

AC Pulse에 의한 Magnetic Fluid Linear Pump의 펌핑력 향상에 관한 연구

서강, 박관수
부산대학교 전기공학과

Improvement of the Pumping Force in the Magnetic Fluid Linear Pump by AC Pulse current

Kang SEO, Gwan soo PARK
Dept. of electrical engineering

Abstract - 이 전에 DC Pulse 전류로 구동하는 Magnetic Fluid Linear Pump(MFLP)를 개발하였다. 개발된 MFLP는 DC Pulse 전류에 의하여 발생하는 자기장의 분포 변화가 불연속적이게 되고, 펌핑력 또한 불연속성을 가지게 된다. 불연속적 자기장의 변화와 펌핑력의 불균일성을 저감하였다. 펌핑력을 증가시키기 위하여 AC 전류를 이용하였으며, 이에 따른 펌프의 운전 특성을 파악하기 위하여 자기장의 분포와 자성유체의 형상을 해석하였다.

1. 서 론

Magnetic Fluid는 자성체의 성질을 갖는 액체이다. Magnetic Fluid는 외부에서 자기장을 걸어줄 경우 자기장의 모양으로 모이게 된다.

이전에 우리는 Magnetic Yoke를 이용하여 Magnetic Fluid Linear Pump를 설계 제작하였다. 이 Linear Pump는 Magnetic Yoke에 의해 자기회로가 구성되므로 자기저항을 최소화할 수 있으며, 관내의 자기장을 증가시킴으로써 Linear Pump의 펌핑 압력을 증가시킬 수 있다. 그러나 DC 펄스 전류로는 펄스가 변하는 Time delay로 인하여 펌핑되는 유체가 역류하게 되어 Pumping Force를 작게 만드는 원인이 된다.

이러한 유체의 역류를 막고 Pumping Force를 증가시키기 위하여 90°위상차의 4상 교류 반파 전류를 이용하여 관내에 이동 자기장을 형성하고, 시간에 따라 연속적인 자기장의 분포와 자성유체의 연속적인 흐름을 만들어 분사식 펌핑을 할 수 있도록 하였다.

2. Linear Pump의 구조

Fig. 1, 2는 Linear Pump의 구조를 나타낸 것으로 Thin Rubber에 Magnetic Fluid를 밀봉하여 넣게 된다. 이때 차폐 고무 막은 자성유체의 흐름을 방해하지 않을 정도로 부드러워야 하고 찢어지지 않을 만큼 튼튼해야 한다. 그리고 Coil이 감긴 Yoke 4개가 관을 둘러싼다. Coil이 감긴 Yoke의 양 극 사이에 관이 있는 구조로 Magnetic Yoke로 자기저항을 최소화하였다. 따라서 Linear Pump 동작에 중요한 요소인 자기장의 세기는 증가하고 Linear Pump의 펌핑압력 또한 커지게 된다. Fig. 3은 실제 제작한 Magnetic Fluid Linear Pump이다.

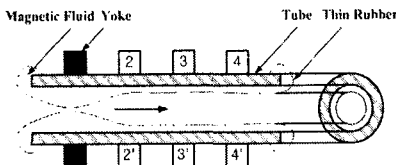


Fig. 1 Structure of the Magnetic Fluid Linear Pump (2D)

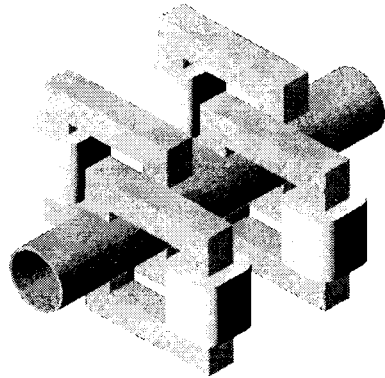


Fig. 2 Structure of the Magnetic Fluid Linear Pump (3D)

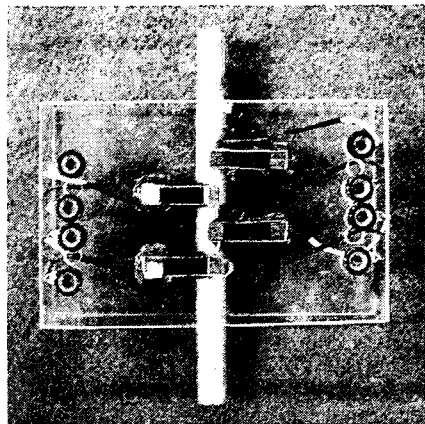


Fig. 3 Fabrication of the Magnetic Fluid Linear Pump

3. 관 내 자성유체의 흐름 해석

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

$$\rho \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{d\rho}{dt} \quad (1)$$

