

동작 전류에 의한 Magnetic Fluid Linear Pump의 동특성 해석

論 文

53B-4-4

Analysis of the Driving Characteristics in the Magnetic Fluid Linear Pump by Operating Current

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

Abstract - The advantages of the Magnetic Fluid Linear Pump(MFLP) is that this device could pump the non-conductive, non-magnetic liquid such as insulin or blood because of the segregation structure of the magnetic fluid and pumping liquid. In this device, the sequential currents are needed to produce pumping forces so that pumping forces and pumping speed mainly depend on the current patterns. The excessive forces at pumping moment could cause the medical shock, and weak forces at intermediate moment could cause the back flow of the pumping liquid. So, the ripples of the pumping forces need to be reduced for the medical application. In this research, the driving characteristics in the MFLP by operating current is analysed. The change of magnetic fluid surface according to the driving currents could be obtained by magneto-hydrodynamic analysis so that pumping forces could be computed by integration of the surface moving to the pumping direction at each moment. The actual MFLP with 13mm diameter was made and tested for experiments. The effects of driving current and frequency on the pumping forces and pumping speed were analyzed and compared with experimental measurements.

Key Words : Finite element analysis, Fluid surface, Magnetic fluid, Magnetic fluid linear pump, Magneto-hydrodynamics

1. 서 론

의료용 소형 펌프에는 인공심장의 혈액 펌프, 당뇨 환자를 위한 인슐린 펌프, DNA 조작용 펌프 등이 있다. 특히 인체에 삽입해서 동작하는 펌프는 소형·경량화, 제어 회로와 연결된 지능화 등의 특성이 매우 절실히 요구되고 있다. 의료용 소형 펌프는 인체와 직결되므로 소음이나 진동이 없어야 하며, 펌프의 동작에 의한 쇼크가 없어야 한다. 의료용 소형 펌프의 특징을 종합하면 펌프는 소형·경량이어야 하며, 무소음·무진동으로 동작하고 동작 쇼크가 없어야 하는 조건을 가지고 있다. 현재 의료용 소형 펌프에 대한 연구는 선형 왕복 액추에이터(Linear oscillatory actuator), BLDC 모터, 초음파 모터, 선형 펄스 모터(Linear pulse motor) 등이 연구되고 있다. 그러나 이러한 기기들은 동작 부위가 복잡하거나 전자파가 많고 밸브와 같은 기계적 부품이 필요하다는 단점을 가지고 있다.[1]-[6]

따라서 본 연구진은 자성유체(Magnetic Fluid)를 이용한 선형 펌프를 개발하였다.[8]-[10] 자성유체는 자성체의 성질을 갖는 액체로써 외부에서 자기장을 걸어줄 경우 자기장의 모양으로 모이게 되는 특성을 가지고 있다. 개발된 선형 펌프는 기어나 밸브가 필요 없고, 소형·경량화가 가능하며 무소음·무진동 운전이 용이한 이점이 있다. MFLP(Magnetic

Fluid Linear Pump)를 구동시키기 위하여 직류 펄스 전류를 사용하였으며, 이러한 동작 전류로 관내의 자기장을 조절하고, 이렇게 생성된 자기장으로 MFLP의 펌핑 압력과 속도, 방향을 조절한다. 따라서 전류 조절 하나만으로 선형 펌프의 펌핑 압력과 속도, 방향이 조절 가능하다. MFLP의 동작에 있어 자기장이 아주 중요하기 때문에 자기저항을 최소화하고 관내의 자기장을 증가시키기 위하여 Magnetic Yoke를 이용하였다.

본 논문에서는 MFLP의 관내 자기장을 조절하기 위하여 직류 펄스 전류에 따른 관내의 자기장 분포를 유한 요소법으로 해석하고 실제 측정 결과와 비교하였다. 또한, 자기장에 의해 생성되는 자성유체의 형상을 수치적 알고리즘으로 해석하고 실제 측정 결과와 비교하였다. 이러한 자료를 토대로 MFLP의 유연한 운전 방식을 개발하였으며, MFLP를 운전하여 펌핑 압력과 속도를 측정하였다.

2. MFLP의 구조와 동작

2.1 MFLP의 구조

Fig. 1은 MFLP의 구조를 나타낸 것으로 코일이 감긴 Yoke 7개가 관의 외부를 둘러싼다. 관의 내부에는 Thin Rubber에 밀봉된 자성유체가 관 내벽에 위치한다. 이때 차례 고무막은 자성유체의 흐름을 방해하지 않을 정도로 부드러워야 하고 찢어지지 않을 만큼 튼튼해야 한다. 코일이 감긴 Yoke의 양 극 사이에 관이 있는 구조로 Magnetic Yoke로써 자기저항을 최소화하였다. 따라서 MFLP의 구동에 중

