

자성유체의 형상에 따른 선형 펌프의 펌핑력에 관한 연구

서강, 박관수
부산대학교 전자전기컴퓨터정보공학부

Research of Pumping Force according to Shape of Magnetic Fluid in Magnetic Fluid Linear Pump

Kang Seo, Gwan Soo Park
Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University

Abstract – 자성유체를 이용하여 동작하는 선형 펌프를 개발하였다. 자성유체의 자기적 성질을 이용하여 구동하는 선형펌프로 일반 펌프에 비해 구조가 간단하고, 진동/소음이 작다는 장점이 있다. 또한 외부에서 인가하는 자기장의 조절만으로 펌프를 조절할 수 있다. 개발한 펌프는 자성유체의 관내에서의 형상에 따라 펌핑력이 매우 달라진다. 따라서 외부에서 인가하는 자기장에 의해 형성되는 자성유체의 형상을 해석하고, 이로 인해 형성되는 자성유체에 의해 발생하는 펌핑력을 측정하고 비교하였다.

1. 서 론

자성유체는 3가지 기본적인 구성 요소인 자성미립자, 계면활성제 그리고 캐리어로 구성되어져 있는 안정된 쿠로이드 액체로서 자성적 성질을 가지고 있다. 자성유체는 다른 액체와는 달리 외부의 힘에 의해서 이동한다. 즉, 외부에서 자기장을 걸어줄 경우 자기장의 모양으로 모이게 된다. 지금까지는 자성유체의 적용범위가 그리 넓지 않으나 응용범위를 개척하기에 따라 액상 자성체의 성질을 이용한 특수용도로 활용될 수 있다. 자성유체의 자기적인 특징을 이용하여 Magnetic Fluid Linear Pump(MFLP)를 개발하였다. 이 펌프는 외부에서 관내로 인가하는 자기장을 조절하여 자성유체의 형상을 조절함으로 해서 펌핑 압력과 속도, 방향을 조절할 수 있다. 결국 펌프의 펌핑 압력과 속도는 자성유체의 형상과 밀접한 관계가 있으며, 이러한 자성유체의 형상을 결정하는 것은 외부에서 인가하는 자기장이 된다. 따라서 본 논문에서는 MFLP의 성능을 결정하는 외부에서 인가하는 자기장을 해석하고 이러한 자기장의 영향으로 반응하고 동작하는 자성유체의 관내에서의 형상을 해석하였으며, 별도의 실험 장치를 제작하여 해석된 자성유체의 형상과 비교하였다. 또한 이렇게 형성된 자기장에 의해서 발생하는 펌핑력을 측정하였다.

2. 본 론

2.1 MFLP의 구조

Fig. 1은 Linear Pump의 구조를 나타낸 것으로 Thin Rubber에 Magnetic Fluid를 밀봉하여 넣게 된다. 이때 차폐 고무 막은 자성유체의 흐름을 방해하지 않을 정도로 부드러워야 하고 젖어지지 않을 만큼 튼튼해야 한다. 그리고 Coil이 감긴 Yoke 4개가 판을 둘러싼다. Coil이 감긴 Yoke의 양 측 사이에 판이 있는 구조로 Magnetic Yoke로 자기저항을 최소하였다. 따라서 Linear Pump 동작에 중요한 요소인 자기장의 세기는 증가하고 Linear Pump의 펌핑압력 또한 커지게 된다. Fig. 2는 실제 제작한 MFLP이다. Fig. 3은 제어회로에 연결된 MFLP System이다.

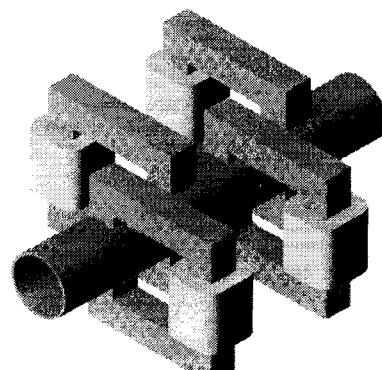
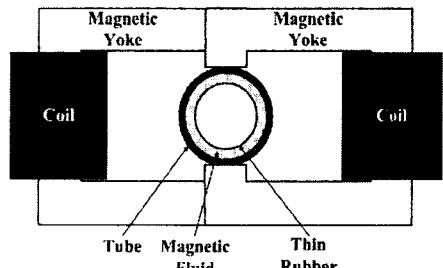
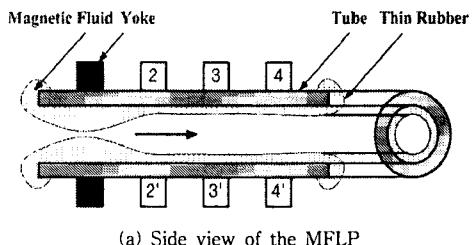


