

工學碩士 學位論文

의료용 **Magnetic Fluid Linear Pump**
개발

Development of a Magnetic Fluid Linear Pump
for Medical Purpose

指導教授 朴 寬 秀

2003 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

電 氣 工 學 科

徐 康

本 論文을 徐康의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 吳 珍 錫 ㊟

委 員：工學博士 吉 暻 碩 ㊟

委 員：工學博士 朴 寬 秀 ㊟

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科 徐 康

목 차

Abstract

제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구개요	3
제 2 장 자성유체의 구조와 성질	5
2.1 자성유체의 물성	5
2.2 자성유체의 성질	6
2.3 자성유체의 응용	7
제 3 장 자성유체의 해석	9
3.1 선형운동량 해석	9
3.2 Navier-Stokes 방정식에 의한 유체해석	17
3.3 유한요소법에 의한 자기장 해석	21
3.4 유체 형태를 결정하는 수치해석	24

제 4 장 MFLP(Magnetic Fluid Linear Pump)의 구조 및 설계 ..	31
4.1 MFLP의 구조	31
4.2 MFLP의 원리	33
4.3 MFLP의 최적 설계	37
제 5 장 MFLP 제작	41
제 6 장 MFLP의 실험 및 운전	47
6.1 MFLP의 관내 자기장 분포	47
6.2 MFLP 관내 자성유체의 형상	52
6.3 MFLP 운전	55
6.4 MFLP의 펌핑 속도와 펌핑 압력	59
제 7 장 결 론	62
참 고 문 헌	64

Development of a Magnetic Fluid Linear Pump for Medical Purpose

by Kang Seo

Department of Electrical Engineering
The Graduate School of Korea Maritime University
Busan, Republic of Korea

Abstract

Magnetic fluid is liquid, so it moves under the external forces. It is also rigid under the magnetic field enough to maintain against the external forces. This very special characteristic can be applied to the various types of actuators or sensors. In this thesis, the linear pump by using magnetic fluid was developed for medical purpose. the advantages of the **MFLP** (magnetic fluid linear pump) is that it 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 by thin rubber. The sequential currents are needed to produce pumping forces. 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 controlled for the medical application. In this device, the pumping force and pumping speed could be controlled by current scheme.

In this thesis, the method to compute the pumping forces of the **MFLP** is derived. 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. Optimum design using 3-D finite element method with hydrodynamic analysis was performed. The actual **MFLP** with 12mm 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.

Index Terms : Finite element analysis, Fluid surface, Magnetic fluid,
Magnetic fluid linear pump, Magneto-hydrodynamics

기호설명

\mathbf{b}	:	체력강도
F_s	:	검사면을 통하여 계에 작용하는 표면력
F_b	:	유체의 체력
ρ	:	밀도
\mathbf{v}	:	속도
Ω	:	포텐셜 에너지
\mathbf{g}	:	중력장
μ	:	점성계수(유체역학)
τ	:	전단응력
h	:	연직좌표(높이)
P_i	:	압력
M	:	자화량
H	:	자계의 세기
P_o	:	압력의 법선성분
M_n	:	자화의 법선성분
J	:	전류밀도
B	:	자속밀도
A	:	벡타자기포텐셜

ϕ	:	포텐셜함수
μ_o	:	진공중의 투자율
μ_r	:	비투자율
NE	:	요소의 개수

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

의료용 소형 펌프에 대한 연구[1-6]는 인공심장의 혈액펌프용, 당뇨환자를 위한 인슐린 펌프, DNA 조작 등에 사용되는 소형 정밀 펌프 등으로 연구되고 있으며, 특히 인체에 삽입해서 동작하는 의료용은 소형, 경량화, 제어회로와 연결된 지능화 등의 특성이 매우 절실히 요구되고 있다.

의료용 소형펌프에 대한 연구는 1998년 일본 연구진이 기어를 없애고 다극의 두 쌍의 영구자석을 사용하여 한 자석의 회전을 다른 영구자석의 진동으로 변환하는 구조를 연구하였으며, 이 경우 기어와 같은 부품은 없었으나 회전을 직선운동으로 바꾸는 방식은 같기 때문에 여전히 진동 소음문제를 제거하지 못하였다. 그래서 에너지 효율이 낮고, 두 쌍의 영구자석이 회전하는 구조로 인하여 소형화, 경량화가 어렵다. 그 대안으로 연구되고 있는 선형 왕복 액추에이터(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 펌핑력으로 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. 1997년 일본의 연구팀이 선형 펄스 모터를 사용하여 77N, 80mm/s인 펌프를 개발하였으며[1], 1999년 1월 미국 Purdue Univ.의 Doyle FJ등의 연구진은 복잡한 제어회로를 사용하여 이 쇼크를 줄이는 연구를 발표한 적이 있으나[2], 여전히 인체에 완전 삽입되어 동작하기 위해서는 더 소형화, 고효율화 된 기기가 개발되어야 한다. 이와 같이 의료용 액추에이터의 경우 소형, 경량화, 정숙운전, 유연동작, 고효율화가 중요한 관건이 되고 있다.

펄스로 인하여 과도한 힘이 일시에 가해지는 선형 펄스 모터 방식 대신 유연한 선형추진방식의 펌프로는 제철소에서 용융된 액상의 철을 이송시키는 장치가 개발되어 사용되고 있다. 이 방식은 코일에서 발생하는 자기장이 대상액체에 직접 작용하여 펌핑력을 발생시키는 방식인데, 코일에서 발생하는 자기장을 순차적으로 이동시켜 펌핑력을 얻는 방식이다. 그러나 이 방식은 펌핑하는 대상액체가 자성체로서 투자율이 크거나 도전율이 큰 경우에만 인가된 자기장에 대한 힘이 발생된다.

그런데 의료용 액체의 경우 혈액이나 인슐린 등은 비 자성체로서 투자율이 낮고, 도전율도 매우 낮은 액체이므로 기존의 선형펌프로는 펌핑력이 발생하지 않으므로 의료용으로 사용할 수가 없다.

본 논문에서는 자성유체가 외부에서 자기장을 걸어줄 경우 자기장의 모양으로 모이게 되는 특성을 이용하여 기어나 밸브 등의 기계적인 부품이 없으며 신축부재로 펌핑대상 액체와 격리된 자성유체의 연동운동으로 비 자성체의 대상액체를 펌핑할 수 있고, 또한 의료용으로 사용할 수 있는 소형, 경량의 선형 펌프를 개발하고자 한다. 의료용으로 사용하기 위하여 기기를 소형화, 경량화 할 수 있는 설계방법을 개발하고, 동작쇼크 없는 유연한 운전방식을 개발하고자 한다.

1.2 연구개요

자성유체는 자기적 성질을 가지는 유체로서 외부에서 자기장을 걸어줄 경우 자기장의 모양으로 모이게 된다. 자성유체의 형상을 모델링하기 위해 자성유체를 압축할 수도 없고 무점도이며 균질인 것으로 가정한다. 이러한 자성유체를 이용하여 선형 펌프를 설계하고 제작하여 운전하고 해석한 데이터와 측정된 데이터를 비교하였다.

본 논문의 제 2장에서는 자성유체의 구조와 성질, 그리고 응용에 대하여 설명한다. 자성유체를 이용하기 위해서는 먼저 자성유체의 물성과 구조, 그리고 성질에 대하여 이해하고, 이러한 자성유체가 현재 어떻게 적용되어 사용되고 있는지에 대한 응용에 대하여 설명한다. 제 3장에서는 이와 같은 자성유체의 외부 자기장에 의한 동작과 형상을 모델링하기 위하여 수치적 알고리즘[7]에 대해 설명한다. 수치적 알고리즘은 Navier-Stokes 방정식과 비선형 유한요소법을 사용한다. 운동 방정식인 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 유체의 응력을 계산함과 동시에 비선형 유한 요소법을 이용하여 외부 자기장이 유체에 미치는 영향과 유체가 자기장에 미치는 영향을 계산한다. 이러한 방정식을 해석함으로써 해서 자성유체의 표면 평형 상태를 가지는 자성유체의 형상을 해석할 수 있게 된다. 제 4장에서는 선형 펌프의 구조와 원리에 대해 설명하고, 2장과 3장에서 언급한 자성유체의 특성과 형상 해석, 그리고 유한 요소법을 이용하여 선형 펌프를 최적 설계하였다. 가는 튜브관내에, 자성유체를 얇은 고무 막으로 차폐시키고 요크에 의해 발생된 자기장의 이동 펄스로 자성유체는 유동되고 관내의 액체를 이동시킨다. 또한 자성유체를 동작시키기 위한 적정량의 자기장을 얻기 위해 자기장의 분포에 영향을 주는 요

소인 요크의 크기와 요크간의 간격, 그리고 최적의 자성유체량을 유한 요소법으로 해석하였다. 제 5장에서는 4장에서의 데이터를 토대로 직경 12mm인 관에 적용하여 자기 요크를 설계하고 제작하여 MFLP(Magnetic Fluid Linear Pump)를 제작하였다. 제 6장에서는 제작된 선형 펌프의 관 내 자기장의 분포를 측정하고 이를 유한 요소법으로 해석한 결과와 비교하였다. 3장에서의 수치적 알고리즘으로 해석한 유체의 형상과 실제 자기장에서의 유체의 형상을 비교하였고, 정방향 펌핑과 역방향 펌핑 그리고 On/Off의 세 가지 운전을 하였다. 또한 선형 펌프의 펌핑 속도와 펌핑 압력을 측정하였다.

MFLP는 구조가 매우 간단하며 전동장치, 기어장치가 없다. 따라서 MFLP는 작고 가볍게 만들 수 있으며 기계적인 관성이 작으므로 속음 특성이 양호하고 진동도 없다. 또한 펄스 간격을 변화시켜 주입속도를 조절할 수도 있으며 펄스 크기를 변화시킴으로 주입 저항력을 조절하기 위한 주입력의 조절이 가능하다. 이러한 MFLP는 무소음·무진동과 소형·경량화가 가능함으로써 의료용 펌프로 활용이 가능함을 보였다.

제 2 장 자성유체의 구조와 성질

2.1 자성유체의 물성

자성유체는 일반 액체(液體)의 특성과 자성체의 특성으로 자기장에 반응하며, 자기장의 분포와 같은 형태로 유지되는 물체이다. 이러한 자성유체는 3가지 기본적인 구성 요소인 자성미립자, 계면활성제 그리고 캐리어로 구성되어 있는 안정된 콜로이드 액체로서 자성적 성질을 가지고 있다. 자성 미립자의 평균지름은 100\AA 정도의 크기로 마그네타이트(Fe_3O_4)와 같은 안정된 입자로서 중력에 의한 침강이나 자기적 응집을 일으키지 않는 특성을 나타낸다. 계면활성제는 물은 용액 속에서 계면에 흡착하여 그 표면장력을 감소시키는 물질을 말하며, 표면 활성제라고도 한다. 계면활성제는 자성 미립자에 부착되어 있는 머리 그리고, 캐리어

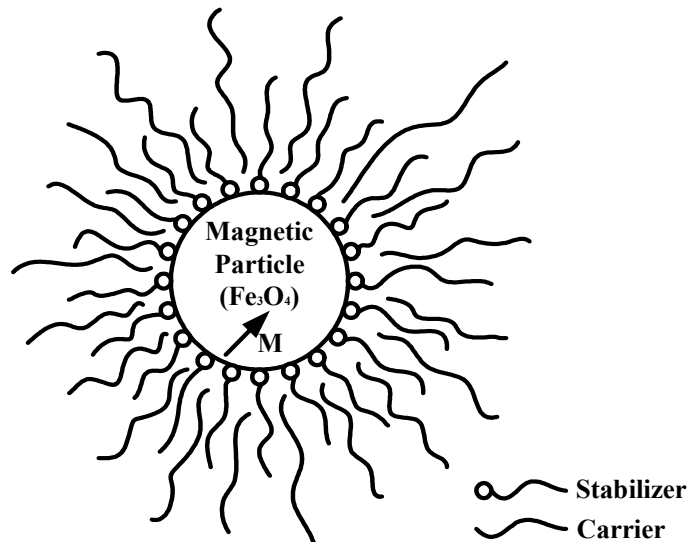


Fig. 2.1 Shape of the magnetic fluid

와 친화력을 갖는 꼬리 부분으로 이루어져 있으며 자성 미립자를 캐리어 중에 분산시키고 꼬리 부분이 서로 반발하여 자성 미립자가 응집되지 않도록 하는 작용을 한다. 외부 자기장이 없을 때는 자성 미립자의 자기적 행동은 일정하지 않게 분산하게 되고, 그 자성유체는 자화되어 있지 않은 상태로 된다.

2.2 자성유체의 성질

자성유체의 물리·화학적 성질은 그 대부분이 사용되는 캐리어에 따라 영향을 받는다. 밀봉 시스템에 이용할 경우 차단하려고 하는 물질의 성질, 주변장치의 환경 등에 따라서 캐리어의 종류를 선택한다. 반도체 제조 장치와 같이 고 진공이 요구되는 경우는 증발량이 적은 것을

Table 1 Characteristics of the magnetic fluid and ferrofluid

형명	WIL	D04	EIL	P03	M11
주 캐리어	트리에스터	다이에스트	과-폴로오르 폴리에테르	폴리페닐에 테르	트리에스터
주 용 도	진 공 실	진 공 실	활성가스 실	방 진 실	방 진 실
포화자화 (Gauss)	450	450	350	200	300
점도 (cps at 27℃)	300	500	3,500	200	120
증발량($\times 10^{-6}$) (g/sec · cm ²)	1.39	10.70	2.24	3.17	3.69
밀 도	1,425	4,410	2,245	1,080	1,210
유동점(℃)	-28	-44	-27	-51	-54

채용하고, 활성 가스를 사용하는 경우는 파-플로오르 폴리에테르와 같은 화학적으로 안정된 캐리어를 채용한다. 소형 컴퓨터용의 방진실에서는 자성 유체의 점성에 의한 손실 토크를 최소화하기 위하여 점성이 낮은 유체를 사용한다. 원자력 관계에서는 방사선으로 분해되지 않는 용매를 캐리어로 사용하는 등 현재의 자성유체는 그 용도에 따라 선정하고 있다. 자성유체의 캐리어별 특성을 Table 1에 제시하였다.

자성유체의 수명은 캐리어의 증발에 의하여 유동성이 없어지는 때가 그 수명을 다하는 것이다. 일반적으로 자성유체의 증발율은 20℃ 이상이 되면 급격히 증가한다.

2.3 자성유체의 응용

최근 자성유체는 그 특성을 이용하여 여러 특수 목적으로 응용되고 있다. 자성유체의 점성, 유체·자성체적 성질 등의 특성을 이용하는 것이다.

자성유체의 응용 가운데 가장 활용도가 높은 것이 밀봉 시스템이다. 이러한 시스템으로는 반도체 프로세스에서의 진공장치용 진공 회전축이 있다. 이는 고정부와 회전 부 사이에 자성 유체를 삽입하여 밀봉의 효과를 꾀하는 것이다. 그리고 컴퓨터의 외부 기억장치의 하나로서 자기 디스크가 수납되어 있는 자기 디스크 장치 또한 자성유체의 밀봉을 응용한 예이다. 디스크 팩 내부는 청정 환경이 요구되며 0.2 μ m 정도의 먼지도 없어야 한다. 그래서 디스크 밀봉에서의 자성유체는 외부로부터의 먼지나 오염물질 등이 스핀들 부의 사이에서 디스크 팩 내로 침입하여 디스크면에 부착하는 것을 방지한다. 자성유체 밀봉 시스템의 예는 또 있다. 초전도 발전기에 사용하는 것이다. 이 경우 고속 회전축에 자성유체를 이

용하여 헬륨 가스를 밀봉하는 목적으로 사용되고 있다.

응용의 두 번째로는 금속의 작은 흠이나 결함을 발견할 때 자성유체를 금속 위에 흘려 두고 자기장을 걸어두면 작은 흠에 자성유체가 모이는 현상을 이용하여 결함이나 흠을 발견하기 위하여 사용되고 있다.

세 번째로는 DVD DRIVE나 CD-ROM DRIVE에서 고속 회전 시 발생하는 소음을 줄이기 위한 용도로 기계 베어링을 대체한 유체 베어링이 있다.

네 번째로는 고음질 스피커에 사용할 경우 자기저항을 저감시켜 자기 회로의 효율을 증가시킬 수 있다. 또한 유체로서의 열전도 특성을 이용하여 코일 부분의 열을 발산시키는 냉각제로서의 역할도 한다.

