

Magnetic Fluid Linear Pump의 AC 전류에 의한 운전 특성에 관한 연구

論 文
54B-3-1

Study of the Driving Characteristics in the Magnetic Fluid Linear Pump by AC Operating Currents

徐 康^{*} · 朴 寬 秀^{*}
(Kang Seo · Gwan Soo Park)

Abstract - In the magnetic fluid linear pump, the pumping forces and pumping speed mainly depend on the current patterns. In this research, a new design to reduce the discontinuities of the pumping forces of the MFLP was studied. Continuous pumping of the newly designed MFLP by using AC current increases pumping efficiency and reduces the pumping force. Forming shapes of the magnetic fluid at the intermediate state were computed and compared to measurement. Since the back flow of the fluid is reduced remarkably, 4 yoke's AC driving is more efficient than 7 yoke's DC driving. The size, weight and pumping discontinuity are also reduced.

Key Words : Finite Element Analysis, Fluid Surface, Magnetic Fluid, Magnetic Fluid Linear Pump, Linear Pump, Pump Magneto-Hydrodynamics

1. 서 론

의료용 소형펌프는 인체에 완전히 삽입되어 동작되기 때문에 소형, 경량화, 정속운전, 유연동작, 고 효율화 될 필요가 있으며 이를 위하여 .근년 들어 새롭고 다양한 연구가 이루어지고 있다. 1998년 일본 연구진은 기어를 없애고 다극의 두 쌍으로 된 영구자석을 사용하여 한 자석의 회전을 다른 영구자석의 진동으로 변환하는 구조를 연구하였다. 이 경우 기어와 같은 부품은 없었으나 회전을 직선운동으로 바꾸는 방식은 같기 때문에 여전히 진동소음문제를 제거하지 못하기 때문에 에너지 효율이 낮고, 두 쌍의 영구자석이 회전하는 구조로 인하여 소형화, 경량화가 어렵다. 그 대안으로 연구되고 있는 선형 왕복 운동기(linear oscillatory actuator)는 동작 부위가 복잡하고, BLDC 모터는 힘이 세지만 전자파가 많고, 초음파 모터는 소형에 큰 힘을 낼 수 있으나 소음, 진동 등의 동작여건으로 인하여 인체에 사용하기에는 무리가 있다. 현재 가장 가능성 있는 기기로 생각되었던 선형 펄스 모터의 경우 회전식에 비하여 소형, 경량화가 가능하고 부품이 적은 등의 장점이 있지만 역시 선형 기계력을 변환시키는 밸브와 같은 기계적 부품이 필요하고, 무엇보다 펄스가 가해질 때 과도한 힘이 생기고 이에 따라 일시적으로 환자들에게 쇼크를 줄 수 있는 문제가 있고, 펄스가 없을 때 반대의 펌핑력이 생기는 등 유연한 제어가 어려운 단점이 있다.[1] [6]

본 연구진은 의료용 소형 펌프에 필요한 조건에 부합하도록 자성유체(Magnetic Fluid)를 이용한 선형 펌프를 개발하였다.[8] [11] 이것은 자성유체가 자성체의 성질을 갖는 액체로써, 외부에서 자기장을 걸어줄 경우 자기장의 모양으로 모이게 되는 특성을 이용한 것으로 기어나 밸브가 없고 코일의 순차적인 여자만으로 동작한다는 이점을 가지고 있다. 최초로 개발된 MFLP는 자기회로가 공기에 의해 형성이 되어 자기저항이 매우 높고 자기효율이 낮아 펌핑력이 아주 작았다.[8] 이를 보완하기 위해 두 번째에 개발된 MFLP는 자기요크를 이용하여 자기회로를 형성하게 하여 자기저항을 작게하고 자기효율을 증가시켜 펌핑력을 매우 향상시켰다.[9] [11] 두 번째에 개발된 MFLP는 DC 펄스 전류로 구동되는 것으로 모드가 변화하게 되는 지점에서 시간지연으로 인한 펌핑력 약화가 발생했다. 이것은 펌핑 중이던 유체가 시간지연으로 인하여 힘의 연속성이 유지하지 못하고 유체가 역류해서 발생하는 것이다. 이러한 시간지연은 펌핑력을 작게하고 MFLP의 유연한 동작을 방해하는 요인이 되었다.

따라서 본 연구에서는 DC 펄스 전류에 의해 발생하는 유체의 역류를 막고 펌핑력을 증가시키기 위하여 90° 위상차의 4상 교류 반파 전류를 이용하여 이러한 문제를 해결하였으며, 두 번째 개발한 MFLP보다 소형, 경량화하였다.

2. MFLP의 구조와 동작

2.1 MFLP의 구조

그림 1은 두 번째 개발한 MFLP의 구조를 나타낸 것으로 코일이 감긴 자기 요크 7개가 관의 외부를 둘러싸며, 관의 내부에는 차폐 고무막에 밀봉된 자성유체가 관 내벽에 위치

* 교신저자, 正 會 員 : 釜 山 大 學 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

E-mail : kalam@pusan.ac.kr

* 正 會 員 : 釜 山 大 學 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2004年 7月 6日

