

전자기력에 의한 자성유체의 2차원 자유표면 형상 제어에 관한 연구

배형섭*, 양택주*, 이육형**, 주동우***, 박명관#

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

Hyung Sub Bae*, Taek Joo Yang*, Yuk Hyung Lee**, Dong Woo Joo*** and Myeong Kwan Park#

ABSTRACT

In this study, the control of the free surface deformation of a magnetic fluid for the change in electromagnetic force is discussed. The free surface of magnetic fluid is formed by the balance of surface force, gravity, pressure difference, magnetic normal pressure and magnetic body force. Magnetic fluid in characteristics of fluid adjusted to the opposite direction of the gravity direction. Thus, the device of a magnetic fluid proposed the complete zero-leakage sealing, oscillator for surface control, boundary layer control, MHD, flow control, flow using magnetic levitation system and surface actuator. This study show the deformation of surface rise due to the intensity of the magnetic field and possibility of two-dimensional control of magnetic fluid through the feedback data of hall sensor.

Key Words : Magnetic Fluid(자성유체), Electromagnetic(전자석), Hall Sensor(홀센서), LabView, Surface Control(표면제어), PID Control(PID 제어)

기호설명

H: 자기장의 세기 (A/m) ρ : 밀도 (Kg/mm³)
 B: 자속 밀도 (T), f: 힘 (N)
 A: 자위(vector) (Wb/m) T_v : 점성 응력 텐서
 M: 자화 (A/m) Ω : 내부회전속도
 λ : 2차 점성계수 P^* : 합성 압력
 P_s : 자왜 압력 P_m : 평균자화 압력
 Φ : 속도 포텐셜 v: 점도
 h: 높이 I: 전류

V: 전압

μ : 1차 점성계수 (Ns/m²)

1. 서론

오늘날 유체를 이용한 시스템은 기계산업의 발달과 기계장치의 고도화로 인하여 항공기, 선박, 로켓, 공작기계, 군수산업 등의 여러 분야에서 응용되어 지고 있다. 특히, 신소재 개발 및 우주산업 개발 기술의 부산물로 전자기장에 반응하는 유체

접수일: 2004년 2월 3일; 게재승인일: 2005년 1월 21일
 * 부산대학교 대학원
 ** 울산과학기술대학 디지털기계학부
 *** 양산대학 자동차학과
 # 교신저자: 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소
 E-mail mkpark1@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2464

2. 이론적 배경

2.1 자성유체

자성유체(Magnetic Fluid or Ferro Fluid)란 콜로이드 사이즈(직경 10nm~20nm)의 마그네타이트(Magnetite), 망간페라이트, 니켈페라이트, 코발트페라이트, 바륨페라이트, 철, 니켈 등과 같은 강자성 미립자의 표면에 올레인산이나 리놀산과 같은 불포화 지방산으로 피복하고 이를 계면활성제를 사용하여 지방족 탄화수소, 방향족 탄화수소, 물 또는 기름 등의 용매중에 안정하게 분산시킨 콜로이드액체를 말한다. 자성유체는 유체 자체가 자성을 지니고 있어 자기장 인가시 강한 자화(Magnetization)를 발생하여 유체 자체의 물리적, 화학적 특성이 변화하게 된다. 이러한 용매 속에 포함된 강자성 입자의 직경은 대략 2nm~10nm, 밀도는 대략 10^{16} 個/cm³ 정도이며, 이러한 특성 때문에 자성 유체의 역학적 특이성은 미립자의 자기적 특이성에 기인한다. 자성 유체에 작용하는 자기적인 힘은 자성 유체의 자기 모멘텀과 자기장 구배와의 곱에 비례하여 커지게 된다. 자기 모멘텀의 단위 체적에 해당되는 세기가 자화의 세기에 따라 좌우되기 때문에 단위 체적당에 해당되는 자기력은 자화의 세기와 자기장의 구배에 따라 비례하게 된다. 또한, 자기력의 방향은 자기장의 구배 방향을 좌우한다.