이러한 네 가지 용도 외에도 최근에 고급 승용차의 충격 흡수 장치 (shocks absorber)에 사용되고 있다. 이 것은 쇼크 업소버 내부의 오일 대신에 자성유체를 넣어 자기장의 강도로 자성유체의 점성을 조절하고 쇼크 업소버를 조절하는 방식이다.

본 논문에서는 자성유체의 자기적 특성인 자기장의 분포로 형성되는 특성과 응력을 이용하여 선형 펌프를 개발하였다. 개발한 선형 펌프는 정, 역방향으로 펌핑 방향을 바꿀 수 있으며, 구조가 간단하고 기어 등의 부가장치가 없는 장점이 있다.

제 3 장 자성유체의 해석

자성유체는 자기장의 분포로 그 형상이 이루어지며 자성유체로 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 선형운동량 해석

유체가 유동할 때에는 연속방정식과 함께 운동량방정식도 만족해야 한다. 운동량방정식은 유체의 운동을 지배하는 뉴턴 방정식이다. 미분형 운동량방정식을 산출하기 위해 적분형 운동량방정식을 미소 검사역에 적용하여 산출하는 방법과 미소유체요소(계)에 직접 뉴턴의 운동 제 2법칙을 적용하여 산출하는 방법이 있다. 본 논문에서는 미소 검사역에 적용하여 산출한다. 미소 검사역에 의한 방법으로 산출한 결과는 자동적으로 후자인 뉴턴의 운동 제 2법칙이 된다.

유체는 계를 고립시켜 독립적으로 다룰 수가 없으므로 계가 갖는 선형운동량의 시간변화율 DP/Dt 를 레이놀드(Reynolds) 수송법칙을 사용하여 오일러(Euler)적으로 기술해야 한다. 이를 위하여 Fig. 3.1의 직육면체는 임의의 시각 t 에 계가 점유했던 체적을 미소 검사체적 CV로 택하면, 표면은 검사표면 CS가 되므로 선형 운동량 방정식은 다음과 같이 된다.

$$-\int_{CS} p d\mathbf{A} + \int_{CS} \boldsymbol{\tau} d\mathbf{A} + \mathbf{F}_R + \int_{CV} \mathbf{b} \rho dv = \frac{D\mathbf{P}}{Dt} \quad (3.1.1)$$

여기서 \mathbf{b} 는 체력밀도, \mathbf{F}_R 은 압력과 전단 응력 이외의 미지 반력이다. 계가 갖는 선형 운동량의 시간 변화율은 레이놀드 수송 방정식에 의하여 다음과 같이 오일러적으로 기술된다.

$$\left(\frac{D\mathbf{P}}{Dt}\right)_{sys} = \int_{CS} \mathbf{v}(\rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \mathbf{v} \rho dv \quad (3.1.2)$$

선형 운동량 방정식 식 (3.1.1)은 관성좌표계 xyz 공간에서 세운 방정식이지만, 관측좌표 uvw 공간이 xyz 에 대하여 정지 또는 등속도 운동을 할 경우에는 양 좌표계에서 관측한 가속도가 같으므로 uvw 공간도 관성

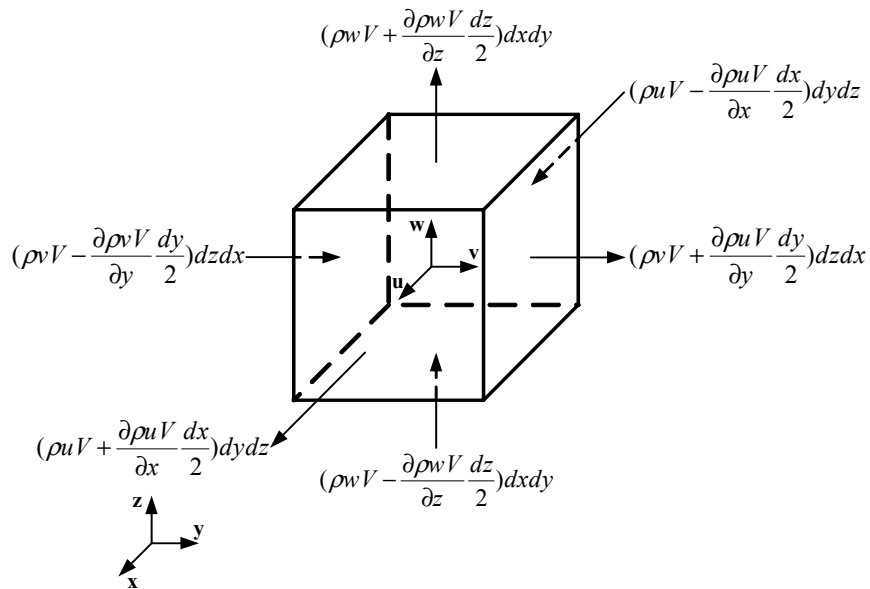


Fig. 3.1 Motional quantity to pass a surface

좌표공간이 되어, 식 (3.1.1)을 그대로 uvw 공간에서 적용할 수 있다. 따라서, 선형 운동량의 시간변화율 DP/Dt 와 식 (3.1.2)의 좌변 $(DP/Dt)_{\text{sys}}$ 은 동일 계가 갖는 선형 운동량의 변화율을 동일 관측 좌표계에서 관측한 값이므로 같은 값을 가져야 한다. 그러므로 식 (3.1.1)과 식 (3.1.2)가 같다고 하면 선형 운동량 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 - \int_{CS} p d\mathbf{A} + \int_{CS} \boldsymbol{\tau} d\mathbf{A} + \mathbf{F}_R + \int_{CV} \mathbf{b} \rho dv \\
 = \int_{CS} \mathbf{v}(\rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \mathbf{v} \rho dv
 \end{aligned} \tag{3.1.3}$$

이 방정식의 물리적 의미는

$$\begin{aligned}
 \left[\begin{array}{c} \text{검사 표면} \\ \text{에 작용하는} \\ \text{표면력} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{검사체적에} \\ \text{작용하는} \\ \text{체력} \end{array} \right] \\
 = \left[\begin{array}{c} \text{검사표면을 통하여} \\ \text{단위시간당 유출하} \\ \text{는 선형 운동량의} \\ \text{정미유출량} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{검사체적 내에서} \\ \text{단위시간당 증가} \\ \text{하는 선형운동량} \\ \text{증가 속도} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

이다. 식 (3.1.3)을 다시 표현하면

$$\mathbf{F}_S + \int_{CV} \mathbf{b} \rho dv = \int_{CS} \mathbf{v}(\rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \mathbf{v} \rho dv \tag{3.1.4}$$

와 같다. 여기서 F_S 는 검사면을 통하여 계에 작용하는 표면력이므로, 압력 p 와 전단 응력 $\boldsymbol{\tau}$ 그리고 미지 외력 F_R 로 이루어진다. 검사역이 미소하므로 검사역내에서 밀도 ρ 는 균등하게 분포되어 있다고 생각할 수 있으므로 유체의 체력인 좌변 둘째 항은 근사적으로

$$\int_{CV} \mathbf{b} \rho dV = \rho \mathbf{b} dx dy dz \quad (3.1.5)$$

와 같이 쓸 수 있다. 그리고 우변 첫째 항은

$$\begin{aligned} & \int_{CS} \mathbf{v}(\rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A}) \\ &= \left\{ -\left[\rho u \mathbf{v} - \frac{\partial \rho u \mathbf{v}}{\partial x} \frac{dx}{2} \right] + \left[\rho u \mathbf{v} + \frac{\partial \rho u \mathbf{v}}{\partial x} \frac{dx}{2} \right] \right\} dy dz \\ &= \left\{ -\left[\rho v \mathbf{v} - \frac{\partial \rho v \mathbf{v}}{\partial y} \frac{dy}{2} \right] + \left[\rho v \mathbf{v} + \frac{\partial \rho v \mathbf{v}}{\partial y} \frac{dy}{2} \right] \right\} dz dx \quad (3.1.6) \\ &= \left\{ -\left[\rho w \mathbf{v} - \frac{\partial \rho w \mathbf{v}}{\partial z} \frac{dz}{2} \right] + \left[\rho w \mathbf{v} + \frac{\partial \rho w \mathbf{v}}{\partial z} \frac{dz}{2} \right] \right\} dx dy \\ &= \left[\frac{\partial \rho u \mathbf{v}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \mathbf{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho w \mathbf{v}}{\partial z} \right] dx dy dz \end{aligned}$$

와 같이 된다. 식 (3.1.4)의 우변 마지막 체적 적분도 근사적으로

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \mathbf{v} \rho dV = \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} dx dy dz \quad (3.1.7)$$

와 같이 쓸 수 있다. 이들 값을 식 (3.1.4)에 대입하고 정리하면 운동량 방정식은

$$\begin{aligned} F_s + \rho \mathbf{b} dx dy dz \\ = \left[\frac{\partial \rho u \mathbf{v}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \mathbf{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho w \mathbf{v}}{\partial z} + \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} \right] dx dy dz \end{aligned} \quad (3.1.8)$$

을 얻는다. 운동량 방정식은 식 (3.1.8)을 그대로 사용하는 것은 어려우므로 편리하게 변형해야한다. 그러기 위해서 우선 식 (3.1.8)의 우변을 미분 전개하면

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \rho u \mathbf{v}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \mathbf{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho w \mathbf{v}}{\partial z} \\
&= \mathbf{v} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right) \\
&+ \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} \right) \\
&= \mathbf{v} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} \right) + \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt}
\end{aligned} \tag{3.1.9}$$

가 된다. 여기서 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \tag{3.1.10}$$

을 적용하였다. 식 (3.1.9)의 관계를 식 (3.1.8)에 적용하면 선형운동량방정식은

$$F_s + \rho \mathbf{b} \, dx \, dy \, dz = \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} \, dx \, dy \, dz \tag{3.1.11}$$

을 얻는다. 식 (3.1.11)은 미소입자 $\rho \, dx \, dy \, dz$ 에 대한 뉴턴의 운동법칙이다. 유체입자에 작용하는 표면력은 응력이다. 식 (3.1.11)에서 표면력 F_s 를 응력 항으로 나타내야 한다.

유체입자에 작용하는 힘은 표면력과 체력이다. 체력은 외부장(중력장, 자장, 전장 등)에 의하여 계의 질에 표면을 통하지 않고 계에 직접 작용하는 힘이다. 만일 외부장이 보존력장이고, 퍼텐셜에너지(단위질량에 대하여)를 \mathcal{Q} 라고 하면 체력장도 \mathbf{b} 는

$$\mathbf{b} = -\nabla\Omega \quad (3.1.12)$$

와 같은 관계가 있다. 특히 외부장이 중력장이고 연직 상방의 좌표를 직교좌표계에서 z좌표로 택한다면

$$\Omega = gz \quad (3.1.13)$$

$$\mathbf{b} = -\nabla\Omega = -\nabla gz = -g\mathbf{k} = \mathbf{g} \quad (3.1.14)$$

이므로

$$\mathbf{b} = \mathbf{g} \quad (3.1.15)$$

이다. 표면력은 응력 텐서

$$\sigma_{ij} = [\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yz} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.1.16)$$

가 검사 면에 작용하는 힘이다. 힘은 벡터량이므로

$$\mathbf{F}_s = F_{sx}\mathbf{i} + F_{sy}\mathbf{j} + F_{sz}\mathbf{k} \quad (3.1.17)$$

와 같은 성분으로 나누어 표시할 수 있다. 여기서 x성분은

$$\begin{aligned}
F_{sx} &= \left[-\left(\sigma_{xx} - \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) + \left(\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \right] dydz \\
&+ \left[-\left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) \right] dzdx \\
&+ \left[-\left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) \right] dxdy \\
&= \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dxdydz
\end{aligned} \tag{3.1.18}$$

이고, 같은 방법으로 y, z방향의 성분을 계산하면

$$F_{sy} = \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) dxdydz \tag{3.1.19}$$

$$F_{sz} = \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) dxdydz \tag{3.1.20}$$

을 얻는다. 따라서 힘 \mathbf{F}_s 는

$$\begin{aligned}
\mathbf{F}_s &= \left[\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \mathbf{i} \right. \\
&+ \left. \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \mathbf{j} \right. \\
&+ \left. \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) \mathbf{k} \right] dxdydz
\end{aligned} \tag{3.1.21}$$

이다. 식 (3.1.21)을 텐서 연산으로 표현하면 간단히 표시할 수 있다. 식 (3.1.21)을 벡터 ∇ 와 텐서 $[\sigma]$ 의 텐서 곱으로 표시하면

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yz} & \sigma_{yy} & \tau_{zz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \nabla \cdot [\sigma] \quad (3.1.22)$$

이 된다. 이 관계식을 식 (3.1.21)에 대입하면

$$F_s = \nabla \cdot [\sigma] dxdydz \quad (3.1.23)$$

또 다음 식

$$[\sigma] = -p[1] + [\tau] = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (3.1.24)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right] \quad (3.1.25)$$

을 식 (3.1.23)에 대입하면

$$F_s = [-\nabla p + \nabla \cdot [\tau]] dxdydz \quad (3.1.26)$$

을 얻는다. 따라서, 운동량방정식은 식 (3.1.26)을 식 (3.1.11)에 대입하여

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \nabla \cdot [\tau] + \rho \mathbf{b} \quad (3.1.27)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \nabla \cdot [\tau] + \rho \mathbf{b} \quad (3.1.28)$$

와 같은 형으로 표시된다. 식 (3.1.28)은 단위체적의 유체가 만족해야 할

뉴턴의 운동법칙이다. 좌변은 단위체적의 유체가 갖는 관성력이고, 우변 제 1항은 압력구배 때문에 단위체적유체에 가해지는힘, 제 2항은 점성마찰, 제 3항은 외부장에 의한 단위체적에 가해지는 힘이다.

3.2 Navier-Stokes방정식에 의한 유체해석

유체 내에 작용하는 응력은 직접 측정이 어려우므로 운동방정식 식 (3.1.28)을 그대로 사용하여 유체의 운동을 해석할 수 없다. 그러므로 식 (3.1.28)을 응력 대신 속도 구배항으로 표시하여 사용하는 것이 유용하다.

Navier(1823)와 Stokes(1845)는 운동량방정식에 뉴턴 유체에 대한 응력-속도 구배관계를 대입하여 뉴턴 유체가 유동할 때 만족해야할 운동방정식을 도출하였다[45]. 이 운동방정식을 Navier-Stokes방정식이라 한다.

그러므로 Navier-Stokes방정식의 응력의 편차성분은

$$[\tau] = 2\mu[e] + \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v})[I] \quad (3.2.1)$$

이므로

$$\begin{aligned} \nabla \cdot [\tau] &= \nabla \cdot [2\mu[e] + \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v})[I]] \\ &= \nabla(\lambda\nabla \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot (2\mu[e]) \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

와 같이 된다. 여기서

$$[e] = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.2.3)$$

이다. 이 관계를 운동방정식 식 (3.1.28)에 대입하면 Navier-Stokes 방정식

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \nabla(\lambda \nabla \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot (2\mu[\mathbf{e}]) + \rho \mathbf{b} \quad (3.2.4)$$

을 얻을 수 있고, 텐서 기호로 표시하면

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho b_i \quad (3.2.5)$$

와 같이 쓸 수 있다.