最 終 完 了 : 2005年 1月 5日

한다. 새로운 형태의 MFLP는 두 번째 MFLP보다 요크의 수가 3개가 줄어 4개로 구성되어 있다. 그 외의 구조는 두 번째 MFLP와 동일하며 새로운 형태의 MFLP를 그림 2와 3에 나타내었다. 그림 2는 새로운 형태의 MFLP로서 삼차원으로 나타낸 것이고, 그림 3은 이차원으로 나타낸 것이다. 제작에 있어 중요한 것은 자성유체의 자기적 성질과 차폐 고무막이며, 차폐 고무막은 자성유체의 흐름을 방해하지 않을 정도로 부드러워야 하고 찢어지지 않을 만큼 튼튼해야 한다. 코일이 감긴 요크의 양 극 사이에 관이 있는 구조로 자기 요크로 자기저항을 최소화하였다. 따라서 MFLP의 구동에 중요한 요소인 자성유체의 동작을 발생시키는 자기장의 세기는 증가하고 MFLP의 펌핑 압력 또한 커지게 된다. 펌프의 관 내 자기장 분포와 세기는 요크의 폭·길이, 요크 간의 간격에 의해 결정된다. 요크의 폭과 길이가 클 경우는 자기장의 분포가 전체적으로 퍼지게 되고 중심에서의 자기장의 세기가 약하게 된다. 작을 경우는 자기장의 세기는 증가하지만 자기장의 분포가 한 곳으로 집중되게 되어 최적화가 필요하다. 또한 요크 간의 간격이 가까우면 자기 유도에 의해 주위의 요크에 자기력이 발생하게 되고 멀게 되면 자기 유도는 없으나 모드에 모드로 넘어가는 구간이 커지게 되어 펌핑력이 약화되므로 이 또한 최적화가 필요하다. 따라서 삼차원 유한 요소법을 이용하여 요크의 폭, 길이, 간격을 변화하여 해석하였다. 이 결과를 관의 직경에 비례하는 요크의 폭·길이, 요크간의 간격으로 검토하였다. 이렇게 해석된 결과 길이의 비율이 커질수록 자기장의 세기가 선형적으로 증가하였으나 0.6 이후부터는 자기장의 세기가 증가하는 하지만 큰 폭으로 변화하지는 않았다. 따라서 MFLP는 요크의 폭, 길이, 간격 모두가 관 직경의 0.6에서 최적화됨을 확인하였다. 이것은 자기장의 세기가 클수록 좋으나 의료용 소형 펌프의 특성인 소형·경량화를 고려한 최적화이다.¹⁾²⁾ 이렇게 최적화된 요크를 직경 13mm 관에 맞추어 설계하였으며, 두께 0.2mm의 규소강판을 적층하여 제작하였다. 여기에 직경 0.2mm의 코일을 1000턴을 감았으며 코일과 요크 사이의 절연은 절연지와 절연 테이프를 이용하였다. 제작된 새로운 형태의 MFLP를 그림 4에 나타내었다.

2.2 MFLP의 동작

MFLP의 동작은 순방향 펌핑, 역방향 펌핑, 온오프 스위칭의 3가지 동작으로 구분할 수 있다. MFLP의 펌핑 동작은 4가지 모드로 구분하여 동작한다. 4가지 모드는 모드 1, 모드 2, 모드 3, 모드 4로 구분하며, 모드 1은 그림 3에서의 1번 요크의 코일이 여자되어 기전력을 발생시키고, 모드 2는 2번 요크에 의해 기전력이 발생되며, 모드 3은 3번 요크에 의해 기전력이 발생되고, 모드 4는 4번 요크에 의해 기전력이 발생된다. 먼저 순방향 펌핑은 모드 1, 모드 2, 모드 3, 모드 4 순으로 1주기를 이루어 펌핑하게 되며 그림 5와 같다. 역방향 펌핑은 순방향 펌핑의 반대 방향으로 펌핑하는 동작으로 모드 4, 모드 3, 모드 2, 모드 1 순으로 1주기를 이루어 펌핑하는 동작으로 그림 6과 같다. 온오프 스위칭은 유체의 흐름을 개방하거나 차단하는 동작이다. 온 스위칭은 4개의 요크가 모두 동작하지 않아 기전력이 전혀 발생하지 않게 되어 관내가 개방되는 동작이다. 오프 스위칭은 2-3번

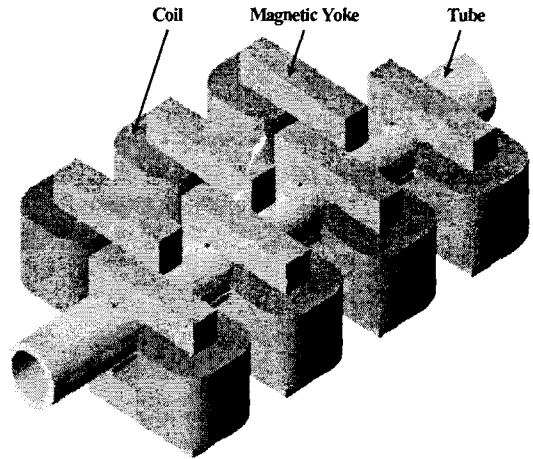


그림 1 두 번째 개발한 MFLP의 구조 (3D)
Fig. 1 Structure of the second developed MFLP (3D)

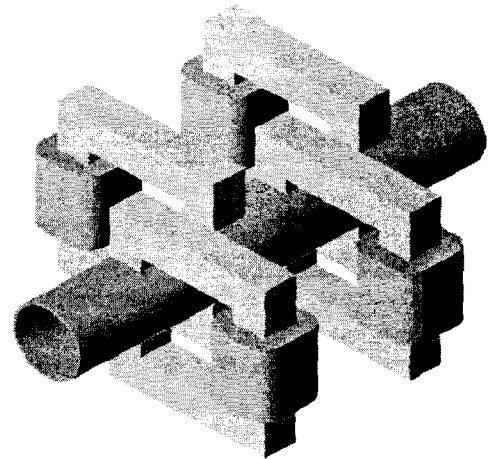


그림 2 새로 개발한 MFLP의 구조 (3D)
Fig. 2 Structure of the new MFLP (3D)

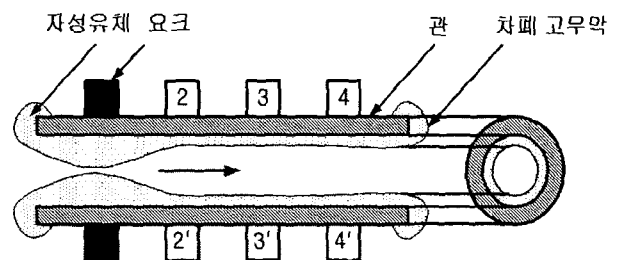


그림 3 새 자성유체 선형펌프의 구조 (2D)
Fig. 3 Structure of the new MFLP (2D)

요크에 의해 기전력이 발생되고, 이러한 기전력이 지속되어 관내를 차단함으로써 유체의 흐름을 막게 되는 동작이다. MFLP의 동작에 있어서 각 모드에서의 펄스 간격은 유출 속도를 결정하는 요소이고, 각 모드에서의 펄스의 크기는 유출하는 펌핑 압력을 결정하는 요소이다.