2.2 지배 방정식

자성유체의 이론적 운동방정식은 자성유체역학(Ferro-hydro-dynamics)을 토대로 얻을 수 있다.¹¹ 자성유체의 구성요소는 매우 미소하며, 단위 체적당 역학적 평형을 이루고 있다고 고려한다. 여기서, 미소한 구성요소는 유동장에 비하면 매우 작은 크기이지만, 자성유체내의 콜로이드 자성입자들이 포함될 만큼은 크다고 가정한다. 따라서 일정한 질량에서 모멘텀(Momentum)의 시간변화율을 단위 체적 dx, dy, dz 로부터 결정할 수 있다.

$$\frac{D}{Dt}(\rho v dx dy dz) = \rho dx dy dz \frac{Dv}{Dt} + \frac{D\rho dx dy dz}{Dt} \quad (1)$$

여기서, 질량 $\rho dx dy dz$ 는 일정하므로, 우

가 개발되면서 새로운 응용장치와 그것에 대한 개발 연구가 활발해 지고 있다. 기능성 유체의 연구는 크게 두 분야로 나누어져 연구되고 있다. 첫 번째는 고성능 가제어성 유체 개발이다. 현재 개발되어 있는 가제어성 유체는 여러 종류가 있으나 이들은 각각의 유체역학적 특성을 정량화 하는데는 많은 어려움이 있다. 두 번째는 인가되는 전자기장에 대하여 빠른 응답성을 가지고 성능이 우수한 새로운 개념의 전자, 전기, 기계시스템에 응용이 되고 있다. 1960년대 미국 NASA의 S.S Papell이 무중력 하에서 로켓 제어 연구에 자석을 이용하면서 시작되었다. 1965년 S.S Papell은 스스로 기계적 습식분쇄법으로 고농도의 마그네타이트(Fe₃O₄) 미립자 콜로이드 자성유체를 제작하였다. Papell은 무중력 환경에서 현상을 지상에서 시뮬레이션 하기 위해 그와 같은 액체를 개발했는데 그 유체는 아폴로 계획 중 우주복이나 회전축의 진공 봉합, 무중력 환경에서 물체의 위치 결정 등에 사용되어졌다.^{1,2} 이후 많은 연구자들에 의해 액츄에이터³, 댐퍼⁴, 경계층 제어^{5,6} 관련연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 유체유동의 표면에 대한 특성과 그것에 대한 제어에 관한 연구가 특히 주목받고 있으며 이러한 표면제어를 통해 실제 시스템에서 액츄에이터 역할을 할 수 있도록 하는 연구가 활발하다.^{7,8} 또 한 전자석과 영구자석을 이용한 유체표면과 거동과 제어, 경계층 제어에 대한 연구는 대단한 성과를 거두고 있다.^{9,10} 그러나 자성유체의 복잡한 미시적 구조와 레올로지적 다양한 특성 때문에 아직은 학문적 체계가 미흡한 실정이다. 따라서 새로운 장치에 의한 자성유체의 특성 파악과 그것을 이용한 응용시스템에 대한 해석이 요구된다. 선행 연구에서는 자성유체의 자기장에 의한 점도 변화 특성이나 단순한 동적 거동에 관한 연구가 주를 이루고 있고 자성유체 제어에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 자성유체의 이론적 배경을 통해 유체역학적 특성을 파악하고, 표면제어를 위한 응용장치를 제작하여 자성유체의 유동을 자체 제작한 전자석으로 컴퓨터 인터페이스를 통해 제어하고, 시뮬레이션 결과와 여러 가지 실험 결과를 제시하여 액츄에이터로서의 자성유체 특성을 파악하고자 한다.

변의 두 번째 항은 소거되고, 뉴턴 법칙에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = f_p + f_v + f_g + f_m \quad (2)$$

그리고 유체역학으로부터 일반화된 열역학적 방정식의 압력구배 f_p , 점성력 f_v , 중력 f_g 는 다음과 같이 표현된다.

$$f_p = \nabla p(\rho, T_v) \quad (3)$$

$$f_v = \nabla \cdot T_v \quad (4)$$

$$f_g = \rho g \quad (5)$$

여기서 T_v 는 점성응력텐서이고 g 는 중력 가속도이다. 따라서 위의 식은 다음과 같이 변환 할 수 있다.

