

수평진동이 있는 용기내 자성유체 액면 동요 현상에 관한 연구

김대완 · 박정우 · 서이수*

동아대학교 기계공학과, 부산시 사하구 하단동840, 604-714

(2012년 9월 20일 받음, 2012년 10월 24일 최종수정본 받음, 2012년 10월 24일 게재확정)

본 논문에서는 수평진동이 있는 용기내 자유표면을 갖는 자성유체에 용기하부로부터 수직자장을 인가시킨 경우 유동을 실험하였다. 실험은 직사각형 및 원통형 용기에 대해 자성유체에 인가된 자기력이 공진주파수, 액면변위에 미치는 영향을 조사하였다. 인가자장의 증가는 최대 공진점 및 액면변위에 영향을 미치고 그 결과 표면파의 진폭과 슬로싱 유동의 변동주기를 변화시킨다.

주제어 : 자성유체, 자장, 수평가진, 슬로싱, 자유표면, 액면변위

I. 서 론

자석에 반응을 나타내지 않는 유체에 자기를 띠게 하기 위해서는 자성을 가진 고체 미립자의 도움을 받아야만 한다. 자성유체라는 것은 이와 같이 고체의 상태를 가진 강자성의 성질과 유체로서의 유동하는 성질을 합한 것처럼 강자성의 미립자를 액체 속에 분산시켜 외견상의 유체가 자성을 띤 것처럼 인공적으로 만들어진 일종의 고액혼상유체(콜로이드용액)이다[1, 2].

자성유체의 연구는 체법, 물성 및 여러 가지 응용측면의 개발에 있어서 착실한 진전을 보여주고 있다. 그러나 아직 그 학문 체계로서는 미완성의 부분이 많고 또 새로운 응용측면의 개발에 있어서도 충분한 검토가 되고 있다고는 할 수 없다. 그 의미에서도 금후 더 한층 진전이 전망되는 연구 분야라고 할 수 있다[3-5].

Seo 등은 용기내에 자유표면을 갖는 액체가 외부로부터 진동을 받을 경우 요동하게 되어 자유표면에 파가 발생한다고 보고했다. 이 때 수심과 자기력이 공진주파수, 액면변위 및 변동압력에 미치는 영향을 이론적 해석을 통하여 규명하였다[6].

산업적 측면에서 유조선내 탱크 등과 같이 용기 내에 자유표면을 갖는 액체가 외부로부터 수평진동을 받을 경우 요동하게 되어 자유표면에 액면 동요 현상이 일어난다. 이러한 진동이 주기적으로 발생할 경우 액체의 진동과 기계나 설비의 공진주파수가 일치할 경우 심각한 결함을 발생시킬 수 있다 [7, 8].

따라서 본 논문에서는 이러한 현상의 기초연구로서 자성유체에 자기력이 공진주파수, 액면변위에 미치는 영향을 실험을 통하여 규명하고자 한다. 실험모델은 직방형 및 원통형 용기에 자성유체를 채우고 하부에서 비균일 자장을 인가시킨 경

우, 유체 자유표면의 거동을 실험하였다.

II. 본 론

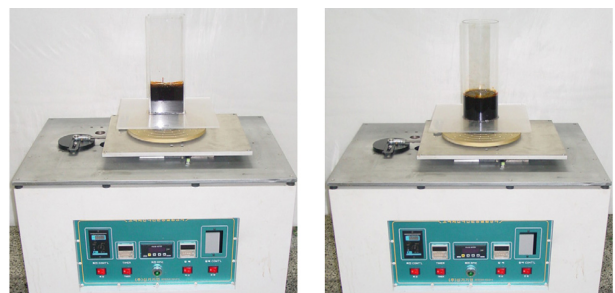
1. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 자성유체는 Ferricolloid W-40이고, Table I은 실험유체의 물성치를 나타낸 것이다. 본 대상유체는 물 base의 자성유체로서 중량농도가 40%이고, 점도가 $1.06 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 이다.

