

자성유체의 표면제어에 관한 연구

신진오* · 이은준** · 박명관***

A Study on the Surface Control of a Magnetic Fluid

J. O. Shin, E. J. Rhee, M. K. Park

Key Words: Magnetic Fluid (자성유체), Deformation Control (불규칙형상제어), Electromagnetic Force (전자기력), Surface Control (표면제어)

Abstract

In this study, the deformation of the free surface motion of a magnetic fluid for the change in electromagnetic force is discussed. 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 complete zero-leakage Sealing and the surface actuator. The device of surface deformation as well comparison between numerical simulation and experiments as will be presented.

기호설명

B	:	자기 유도 벡터
I	:	전기 전류
c	:	폐 칸투어
J	:	전류 밀도
M	:	쌍극자 모멘트
H	:	자계
Φ	:	스칼라 자기 포텐셜
ρ	:	밀도
p	:	압력
U	:	속도
μ_0	:	투자율
v	:	동점성 계수
g	:	중력 가속도
θ	:	입자 농도
σ	:	표면 장력

1. 서론

새로운 소재의 개발과 해양 및 우주개발 기술의 점진적인 발전으로 기능성유체에 관한 연구가 매우 활발히 이루어지고 있다. 또한 시각적인 효과를 더하기 위해서나 장치제작전의 시뮬레이터에서 2차원개념에서 3차원개념으로 많은 부분에서 개발·연구되고 있다. 특히 자성유체는 외부에서 인가되는 전자기장의 세기에 따라 표면의 형상이 변화하는 독특한 특징으로 인해 그 연구가 진행되었다.⁽¹⁾ 이러한 특징으로 인해 경계층 제어, 에너지 변환장치, MHD 등에 응용할 수 있다.⁽²⁾ 특히, 유체이지만 중력의 방향과는 반대로 크기를 조절할 수 있는 특성을 이용해 완전 누수 막음 장치(Zero-leakage Sealing)의 활용이 가능하고, 유체의 특성과 고체의 특성을 동시에 가지고 있어 표면 액츄에이터를 활용할 수도 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾

이에 대해 이론적 방법으로 원형 코일에 흐르는 전류에 의해 유기되는 외부인가 비 균일 전기

* 부산대학교 지능기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계기술연구소

*** 부산대학교 기계공학과

장에 대해 접근하였으며, 외부 전자기장에 대해 정지 상태에서부터 변화하는 자성유체의 자유표면의 변화를 수치 계산에 대한 결과가 보고된바 있다.⁽⁵⁾ 실험적 방법으로 Cowlev, Rosensweig는 유체의 표면물결의 진폭의 변화와 자기장의 세기는 비례한다고 밝힌바 있으며, 유체표면내의 형상변화로 인한 디스플레이에 관한 연구도 수행되고 있다.⁽⁶⁾ 유체로부터 원하는 형상을 만들어 내고 다시 원래대로 복원시키는 자체가 매우 흥미로운 일이며, 새로운 개념의 응용디스플레이장치로의 활용이 가능하다.

본 연구는 자성유체의 표면 형상을 컴퓨터인터페이스를 통해 제어함으로써 표면디스플레이를 사용자가 원하는 형태로 나타나게 하고자 한다. 이러한 연구를 통해 표면 액츄에이터의 활용, 완전 누수막음 장치(Zero-leakage Sealing)의 제어를 용이하게 할 수 있으며 유체로서의 3차원적인 형상에 대한 디스플레이가 가능하게 된다. 그러므로, 본 연구는 자성유체의 표면을 전자석 제어만을 통한 시뮬레이션과 실험결과를 제시하고자 한다.

