

구형 용기 내 자성유체의 슬로싱 특성에 관한 실험적 연구

김대완 · 이무연* · 서이수

동아대학교 기계공학과, 부산시 사하구 하단동 840, 604-714

(2013년 9월 15일 받음, 2013년 10월 17일 최종수정본 받음, 2013년 10월 18일 게재확정)

본 연구에서는 구형(sphere) 용기 내 작동유체로 물과 자성유체(ferrofluid)를 사용하였을 경우의 구형 용기의 병진 운동에 따른 슬로싱(sloshing) 현상에 대하여 실험적으로 고찰하였고 두 가지 작동유체에서 나타나는 특성을 비교하였다. 구형 용기의 병진 운동에 따른 슬로싱 현상을 고찰하기 위하여, 자기장(magnetic field)을 0 mT에서 50 mT로 변화시키고, 가진 진폭을 5 mm에서 15 mm로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 결과적으로, 구형 용기내의 자성유체는 자기장을 인가하지 않았을 때 물과 유사한 액면거동 현상을 나타내었고, 자성유체에 인가되는 자기장 세기가 증가할수록 공진점(resonance point) 발생이 이론공진주파수(theoretical resonance frequency)보다 높은 영역에서 발생함을 확인하였다. 즉 용기 내 슬로싱은 자성유체를 사용할 경우 인가 자기장의 크기에 따라 공진점이 발생하는 공진주파수를 제어할 수 있으며 액면 변위의 크기를 제어할 수 있었다.

주제어 : 슬로싱, 자성유체, 공진주파수, 공진점, 액면 변위

I. 서 론

다양한 산업 및 공학 분야 중에서 액체 연료 등의 운반이나 저장에 있어서 병진 및 회전 운동에 대한 용기 내 슬로싱(sloshing)은 연구되어야 할 중요한 현상이다. Bae 등은 슬로싱은 유체를 포함하는 저장용기에 가진 및 진동을 주었을 경우 유체의 출렁거림이라고 정의하였고[1], 이러한 슬로싱은 초대형 우주선에서부터 시작하여 기름을 운반하는 정유차등과 같이 액체화물을 운반해야 하는 곳에서 진동 및 가진에 의한 슬로싱 문제에 대하여 많은 연구를 진행해 오고 있다. Shin 등은 액체 화물창내의 슬로싱 고유주기 산정에 관한 연구를 사각 탱크를 대상으로 진행하였다[2]. Ha 등은 사각형 연료탱크 내 슬로싱 주파수 응답을 해석적으로 연구하였으며, 자유표면, 상승 높이, 동수압, 내부 유체력에 대한 이론적인 해 와 해석적으로 구한 해가 저차 주파수에서 잘 일치함을 보고하고 있다[3]. Lee and Yoon 등은 다양한 적재높이를 가진 2차원 사각탱크 내부의 슬로싱 현상에 대하여 연구를 진행하였고, 탱크의 진동 주파수가 고유 주파수에 근접할 때 자유표면의 높이 및 압력 변동으로부터 맥놀이 현상이 발생한다고 보고하고 있다[4]. Ji 등은 사각용기의 슬로싱 유동에 관하여 실험적으로 고찰하였으며, 큰 가진 변위를 갖는 비선형 슬로싱에 대한 물리적 특성과 시간 변화에 따른 유동의 거동특성에 대하여 관찰하였다[5]. 이렇듯 슬로싱 현상에 관한 연구는 다양하게 진행되어왔으나,

사각형 형상을 갖는 저장용기를 대상으로 액화천연가스, 물, 기름등과 같은 뉴턴유체에 대하여 주로 연구되었다.

그러나 본 연구에서는 단면이 원형 형상을 갖는 구형용기 내에서 일반유체와는 다른 물리적 특성을 가지는 자성유체를 대상으로 병진방향으로 가진 할 경우의 슬로싱 현상에 대하여 실험적으로 고찰하고자 한다.