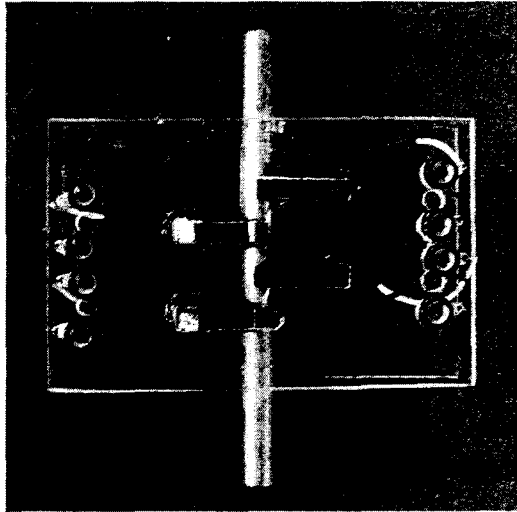


그림 4 자성유체 선형펌프의 제작
Fig. 4 Fabrication of the new MFLP

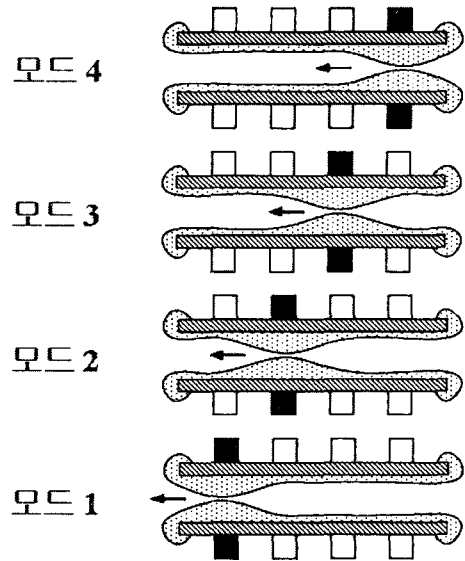


그림 6 역방향 펌핑
Fig. 6 Backward Pumping

3. 자성유체의 형상 해석

자성유체는 자기장의 분포로 그 형상이 이루어지며 자성 유체로 인해 자기장이 변화하므로 자성유체와 자기장은 서로 상호 작용을 한다는 문제점을 가지고 있다. 결국 자기장의 변화가 자성유체 형태를 결정짓게 된다. 따라서 자성유체의 형상과 흐름은 자성유체의 표면 평형상태를 계산해야 하고, 이러한 자성유체의 표면 평형 상태는 Poisson 방정식과 Navier-Stokes 방정식을 동시에 해석해야 한다.

3.1 Navier-Stokes 방정식에 의한 유체 해석

유체 내에 분포되는 응력은 측정이 불가능하므로 운동량 방정식을 그대로 사용하여 유체의 거동을 해석한다는 것은 의미가 없다. 유체를 연속체로 모형화하여 응력분포를 속도 구배항으로 고쳐 사용한 것이 Navier-Stokes 방정식이다.

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla \cdot \nabla \mathbf{v} + \rho \mathbf{b} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도이며, p 는 압력, μ 는 점성 계수, \mathbf{b} 는 보존장내 장력(체력)이다.

3.2 자성유체의 자화량

자기장의 분포 해석은 비선형 유한 요소법을 사용하였다. 변위 전류와 유도 전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 맥스웰(Maxwell) 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3)$$

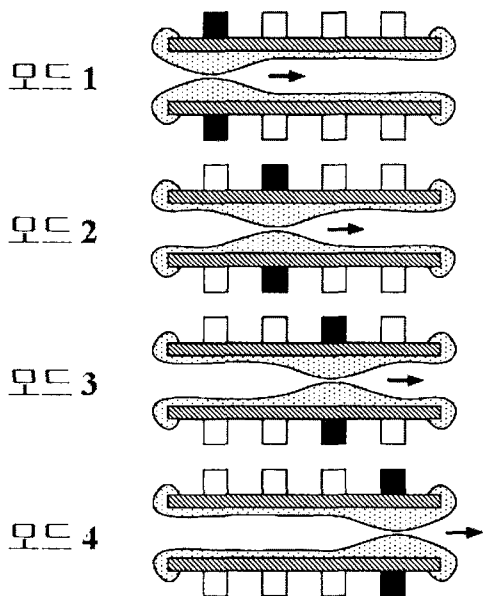


그림 5 순방향 펌핑
Fig. 5 Forward Pumping

이며, 매질을 고려하면

$$B = \mu H \quad (4)$$

이므로, 자기 벡터 포텐셜은

$$B = \nabla \times A \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (4)를 식 (5)에 대입하고, 이것을 다시 식 (3)에 대입하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (6)$$

와 같이 된다. 여기서 μ , J , A 는 각각 투자율, 전류밀도, 자기 벡터 포텐셜이다. 유한 요소법을 사용하여 범함수 행렬로 나타내면

$$[K]\{A\} = \{F\} \quad (7)$$

와 같으며 이 행렬에 고정 경계 조건과 자연 경계 조건을 대입한 후 해를 구할 수 있다.

