 표준화한 후 그 값을 비교한 것으로 두 결과가 일치함을 알 수 있다. 또한 시험부에서의 자기장이 축방향으로 일정한 값을 유지할 수 있도록 자석을 관반경의 4 배의 길이로 제작하였다.

또한 Maxwell 해석 결과를 피팅(fitting)하여 식 (2)와 식 (3)같이 자기장을 함수형태로 나타내었다.

$$B_r = \sum_{l=0}^{N} b_l r^l \cos[(l+1)(\theta-\phi)] \tag{2}$$

$$B_\theta = -\sum_{l=0}^{N} b_l r^l \sin[(l+1)(\theta-\phi)] \tag{3}$$

3.2.3 가상전류

가상전류밀도($\mathbf{j}$)란 내부의 유동이 없는 유체로 관이 채워져 있는 경우, 전극에 단위전류(1A)가 흐를 때 관내에서의 전류 밀도 분포를 의미하는 것으로 관경의 두 끝지점에 전극 A 와 B 가 각각 있는 경우, 포텐셜 G 가 식 (4)과 같이 라플라스 방정식 및 식 (5)와 식 (6)의 경계조건을 만족한다.

$$\nabla^2 G = 0 \tag{4}$$

$$\left.\frac{\partial G}{\partial r}\right|_{r=R} = \delta(position\ of\ electrode\ A) \tag{5}$$

$$\left.\frac{\partial G}{\partial r}\right|_{r=R} = -\delta(position\ of\ electrode\ B) \tag{6}$$

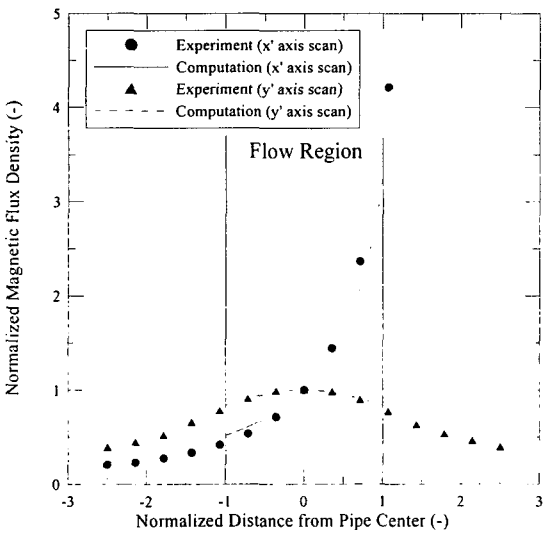

Fig. 2 Comparison between computed (Maxwell) and measured magnetic flux densities

위 문제의 해는 O'Sullivan 과 Wyatt,[9] O'Sullivan[10] 에 의해 해석된 바 있다.

3.2.4 시스템 선형화

식 (2)와 식 (3) 그리고 식 (4)에서 식 (6)의 해를 식 (1)에 대입하게 되면 첫번째 형태의 Fredholm 적분방정식을 얻게 되는데 이를 풀기 위해서는 적분방정식이 선형화 되어야 한다[Groetsch[11]].

관내의 유동이 정상 상태, 완전발달, 축대칭, 관과 평행한 성분의 속도 성분만을 가진다고 가정하면 속도장은 식 (7)처럼 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{v} = \sum_{k=0}^{n} a_k f_k(r)\mathbf{e}_z \tag{7}$$

식 (7)을 위의 적분방정식에 대입 후 정리하면 식 (8)의 결론을 얻는다.

$$\Delta U(\phi_i) = \sum_{m=0}^{N} b_{2m+1} \sin[(2m+1)\phi_i] \times \sum_{k=0}^{n} \int_0^1 a_k f_k(r) r^{4m+1} dr \tag{8}$$

$$where\ \ i = 1, 2, 3, 4, ...$$

3.2.5 속도장 재구성 알고리즘

식 (8)에서 좌변은 실험을 통해 얻게 되는 출력 신호이며 우변에서 미지수는 a_k 이다. 따라서 실험을 통해 $\Delta U(\phi_i)$ 를 측정한 후 좌변과 우변을 비교하여 a_k 를 계산하게 되면 식 (7)을 통해 속도장을 구할 수 있게 된다.