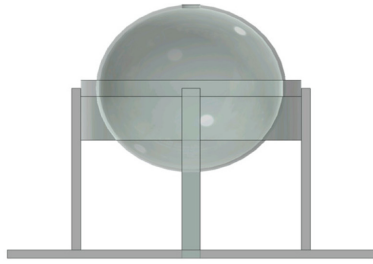
II. 실험방법

1. 실험장치

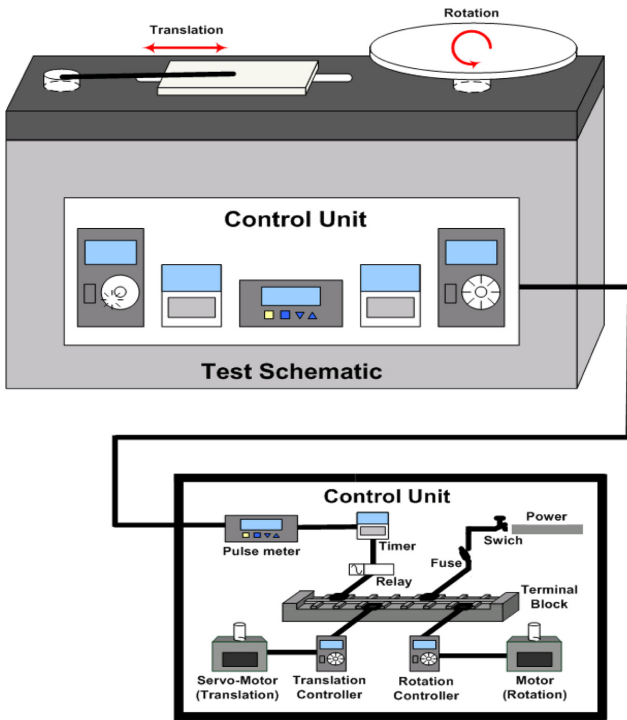
Fig. 1은 구형 용기내 자성유체의 슬로싱 현상을 실험적으로 고찰하기 위하여 본 연구에서 제작된 실험장치 및 용기형상을 나타내고 있다. Fig. 1(a)에서 보는 것처럼, 자성유체의 거동을 관찰하기 위하여 시험용기는 두께 5 mm의 투명 아크릴을 이용하여 제작하였고, 자성유체(ferrofluid)로 채워져 있다. 자성유체로 채워진 구형용기에 병진 운동을 구현하기 위하여 무단변속모터를 이용하여 모터의 회전운동을 크랭크식 가진기를 이용하여 병진운동으로 바꾸었고, 회전수 변화를 이용하여 진폭을 제어하였다. 가진 진폭은 컨트롤러를 이용하여 모터의 회전수로 제어하였다. Fig. 1(b)에 본 연구에서 사용된 실험 장치를 나타내었다. 자성유체에 인가한 자기장은 비균일 영구자석을 이용하였으며 자기장세기의 변화는 영구자석의 수를 이용하여 용기 밑면에서 인가하였다.

2. 실험방법

Table I은 본 연구에서 사용한 자성유체의 열역학적 물성치



(a) Spherical container



(b) Test set-up

Fig. 1. (Color online) Schematic of the test set-up.

Table I. Properties of the tested ferrofluid.

Properties	W-40
Effective radius of particle, d_m (nm)	10.0
Density, ρ (kg/m^3)	1.37×10^3
Density of particle, ρ_a (kg/m^3)	5.16×10^3
Volume concentration of particle, ϕ_a	8.68×10^{-2}
Particle number per unit volume, N (EA/m^3)	1.25×10^{23}

이며, 모액이 물인 W-40 Ferrofluid를 이용하였다. 자성유체는 유효반경 10 nm 및 밀도 $1.37 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 이다. 병진 운동에 의한 구형용기의 슬로싱을 관찰하기 위하여 정지상태에서 구형 용기의 상부 중심에서 자성유체를 삽입하였고, 구형 용기의 중간 지점에서 병진 운동에 따른 액면 변위(출렁거림)를 측정하였다. 즉, 변위의 측정은 정지상태 및 자기장이 없는 경우를 기준으로 하였고 병진 방향으로 가진이 있을 때

Table II. Specifications and conditions of the test.

