

전자기력에 의한 자성유체의 2차원 자유표면 형상 제어에 관한 연구

안창호*, 지병걸(부산대 대학원 지능기계공학과), 이은준(부산대학교 기계기술연구소)
박명관(부산대 기계공학부)

Study on the two-dimensional Formation Control of Free Surface of Magnetic Fluid by Electromagnetic Force

C. H. Ann*, B. K. Ji, E. J. Rhee(Graduated School of Intelligence and Mech. Eng. Dept., PNU)
M. K. Park(School of Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

In this study, because of change in electromagnetic force, deformation of the free surface motion of a magnetic fluid is changed. 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. Objective of this study explicates free surface motion by electromagnetic force and planes to designed controller. To control free surface of magnetic fluid, it embody designed two-dimensional free surface form of magnetic fluid. By using this characteristics, they applied to oscillator for surface control, flow control, boundary layer control. Strength of magnetic field and height of free surface of magnetic fluid measure as a hall-effect sensor.

As performing height control of magnetic fluid, the result will be presented possibility of free surface deformation control.

Key Words : Free surface control(자유 표면제어), Electromagnetic force(전자기력), Magnetic fluid(자성유체), Boundary layer flow control(경계층 흐름제어), Deformation control(불규칙 형상 제어), Magnetic filed(자장)

1. 서론

산업의 발달과 기계장치의 고도화에 의해서 여러 분야로 연구와 개발이 추진중인데 특히 신소재 개발의 부산물로 전자기장에 강한 반응을 나타내는 유체가 개발되면서 새로운 응용장치들의 개발 및 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^[1] 그 중 유체적 특징과 함께 고체적 특징이 있는 자성유체는 자기장의 영향을 받으면 자성유체 형상이 쉽게 변형된다. 이 유체의 특성은 자기장이 없을 때는 뉴턴 유체적인 성질을 가지지만 자기장이 걸리면 비 뉴턴 유체의 성질을 가지는 것이다.^{[2][3]} 이런 독특한 특성 때문에 자성유체에 대한 응용분야의 연구가 활발히 이루어진다. 이런 응용분야 연구 중 하나인 자성유체 표면형상을

제어하여 원하는 2차원 표면 형상을 구현할 수 있다는 가능성을 제시할 것이다. 이를 이용한 연구는 경계층 제어, 난류 흐름제어, 능동 소음 제어 등에 응용될 수 있다. 자성유체의 표면형상은 자장의 분포 및 세기 그리고 유체의 특성과 관계가 깊다. 전자기력에 의한 자유표면은 복잡한 메카니즘을 가지므로 다양한 연구가 이루어지고 있다.

이전 연구에는 Cowley와 Rosenweig는 유체물결의 진폭의 변화와 자기장의 세기는 비례한다는 것을 실험적으로 밝힌바 있으며^[4], Okubo, M., Mai, j. 등은 교류자장에 의한 자성유체 계면의 불안정성에 관해 연구하였고^[5]이, Nam, S .W등은 전자기장에 대해 정지상태에서 변화하는 자성유체의 자유표면의 형상을 수치 계산에 대한 결과를 이론적으로 보고하였다^[6].

이전 연구는 자성유체 표면형상의 거동해석을 위해 다양한 연구를 하지만 아직은 미흡한 점이 많다. 하지만 새로운 응용분야의 도입에 있어서 충분한 검증이 이루어지고 이러한 검증에 대한 상당부분에서 타당성이 입증되고 있으므로 이러한 점을 고려하여 자성 유체 역학(Ferrohydro dynamics)을 토대로 이론적 해석 및 실험을 병행한 유체역학적 특성 파악할 수 있다. 본 연구에서는 전자기력에 의한 자성유체의 표면 형상을 근사적으로 해석할 것이다. 이런 해석을 근거로 적합한 제어를 설계하고 제어 알고리즘을 선형적으로 자성유체의 2차원 표면형상에 관한 연구의 완성도를 높일 수 있다. 자성유체의 자유표면 형상에 관한 메카니즘을 해석하기 위하여 자위를 이용하여 자장의 세기를 구하고 Rosenweig가 제한한 Ferrohydrodynamic Bernulli Equation을 이용하여 자장의 세기에 의한 상승높이를 수치 시뮬레이션을 했다. 또한 자성유체는 자장의 세기에 의한 표면이 불안정해지는 스파이크 현상이 나타날 수 있으므로 실험을 통하여 불안정 조건을 알아냈다. 그리고 자성 유체의 유체역학적 특성을 파악하고, 표면제어를 위한 응용장치를 제작하여 자성유체의 유동을 전자석으로 컴퓨터 인터페이스를 통해 제어하여 자기력에 의한 자성유체의 2차원 자유표면 형상 제어에 관한 연구를 수행한다. 따라서 자성유체를 이용한 표면형상제어가 이루어진 경우 경계층 흐름제어 및 난류 흐름제어, 평판의 능동제어 등이 용이함으로 우주항공 분야 등에 폭 넓게 적용될 수 있다.

