

# 자성유체에 잠긴 비자성체 부상현상의 다중물리수치해석 및 실험

## A Multi-physics Simulation and Measurement for Buoyancy of Nonmagnetic Solid Object Submerged in Magnetic Liquid

최 홍 순\*  
 (Hong-Soon Choi)

**Abstract** - In this paper, magnetic buoyancy force on nonmagnetic solid object submerged in magnetic liquid was simulated and measured. For the evaluation of the force, a multi-physics approach of hydrostatic equilibrium considering magnetic body force as well as gravity is presented. The magnetic body force should be regarded as an additional forcing term in the momentum equation of hydrodynamics. It is also shown that the virtual air-gap based Kelvin's force formula is a useful method for the calculation of force distribution in the magnetic liquid. The experimental result which was performed by a load-cell measurement system agreed quantitatively well with the numerical one.

**Key Words** : Multi-physics simulation, Buoyancy, Magnetic liquid, Hydrodynamics, Hydrostatics, Magnetic body force

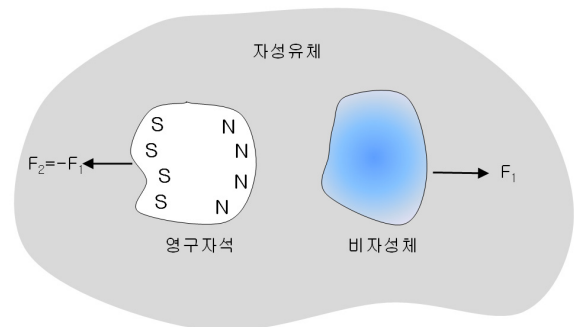
### 1. 서 론

자성유체는 자성을 가지는 액체로서 우주의 진공상태에서의 헬륨과 같은 기체의 기밀 기압유지와 액체연료제어를 위한 장치, 회전축 실링장치, 능동식 뿔퍼등과 같은 산업분야에서 응용이 된다[1][2]. 고체가 아닌 유체상태의 자성체인 자성유체는 고체자성체가 보이는 현상과 여러모로 다른 현상을 보여 학자와 연구원들의 이론과 실험적 관심의 대상이기도 하다.

본 논문에서는 자성유체를 전자기장 관점에서 어떻게 해석하여야 하는 가를 보여주고자 한다. 자성유체 내에서 기계적 역학과 전자기적 역학이 서로 얽힌 상태에서 전자기력에 의한 영향을 어떻게 구하는 것이 옳은가에 대한 탐구의 일환으로, 자성유체 내의 비자성체에 미치는 힘에 대한 연구 결과이다. 이론적 검토는 수치해석과 실험에 의하여 검증하였다.

자성유체 내부에 그림 1과 같이 자석과 비자성체가 있다고 가정하면, 비자성체는 자석과 멀어져가는 방향으로 힘을 받게 된다. 이러한 현상은 자석이 자성유체를 끌어당겨 자석의 주변에 물리적 함으로서 발생하는 자연스러운 현상의 결과로서 이로 인해 비자성체가 밀려나게 되는 것이다. 자석의 입장에서 보면 동일한 반발력이 반대방향으로 작용할 것이다. 중력이나 다른 힘은 없다고 가정하면 이 시스템에 부가되는 힘은 오로지 전자기적인 원인에 의해서일 것이다. 일반적으로 전자기력 계산에 많이 사용하는 맥스웰응력법 Maxwell stress method을 사용하여 비자성 고체에 미치는 전자기력을 바로 계산하려고 하면 우선 폐쇄면closed surface을 그 주위에 설정하여야하는 데, 비자성체의 경우

이 면을 비자성체 표면 바로 위 또는 바로 아래로 설정하면 그 면 내부의 힘 계산은 영이 될 수밖에 없다. 전자기력이 비자성체는 영향을 미치지 않기 때문이다. 자성유체 전체를 감싸는 면을 설정하여 자성유체에 미치는 힘을 계산 한다 하더라도 이 힘은 비자성체에 미치는 실제의 힘과 대응되는 것으로 볼 수가 없다. 이러한 방식으로 자성유체에 미치는 힘을 계산하려면 자석과 자성유체 사이에 미치는 힘도 계산하여야 하는 데, 이 또한 자석을 제외한 자성유체를 어떤 폐쇄면으로 감쌀 것인가 하는 개념적 혼돈을 야기한다. 더구나, 자성체나 유전체의 표면이나 공극에서 표현되는 맥스웰 응력 또는 맥스웰 표면력은 물리적인 의미가 없고 물체 전체에 미치는 힘 또는 체적력에서만 의미가 있다[3][4].



