

전자기력에 의한 자성유체의 자유표면 형성 및 상승높이 제어에 관한 연구

이은준* · 신진오** · 박명관†

(2002년 3월 11일 접수, 2002년 10월 16일 심사완료)

A Study on the Elevation Control and the Deformation of Free Surface of Magnetic Fluid by Electromagnetic Force

Eun-Jun Rhee, Jin-Oh Shin and Myeong-Kwan Park

Key Words : The Free Surface of Magnetic Fluids(자성유체의 자유표면), Rosensweig' Ferrohydrodynamic Bernoulli Equation(Rosensweig의 자성유체역학 베르누이방정식),

Abstract

In this paper, the investigation about the elevation control and the formation of the free surface of magnetic fluids is carried out theoretically and experimentally on the basis of Rosensweig' Ferrohydrodynamic Bernoulli Equation. Governing equations of magnetic fields are solved using the concept of vector potential. While applied magnetic fields are induced by 4×4 electromagnet located under the magnetic fluid, the free surface of the magnetic fluid is formed the balance of surface force, gravity, pressure difference, magnetic normal pressure and magnetic body force. The results of numerical simulation and experiment show the formation of the free surface of the magnetic fluid. Using PID control, an experiment for the elevation control of the free surface of magnetic fluids is performed.

1. 서론

자성 유체란 물이나 석유와 같은 용매에 코발트, 니켈, 철, 코발트, 마그네타이트, 망간과 같은 강자성 미립자를 다량으로 분산시킨 일종의 콜로이드 용액을 말한다. 자성 유체는 유체자체가 자성을 지니고 있어 자기장을 부하하면 자화를 발생하여 자기장의 방향으로 섬유질 형상의 체인을 형성하여 이방성을 나타내게 되며 외부에서 가해지는 전단응력이나 유동에 대하여 저항력을 나타내게 된다. 일반적으로 자성유체는 자기장을 가하지 않을 때는 뉴턴성 유체와 같은 성질을 띠다가 자기장을 가하면 비뉴턴성 유체처럼 거동한다고 알

려져 있으며 이를 이용한 응용장치가 여러 분야에 적용되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 특히 외부로부터 가해진 전자기장에 의해 표면의 형상이 변화하는 성질은 자성 유체가 가지고 있는 독특한 성질로서 자성유체의 다양한 응용 분야와도 연관된 현상이다. 자성유체의 표면제어를 이용하여는 연구는 경계층 제어, 유체 표면의 유동제어, 충격파 제어, 평판의 능동 제어, 촉각 시스템 등 많은 분야에 폭 넓게 응용 될 수 있다.

자성 유체의 자유표면 형상변화는 자기장의 분포형태나 자기장의 세기뿐만 아니라 자성유체의 특성과도 밀접한 관계를 가지고 있다. 전자기력에 의한 자성유체의 자유표면 매우 복잡한 메커니즘에 의해 형성되므로 이를 명확히 해석하기 위한 연구가 다각적인 방법으로 시도되고 있다.

Okubo, M., Mai, J. 등은 교류 자장에 의한 자성 유체 계면의 불안정성에 관해 연구하였고^(4,5) 박창호 등은 균일한 크기의 자기장이 수직으로 작용할 때 정지된 자기성 유체 계면의 선형 안정성에

* 회원, 부산대학교 기계기술연구소

** 부산대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계기술연구소 및 기계공학부

E-mail : mkpark1@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2464 FAX: (051)514-0685

대해 연구⁽⁶⁾ 하였다.

또한 Nam, S. W. 등은 Rosensweig가 제안한 자성유체 역학 베르누이 방정식(Ferrohydrodynamic Bernoulli Equation)의 미분형 방정식을 이용하여 자성유체 자유표면의 형상변화에 관한 수치해석을 시도하였다.⁽⁷⁾ 이러한 방법은 자유표면 변형에 대해 상세한 정보를 제공하는 장점이 있는 반면 수치해석의 계산이 매우 힘들고 많은 시간을 요구하는 단점이 있다.⁽⁸⁾

Chantrell, R. W. 등은 자성유체에 분산되어 있는 미립자의 응집현상을 고려하여 그 유동특성 및 응집기구의 해석⁽⁹⁾에 관해 연구하였고, 박정우 등은 Shilmois가 제안한 기초식을 근거로 수직 자장 하에서의 원관 내 자성유체 거동해석⁽¹⁰⁾에 관해 연구하는 등 자성유체의 명확한 거동해석을 위해 다양한 방법의 연구가 시도되고 있지만 아직까지 미흡한 점이 많이 남아있다.