3.3 유체의 형태 결정을 위한 수치적 알고리즘

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.

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot V = \frac{d\rho}{dt} \quad (8)$$

$$F = \rho \frac{dV}{dt} = \rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho (V \cdot \nabla) V \quad (9)$$

여기서 ρ 는 단위 체적당 중량이고, V 는 속도 벡터이다. 식 (9)에서의 F 는 다음과 같다.

$$F = F^g + F^m + F^e \quad (10)$$

여기서 F^g 는 중력으로

$$F^g = -\nabla U, \quad U = \rho gh \quad (11)$$

와 같고, F^m 은 기계력으로

$$F^m = -\nabla P \quad (12)$$

이며, F^e 는 전자기력으로

$$F^e = -\nabla \Psi \quad (13)$$

와 같다. 여기서 Ψ 는 매질의 전자기 에너지이며

$$\Psi = -\int M \cdot H \quad (14)$$

와 같다. 그래서 식 (9)를 다시 나타내면

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho (V \cdot \nabla) V = -\nabla U - \nabla P - \nabla \Psi \quad (15)$$

이다. 식 (15)를 다음과 같은 벡터 회전을 이용하면

$$(V \cdot \nabla) V = \nabla \left(\frac{1}{2} V^2 \right) - V \times (\nabla \times V) \quad (16)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \left(P + \Psi + \frac{1}{2} \rho V^2 + U \right) = \rho V \times (\nabla \times V) \quad (17)$$

와 같이 된다. 유체의 유동이 없는 상태에서 속도항은 0이

된다. 따라서 식 (17)에서 이 $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$ 이 되므로

$$\nabla \left(P - \int M \cdot H + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gh \right) = \rho V \times (\nabla \times V) \quad (18)$$

와 같이 다시 나타낼 수 있다. 유체가 회전하지 않는다면

$$(\nabla \times V) = 0, \quad V = -\nabla \phi \quad (19)$$

와 같은 식이 적용된다. 그래서 식 (18)은

$$P_i - \int M \cdot H + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gh = C \quad (20)$$

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. P_i 는 유체의 내부 압력이고, P_o 는 유체의 외부 압력으로 유체의 형상은 내부 압력 P_i 와 외부 압력 P_o 가 일치하는 평형 상태가 되므로 유체표면에서의 압력은

$$P_o = P_i + \int M \cdot H + \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 \quad (21)$$

와 같다. 식 (20)과 식 (21)로부터

$$P_o = 2 \int M \cdot H - \frac{1}{2} \rho V^2 - \rho gh + \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 + C \quad (22)$$

와 같이 된다. 여기서 P_o 는 유체 외부의 압력이고, M_n 은 자화의 법선 성분이다. 식 (22)를 C 에 대하여 정리하면

$$C = P_o - 2 \int M dH + \rho g h - \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 \quad (23)$$

이다. 이 방정식의 유체 상수 C 는 자성유체의 곡선 S 를 결정한다. 이 알고리즘은 일정한 자성유체의 부피이다. 이것을 이용하여 유체의 형상을 구하기 위해 Fig. 7과 같은 알고리즘에 따라 유한요소법을 이용한 반복계산이 수행되어야 한다. 이 알고리즘으로 MFLP 관내의 자성유체의 흐름을 해석한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이것은 MFLP의 동작 중 모드 2의 동작을 나타내는 것이며, 자성유체의 양에 따라 ① ② ③ ④의 4가지 평형상태를 가진다. 이 4가지 평형상태 중 여기서 자성유체의 체적을 만족하는 곡선이 자성유체의 형태이다. 이 모델의 해석 결과에서는 ④의 경우가 자성유체의 체적과 일치하므로 관내에서 자성유체는 이러한 형태로 나타나게 된다.

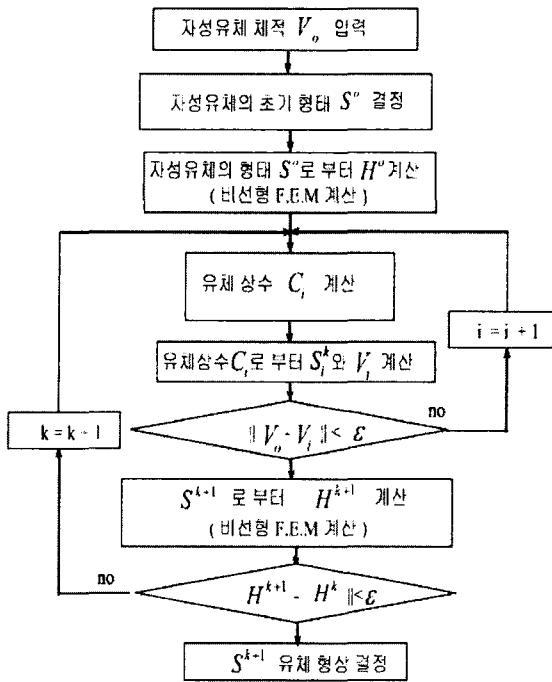


그림 7 자성유체 형상 해석을 위한 수치적 알고리즘
Fig. 7 Numerical algorithm for the magnetic fluid shape