점성계수 μ 와 λ 가 공간좌표에 무관한 일정한 유동에서는 우변 둘째 항은

$$\begin{aligned} \nabla(\lambda \nabla \cdot \mathbf{v}) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \\ &= \lambda \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) = \lambda \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (3.2.6)$$

와 같으며 셋째 항은

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (2\mu[\mathbf{e}]) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ &= \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \mu \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i \partial x_i} \\ &= \mu \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) + \mu \nabla \cdot \nabla \mathbf{v} \end{aligned} \quad (3.2.7)$$

이므로 Navier-Stokes 방정식은

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) + \mu \nabla \cdot \nabla \mathbf{v} + \rho \mathbf{b} \quad (3.2.8)$$

와 같이 정리된다. 이 것을 텐서 형으로 표시하면

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_i \partial x_i} + \rho b_j \quad (3.2.9)$$

이다. $\nabla \cdot \nabla \mathbf{v} = \nabla^2 \mathbf{v}$ 로 표시할 수도 있다. 이것을 벡터 Laplacian이라 한다. 벡터미분에서 항등식

$$\nabla \cdot \nabla \mathbf{v} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) - \nabla \times (\nabla \times \mathbf{v}) \quad (3.2.10)$$

를 적용하면 식 (3.2.8)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + (\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) - \mu \nabla \times (\nabla \times \mathbf{v}) + \rho \mathbf{b} \quad (3.2.11)$$

유동이 비압축성 유동인 경우 연속방정식에 의해 $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ 이므로, Navier-Stokes 방정식으로부터 계수 λ 가 제거되며, 점성계수가 일정한 유체의 비압축성 유동에 대한 Navier-Stokes 방정식은 식 (3.2.8)로부터

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla \cdot \nabla \mathbf{v} + \rho \mathbf{b} \quad (3.2.12)$$

혹은 식 (3.2.11)로 부터

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p - \mu \nabla \times (\nabla \times \mathbf{v}) + \rho \mathbf{b} \quad (3.2.13)$$

와 같이 간단히 주어진다. 체력이 중력장에만 의한다면

$$\mathbf{b} = \mathbf{g} = -\nabla\Omega \quad (3.2.14)$$

이다. 여기서 \mathbf{g} 는 지구중력 가속도로, 중력장에서 단위질량에 작용하는 중력, 즉 중력장의 체력강도이다. 또 h 를 연직 좌표라고 하면 퍼텐셜 에너지강도 Ω 는

$$\Omega = gh \quad (3.2.15)$$

이므로

$$\mathbf{b} = \mathbf{g} = -\nabla\Omega = -\nabla gh \quad (3.2.16)$$

로부터 μ 가 일정한 비압축성 유동에 대한 중력장에서 성립하는 Navier-Stokes 방정식은 벡터형으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla \cdot \nabla \mathbf{v} - \rho \nabla gh \quad (3.2.17)$$

비압축성 비점성 유동장에 운동량이론을 적용한 운동방정식을 오일러 방정식이라 하며, 비압축성 Navier-Stokes 방정식인 식 (3.2.12)에 $\mu=0$ 을 대입하여 얻을 수 있다.

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{b} \quad (3.2.18)$$

3.3 유한요소법에 의한 자기장 해석

유한요소법은 자계 문제 해석에 가장 널리 이용되는 방법으로 특히 비선형 문제를 해석함에 있어 다른 수치해석기법보다 우수하다. 본 절에서는 정자계 문제를 해석하기 위한 수치해석기법으로 유한요소법을 유도한다.

3.3.1 지배 방정식 유도

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 맥스웰(Maxwell)방정식과 그 보조 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3.3.1)$$

이때 매질을 고려하면

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.3.2)$$

자기 벡터포텐셜은

$$\mathbf{B} \equiv \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.3.3)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (3.3.2)에 식 (3.3.3)을 대입하고 이 것을 다시 (3.3.1)에 대입하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (3.3.4)$$

와 같고, 벡터 정리에서

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A} \right) - \left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \right) \mathbf{A} \quad (3.3.5)$$

이고

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A} \right) = \mathbf{0} \quad (3.3.6)$$

이므로, 식 (3.3.5)와 식 (3.3.6)을 식 (3.3.4)에 대입하면

$$-\left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \right) \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (3.3.7)$$

와 같고, 선형 등방성 매질에서

$$-\nabla^2 \mathbf{A} = \mu \mathbf{J} \quad (3.3.8)$$

이다. 식 (3.3.8)이 Poisson 방정식이다. 이것을 유한요소법에 사용하기 위하여 functional 형태로 바꾸면 $\frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}$ 형태의 kinetic energy 형태와 $-\mathbf{J} \mathbf{A}$ 형태의 potential energy 형태로 나타낼 수 있다. 에너지 형태의 함수를 범함수 형태로 바꾸면

$$\begin{aligned}
I(\mathbf{A}) &= \int \left[\frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} - \mathbf{J} \cdot \mathbf{A} \right] dv \\
&= \int \left[\frac{1}{2} \frac{1}{\mu} \mathbf{B}^2 - \mathbf{J} \cdot \mathbf{A} \right] dv
\end{aligned}
\tag{3.3.9}$$

로 나타낼 수 있으며, 다시 자기 벡터포텐셜 형태로 정리하면

$$I(\mathbf{A}) = \int \left[\frac{1}{2} \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A})^2 - \mathbf{J} \cdot \mathbf{A} \right] dv
\tag{3.3.10}$$

와 같다. 해는 에너지가 가장 작은 값이므로 $I(\mathbf{A})$ 가 0일 때이다.

3.3.2 유한요소 정식화

식 (3.3.10)을 일반화시키면

$$-\nabla^2 \phi = f
\tag{3.3.11}$$

형태로 나타낼 수 있다. 이 것을 유한개의 요소로 나누기 위해서 2차원 일 경우 보간 함수

$$\phi(x, y) = \sum_{e=1}^{NE} \phi^e(x, y)
\tag{3.3.12}$$

를 사용하며 $\phi^e(x, y)$ 는

$$\phi^e(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y
\tag{3.3.13}$$

로 표현한다. 고정 경계조건($\Psi = g(s)$)과 자연 경계조건($\frac{\partial \phi}{\partial n} = h(s)$)을 만족시키는 유한요소로 정식화시키면

$$\frac{\partial I^e(\phi_i)}{\partial \phi_i} = 0 \quad (3.3.14)$$

와 같고, 식 (3.3.14)를 범함수 형태로 바꾸면

$$I^e(\phi^e) = \frac{1}{2} \int \int \left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy - \int \int f \phi dx dy \quad (3.3.15)$$

이며 식 (3.3.15)에 식 (3.3.12)를 적용하여 다음과 같이 간략화 된다.

$$\sum_{j=1}^n K_{ij} \phi_j = f_i \quad (3.3.16)$$

이 행렬에 고정경계조건과 자연경계조건을 대입한 후 해를 구할 수 있다.

3.4 유체의 형태를 결정하는 수치해석

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{d\rho}{dt} \quad (3.4.1)$$

$$\mathbf{F} = \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \quad (3.4.2)$$

여기서 ρ 는 단위 체적당 중량이고, \mathbf{V} 는 속도 벡터이다. 식 (3.4.2)에서의 힘 \mathbf{F} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^g + \mathbf{F}^m + \mathbf{F}^e \quad (3.4.3)$$

여기서 \mathbf{F}^g 는 중력으로

$$\mathbf{F}^g = -\nabla U \quad U = \rho gh \quad (3.4.4)$$

와 같고, \mathbf{F}^m 은 기계력으로

$$\mathbf{F}^m = -\nabla P \quad (3.4.5)$$

이며, \mathbf{F}^e 는 전자기력으로

$$\mathbf{F}^e = -\nabla \Psi \quad (3.4.6)$$

와 같다. 여기서 Ψ 는 매질의 전자기 에너지이며

$$\Psi = -\int M dH \quad (3.4.7)$$

와 같다. 그래서 식 (3.4.2)를 다시 나타내면

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla U - \nabla P - \nabla \Psi \quad (3.4.8)$$

이다. 식 (3.4.8)을 다음과 같은 벡터 회전을 이용하면

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \nabla \left(\frac{1}{2} V^2 \right) - \mathbf{V} \times (\nabla \times \mathbf{V}) \quad (3.4.9)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \left(P + \Psi + \frac{1}{2} \rho V^2 + U \right) = \rho \mathbf{V} \times (\nabla \times \mathbf{V}) \quad (3.4.10)$$

와 같이 된다. 유체의 유동이 없는 상태에서 속도항은 0이 된다. 따라서 식 (3.4.10)에서 $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} \rightarrow 0$ 이 되므로

$$\nabla \left(P - \int M dH + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g h \right) = \rho \mathbf{V} \times (\nabla \times \mathbf{V}) \quad (3.4.11)$$

와 같이 다시 나타낼 수 있다. 유체가 회전하지 않는다면

$$(\nabla \times \mathbf{V}) = 0, \quad \mathbf{V} = -\nabla \phi \quad (3.4.12)$$

와 같은 식이 적용된다. 그래서 식 (3.4.11)은

$$P_i - \int M dH + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g h = C \quad (3.4.13)$$

와 같이 된다. 여기서 P_i , M , H , ρ , g , h 는 각각 내부 압력, 자화, 자기

장, 질량밀도, 중력상수, 액체높이이다. C는 유체 상수로 유체역학적으로 액체 표면을 따라 일정하다. 표면평형상태를 만족하기 위해 자속 밀도의 법선 성분과 자계의 세기의 접선성분은 자성유체의 표면에서 연속적이다. 그래서 유체표면에서의 압력은

$$P_o = P_i + \int MdH + \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 \quad (3.4.14)$$

와 같다. 식 (3.4.13)과 식 (3.4.14)로부터

$$P_o = 2 \int MdH - \frac{1}{2} \rho V^2 - \rho gh + \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 + C \quad (3.4.15)$$

와 같이 된다. 여기서 P_o 와 M_n 은 각각 입력과 자화의 법선 성분이다. 식(3.4.15)를 C에 대하여 정리하면

$$C = P_o - 2 \int MdH + \rho gh - \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 \quad (3.4.16)$$

이다. 이 방정식의 유체 상수 C는 자성유체의 곡선 S를 결정한다. 이 알고리즘은 일정한 자성유체의 부피이다. 이것을 이용하여 유체의 형상을 구하기 위해 Fig. 3.1과 같은 알고리즘에 따라 유한요소법을 이용한 반복 계산이 수행되어야 한다. Fig. 3.2는 유체의 표면 평형 상태를 해석하기 위한 두 개의 방정식을 결합하기 위한 개요도이다. 알고리즘을 증명하기 위해 평평한 표면 위에 하나의 코일에 의해 존재하는 자성유체의 모습이 컴퓨터에 의해 구현되고, 측정되었다. Fig. 3.3에서 보여진 바와 같이 컴

퓨터와 구현된 모습과 사진이 찍힌 모습이 잘 일치한다. Fig. 3.3의 (b) 그림에서 자석의 크기는 직경과 높이 각각 10mm이다. Fig. 3.4는 자성유체의 형상을 해석한 한가지 예이다. 이 것은 Fig. 4.1의 mode 2에 해당하는 전류를 여자할 때 자성유체의 양에 따라 Fig. 3.4에서는 ① ② ③ ④의 4가지 경우의 평형상태의 일 예가 있다. 자성유체의 체적을 만족하는 한 개의 곡선이 마지막 형태이다. 자성유체의 형상은 다음과 같은 8개 단계로 해석한다.

Step 1 : 유체부피 V_o 와 외부압력 P_o 를 입력시킨다.

Step 2 : 유한요소법을 사용하여 영역에서의 자계의 세기 H^i 를 계산한다.

Step 3 : P_o 를 사용하여 식 (3.4.16)에 의해 영역내의 C를 계산한다.

Step 4 : 영역 안에서 유체의 경계면상의 좌표값을 임의의 x_k 로 취하여 C를 계산한다.

Step 5 : C값이 같은 선을 따라 유체의 경계면을 나타내는 S를 결정한다.

Step 6 : S에 의해 결정된 유체부피 V_k 를 계산한다.

Step 7 : 만약 $|V_k - V_o|$ 이 충분히 적지 않으면 x_k 값을 조정하고 Step 4로 되돌아간다.

Step 8 : 만약 $|H^i - H^{i-1}|$ 이 충분히 적지 않으면 Step 2로 되돌아간다.

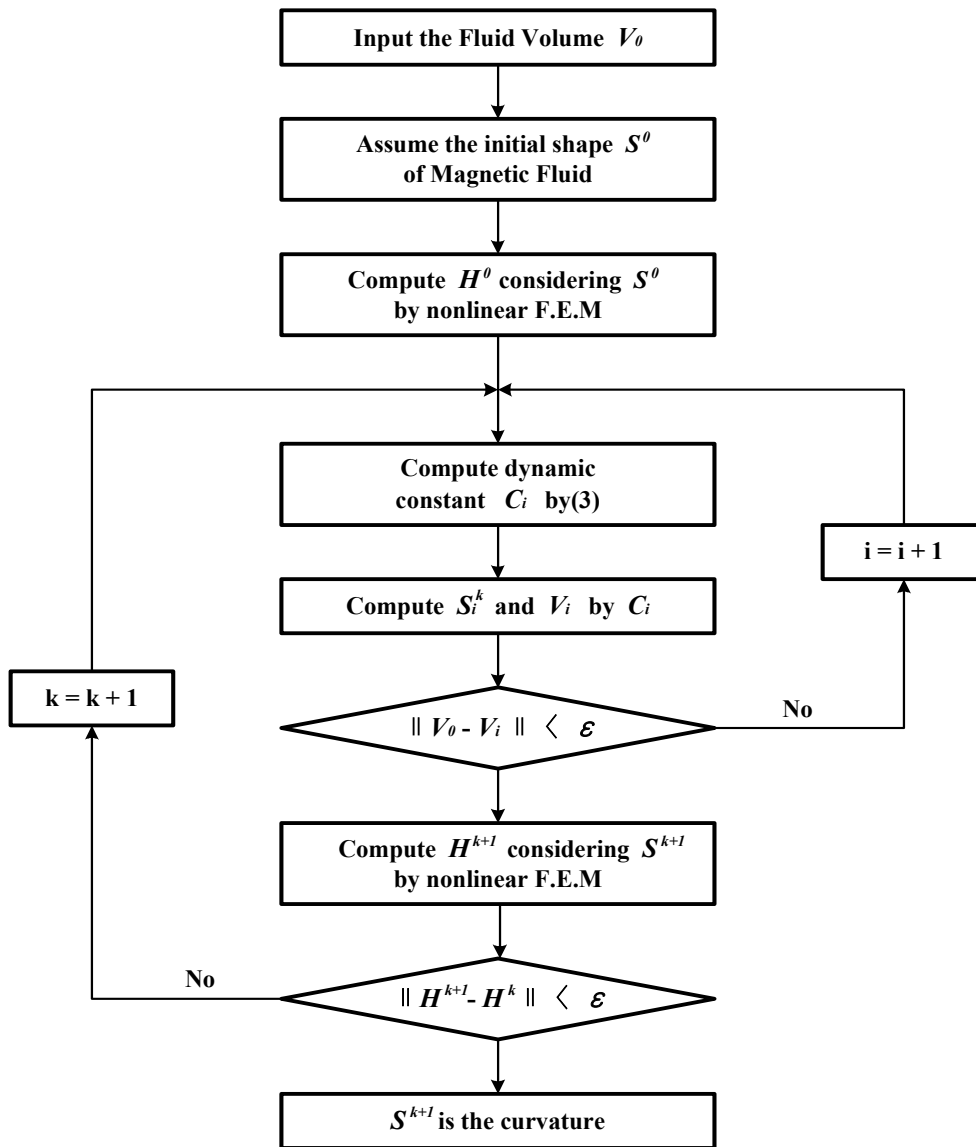


Fig. 3.1 Numerical algorithm for the magnetic fluid shape

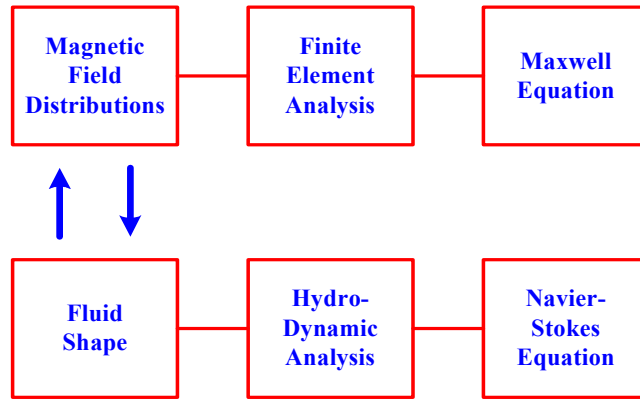
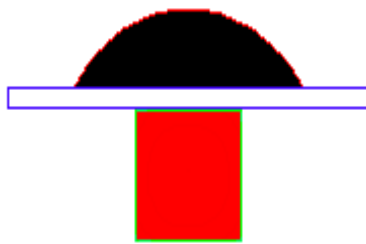


Fig. 3.2 Combined problem



(a) Computed shape



(b) Photographed shape

Fig. 3.3 Shapes of the magnetic fluid under the magnetic field and gravitation

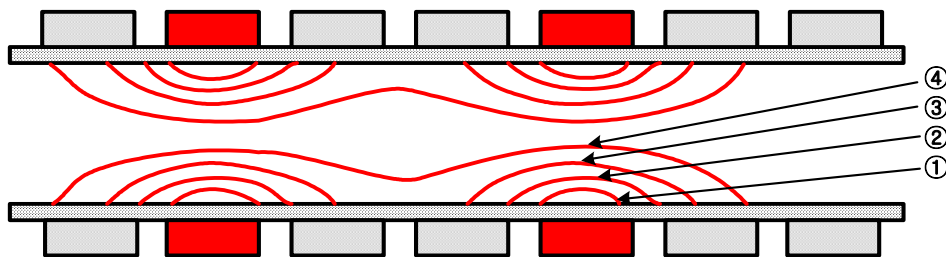


Fig. 3.4 Examples of the magnetic fluid shape

제 4 장 MFLP의 구조 및 설계

4.1 MFLP의 구조

Fig. 4.1은 선형 펌프의 구조를 단면적으로 나타낸 것으로 얇은 고무에 자성 유체를 밀봉하여 넣게 된다. 이때 차폐 고무 막은 자성유체의 흐름을 방해하지 않을 정도로 부드러워야 하고 찢어지지 않을 만큼 튼튼해야 한다. 그리고 코일이 감긴 요크 7개가 관을 둘러싼다. Fig. 4.2는 선형 펌프의 정면도를 나타낸 것이다. Fig. 4.3은 3D로 선형 펌프를 나타낸 것이다. Fig. 4.2와 같이 코일이 감긴 요크의 양 극 사이에 관이 있는 구조로 자기 요크로 자기저항을 최소화하였다. 따라서 선형 펌프 동작에 중요한 요소인 자기장의 세기는 증가하고 선형 펌프의 펌핑압력 또한 커지게 된다.