한편 식 (8)은 연립방정식 형태로 나타나는데 행렬을 이용하면 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{\Lambda} = \mathbf{S}\mathbf{A} \tag{9}$$

식 (9)에서 행렬 $\mathbf{S}$ 는 일포즈(ill-posed) 또는 역행렬이 존재하지 않는 행렬이기 때문에 직접적으로 해를 구하는 경우 해의 안정성이 매우 떨어진다. 따라서 일반적으로 토모그래피 기법에서는 해의 안정성을 높이기 위해 직접 역행렬을 취하지 않고 다양한 재구성 알고리즘을 사용한다. 이 중에서 가장 널리 사용되는 방법은 Tikhonov 정규화 방법으로, 측정하고자 하는 대상의 선행 정보가 있는 경우 더욱 정확성이 높아지는 특징을 가진다 Tikhonov 정규화 방법은 역문제(inverse problem)를 푸는데 해의 안정성이 떨어지는 경우 원래의 문제를 푸는 대신 원래 문제를 근사하여 해의 안정성을 높인 문제를 해결하는 방법이다. Tikhonov 정규화 방법을 통해 식 (9)를 풀게 되면 식 (10)와 같은 결과를 얻게 된다.

$$\mathbf{A} = (\mathbf{S}^T\mathbf{S} + \mu\mathbf{I})^{-1}\mathbf{S}^T\mathbf{\Lambda} \tag{10}$$

여기서 μ 는 정규화 변수(regularization parameter)로서 Tikhonov 정규화 방법의 정확성을 결정하는 핵심적인 변수이다. 정규화 변수의 값이 작은 경우 원래와 가까운 문제를 푸나 측정 오차의 영향으로 인해 물리적으로 받아들이기 어려운 해를 나타낼 수 있다. 또한 그 값이 큰 경우에는 측정 오차의 영향을 작게 하나 상대적으로 원래 문제와는 벗어난 문제를 풀게 된다. 일반적으로 경험 및 시행착오를 통해 정규화 변수의 최적화된 값을 찾게 된다[Yangr 과 Peng[12]].

3.3 실험장치 구성

3.3.1 순환 루프 구성

작동 유체로 상온 상태에서 유일하게 액체로 존재하는 금속인 수은을 사용하였다. 한편, 전기전도성이 작은 물 등의 유전성을 지닌 물질에서는 실험부에 설치된 전극 양쪽에서 분극화(polarization) 현상이 일어난다. 따라서 이를 억제하기 위해, 시간에 따라 자기장의 방향이 변하는 교류자기장이 필요하다. 하지만 수은의 경우, 분극화 현상이 거의 일어나지 않기 때문에 제작이 용이하고 다루기 쉬운 영구자석을 사용할 수 있다는 장점이 있다.

Fig. 3 과 같은 순환 장치는 축 방향의 대칭성을 유지할 수 있도록 수직 하향류 방향으로 순환 장치가 구성되었으며, 실험에 사용한 관 내경과 외경은 각각 28mm 와 32mm 이다.

유체의 완전 발달 조건을 만족시키기 위하여 관 직경의 약 60 배에 해당하는 발달 구간을 준비하였으며, 루프의 우측 상향 방향에 기어 타입의 유량계를 설치하였다. 또한 최대 수두 83 m, 최대 유량 $10 m^3/h$ 인 원심 펌프(WIDO, model : HD5020201, type HMI405-1) 2 대가 직렬과 병렬을 바꿀 수 있는 구조로 설치되었다.