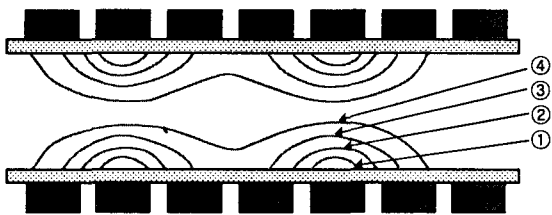


그림 8 자성유체 형상 해석의 예
Fig. 8 Examples of the magnetic fluid shape

4. MFLP의 동작 전류

MFLP의 동특성은 자성유체의 동특성을 말하며, 이는 관내 자기장에 의해 발생되며, 관내 자기장은 동작 전류에 의해 발생한다. MFLP의 유연한 운전 방식 개발은 우선 MFLP에 필요한 동특성을 구상하고, 이에 따라 MFLP에 필요한 자성유체의 형상을 결정할 수 있다. 결정된 자성유체의 형상을 만들기 위한 자기장의 분포를 해석하여, 자기장 분포 형성에 필요한 전류 패턴을 계산하면 된다. 두 번째 개발된 MFLP는 그림 9와 같은 DC 펄스 전류를 동작 전류로 하였다. 그러나 이러한 DC 직류 펄스 전류는 펄스가 변화하는 시간지연으로 인하여 펌핑되는 유체가 역류하게 되어 펌핑력을 작게하는 원인이 된다. 따라서 이러한 유체의 역류를 막기 위해 AC 펄스 전류를 그림 10과 같이 사용하였으며 AC 펄스 전류의 동작 특성을 분석, 비교하였다. 자기장 분포에 따른 자성유체의 형상을 별도의 장치를 제작하여 해석 결과와 비교하였다. 개발된 유연한 운전방식으로 MFLP에 적용하여 펌핑 압력과 속도를 측정하고 분석하였으며, 두 번째 개발된 MFLP와 비교하였다.

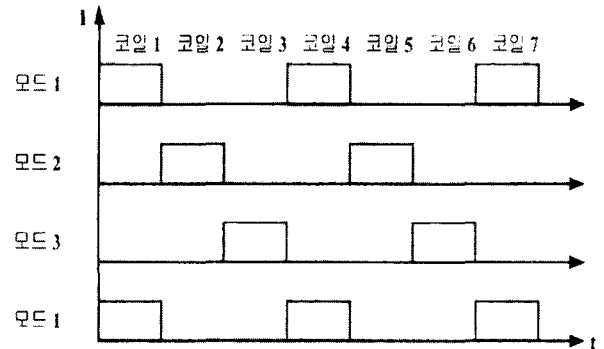


그림 9 동작 전류 (DC)
Fig. 9 Operating Current (DC)

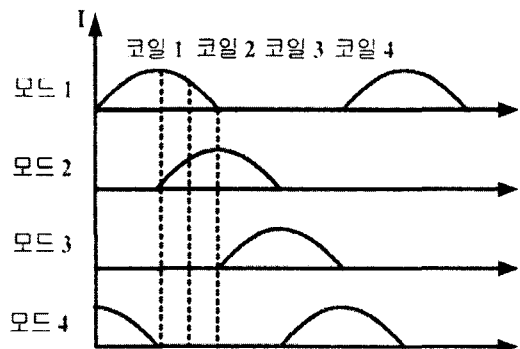


그림 10 동작 전류 (AC)
Fig. 10 Operating Current (AC)

4.1 자성유체의 자기적 성질

본 논문에서 사용한 자성유체는 일본의 Sigma Hi-Chemical사에서 제작된 N-504 모델을 사용하였다. N-504 모델에 대한 제원은 표 1에 B-H 곡선은 그림 11에 나타내었다. N-504의 자화량이 500G로 일반적인 영구자석은 공극에서의 자속밀도가 500G이므로 철가루가 자석에 반응하는 것과 동일한 반응을 보인다는 것이다. 이것은 자성유체가 유체의 특성을 가진 것을 고려한다면 일반적인 철가루와 동일한 자기적 특성을 가진다는 것이다. 따라서 MFLP에 사용된 자성유체는 자기적 성질이 우수한 것을 알 수 있다.

4.2 MFLP의 관내 자기장 분포

MFLP의 관내 각 모드별 자기장의 분포를 유한 요소법으로 해석하였다. DC 펄스 전류를 이용하여 MFLP를 운전할 경우 관내부에서의 자기장 분포는 그림 12와 같다. 이렇게 발생된 자기장이 분포한 형태로 자성유체가 모이게 되고, 자성유체는 다른 유체를 펌핑할 수 있는 힘을 가지게 된다. 그러나 DC 펄스 전류로 운전하게 되면 그림 12에서와 같이 모드와 모드를 변경할 경우에 시간지연으로 인하여 t만큼의 불연속적인 펌핑력이 발생하게 된다. DC 펄스 전류에 발생하는 t만큼의 불연속적인 펌핑력을 줄이기 위하여 AC 펄스 전류를 사용하였다. 이 경우의 관내 자기장 분포는 그림 13과 같다. 그림 13의 두 번째는 그림 12의 첫 번째와 두 번째의 자기장 분포 사이에서 형성되는 자기장 분포로 중간 단계의 자기장 분포이다. 이러한 자기장의 분포로 인하여 그림 12에 있던 t만큼의 불연속적인 펌핑력이 없어지게 되고 연속적인 펌핑력을 형성하게 되어 MFLP의 전체적인 펌핑력을 향상하게 된다. 또한 이러한 자기장의 분포를 시간과 MFLP관내의 위치에서 확인할 수 있도록 그림 14와 같이 나타내었다. 그림 14를 통하여 DC 펄스 전류에 의한 자기장 분포에 존재하던 불연속적인 부분이 AC 펄스 전류에는 없음을 확인할 수 있다.