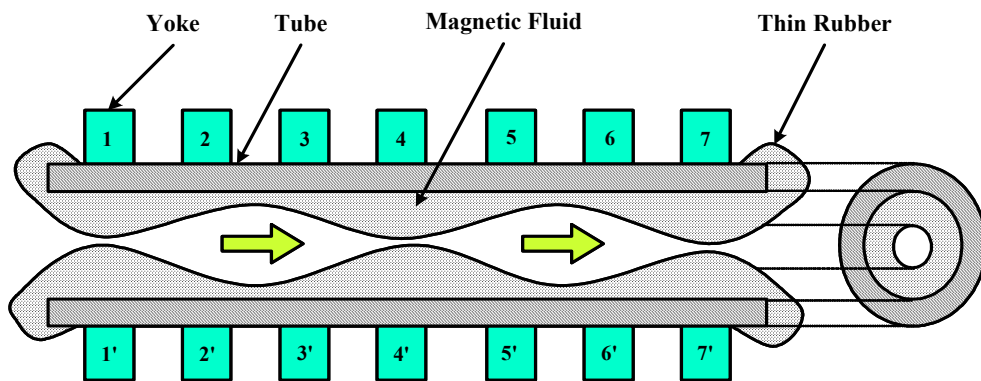


Fig. 4.1 Side view of the MFLP

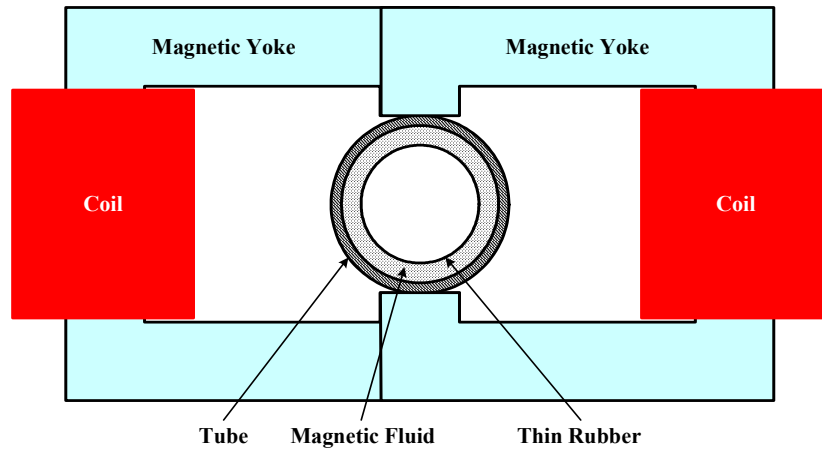


Fig. 4.2 Front view of the MFLP

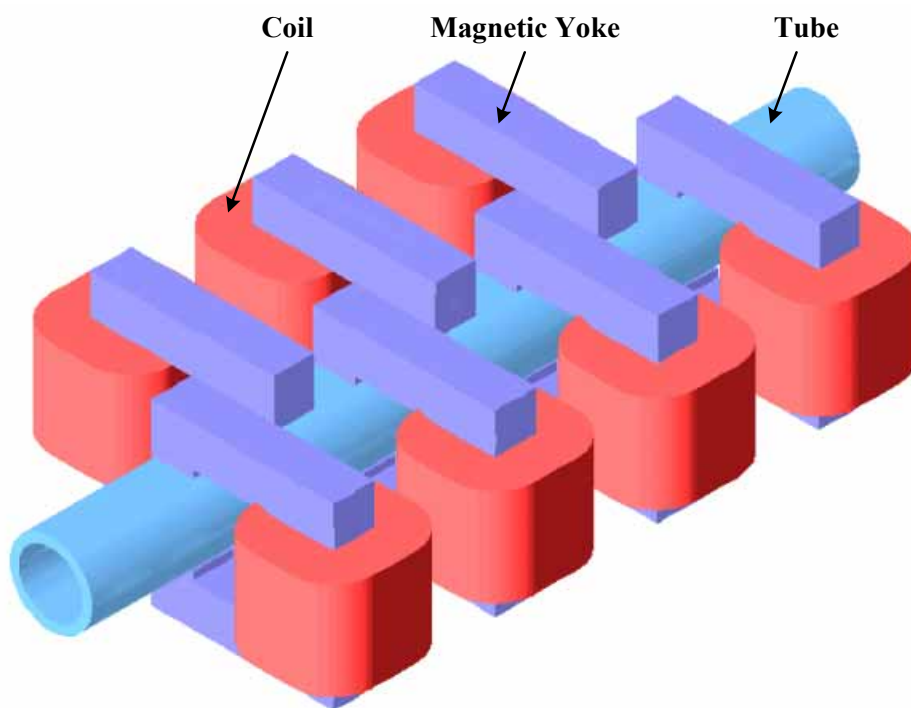


Fig. 4.3 Structure of the MFLP (3D)

4.2 MFLP의 원리

선형 펌프의 동작은 정방향 펌핑, 역방향 펌핑, On/Off의 동작으로 구분할 수 있다. 정방향 펌핑은 3가지 모드로 구분하여 동작하며, mode 1은 1-4-7번 요크가 동작하고 mode 2는 2-5번, mode 3은 3-6번, mode 1로 다시 1-4-7번 요크가 동작하여 한 주기를 이루어 펌핑하며 Fig. 4.4와 같다. 역방향 펌핑은 정방향 펌핑과 같이 4가지 모드로 구분되며, 정방향 펌핑의 동작과는 반대로 mode 1, mode 3, mode 2, mode 1순의 한 주기로 펌핑하며 Fig. 4.5와 같다. switching off는 흐름을 차단하기 위한 것으로 4-5번 요크가 동작 유지하게 되며, switching on은 7개의 요크 전부가 자기장이 없는 동작이며 Fig. 4.6과 같다. 각 모드에서의 펄스간격을 유출속도로 제한하고, 각 코일에서 펄스의 크기는 유출하는 펌핑 압력을 결정한다.

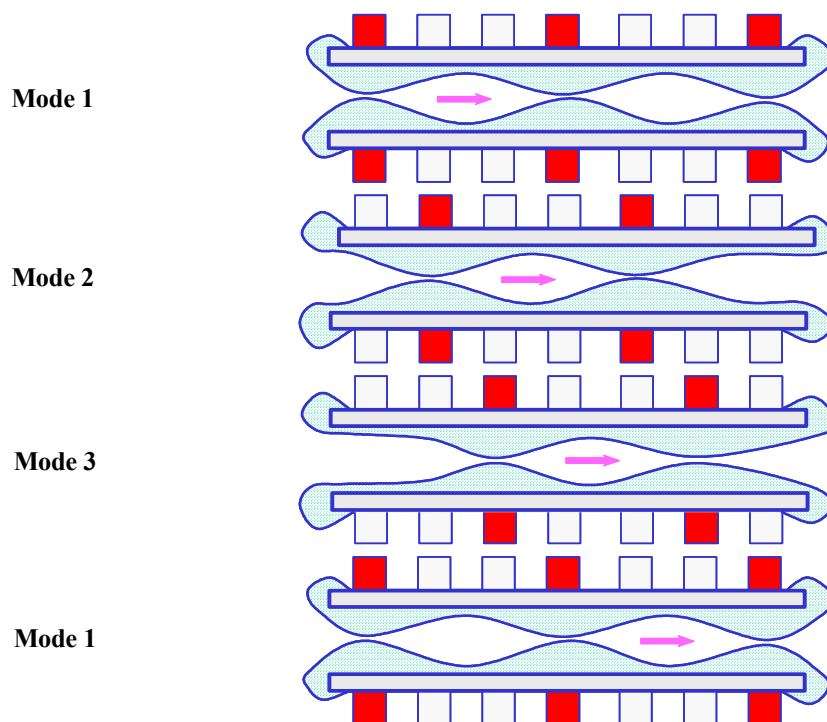


Fig. 4.4 Forward pumping of the MFLP

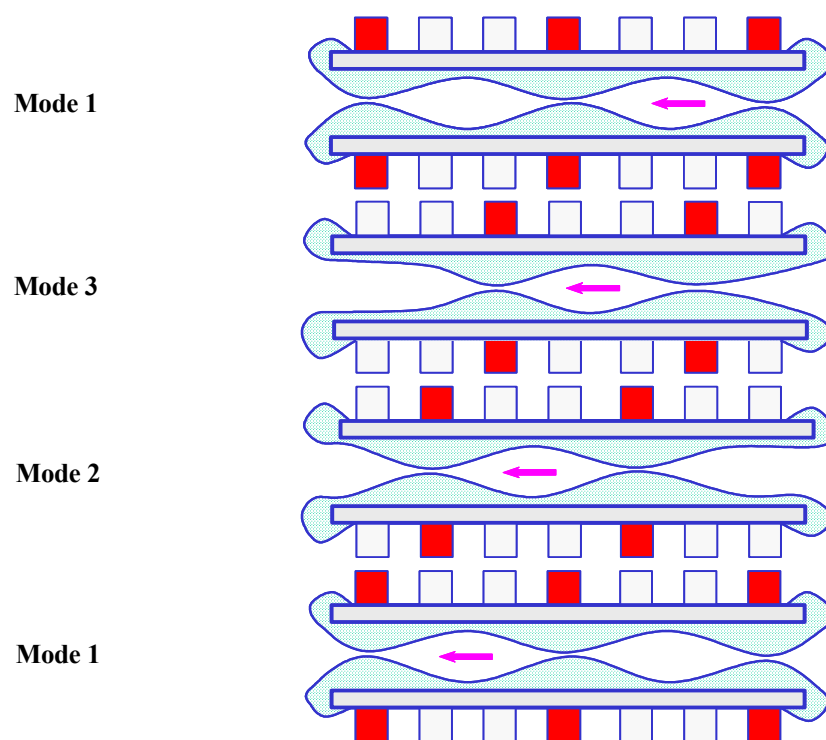


Fig. 4.5 Backward pumping of the MFLP

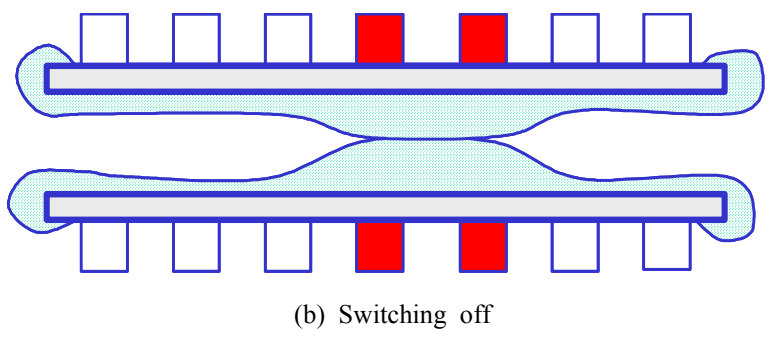
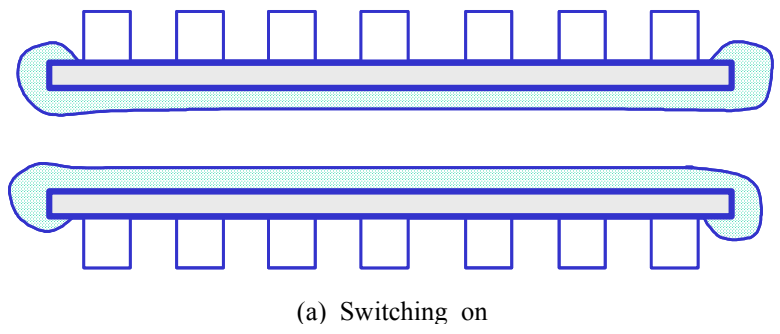


Fig. 4.6 On/Off of the MFLP

4.3 MFLP 최적 설계

선형 펌프는 자성유체가 일반 펌프의 기어와 같은 기능을 한다. 자성유체가 유체를 밀어내고 역류를 막기 위해서는 충분한 응력을 가지고 있어야 하며, 이에 따라 자성유체의 이러한 응력과 형상을 만들고 유지하기 위한 자기장이 중요한 문제가 된다.

선형 펌프의 관내에 적정량의 자기장을 만들기 위해 자기저항을 최소화하고 자기장을 증가시키기 위해 자기 요크를 사용하였으며, 자기장의 세기는 자기 요크의 폭과 두께에 의해 결정된다. 요크의 간격이 가깝게 되면 코일이 여자되지 않은 요크에서의 자기 유도현상이 발생하게 되며, 자기장의 세기와 자속 밀도 분포에 의해 자성유체의 형태와 펌핑 압력이 영향을 받게된다. 이 것은 Fig. 4.7을 통해 확인할 수 있다. 따라서 요크의 폭, 두께와 간격에 따른 최적 설계가 필요하다. 따라서 3D 유한 요소 법으로 요크 크기의 변화에 따른 관내 자기장의 변화를 해석하고, 분석하여 요크 크기의 최적량을 계산하였다. 최적량을 계산한 것을 Fig. 4.8, Fig. 4.9, Fig. 4.10에 나타내었다. Fig. 4.8은 튜브와 요크 폭의 비에 따른 자속 밀도의 크기를 나타낸 것이다. Fig. 4.9는 튜브와 요크 두께의 비에 따른 자속 밀도의 크기를 나타낸 것이다. Fig. 4.10은 튜브와 요크 간격의 비에 따른 자속 밀도의 크기를 나타낸 것이다. 요크의 폭, 두께와 간격은 튜브와의 비율이 증가함에 따라 증가하지만 선형적이지 않다. 따라서 이 결과를 통하여 요크의 적정한 폭, 두께와 간격은 펌프의 소형·경량화와 자속 밀도의 크기에 중점을 두고 고려할 때 비율이 0.6에서 최적화된다.

또한 관내의 자기장을 결정하기 위해서는 자기 요크의 크기뿐만 아니라 제 2장에서 설명했듯이 자성유체도 자기장의 세기를 결정하는 요소가

된다. 만일 자성유체의 양이 너무 작다면, 그 유체는 끌 힘이 없어진다. 또 만일 유체의 양이 너무 많다면 자성유체의 형태는 높이가 증가하는 대신 그냥 퍼져버린다. 따라서 자성유체의 최적량이 필요하다. 자성유체의 최적량은 선형 펌프의 사이즈에 따라 달라지며, 제 2장의 수치적 알고리즘을 바탕으로 해석한 값이다. 자성유체의 최적의 양은 Fig. 4.11에 나타내었다.