본 연구에서는 전자기력에 의한 자성유체의 표면형상을 근사적으로 해석하고 PID 제어를 설계하여 자성유체 자유표면의 부상높이를 제어함으로써 표면형상 제어의 기초지식을 제공하고자 한다. 여기서는 계산의 편리성을 위해 자위(Magnetic Potential)를 이용하여 자장의 세기를 구하였다.

또한 Rosensweig가 제안한 자성유체역학 베르누이 방정식을 유한 검사체적법으로 단순화 시켜 자장의 세기에 의한 자성유체의 정상상태 상승높이를 비교적 간단하게 수치 시뮬레이션 하였고 그 값을 실험결과와 비교하였다.

자성유체는 자기장의 세기에 의해 표면이 불안정하게 되는 스파이크 현상이 나타날 수 있으므로 실험을 통해 표면 불안정 조건을 알아내고, 강인한 제어성능으로 인해 산업현장에서 광범위하게 쓰이고 있는 PID(비례-적분-미분, Proportional-Integral-Derivative, 이하 PID)제어를 이용하여 안정한 범위에서 자성유체 표면의 상승 높이에 관한 제어를 수행하였다.

2. 지배방정식의 구성⁽¹¹⁾

정전류 I 에 의해 생성된 자속밀도 B 는 암페어의 법칙을 만족하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad (1)$$

여기서 C 는 전류 I 를 운반하는 닫힌 도체의 경로이다.

스톡스의 적분 정리를 이용하면 이 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

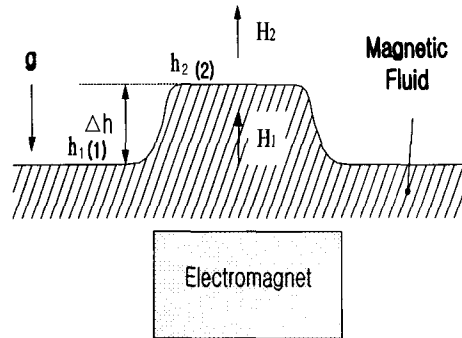


Fig. 1 Surface elevation in a normal field

$$\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{J} 는 전류밀도(Am^{-2}), μ_0 는 투자율(Magnetic Permeability $4\pi \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)이다.

다른 기본적인 특징으로서 자속밀도 B 는 폐회로를 형성한다. 즉,

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

를 만족한다.

전기쌍극자 근처의 전기장과 유사한 작은 전류 폐회로는 자속밀도 B 를 생성하며 그 결과로서 자기 쌍극자 모멘트는 그 회로와 동일시 할 수 있다. 자기물질은 많은 수의 기본적인 폐회로를 포함하고 있다고 가정할 수 있으며 이것은 단위 체적당 쌍극자 모멘트, 즉 자화 M 을 일으킨다.

자화 M 과 자속밀도 B 의 관계에 의해 식 (2)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \text{curl } \mathbf{M} \quad (4)$$

자기장 세기 H 를 다음과 같이 정의하면

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (5)$$

식 (4)로부터 자장의 세기 H 는 다음 조건을 만족한다.

$$\text{curl } \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (6)$$

영구자석에 전류가 흐르지 않는다면 식 (6)은 다음과 같이 된다.

