

수동부양현상을 이용한 자성유체 작동기 Magnetic Fluid Actuator Based on Passive Levitation Phenomenon

*남윤주¹, 전상현¹, #박명관³

*Y. J. Nam¹, S. H. Jeon², #M. K. Park(mkpark1@pusan.ac.kr)³

¹ 부산대학교 대학원 지능기계공학과, ² 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

Key words : Dynamic characteristic, Magnetic fluid, Passive levitation

1. 서론

자성유체는 물 또는 등유와 같은 기반 유체에 대략 수에서 수십 nm 크기의 직경을 갖는 자성 입자를 안정하게 분산시켜 조성한 콜로이드 유체이다. 이러한 유체는 자기장에 쉽게 반응하는 특징을 갖는다. 최근, 가속도계, 관성댐퍼, 자기 베어링, 회전 쉘 및 스피커 냉각장치와 같이 자성유체를 이용한 다양한 장치들이 개발되어 왔다.^{1,2}

기존 대부분의 자성유체 작동기들은 자기부양(self-levitation) 현상에 기초하여 제안되었다.³ 영구자석이 자성유체에 담겼을 때, 영구자석 주위의 자기장은 자성유체에 자기 체적력(magnetic body force)을 생성한다. 이때, 영구자석은 중력, 부력 및 자기체적력 사이의 정적 힘평형 상태에 놓이게 되며, 이로 인해 영구자석은 자성유체 내부에서 상승 부양할 수 있다. 유사한 방법으로, 비균일 자기장을 이용하여 자성유체의 자기 체적력을 조절함에 의해 자성유체 내에 담긴 비자성체를 상승 부양시킬 수 있으며, 이를 수동부양(passive levitation) 현상이라 한다.⁴

수동부양현상을 이용한 작동기는 적정 크기의 자기장 구배(gradient)를 얻기위해 전자석 또는 공심 솔레노이드와 같은 자기장 생성 시스템을 이용한다. 따라서 비자성체의 상승 위치는 능동적으로 제어될 수 있으며, 다양한 형상의 자기장을 생성시킬 수 있기 때문에 자성유체 내부에 다양한 압력 분포를 구현할 수도 있다.⁵ 이러한 장점에도 불구하고, 자성유체 작동기의 설계 관점에 대한 연구자료가 여전히 부족하다. 또한, 시변 자기장 하에서 자성유체에 담긴 비자성체의 동특성에 대한 연구는 다양한 공학적 응용장치의 개발이라는 관점에서 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고, 기존의 연구들은 정적 자기장 하에서 기초적인 특성에 초점을 맞춰왔다. 따라서 본 연구의 목적은 수동부양 현상을 이용한 자성유체 작동기의 실용적인 설계방법을 제안하고 그것의 동특성을 실험적으로 조사하는 데 있다.

2. 자성유체 작동기의 설계 및 제작

외부 자기장 구배 ∇H 하에서, 정지된 자성유체(밀도: ρ_f)에 담겨진 입자의 형상을 갖는 비자성체(부피: V , 표면적: A , 밀도: ρ_b)에 작용하는 힘들은 다음과 같다.⁴

$$(i) \text{ 중력: } \vec{F}_g = \int_V \rho_b \vec{g} dV = \rho_b \vec{g} V \quad (1)$$

$$(ii) \text{ 부력: } \vec{F}_b = -\int_V \rho_f \vec{g} dV = -\rho_f \vec{g} V \quad (2)$$

$$(iii) \text{ 자기 체적력: } \vec{F}_m = -\mu_0 M \nabla H V \quad (3)$$

여기서 g 는 중력 가속도, M 은 유체의 자화(magnetization), H 는 자기장 강도 그리고 μ_0 는 진공의 자기 투자율이다. 이때, 위 식들은 모두 SI 단위계에서 주어졌다. 그러면, 비자성체의 단위 체적에 작용하는 정적 힘 관계식은 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\vec{F}/V = (\rho_b - \rho_f) \vec{g} - \mu_0 M \nabla H \quad (4)$$