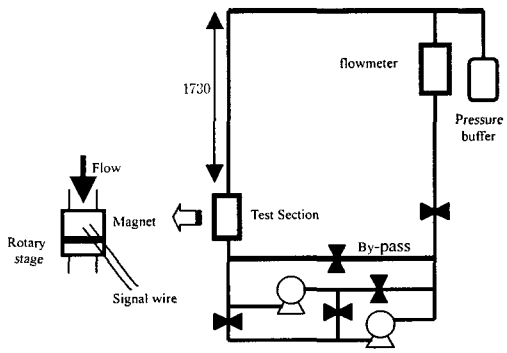

Fig. 3 Circulation loop schematic

3.3.2 시험부(main test section)

시험부는 유체가 완전 발달 구간을 지난 지점에 설치되였으며, 시험부는 크게 시험관, 전극, 영구자석, 각도 계측기, 차압기로 구성되어 있다. 실험관의 재질은 폴리카보네이트로 지름 28mm, 두께 3mm, 전체 길이는 210mm 로 가공되었다. 관 중앙에는 지름이 1.2mm 인 구리선 한쌍이 전극으로 삽입되었으며, 영구자석과 전극사이의 각도는 측정오차가 1/60° 인 각도 계측기(precision rotary stage, Daeil)를 이용하여 측정하였다. 또한 실험부에서의 압력강하를 측정하기 위하여 실험관의 양 끝에 차압용 압력계(Omega, model : PX 750 pressure transmitters, current type)를 연결하였다. Fig. 4는 시험부를 촬영한 사진이다.

3.3.3 신호처리부

자기장이 존재하는 상황에서 관에 유동이 흐를 때, 두 전극 사이에서 발생하는 유도기전력은 신호의 크기가 유량이 10lpm 일 때 0.2mV 정도로 크기가 매우 작으며, 실험부 주위에는 상용 전원에 의한 60Hz 에 해당하는 노이즈가 존재한다. 노이즈를 제거하고 신호를 증폭하기 위해 설계 및 제작된 신호 처리부는 Fig. 5와 같이 출력 신호에서 나타나는 노이즈를 제거하는 필터와 출력신호를 증폭시켜주는 증폭부로 구성되어 있다. 두 전극 사이에 발생된 유도기전력은 먼저 각각 볼테지 팔로워(voltage follower)를 거치게 되는데, 이 부분은 신호 측정을 위해 전극 신호선에 연결된 계측기기에 의한 부하효과(loading effect)를 차단한다. 볼테지 팔로워를 거친 신호는 저주파 필터 및 증폭부를 거치게 되는데 저역 필터(low pass filter)는 2 차 형태의 능동 필터로 구성되어 있으며 차단(cut-off) 주파수는 22Hz, 앰프의 증폭비는 1000 이다.