$$\text{curl } \mathbf{H} = 0 \quad (7)$$

스칼라 자기 포텐셜 ϕ 를 다음과 같이 정의하면

$$\mathbf{H} = -\nabla \phi \quad (8)$$

식 (3)과 (5)로부터

$$\text{div } \mathbf{H} = -\text{div } \mathbf{M} \quad (9)$$

$$\nabla^2 \phi = \text{div } \mathbf{M} \quad (10)$$

Fig. 1과 같이 자성유체 아래에 전자석을 놓고 전류를 가하면, 자성유체의 표면에서 자기장의 영

향을 받지 않는 부분(1)과 자기장의 영향을 받는 부분(2)에서는 각각 h_1 , h_2 만큼 부상하여 Δh 의 차이를 나타내게 된다. 경계면을 중심으로 아래와 위의 자기장을 각각 H_1 과 H_2 라고 하면 이것들은 B 의 수직성분 경계조건에 의해 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\mu_0(H_1 + M) = \mu_0 H_2 \quad (11)$$

자성유체의 이론적 운동방정식은 Rosensweig가 제안한 자성유체역학 베르누이 방정식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_1^* + \rho g h_1 = p_2^* + \rho g h_2 - \mu_0 \overline{M} H_1 \quad (12)$$

여기서 $p^* = p(\rho, T) + p_s + p_m$: 복합압력

$$p_s = \mu_0 \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial v} \right)_{H,T} dH : \text{자기변형압력}$$

$$p_m = \mu_0 \int_0^H M dH = \mu_0 \overline{M} H : \text{유체자기압력}$$

$$\overline{M} = \frac{1}{H} \int_0^H M dH : \text{자기장 내의 평균자화}$$

또, 표면력 밀도(Surface Force Density) $p_c = 0$ 이므로 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$p_1^* = p_0 \quad (13)$$

$$p_2^* = p_0 - (\mu_0 / 2) M^2 \quad (14)$$

여기서 P_0 는 외부에서 가해진 임의의 압력이다. 식(13)과 (14)를 식(12)에 대입하여 Δh 의 항으로 나타내면

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \frac{1}{\rho g} \left(\mu_0 \overline{M} H_1 + \mu_0 \frac{M^2}{2} \right) \quad (15)$$

과 같이 쓸 수 있다.

3. 실험장치의 구성

자성유체의 자유표면의 형성 해석 및 상승높이 제어를 위한 실험 장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 가로 5mm, 세로 5mm, 길이 45mm인 전자석을 16개 제작하여 4x4로 배열하였다. 이때 전자석과 전자석 사이의 간격은 5mm이고 간극을 나누기 위한 격판으로 아크릴을 사용하였다.

전자석 하나에 감긴 코일 수는 160회이고, 배열한 전자석 상단부에 자성유체를 담은 용기를 놓아 자기장이 수직으로 작용하게 하였다.

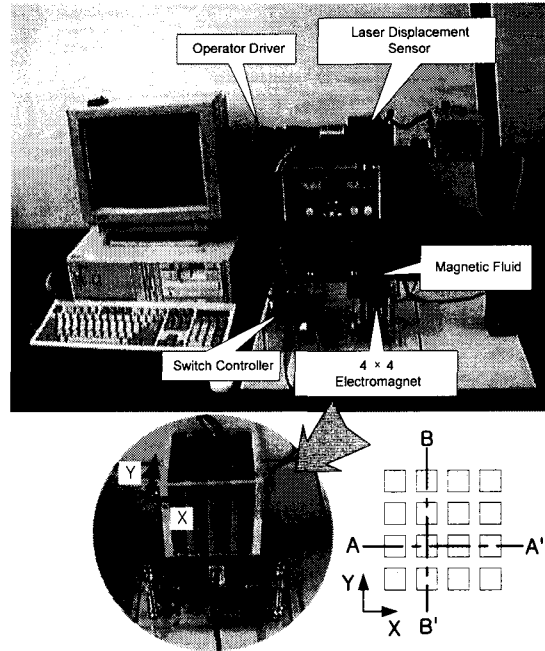


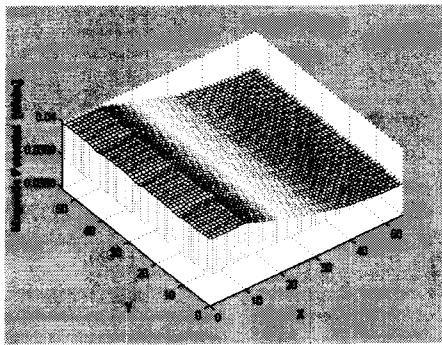
Fig. 2 Schematic of Experimental Apparatus