위 식에서 알 수 있듯이, 자기장 무 부하시에 비자성체는 $\rho_b > \rho_f$ 조건 하에서 가라앉는다. 반대로, 중력 가속도와 동일한 방향을 갖는 적정 크기의 자기장 구배가 부하되면, 비자성체는 유체 내부에서 부양될 수 있다. 다시 말해서, 비자성체가 안정적으로 상승, 부양하기 위한 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$M \nabla H \leq (\rho_b - \rho_f) \vec{g} / \mu_0 \equiv \alpha \quad (5)$$

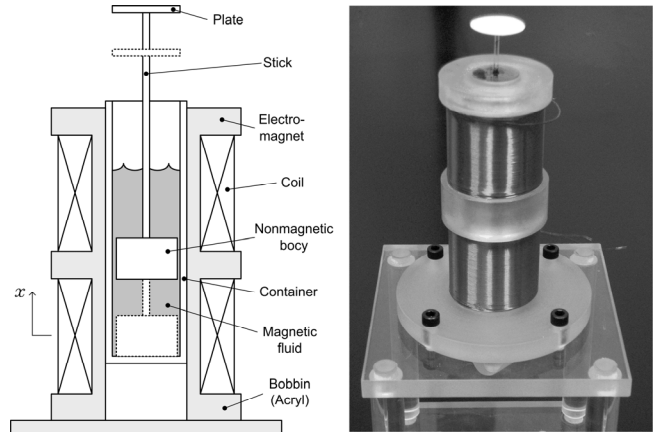


Fig. 1 Magnetic fluid actuator

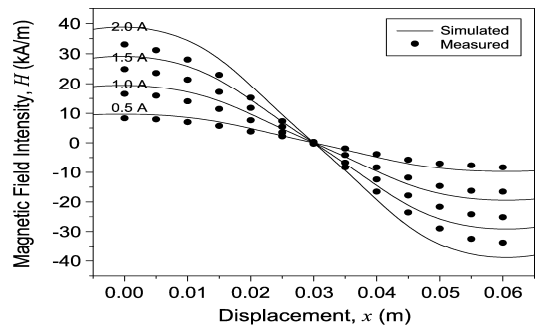


Fig.2 Magnetic field intensity

Fig. 1 은 본 연구에서 제안된 자성유체 작동기의 개략도와 제작된 장치의 사진을 보여준다. 작동기는 자성유체, 비자성체 그리고 자기장 생성 시스템으로 구성된다. 사용된 자성유체는 등유 기반 페리콜로이드 용액인 HC-50 (Taiho Industries Co.)이다. 자성유체의 점성 효과를 고려하기 위해, 동일한 높이(10 mm)를 가지며 각각 다른 직경(10, 13, 14 mm)을 갖는 원기둥 형태의 세가지 비자성체가 준비되었으며, 이들은 상자성체(paramagnetic material)의 일종인 알루미늄($\rho_b = 2700 \text{ kg/m}^3$)으로 제작되었다. 광학 변위계를 이용하여 변위를 측정하기 위해서, 비자성체에는 작은 원형판을 갖는 플라스틱 봉이 부착되었다. 안정된 부양에 적합한 자기장 구배를 얻기 위해서 각각의 N 극이 서로 마주보도록 위치된 한 쌍의 공심 솔레노이드를 이용하였다. 자극 사이의 간극 크기는 30mm 이며, 이들의 내경은 24mm, 외경은 40mm 그리고 길이는 30mm 이다. 각각의 솔레노이드는 0.5mm 의 직경을 갖는 에나멜 선을 1000 회 감아 제작하였으며, 전기 저항은 10.77 Ω 이다. 최대 공급가능한 전류는 2.4A 이며, 모든 실험은 실내(20 $^{\circ}\text{C}$)에서 수행되었다.