2. 본론

2.1 지배방정식

정 전류 I에 의해 생성된 자속밀도 B는 암페어 법칙을 만족한다.

$$\oint_C B = \mu_0 I \quad (1)$$

스톡스의 적분이론을 사용하면 다음 식과 같다.

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

여기서 J는 전류밀도 ($A \cdot m^{-2}$)

μ_0 는 투자율 ($4\pi \times 10^{-7} H \cdot m^{-1}$)

그러므로 자화 M과 자속밀도 B의 관계는 식(2)에 의해서 다음 식과 같다.

$$\text{Curl } B = \mu_0 J + \mu_0 \text{Curl } M \quad (3)$$

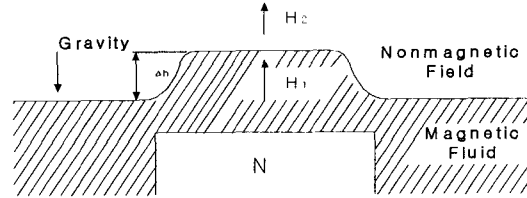


Fig. 1 Surface Elevation in a Normal field

식(3)으로부터 자장의 세기 H는 다음과 같다.

$$\text{Curl } H = J \quad (4)$$

만약 전류가 흐르지 않는다면 식(4)는 다음과 같다.

$$\text{Curl } H = 0 \quad (5)$$

스칼라 자기 포텐셜 ϕ 를 다음과 같이 정의한다.

$$H = -\nabla\phi \quad (6)$$

$$\text{div } H = \text{div } M \quad (7)$$

$$\nabla^2 \phi = \text{div } M \quad (8)$$

Fig. 1과 같이 자성유체 아래 전자석을 위치시키고 전류를 가하면 자기장이 형성되고 안정영역에서 형성된 자기장의 세기에 비례하여 자성유체의 표면형상은 Δh 만큼 높이가 상승한다. 경계면을 중심으로 유체내의 자기장 H_1 과 자유공간에서의 자기장 H_2 는 B의 수직성분 경계조건에 의해서 다음의 관계식을 가질 수 있다.

$$\mu_0 (H_1 + M) = \mu_0 H_2 \quad (9)$$

자성유체의 이론적 방정식은 자성유체역학 베르누이 방정식으로부터 다음의 식을 구할 수 있다.

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p^* + \mu_0 M \nabla H + \eta \nabla^2 v + \rho g \quad (10)$$

그러나 다음 식을 구하기 위한 몇 가지의 가정이 필요하다.

가정

- 비 압축성이며, 뉴토니안 유체(Newtonian Fluid)

- $\nabla \times H = 0$
- Hysteresis가 없는 비 선형 자성체

$$p_1^* + \rho g h_1 = p_2^* + \rho g h_2 - \mu_0 \overline{M} H_1 \quad (11)$$

여기서 p^* 은 복합 압력

\overline{M} 은 자기장내의 평균자화

그리고 표면력 밀도 P_s 는 0이므로 다음의 경계조건을 가진다.

$$p_1^* = p_0 \quad (12)$$

$$p_2^* = p_0 - (\mu_0/2) M^2 \quad (13)$$

여기서 p_0 는 외부에서 가해진 임의의 압력

식(5)과 식(6)을 식(4)에 대입하여 Δh 항으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \frac{1}{\rho g} (\mu_0 \overline{M} H_1 + \mu_0 \frac{M^2}{2}) \quad (14)$$

2.2 실험장치의 구성

자성유체의 2차원 자유 표면형상 제어를 위한 실험장치의 개략도는 Fig.2와 같다. 원 기둥 형태의 코일에 길이가 8mm인 전자석을 2개 제작하여 Fig.2와 같이 구성하였다. 전자석 하나에 감겨있는 코일의 횡수는 500회이고 코일의 단면적은 0.7mm²이다. 전자석의 자계의 힘은 코일의 감은 수와 전류의 세기에 비례하고 전자석의 길이에 반비례한다. 이 특징은 유체의 형상변화와 매우 중요하게 작용한다. 즉, 자계의 세기에 따라 표면의 상승진폭과 상승형태, 상승 상단 면의 모양이 바뀌게된다. 본 연구에서 사용된 자성유체는 일본 타이오사의 HC-50이다. 자성유체 HC-50에 대한 물성치는 Table 1과 같다.