Table 1 Specification of W-40

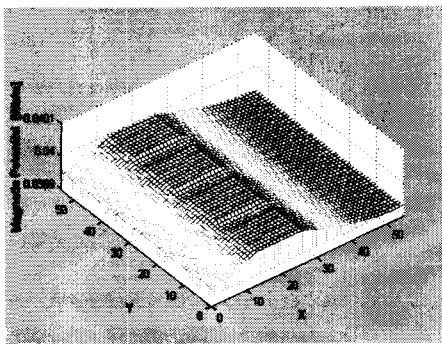
Specific Gravity	1.40± 0.02
Viscosity	25± 7 cp
Density	1.21×10 ³ kg/m ³
Surface Tension	28± 2 dyne/cm
Saturated Magnetization	380± 30 gauss
Boiling Point	100°C at 760 mmHg
Temperature Range	10-80°C

정전류 전원공급기(AutoPower, AP-10)에 제어 로직 PPI8255 (Programmable Peripheral Interface 8255)을 사용하여, 전자석의 한 열씩 정전류를 인가하였다. 이때 발생한 비 균일 자기장이 자성유체에 수직으로 작용할 때 형성된 자성유체의 자유표면의 형상변화 및 상승 높이를 레이저 변위센서로 측정하였다.

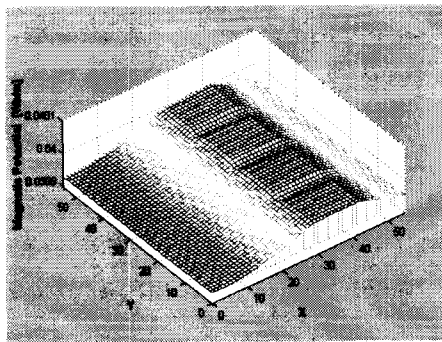
본 연구에서 사용한 자성유체는 일본 타이오사의 W-40으로써 이온 교환수에 직경이 10nm 정도인 Fe₃O₄ 미립자를 중량농도 17.5%로 분산시키고 분산 안정화를 위해 오레인 산을 첨가하여 제조한 것이다. W-40의 구체적인 물성치는 Table 1과 같다