4.3 MFLP의 관내 자성유체의 형태

MFLP의 관내에서 동작하는 자성유체는 관 외벽으로 인해 확인할 수 없었다. 따라서 별도의 장치를 제작하여 자성유체의 형상을 확인하였다. 본 논문에서 사용한 수치적

표 1 N-504의 제원
Table 1 Spec. of the N-504

자성유체	N - 504
비중	1.40
점성	25 mPa·sec
자화량	56.1 mT

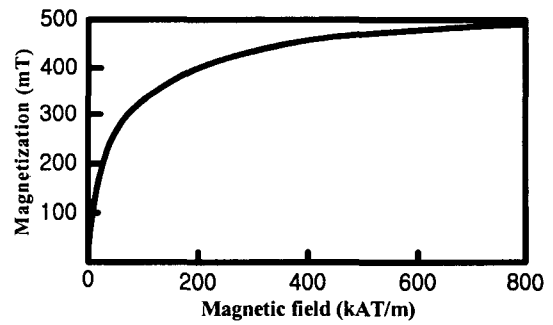


그림 11 N-504의 B-H 특성 곡선
Fig. 11 B-H curve of the N-504

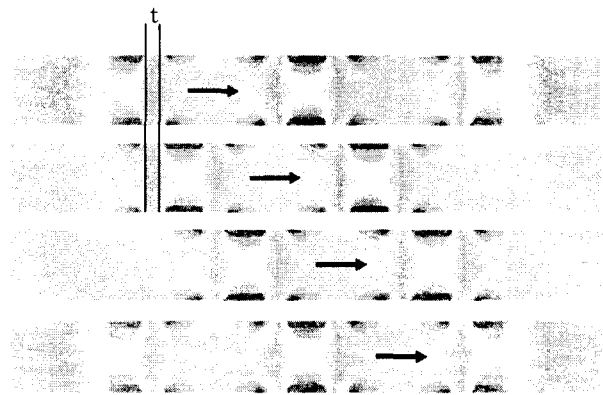


그림 12 펌프 관내에서 자성유체의 형상 (DC 펄스 전류)
Fig. 12 Shape of the magnetic fluid inside the pervious MFLP

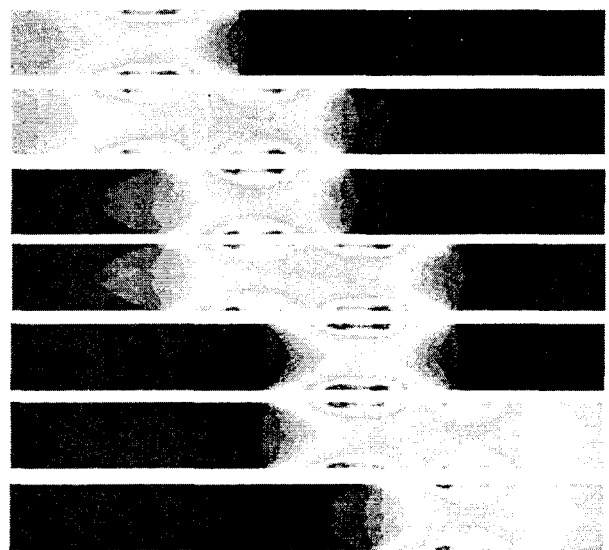


그림 13 펌프 관내에서 자성유체의 형상 (AC 전류)
Fig. 13 Computed Forming Shapes in AC Driving

알고리즘으로 해석한 것과 실제 관내 자성유체의 형상을 비교하였으며, 그 결과는 그림 15와 같다. 그림 15(a)는 전류를 S1~S5로 구분하기 위한 전류의 형태이다. 그림 15(b)는 각 위치에서의 자성유체의 형태를 수치적 알고리즘으로 해석한 것과 측정된 것을 비교한 것이다. 두 결과가 아주 유사한 형태를 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 수치적 알고리즘으로 해석한 자성유체의 형상도 상당히 정확함을 확인할 수 있다. 그림 15와 같은 자성유체의 형태는 새로운 형태의 MFLP에 구상했던 동작과 매우 흡사하며, DC 펄스 전류보다 유연한 동작을 할 수 있을 것이다.

4.4 MFLP의 펌핑 압력과 속도

제작한 MFLP와 이에 적용할 유연한 동작 전류의 성능을 확인하기 위하여 그림 16과 같이 인버터를 사용하여 실험하였다. 펌핑 속도는 AC 펄스 전류의 주파수를 조절하였으며 펌핑 속도에 따른 펌핑력을 측정하였다. 또한 전류의 크기에 따른 펌핑력도 측정하였으며 그림 17에 DC 펄스 전류와 AC 펄스 전류를 비교하여 나타내었다. 그림 17을 통하여 일정 전류 이상에서는 오히려 펌핑력이 낮아짐을 확인하였다. 이것은 고르게 분포해야 하는 자성유체가 높은 기자력에 의하여 관의 끝쪽으로 편중되게 되어 유체의 펌핑에 오히려 방해하게 되는 것이다. 따라서 그림 17의 결과를 통하여 MFLP의 유연한 동작방식에 필요한 적정 기자력이 존재함을 확인하였다. 또한 DC 펄스 전류보다 AC 펄스 전류로 운전할 때 펌핑력이 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 그림 12와 13에서 알 수 있었던 자기장 분포의 불연속으로 인한 불연속적인 펌핑력과 연속적인 자기장 분포에 의한 연속적인 펌핑력의 차이이다.

