

자성유체 자유표면의 형상 제어에 관한 연구

안창호(부산대 대학원), 김대영*(부산대 대학원), 지병걸(부산대 대학원)
이은준(부산대 대학원), 박명관(부산대 기계공학부)

A Study on the Deformation control of Free Surface of Magnetic Fluid

C. H. Ann, D. Y. Kim, B. K. Ji, E. J. Rhee, M. K. Park

ABSTRACT

In this study, the deformation of the free surface motion of a magnetic fluid for the change in electromagnetic force is discussed and carried out theoretically and experimentally on the basis of Rosensweig Ferrohydrodynamic Bernoulli Equation. While applied magnetic fields are induced by 4x4 electromagnet located under the magnetic fluid, the surface of the magnetic fluid is formed the balance of surface force, gravity, pressure difference, magnetic normal pressure and magnetic body force. In case, magnetic fluid in characteristics of fluid adjusted to the opposite direction of the gravity direction. thus, the device of a magnetic fluid proposed the surface actuator. The device of surface deformation as well comparision between numerical simulation and experiments as will be presented.

Key Words : Magnetic Fluids(자성유체), Deformation Control(불규칙형상 제어), Surface control(표면 제어), Electromagnetic Force(전자기력)

1. 서론

산업의 발달과 더불어 기계분야에서는 여러 방향으로 연구 및 개발을 추진중이다. 신소재 개발과 함께 우주개발이 활발히 이루어짐에 따라 전자기장에 반응이 강한 유체가 개발되고, 이에 따라 응용장치의 개발 및 연구가 활발하다.^[1] 자성유체는 자기장의 영향을 받으면 자성유체 형상이 쉽게 변형되고, 유체적 특성과 동시에 고체적 특성을 가지고 있고, 자기장이 없을 때는 뉴턴 유체의 성질을 가지지만 자기장이 걸리면 비 뉴턴 유체의 성질을 가진다.^{[2][3][4]} 자성유체는 자성과 유동성을 함께 지니고 있는 상당히 흥미 깊은 유체이다. 이런 독특한 특징을 가지고 있는 자성유체에 대한 연구가 진행되고, 이 특징을 이용한 응용분야는 계측분야에서 시스템까지 다양하다. 응용 분야 중에서 자성유체 표면 형상에 관한 제어 연구할 것이다.

이론적 방법으로는 외부 전자기장에 대해 정지

상태로부터 변화하는 자성유체의 자유표면의 변화를 수치 계산에 대한 결과가 보고된바 있다.^[5] Cowley와 Rosensweig는 실험적 방법으로써 유체의 표면물결의 진폭의 변화와 자기장의 세기는 비례한다고 밝힌바 있으며, 유체표면내의 형상변화로 인한 디스플레이에 관한 연구도 수행하고 있다.^[6]

본 연구에서는 독특한 특성을 가진 자성유체를 자기장의 세기에 따른 표면형상의 분포 및 유동특성을 알아보고, 자위(magnetic potential)를 이용하여 자장의 세기를 구한 후 자유표면 형성에 관해 해석하였다. 자성유체를 이용한 표면제어에 관한 응용장치를 폭넓게 활용할 수 있다는 가능성을 보여서 다양한 방법의 연구가 이를 수 있다는 가능성을 보여줄 것이다. 자성유체의 표면 현상을 근사적으로 해석하고 전자석으로 컴퓨터 인터페이스를 통해 제어함으로써 사용자가 원하는 형상을 나타낼 수 있고, 그 형상을 통해 표면 액추에이터를 활용한 제어가 용이해질 것이다.

2. 본론

2.1 지배방정식

스칼라 자기 포텐셜 ϕ 를 다음과 같이 정의한다.

$$H = -\nabla\phi \quad (1)$$

$$\text{div}H = -\text{div}M \quad (2)$$

$$\nabla^2\phi = \text{div}M \quad (3)$$

Fig. 1과 같이 자성유체 아래 전자석을 위치시키고 전류를 가하면 형성된 자기장에 의해 자성유체의 표면은 Δh 만큼 높이가 상승하게된다. 그러므로 경계면을 중심으로 아래와 위의 자기장을 H_1 과 H_2 로 설정한다. B의 수직 성분과 경계조건에 의해 아래의 식과 같은 관계를 가질 수 있다.