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p - \rho g + f_m + \mu \nabla^2 v \quad (6)$$

그리고 Rosensweig가 제안한 stress tensor of a magnetizable fluid로부터 f_m 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_m = \nabla \cdot T_m \quad (7)$$

따라서 자성유체 운동방정식을 합성압력 p^* 을 도입하여 간단하게 나타내면 다음과 같다.

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p^* + \mu_0 M \nabla H + \eta \nabla^2 v + \rho g \quad (8)$$

이것은 고전 유체역학에서의 나비아 스톱스(Navier-stokes)방정식에서 압력 p 를 합성압력 p^* 로 표현하고 자기력 $\mu_0 M \nabla H$ 를 첨가한 형

태이다. 여기서 비압축성 유체이며 무점성이거나 유체의 내부회전이 0인 경우 식(8)은 다음과 같이 된다.

$$\rho \frac{Dv}{Dt} + \rho v \cdot \nabla v = -\nabla p^* + \mu_0 M \nabla H + \rho g \quad (9)$$

이것은 다시 텐서 함수의 정리에 의하여 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dv}{Dt} - \rho v \times \Omega = & -\nabla(p^* + \rho \frac{v^2}{2} + \rho gh - \mu_0 \int_0^H M dH) \\ & - \int_0^H (\frac{\partial M}{\partial T})_{H,v} (\nabla T)_{H,v} dH \end{aligned} \quad (10)$$

내부회전 유체인 경우 속도전위 Φ 가 존재하며 식(10)은 다음과 같이 재 정리 된다.

$$\nabla(\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + p^* + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh - \mu_0 \overline{MH}) = f(t) \quad (11)$$

식(11)을 자성유체역학 베르누이 방정식(Ferro-Hydro-Dynamic equation)이라하며 여기서 \overline{M} 은 평균 자화이며 다음과 같다.

$$\overline{M} = \frac{1}{H} \int_0^H M dH \quad (12)$$

만약, 정상상태 또는 시불변 유체인 경우 $\frac{\partial \phi}{\partial T} = 0$ 이며 $f(t) = \text{const}$ 이므로 자성유체역학 베르누이 방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$p + p_s + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{const} \quad (13)$$

다음은, 자성유체 계면에서 외부 전원으로 슬레노이드에 전류를 가해주었을 때, 자성유체의 형상 변화에 따른 진폭에 대한 식을 도출해야 한다.

Fig. 1에서 처럼 자성유체는 전자석에 의해 Δh 로 응답한다. 경계면에서 위의 자기장은 H_2 이고, 경계면 아래의 자기장은 H_1 이다. 이러한 자기장은 B의 수직성분에서 경계조건에 의해 관계되며 다음과 같다.

$$\mu_0(H_1 + M) = \mu_0 H_2 \quad (14)$$

식(14)를 베르누이 방정식에 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$p_1^* + \rho g h_1 = p_2^* + \rho g h_2 - \mu_0 \overline{MH}_1 \quad (15)$$

경계조건은 다음과 같다.

$$p_1^* = p_0 \quad (16)$$

$$p_2^* = p_0 - (\mu/2)M^2 \quad (17)$$

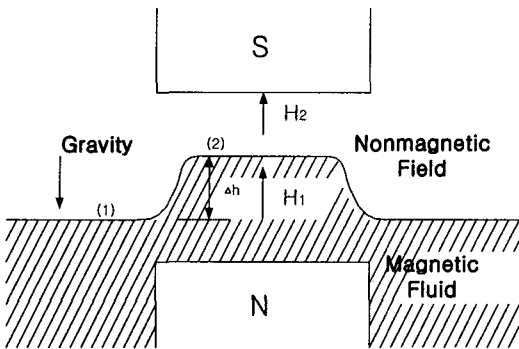


Fig. 1 Uniform magnetic field imposed normal to a free ferrofluid interface

그러므로 경계조건에 따른 Δh 를 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \frac{1}{\rho g} (\mu_0 \overline{MH}_1 + \mu_0 \frac{M^2}{2}) \quad (18)$$