**그림 1** 자성유체에 잠긴 영구자석과 비자성체  
**Fig. 1** A permanent magnet and a nonmagnetic object when both are submerged in a magnetic liquid

이러한 모순들의 해결과 일관된 역학적 설명을 위해서는, 비자성체 또는 자성유체에 전체에 미치는 힘을 구하는 접근이 아닌 자성유체내부에 미치는 체적력을 중력과 함께 고려하여 비자성체의 표면에 미치는 압력을 구하는 접근법이어야 한다. 즉 전자기 체적력을 추가로 고려한 정유체역학 hydrostatics이어야 한다. 본 논문에서는 자성유체의 자기장

\* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook University, Korea.

E-mail : tochs@knu.ac.kr

Received : October 17, 2012; Accepted : December 18, 2012

에 의한 자성유체표면의 왜곡을 구하기 위하여 체적력을 고려한 접근 연구[5]를 기반으로 하여 유체내부에 잠긴 비자성 고체에 미치는 압력에 대한 고찰을 하고자 한다.

논지를 단순화하기 위해 비자성체 입장만을 고려해본다. 그림 2에는 수치해석과 실험이 모두 가능한 자석-자성유체-비자성체 모델의 설계개략도를 보여준다. 자성유체는 비이커에 담겨 있으며, 이 안에 자성유체보다 밀도가 약간 더 높은 비자성체의 고체A를 넣기로 하고 비이커 밑에는 자석을 배치한다. 비자성체A는 그 자체가 중력에 의해 밑의 방향으로 작용하는 힘을 받고 있고, 자성유체가 중력과 자석에 의한 힘을 받아 비자성체A를 위로 올리는 부상력을 추가할 것이다. 이럴 때 비자성체가 받는 총합의 힘은 아르키메데스의 원리Archimedes' principle에 의해 지배된다[6]. 자석에 의해 자기장이 발생하기 전에는 비이커의 자성유체와 비자성체A는 유체의 내부에서 밀도가 높은 물체가 바닥으로 가라앉는 현상과 동일하다. 비자성체에 미치는 중력이 아르키메데스 원리에 의한 부상력보다 크게 되면 물체에 미치는 전체 힘은 아래 방향을 향하게 되기 때문이다. 이럴 때 유체는 중력에 의해 모든 부위가 아래로 향하는 힘을 받고 있고, 표면으로 부터의 깊이h에 따라 다음과 같은 압력p를 얻는다.

$$p = \rho gh + p_0 \tag{1}$$

여기서,  $\rho$ 는 질량밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $p_0$ 는 유체의 상부 표면에서의 대기압력이다. 식(1)에 의한 압력은 유체 내부에 고체가 있을 경우에 고체의 표면에 미치는 압력이 되는 것이며, 이의 총합은 고체를 위로 올리는 부상력으로 작용이 된다. 전자기력을 고려할 경우는 식(1)에 변형을 가하게 될 것이다. 본 논문에서는 전자기력이 고려된 유체정역학의 변형된 식의 도출과 전자기 체적력을 구하는 방법, 총합에 의한 순부상력을 수치적인 방법으로 구하는 법을 제시하며, 최종적으로 실험에 의한 결과의 타당성을 보여주고자 한다.