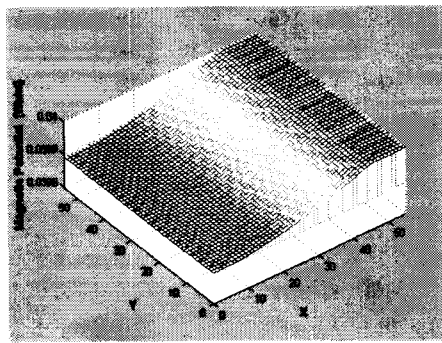
(a) 1 Column



(b) 2 Column

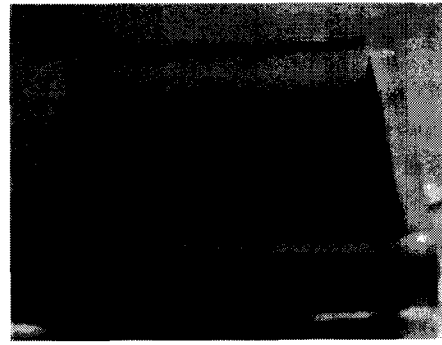


(c) 3 Column



(d) 4 Column

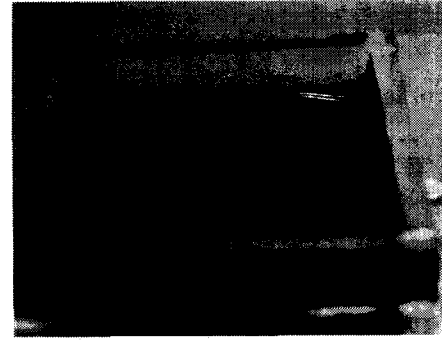
Fig. 3 Magnetic Potential



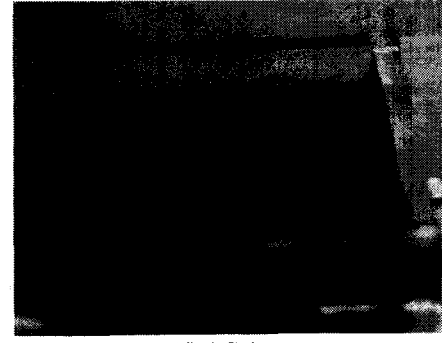
(a) 1 Column



(b) 2 Column



(c) 3 Column



(d) 4 Column

Fig. 4 Elevation Shape of Magnetic Fluids Surface

4. 실험결과

4.1 정상상태의 자성유체 자유표면 부상

4x4 로 배치한 전자석을 1 행부터 4 행까지 순차적으로 5A 의 전류를 인가하여 구동하였을 때 발생한 전위 분포를 식 (10)을 이용하여 구하였으며 결과는 Fig. 3 과 같고, Fig. 4 는 전자석에 의해 부상한 자성유체의 표면 형태를 나타내고 있으며, 이들 결과가 매우 유사함을 할 수 있다

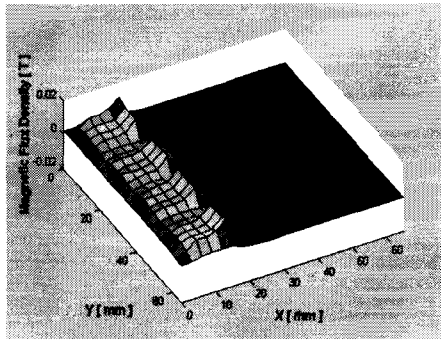
Fig. 5 는 1 열과 2 열에 해당하는 전자석에 전류를 인가하였을 때 발생한 자속밀도를 가우스미터로 측정된 것이고 이때 발생한 자속밀도는 약 0.02T 정도이다. Fig. 6 은 발생한 자기장에 의해 부상한 자성유체의 표면을 레이저 센서로 측정된 것이다. 5A 전류에 의해 부상한 표면 높이는 약 0.5mm 정도이다.

이들 결과를 통해 Fig. 3 의 전위 분포의 시뮬레이션과 자성유체의 표면 형성 모습이 매우 유사함을 알 수 있으며 이들 통해 자기장의 세기와 자성유체 표면 부상과의 관계 규명을 통해 자유표면의 형상 제어가 가능함을 알 수 있다.

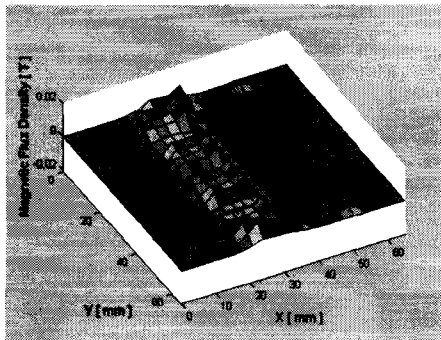
그러나 자성유체의 표면은 전위 분포와 비례하여 부상하지만 자기장의 세기가 강해지면 자성유체의 표면은 완만한 변화를 일으키지 않고 스파이크 현상을 나타내는 것으로 알려져 있다.^(12,13) 이러한 현상은 자기자의 세기, 분포 그리고 자성유체의 물리적 특성과 밀접한 관계를 가지고 있으며 이 같은 자유표면의 불안정성에 관해 많은 연구들이 진행되고 있으나 명확한 규정은 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 응용의 편의를 도모하기 위해, 자성유체 표면불안정 영역을 실험적으로 구하였고 이때 인가 전류의 범위는 $0 \leq I \leq 10$ [A]이다.