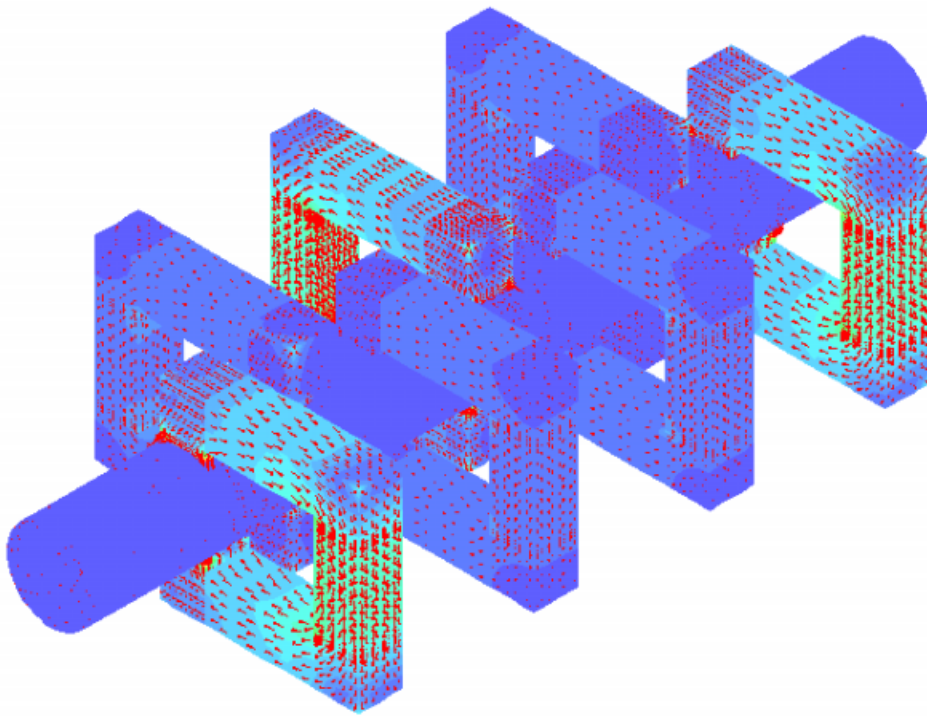


Fig. 4.7 3D F.E.M analysis of the MFLP
(Magnetization of 1,4,7 yoke)

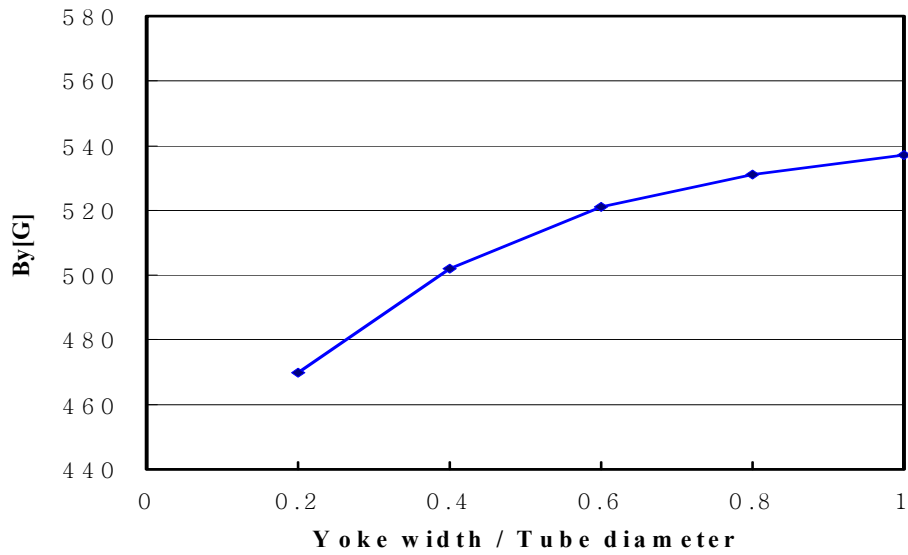


Fig. 4.8 Optimization of the yoke width according to the magnetic flux density

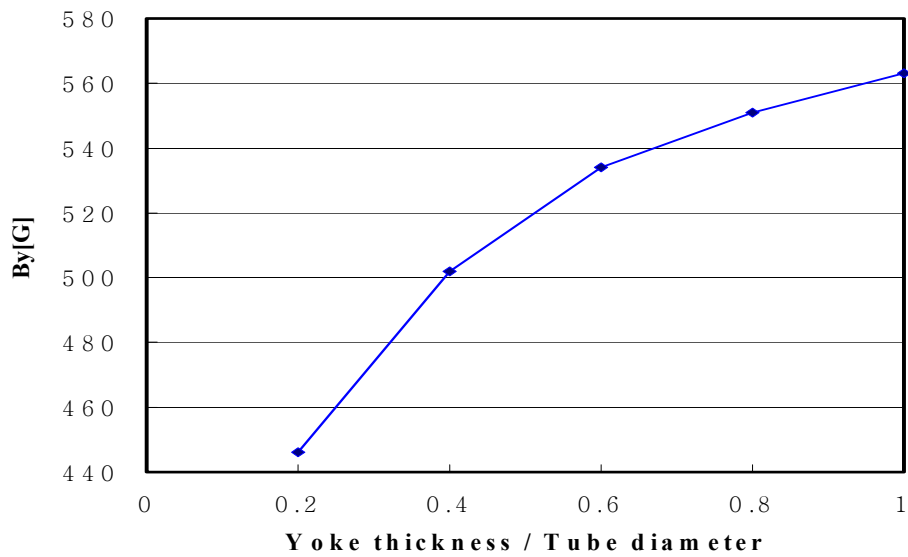


Fig. 4.9 Optimization of the yoke thickness according to the magnetic flux density

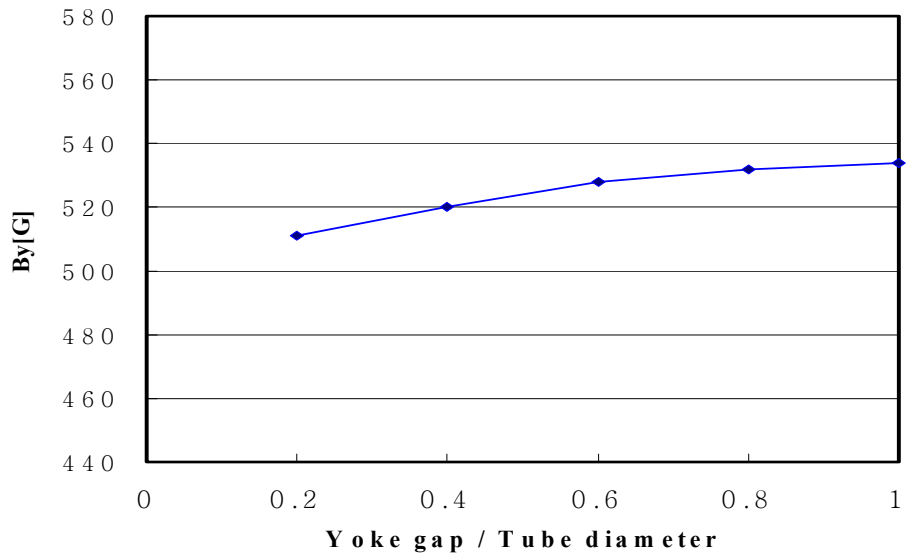


Fig. 4.10 Optimization of the yoke gap according to the magnetic flux density

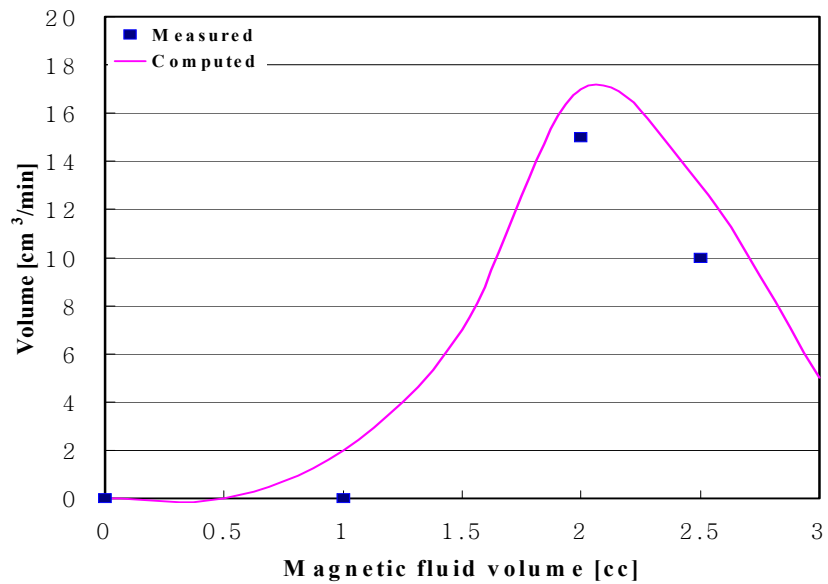
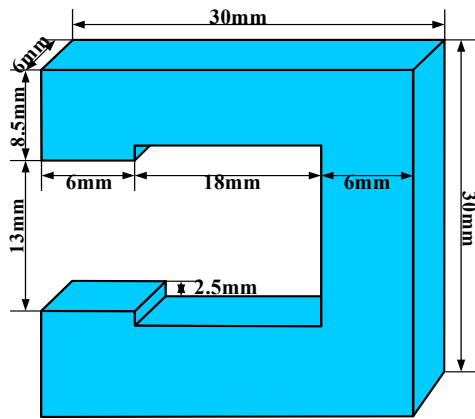


Fig. 4.11 Optimum volume of the magnetic fluid

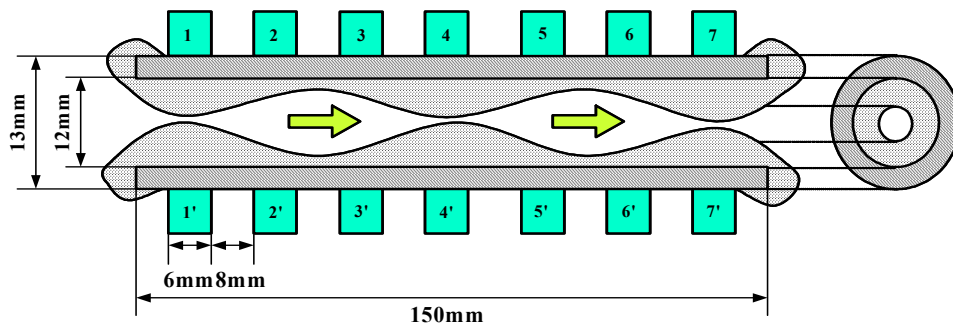
제 5 장 MFLP 제작

제 4장에서와 같이 데이터를 토대로 실질적인 MFLP를 제작하였다. 먼저 관의 직경을 결정하고 관의 직경에 맞추어 자기 요크의 크기를 결정하였다. 외경이 13mm이고 내경 12mm인 관에 맞추어서 두께 0.5mm인 규소강판을 적층하여 두께 6mm인 자기 요크를 제작하였다. Fig. 5.1의 (a)는 제작한 요크 크기를 나타내는 것이고 Fig. 5.1의 (b)는 (a)에서 제작한 요크를 이용한 선형 펌프의 사이즈이다. Fig. 5.2는 실제 제작한 요크와 코일의 사진이다. 직경 0.2mm인 코일을 요크에 1000T을 감았다. 이러한 요크를 7개 제작하여 Fig. 5.3과 같이 튜브에 연결하여 MFLP를 제작하였다. 관의 총 길이는 150mm이다. 요크간의 간격은 8mm로 하였다. 코일과 요크 사이의 절연은 절연지와 절연 테잎을 이용하였다. 자성유체는 일본의 Sigma Hi-Chemical사에서 제작한 N-504 모델을 사용하였다. N-504 모델에 대한 스펙은 Table 2에, B-H Curve는 Fig. 5.4에 나타내었다.

또한 제 3장의 자성유체의 형상에 대해 해석한 수치적 알고리즘과 실제 MFLP의 관내에서의 자성유체의 형상을 비교하기 위하여 Fig. 5.5와 같은 별도의 실험 장치도 제작하였다. Fig. 5.5의 (a)는 요크가 한 개로 모드 동작 시간과 전류의 크기, 자성유체의 량에 따른 자성유체의 변화를 확인하기 위한 것이다. Fig. 5.5(b)는 요크가 두 개로 자기 유도 현상을 고려했을 경우에 대한 자성유체의 변화를 확인하기 위한 것이다.



(a) Size of the magnetic yoke



(b) Size of the MFLP

Fig. 5.1 Size of the magnetic yoke and MFLP



Fig. 5.2 Fabrication of the magnetic yoke

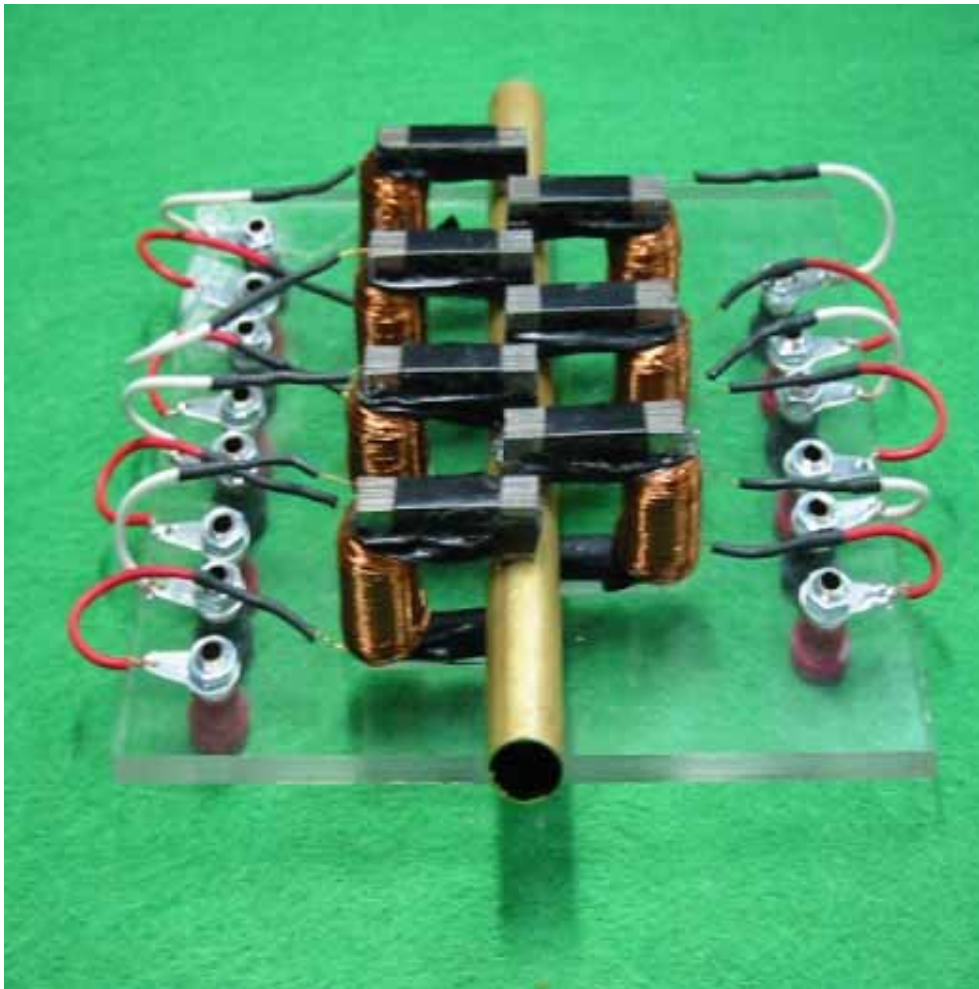


Fig. 5.3 Fabrication of the MFLP

Table 2 Spec of the N-504

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

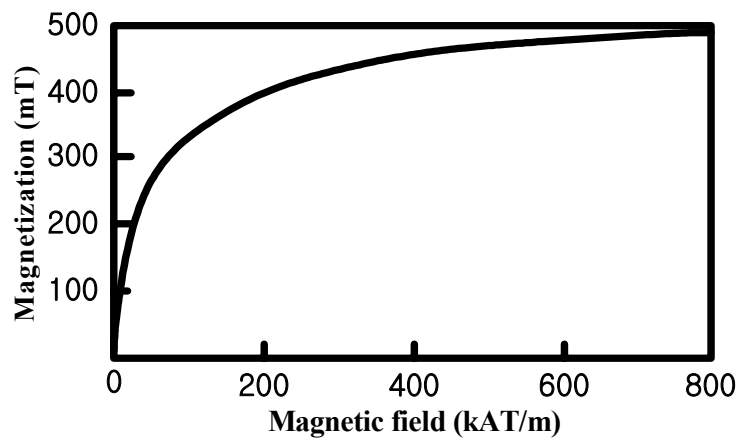


Fig. 5.4 B-H curve of the N-504

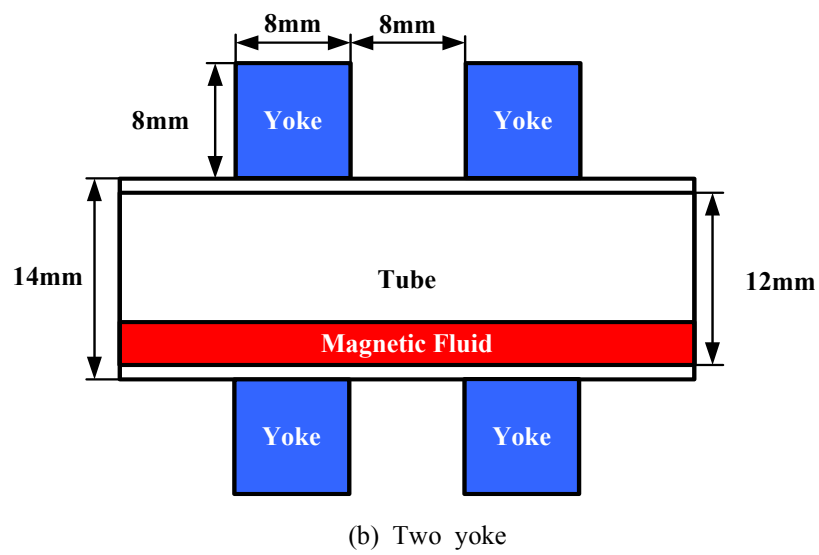
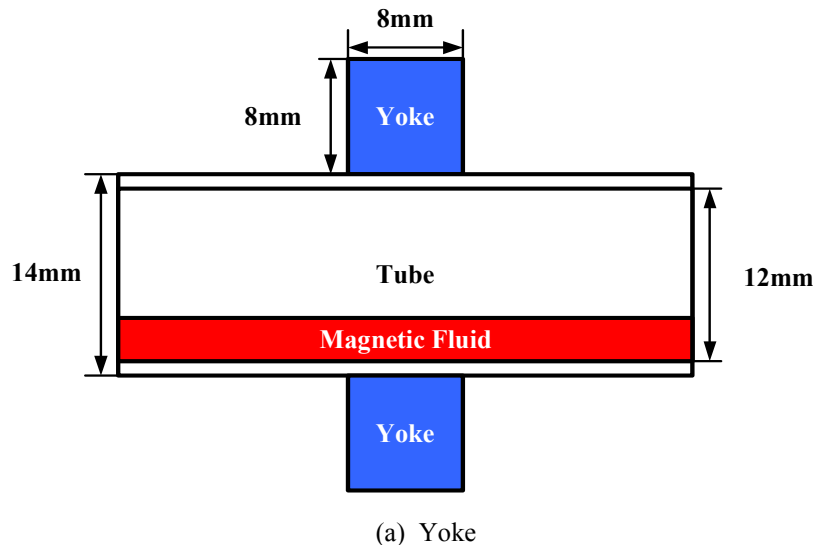