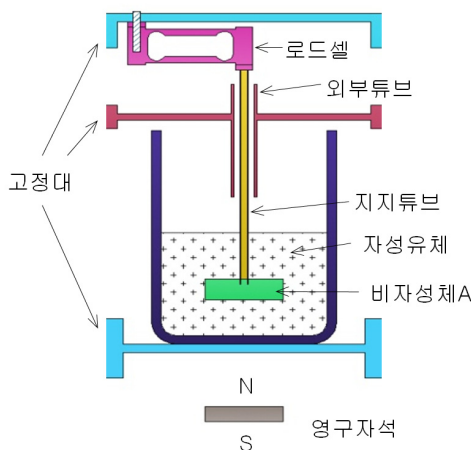


그림 2 실험과 수치해석을 위한 실험 모델도. 비자성체 A가 자성유체에 담겨진 형태이며 비이커 아래쪽에 자석을 배치.

Fig. 2 A schematic of buoyancy measurement system. Nonmagnetic-A submerged in magnetic liquid with external field by a magnet.

## 2. 정유체역학 방정식

유체내부의 임의의 위치에서 압력을 구하기 위해서 전자기적 체적력을 고려한 미분형태의 유체동역학 방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{T}_{mech} + \vec{\rho}g + \eta \nabla^2 \vec{v} + \vec{f}_m \tag{2}$$

여기서,  $\vec{v}$ 는 미소체적의 속도벡터,  $D/Dt$ 는 미소체적을 따라가면서 작용하는 라그랑지안 미분Lagrangian derivative,  $\vec{T}_{mech}$ 는 기계적 응력텐서,  $\vec{g}$ 는 중력가속도 벡터,  $\vec{f}_m$ 는 미소체적에 미치는 전자기 체적력밀도벡터,  $\eta$ 는 점성도이다. 식(2)의 등호 오른쪽의 항들은 결과적으로 모두 체적력밀도의 의미를 지닌다.  $\vec{\rho}g$ 의 방향은 지구중심을 향한 일정한 벡터 값이고, 전자기 체적력  $\vec{f}_m$ 는 전자기의 분포에 따라 임의의 방향의 값을 가질 수 있다. 자기장내의 자성체에서의 Kelvin의 체적력 방정식  $\vec{f}_m = \mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H}$ 에 의하면  $\vec{f}_m$ 은 필드 $\vec{H}$ 가 조밀해지는 방향으로 향한다. 유체가 움직이지 않는 정역학 상태를 고려하게 되면 속도  $\vec{v}$ 값은 영이 되고 시간에 따른 변화도 영이 되므로 식(2)는 다음과 같이 간략화 된다.

$$0 = -\nabla \cdot \vec{T}_{mech} + \vec{\rho}g + \vec{f}_m \tag{3}$$

기계적 응력텐서  $\vec{T}_{mech}$ 도 유체내부에서는 응력이 방향성에 무관한 값을 띠는 스칼라압력 p로 나타나므로, 식(3)의 오른쪽 첫 번째항은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot \vec{T}_{mech} = \nabla \cdot p \vec{I} = \nabla p \tag{4}$$

여기서  $\vec{I}$ 는 단위텐서identity tensor이다. 식(4)를 적용하여 식(3)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\nabla p = \vec{\rho}g + \vec{f}_m \tag{5}$$

유체 내부에서는 어떤 임의의 방향의 힘이 작용하여 그로 인해 압력이 발생하더라도, 압력 자체에는 방향성이 없어야 한다는 것을 주목할 필요가 있다. 전자기력  $\vec{f}_m$ 의 경우 중력과 달리 일정한 방향이 아님에도 그로 인해 발생한 압력은 방향성이 없어야 한다. 유체는 정적인 상태에서 내부에 전단응력shear stress(관심표면의 수평방향의 응력성분)를 유지할 수 없으며, 오로지 관심표면에 수직방향으로의 스칼라 압력성분만이 존재한다. 자성유체도 이러한 성질을 당연히 만족하여야 한다. 자기력이 고려된 유체내의 임의의 a점에서의 압력을 구하기 위한 식은 식(5)로부터 다음과 같이 만들어진다.

$$p = \int_0^a \nabla p \cdot d\vec{l} + p_0 = \int_0^a (\vec{\rho}g + \vec{f}_m) \cdot d\vec{l} + p_0 \tag{6}$$