와 같은 식이 적용된다. 그래서 식 11은

$$\mathbf{F} = \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \quad (2)$$

$$P_i - \int M dH + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gh = C \quad (13)$$

여기서 ρ 는 단위 체적당 중량이고, \mathbf{V} 는 속도 벡터이다. 식 2에서의 \mathbf{F} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^g + \mathbf{F}^m + \mathbf{F}^e \quad (3)$$

와 같이 된다. 여기서 P_i, M, H, ρ, g, h 는 각각 내부 압력, 자화, 자기장, 질량밀도, 중력상수, 액체높이다. 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

여기서 \mathbf{F}^g 는 중력으로

$$\mathbf{F}^g = -\nabla U \quad U = \rho gh \quad (4)$$

$$P_o = P_i + \int M dH + \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 \quad (14)$$

와 같고, \mathbf{F}^m 은 기계력으로

$$\mathbf{F}^m = -\nabla P \quad (5)$$

와 같다. 식 13과 식 14로부터

$$P_o = 2 \int M dH - \frac{1}{2} \rho V^2 - \rho gh + \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 + C \quad (15)$$

이며, \mathbf{F}^e 는 전자기력으로

$$\mathbf{F}^e = -\nabla \Psi \quad (6)$$

와 같다. 여기서 Ψ 는 매질의 전자기 에너지며

$$\Psi = -\int M dH \quad (7)$$

와 같이 된다. 여기서 P_o 와 M_n 은 각각 입력과 자화의 법선 성분이다. 식 15를 C 에 대하여 정리하면

$$C = P_o - 2 \int M dH + \rho gh - \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 \quad (16)$$

와 같다. 그래서 식 2을 다시 나타내면

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla U - \nabla P - \nabla \Psi \quad (8)$$

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

4. Linear Pump의 동작 전류

이다. 식 8을 다음과 같은 벡터 회전을 이용하면

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \nabla \left(\frac{1}{2} V^2 \right) - \mathbf{V} \times (\nabla \times \mathbf{V}) \quad (9)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \left(P + \Psi + \frac{1}{2} \rho V^2 + U \right) = \rho \mathbf{V} \times (\nabla \times \mathbf{V}) \quad (10)$$

와 같이 된다. 유체의 유동이 없는 상태에서 속도항은 0

이 된다. 따라서 식 10에서 $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = 0$ 이 되므로

$$\nabla \left(P - \int M dH + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gh \right) = \rho \mathbf{V} \times (\nabla \times \mathbf{V}) \quad (11)$$

와 같이 다시 나타낼 수 있다. 유체가 회전하지 않는다면

$$(\nabla \times \mathbf{V}) = 0, \quad \mathbf{V} = -\nabla \psi \quad (12)$$

이전에 사용한 Operating Current는 DC 펄스 전류를 이용하여 Linear Pump를 동작시킨다. 각 모드에서의 펄스간격을 유출속도로 제한하고, 각 코일에서 펄스의 크기는 유출하는 펌핑 압력을 결정한다. 모드에서 모드로 넘어가는 동안 자기장의 분포가 공백이 생기고 이러한 동안 펌핑되는 유체가 역류하여 Pumping Force를 감소시키게 된다. 이러한 유체의 역류를 막기 위해서 Fig. 4와 같은 AC 전류를 사용하여 불연속적인 부분을 최소화시키기 위하여 각 모드별로 90°의 위상차를 가지게 하여 4상의 반파 교류 전류를 사용하였을 경우 Fig. 5와 같은 연속적인 자기장의 분포를 가지게 된다. 이것은 분사식으로 Linear Pump를 펌핑할 수 있다. 또한 펌핑되는 유체의 역류 문제가 해결되어 Pumping Force가 증가하게 된다. 이와 같은 4상 교류 전류를 이용하여 이동 자기장을 형성하게 될 경우 Linear Pump의 Yoke가 4개이므로 Linear Pump가 더욱욱 소형·경량화하게 된다. Fig. 6은 Linear Pump와 펌프를 구동시키기 위한 시스템이다. 펌프의 동작 특성을 파악하기 위하여 자기장의 분포와 자성유체의 형상에 대하여 해석하였으며 이것을 90° 위상차의 4상 AC 전류일 때의 자성유체의 형상 변화에 대하여 측정하였다. 해석한 것과 측정된 정한자성유체의 형상을 비교한 것을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7은 시간과 위치에서의 자기장의 분포를 나타내는 것으로 불연속적이던 것이 거의 없음을 확인할 수 있다.