* 正 會 員 : 釜 山 大 學 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

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

接 受 日 字 : 2003年 11月 10日

最 終 完 了 : 2004年 1月 19日

요한 요소인 자성유체의 동작을 발생시키는 자기장의 세기는 증가하고 MFLP의 펌핑 압력 또한 커지게 된다. MFLP의 중요한 요소인 관 내 자기장의 분포와 세기를 결정하는 Yoke의 폭·길이, Yoke간의 간격을 유한 요소법으로 해석하였고, 이 결과를 관의 직경에 비례하는 Yoke의 폭·길이, Yoke간의 간격으로 나타내었다. 이렇게 해석된 결과로 MFLP의 소형·경량화를 고려하였을 때 세 가지 모두가 관 직경의 0.6에서 최적화됨을 확인하였다. 이렇게 최적화된 Yoke를 직경 13mm 관에 맞추어 두께 0.2mm의 규소강판을 적층하여 제작하고, 여기에 직경 0.2mm의 코일을 1000턴을 감아 Fig. 2와 같이 제작하였다. 여기에서 코일과 Yoke 사이의 절연은 절연지와 절연 테이프를 이용하였다. 제작된 Yoke 7개를 관 외부에 나열하여 MFLP를 Fig. 3과 같이 하여 제작하였다.

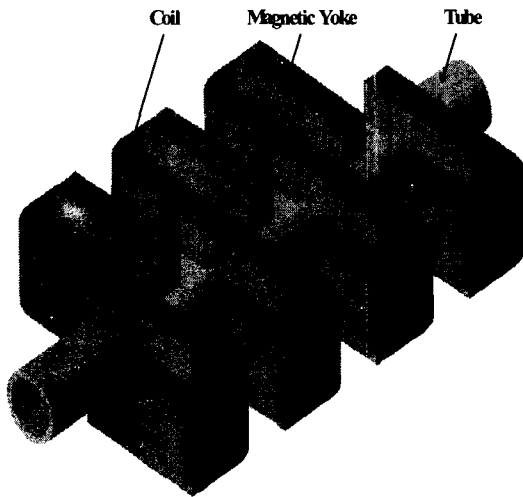
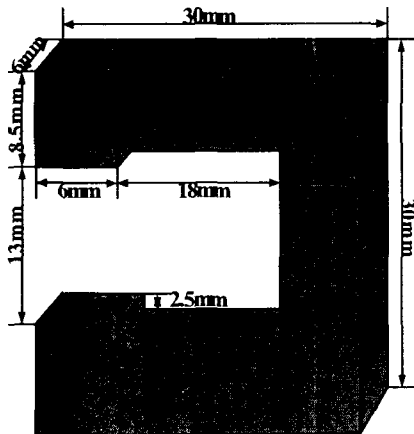
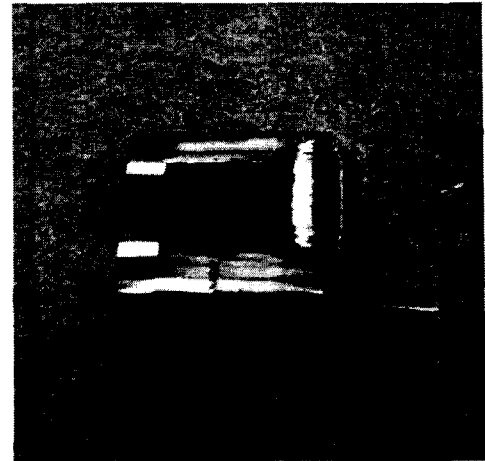


그림 1 MFLP의 구조 (3D)
Fig. 1 Structure of the MFLP (3D)

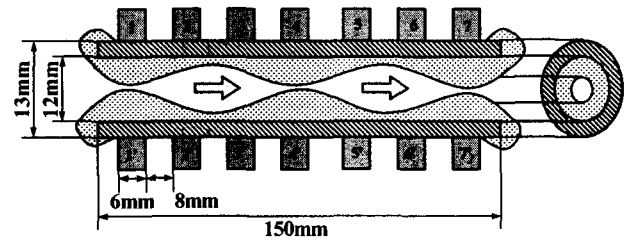


(a) 마그네틱 요크의 치수
(a) Size of the magnetic yoke



(b) 실제 사진
(b) Photographed

그림 2 마그네틱 요크의 제작
Fig. 2 Fabrication of the magnetic yoke



(a) MFLP의 치수
(a) Size of the MFLP



(b) 실제 사진
(b) Photographed

그림 3 MFLP의 제작
Fig. 3 Fabrication of the MFLP

2.2 MFLP의 동작

MFLP의 동작은 Forward Pumping, Backward Pumping, On/Off Switching의 3가지 동작으로 구분할 수 있다. MFLP의 펌핑 동작은 3가지 모드로 구분하여 동작한다. 3가지 모드는 모드 1, 모드 2, 모드 3으로 구분하며, 모드 1은 Fig. 3(a)에서의 1-4-7번 Yoke의 코일이 여자되어 기전력을 발생시키고, 모드 2는 2-5번 Yoke에 의해 기전력이 발생되며, 모드 3은 3-6번 Yoke에 의해 기전력이 발생된다. 먼저 Forward Pumping은 모드 1, 모드 2, 모드 3, 모드 1 순으로 1Cycle을 이루어 펌핑하게 되며 Fig. 4와 같다. Backward Pumping은 Forward Pumping의 반대 방향으로 펌핑하는 동작으로 모드 1, 모드 3, 모드 2, 모드 1 순으로 1Cycle을 이루어 펌핑하게 되며 Fig. 5와 같다. On/Off Switching은 유체의 흐름을 개방하거나 차단하는 동작으로 Fig. 6과 같다. On Switching은 7개의 Yoke가 모두 동작하지 않아 기전력이 전혀 발생하지 않게 되어 관내가 개방되는 동작이다. Off Switching은 4-5번 Yoke에 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.