Fig. 1은 실험장치의 사진이다. 시험용기는 직사각형 및 원통형 용기 두 종류를 사용하였다. 광학적 관찰을 위하여 두

Table I. Properties of magnetic fluid. (20 °C 기준)

내부입자의 유효반경	10 [nm]
자성유체의 밀도	1.37×10^3 [kg/m ³]
내부입자의 밀도	5.16×10^3 [kg/m ³]
분산입자의 체적농도	8.68×10^{-2}
단위체적당 내부입자의 수	1.25×10^{23} [개/m ³]
단위체적당 평균관성모멘트	1.1×10^{-14}
분산입자의 와점성계수	2.18×10^{-3} [Pa · s]
자성유체의 점성계수	1.06×10^{-2} [Pa · s]
자성입자의 포화자화	0.36 [Wb/m ²]



(a) Rectangular tank

(b) Cylindrical tank

Fig. 1. (Color online) Photographs of experimental apparatus.

*Tel: (051) 200-7647, E-mail: lsseo@dau.ac.kr

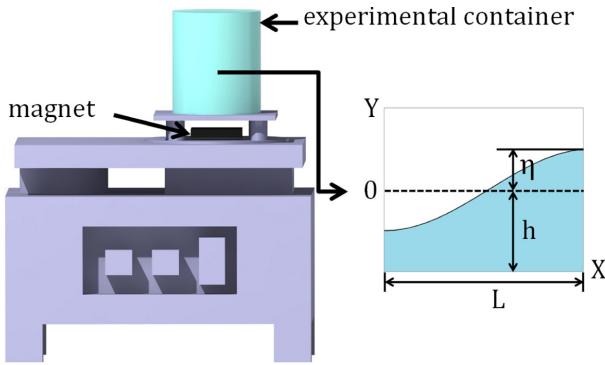


Fig. 2. (Color online) Schematic diagram of experimental apparatus.

께 5 mm의 아크릴로 제작하였고, 직방형 용기는 25 mm × 100 mm × 300 mm 또한 원통형 용기는 직경 100 mm 높이 300 mm로 제작하였다. 단, 직사각형 용기의 실험은 폭이 긴 쪽을 가진(진동)방향으로 하였다. 가진(加振)장치는 수평진동을 위해 제작하였다. 본 장치는 무단변속모터를 사용하여 회전운동을 크랭크식 가진기로부터 수평운동으로 바꾸기 때문에 가진 진동수를 모터에 연결된 컨트롤러로부터 연속제어가 가능하다. 본 실험에서는 가진을 5 mm, 10 mm 및 15 mm의 가진 진폭을 주었다.

Fig. 2는 본 실험 장치의 개략도이다. 실험에 사용된 자석은 80 mm × 80 mm × 10 mm인 페라이트 자석을 사용하였고, 자장의 세기를 변화시키기 위하여 1개, 2개, 4개를 겹쳐 용기 밑에 설치했다.

자성유체는 연직 상방향 인가자장(印加磁場)에 의해 표면에 스파이크 모양의 돌기가 발생한다. 이 경우는 밀면적에 비하여 수심높이가 매우 낮은 경우로, 위치에너지에 비해서 자기 에너지가 매우 크기 때문에 발생된다. 본 실험에 이용된 자장은 자장의 세기가 자유표면의 불안정성을 초래하지 않는 범위에서 실험을 실시하였다.

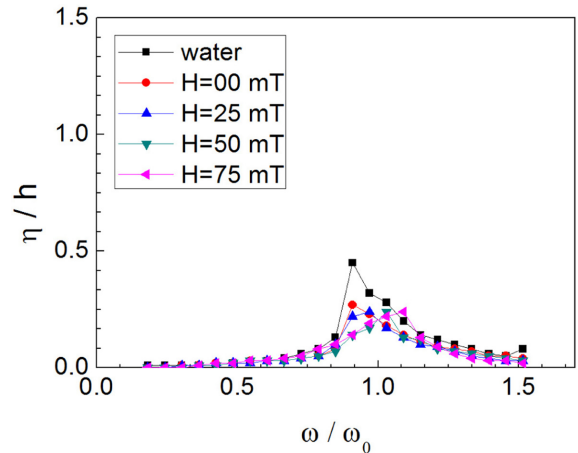
실험에 사용한 자석의 자장분포는 GAUSS METER기 (F.W.Bell社, Model 4048)를 사용하여 측정하였다.