Components	Specifications
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	20
Diameter of spherical container (mm)	100
Thickness of spherical container (mm)	5
Magnetic field strength (mT)	0, 25, 50
Periodic width of translation motion (mm)	5, 10, 15
Size of permanent magnet (mm^3)	$80 \times 80 \times 10$
Amount of magnetic fluid (g)	359
Resolution of the measuring camera (mm)	20~60
Working fluid	Water/Ferrofluid

상승하는 부분과 하강하는 부분을 고정밀 카메라를 이용하여 측정하였고 측정치를 이용하여 계산하였다. 자성유체가 채워진 구형용기의 액면 위치가 최대점에 도달하였을 경우의 모터 진동수를 이용하여 공진주파수(w_m)를 계산하였다. 또한, 자성유체의 고유진동수는 Kim의 논문을 이용하여 계산하였다[6].

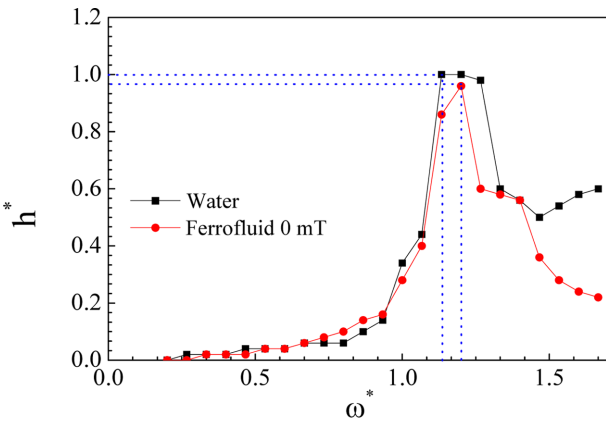
Table II는 본 연구에서 사용한 실험 조건 및 구형용기의 사양을 나타내고 있다. 슬로싱 실험은 상온(room temperature) 조건에서 수행하였으며, 병진 방향으로 진폭은 5, 10, 15 mm로 5 mm씩 변화시켰으며, 자기장 세기는 0, 25, 50 mT로 변화시켰다. 중심 직경 100 mm인 구형용기는 5 mm 두께의 투명 아크릴 소재를 이용하여 제작하여 관찰을 용이하게 하였다. 구형용기에 채워진 자성유체의 양은 약 359 g이며, 영구자석의 크기는 80 mm × 80 mm × 10 mm이다. 관찰은 초정밀 카메라를 이용하였고 측정값은 5회 평균한 값을 이용하였으며, 작동유체는 물과 자성유체를 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

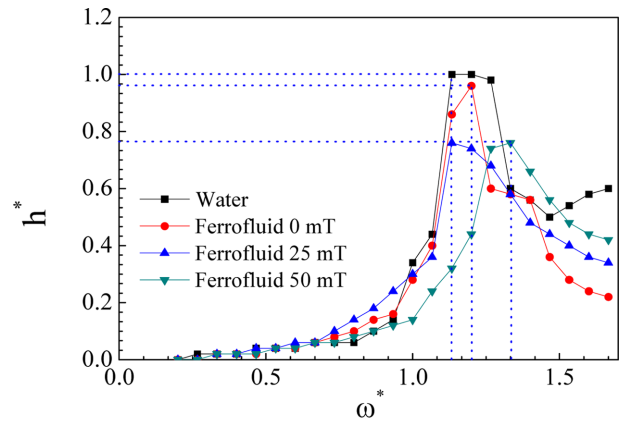
1. 물 및 자성유체에서 슬로싱 특성

Fig. 2는 구형(sphere) 용기 내 물과 자성유체에 자기장을 인가하지 않은 상태($B = 0 \text{ mT}$)에서 가진 진폭을 5, 10, 15 mm로 변화시켜가면서 주파수 응답 특성을 비교하였다. 여기서, 그래프의 x축으로 사용된 $\omega^* = \omega/\omega_0$ 에서 ω 는 가진 주파수이고 ω_0 는 이론공진주파수(theoretical resonance frequency)이다. y축으로 사용된 $h^* = h/h_0$ 에서 h 는 액면변위이고 h_0 는 초기 액면 높이이다. 초기 액면 높이는 $h_0 = 50 \text{ mm}$ 이다.