3. 관내 자성유체의 흐름 해석

3.1 자성유체의 자화량

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

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

이며, 매질을 고려하면

$$B = \mu H \tag{2}$$

이므로, 자기 벡터 포텐셜은

$$B = \nabla \times A \tag{3}$$

로 나타낼 수 있다. 식 2를 식 3에 대입하고, 이것을 다시 식 1에 대입하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \tag{4}$$

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

$$[K]\{A\} = \{F\} \tag{5}$$

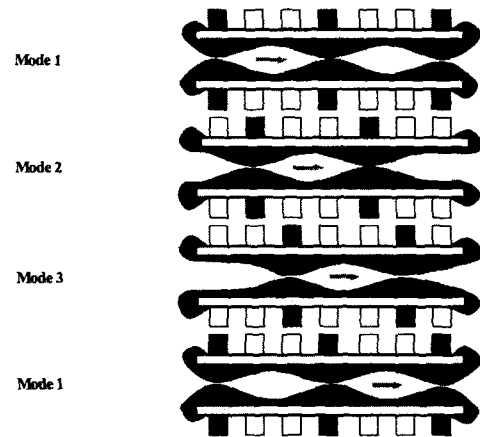


그림 4 MFLP의 정방향 펌핑
Fig. 4 Forward pumping of the MFLP

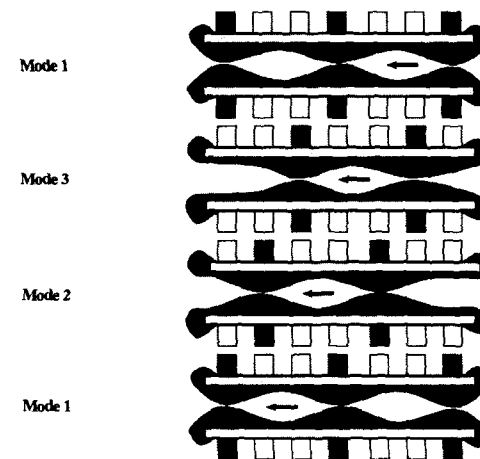


그림 5 MFLP의 역방향 펌핑
Fig. 5 Backward pumping of the MFLP

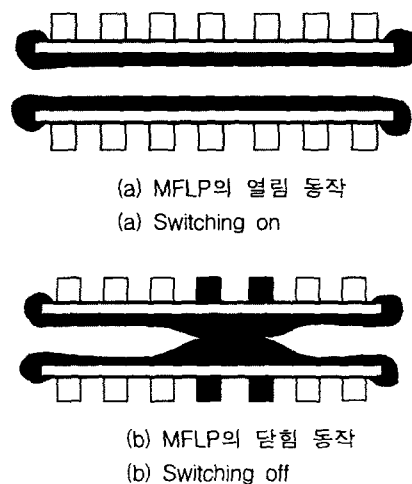


그림 6 MFLP의 열림/닫힘 동작
Fig. 6 On/Off of the MFLP

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

3.2 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.

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

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

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

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

여기서 \mathbf{F}^g 는 중력으로

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

와 같고, \mathbf{F}^m 은 기계력으로

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

이며, \mathbf{F}^e 는 전자기력으로

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

와 같다.[7] 여기서 Ψ 는 매질의 전자기 에너지이며

$$\Psi = -\int \mathbf{M} \cdot \mathbf{H} \quad (12)$$

와 같다. 그래서 식 7을 다시 나타내면

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

이다. 식 13을 다음과 같은 벡터 회전을 이용하면

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

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

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

식 15에서 이 $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = 0$ 이 되므로

$$\nabla \left(P - \int \mathbf{M} \cdot \mathbf{H} + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gh \right) = \rho \mathbf{V} \times (\nabla \times \mathbf{V}) \quad (16)$$

와 같이 다시 나타낼 수 있다. 유체가 회전하지 않는다면

$$(\nabla \times \mathbf{V}) = 0, \quad \mathbf{V} = -\nabla \phi \quad (17)$$

와 같은 식이 적용된다. 그래서 식 16은

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

와 같이 된다. 여기서 P_i , \mathbf{M} , \mathbf{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

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

와 같다. 식 18과 식 19로부터

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

와 같이 된다. 여기서 P_o 는 유체 외부의 압력이고, M_n 은 자화의 법선 성분이다. 식 20을 C 에 대하여 정리하면

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

이다. 이 방정식의 유체 상수 C 는 자성유체의 곡선 S 를 결정한다. 이 알고리즘은 일정한 자성유체의 부피이다. 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 일치함으로 관내에서 자성유체는 이러한 형태로 나타나게 된다.