액면변위의 측정은 정지상태(h)와 가진시킨 후 h로부터 위쪽에 도달되는 액면변위(η)를 측정했다.

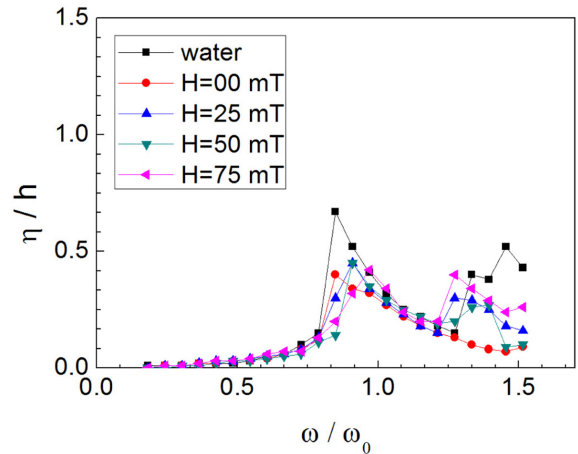
본 실험은 직사각형과 원통형용기의 초기 액면수심(h)을 100 mm로 하여 각각 h/L=1과 h/D=1로 고정하였다. 두 시험용기에 대해서 각 진폭마다 하부의 수직자장을 변화시킴에 따라 진행하였다. 따라서 실험은 총 6 case로 진행되었다. 각 실험의 액면변위는 정상상태 후 측정하였고, 그 측정치는 약 10회 실험 후 평균하였다.

2. 결과 및 고찰

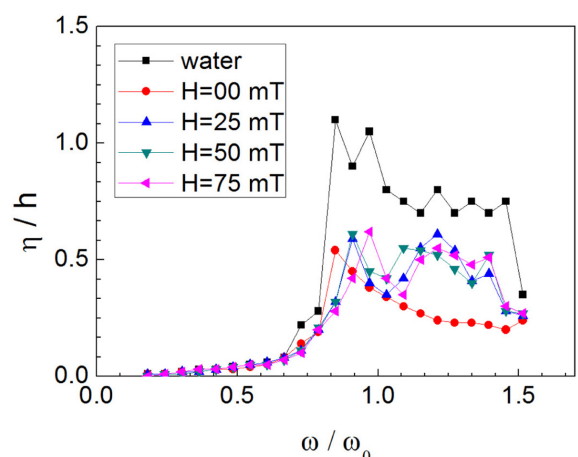
파동해석은 대개 2가지로 나누어 생각할 수 있다. 하나는



(a) a=5 mm



(b) a=10 mm



(c) a=15 mm

Fig. 3. (Color online) Frequency response of magnetic fluid with magnetic intensity and water at rectangular container.

액체 깊이에 비하여 파장(波長)이 커서, 액체 전체가 파동에 관여되는 것인데, 이를 장파(長波)라고 말한다. 다른 하나는 액체 깊이에 비해 파장이 작은 경우로서 이를 표면파라 한

다. 여기서는 자성유체의 유체 슬로싱(sloshing) 현상을 표면파로 간주해서 취급한다. 본 실험에서는 서[6] 등의 이론 연구 결과인 이론공진주파수를 대표치로 적용하였고 아래와 같다:

$$\omega_0^2 = g^+ k \tanh kh$$

여기서 g^+ 는 인가자장을 고려한 중력가속도, k 는 변수분리 상수이다.

본 실험에서는 윗식에서 구한 이론공진주파수와 가진주파수의 비로서 무차원 주파수를 사용하였다. 또한, 액면변위는 h 와 η 의 비를 이용한 무차원수를 사용한다.