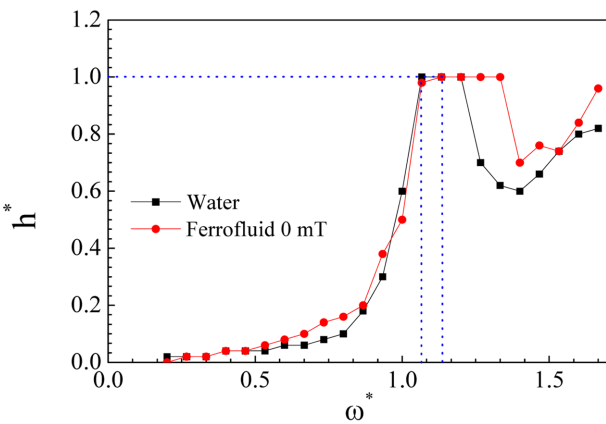
Fig. 2에서 보는 것처럼, 물과 자성유체 h^* 의 최대값이 1로 나오는 이유는 구형 용기의 경우 윗면이 막혀 있어 액면변위가 최대 높이까지 올라가기 때문이다. 자성유체의 경우 인가 자기장이 0 mT일 때 주파수 응답 특성은 물과 비슷한 특성을 나타내는 것을 알 수 있으며, 이론공진주파수($w = 1$)에서 최대 액면 변위가 나타나고 이후 점차 안정을 찾아가다 2차 공진점이 나타난다. 특히, 물과 자성유체의 액면거동 특성은 가진 주파수와 이론공진주파수가 일치하는 공진점(resonance point)



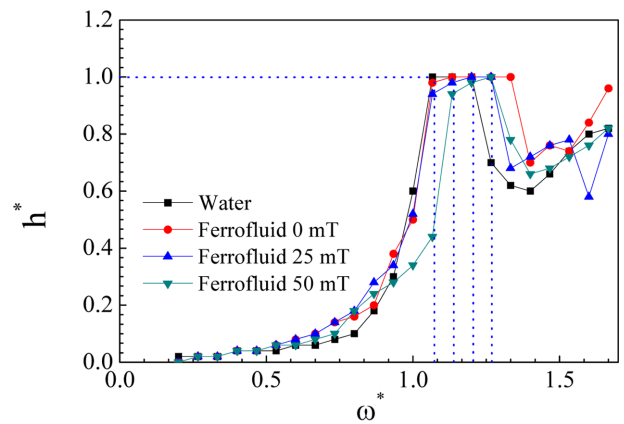
(a) p=5 mm



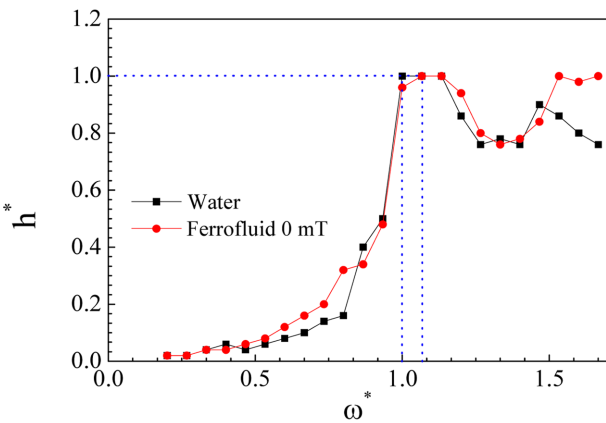
(a) p=5 mm



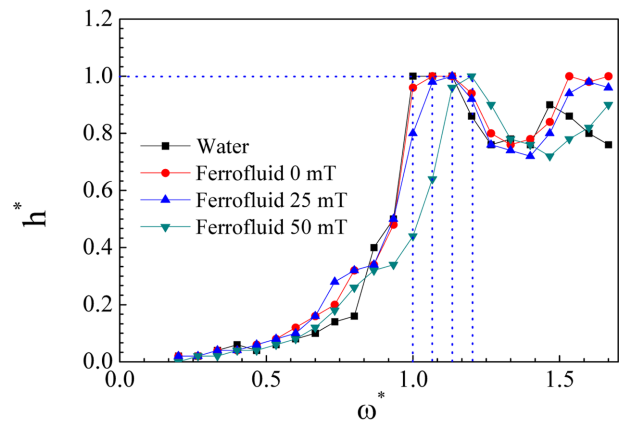
(b) p=10 mm



(b) p=10 mm



(c) p=15 mm



(c) p=15 mm

Fig. 2. (Color online) Sloshing characteristics of the water and the ferrofluid with the frequency response.