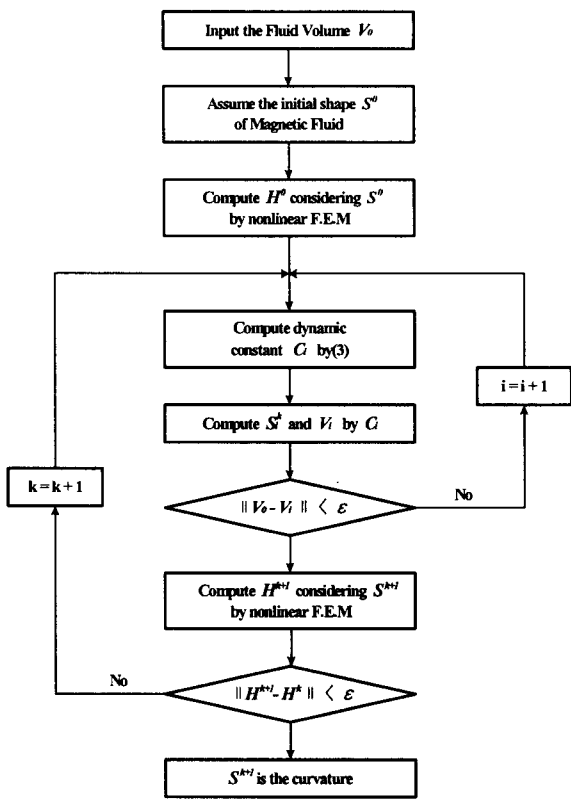


그림 7 자성유체 형상 해석을 위한 수치적 알고리즘
 Fig. 7 Numerical algorithm for the magnetic fluid shape

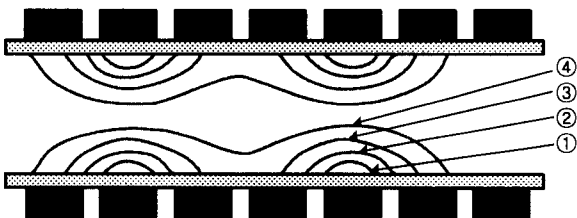


그림 8 자성유체의 형상 해석의 예
 Fig. 8 Examples of the magnetic fluid shape

4. MFLP 관내 자성유체의 동특성

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 형상에 필요한 전류 패턴을 계산하면 된다. 이렇게 하여 유연한 운전을 위해 본 연구진은 Fig. 9와 같은 직류 펄스 전류를 동작 전류로 하였다. 이렇게 구상된 MFLP의 동특성을 실제 동특성과 비교하기 위하여 다음과 같은 방법으로 확인하였다. 먼저 동작 전류에 의해 형성된 관내 자기장

을 홀센서를 이용하여 측정하고 해석된 자기장 분포와 비교하였다. 두 번째로 이렇게 형성된 자기장 분포에 따른 자성유체의 형상을 별도의 장치를 제작하여 해석 결과와 비교하였다. 개발된 유연한 운전방식으로 MFLP에 적용하여 펌핑압력과 속도를 측정하고 분석하였다.

4.1 MFLP의 관내 자기장 분포

MFLP의 관내에서 발생하는 자기장 분포를 각 모드별에 따라 유한 요소법으로 해석하였다. Fig. 10은 MFLP를 동작시킬 경우 관의 외벽과 Yoke에 발생하는 분포를 나타내는 것으로 MFLP의 동작 중 모드 1에 해당한다. Fig. 10을 통하여 Yoke에서 발생한 자속이 이웃한 Yoke로도 흘러감을 확인할 수 있어 Yoke간의 간격도 관내 자기장의 분포를 결정하는 요소임을 확인할 수 있다. 관내부에서의 자기장 분포는 Fig. 11과 Fig. 12와 같다. 이렇게 발생된 자기장이 분포한 형태로 자성유체가 모이게 되고, 자성유체는 다른 유체를 펌핑할 수 있는 Force를 가지게 된다.