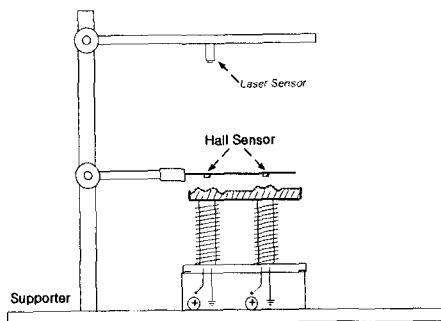


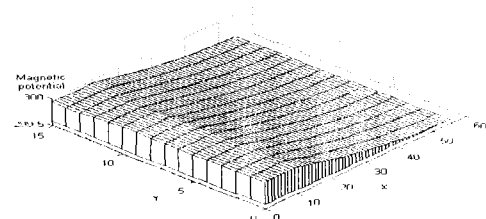
Fig. 2. Schematic of Experiment

항목	HC-50	비고
외관	흑색 액체	
비중	1.39 ± 0.02	(-) at 25°C
점도	15 ± 10	cp at 25°C
표면 장력	26 ± 2	dyne/cm at 25°C
포화 자화	475 ± 30	gauss
비등점	150 ~ 250	°C at 760mmHg
인화점	30 ~ 60	°C
사용온도 범위	-20 ~ 120	°C
용매	오일	

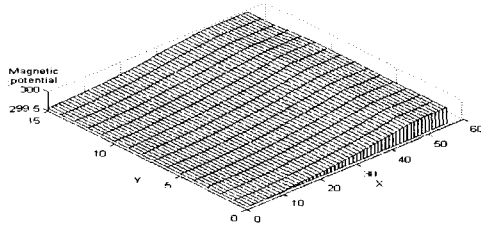
Table 1 Characteristics of Magnetic fluid HC-50

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

전자석을 1행과 2행으로 순차적으로 전류를 인가하여 구동할 때 나타나는 전위분포는 식(8)를 이용하여 구하였고 그 결과 그래프는 Fig. 3과 같다. 시뮬레이션 결과를 통해서 자기장의 세기와 자성유체 표면 부상과의 관계 규명에 의해서 제어가 가능함을 알 수 있다. 그러나 자성유체의 표면은 전위분포와 비례하여 부상하지만 자기장의 세기가 일정범위 이상으로 커지면 자성유체의 표면에 스파이크 현상이 나타나는 것으로 알려져 있다.¹⁹⁾ 스파이크 현상은 자기장의 세기, 분포, 자성유체의 물리적 특성과 밀접한 관계를 가지며 이러한 표면의 불안정성에 관해 많은 연구가 진행되지만 아직은 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 자성유체의 표면 불안정 영역을 실험적으로 구하였고 인가전류의 범위는 $0 \leq I \leq 5$ [A]이다. 이러한 시뮬레이션 결과를 이용하면 경계층 발생위치의 실시간 제어가 가능해지고 복잡한 미분방정식의 방법 대신 비교적 간단한 유한요소 체적법을 사용하여 자성유체 자유표면의 해석이 용이해짐을 알 수 있다.



(a) 1 column



(a) 2 column

Fig. 3 Magnetic potential

4. 결론

본 연구는 자성유체의 표면 높이를 제어하여 경계층 흐름을 제어하는 것이다. 기존의 경계층 흐름이나 능동 및 수동의 난류제어를 위해서는 입자, 미소 기포, 폴리머, 미소 구동기 첨가 등 다양한 방법 등이 시도되고 있으나 시스템의 복잡성, 이론적 배경의 부족 등으로 인해 아직까지는 효율적인 연구 결과를 얻지 못하고 있다. 따라서, 자성유체를 이용한 표면형상제어가 가능해질 경우에는 경계층 흐름 제어뿐만 아니라 난류 흐름 제어, 평판의 능동제어 그리고 능동 소음 제어가 용이해 짐으로써 우주 항공 분야 등 첨단 분야에 폭넓게 적용될 수 있다.

향후과제로써 자성유체를 이용한 2차원 자유표면 형상제어에 관한 본 연구의 시스템에 알맞은 제어기를 설계하여 표면 높이를 제어함으로써 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교 분석하고 연구결과를 이용하여 경계층 흐름을 제어할 수 있을 것이다.

후기

이 과제는 2002년도 학술진흥재단 과제인 지방대 육성지원사업에 의해서 연구가 수행되었으며 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 神田新一, 磁性流體入門, 産業圖書(1995)
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. M. D. Cowley, R. E. Rosenweig, 1967, "The Interfacial Stability of a Ferro Magnetic Fluid", Journal of Mech. Vol. 30, pp. 671-688
5. 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.
6. 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
7. 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.
8. R. E. Rosenweig, Ferrohydrodynamics, pp. 119-122
9. Berkovski, B. M., Bashtovoy, V. G., 1996, Magnetic fluids and applications handbook, Begell House, Inc., New York, pp. 422-471