3. 시스템 설계 및 제작

3.1 실험 장치

자성유체의 표면 제어를 위한 실험 장치의 개략도는 Fig. 2와 같고 실제 모습은 Fig. 3에 나타나 있다. 2개의 동일한 솔레노이드(Solenoid)를 자체 제작하여 구성하였으며, 각각의 솔레노이드는 중실축의 연강(SS-41)으로 제작하였으며 자성유체의 사양은 Table 1에 나타내었다. 솔레노이드의 자계 힘은 코일의 감은 수와 전류의 세기에 비례하고 전자석 길이에 반비례한다. 또 한 저항이 증가하게 되면, 시스템에 열이 많이 발생하기 때문에 코일의 감은 횟수나 코일의 직경을 고려해야 한다. 이러한 설계사양의 설정은 자성유체 표면 형상 변화에 매우 중요하게 작용한다. 자계의 세기에 따라 표면의 상승 높이가 결정 된다. 정전류 전원공급 장치(Power Supply, Autopower)는 5A, 5V 이며, 제어입력에 따라 제어가 가능하며 제어로직은 PCL-818L, PCI 1723이며 Data-acquisition System 은 LabView6.1이다.

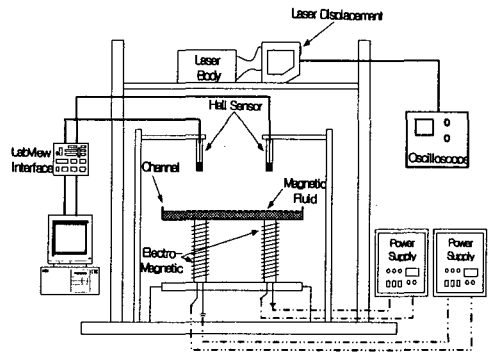


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

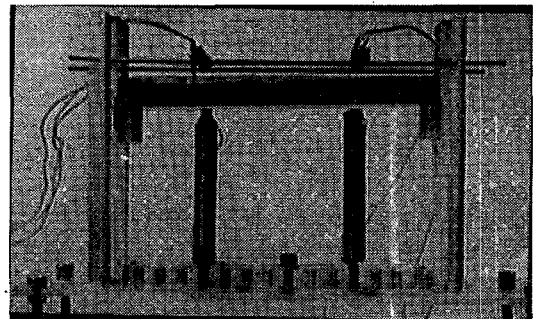


Fig. 3 Experimental device

Table 1 HC-50

항목	HC-50	비고
외관	흑색 액체	
비중	1.388	at 25° C
점도	10	cp at 25° C
표면 장력	28±2	dyne/cm at 25° C
포화 자화	380±30	gauss
비등점	100	° C at 760mmHg
인화점	없음	° C
사용온도 범위	10-80	° C
용매	기름	

3.2 실험 방법

실험에 있어 각각의 신호처리는 LabView에서 처리하였다. 첫 번째 단계로 제어기가 없는 상태 즉, AD, DA 신호처리만 가능한 프로그램을 작성하여 실험하고 이러한 기본적인 데이터가 실험에 부합 되었을 때 다음 단계로 PID 제어기를 설계하여 실험하였다. 또 한 Fig. 2에 나타나듯이 홀센서에서 얻어진 홀전압에 의해 최종적으로 나타내어지는 자성유체의 변위값이 정확한지를 증명하기 위해 홀센서의 측정지점에 레이저 변위계를 설치하여 비교하였다. 레이저 변위계에 의해 측정된 값은 오실로스코프에서 독자적으로 획득하였으며 결과 그래프에 대한 비교는 본 논문의 제 4장에 나타내었다. 제어로적인 LabView 프로그램 상에서 각각의 파형에 따른 즉, Step, Sine, Square 파형에 따른 입력값인 자성유체의 상승 높이를 입력하면 전원 공급장치에 의해 전자석은 자계를 형성하게 되고 전자석의 자계에 의해 채널 속에 담겨있는 자성유체는 입력값에 따른 거동을 하게 된다. 이때 자성유체로부터 나오는 자기장의 세기를 홀센서로 측정하게 되고 자성유체가 상승한 높이를 레이저 변위계에서 측정하였다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