자성유체의 표면부상 높이는 식 (15)에 의해 구할 수 있는데 Fig. 2 의 실험장치에서 2 행의 전자석에 전류를 인가하였을 때, 단면 A-A' 과 B-B'에 서서 자속밀도 벡터선도는 Fig. 7 과 같다. 또한 부상한 자성유체 표면 높이에 관한 수치 시뮬레이션과 실험결과를 비교하면 각각 Fig. 8 및 Fig. 9 과 같이 나타난다. 이것은 정상상태에서의 전자기력에 의한 자성유체 자유표면의 부상 결과를 보여주고 있다. 전자석의 위치에 따라 자성유체의 표면상승의

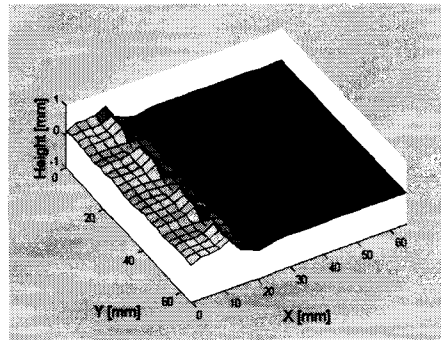


(a) 1 Column

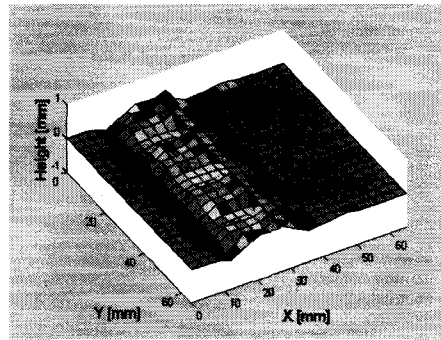


(b) 2 Column

Fig. 5 Magnetic Flux Density by Gauss Meter



(a) 1 Column



(b) 2 Column

Fig. 6 Elevation of Magnetic Fluids by Laser Sensor

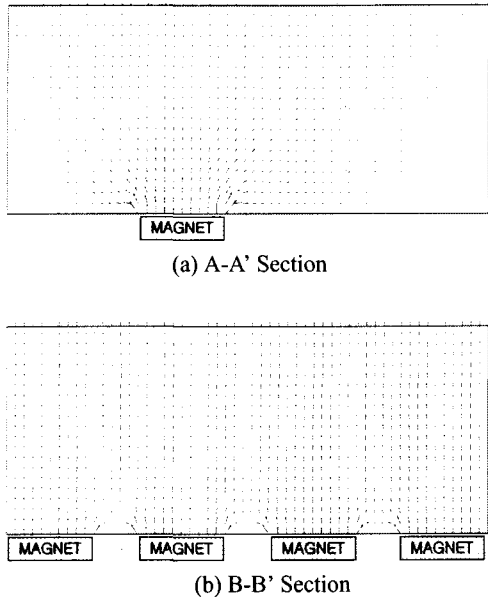


Fig. 7 Vector Plot of Magnetic Flux

정도가 각각 다르게 나타나며 실험결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 이러한 결과를 이용하면 자성유체를 이용하여 평면에 요철부를 발생시킴으로 말미암아 유체 유동시 발생할 수 있는 난류나 충격파 그리고 경계층에 의한 마찰력 등의 크기나 경계층 발생 위치의 실시간 제어 등이 가능해짐을 알 수 있다. 또한 복잡한 미분형 방정식의 수치해석 방법 대신 유한 검사체적법에 의해 단순화 시킨 비교적 간단한 방정식을 사용하여 자성유체 자유표면의 해석이 용이해 짐을 알 수 있다.

4.2 자성유체 자유표면 부상의 PID 제어

자성유체의 거동은 많은 비선형성을 가지고 있고 또 초기조건에 선형이나 작동범위의 선형에 따라서도 변화가 다양하게 일어난다. 특히 자성유체는 조건에 따라 스파이크 현상을 보이며 표면이 불안정하게 되는 특성을 가지고 있으므로, 4.1 절에서 언급한 바와 같이 실험을 통하여 표면 불안정 영역을 파악하고 안정한 조건 내에서 실험을 수행하였다.

PID 제어기는 광범위한 동작조건에서 좋은 성능을 보이며, 공학자가 쉽고 간단하게 동작시킬 수 있는 단순성을 가지고 있기 때문에 산업공정에서 많이 쓰이고 있으며 식 (16)과 같은 전달함수를 가진다.