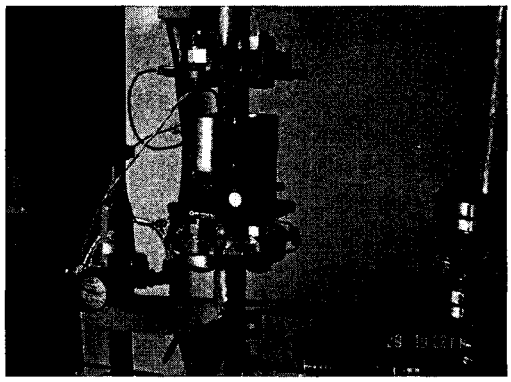

Fig. 4 Main test section

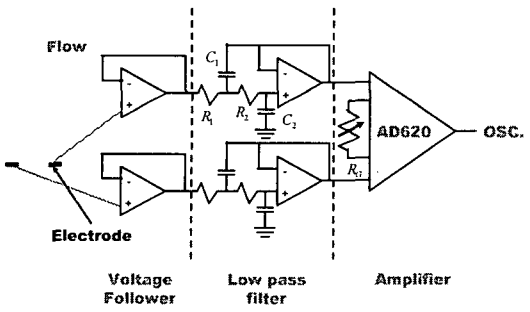

Fig. 5 Circuit for signal conditioner

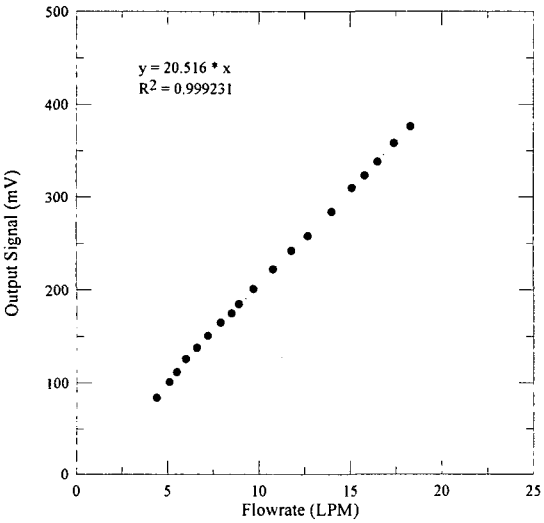

Fig. 6 Signal vs. flow rate

4. 실험결과

4.1 유량 측정 실험결과

본 연구를 위해 개발된 장치는 전자기 유량계의 원리를 확장한 것으로, 영구자석의 위치를 어떤 한 각도에 고정시켜 놓은 상태에서는 유량계로 작동할 수 있다. Fig. 6 은 영구자석과 전극의 위치가 수직일 때($\phi = 90°$), 유량을 변화시켜 가며 전극 양단에의 유도기전력을 측정한 결과이다. 출력신호가 유량에 따라 선형적으로 변함을 나타내고 있다.

한편 영구자석과 전극 사이의 여러 각도 ϕ 에 대하여 축대칭 가중함수(axisymmetric weight function, Ahn et al.[13])가 Fig. 7 에 나타나 있다. 특히 $\phi = 54°$ 일 때 축대칭 가중함수는 반경방향의 위치에 관계없이 그 값이 거의 일정한데, 이것은 유량계의 출력

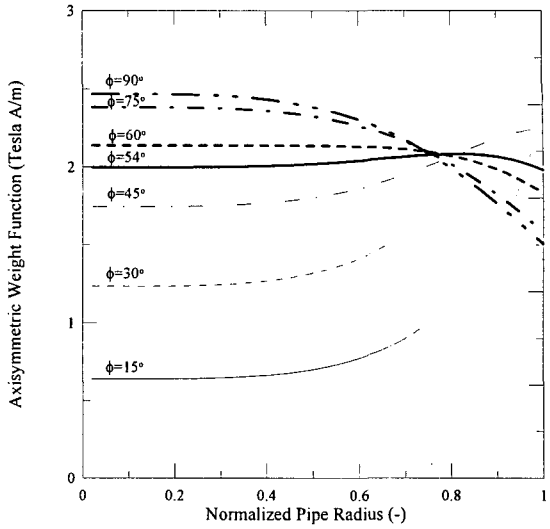

Fig. 7 Axisymmetric weight functions at various magnet rotation angles ϕ

신호가 속도장 형태에 무관하게 같은 유량의 경우 같은 신호를 출력한다는 것을 의미한다. 즉 본 연구를 위해 제작된 장치는 완전발달, 축대칭, 관과 평행한 성분의 속도 성분만 가진 임의의 속도장에 대하여 이상 유량계(ideal flowmeter)로 작동할 수 있음을 의미한다.

4.2 속도장 측정 실험결과

속도장 재구성에 필요한 신호 함수를 얻기 위해 자기장과 전극의 상대적인 각도 ϕ 를 변화시키면서 출력신호를 얻었다. 이 때 유량의 변화는 ϕ 에 따른 출력신호 변화의 진폭에만 영향을 줄 뿐, 출력신호의 표준화된 형태에는 영향을 주지 않으므로 펌프가 안정적으로 작동하는 10 lpm 의 유량에서 실험을 수행하였다. 영구자석과 전극의 상대적인 위치를 $18°$씩 변화시키며 20 지점에서 전극간의 유도기전력을 측정하였다. Fig. 8 은 출력 전압을 측정하여 표준화한 값을 나타낸 그래프이다. 10 lpm 에서 레이놀드 수는 100 kPa, 293 K 기준 66480 으로 난류영역으로 볼 수 있었다. 한편 자기 레이놀드 수는 0.01 로서 1 보다 매우 작으며, 전자기력과 관성력의 비를 나타내는 무차원수인 스튜어트 수는 관내 최고 자기장을 고려하더라도 약 0.07 정도로 전자기력을 무시할 수 있는 수준이었다.