$$\mu_0(H_1 + M) = \mu_0 H_2 \quad (4)$$

자성유체의 이론적 운동방정식은 Rosensweig가 제안한 자성유체역학 베르누이 방정식으로부터 아래 식을 구할 수 있다.

$$p_1^* + \rho g h_1 = p_2^* + \rho g h_2 - \mu_0 \overline{M} H_1 \quad (5)$$

(\overline{M} 은 자기장 내의 평균자화)

그리고 표면력 밀도 P_c 가 0이므로 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$P_1^* = P_0 \quad (6)$$

$$P_1^* = P_0 - (\mu_0/2) M^2 \quad (7)$$

(P_0 은 외부에서 가해진 임의의 압력)

식(6)과 식(7)을 식(5)에 대입하여 Δh 의 항으로 나타내면 아래와 같은 식이 된다.

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \frac{1}{\rho g} \left[\mu_0 \overline{M} H_1 + \mu_0 \frac{M^2}{2} \right] \quad (8)$$

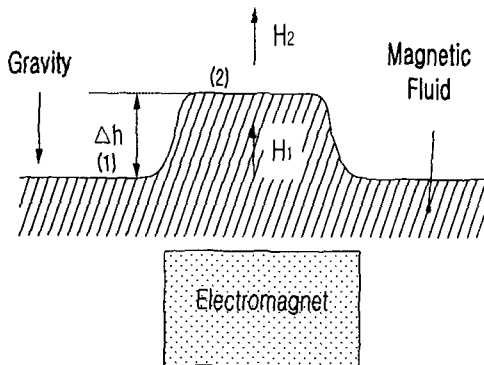


Fig. 1 Surface Elevation in a Normal

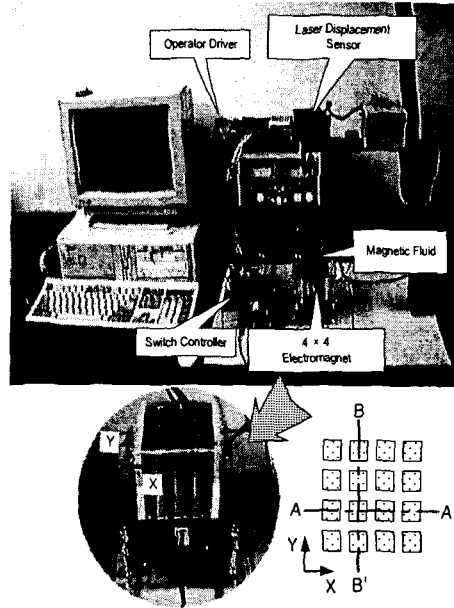


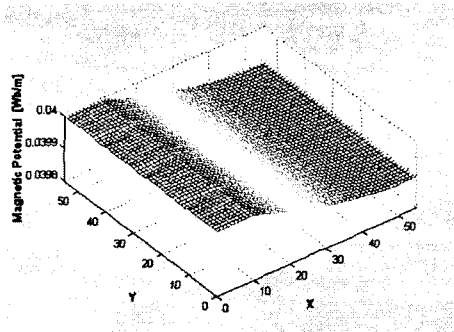
Fig. 2 Schematic of Experimental Apparatus

2.2 실험장치의 구성

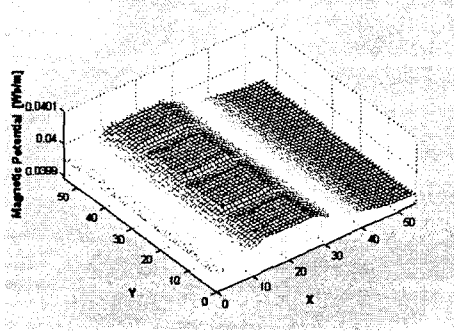
자성유체의 표면형상 제어를 위한 실험장비의 개략도는 Fig. 2와 같다. 가로5mm, 세로5mm, 길이가 45mm인 전자석을 16개 제작하여 4X4로 구성하고 상단부에 정사각형10mm의 캡을 씌웠다. 이는 자성유체 표면형상과 관련이 있다. 전자석 하나에 감겨있는 코일수는 160회이고 코일의 단면적은 0.385 mm^2 이다. 전자석의 자계 힘은 코일의 감은 수와 전류의 세기에 비례하고 전자석 길이에 반비례한다. 이는 유체의 형상변화에 매우 중요하게 작용한다.