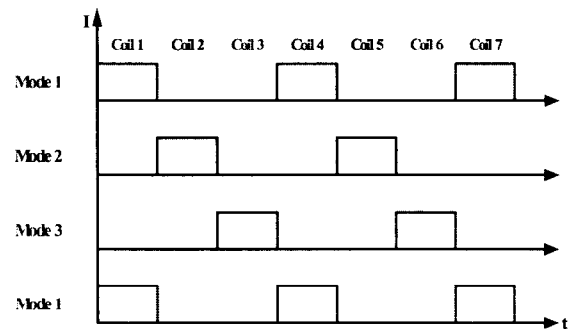


그림 9 동작 전류의 시간
 Fig. 9 Time chart for operation

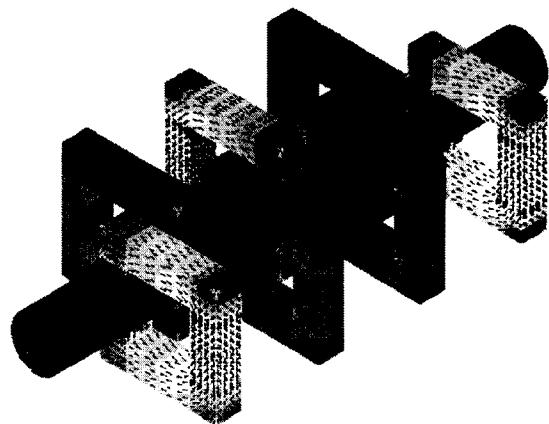


그림 10 MFLP의 3D 유한요소법 해석
 (1,4,7번 요크에 기자력 발생)
 Fig. 10 3D F.E.M analysis of the MFLP
 (Magnetization of 1.4,7 yoke)

관내의 자기장을 측정하기 위하여 홀센서를 관내의 중심에서 3mm 간격으로 이동하며 측정하였다. 그 결과를 Fig. 13, 14, 15, 16에 나타내었으며, 해석 결과와 비교하였다. Fig.13, 14, 15, 16은 각각 모드 1, 모드 2, 모드 3, Off

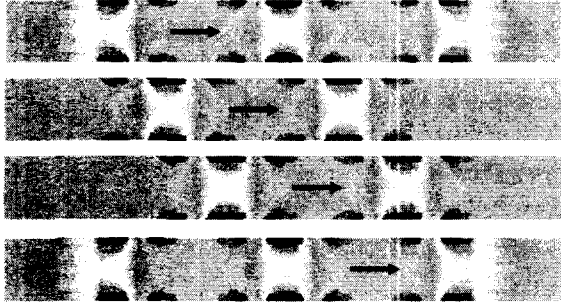


그림 11 MFLP 내부에서의 자성유체의 흐름
Fig. 11 Movement of the magnetic fluid inside the MFLP

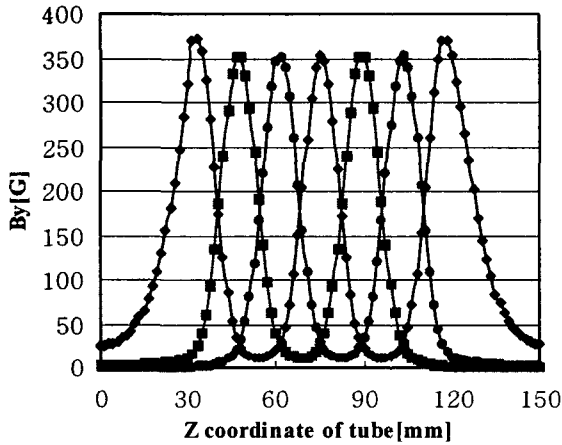


그림 12 각 모드에서의 자기장 분포
Fig. 12 Magnetic fields in each mode

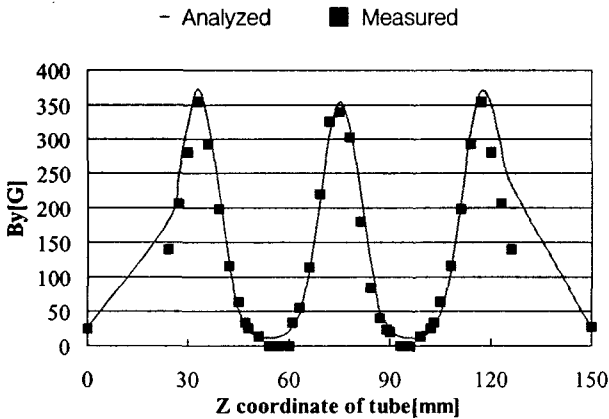


그림 13 모드1에서의 관내 자기장 분포
Fig. 13 Magnetic field inside the MFLP (mode 1)

Switching에서의 자기장 분포이다. Fig. 13, 14, 15, 16을 통하여 유한 요소법으로 해석한 자기장의 분포와 실제 MFLP에서의 자기장의 분포가 패턴이 일치함을 확인할 수 있다.

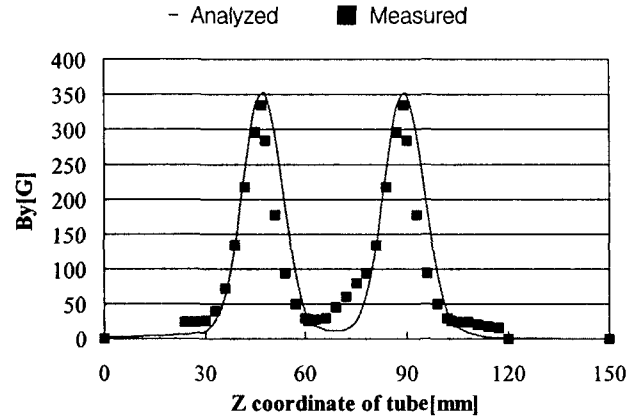


그림 14 모드2에서의 관내 자기장 분포
Fig. 14 Magnetic Field inside the MFLP (Mode 2)