실험을 통해 측정된 출력신호를 바탕으로 앞에서 언급한 방법을 통하여 속도장을 재구성함에 있어서 속도장을 나타내는 기본 함수의 선택은 매우 중요하다. 기본함수 $f_k(r)$ 를 다항함수를 사용하여

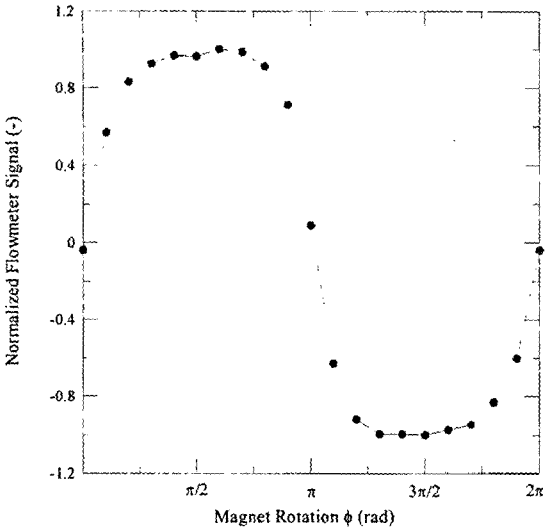

Fig. 8 Normalized flowmeter signal with respect to magnet rotation

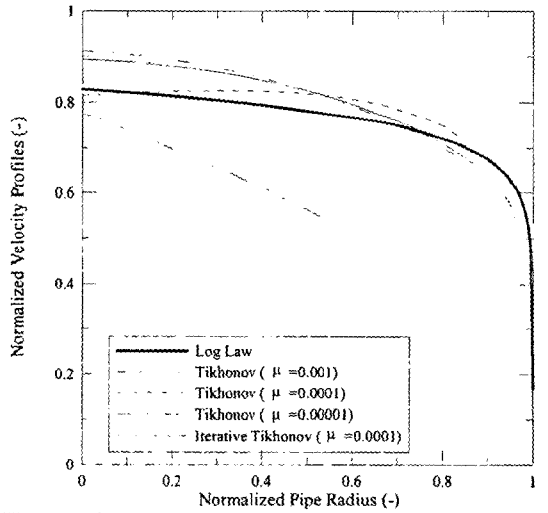

Fig. 9 Comparison between the reconstructed velocity profiles and the profile represented by log law

미결정된 계수들을 구하였을 때의 결과는 실제 로그 법칙을 통해 나타나는 속도장과는 다소 차이를 보였다. 이는 다항 함수를 기본 함수로 이용하는 경우, 난류유동의 속도장을 묘사하는데 있어서 관벽쪽에서의 급격한 변화를 나타내기 위해서는 다수의 항들이 필요하며 또한 계수의 유효숫자가 10자리 정도로 정확해야 하기 때문이다.

따라서 다항함수를 사용하면서 관벽쪽에서 속도가 급속히 떨어지는 경향을 나타낼 수 있는 함수를 추가로 선택하였다. 또한 속도장을 나타내는 기본함수가 많아질수록 해의 안정성이 떨어지므로 가능한한 기본함수를 적게 선택하였다. Fig. 9는 기본함수에 로그함수를 추가한 후 Tikhonov 정규화 과정을 통해 유량계 방정식을 푼 결과 및 이를 iteration 하였을 때의 결과이다. Tikhonov 정규화 방법에서는 정규화 변수가 0.0001~0.00001 일 경우가 로그 법칙과 잘 일치하였으며, 이 경우 편차는 10.2% ~ 11%였다. 한편 축차근사(iteration) Tikhonov 방법을 사용하여 속도장을 재구성하였을 때는 단일 단계 정규화 방법에 비해 관벽쪽에서의 경향을 잘 따라가나 관 중심에서의 경향은 로그 법칙에 비해 다소 높게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 전자기 토모그래피 기법을 적용하여 액체 금속 유동의 속도장를 비침투적으로 측정하는 방법을 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유체가 정상상태, 완전발달, 축대칭, 관과 평행한 유동의 경우에 대해 유동과 자기장의 상호작용으로 인해 발생하는 유도기전력을 측정 하였으며, 이를 이용하여 속도장(velocity profile)을 재구성하였다. 재구성된 속도장은 로그 법칙을 통해 나타나는 난류 속도장과의 편차가 10% 정도로 두 결과가 일치하였다.