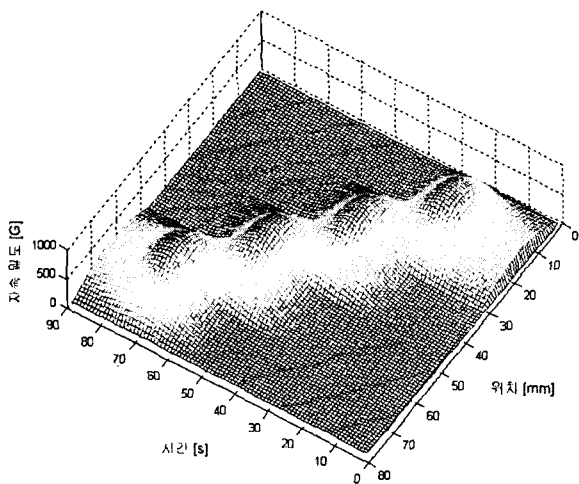
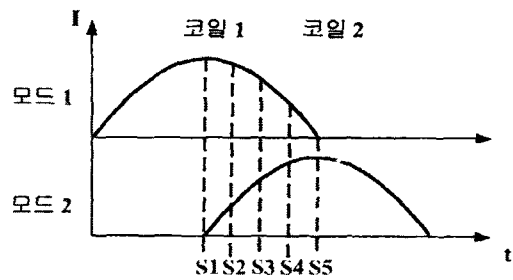
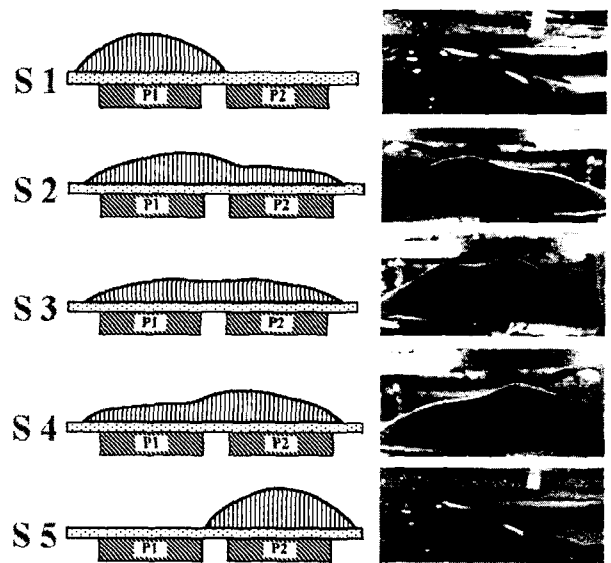


그림 14 자성유체 선형펌프의 동작에 의한 자속밀도 (AC 전류)

Fig. 14 Magnetic Flux Density to operate MFLP in AC driving



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



(b) 자성유체의 각 모드별 형상
(b) Forming Shape of the Magnetic Fluid

그림 15 각 모드별 자성유체의 형상 측정과 해석 (AC 전류)

Fig. 15 Computed and Measured Forming Shapes at each moment in AC driving

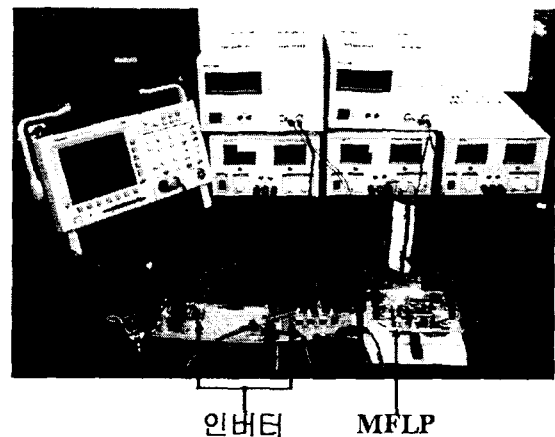


그림 16 자성유체 선형펌프의 동작 드라이브
Fig. 16 Driving System of the MFLP

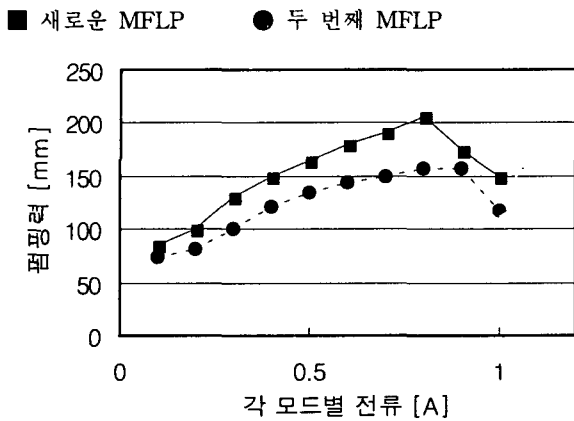


그림 17 자성유체 선형펌프의 동작전류의 크기에 따른 펌핑력
 Fig. 17 Measured pumping height according to the driving current

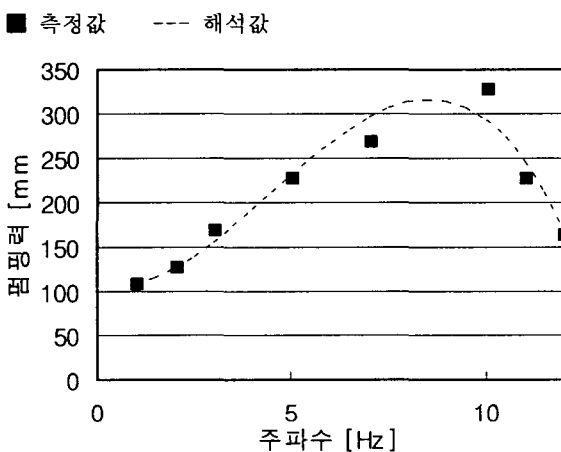


그림 18 자성유체 선형펌프의 동작전류의 주파수에 따른 펌핑력
 Fig. 18 Measured pumping height according to the driving current

4.5 고찰

동작 전류에 의한 MFLP의 동특성을 해석하기 위해서 먼저 관내의 자기장의 분포를 유한 요소법으로 해석하고 이것을 측정된 데이터와 비교하였다. 그 결과 제작된 MFLP에서의 자기장의 분포가 해석한 자기장의 분포와 유사한 패턴을 나타냈다. 이것은 제작된 MFLP가 자성유체의 동작에 필요한 기자력을 충분히 발생시키며, 관내의 자기장 분포 또한 자성유체를 동작시킬 수 있음을 의미한다. 그림 15를 통하여 본 연구진이 개발한 수치적 알고리즘으로 자성유체의 형상을 계산하기에 효과적임을 알 수 있었다. 그림 16과 17을 통하여 MFLP의 동작 전류의 크기와 펌핑 속도에 따른 펌핑력을 측정하였으며 상관관계를 확인할 수 있었다. 표 2에