여기서,  $p_0$ 는 적분 초기위치에서의 압력이라 할 수 있고, 유체표면을 시작점으로 하면 대기압을 의미하게 된다.  $a$ 점이 깊이  $h$ 에 위치하고 있다면, 중력가속도  $\vec{g}$ 는 아래로만 향하는 벡터성분을 가지므로 중력항의 선적분은  $\rho gh$ 로 단순화된다. 식(6)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$p = \rho gh + p_m + p_0 \quad (7)$$

$$\text{여기서, } p_m = \int_0^a (\vec{f}_m) \cdot d\vec{l} \quad (8)$$

이다. 식(7)을 중력만 고려된 식(1)과 비교해 보면 등호 오른쪽의 두 번째항  $p_m$ 이 추가된 것을 알 수 있다. 바로 이  $p_m$ 항에 의한 압력이 자기부상력magnetic buoyance을 만들어 낼 것이다. 식(8)의  $p_m$ 은 시작점과 끝점의 위치가 같다면 적분 경로에 의존하지 않는 단일한 스칼라값을 가져야 한다.

전자기 체적력은 가상공극이 적용된 다음과 같은 Kelvin 식을 적용한다[7][8].

$$\vec{f}_m = \mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H}_0 \quad (9)$$

여기서,  $\vec{M}$ 은 자화magnetization이고  $\vec{H}_0$ 는 외부자기세기 external magnetic field intensity,  $\mu_0$ 는 공기투자율이다. 외부자기는 자성체내에서 관심체적의 영향을 고려하고, 동시에 그 관심체적을 제거하였을 때 외부의 자성체등에 의한 모든 영향을 고려한 자기이다.  $\vec{H}_0$ 는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\vec{H}_0 = \frac{\mu/\mu_0 + 1}{2} \vec{H} \quad (10)$$

여기서,  $\vec{H}$ 는 통상적으로 취급하는 전체 자기세기total magnetic field intensity,  $\mu$ 는 자성유체의 투자율이다. 외부자기의 개념은 Kelvin에 의해 처음 제기되었고, 이 외부자기  $\vec{H}_0$ 를 구하는 방법에 관한 것은 현대 재료공학과 전자기학 책에서 원통구멍 개념을 통해 설명되었다[9][10].

### 3. 수치해석

수치해석을 위해 그림 2의 모델은 그림 3처럼 단순화하며 축대칭 3차원문제라 취급한다. 그림 3에는 모델링 치수들과 재질값에 대해 그림과 함께 표시하였다. 축대칭을 위하여 비이커, 자석과 비자성체A 모두 원통형 구조이다. 해석영역은 자속의 공기중으로의 누설이 상당량 되므로 모델을 포함하여 충분히 크게 설정한다. 본 논문은 모델최대 길이의 4 배 정도의 영역을 바깥 공기영역으로 충분히 설정하였다. 자성유체의 위쪽 표면은 자석과의 거리가 있으므로 자장에 의해 왜곡되지 않고 평면으로 유지된다고 보았다. 자성유체의 재질은 선형으로 가정하였고, 포화영역 이전의 비투자율 1.85로 입력하였다. 자성유체와 비자성체A와 밀도는 각각  $1.18g/cm^3$ ,  $1.383g/cm^3$ 이다. 비이커의 모서리 부위는 실제의 경우 곡면처리가 되어있으나, 수치해석을 위한 모델에서는

직각으로 되어 있는 것으로 단순화 하였다. 비이커의 유리 와 튜브등은 공기영역으로 처리하였다.

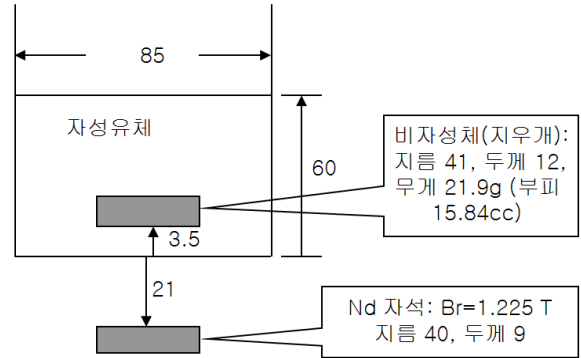


그림 3 그림 2의 실험장치 수치해석을 위한 단순모델. 하이드로카본 재질의 EFH1이 사용됨. 단위:mm

Fig. 3 Numerical model from the final experiment stage. EFH1 hydrocarbon-based magnetic liquid used. mm unit was used.