(2) 측정된 출력신호 함수로부터 속도장을 재구성하기 위해서는 적분 방정식을 풀어야 하는데, 이를 선형화한 후 해의 안정성(stability)이 높이기 위하여 Tikhonov 정규화 방법을 사용하였으며, 정규화 변수가 0.0001 일 경우에 재구성된 속도장이 로그 법칙에 의해 나타나는 속도장과 가장 일치하는 결과를 보였다.

(3) 제작된 측정 장치는 영구자석과 전극 사이의 각도를 고정시키면, 유량의 변화에 대해 발생되는 유도기전력이 선형적으로 변하기 때문에 유량계로 작동될 수 있다. 영구자석과 전극과의 각도가 54°일 때는 축대칭가중함수가 반경방향 위치에 무관하게 일정한 값을 가지므로, 측정하는 속도장의 형태에 관계없이 같은 출력신호를 내는 이상유량계(ideal flowmeter)로 사용될 수 있었다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Gibbs, S. J., Newling, B., Hall, L. D., Haycock, D. E., Frith, W. J. and Ablett, S., 1994, "Magnetic Resonance Velocimetry," *Frontiers in Industrial Process Tomography*, Chap. 5, pp. 47~58.

(2) Axcell, B. P. and Walton, A., 1993, "Thermoelectric Effects in Miniature Permanent Magnet Probes Used for Velocity Measurement in Flowing Sodium," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, pp. 309~323.

(3) Eckert, S., Witke, W. and Gerbeth, G., 2000, "A New Mechano-Optical Technique to Measure Local Velocities in Opaque Fluids," *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 11, pp. 71~78.

(4) Eckert, S., Gerbeth, G., Witke, W. and Langenbrunner, H., 2001, "MHD Turbulence Measurements in a Sodium Channel Flow Exposed to a Transverse Magnetic Field," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 22, pp. 358~364.

(5) Satoshi Honda and Yutaka Tomita, 1991, "Estimation of Velocity Profile by Magnetic Flowmeter with Rotating Field," *FLUCOME'91 ASME 1991*, pp. 131~137.

(6) Horner, B., Mesch, F. and Trächtler, A., 1996, "A Multi-Sensor Induction Flowmeter Reducing Errors Due to Non-Axisymmetirc Flow Profiles," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7, pp. 354~360.

(7) Trächtler, A. and Wernsdörfer, A., 1994, "Direct Algebraic Reconstruction in Electromagnetic Flow Tomography," *Frontiers in Industrial Process Tomography*, Chap. 14, pp. 159~170.

(8) Ansgar Trächtler and Franz Mesch, 1998, "In-Line Monitoring of Rheological Parameters with an Electromagnetic Flowmeter," *Part. Part. Syst. Charact.*, Vol. 15, pp. 30~35.

(9) O'Sullivan, V. T. and Wyatt, D. G., 1983, "Computation of Electromagnetic Flowmeter Characteristics from Magnetic Field Data: III. Rectilinear Weight Functions," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 16, pp. 1461~1476.

(10) Valerie Teresa O'Sullivan, 1980, *The Axisymmetric and Asymmetric Flow Properties of Electromagnetic Flowmeters*, U. of Oxford., pp. 13~25.

(11) Groetsch, C. W., 1984, *The Theory of Tikhonov Regularization for Fredholm Equations of the First Kind*, Pitman Advanced Publishing Program, pp. 1~13.

(12) Yang, W. Q. and Lihui Peng, 2003, "Image Reconstruction Algorithms for Electrical Capacitance Tomography," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. R1~R13.

(13) Yeh-Chan Ahn, Byung Do Oh and Moo Hwan Kim 2003, "Theory of a Current-Type Electromagnetic Flowmeter for Two-Phase Flow and Numerical Computation of the 3D Virtual Potential Distributions for Annular Flow," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 27, No. 6, pp. 714~725.