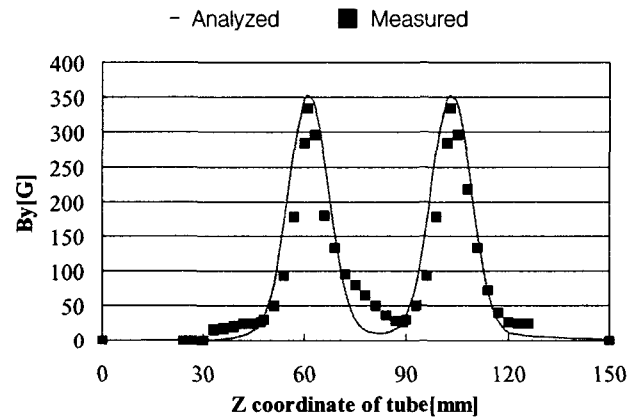


그림 15 모드3에서의 관내 자기장 분포
Fig. 15 Magnetic Field inside the MFLP (Mode 3)

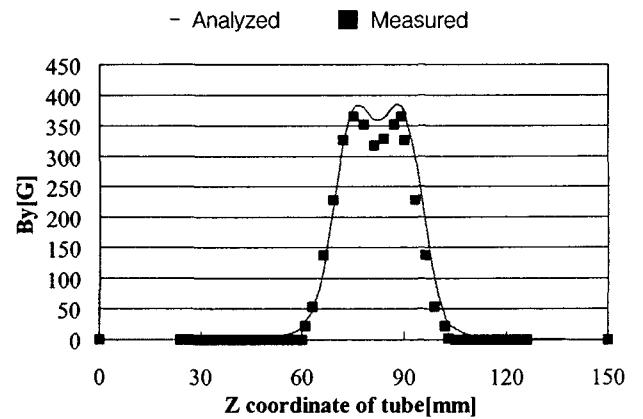


그림 16 달침 동작에서의 관내 자기장 분포
Fig. 16 Magnetic Field inside the MFLP (Switching off)

4.2 자성유체의 자기적 성질

본 논문에서 사용한 자성유체는 일본의 Sigma Hi-Chemical사에서 제작한 N-504 모델을 사용하였다. N-504 모델에 대한 스펙은 Table 1에, B-H Curve는 Fig. 17에 나타내었다. Table 1과 Fig. 17을 통하여 본 논문에서 사용한 자성유체의 자기적 성질이 우수한 것을 알 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 알고리즘으로 해석한 것과 실제 관내 자성유체의 형상을 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 18, 19와 같다. Fig. 18은 정면에서의 자성유체의 형상이며, Fig. 19는 측면에서의 자성유체의 형상이다. Fig. 18, 19에서의 (a), (b), (c)는 각각 유한요소법으로 해석한 자기장의 분포, 수치적 알고리즘을 이용하여 해석한 자성유체의 형상, 그리고 실제 측정된 자성유체의 형상을 나타낸 것이다. (a), (b), (c)를 통해 자기장의 분포와 자성유체의 형상이 유사한 패턴임을 확인할 수 있다. 또한 수치적 알고리즘으로 해석한 자성유체의 형상도 상당히 정확함을 확인할 수 있다.

표 1 N-504 모델의 특성
Table 1 Spec of the N-504

Fluid Type	N - 504
Specific Gravity	1.40
Viscosity	25 mPa · sec
Magnetization	56.1 mT

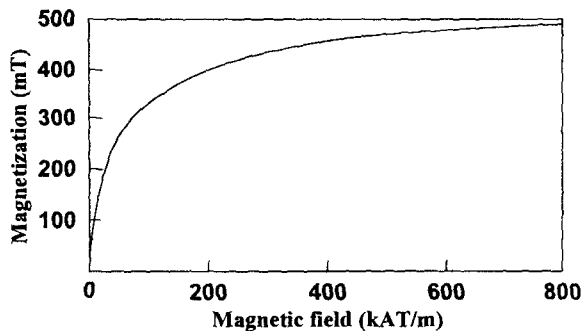
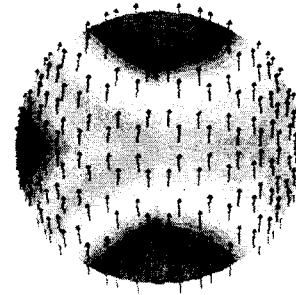
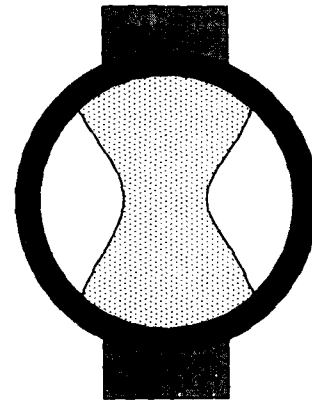