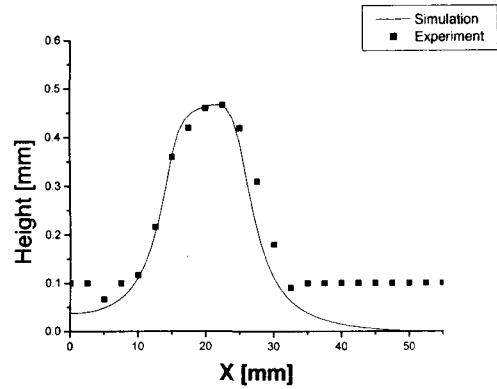


Fig. 8 Elevation of Magnetic Fluids at Section A-A'

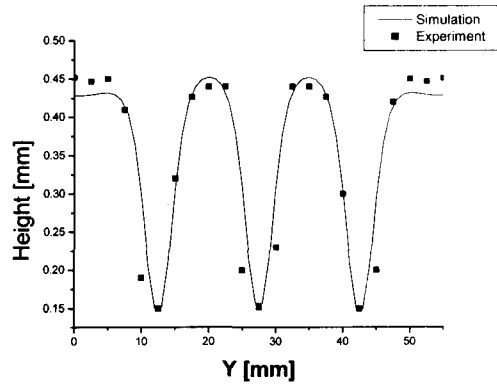


Fig. 9 Elevation of Magnetic Fluids at Section B-B'

$$G(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \tag{16}$$

먼저 정상상태의 자성유체 표면 부상 실험에서 사용한 전자석 1 개를 사용하여 자성유체 표면의 높이를 1.00mm 부상시키기 위한 실험을 수행하였으며 이때 표면 부상 높이의 제어를 위해 PID 제어를 사용하였다. 샘플링 시간은 0.01 초이고 비례게인, K_p , 미분게인, K_D , 그리고 적분게인 K_I 은 각각 0.5, 0.01, 0.05 이다.

Fig.10 은 PID 제어에 의한 자성유체 표면제어 결과를 보여주고 있고, Fig.11 는 오차의 변화를 보여주고 있다. 실험을 통해 정상상태 까지 도달 시간은 약 0.2 초이며 정상상태 오차가 거의 없이 잘 추종하고 있는 모습을 볼 수 있다.

이러한 표면의 제어는 계면 형상 변화가 액츄에이터 작용으로 사용할 수 있으며 특히 경계층 내부의 저항력 감소나 충격파의 발생 위치 변화 등이 가능한 유체와 고체벽면의 에너지 변환 제어 시스템으로서 사용이 가능하다.

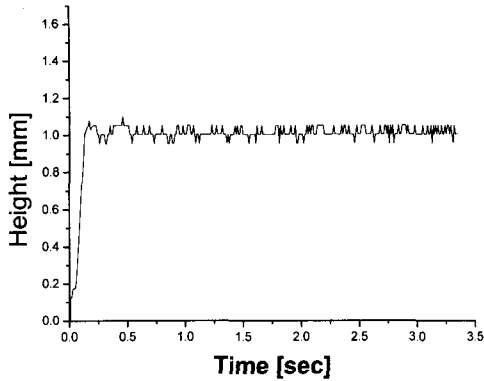


Fig. 10 Elevation of Magnetic Fluids by PID Control

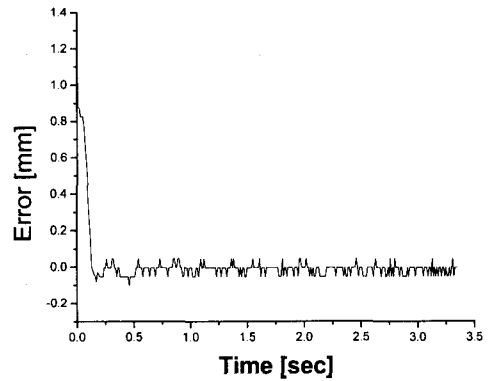


Fig. 11 Tracking Error

5. 결 론

본 연구에서 전자기력에 의한 자성유체 표면의 형성과 제어를 위한 연구를 수행하였으며 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 전자기력에 의한 자성유체의 표면형상을 근사적으로 해석하기 위해 자위(Magnetic Potential)를 개념을 이용하였다. 자위분포의 수치해석 결과와 자성유체 자유표면 상승의 실험결과가 매우 유사함 통해 표면상승이 자위분포와 비례함을 알 수 있다.