3. 자성유체 작동기의 성능평가

3.1 전자기 특성

Fig. 2 은 이론적으로 실험적으로 얻어진 작동기의 자기장 강도를 보여준다. 코일 전류는 0.5A 의 간격으로 0.5A 에서 2.0A 의 범위로 인가하였으며, 이때 자기장 강도는 가우스 미터(Gauss meter)를 이용하여 측정하였다. 예측한 바와

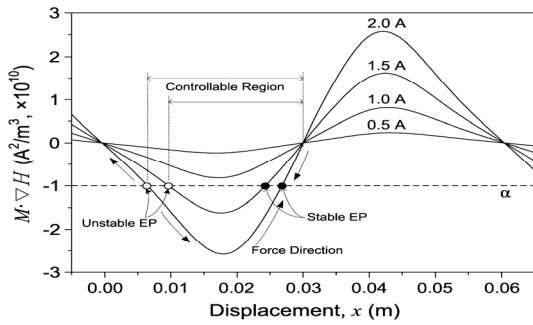


Fig. 3 $M∇H$ curves

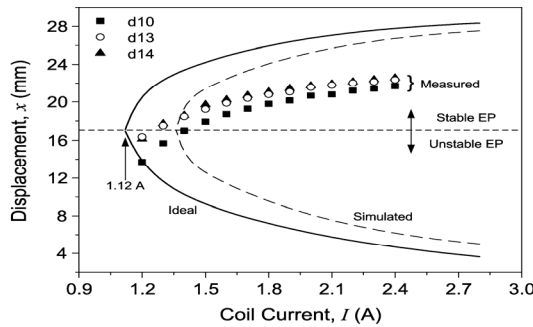


Fig. 4 Displacements vs. coil currents

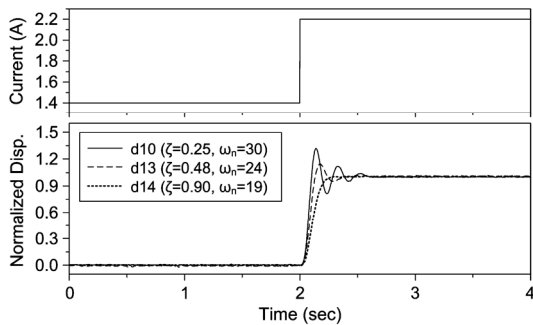


Fig. 5 Normalized step responses

같이, 자기장은 자극 사이의 간극 중심에서 상쇄되었으며, 중심으로부터 멀어질수록 점진적으로 강해짐을 확인하였다. 실험과 시뮬레이션의 비교를 통해, 솔레노이드 시스템의 효율이 대략 85%임을 확인하였다. Fig. 3 는 이론적으로 얻어진 코일 전류에 따른 $M∇H$ 선도를 보여준다. 본 연구에서 이용된 재료의 특성을 고려하면, 식 (5)에 주어진 α 는 $-1.0453 \times 10^{10} \text{A}^2/\text{m}^3$ 이다. 그러면, 식 (5)를 만족하는 코일 전류에 대해서 두 개의 평형점이 존재하며, 하나는 안정한 평형점이며 다른 하나는 불안정한 평형점임을 알 수 있다. 불안정한 평형점에 놓인 비자성체는 기계적 또는 전자기적 외란에 의해 가라앉거나 상승하려는 경향을 갖는다. 이와 반대로, 안정한 평형점에서 임의의 변위만큼 떨어진 비자성체는 평형점으로 복귀하려는 회복력을 갖는다. 따라서, 자성유체에 담겨진 비자성체의 안정적인 부양은 단지 안정한 평형점에서만 가능하며, 이러한 부양 위치는 코일전류에 의해 능동적으로 제어될 수 있다.