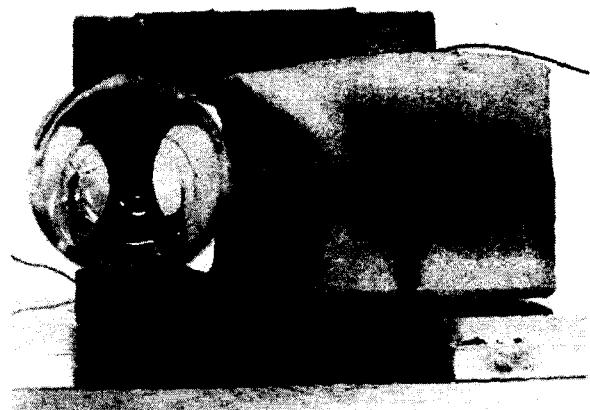
그림 17 N-504 모델의 B-H 커브
Fig. 17 B-H curve of the N-504



(a) 3D 유한요소법 해석
(a) 3D analysis of F.E.M

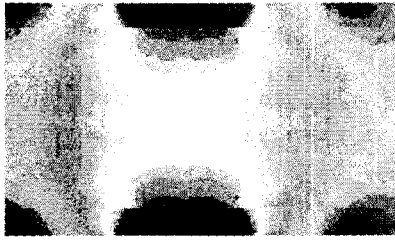


(b) 수치적 알고리즘으로 자성유체 형상해석
(b) Computed of numerical algorithm

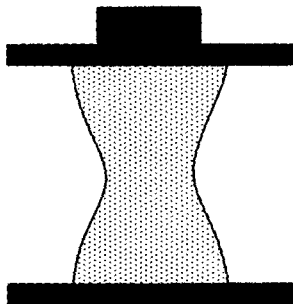


(c) 실제 사진
(c) Photographed

그림 18 정면에서의 자성유체 형상
Fig. 18 Front view of the magnetic fluid inside the MFLP



(a) 3D 유한요소법 해석
(a) 3D analysis of F.E.M



(b) 수치적 알고리즘으로 자성유체 형상 해석
(b) Computed of numerical algorithm



(c) 실제 사진
(c) Photographed

그림 19 측면에서의 자성유체의 형상
Fig. 19 Side view of the magnetic fluid inside the MFLP

4.4 MFLP의 펌핑 압력과 속도

제작한 MFLP와 이에 적용할 유연한 동작 전류의 성능을 확인하기 위하여 Fig. 20과 같이 MFLP의 양쪽에 물을 담은 용기를 두고 MFLP를 구동시켜 한 쪽의 용기의 물의 수위를 측정하여 펌핑 압력과 속도를 측정하였다. 또한 각 펌핑 압력과 속도가 자성유체의 양과의 상관관계를 확인하기 위하여 자성유체의 양에 따라서도 측정하였다. 펌핑 속도의 측정은 한 모드에서 다음 모드로 변화하는 시간, 즉 각 모드에서의 펄스 간격을 조절하여 물의 수위를 측정하여 확인하였으며, 펄스 간격이 짧아질수록 펌핑되는 양이 증가하였다. 또한 일정 시간 이상의 지연이 생기면 급격히 감소하고, 자성유체의 양이 많을수록 펌핑되는 양이 증가함을 확인할 수 있었다. 그 결과는 Fig. 21을 통하여 확인할 수 있다.

펌핑 압력은 Fig. 21에서 측정된 결과를 바탕으로 펌핑 속도를 각 모드별 펄스 간격을 0.2초로 고정하고, 각 모드에서의 펄스 크기를 조절하여 펌핑 속도를 측정하는 방법과 동일하게 했다. 펄스 크기가 클수록 펌핑되는 물의 양이 증가하였다. 그러나 일정 전류 이상에서는 오히려 펌핑되는 양이 감소하였으며, 자성유체의 양이 많을수록 이러한 양상은 더 급격하였다. 그 결과는 Fig. 22을 통하여 확인할 수 있다.