이상적인 자성유체는 미립자가 균일하게 분산되어 있다고 가정되지만 실제 자성유체에서는 입자가 응집하고 클러스터(Cluster)를 형성하게 되며 특히 자기장의 작용을 받게 되면 클러스터들은 자기

장의 방향으로 재배열하게 된다. 자성유체의 유동 특성해석에 관한 연구들의 대부분은 자성유체를 연속체로 가정하여 해석하고 있으며 이러한 결과들은 미시적인 관점에서 실제 자성유체의 거동과 다소 오차를 나타내고 있다. 따라서 정확한 자성유체의 거동을 해석하기 위해서는 입자가 클러스터를 형성하는 메카니즘을 분자 동력학법이나 Monte-Carlo법을 이용한 수치 시뮬레이션으로 규명을 한다. 또 다른 방법으로는 극성유체로 간주하여 자기 모멘트의 회전에 의한 완화 시간과 브라운 운동에 의한 완화시간 등을 고려하는 것이다. 자성유체에 외부 자장이 작용하면 입자의 자기 모멘트는 입자 자신의 회전에 의하여 자기 방향을 배열하기 때문에 유체의 회전 각속도와 입자의 회전 각속도 일치하지 않게 되므로 자장이 입자의 회전에 미치는 효과를 해석하기 위해서는 Shliomis가 제시한 입자의 극성을 고려한 분자동력학 이론이 첨가 되어야한다. 그러나 이것 역시 전산유체적 수치 시뮬레이션으로만 가능하고 이론적인 자성유체 운동방정식을 구하여 전달함수를 구하기란 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 실험을 통하여 획득한 데이터를 이용하여 sin파 입력일 경우 Fig. 4와 같은 형상이 나타날 것이라 예상한다. 일반적으로 동적 시스템의 주파수 응답은 사용하기가 간편한 정현파 신호발생기와 같은 측정장치를 이용하여 정확하고 쉽게 구할 수 있다. 그래서 시스템이 복잡하고 수학적 해석이 어려운 경우에는 주로 실험적으로 얻은 주파수응답을 이용하여 시스템의 동특성을 나타내는 전달함수를 구하고 있다. 본 논문에서는 실험에서 얻어진

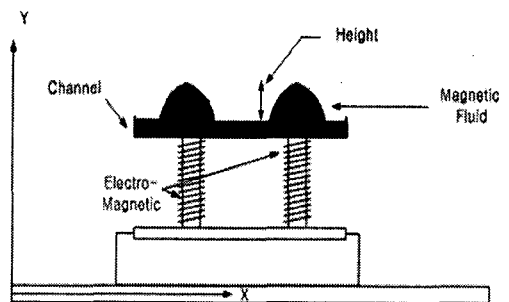


Fig. 4 Schematic of magnetic fluid surface

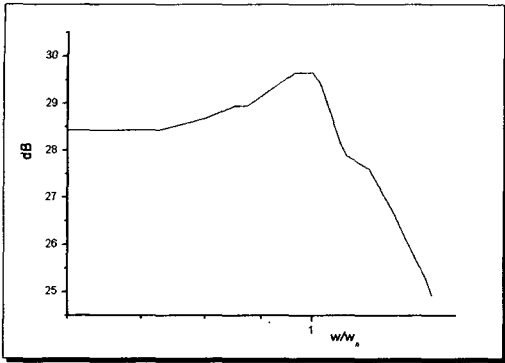


Fig. 5 Characteristic of frequency response

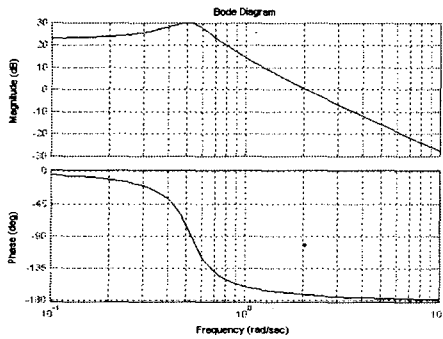


Fig. 6 Bode diagram

데이터를 분석하여 Fig. 5와 같은 입력값에 따른 출력값을 비교하여 Bode 선도를 이용하여 전달함수를 구하였다. Fig. 6은 그에 따른 Bode 선도를 나타내며 이러한 실험적 방법을 통해 $\xi = 0.23$, $\omega_n = 0.533$ 을 구하였으며 전류입력에 따른 홀센서 출력값의 전달함수를 구하였다.