Fig. 1 Structure of the Magnetic Fluid Linear Pump

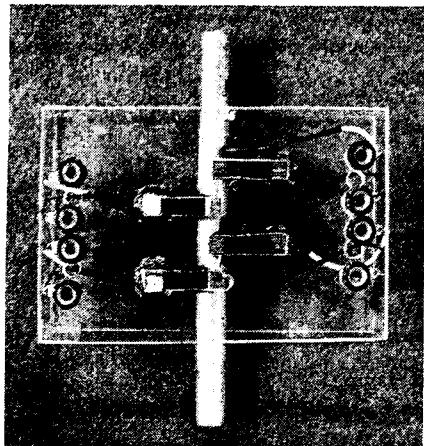


Fig. 2 Fabrication of the Magnetic Fluid Linear Pump

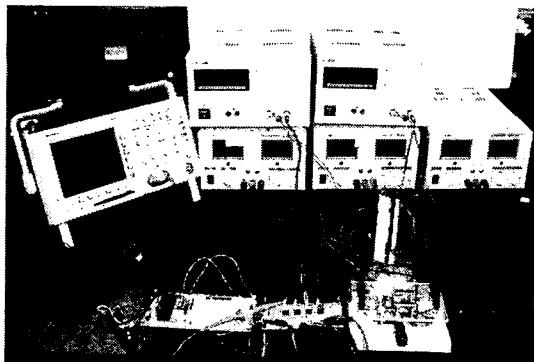


Fig. 3 the Magnetic Fluid Linear Pump System

2.2 자성유체의 형상 해석

자성유체는 압축할 수도 없고 무점도이며 균질인으로 가정한다. 또한 자성유체의 유동은 없다고 가정한다. 이러한 상태의 자성유체는 질량 보존 법칙과 운동량 보존 법칙을 만족한다. 이 것은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot V = \frac{d\rho}{dt} \quad (6)$$

$$F = \rho \frac{dV}{dt} = \rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho (V \cdot \nabla) V \quad (7)$$

여기서 ρ 는 단위 체적당 중량이고, V 는 속도 벡터이다. 식 7에서의 F 는 다음과 같다.

$$F = F^g + F^m + F^e \quad (8)$$

여기서 F^g 는 중력으로

$$F^g = -\nabla U \quad U = \rho gh \quad (9)$$

와 같고, F^m 은 기계력으로

$$F^m = -\nabla P \quad (10)$$

이며, F^e 는 전자기력으로

$$F^e = -\nabla \Psi \quad (11)$$

와 같다. 여기서 Ψ 는 매질의 전자기 에너지이며

$$\Psi = - \int M dH \quad (12)$$

와 같다. 그래서 식 7을 다시 나타내면

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho (V \cdot \nabla) V = -\nabla U - \nabla P - \nabla \Psi \quad (13)$$

이다. 식 13을 다음과 같은 벡터 회전을 이용하면

$$(V \cdot \nabla) V = \nabla \left(\frac{1}{2} V^2 \right) - V \times (\nabla \times V) \quad (14)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \left(P + \Psi + \frac{1}{2} \rho V^2 + U \right) = \rho V \times (\nabla \times V) \quad (15)$$

와 같이 된다. 유체의 유동이 없는 상태에서 속도항은 0이 된다. 따라서

$$\text{식 15에서 } \frac{\partial V}{\partial t} \rightarrow 0 \text{이 되므로}$$

$$\nabla \left(P + \Psi + \frac{1}{2} \rho V^2 + U \right) = \rho V \times (\nabla \times V) \quad (16)$$

와 같이 다시 나타낼 수 있다. 유체가 회전하지 않는다면

$$(\nabla \times V) = 0, \quad V = -\nabla \psi \quad (17)$$

와 같은 식이 적용된다. 그래서 식 16은

$$P_i - \int M dH + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gh = C \quad (18)$$

와 같이 된다. 여기서 P_i , M , H , ρ , g , h 는 각각 내부 압력, 자화, 자기장, 질량밀도, 중력상수, 액체높이이다. C 는 유체 상수로 유체역학적으로 액체 표면을 따라 일정하다. 표면평형상태를 만족하기 위해 자속 밀도의 법선 성분과 자계의 세기의 접선성분은 자성유체의 표면에서 연속적이다. 그래서 유체표면에서의 압력은

$$P_o = P_i + \int M dH + \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 \quad (19)$$

와 같다. 식 18과 식 19로부터

$$P_o = 2 \int M dH - \frac{1}{2} \rho V^2 - \rho gh + \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 + C \quad (20)$$

와 같이 된다. 여기서 P_o 와 M_n 은 각각 입력과 자화의 법선 성분이다. 식 20을 C에 대하여 정리하면

$$C = P_o - 2 \int M dH - \rho gh - \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 \quad (21)$$

이다. 이 방정식의 유체 상수 C 는 자성유체의 곡선 S 를 결정한다. 이 알고리즘은 일정한 자성유체의 부피이다.

2.3 MFLP 관내 자성유체의 형상

2.2절에서 서술한 수치적 알고리즘을 MFLP에 적용하여 관내에서의 자성유체가 외부자기장에 반응한 형상을 해석하고, 별도의 실험 장치를 통하여 확인하였다. Fig. 4는 외부에서 공급하는 전류에 의해 발생된 자기장에 의해 형성되는 자성유체의 형상을 해석한 것이다. 관내에서 충분히 자기장을 발생시키지 못하면 Fig. 4와 같이 자성유체의 형상이 잘 형성되지 않는다. 따라서 펌핑력을 높이기 위해서는 충분한 자기장을 관내에 형성하여야 하며, 충분한 자기장에 의해서 높은 펌핑력을 발생시키는 자성유체가 형성된다.