3.2 정특성

Fig. 4 는 자성유체에 담겨진 비자성체의 코일 전류에 따른 부양 변위를 보여준다. ‘ideal’ 곡선은 분석적으로 얻어졌으며, ‘simulated’ 곡선은 앞서 구한 솔레노이드의 효율을 고려하여 이론적으로 얻어졌다. 실험은 0.1A 간격으로 1.2 에서 2.4A 의 범위를 갖는 직류 전류를 이용하여 수행되었다. 그림에서 보여준 것처럼, 실험결과는 이론적으로 얻어진 곡선들과 다소 큰 차이를 가졌으며, 이는 식 (4)를 얻는 과정에서 소개된 다음의 가정들로부터 기인된 결과로 사료된

다: (i) 비자성체에 의한 자기장 왜곡은 무시 가능하다, (ii) 비자성체의 체적에 걸쳐서 M 과 ∇H 는 동일하다, (iii) 자성유체의 열적 거동은 무시 가능하다, (iv) 솔레노이드 내부의 반경 방향으로 자기장 강도는 균일하다. 따라서 제안된 작동기의 정특성을 개선하기 위해서는 재료 선정과 보다 정밀한 자기장 해석에 대한 추가 연구가 요구된다. 그럼에도 불구하고, 비자성체의 변위는 코일 전류의 증가와 함께 증가함을 분명히 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터, 안정한 평형점의 존재여부와 자성유체 내부에서 비자성체의 부양 높이에 대한 제어 가능성이 확인되었다.

3.3 동특성

Fig. 5 은 자성유체 작동기의 계단 응답특성을 보여준다. 처음에, 비자성체는 1.4A 의 코일 전류에 대응하는 위치에서 안정적으로 부양하고 있었다. 2 초 후, 2.2A 의 코일 전류를 인가하면, 비자성체는 오버슛(overshoot)과 점성 댐핑(viscous damping)을 갖는 전형적인 계단 응답 거동을 보였다. 따라서, 각각의 다른 직경을 갖는 비자성체에 대한 댐핑 계수 ζ 와 공진 주파수 ω_n 은 실험 결과와 2 차 선형 시스템을 이용한 시뮬레이션 결과의 비교를 통해서 구해졌다. 비자성체 직径의 영향을 효과적으로 조사하기 위해서, 얻어진 데이터들은 각각의 최대, 최소값들을 이용하여 정규화하였다. 결과로부터, 상대적으로 큰 직경을 갖는 비자성체가 더 작은 공진 주파수와 더 큰 댐핑 계수를 가짐을 확인할 수 있다. 이는 비자성체와 자성유체 컨테이너 벽 사이의 유체 점성 효과로부터 기인된 것이다. 따라서 자성유체 작동기의 동특성을 개선하기 위한 비자성체의 최적화된 크기가 존재함을 확인하였다. 또한, 모든 경우에서 정착시간이 0.5sec 이내임을 고려할 때 제안된 작동기는 낮은 주파수 대역의 진동을 억제하기 위한 능동형 댐퍼로 활용될 수 있음을 기대할 수 있다.

4. 결론

- (i) 충분한 크기의 자기장 구배 하에서, 자성유체에 담겨진 비자성체의 부양을 위한 두 개의 평형점이 존재함을 확인하였다. 이때, 안정한 부양은 단지 하나의 평형점에서만 가능하다.
- (ii) 비자성체의 부양 위치는 코일 전류를 조절함에 의해 능동적으로 제어될 수 있으며, 이는 제안된 자성유체 작동기가 다양한 공학 장치에 응용될 수 있음을 보여준다.
- (iii) 자성유체 작동기의 동특성은 비자성체의 무게 및 비자성체와 자성유체 컨테이너 사이의 간극 크기에 크게 의존한다. 이러한 설계 변수들은 작동기의 적용 분야에 따라 적절하게 최적화될 수 있다.

참고문헌

1. Raj, K., Moskowitz, B., and Caciari, R., J. Magn. Magn. Mater., **149**, 174, 1995.
2. Popplewell, J. 1984, Physics in Technology, **15**, 150, 1984.
3. Sudo, S., Ise, K., and Ikohagi, T., J. Intell. Mater. Syst. Struct., **13**, 539, 2002.
4. Rosensweig, R. E., Ferrohydrodynamics, Cambridge, Cambridge university press, 1985.
5. Yamane, R., Oshima, S., and Park, M. K., J. Magn. Magn. Mater., **289**, 389, 2005.