Fig. 5.5 Measurement by shape of the magnetic fluid

제 6 장 MFLP 실험 및 운전

먼저 MFLP의 관내에 각 모드별로 자기장의 분포와 형태를 유한 요소법을 통해 해석하고 측정하였다. 직류 전류를 이용하여 선형 펌프를 운전하였고, 관내의 자성유체의 형태를 확인하였다. 또한 전류의 크기, 모드 동작 시간별로 펌핑되는 유체의 양을 측정하였다.

6.1 MFLP의 관내 자기장 분포

자성유체를 동작시키기 위한 선형 펌프의 관내 각 모드별 자기장의 분포를 유한 요소법으로 해석하고 실제 제작된 선형 펌프에서 홀 센서를 이용하여 자기장의 분포를 측정하여 두 가지 데이터를 비교하였다. Table 3은 요크 한 개에 대한 자기장과 기자력(MMF), 전압, 저항 등을 비교한 것으로 일치함을 보인다. Fig. 6.1은 mode 1일 때의 자기장분포이며, Fig. 6.2, 6.3, 6.4는 각각 mode 2, mode 3, 그리고 switching off일 때의 자기장 분포이다. 유한 요소법으로 해석한 관내 자기장 분포와 실제 관내 자기장의 분포가 유사한 패턴을 보임을 알 수 있다.

Table 3 Compare of analyzed and measured data

	Analysis	Measurement
MMF	500 [AT]	500 [AT]
Resister	6.737 [Ω]	8.2 [Ω]
Voltage	6.7 [V]	8.5 [V]
Magnetic Field	360 [G]	340 [G]

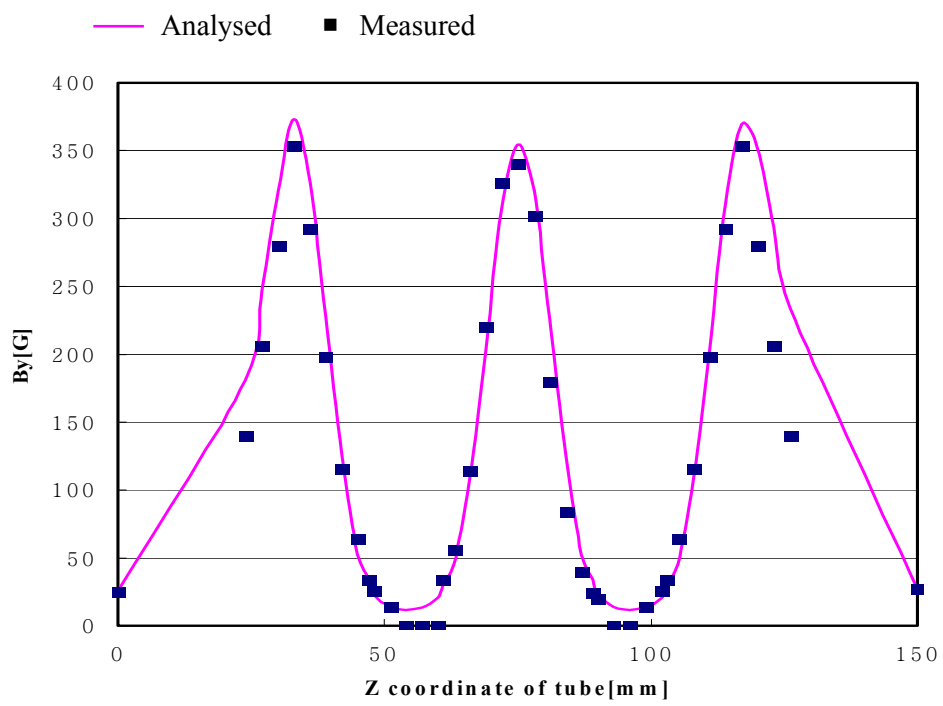


Fig. 6.1 Magnetic field inside the MFLP (mode 1)

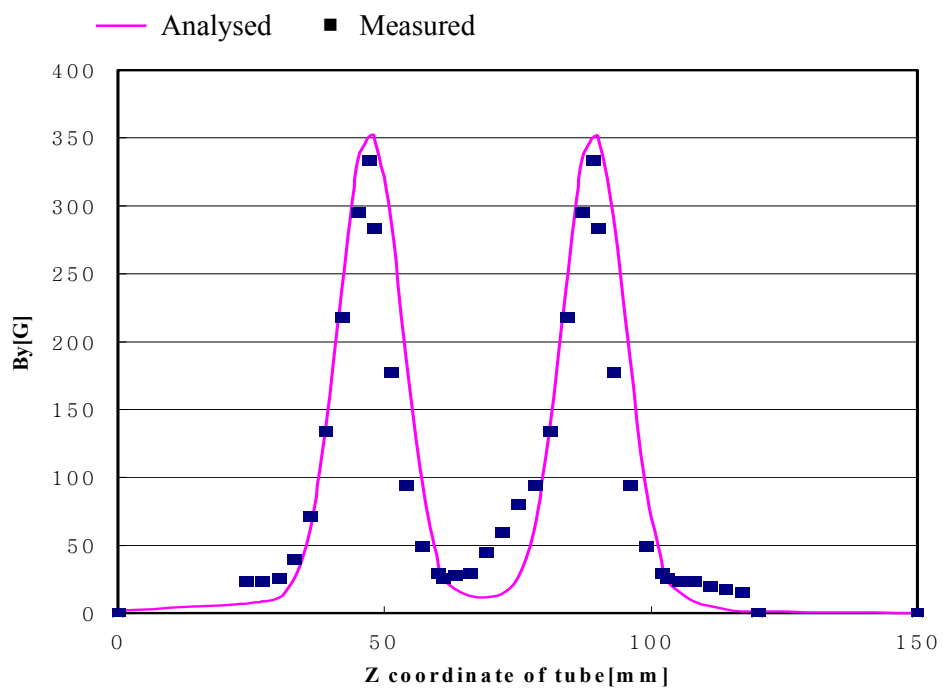


Fig. 6.2 Magnetic field inside the MFLP (mode 2)

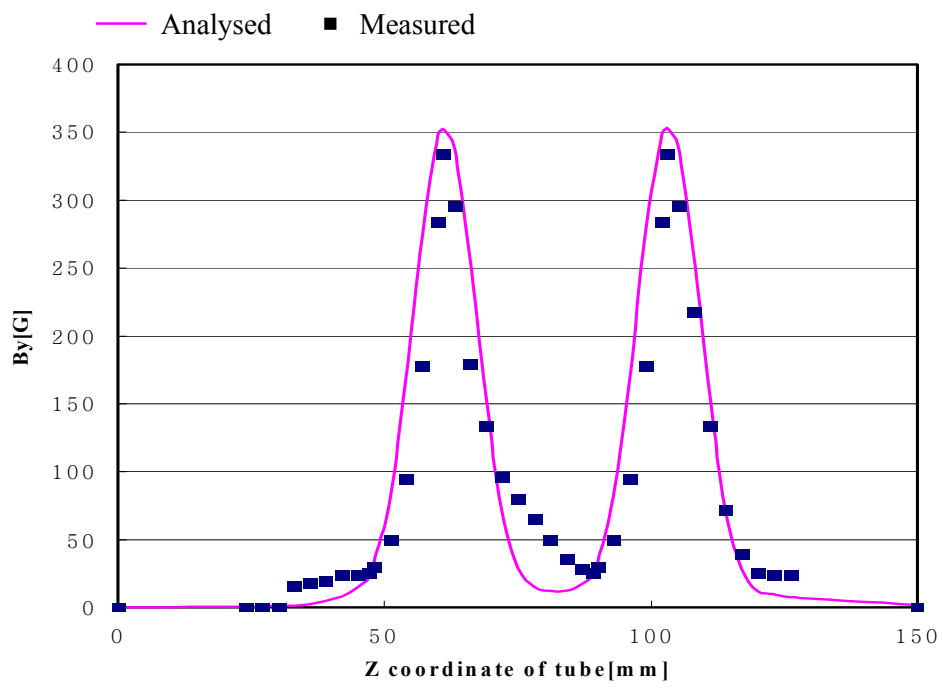


Fig. 6.3 Magnetic field inside the MFLP (mode 3)

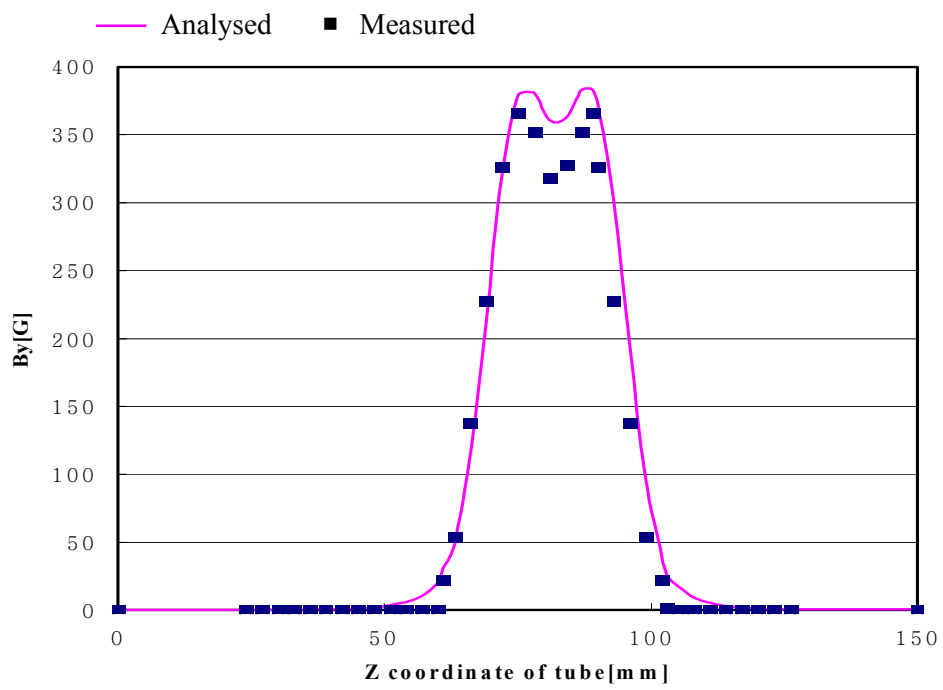
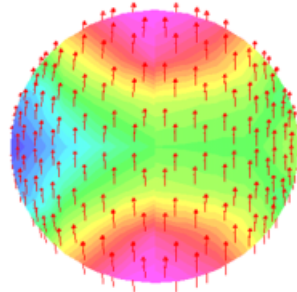


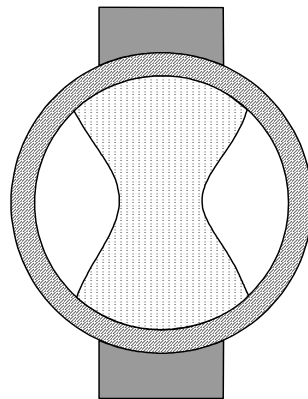
Fig. 6.4 Magnetic field inside the MFLP (switching off)

6.2 MFLP 관내 자성유체의 형상

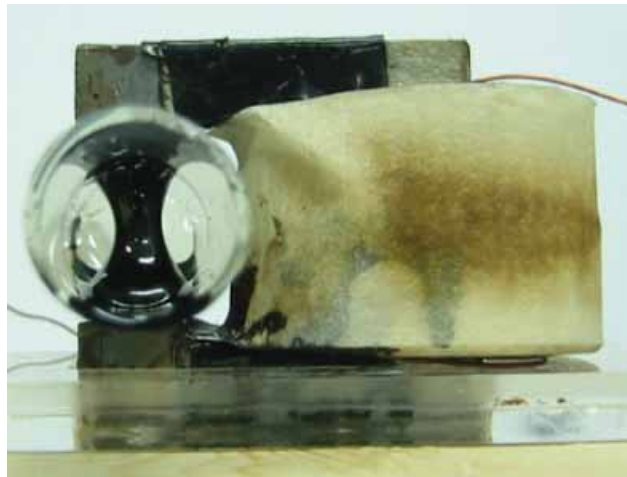
Fig. 5.4와 같이 하여 관내에 자성유체의 형상을 확인하였다. 제 3장에서 수치적 알고리즘으로 해석한 것과 실제 관내 자성유체의 형상을 비교하였으며, 이것을 Fig. 6.5와 Fig. 6.6에 나타내었다. Fig. 6.5는 정면에서 유한 요소법으로 해석한 자기장의 분포 (a)와 수치적 알고리즘을 이용한 해석 (b)와 실제의 자성유체 형상을 나타낸 것 (c)로 자성유체의 해석결과와 실제 형상이 일치함을 확인할 수 있다. Fig. 6.6은 측면에서의 자성유체의 형상을 비교한 것으로 이 실험 역시 해석결과와 실제 형상이 일치함을 잘 보여주고 있다. 따라서 제 3장에서 제시한 수치적 알고리즘으로 자성유체의 형상을 해석할 수 있음을 확인하였다.



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

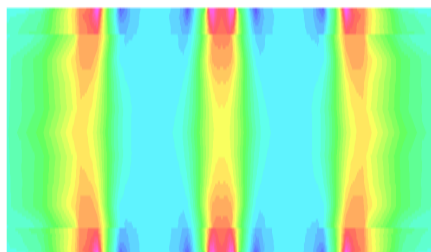


(b) Computed of numerical algorithm

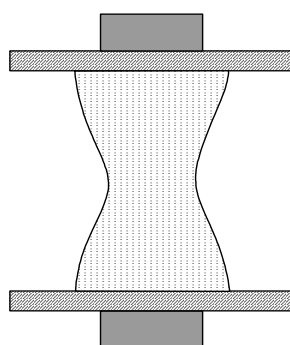


(c) Photographed

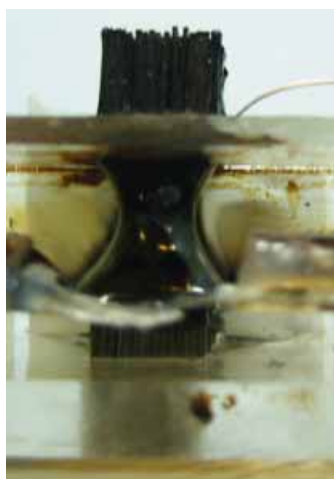
Fig. 6.5 Front view of the magnetic fluid inside the MFLP



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



(b) Computed of numerical algorithm



(c) Photographed

Fig. 6.6 Side view of the magnetic fluid inside the MFLP

6.3 MFLP 운전

선형 펌프의 운전은 세 가지로 구분된다. 정방향 펌핑, 역방향 펌핑, On/Off이다. 세 가지 운전을 하기 위해 Fig. 6.7과 같은 직류 전류를 PLC를 통한 순차적 회로를 구성하여 자성유체의 유동에 필요한 자기장을 공급한다. Fig. 6.7과 같은 방법으로 스위칭하게 되면 Fig. 6.8과 같은 자기장의 분포로 자성유체가 유동한다. Fig. 6.9는 Fig. 6.8과 같이 자기장의 분포를 각 모드별로 나타낸 것으로 자기장의 분포와 같은 형태로 자성유체가 형성된다. Fig. 6.10을 통해서 On/Off 동작 시에 선형 펌프 관내가 차단되는 것을 확인하였다. Fig. 6.11은 직류 전류를 공급하기 위한 PLC 순서도이다. 타이머로 모드 동작 시간을 조절하고 mode 1, mode 2, mode 3의 회로를 구성해 놓고 PLC로 스위칭하는 방식이다.