2. 자성유체의 일반적 특징

일반적으로 자성유체는 Fig. 1과 같이 코발트(Cobalt), 니켈(Nickel), 철(Iron) 과 같은 강자성 미립자(強者性 微粒子)를 물, 석유와 같은 용매에 다량으로 분산시킨 일종의 콜로이드 용액으로써 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 직경과 밀도는 대략 $\sim 10\text{nm}$, $10^{16}\text{개}/\text{cm}^3$ 정도이며, 이러한 특성 때문에 자성 유체의 역학적 특이성은 미립자의 자기적 특이성에 기인한다고 말할 수 있다. 콜로이드 입자와 용매와의 혼합물로 되어 있어도 콜로이드 입자의 크기는 용매분자의 100배 정도이므로 용액 전체로는 어느 정도 안정한 혼합용액으로 존재하게 된다. 그런데 강자성 미립자가 작아지면 각 입자는 단자구 구조를 갖게되므로 이러한 미립자를 용액 중에 단순하게 분산시키면 자기적 인력으로 인하여 응집 침전하여 버린다.

그러나 강자성 미립자의 표면을 계면 활성제로 피복하면 강자성 미립자는 어느 정도 거리까지는 접근하지 않는 안정한 콜로이드가 된다. 강자성 미립자 중에서 가장 용이하게 얻을 수가 있으며 자기적 성질이 우수한 자철광(magnetite)이 자성유체의 대부분을 차지하고 있다. 또한 계면활성제의 종류에 따라서 분산기구와 분산성이 다르며, 용매의 종류에 따라서도 자성유체의 물리적 특성이 다르다.

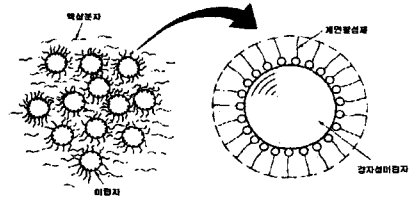


Fig. 1 Structure of Magnetic Fluid

3. 이론적 배경

Rosensweig가 제안한 자기 체적력을 이용한 자성유체의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -\nabla p + \nu \nabla^2 U + g + \mu_0 M \nabla H \quad (1)$$

여기서, 자화는 다음과 같다.

$$M = \theta M_d \left(\coth a - \frac{1}{a} \right), \quad a = \frac{\mu_0 m H}{kT} \quad (2)$$

또한, 자기유도벡터는 암페어의 주회적분의 법칙을 만족하는 전류에 의해 생성된다.

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad (3)$$

Stokes의 적분이론을 이용하면 식(1)은 다음과 같이 된다.

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

또한, 작은 전류루프에서 전기 쌍극자 가까이 의 전기장으로 생성되는 자기유도벡터의 기본 성질은 다음과 같다.

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (5)$$

따라서, 자기 쌍극자모멘트를 알수 있으며 자기물질로 형성시킨 자화는 자기유도벡터에 영향을 받으므로 식(4)를 다시 쓸 수 있고, 자기유도벡터를 자계에 대해 정의할 수 있다.

$$\text{curl}B = \mu_0 J + \mu_0 \text{curl} M \quad (6)$$

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (7)$$

식(6)으로부터 자계는 다음을 만족한다.

$$\text{curl} H = J \quad (8)$$

여기서 영구자석(Permanent magnet)에 전류가 흐르지 않는다면 식(8)은 다음과 같이 된다.

$$\text{curl} H = 0 \quad (9)$$

그러므로 스칼라 자기 포텐셜(Scalar Magnetic Potential)로 정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = -\nabla\Phi \quad (10)$$

결국 식(5),(7)에 의한 방정식은 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$\text{div}H = -\text{div}M \quad (11)$$

$$\nabla^2\Phi = \text{div}M \quad (12)$$

한편, 자성유체의 자유표면이 자기장이 형성되지 않을 때는 유체의 형상과 동일시되지만, 자기장이 작용하면 자기용력이 부가되어 표면의 압력차, 표면장력 및 자기압력의 균형으로 이루어지면, 다음 식에 의해 지배된다.

$$p_1 - p_2 - \sigma\zeta + \frac{\mu_0 M_n^2}{2} = 0 \quad (13)$$

여기서, p_1, p_2 는 유체표면의 자성유체와 비자성체의 압력, ζ 는 계면의 곡률 반경을 나타내며, M_n 은 표면에서의 자화의 법선 성분으로 $H_{2n} - H_{1n}$ 으로 결정된다.