즉, 자계의 세기에 따라 표면의 상승진폭과 상승형태, 상승 상단면의 모양이 바뀌게 된다. 그리고 각 열과 행의 4개의 전자석에 전원을 가하고 좌, 우 또는 상, 하로 슈프트 시킴으로써 표면의 형상변화를 확인하고 시뮬레이션 결과와 비교하게 된다.

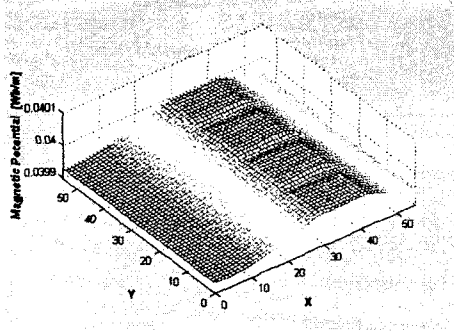
본 연구에서 사용된 자성유체는 일본 타이오사의 w-40으로써 이온 교환수에 직경이 10nm정도인 Fe_3O_4 미립자를 물에 분산시킨 것이다. W-40의 구체적인 물성치는 비중은 1.40 ± 0.02 , 점도는 $25 \pm 7 \text{ cp}$, 표면장력은 $28 \pm 2 \text{ dyne/cm}$, 포화자화는 $380 \pm 30 \text{ gauss}$ 이다. 전자석의 한 열씩 차례로 인가하여 이때 발생한 자기장의 세기를 가우스미터로 측정하고, 이때 형성된 자성유체의 표면형상 변화에 따른 상승높이를 레이저 변위센서로 측정하였다.



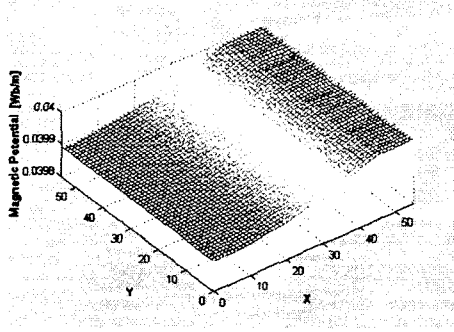
(a) 1 column



(b) 2 column

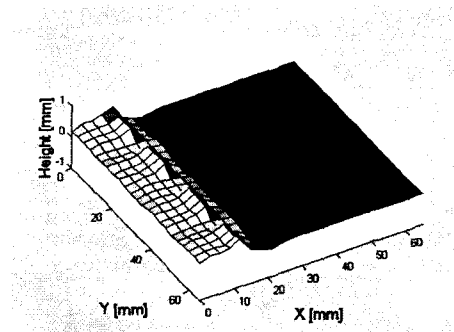


(c) 3 column

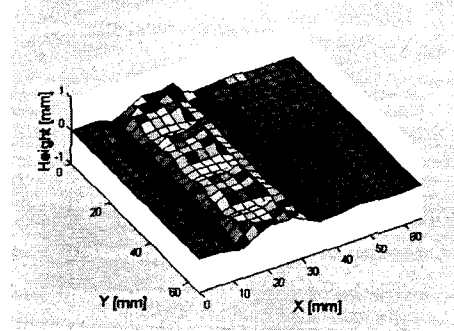


(d) 4 column

Fig.3 Magnetic Potential



(a) 1 column



(b) 2 column

Fig.4 Elevation of Magnetic Fluids by Laser Sensor

3. 실험결과 및 고찰

전자석을 1행부터 4행까지 차례로 전류를 인가하여 구동시켰을 때 나타난 전위분포는 식(3)을 이용하여 구했고, 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 4는 1행과 2행에 해당하는 전자석에 전류를 인가하여 자기장의 영향으로 상승한 자성유체의 표면 높이를 레이저 센서로 측정한 것이다.

이들 결과를 통해서 Fig.3의 전위 분포의 시뮬레이션과 자성유체의 표면 형성 모습이 유사함을 알 수 있고, 자기장의 세기와 자성유체 표면 부상과의 관계 규명에 의해 제어 가능함을 알 수 있다.