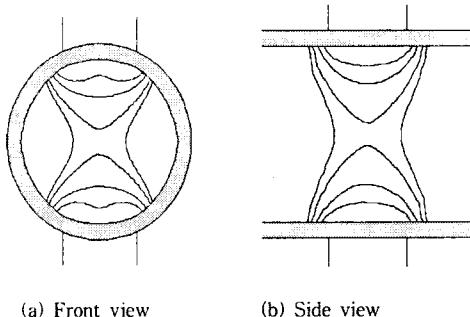


Fig. 4 Computed forming shape of the Magnetic Fluid according to magnetic field inside the MFLP

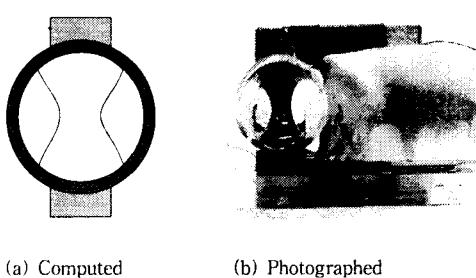


Fig. 5 Front view of the magnetic fluid inside the MFLP

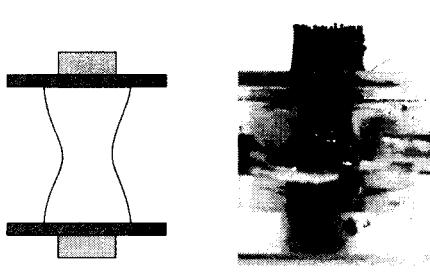


Fig. 6 Side view of the magnetic fluid inside the MFLP

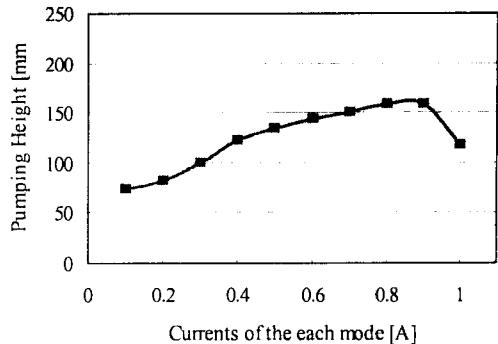


Fig. 7 Pumping Force according to forming shape of the magnetic fluid

2.4 결과

Fig. 5(a), 6(a)는 자성유체를 2.2절에서 서술한 알고리즘을 통해 해석한 것이고, Fig. 5(b), 6(b)는 실제 자성유체를 측정하여 활용한 것이다. Fig. 5, 6을 통하여 2.2절에서 서술한 수치적 알고리즘이 실제 자성유체의 형상과 유사함을 확인할 수 있다. 자성유체의 형상은 외부에서 인가하는 전류에 의해 발생하는 자기장의 분포에 의해 결정되고 충분한 자기장을 발생시키지 못하면 아주 낮은 펌핑력을 발생시킨다. 외부에서 공급하는 전류의 크기에 의해 발생하는 펌핑력을 측정한 것이 Fig. 7이다. 전류가 작을 경우는 평평력이 낮다. 이것은 자성유체가 형성되기 위한 충분한 자기장을 발생시키지 못하고 있는 것으로 0.8A에서 최대의 평평력이 발생한다. 또한 0.8A 이상에서는 오히려 펌핑력이 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

자성유체의 자기적 성질을 이용하여 제작한 MFLP의 성능을 결정하는 중요한 요소는 외부에서 인가하는 자기장이며, 인가된 자기장에 의하여 자성유체의 형상을 결정하게 된다. 본 논문에서는 외부에서 인가되는 전류에 의해 발생되는 자기장을 해석하고, 자기장에 의해 형성되는 자성유체의 형태에 따라 MFLP의 펌핑력을 측정하였다. 또한 자성유체의 형상을 해석하는 수치적 알고리즘을 MFLP에 적용하여 해석한 자료와 실제 자료를 비교하였으며, 거의 일치함을 확인하였다. 앞으로 수치적 알고리즘을 통하여 펌프의 성능을 향상시키기 위한 해석과 유연한 운전 방식 개발이 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] G.S.Park, D.H.Kim, S.Y.Hahn and K.S.Lee, "Numerical algorithm for analyzing the magnetic fluid seals.", IEEE Trans.Magn. Vol.30, pp. 3351-3354, Sept.1994
- [2] G. S. Park and S. H. Park, "Determination of the Curvature of the Magnetic Fluid under the External Forces", IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 2, pp. 957-960, March 2002
- [3] Gwan Soo Park, Kang Seo, "A Study on the Pumping Forces of the Magnetic Fluid Linear Pump" IEEE Trans. Magn., vol. 39, no. 3, pp. 1468-1471, May 2003