$$G(S) = \frac{35.423}{s^2 + 0.437s + 0.284} \quad (19)$$

본 논문에서는 실험하기 이전에 홀 센서의 신뢰성을 판단하기 위해 홀센서와 레이저 센서를 Fig. 7과 같이 비교하였다. 낮은 범위에서 홀센서가 레이저 센서의 대응으로도 선형적으로 충분한 역할을 하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 전자석1에 sine 입력을 자성유체의 높이만

변화시켜 입력하고 다른 조건은 동일하게 주었을 때의 실험 결과이다. 홀센서에 의한 출력값이 원하는 입력값에 추종해 나타남을 볼 수 있다.

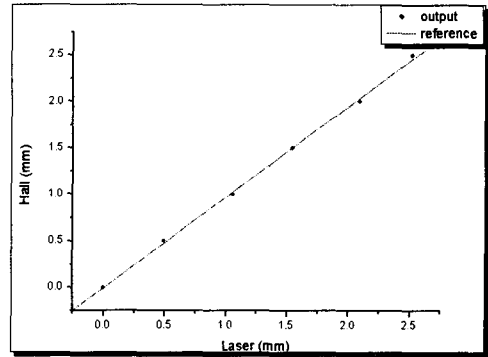


Fig. 7 Comparison of hall and laser sensor

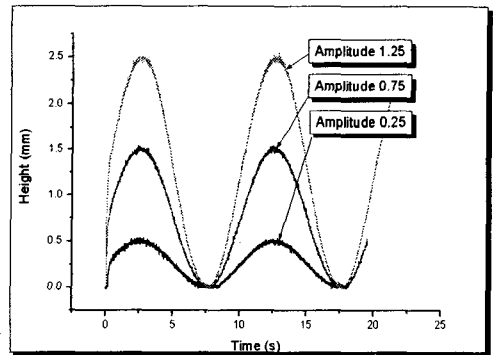


Fig. 8 Surface height for different amplitude of sine input

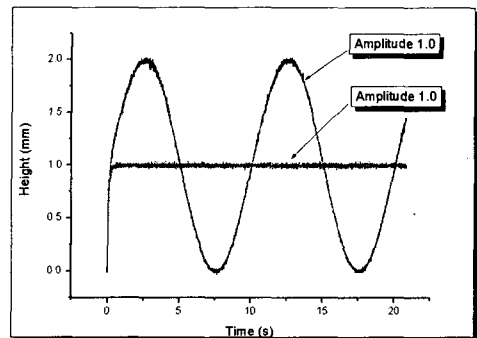


Fig. 9 Surface height for different amplitude

Fig. 9는 전자석0에 sine1.0, 전자석1에 step1.0을 입력하였을 때의 결과이다. 그림에서도 알 수 있듯이 전자석 상호간에 한쪽의 전자석에 의해 다른 한쪽의 전자석이 영향을 받는 부분이 극히 미소하게