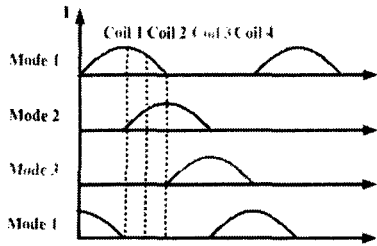


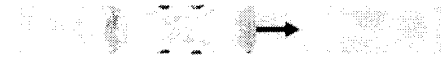
Fig. 4 Operating Current (AC)



(a) Mode 1

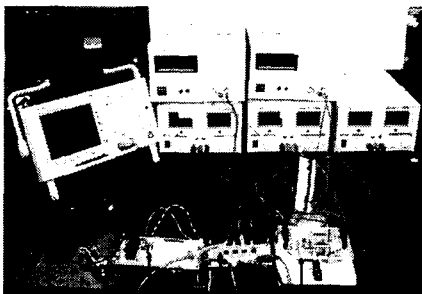


(b) Intermediate state



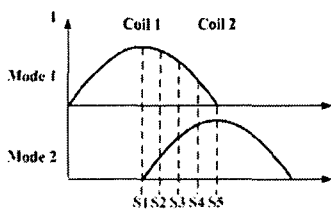
(c) Mode 2

Fig. 5 Computed forming shapes in AC driving

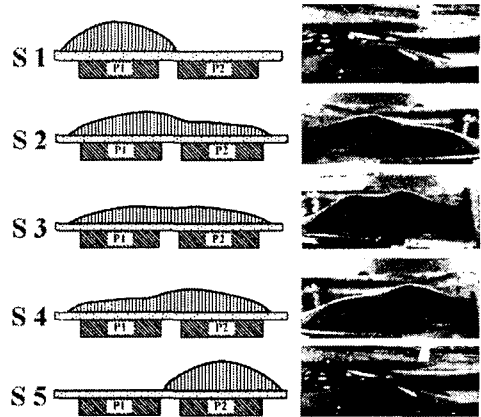


Inverter Linear Pump

Fig. 6 Driving System of the MFLP



(a) Currents at each moment
(t=S1, S2, S3, S4, S5)



(b) Forming Shape of the Magnetic Fluid

Fig. 7 Computed and Measured Forming Shapes at each moment in AC driving

5. 결론

본 논문에서는 Magnetic Fluid를 이용하여 기어와 같은 기계적 부품이 없는 소형·경량의 Linear Pump를 설계하고 제작하였다. Pumping Force를 증가시키기 위하여 기존의 직류 전류의 펄스 전류가 아닌 90°위상차의 4상 교류 반파 전류를 이용하였다. 이러한 Operating Current를 이용해서 Linear Pump의 분사식 펌핑이 가능하게 했으며 DC 펄스 전류에서의 펌핑의 불연속 부분을 최소화시켰다. 또한 Yoke가 4개면 되므로 Linear Pump를 더욱더 소형·경량화할 수 있었으며, Pumping Speed를 교류의 주파수만으로 조절할 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] D. Verotta, "A general solution for nonparametric control of a linear system using computer controlled infusion pumps." IEEE Trans.Magn. Vol.46, pp. 44 50, Jan.1999
- [2] 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
- [3] G. S. Park and S. H. Park, "New Structure of the Magnetic Fluid Linear Pump", IEEE Trans. Magn., vol. 36, no. 5, pp. 3709-3711, September 2000.
- [4] 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.
- [5] Gwan Soo Park and Kang Seo, "New Design of Magnetic Fluid Linear Pump to Reduce the Discontinuities of the Pumping Forces", IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 3, pp.710 713, May 2004.