축대칭 3차원에서의 벡터포텐셜을 정식화한 유한요소법을 사용하여 해석하였고, 후처리 과정에서 해석영역 모든 부위의 자기세기  $\vec{H}$ 를 도출할 수 있다. 축대칭문제의 후처리 단계에서 전자기 체적력을 구하기 위하여 식(9)과 (10)를 적용하면 다음과 같다.

$$\vec{f}_m = \frac{\mu + \mu_0}{2} [(M_r \frac{\partial H_r}{\partial r} + M_z \frac{\partial H_r}{\partial z}) \hat{r} + (M_r \frac{\partial H_z}{\partial r} + M_z \frac{\partial H_z}{\partial z}) \hat{z}] \quad (11)$$

여기서  $\hat{r}$ 과  $\hat{z}$ 는 각각 반지름방향, z축방향 단위벡터이다. 그림 4에는 해석결과를 나타내었다. 그림 4(a)에는 자속밀도를, 그림 4(b)에는 식(8)을 사용한 전자기력 체적력 밀도를 길쭉한 삼각형의 크기와 방향으로 표현하였다. 비자성체 내부는 자화  $\vec{M}$ 이 영이므로 체적력밀도가 존재하지 않는다. 전자기 체적력은 대체적으로 아래로 향하는 방향을 가지고 있고, 비자성체 모서리 밑쪽에서는 반지름이 작아지는 방향으로 작용하고 있음을 볼 수 있다. 상부표면에 가까운 영역에서는 매우 작은 값이라 점과 같은 형태로 보인다.

비자성체A에 미치는 힘은 세 가지로 나누어서 계산한다. 첫째 자신의 무게로 인한 가라앉는 힘이다. 이 힘은 비자성체A의 질량밀도에 그것의 부피와 중력가속도  $g$ 를 곱함으로써 수치해석 없이 쉽게 구할 수 있다. 둘째로, (1)식에 의해 윗면과 아랫면이 받는 중력으로 인한 유체압력의 힘이다. 비자성체A의 옆면은 대칭적으로 상쇄되므로 고려할 필요가 없다. 중력에 의한 유체압력은 비자성체A가 유체내부에서 차지하고 있는 부피에서 자성유체의 무게만큼의 힘이 상승력으로 작용한다. 윗면은 아래로 누르는 힘, 아래의 면은 위로 올리는 힘이 되고 두 힘의 합이 중력에 의한 유체의 부상력이다. 이 힘을 위해서도 별도의 수치해석이 필요하다. 위아래면의 수면으로부터의 깊이와 유체의 밀도만 알면 수동으로 계산이 가능하다. 자기장의 계산에 의한 추가

적인 힘이 마지막으로 고려하여야 할 힘이다. 이 힘은 중력에 의한 것과 다르게 비자성체A의 윗면과 아랫면 내에서의 반경에 따라 다른 힘을 받고 있으므로 여러 점에서의 자기적 압력의 계산이 필요하다. 본 논문에서는 윗면, 아랫면 각각에서 반경방향으로 균일한 10개의 점에서 압력을 계산하여 전체 면이 받는 힘을 계산하였다. 각 점에서의 압력 값에 원형띠의 면적을 곱한 것을 모든 점에 대해 더하면 된다. 자기적 압력 계산의 경우도 축에 대해 대칭이므로 비자성체 A의 옆면에서의 힘은 계산할 필요가 없다. 그림 5에는 유한요소해석을 위한 요소망과 윗면과 아랫면의 압력 계산을 위한 각각의 한 점에 대한 적분 경로를 보여주고 있다. 적분 경로의 양끝점이 정해지면, 전자기력 밀도  $\vec{f}_m$ 의 정밀도와 위치에 따른 부드러움smoothness의 분포에 따라 오차가 있을 수 있으나, 본 논문에서 사용한 Kelvin법은 이러한 오차에 대해 강건한 것으로 판단되고 있다[8]. Kelvin법이 아닌 맥스웰 응력법등에도 가상공극을 적용하여 전자기 체적력을 구할 수 있으나, 요소의 모양과 방향에 따른 불균일성이 나

타하므로, 이런 경우 경로에 따른 오차를 줄이기 위해서 양 끝점은 같더라도 다른 적분경로를 다수 택하여 그 값의 평균을 취하는 방법을 택하여야 한다.