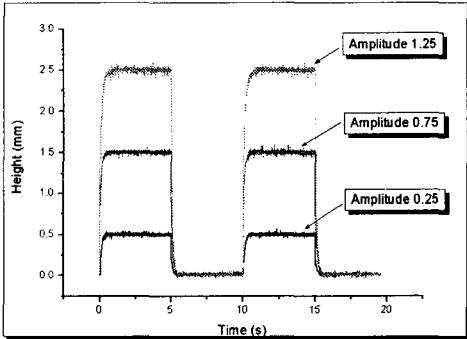


Fig. 10 Surface height for different amplitude of square input

나타났다. 이것은 실험전에 전자석 상호간의 영향을 최소화하고 간섭현상을 없애기 위해 기초실험을 통해 전자석 사이의 간격을 충분히 띄웠기 때문이다. Fig. 10은 square입력에 대한 각각의 자성유체 높이변화를 나타내고 있다. 각각의 진폭변화 0.25, 0.75, 1.25를 입력하였을 때 출력값을 나타내고 있으며 sine이나 step입력과 마찬가지로 자성유체 높이변화가 입력을 추종하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11 ~ Fig. 13은 전자석 각각에 서로 다른 입력을 주었을 때와 크기가 다른 step 입력을 주었을 때의 결과이다. 모두가 입력값을 추종하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로 미루어 보아 여러 가지 응용분야에 적용할 수 있을 것이다.

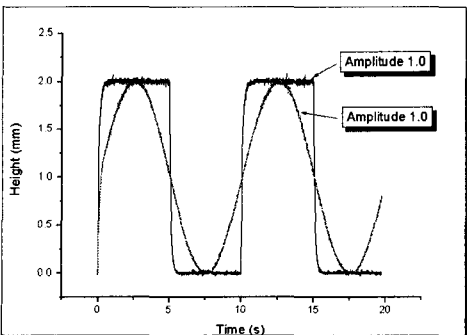


Fig. 11 Surface height of different signal

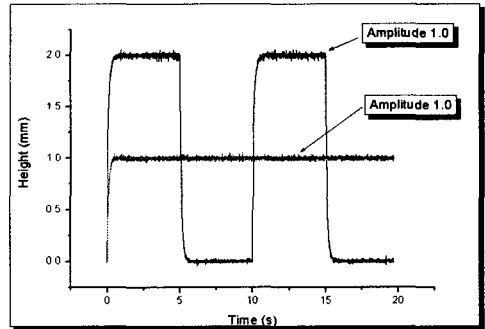


Fig. 12 Surface height of different signal

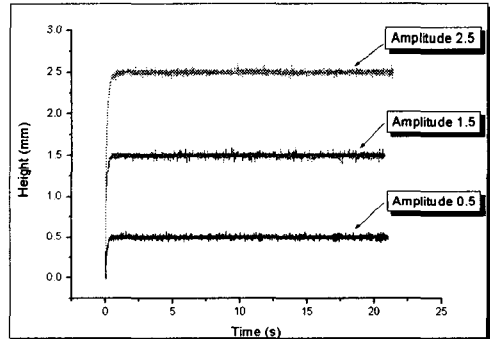


Fig. 13 Surface height of step signal

5. 결론

본 연구는 자성유체의 표면형상제어로부터 응용장치에 응용하기 위해 여러 가지 입력에 대한 출력값의 변화를 알아보기 위한 실험이다. 유체의 특성과 고체의 특성을 동시에 가지고 있다는 장점으로 응용장치는 여러 분야에서 도입할 수 있다. 이러한 관점에서 다음과 같은 실험 결과, 시뮬레이션 결과, 및 결론을 도출하였다.

- (1) 외부인가 전원으로 자성유체의 표면 형상을 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 일치함을 알 수 있다. 또한, 외부 전원의 크기가 증가함에 따라 자장의 세기가 증가하면 자성유체 용기에서 발생하는 자성유체 표면의 높이분포가 다르게 나타남을 알 수 있다.
- (2) 외부인가 전원만으로 유체이지만 중력과 반대 방향으로 크기를 조절할 수 있어 완전 누수막

음 장치 및 표면 형상을 변화시킬 수 있다.

- (3) 본 논문에서는 산업현장에서 가장 많이 사용하고 있는 PID제어를 이용하여 자성유체 표면 높이 제어를 수행하여 기존의 다른 연구에서 시도하지 않았던 자성유체 자체에 대한 PID제어가 가능함을 보여 주었으며 PID제어를 통한 자성유체 표면의 높이 제어가 원하는 값으로 잘 추종하고 있음을 보여준다.