Fig. 3은 직사각형 용기에 대한 물과 자성유체의 주파수 응답을 나타낸 결과이다. 각 그림에서 가진주파수가 증가함에 따라 제1의 공진점까지 액면변위는 상승하고, 그 후 액면변위는 하강하게 되고, 다시 제2의 공진점이 나타나며, 액면변위는 전반적으로 떨어진다. 이는 전형적인 슬로싱 현상의 beating을 나타낸 것이라 사료된다[9, 10]. 단, Fig. 3(a)의 경우는 제2의 공진점이 나타나지 않고, 이는 가진 진폭이 작기 때문이라 생각된다.

Fig. 3(a)부터 Fig. 3(c)에서 물의 경우와 자성유체의 경우를 비교해 보면 자성유체의 액면변위는 물보다 다소 낮고, 공진점이 고진동수 쪽으로 이동된 곳에 나타난다. 이 차이는 Table I에 나타낸 바와 같이 물과 자성유체의 비중과 점성이 다르기 때문이라고 생각된다.

Fig. 3(a)의 공진주파수를 볼 때 $H=0$ mT일 때 0.91, $H=25$ mT일 때 0.97, $H=50$ mT일 때 1.03, $H=75$ mT일 때 1.09이다. 여기서 공진주파수는 인가자장의 세기가 강할수록 고진동수 쪽으로 이동된 곳에서 나타남을 볼 수 있다. 이는 자성유체의 고유특성인 자장에 대한 밀도변화에 의한 것이라

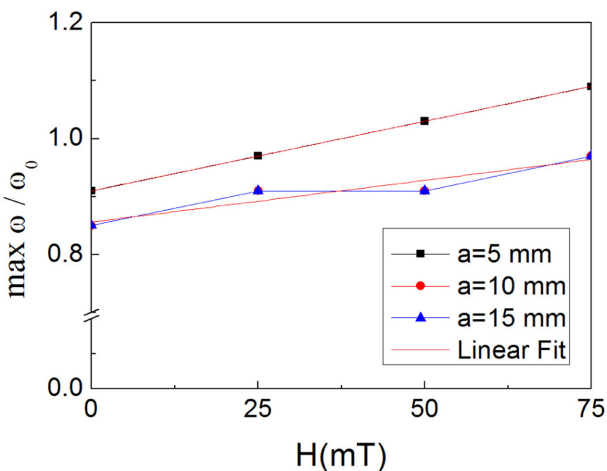


Fig. 4. (Color online) Maximum frequency according to variety magnetic intensity at rectangular container.

생각된다. 즉, 인가자장에 의해 하부 밀도가 증가하게 되고 이로 인해 가진에 의한 자성유체의 유동성이 감소하고, 자성 유체에 인가하는 자장의 세기가 커질수록 그 영향은 더 커지기 때문이다. 또한, 가진 진폭이 $a=10$ mm(Fig. 3(b)) 및 $a=15$ mm(Fig. 3(c))인 경우도 같은 성향을 볼 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3에서 나타나는 최대 공진점을 자장의 세기에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 인가자장의 세기가 커질수록 무차원 최대 주파수는 증가하고 그 변화는 선형인 것을 볼 수 있다. 단, $a=5$ mm인 경우는 선형적인 증가를 보이지만 $a=10$ mm와 $a=15$ mm의 경우는 완전한 선형적인 증가를 보이지는 않는다. 이는 진폭이 커짐에 따라 진행과의 공진이 다소 불안정하기 때문이라 생각된다. 또한 $a=10$ mm와 $a=15$ mm의 data가 거의 일치한다. 따라서 이에 대한 향후 엄밀한 실험이 필요하다.

Fig. 3(a)에서 Fig. 3(c)에서 자장의 세기의 변화에 대한 η/h 의 변화는 $a=5$ mm일 때 약 0.24에서 약 0.27, $a=10$ mm일 때 약 0.4에서 약 0.45, $a=15$ mm일 때 약 0.54에서 약 0.62이다. 즉, 자장의 세기의 변화가 액면변위에 미치는 영향은 미소하다.