(2) Rosensweig의 자성유체역학 베르누이 방정식을 이용하여 자장의 세기에 의한 자성유체의 정상상태 상승높이를 수치 시뮬레이션하고 실험치와 비교하였다. 이들 결과가 거의 일치함을 통해 자유표면 상승에 관한 지배방정식의 타당성을 증명하였다.

(3) 실험을 통해 자성유체 표면의 불안정 조건을 알아내고, 안정한 범위 내에서 1개의 전자석을 사용하여 PID 제어에 의한 자성유체 표면의 상승높이 제어를 수행하였다.

(4) 자성유체 표면을 1.00mm를 부상시키기 위해 필요한 정상상태 도달 시간은 약 0.2초이며 정상상태오차는 거의 발생하지 않은 좋은 추종성을 확인할 수 있었다.

이러한 연구결과는 경계층 제어나 유체 표면의 유동제어, 충격과 제어, 평판의 능동제어, 촉각 시스템 등 많은 응용분야에 걸친 폭 넓은 기초 지식을 제공할 것이다.

참고문헌

- (1) Fukuda, H., Ueno, K., Kamiyama, S., and Oyama, T., 1998, "Study on Active Damper with a Magnetic Fluid," *JSME International Journal Series B*, Vol. 41, No. 4, pp. 822~829.
- (2) Chun, U.H., Hwang, S.S., Lee, B.G., Lee, H.S., and Kim, J., 2000, "An Experimental Study on the Vibration Characteristics in Viscous Damper using Magneticfluid," *Korean Society of Automatic Engineers*, Vol. 8, No.1, pp. 163~171.
- (3) Aum,H.S., Lee,S.W., Roh,B.O., and Jang,T.S., 1998, "Development of Machining Apparatus for Ceramic Ball Bearing," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, No. 3, pp. 545~553.
- (4) Okubo, M., Ishibashi, Y., Oshima, S., and Yamane, R., 1989, "Interfacial Instability of Magnetic Fluid in alternating Magnetic Field," *Transactions of the JSME, B*, Vol. 55, No. 518, pp. 66~72.
- (5) Mai, J., Yamaguchi, K., Oshima, S., Yamane, R., and Nakatani, I., 1996, "The Surface Response of a Strong Magnetic Fluid to an Alternating Magnetic Field," *Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, pp. 1~6.
- (6) Park, C. H., Joo, S. W., and Lee, S. C., 1998, "A Linear Analysis of Interfacial Instabilities of Ferrofluids," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 22, No. 7, pp. 899~904.
- (7) Nam, S. W., and Watanabe, T., 1989, "Numerical Analysis on the Deformation of Free Surface of Magnetic Fluid," *Transactions of the JSME, B*, Vol. 62, No. 593, pp. 44~48.
- (8) Gerhart, Philip M., Gross, Richard J., Hochstein, John I., 1992, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Addison-Wesley, USA, pp. 134~138.
- (9) Chantrell, R. W., Bradbury, A., Charles, S. W., 1982, "Agglomerate Formation in a Magnetic Fluid," *J. Appl. Phys.*, Vol. 53, No. 3, pp. 2742~2744.
- (10) Park, J. W., Ryu, S. O., and Seo, L. S., 1999, "A

- Study on the Flow Behavior of Magnetic Fluids in a Circular Pipe with a Vertical Magnetic Field," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 23, No. 1, pp. 25~32.
- (11) Rosensweig, R. E., 1985, "*Ferrohydrodynamics*," Cambridge University Press.
- (12) Isomura, K., Oshima, S., and Yamane, R., 1996, "Numerical Simulation of Oscillation of Single Spike of Magnetic Fluid under Vertical Alternating Magnetic Field," *Transactions of the JSME, B*, Vol. 62, No. 596, pp. 1355~1361.
- (13) Berkovski, B. M., Bashtovoy, V. G., 1996, *Magnetic fluids and applications handbook*, Begell House, Inc., New York, pp. 422~471.