자성유체의 표면상승 높이는 식(8)에 의해 구하였고, Fig.2의 실험장치에서 2행의 전자석에 전류를 인가하여 단면A-A'과 B-B'에 자성유체 표면 높이에 대한 수치시뮬레이션과 실험결과를 Fig.5와 6에 비교하였다. 전자석의 위치 변화로 표면 상승높이가 차이는 나지만, 실험결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치함을 볼 수 있고 본 연구의 자성유체 표면제어를 통한 실험결과와 시뮬레이션 결과는 신 개념의 응용장치 연구에 많은 의의를 가지고 있다.

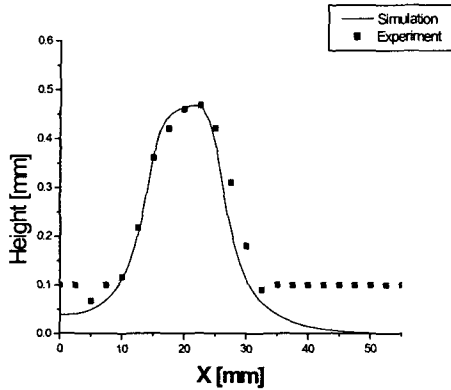


Fig.5 Elevation of Magnetic Fluids at Section A-A'

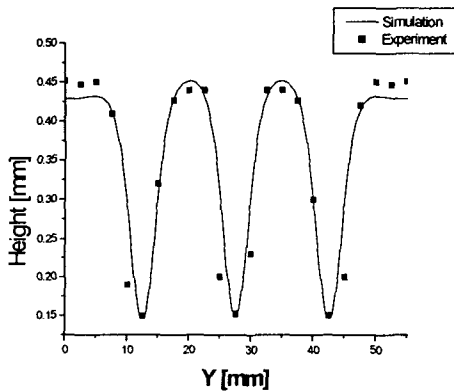


Fig.6 Elevation of Magnetic Fluids at Section B-B'

4. 결론

본 연구는 자성유체의 표면형상제어로부터 응용 장치에 응용하기 위한 실험이다. 유체의 특성과 고체의 특성을 동시에 가지고 있다는 장점으로 여러 분야의 응용장치에 도입될 수 있다. 이러한 관점에서 결과를 도출하였다.

1) 자성유체의 표면형상을 근사적으로 해석하기 위해 자위를 이용해 자장의 세기를 구하였다.

2) 외부인가 전원으로 자성유체의 자유표면 형상의 실험결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 또 전원 크기가 증가함에 따라 자장의 세기가 증가하면 자성유체 발생분포가 다름을 알 수 있다.

3) 액츄에이터의 기능을 접목할 수 있는 솔레노이드 배열로부터 자기부양장치의 운동 및 위치제어가 가능하다.

이런 결과로부터 자성유체의 표면 형상을 솔레노이드와 외부전원만으로 구동 가능하다는 것을 알 수 있고 각 솔레노이드에 외부전원을 다양하게 공급하여 사용자가 원하는 형상으로 제어할 수 있게 개선된 연구가 필요하다.

향후과제로써 자성유체를 이용한 표면 형상제어에 관한 본 연구 결과로서 액츄에이터, 경계층 제어나 유체표면의 유동제어, 충격과 제어, 난류제어, 촉각시스템 등 많은 응용분야에 폭 넓게 활용할 수 있도록 많은 제어이론이 추가된 좀 더 개선된 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 神山新一, 磁性流體入門, 産業圖書(1995), p96
2. 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, 1998.2.
3. E. V. Korobko, R. G. Gorodkin, V. V. Melnichenko, 1996, "Boundary Effects at ERF Spreading in Electric Fluid", International Journal of Modern Physics B, Vol. 10 Nos. 23&24, pp. 3357-3365
4. 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,
5. Nam, S. W., and Watanabe, T., 1989, Numerical Analysis on the Deformation of Free Surface of Magnetic Fluid, 일본기계학회(B) Vol. 62, No. 593, pp 44-48.
6. M. D. Cowley, R. E. Rosensweig, 1967, "The Interfacial Stability of a Ferro Magnetic Fluid" Journal of Mech. Vol. 30, pp. 671-688