Fig. 3. (Color online) Sloshing characteristics of the water and the ferrofluid with magnetic field and frequency response.

이전에는 비슷한 액면거동을 보이고 공진점을 지나서 부터는 약간의 차이가 나타남을 확인할 수 있다. 이는 물과 자성유체의 밀도 및 점성등 물성치의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

2. 자기장 변화에 따른 슬로싱 특성

Fig. 3는 구형 용기의 가진 진폭 5, 10, 15 mm에서 자성

유체의 인가 자기장을 0, 25, 50 mT로 변화시켜 가면서 주파수 응답 특성을 나타내었고 물과 비교하여 나타내었다. 구형 용기 내 자성유체는 모든 가진 진폭에서 인가 자기장 세기가 증가할수록 자성유체의 주파수 응답특성이 지연되었고, 이론 공진주파수보다 높은 가진 주파수에서 공진점이 발생함을 확인하였다. 이러한 이유는 본 연구에서 인가된 자기장 방향에

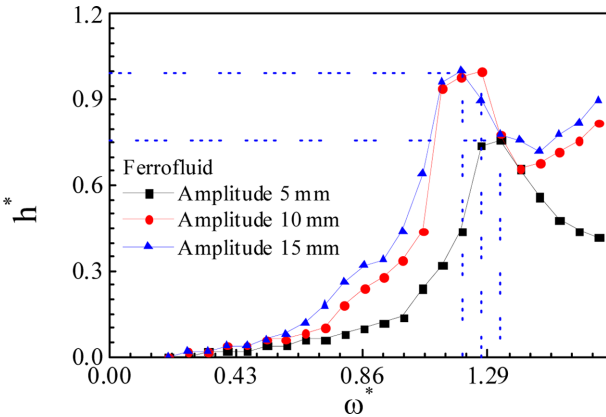


Fig. 4. (Color online) Splotching characteristics of the ferrofluid with the horizontal motion of the sphere at the magnetic intensity of 50 mT.

서 자기장 증가에 따라 자성유체의 자기 체적력이 억제되었기 때문이다.

Fig. 3(a)에서 보면, 가진 진폭 5 mm일 때 구형 용기내 작동유체로 물을 사용하였을 경우 최대 액면변위 $h^* = 1$ 로 나타났지만, 자성유체를 사용하였을 경우 인가 자기장 증가에 따라 최대 액면 변위는 감소하였고 인가 자기장이 50 mT일 때 최대 액면 변위는 $h^* = 0.76$ 로 물과 비교하여 24 % 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 자성유체의 인가 자기장 방향으로 자기체적력이 나타나기 때문이다[7]. 그러나 Fig. 3(b) and Fig. 3(c)에서 보는 것처럼, 가진 진폭을 10 mm 및 15 mm로 증가시킬 경우 구형 용기내 슬로싱에서 자성유체의 최대 액면 변위 감소 효과는 나타나지 않았다. Fig. 3(c)에서 보면, 가진 진폭 15 mm일 때 구형 용기내 자성유체 인가 자기장이 0 mT인 자성유체의 공진점은 $\omega^* = 1.06$ 로 나타났으며 최대 액면변위 $h^* = 1$ 로 나타났다. 또한 인가 자기장이 25 및 50 mT일 때 자성유체의 공진점은 $\omega^* = 1.13$ 이고 $\omega^* = 1.2$ 로 증가하였으며 최대 액면 변위는 두 경우 모두 동일하게 $h^* = 1$ 로 나타났다. 3가지 경우에서 구형 용기내 자성유체의 최대 액면 변위는 모두 물과 같은 $h^* = 1$ 로 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 이유로는 가진 진폭을 증가시키면 용기의 병진 속도가 증가하여 자성유체 사용으로 인한 액면변위 감소 효과를 보기 어렵기 때문이다. 또한, 자성유체 인가 자기장이 50 mT인 자성유체의 공진점은 물과 비교하여 20 % 증가하는 것을 알 수 있다.