본 논문을 통해 자성유체의 표면 형상을 슬레노이드의 구성과 외부 전원만으로 구동 가능하다는걸 알 수 있으며 전자석의 수를 증가하면 3차원 그래픽에서처럼 많은 격자를 나누어 각각의 격자에서 형상을 자유롭게 제어 할 수 있을 것이다. 나아가 자성유체 본질의 성질을 이용한 운동방정식을 도출하면 보다 정밀한 제어가 가능 할 것이다.

후 기

이 과제는 2002년도 학술진흥재단 과제인 지방대 육성 지원사업(과제번호 : D00031)에 의해서 연구가 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kordonsky, W. I., Demchuk, S. A., "Additional Magnetic Dispersed Phase Improves the MR-Fluid Properties," Academy of Sciences, Republic of Belarus and Byelocorp Scientific Inc. USA, pp. 613-619.
2. Sinha, P. K., Electromagnetic Suspension Dynamics & Control, Peter Peregrinus Ltd on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1987.
3. Gutierrez, Hector Martin and Ro, Paul I., "Parametric Modelign and Control of a Long - Range Actuator Using Magnetic Servo Levitation," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 5, pp. 3689-3695, 1998.
4. Pan, Gongyu, Hiroshi, Matsuhisa and Yoshihisa, Honda, "Controllable Vibration Damper Using Magnetorheological Fluid," 日本機械學會 論文集 C編, 67卷, 660号, pp. 2506-2512, 2001.
5. Taylor, P. M., Hosseini-Sianaki, A., Varley, C., "Surface Feedback for Virtual Environment Systems Using Electrorheological Fluids," International Journal of Modern Physics B, Vol. 10, No. 23&24, pp. 3011-3018, 1996.
6. Nakano, M., Yamamoto, H., Jolly, M. R., "Dynamic Viscoelasticity of a Magneto-rheological Fluid in Oscillatory Slit Flow," Proc. of the 6th International Conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Their Applications, pp. 551- 560, 1997.
7. Boardman, A. D., Nikitov, S. A. and Wang, Q., "Theory of Bistable Magnetostatic Surface Waves," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, No. 1, pp. 1-13, 1994.
8. 大島修造, 佐伯英司, 比企野廣一, 壓司 寛, 朴明寛, 山根隆一郎, 非正常電磁力による 浴湯加振," 第8回 シソボヅウム 講演論文集, No. 96-252. 1996.
9. Sato, S., Sakaguchi, S., Futamata, K. and Katou, K., "Coil Optimization for Homogeneous Magnetic Field with Small Leakage Field," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, No. 4, pp. 649-653, 2000.
10. Eiji, Okayama, Vlatko, Cingoski, So, Noguchi, Kazufumi, Kaneda and Hideo, Yamashita, "Interactive Visualization System for Education and Design in Elcctromagnetics," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, No. 4, pp. 995-999, 2000.
11. Rosensweig, R. E., Ferrohydrodynamics, Cambridge University Press, 1985.
12. Wolff, C., "Closed Loop Controlled ER-Actuator," International Journal of Modern Physics B, Vol. 10, Nos. 23&24, 2867-2876, 1996.
13. Kamiyama, Shinichi, "Application of Functional Fluids in a Magnetic Field," Journal of JSME, Vol. 96, No. 899, pp. 896-899, 1993.
14. Boardman, A. D., Physics Programs Magnetism, John Wiley & Sons, 1980.
15. Ali, Charara Jerome De Miras and Bernard, Caron, "Nonlinear Control of a Magnetic Levitation System Without Premagnetization," IEEE Transactions on Control Systems

- Technology, Vol. 4, No. 5, pp. 513-523, 1996.
16. Oshima, Shuzo, Kado-Oka, Hideharu and Yamane, Ryuichiro, "Vertical Wxcitation of Liquid Metals by Means of an Unsteady Electromagnetic Force," 日本機械學會 論文集 B編, 57卷, 541号, pp. 3091-3098, 1991.
 17. Masashi, Okubo and Tomio, Watanabe, "Gazing Line-Motion Linkage System for 3D Shape Evaluation in Virtual Space," 日本機械學會 論文集 C編, 67卷, 660号, pp. 2624-2630, 2001.