Fig. 3(a)에서 액면변위는 각 인가자장의 세기에 대해 최대 공진점 이후 완만하게 하강하는 것을 볼 수 있고, 이는 가진 진폭이 작기 때문이라 사료된다. Fig. 3(b)에서 최대공진점 이후 액면변위를 보면 $H=0$ mT일 때 0.4에서 0.07의 최소치가 되고, $H=25$ mT일 때 0.45에서 0.15이 되고, $H=50$ mT일 때 0.45에서 0.19가 되고, $H=75$ mT일 때 0.42에서 0.2가 된다. 또한, Fig. 3(c)에서도 같은 성향을 볼 수 있다. 이는 인가자장이 자성유체의 유동성에 영향을 미치기 때문에 최대 공진점 후 액면변화를 줄이는 것이라 생각된다.

Fig. 5는 원통형 용기에 대한 물과 자성유체의 주파수 응답을 나타낸 결과이다. 그림에서 전반적인 액면변위는 Fig. 3의 사각형 용기와 같은 전형적인 슬로싱 현상을 나타낸다.

Fig. 5(a)에서 Fig. 5(c)에서 물의 경우와 자성유체의 경우를 비교해 보면 자성유체의 액면변위는 물보다 다소 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 사각형 용기와 같이 물과 자성유체의 물성차이에 의한 것이라 생각된다.

Fig. 5에서 제1공진주파수의 위치, 자장의 세기의 변화가 액면변위에 미치는 영향, 최대 공진점 이후의 액면유동성의 변화가 미미한 것을 볼 수 있다. 이는 다음과 같다. 용기의 형상이 원통형이기 때문에 가진방향과 무관하게 연속적으로 불규칙한 회전운동(swirling)이 발생한다. 즉, swirling은 불규칙적인 회전방향이 되고, 이 스위링 발생은 이론적으로 어떤 가진면내의 진동 응답성의 불안정을 나타낸다. 따라서, 원통형 용기내 자성유체의 슬로싱은 액면변위의 감소를 제외하고 미미한 차이를 보이는 것이라 사료된다.

III. 결 론

수평진동이 있는 용기내의 자성유체에 용기하부로부터 수직자장을 인가시킨 경우, 용기내의 자유표면이 갖는 자성유체 유체유동 현상을 실험적으로 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일정한 비균일 자장하에서 직사각형 및 원통형 용기내 진동수가 증가함에 따라 뉴턴유체와 같은 전형적인 슬로싱 현상을 나타낸다.
2. 직사각형 용기에서 자성유체의 액면변위는 물보다 다소 낮고, 최대 공진점이 고진동수 쪽으로 이동된 곳에 나타나고, 인가자장의 세기와 최대 공진점의 위치는 선형 변화한다.
3. 원통형 용기에서 인가자장은 액면변위의 감소에 영향을 미친다.
4. 인가자장의 증가는 표면파의 진폭과 슬로싱 유동의 변동 주기를 변화시킨다.

참고문헌

- [1] 日本機械學會, 機能性流知能流, コロナ社, 日本 (2001) pp. 1~30.
- [2] 神山新一, 磁性流入門, 産業圖書, 日本 (1989) pp. 5~16.
- [3] 고재귀, 송재만, 자성물리학의 기초와 응용, 숭실대학교 출판부, 한국 (1997) pp. 256~287.
- [4] 神山新一, The Japan Society of Mechanical Engineers **61**, 157 (1995).
- [5] R. V. Polovin, Fundamentals of Magnetohydrodynamics, Consultants Bureau, New York (1990) pp. 1~10.
- [6] 서이수, 수평가진이 있는 용기내 자성유체의 유동특성에 관한 연구, 고려대학교 박사학위논문, 한국 (1991).
- [7] 이창열, The Korean Society of Mechanical Engineers **11**, 1955 (2009).
- [8] 지영무, The Korean Society of Mechanical Engineers **35**, 617 (2011).
- [9] 조진래, The Korean Society of Mechanical Engineers **10**, 149 (2002).
- [10] 윤현식, The Korean Society of Mechanical Engineers **5**, 13 (2009).