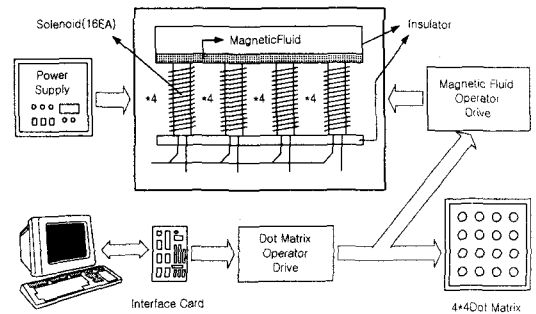
4. 실험장치

본 연구를 위한 실험장치의 개략도가 Fig. 2(a)에 도시되어있다. 16개의 전자석을 제작하여 Fig. 2(b)와 같이 구성하였으며 구동회로는 Fig. 2(c)

과 같이 컴퓨터 인터페이스카드를 이용하였다.

제작된 16개의 전자석은 4×4형태로 구성하고, 각각의 전자석은 자기 따로 제어 가능하도록 구성하였다. 기존에 사용되어지는 DOT Matrix 구동부를 사용하여 각각의 전자석에 전원을 부여함으로써 디스플레이를 형성시킨다. 각 열과 행의 4개의 전자석에 전원을 가하고 좌, 우 또는 상, 하로 쉬프트 시킴으로서 표면의 형상변화를 확인하고 시뮬레이션 결과와 비교하게 된다.

전자석의 코일이 감기는 부분의 길이는 45mm이고 지름은 4mm이며, 상단부에 10mm의 정사각형의 캡을 씌웠다. 이는 자성유체의 표면 형상과 관련이 있다. 전자석 하나에 감겨있는 코일수는 160회이며, 코일의 단면적은 0.385mm²이다. 전자석의 자계 힘은 코일의 감은 수와 전류의 세기에 비례하고 전자석길이에 반비례한다. 이는 유체의 형상변화에 매우 중요하게 작용한다. 즉, 자계의 세기에 따라 표면의 솟아오르는 진폭과 솟아오르는 형태, 솟아오른 상단면의 모양이 바뀌게 된다. 전원의 전압은 정격전압 50V이고 전류는 최대 5A까지 변화시킬 수 있다.



(a) Schematic of Experimental Setup



(b) Solenoid



(c) Operator Drive and Interface Card

Fig. 2 Apparatus

5. 실험 결과 및 고찰

자성유체의 표면 형상에 대한 시뮬레이션결과는 다음과 같다.

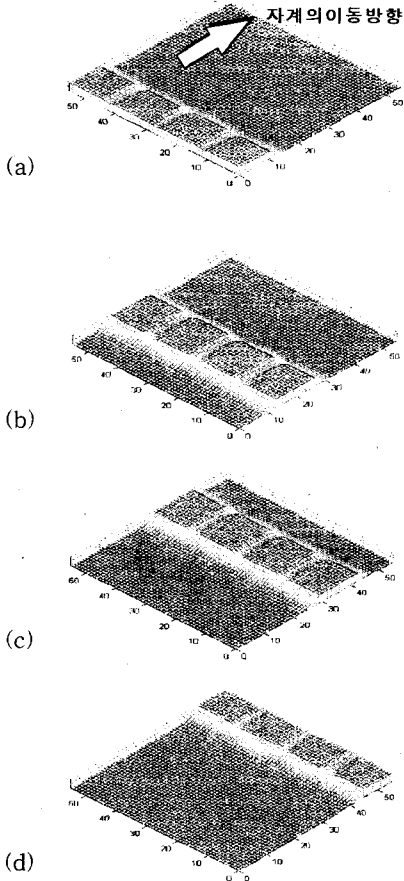


Fig. 3 Simulation Results : 5[A]

자계의 이동방향에 따라 유동의 형태를 확인할 수 있으며, 이로써 좌, 우 또는 상, 하로 쉬프트시켰을 때 움직임도 같은 방법으로 확인할 수 있다. 실험을 통해, 외부에서 인가되는 전원이 없을 시 Fig. 4와 같이 표면의 형상은 유체와 같다. 하지만 1행에 있는 전자석에 전원을 가함으로써 유체의 형태가 변화하는 것을 알 수 있다.(Fig. 5 (a)) 그리고 1 sec간격으로 전원의 변화를 우 쉬프트시켰을 때 유체의 표면이 변화하는 것을 확인할 수 있다.(Fig. 5 (b)(c)(d))