표 1에는 수동계산에 의한 무게힘과 유체의 압력에 의한 부상힘, 전자기력에 의한 부상힘을 나타내었다. 최종 비자성체A에 미치는 힘은 세가지 힘을 모두 합한 위를 향한 방향으로 0.4385N이다. 수치해석으로 계산된 전자기 부상력 성분은 0.47N이다.

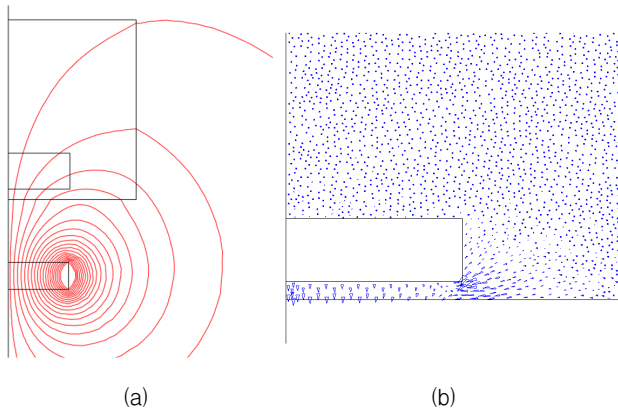


그림 4 축대칭 해석결과: (a) 자속분포도, (b) 비자성체A 부근에서의 가상공극을 적용한 Kelvin법에 의한 전자기 체적력 분포도

Fig. 4 Axis-symmetric analysis results: (a) Flux densities (b) Magnetic body force distribution using virtual air-gap based Kelvin's formula in the vicinity of nonmagnetic-A

표 1 수동계산과 수치해석에 의한 비자성체A에 미치는 힘의 계산

Table 1 The related forces of nonmagnetic-A by hand and numerical calculations

	계산힘 (+가 위로 함함)	비고
① 비자성체A의 무게힘	-0.2148N (21.9gf)	수동계산
② 유체의 중력 부상력 성분	+0.1833N (18.7gf)	수동계산
③ 전자기 부상력 성분	+0.47N	전자기장 수치해석
④ 총합 = ①+②+③	+0.4385N (44.71gf)	(+)이면 비자성체 부상

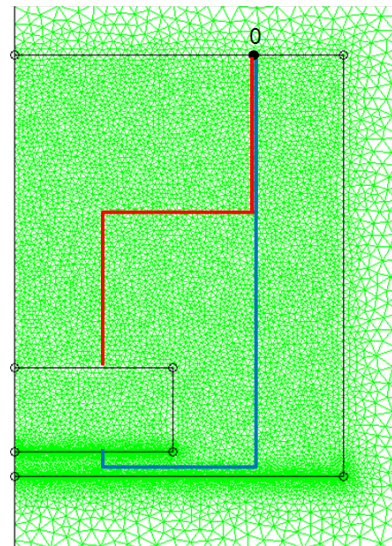


그림 5 해석에 사용된 유한요소도와 표면으로부터의 적분경로. 굵은 두 개의 선은 비자성체의 위아래면의 각 한 점에서의 압력 계산 경로. 총 압력을 계산하기 위해서 위아래면 각 10여개의 점에서 계산.

Fig. 5 Line integration paths for calculating the pressures on nonmagnetic-A surfaces. For total force calculation, 10 pressure points on each surface of solid-A were used. Mesh distribution is also shown.