표 2 이전과 새 자성유체 선형펌프의 크기와 펌핑력 비교

Table 2 Comparison of the size and pumping forces

	두 번째 MFLP	새로운 MFLP	비율
동작전류	DC	AC	
요크수	7	4	57 %
요크길이	8 [mm]	8 [mm]	100 %
관직경	12 [mm]	12 [mm]	100 %
관길이	150 [mm]	80 [mm]	66 %
펌프크기	4,570 [mm ²]	3,047 [mm ²]	66 %
펌프무게	45 [g]	22.5 [g]	50 %
펌핑력	158 [mm]	207 [mm]	131 %

두 번째 MFLP와 새로운 형태의 MFLP의 크기와 펌핑력을 비교하였다. MFLP의 동작 전류를 AC 펄스 전류로 변경하여 보다 유연한 동작과 함께 펌핑력을 증가시켰으며, MFLP의 요크를 7개에서 4개로 감소시켜 보다 소형, 경량화 하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 MFLP의 동작 전류를 DC 펄스 전류에서 AC 펄스 전류로 바꾸어 보다 유연한 동작을 가능하게 하였으며, AC 펄스 전류에 의한 동작 특성에 대하여 연구하였다. MFLP의 동작 특성에 대하여 자기장의 분포를 해석하고, 자기장의 분포에 의한 자성유체의 흐름을 해석하는 수치적 알고리즘을 개발하여 동특성을 파악하였다. 외부에서 인가되는 기자력에 의하여 발생하는 자기장의 분포가 해석한 결과와 일치하여 유한요소법과 수치적 알고리즘을 통하여 여러 가지의 운동 방식을 개발할 수 있었다. 또한 두 번째 MFLP보다 소형, 경량화하였다. 제작된 MFLP의 펌핑 압력과 속도를 측정하고, 그 결과를 통하여 자성유체의 양과 동작 전류의 주파수, 크기의 상관관계를 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 공학공동연구소(R-2003-B-271) 주관으로 수행된 과제지원과 부산대학교 교내학술연구비(4년과제) 지원에 의한 연구입니다.

참 고 문 헌

- [1] Yamaguchi M, et. al., "Design investigation of linear motor for artificial heart driving", Trans. Institute of Elect. Eng. of Japan D-A Publication of Industry Applications Society, V.117-D, N. 5, 1997.
- [2] Parker RS, Doyle FJ, Peppas NA, "A model-based algorithm for blood glucose control in type I diabetic patients", IEEE Trans. Mag., vol. 46, no. 2, pp 148-157, January 1999.
- [3] Matsuki H, et. al., "Transcutaneous DC-DC converter for totally implantable artificial heart using synchronous rectifier", IEEE Trans. Mag., vol. 32, no. 5, pp 5118-5120, September 1996.
- [4] Wen C, Li M, Whitworth JA, "Validation of transonic small animal flowmeter for measurement of cardiac output and regional blood flow in the rat", J. Cardiovascular Pharmacology, vol. 27, no. 4, April 1996.
- [5] Verotta D, "A general solution for nonparametric control of a linear system using computer-controlled infusion pumps", IEEE Trans. Mag., vol. 46, no. 1, pp 44-50, January 1999.
- [6] Daoura MJ, Meldrum DR, "Precise automated control of fluid volumes inside glass capillaries", J. Microelectro-mechanical Systems, vol. 8, no. 1, pp 71-77, March 1999.
- [7] Melcher, James R., "Continuum Electromechanics", 1981.
- [8] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, "Design of Magnetic Fluid Linear Pump", International Magnetics Conference, Kyongju, Korea, May 18-21 1999 / IEEE Trans. Magn., Vol.35, No.5, pp. 4058-4060, September 1999.
- [9] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, "New Structure of the Magnetic Fluid Linear Pump", IEEE Intermag2000, 2000 IEEE International Magnetics Conference, pp. GS-02, Toronto, Canada, April 9-13, 2000 / IEEE Trans. Magn., Vol.36, No.5, pp. 3709-3711, September 2000.
- [10] G.S. Park, S.H. Park, "Determination of the Curvature of the Magnetic Fluid under the External Forces", The 13th COMPUMAG Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Evain, France, July 2-5, 2001. / IEEE Trans. Magn., Vol.38, No.2, pp. 957-960, March 2002.
- [11] Gwan Soo Park, Kang Seo, "A Study on the Pumping Forces of the Magnetic Fluid Linear Pump", CEFC 2002, Proceedings of the Tenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, pp 104, Perugia, Italy, June 16-19 2002 / IEEE Trans. Magn., vol 39, no, 3, pp. 1468-1471, May 2003.
- [12] 서강, 박관수, "Permalloy Yoke를 이용한 Magnetic Fluid Linear Pump의 소형화 설계", 대한전기학회 2001년도 하계 학술 대회 논문집, pp. 789-791, 2001년 7월 18일 - 20일, 용평.
- [13] 서강, 박관수, "동작 전류에 의한 Magnetic Fluid Linear Pump의 동특성 해석", 대한전기학회지, 제 53B 권 4호, pp. 237-246, 2004년 4월.

저 자 소 개



서 강 (徐 康)

1976년 1월 17일생. 2001년 한국해양대학교 전기공학과 졸업. 2003년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사). 현재 부산대학교 대학원 재학(박사과정)

Tel : 051-510-2976

E-mail : kalam@pusan.ac.kr



박 관 수 (朴 寬 秀)

1963년 3월 25일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1987년 서울대학교 대학원 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박). 1997년~1999년 Carnegie Mellon Univ. Visiting scalar. 현재 부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부 부 교수

Tel : 051-510-2788

E-mail : gspark@pusan.ac.kr