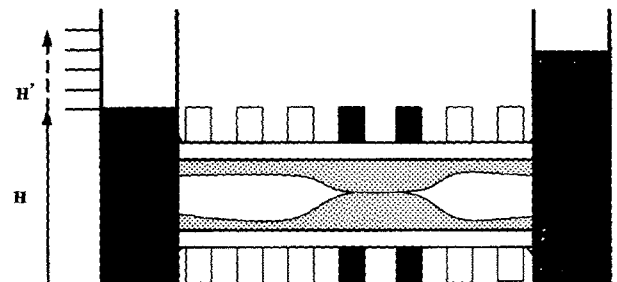


그림 20 펌핑 압력과 속도 측정 장치 개요도
Fig. 20 Measurement of the pumping forces and speed

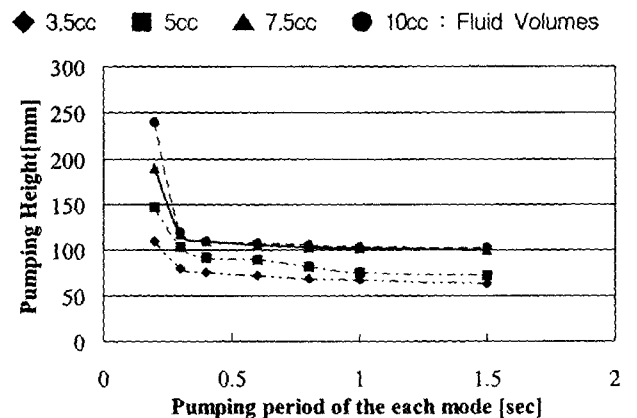


그림 21 운전 속도에 따른 MFLP의 펌핑량
Fig. 21 Effect of the driving speed

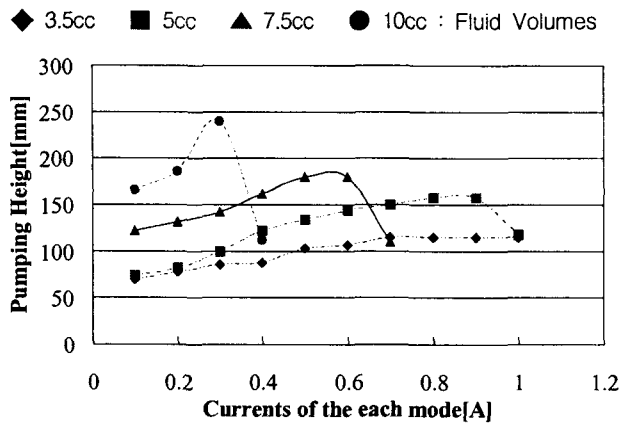


그림 22 운전 전류에 따른 MFLP의 펌핑량
Fig. 22 Effect of the driving current

4.5 고찰

직류 펄스 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. Fig. 18, 19를 통하여 본 연구진이 개발한 수치적 알고리즘으로 자성유체의 형상을 계산하기에 효과적임을 알 수 있었다. 또한, Fig. 18, 19를 통해 알 수 있듯이 자성유체의 실제 형상과 수치적 알고리즘에 의해 계산된 형상이 약간의 오차를 보이고 있다. 이것은 해석된 자성유체의 형상은 비압축성이며 무점성으로 가정한 것이고, 실제 자성유체는 압축성이며 점성을 가지는 것이기 때문이다. 따라서 MFLP의 구동에 있어 중요한 요소인 관내 자기장의 분포와 자성유체의 흐름이 해석되었으며, MFLP의 동특성을 파악할 수 있었다.

제작된 MFLP의 성능을 확인하기 위하여 펌핑 속도와 압력을 측정하였다. 펌핑 속도는 각 모드의 펄스 간격에 비례한다. 하지만 어느 간격 이상에서는 그 선형성을 잃어버리게 된다. 펌핑 압력도 속도와 마찬가지로 펄스 크기에 비례하지만, 자성유체의 양에 따라 그 선형성을 잃어버리게 된다. 이것은 자성유체의 양과 펄스의 크기, 간격의 상관관계가 있음을 보여주는 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 MFLP에 직류 펄스 전류를 인가할 경우의 동작 특성에 대하여 자기장의 분포를 해석하고, 이러한 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. 제작된 MFLP의 펌핑 압력과 속도를 측정하고, 자성유체의 양과 동작 전류의 펄스

간격, 크기의 상관관계를 확인하였다. 또한, 자성유체의 형상이 수치적 알고리즘으로 계산한 것과 유사하지만 약간의 차이를 보인다. 이것은 자성유체의 점성을 고려하지 않았기 때문이다.

차후 자성유체의 응집 문제를 해결하기 위하여 밀봉 방법 개선과 자성유체의 점성에 대한 특성 연구가 필요할 것이다. 또한, MFLP의 보다 유연한 동작을 위하여 새로운 패턴의 동작 방식을 연구, 개발하여야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 지역대학우수과학자 육성 지원연구사업(R05-2003-11069-0)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

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. Micro-electro-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 Magnetism Conference, Kyongju, Korea, May 18-21 1999/ IEEE Trans. Magn., Vol.35, No.5, pp. 4058-4060, Sep-tember 1999.
- [9] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, "New Structure of the Magnetic Fluid Linear Pump", IEEE Inter-mag2000, 2000 IEEE International Magnetism

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.

저 자 소 개



서 강 (徐 康)

1976년 1월 17일생. 2001년 한국해양대학교 전기공학과 졸업. 2003년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사). 2004년 부산대학교 대학원 재학(박사)

Tel : 051-510-2976

E-mail : kalam@bada.hhu.ac.kr



박 관 수 (朴 寬 秀)

3월 25일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1987년 서울대학교 대학원 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박사). 1997년~1999년 Carnegie Mellon Univ. Visiting scalar. 1994년~2003년 한국해양대학교 전기전자공부 교수. 2003년~현재 부산대학교 전자전기정보 컴퓨터공학부 조교수

Tel : 051-510-2788

E-mail : gspark@pusan.ac.kr