#### 4. 실험

그림 6에는 그림 2와 그림 3에서 개요와 수치를 제시한 실제 제작모델의 사진을 보여준다. 그림 2에서 보듯이 로드셀load cell이 상부에 장착되어 속이 비어있는 가벼운 플라스틱 튜브를 통해 비자성체A와 연결되어 있다. 플라스틱 튜브의 무게는 약 1g이다. 로드셀은 그림 6의 사진처럼 두 가닥의 선을 통해 로드셀 미터기와 연결된다. 본 실험에서 사용된 로드셀은 최대 100g까지 측정 가능한 사양이다. 자성 유체는 EFH1 hydrocarbon형을 사용하였다. 비투자율은 전 절에서 언급했듯이 포화전에는 1.85수준이다. 비자성체로는 원통형 고무지우개를 사용하였다. 비이커 밑에 놓일 자석을 고정하기 위하여 또 다른 지우개를 자석과 받침대 사이에 끼워 넣었다. 자성유체와 자석은 서로 당기는 힘이 발생하므로 자석은 지우개 밑에 매달려 있게 된다. 자석은 Nd계열이며 잔류자속밀도가 1.225T이다. 받침대와 프레임등은 투명아크릴로 제작하였다.

측정을 위하여 우선, 자성유체를 비이커에 붓지 않은 상태에서 비자성체A와 튜브만의 무게를 로드셀을 통하여 측



정한다. 다음으로 비이커에 자성유체를 붓고 그 높이를 재어 수치해석용 모델인 그림 3의 테이더로 활용한다. 이 상태에서 로드셀로 무게를 다시 측정한다. 이 두 측정을 통하여 수동으로 계산한 값과 측정치가 잘 맞음을 표 1과 표 2에서 확인할 수 있었다. 마지막 단계로 자석을 비이커 아래에 배치하고 자성유체에 자장을 부가한다. 이 상태에서 다시 로드셀을 값을 읽어 냄으로써 전자기 부상력이 더해진 힘을 최종 측정해 낼 수 있는 것이다.

본 실험의 측정 결과는 표 2와 같다. 전자기 부상력의 표 1에서의 수치해석값 0.47N과 표 2의 측정값 0.459N은 2.3% 오차 수준의 좋은 일치율을 보인다. 표 2에서 ③에서 ②을 빼준 19.3gf가 유체의 중력만에 의한 부상력인데, 이 힘이 표 1에서의 계산된 중력 부상력 성분 18.7gf보다 약간 높은 것은 로드셀과 비자성체A의 연결 튜브가 자성유체에 잠긴 부위에서 충분히 자성유체가 내부로 스며들지 않아서 생기는 추가적인 부상력 때문으로 판단된다.

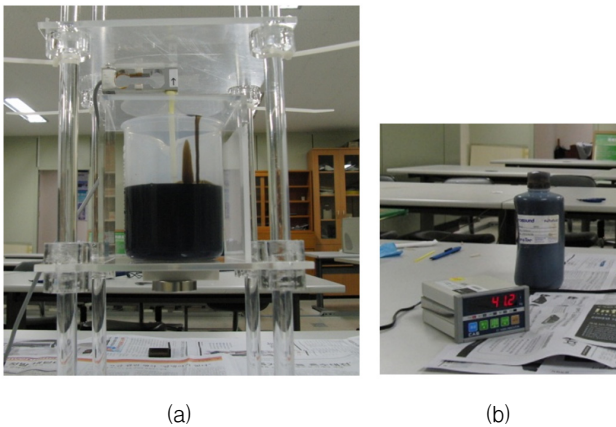


그림 6 실험장치 사진: (a) 최종 측정 단계. (b) 로드셀미터기와 자성유체.

Fig. 6 Photos of experimental measurement: (a) final experimental stage (b) Load-cell meter and magnetic fluid

표 2 로드셀에 의한 무게의 변화 측정.

Table 2 Weight measurements by load-cell

	비자성체A의 측정무게 (+가 위로향함)
① 비자성체A의 무게(튜브포함)	-22.9g
② ①에 자성유체 부가	-3.6g
③ ②에 자석부가	+43.2g
④ 전자기 부상력 성분 = ③-②	+46.8g (0.459N)

### 5. 결 론

자성유체 속에 잠긴 비자성체에 미치는 힘의 계산을 위한 접근방법과 그에 의한 수치해석을 제시하였다. 수치해석 결과는 실제 실험에 의한 측정과 잘 일치함을 보여주었다.