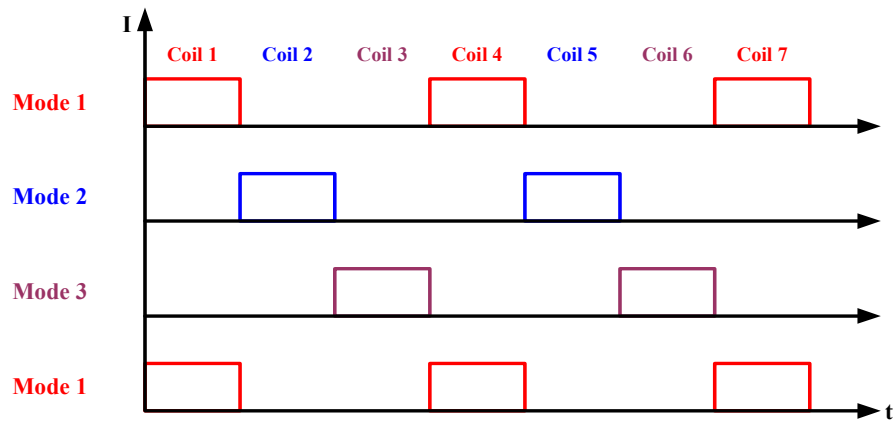


Fig. 6.7 Time chart for operation

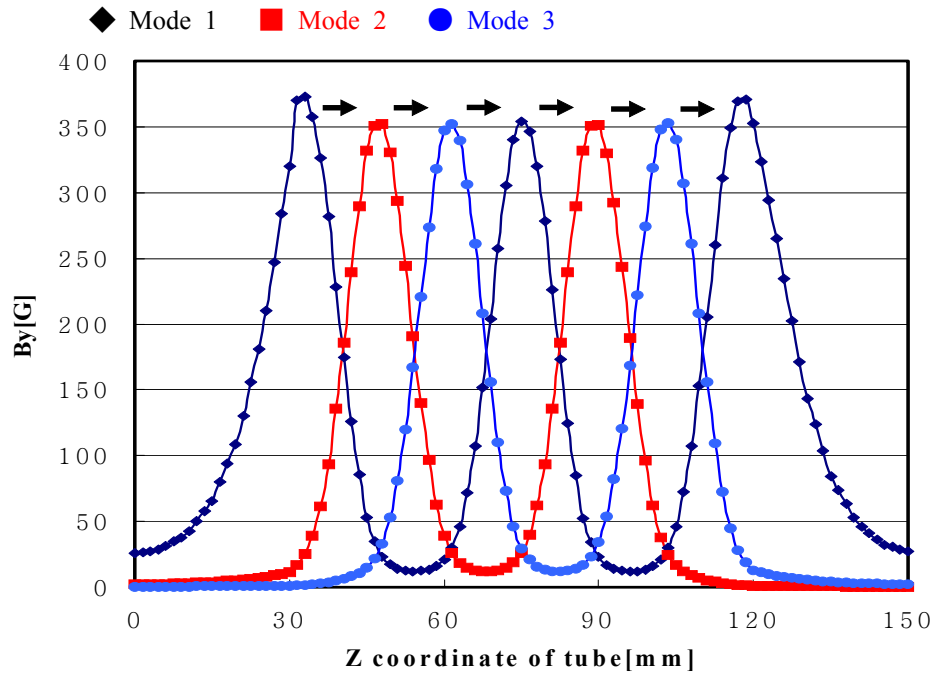


Fig. 6.8 Magnetic fields in each mode

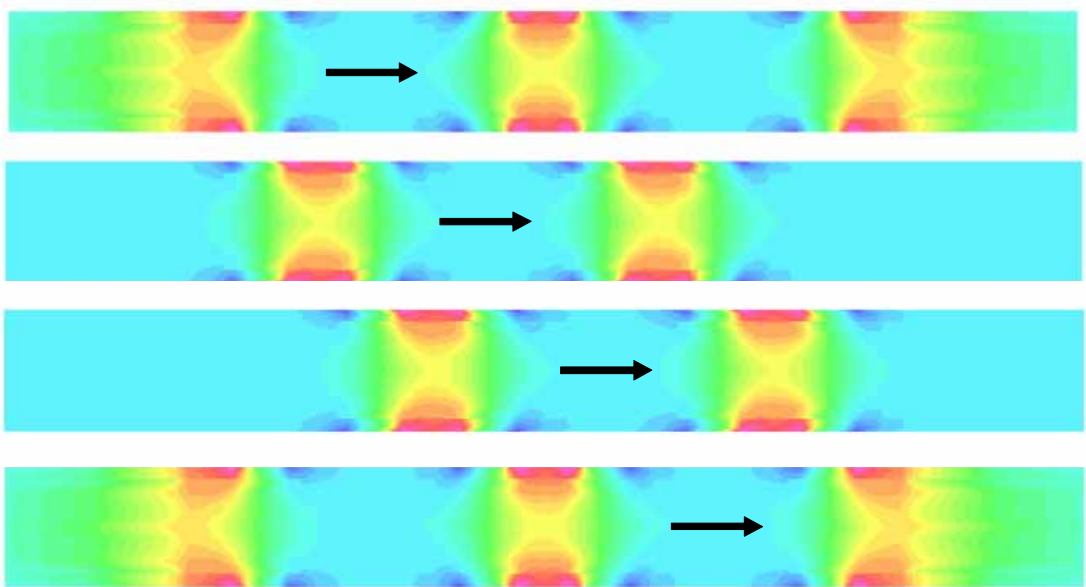
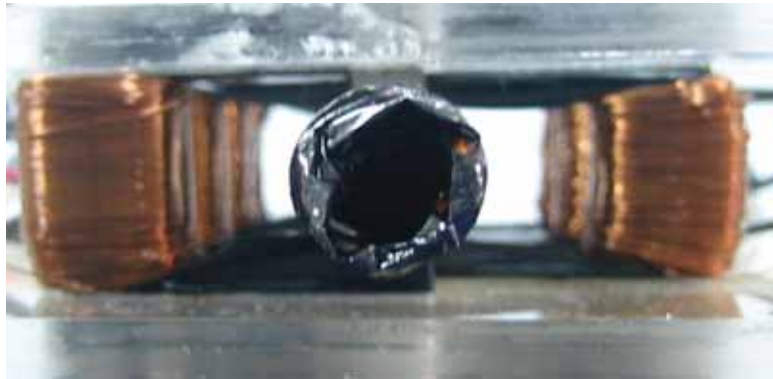


Fig. 6.9 Movement of the magnetic fluid inside the MFLP

(a) Switching on



(b) Switching off

Fig. 6.10 On/Off of the MFLP

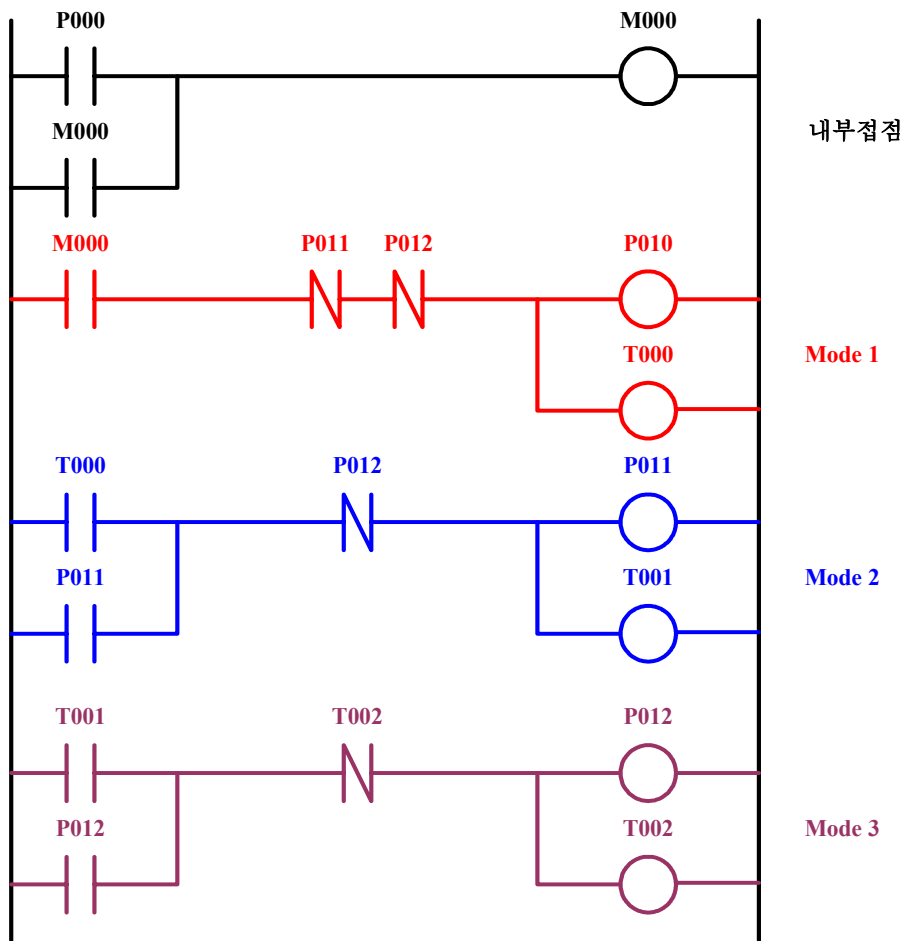


Fig. 6.11 PLC sequence diagram

6.4 선형 펌프의 펌핑 속도와 펌핑 압력

Fig. 6.12와 같이 하여 한쪽 방향으로 선형 펌프를 펌핑하고 반대쪽의 증가 또는 감소되는 물의 양을 측정하여 펌핑 속도와 펌핑 압력을 측정하였다. Fig. 6.13은 한 모드에서 다음 모드로 스위칭되는 시간 즉, 모드 동작 시간을 변화하여 선형 펌프의 펌핑 속도에 따라 펌핑되는 유체의 양을 측정하였으며, 자성유체의 주입 양에 따라 펌핑 속도와 펌핑되는 유체의 양의 변화를 확인하였다. 선형 펌프의 펌핑 속도는 자성유체의 양과 무관하게 모드 동작 시간이 0.2초 이상일 때 펌핑되는 유체량이 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이 것은 펌핑 속도가 낮을 경우에는 자성유체가 펌핑되는 유체의 유동을 오히려 방해하게 된다. Fig. 6.14는 자성유체량에 따른 유체의 펌핑량을 나타낸 것이다. Fig. 6.15는 펌핑 속도를 Fig. 6.13의 데이터를 토대로 펌핑량이 가장 많은 0.2초로 고정하고 전류의 크기를 가변하여 선형 펌프의 펌핑 압력을 측정하였다. 이 실험 또한 자성유체의 양을 변화하면서 상관관계를 확인하였다. 자성유체의 양이 많을수록 낮은 전류에서도 펌핑되는 유체량은 많으나 어느 이상의 전류에서는 자성유체가 펌핑되는 유체의 유동을 방해하게 된다. Fig. 6.13, 6.14, 6.15의 결과로 자성유체는 자성유체의 흐름은 자기장의 이동이 어느 이상의 속도로 빨라야 원활하며, 자기장의 크기가 클수록 원활함을 알 수 있다. 또한 펌핑 압력은 전류의 크기와 자성유체의 양을 적절하게 조절함으로써 증가될 수 있다.