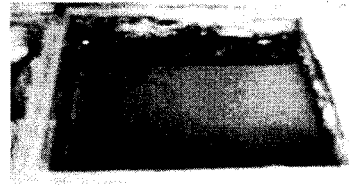


Fig. 4 Magnetic Fluid in a Vessel

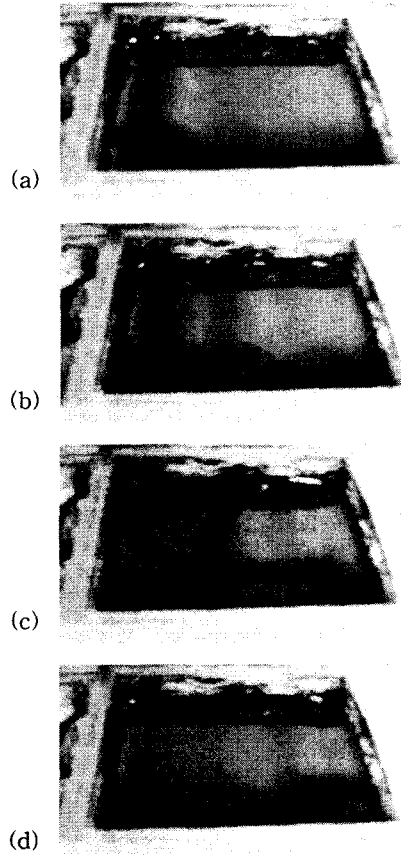


Fig. 5 Experiment Results : 5[V]

이와 같은 결과는 샘플링 시간의 조절로 유체 표면 액추에이터로 활용할 수 있다.

여기서 유체표면에 특이한 현상은 형상변화가 일어나는 유체의 중간이 움푹 패인 것을 발견할 수 있는데, 이는 전자기력선의 형태에 따른 현상으로 전자기력선은 양전하(+)에서 시작하며 음전하(-)에서 끝나는 성질이 있기 때문이다.

6. 결 론

본 논문은 자성유체를 이용한 표면제어에 관한 연구로 완전 누수막음 장치, 표면 액츄에이터, 3차원 형상변화에 대해 실험과 시뮬레이션을 통해 제시하였다.

- (1) 외부에서 인가되는 전원만으로 유체이지만 중력과 반대방향으로 크기를 조절할 수 있어 완전 누수막음 장치가 가능하다.
- (2) 샘플링 시간을 조정함으로써 표면 액츄에이터의 활용이 가능하다.
- (3) 외부 인가전원에 따라 유체표면의 형상을 조절할 수 있으므로 원하는 3차원 형상을 생성시킬 수 있다.

향후 과제로서, 전자석의 수를 증가시키고 각 전자석에 대해 외부 전원을 다양하게 공급함으로써 유체표면의 형상을 사용자가 원하는 형상으로 조절시킬 수 있는 연구가 필요하다.

참고 문헌

- (1) Kyoichi Isomura, Shuzo Oshima, Ryuichiro Yamane, 1996, "Numerical Simulation of Oscillation of Single Spike of Magnetic Fluid under Vertical Alternating Magnetic Field," 日本機械學會論文集 B, 62卷, 596号, pp. 1355-1361.
- (2) 大島修造, 佐伯英司, 比企野廣一, 壓司 寬, 朴明寬, 山根隆一郎, 1996, "非正常電磁力による溶湯加振," 第8回 シソボヅウム 講演論文集, No. 96-252.
- (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) Jianqiang Mai, Kouji Yamaguchi, Shuzo Oshima, Ryuichiro Yamane, 1999, " The Surface Response of a Strong Magnetic

Fluid to an Alternating Magnetic Field", Proceeding of the ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, pp. 1-6.

- (5) S. W. Nam, Takashi Watanabe, 1996 "Numerical Analysis on the Deformation of Free Surface of Magnetic Field", 日本機械學會論文集 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.
- (7) A. D. Boardman, 1980, Physics Programs, John Wiley & Sons.