비자성체에 미치는 힘은 고체 자체에 미치는 중력과 자성유체에 미치는 중력에 의한 압력, 그리고 자성유체에 미치는

전자기력에 의한 압력을 모두 고려하여야 한다. 비자성체에 미치는 전자기력을 계산하기 위하여 비자성체를 감싸는 폐쇄면적을 생각하여 그 면적에서의 전자기스트레스의 수직성분을 면적으로 적분하는 것은 본 논문에서 제시된 문제를 해결할 수 없다. 비자성체가 아닌 투자율이 존재하는 다른 고체라 하더라도 마찬가지이다. 이러한 문제는 고체에 미치는 전자기력을 별도로 계산하고, 다시 그 고체를 감싸는 모든 자성유체에 대해 압력을 구하여야 한다. 이 압력은 공기가 접촉하는 면으로부터 선적분을 통해 구할 수 있음을 보였다.

본 논문의 결과는 전자기력을 체적력적인 관점에서 접근하는 것의 타당성을 보이는 하나의 증거로 제시 될 수 있다. 또한 가상공극을 적용한 Kelvin력 계산의 유용성을 보여준다. 자성유체뿐 아니라 유전유체, 즉, 물과 같은 액체에서 전장electric field이 영향을 미치는 문제의 경우에도 동일한 접근방법을 사용할 수 있다. 또한 전장에 의한 역학적 힘의 주로 응용되는 미세전자기시스템MEMS이나 랩온어칩lab on a chip과 같은 분야에서 유용하게 활용할 수 있는 기법이 될 수 있다.

### 감사의 글

이 논문은 2011학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

### References

- [1] 민만기, 서이수, “자성유체의 물리적 성질과 그의 응용”, *대한기계학회지*, 제30권, 제2호, pp. 188-193, 1990년
- [2] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, New York: Dover, 1997.
- [3] C. Rinaldi and H. Brenner, “Body versus surface forces in continuum mechanics: Is the Maxwell stress tensor a physically objective Cauchy stress?,” *Physical Review E*, vol. 65, 036615, 2002.
- [4] 최홍순, 박일한, 문원규, “맥스웰 응력텐서의 물리적 의미 고찰”, *대한전기학회논문지*, 58권 4호, pp. 725-734, 2009년 4월.
- [5] H. S. Choi, Y. S. Kim, K. T. Kim, and I. H. Park, “Simulation of hydrostatical equilibrium of ferrofluid subjected to magneto-static field,” *IEEETrans. onMagnetics*, Vol.44, No.6, pp.818-821, June 2008.
- [6] Alexander J. Smits, *A Physical Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- [7] H. S. Choi, S. H. Lee, and I. H. Park, “Electromagnetic body force calculation based on virtual air-gap,” *Journal of Applied Physics* 99, 08H903, 2006.
- [8] H. S. Choi, I. H. Park, and S. H. Lee, “Force calculation of magnetized bodies in contact using Kelvin’s formula and virtual air-gap,” *IEEE Trans.*

*Appl. Supercond.*, vol. 16, no. 2, pp. 1832-1835, June 2006.

[9] C. Kittel, *Introduction to solid state physics*, John Wiley & Sons Inc., 2005, pp. 453-461

[10] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, New York: McGraw Hill Book Co., 1941, pp. 258-261.

## 저 자 소 개



### 최 홍 순 (崔 鴻 洵)

1963년생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1988년-1994년 삼성전기/삼성 SDS. 1995-1997 기초전력공학연구소 선임연구원. 1997-2003 (주)코모텍 공동창업 및 이사직. 2003.9-2007.2 성균관대학교 정보통신공학부 연구교수. 2007.3-현재 경북대 IT대학 전기공학과.

주 관심분야: 전동기 설계(영구자석형, 대형기/다상/다극), 전기 및 기계 융합역학, 전자기력 이론.

주요 업적: 자동화된 FEM 기반 전동기 설계프로그램 MotorPro개발. 전자기 체적력과 기계역학 방정식과 연계하여 전기기기내의 응력도출을 사고하여야 하는 개념을 제시.

Tel : 054-530-1328  
Fax : 054-530-1329  
E-mail : tochs@knu.ac.kr