3. 가진진폭 변화에 따른 슬로싱 특성

Fig. 4는 구형 용기 내 자성유체의 인가 자기장 세기가 50 mT일 때 가진 진폭을 5, 10, 15 mm로 변화시켜 가면서 자성유체의 주파수 응답 특성을 비교하였다. 구형 용기내 자성

유체의 주파수 응답 특성 $\omega^* = 1.2$ 을 기준으로 가진 진폭이 5, 10, 15 mm에서 최대 액면변위는 $h^* = 0.44$, $h^* = 0.98$, $h^* = 1.0$ 로 증가하였다. 즉 구형 용기의 가진 진폭을 5 mm에서 15 mm로 증가시킬 경우 최대 액면 변위가 127 % 증가하였다. 이러한 이유는 동일 가진 주파수에서 가진 진폭이 증가할수록 용기의 왕복운동 시 속도가 증가하기 때문이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 구형용기에서 인가 자기장의 세기와 가진 진폭에 따라 물과 자성유체의 액면거동 특성을 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인가 자기장의 세기(magnetic intensity)가 0 mT일 때 자성유체의 액면거동 특성은 물과 비슷하다.
2. 구형 용기 내 자성유체는 모든 가진 진폭에서 인가 자기장 세기가 증가할수록 자성유체의 주파수 응답 특성이 지연되었고 이론공진주파수보다 높은 가진 주파수에서 공진점이 발생함을 확인하였다.
3. 가진 진폭 5 mm일 때 구형 용기내 물의 최대 액면 변위 $h^* = 1$ 이고, 자성유체의 경우 인가 자기장 증가에 따라 최대 액면 변위는 감소하였으며 인가 자기장이 50 mT일 때 최대 액면 변위는 $h^* = 0.76$ 로 물과 비교하여 24 % 감소하였다.
4. 구형 용기의 가진 진폭을 5 mm에서 15 mm로 증가시킬 경우 최대 액면 변위가 127 % 증가하였다.

감사의 글

본 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] H. S. Bae, S. Y. Kim, and M. K. Park, Proc. of the KSME Fall Annual Meeting, pp. 49~54 (2007).
- [2] S. R. Shin, K. S. Choi, S. Y. Kang, and H. S. Kim, J. Ocean Engineering and Technology **8**, 93 (1994).
- [3] S. Y. Ha, H. W. Lee, J. R. Cho, T. H. Park, and W. Y. Lee, Proc. of the KSME Fall Annual Meeting, pp. 149~154 (2002).
- [4] C. Y. Lee and H. S. Yoon, Proc. of the KSME Spring Annual Meeting, pp. 13~18 (2009).
- [5] Y. M. Ji, Y. S. Shin, J. S. Park, and J. M. Hyun, J. Kor. Soc. Mech. Eng. **35**, 617 (2011).
- [6] D. W. Kim, A Master's Dissertation, Dept. of Mech. Eng., Graduate School, Dong-A Univ., Busan, Korea (2010).
- [7] J. H. Seo and M. Y. Lee, J. Kor. Academia-Industrial Cooperation Soc. **14**, 997 (2013).

Experimental Study on Sloshing Characteristics of a Ferrofluid in the Spherical Container

Dae-Wan Kim, Moo-Yeon Lee^{*}, and Lee-Soo Seo

Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

(Received 15 September 2013, Received in final form 17 October 2013, Accepted 18 October 2013)

This work describes the experimental investigations on sloshing characteristics of water and ferrofluid as working fluids in the spherical container with the horizontal oscillation motion and compared the results obtained by two working fluids. In order to investigate the sloshing characteristics of the sphere container with the horizontal oscillation, experiments are performed with the magnetic intensities from 0 mT to 50 mT and horizontal oscillation motions from 5 mm to 15 mm. As results, Ferrofluid without magnetic field in the sphere container showed a similar liquid surface movement with water. The resonance point of the ferrofluid in the sphere container happened at higher value than that of the theoretical resonance frequency with the rise of the magnetic field. In addition, the sloshing characteristics of the ferrofluid in the sphere container can be controlled with the resonance frequency with the magnetic intensity and the liquid surface displacement could be also controlled.

Keywords : sloshing, ferrofluid, resonance frequency, resonance point, liquid surface displacement