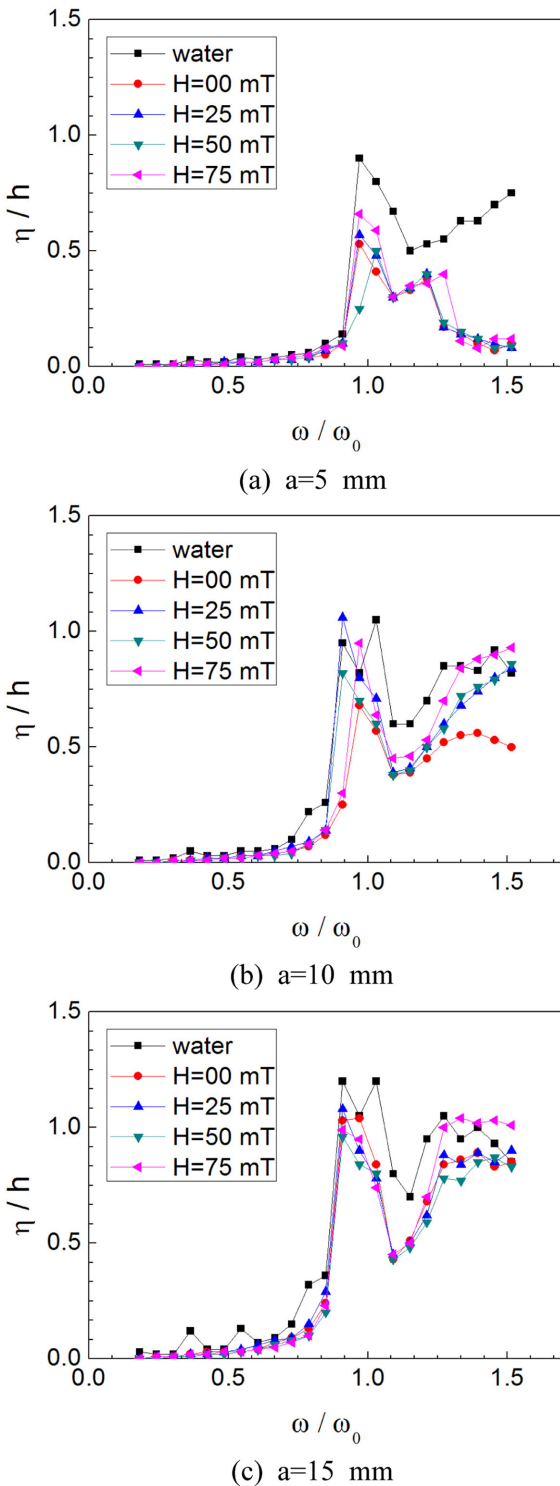


Fig. 5. (Color online) Frequency response of magnetic fluid with magnetic intensity and water at cylindrical container.

A Study on Fluid Surface Movement Phenomena of Magnetic Fluids in a Container Subjected to a Horizontal Oscillation

Dae-Wan Kim, Joung-Woo Park, and Lee-Soo Seo*

Department of Mechanical Engineering, Donga Univ. Hadan 840, Saha-gu, Busan 604-714, Korea

(Received 20 September 2012, Received in final form 24 October 2012, Accepted 24 October 2012)

In this paper, fluid movement of magnetic fluid which has free surface is investigated in a container subjected to a horizontal oscillation. Here, the vertical magnetic field is applied from the bottom of this container. The experiment is performed on the magnetic fluid in a rectangular and a cylindrical container and the effects of magnetic force exerted on the magnetic fluid are investigated on the resonance frequency and liquid surface displacement. The increase of magnetic field affects on the maximum resonance point and the liquid surface displacement. In result, it changes the amplitude of the surface wave and the period of sloshing fluid movement.

Keywords : magnetic fluid, magnetic field, horizontal oscillation, sloshing, free surface, liquid surface displacement