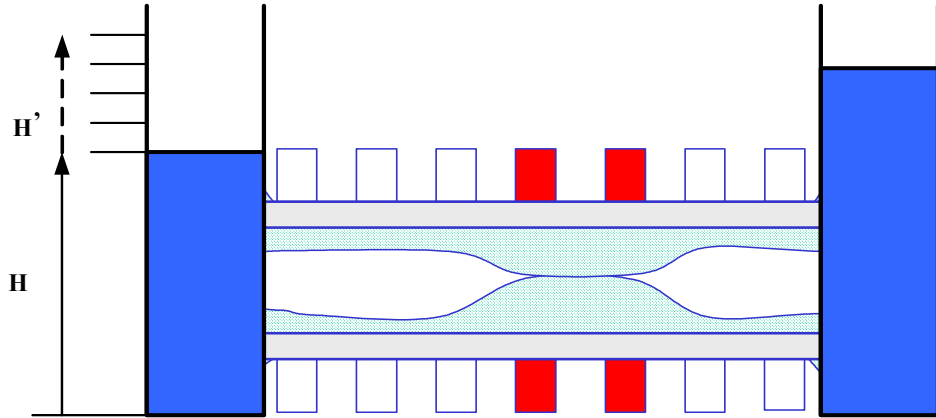


Fig. 6.12 Measurement of the pumping forces and speed

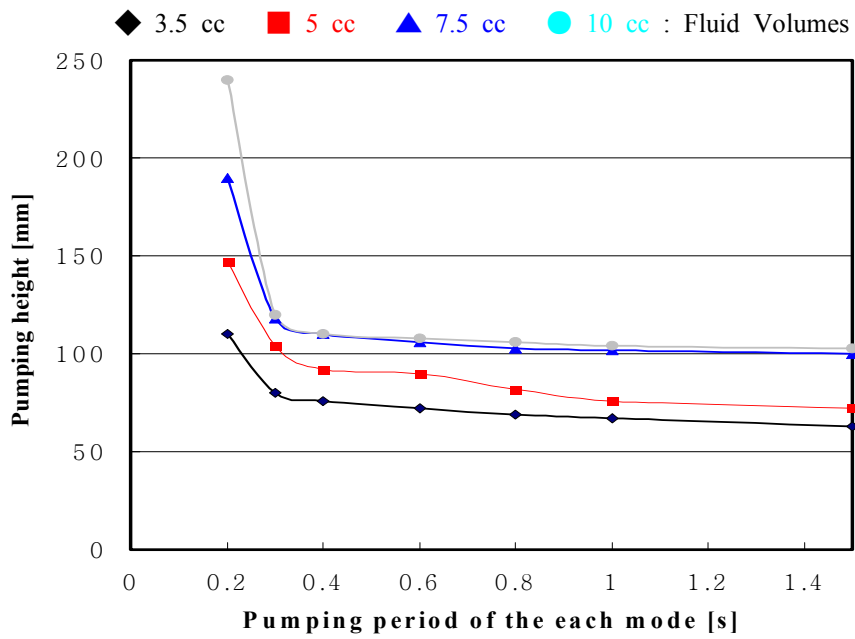


Fig. 6.13 Effect of the driving speed

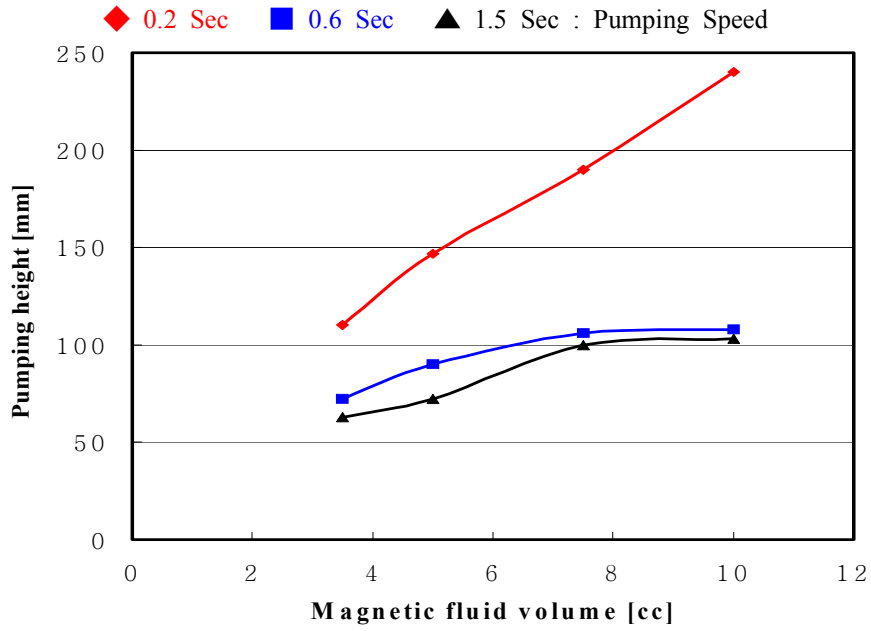


Fig. 6.14 Effect of the magnetic fluid volume

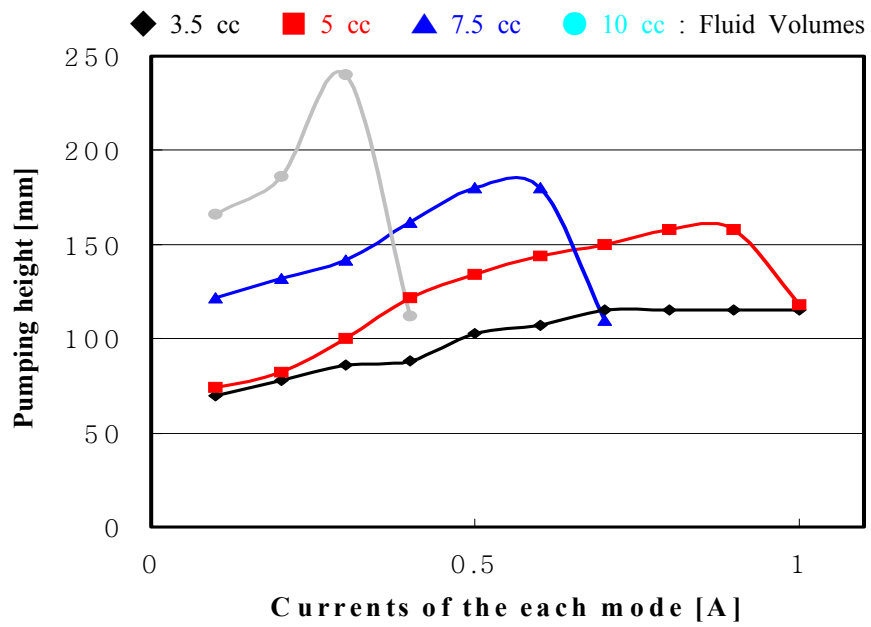


Fig. 6.15 Effect of the driving current

제 7 장 결 론

의료용 소형 펌프에 대한 연구는 인공심장의 혈액펌프용, 당뇨병환자를 위한 인슐린 펌프, DNA 조작 등에 사용되는 소형 정밀 펌프 등으로 연구되고 있으며, 특히 인체에 삽입해서 동작하는 의료용은 소형, 경량화, 제어회로와 연결된 지능화 등의 특성이 매우 절실히 요구되고 있다.

본 논문에서는 자성 유체를 이용하여 의료용 선형 펌프를 소형, 경량화 설계하고 제작하였다. 의료용 펌프는 무소음·무진동은 필수 조건이다. MFLP는 일반 펌프의 기계적인 장치를 자성유체로 대체함으로써 소형, 경량화 및 무소음·무진동의 의료용 펌프로서의 조건을 모두 만족한다. 이러한 선형 펌프는 자기저항을 최소화하기 위하여 자기 요크를 사용하여 관내의 자기장을 증가시키고, 펌핑 압력을 증가시켰다. 또한 효율을 향상시켜 저 소비 전력을 실현시키고, 직류 전류의 동작 전류의 주파수와 크기를 조절하여 펌핑 속도를 조절, 펌핑 압력을 제어하였다.

우선 자성유체에 영향을 미치게 되는 관내 자기장의 분포를 확인하였고, 유한 요소법으로 계산한 데이터와 비교하여 유사한 패턴을 보였다. 선형 펌프의 관내에서 자성유체의 형상을 확인하기 위하여 별도의 장치를 제작하여 확인하였고, 수치적 알고리즘으로 해석한 자성유체의 형상과 일치함을 확인하였다. 이러한 데이터를 통해 관내의 자성유체의 형상과 관내 자기장의 분포는 MFLP가 유체를 펌핑하기에 충분함을 알 수 있었다.

제작된 MFLP를 정방향 펌핑, 역방향 펌핑, On/Off의 세 가지 운전을 시행했으며, 세 가지 동작으로 실제 유체를 펌핑하고, 이에 따른 펌핑 속도와 펌핑 압력을 측정하였다.

본 연구의 결과는 의료용 MFLP를 자기 요크를 사용하여 소형, 경량화 하였고 관내 자기장을 증가시켜 펌핑 압력을 높이고 효율을 증가시켰다. 선형 펌프는 소음이 작고 진동 또한 작으며, 유연 동작 등의 의료용에 필요한 주요 관건을 해결할 수 있었다. 제작된 선형 펌프로 요크 크기, 요크 간격, 전류의 주파수, 전류의 크기, 자성유체의 양 등이 펌핑 속도와 펌핑 압력에 미치는 영향을 해석하고 원하는 목표량에 대한 설계 기준을 확립하였다.

차후 MFLP에서는 자성유체의 응집 문제를 해결하기 위하여 유체의 유동 특성 파악 및 자성유체의 밀봉 방법을 개선해야 할 것이며, 동작 전류에 대한 개선 또한 필요하다. 게다가 MFLP의 펌핑 속도 향상을 위해 마이크로 프로세서와 같은 제어회로를 이용한 제어 시스템의 개발도 병행되어야 할 것이다. 자성유체의 관점에서 본다면 자성유체의 점성에 따른 특성 해석과 실험 역시 병행되어야 할 것으로 사료된다.

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. Microelectromechanical Systems*, vol. 8, no. 1, pp 71-77, March 1999
- [7] G. S. Park, D. H. Kim, S. Y. Hahn, and K. S. Lee, " Numerical algorithm for analyzing the magnetic fluid seals ", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 30, No. 5, pp. 3351-3354, September 1994.
- [8] S. Taketomi and S. Chikazumi, *Magnetic Fluid*, Nikka Kogyo

Simbunsha, 1987.

- [9] J. A. Lopez-Perez, M. A. Lopez-Quintela, J. Mira, and J. Rivas, "Preparation of magnetic fluids with particles obtained in microemulsions", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 33, No. 5, pp. 4359-4362, September 1997.
- [10] M. T. Thompson, " Simple models and measurements of magnetically induced heating effects in ferromagnetic fluids ", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 34, No. 5, pp. 3755-3764, September 1998.
- [11] S. X. Chen, M. A. Jabbar, Q. D. Zhang, and Z. J. Liu, " New Challenge: Electromagnetic design of BLDC motors for high speed fluid film bearing spindles used in hard disk drives ", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 32, No. 5, pp. 3854-3856, September 1996.
- [12] C. A. Borghi, A. Cristofolini and M. Fabbri, " Study of the design model of a liquid metal induction pump ", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 34, No. 5, pp. 2956-2959, September 1998.
- [13] Olaru R., Salceanu A., Calarasu D., and Cotae C., " Magnetic fluid actuator ", *Sens. actuators. A Phys*, Vol. 81, pp. 290-293, 2000.
- [14] Hadgia S., Iusan V., and Stanci, " A method for magnetic field determination inside magnetic fluids ", *J. Mag. Mater*, Vol. 201, pp. 404-406 , 1999.
- [15] Nii K. and KohNo T., " Magnetic Fluid Bearings ", *Jpn. j. tribol*, Vol. 41, No. 6, pp. 575, 1996.
- [16] Shimada K., " Magnetic Fluid Damper ", *Jpn. j. tribol*, Vol. 41 No. 6, pp. 583, 1996.
- [17] Kouda Y. and KanNo T., " Magnetic Fluid Vacuum Seals ", *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol. 42 No. 6, pp. 442, 1997.

- [18] Chen S. X., Zhang Q. D., Liu Z. J., and Lin, H., " Design of Fluid Bearing Spindle Motors with Controlled Unbalanced Magnetic Forces ", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 33 No. 2, pp. 2638, 1997.
- [19] Hideo Oka, " Experimental Observations of the Magnetic Flux Control Characteristics of Magnetic Fluid by means of an Orthogonal Magnetic Field ", *IEEE Trans Mag.*, Vol. 30, No. 6, pp. 4674-4676, November 1994.
- [20] Zhang, QD, Chen SX, Liu ZJ, " Design of a hybrid fluid bearing system for HDD spindles ", *IEEE Trans. Mag.*, vol. 35, no. 2, pp. 821-826, March 1999.
- [21] V.E. Fertman, V.A.Novikov and A.K.Sinitsyn, " Numerical study of the hydrodynamics at high-speed magnetic fluid seals ", *J. Magnetism Magn. Mater*, pp. 133-136, vol. 39, 1983.
- [22] V.K.Rakhuba, V.B.Samoilov and V.A.Chernobai, " Dynamics of High Speed Magnetic Fluid Seals ", *J. Magnetism Magn. Mater*, pp. 152-154, vol. 39, 1983.
- [23] R.A.Williams and H.Malsky, " Some Experiences Using a Ferrofluid Seal against a liquid ", *IEEE Trans. on Mag.*, vol 16, No.2, pp. 379-381, Mar, 1980.
- [24] Abe Y, et al., " Basic characteristics of linear oscillatory actuator for liquid hydrogen pump ", *IEEE Trans. Mag.*, vol. 32, no. 5, pp 5025-5027, September 1996.
- [25] Saotome H, et al., " A pump with flat-ring-shaped magnets ", *J. Appl. Phys.*, vol 83, no. 11, pp 6420-6422, 1998.
- [26] Nakagawa T, Sagara N, " A proposal of a nonlinear H-infinity control

- method for a semiactive demper with a magnetic fluid base ", *IEEE Trans. Mag.*, vol. 33, no. 5, pp 4206-4208, September 1997
- [27] Calarasu D, Cotae C, Olaru R, " Magnetic fluid break ", *J. Magnetism Magn. Mater*, pp. 401-403, vol. 201, 1999.
- [28] Krakov MS, " Influence of rheological properties of magnetic fluid on damping ability of magnetic fluid shock-absorber ", *J. Magnetism Magn. Mater*, pp. 368-371, vol. 201, 1999.
- [29] Cotae C, et. al., " The study of a magnetic fluid-based sensor ", *J. Magnetism Magn. Mater*, pp. 394-397, vol. 201, 1999.
- [30] Seo JW, Park SJ, Jang KO, " An experimental study of light modulator using magnetic fluid ", *J. Appl., Phys.* vol. 85, no. 8, pp.5956-5958, 1999.
- [31] Popa NC, Siblini A, Jorat L, " Gravitational electrical generator on magnetic fluid cushion ", *J. Magnetism Magn. Mater*, pp. 407-409, vol. 201, 1999.
- [32] Shimada K, et. al., " Effect of a magnetic field on the perpomance of an energy conversion system using magnetic fluid ", *J. Magnetism Magn. Mater*, pp. 357-360, vol. 201, 1999.
- [33] Zou Jibin and Lu Yongping, " Numerical Calculations for Ferrofluid Seals ", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 28, No. 6, pp. 3367-3371, November 1992.
- [34] J. Shobaki, D. Manasreh, N. A. Yusuf, and I. Abu-Aljarayesh, " A Scaling Model for the Optical Anisotropy in Magnetic Fluids: Deshroism and Birefringence ", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 32, No. 6, pp. 5245-5250, November 1996.

- [35] P. Kopcansky, D. Horvath, V. Kellnerova, M. Koneracka, V. Svidron, T. Tima, P. Slanco, D. Macko, and M. Kasparikova, "Study of Magneto-Dielectric and Magneto-Optical Effects in Mineral Oil Based Magnetic Fluids ", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 30, No. 2, pp. 1114-1116, March 1994.
- [36] Stanislaw K. Krzeminski, Michal Smialak, and Maciej Wlodarczyk, " Analysis of Magnetohydrodynamic Pressure in Conducting Fluids ", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 34, No. 5, pp. 3138-3141, September 1998.
- [37] Masafumi Fujita, Tadashi Tokumasu, and Toshiaki Yamada, "3-Dimensional Electromagnetic Analysis and Design of an Eddy-Current Rail Brake System", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 34, No. 5, pp. 3548-3551, September 1998.
- [38] G. Vinasrd, B. Laporte, and N. Takorabet, "An Analysis of the Rotational Forces in the Secondary of an Electromagnetic Pump", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 34, No. 5, pp. 3552-3555, September 1998.
- [39] H. Hayashiya, N. Araki, J.E. Paddison, H. Ohsaki, and E. Masada, " Magnetic Levitation of a Flexible Steel Plate with a Vibration Suppressing Magnet ", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 32, No. 5, pp. 5052-5054, September 1996.
- [40] Dan I. Buioca and Vasile Z. Iusan, " Influence of Centrifugation and HGMS on Conversion Parameter in Magnetic Fluids ", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 30, No. 2, pp. 1095-1097, March 1994.
- [41] L. Tomco, " Study of the Structuralization of the Magnetic Particles in Magnetic Fluids ", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 30, No. 2, pp. 1112-1113, March 1994.

- [42] Kamiyama S., " Applications of Oscillatory Flow of Magnetic Fluid as active Damper and Actuator ", *Int. j. mod. phys.* , Vol. 13, No. 14, pp. 2213-2220, 1999.
- [43] James R. Melcher, *Continuum Electromechanics*, 1981
- [44] 손병진, 맹주성, 이상환 편저, **해설 유체역학**, 희중당, pp459-484, 1992
- [45] 손병진, 조강래 편저, **유체역학**, 희중당, pp390-400,1992
- [46] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, " Design of Magnetic Fluid Linear Pump ", International Magnetics Confereance, Kyongju, Korea, May 18-21 1999 / *IEEE Trans. Magn.*, Vol.35, No.5, pp. 4058-4060, September 1999.
- [47] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, " New Structure of the Magnetic Fluid Linear Pump ", *IEEE Intermag 2000*, 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.
- [48] 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.
- [49] G.S. Park, K. Seo, " A Study on the Pumping Forces of the Magnetic Fluid Linear Pump ", The 14th COMPUMAG Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Ferugia, Italy, June 16-19, 2002.
- [50] G.S. Park, K. Seo, " Pumping Forces of the Magnetic Fluid Linear Pump ", The International Conference on Electrical Engineering, LOTTE Hotel Jeju Island, Korea July 7-11, 2002.

- [51] 박관수, 박상호, “ 자성유체를 이용한 Linear Pump의 설계와 제작 ”, 대한 전기 학회 1999년도 하계 연구 발표회 논문집, pp. 37-39, 1999년 7월 19일 - 21일, 용평리조트, 용평
- [52] 서강, 박관수, “ 유한요소법에 의한 자성체의 전자력 밀도분포 해석에 관한 연구 ”, 대한전기학회 부산지부 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp.72-77, May 2001, 부산 한국해양대학교
- [53] 서강, 박관수, “ Permalloy Yoke를 이용한 Magnetic Fluid Linear Pump의 소형화 설계 ”, 대한 전기 학회 2001년도 하계 학술 대회 논문집, pp. 789-791, 2001년 7월 18일 - 20일, 용평
- [54] 서강, 박관수, “ 직경 12mm용 자성유체 펌프의 설계와 제작 ”, 한국 자기 학회 2002년도 추계 학술 대회 논문집, W6, 2002년 4월 12일 - 13일, 고려대학교 서창캠퍼스, 조치원
- [55] 서강, 박관수, “ 자성유체를 이용한 Linear Actuator 개발에 관한 연구 ”, 대한 전기 학회 부산지회 2002년도 춘계 학술 대회 논문집, pp.81 - 86, 2002년 5월 11일, 부산대학교
- [56] 서강, 박관수, “ 직경 12mm용 Magnetic Fluid Linear Pump의 제작과 운전 ”, 대한 전기 학회 2002년도 하계 학술 대회 논문집, pp.873-875, 2002년 7월 10일 - 12일, 제주도 롯데 호텔
- [57] 서강, 박관수, “ 동작 전류에 의한 Magnetic Fluid Linear Pump의 동특성 해석”, 대한 전기 학회 부산,경남, 울산 지회 2002년 추계 학술 대회 논문집, pp.73-76, 2002년 11월 29일, 울산대학교
- [58] 박관수, “자성유체를 이용한 리니어펌프”, 특허출원번호. 1020000038610, 출원일자. 2000년 7월 6일