工學碩士 學位論文

자성유체를 이용한 무소음·무진동의 Linear Actuator 설계와 제작

Design of Magnetic Fluid Linear Actuator Without Noise and Vibration

指導教授 朴 寬 秀

2001 年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電 氣 工 學 科

朴 相 浩

本 論文을 朴相浩의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長 : 工學博士 劉 永 昊 ㊞

委 員 : 工學博士 朴 寬 秀 ㊞

委 員 : 工學博士 全 泰 寅 ㊞

2001年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科 朴 相 浩

목　　차

Design of Magnetic Fluid Linear Actuator Without Noise and Vibration

by Park, Sang Ho

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

Abstract

In this paper, the magnetic fluid linear actuator is designed. Inside the small tube, magnetic fluid is shielded with thin rubber protector. The magnetic fluid activated by traveling

pulses of magnetic field drags the water inside the actuator. The size and weight of the device because there is no gear type parts, we can do reduce. Furthermore, it could be operated without vibration and noise.

The iterative algorithm for the shape of magnetic fluid is presented by using nonlinear finite element method and Navier-Stokes equations. The computed curvatures of fluid under the magnetic field and the gravitational force are agreed well with photographic image. The dimension and electric configurations of the magnetic linear actuator are optimized and the results are compared with the measurements.

기호설명

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

ϕ	:	**퍼텐셜함수**
μ_o	:	**진공중의 투자율**
μ_r	:	**비투자율**
NE	:	**요소의 갯수**

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

자성유체는 자성체의 성질을 갖는 액체이다. 자성유체는 다른 액체와는 달리 외부의 힘에 의해서 이동한다. 즉, 자성유체는 외부에서 자기장을 걸어줄 경우 자기장의 모양으로 모이게 된다. 이러한 매우 독특한 성질은 다양한 형태의 actuator나 센서에 응용될 수 있다. 대표적인 응용 예로서는 구동부의 sealing system, magnetic clutch, 유성필림 윤활제를 바른 베어링등이 있다.[1]-[4]

지금까지는 자성유체(磁性流體)의 적용 범위가 그리 넓지는 않으나 응용범위를 개척하기에 따라 액상 자성체의 성질을 이용한 특수용도로 활용될수 있다. 예를 들면, 개인용 컴퓨터(PC)의 하드디스크 드라이브의 기억장치의 오염물질을 방지하는데 사용되어지고 있으며, CD-ROM DRIVER 이나 DVD DRIVER의 렌즈의 댐핑 작용을 대신하고 있으며, 칼라 프린트에 내장된 스탭핑 모터(stepping motor), 비디오 테이프의 자기장 감지기능, 고음질 오디오 스피커, 그리고 의료용 기구와 장치 등 여러 가지 분야에 사용되고 있다.

지금 자성유체의 기술발달 정도는 일본이 가장 그 수준이 높다. 지금 일본에서는 자성유체를 공장에서 생산하여 이것을 실제로 적용시켜 물품을 생산하는 단계지만 우리 나라는 아직 초보적인 연구단계이며, 초보적인 생산과정에 있다.

본 논문에서는 자성유체의 특징 및 이를 응용하여 의료용 기기 등에 적용 가능한 Linear Actuator를 설계하고 이를 제작하고자 한다.

1.2 연구내용 및 방법

자성유체는 압축할수도 없고 무점도이며 균질인 것으로 가정한다.

본 논문에서는 자성유체가 가지는 독특한 성질을 이용하여, 자성유체에 의해 작동하는 Linear Actuator를 개발하였다. 가는 튜브관내에, 자성유체를 얇은 고무 막으로 차폐시킨다. 자기장의 이동 펄스에 의해서 자성유체는 관내의 액체를 이동시킨다.

이 장치는 많은 장점을 가지고 있다. 구조가 매우 간단하며 전동장치, 기어장치가 없어도 된다. 그래서 이 펌프는 작고 가볍게 만들 수도 있다. 이장치를 인슐린 펌프로 이용한다면, 펄스 간격을 변화시켜 주입속도를 조절할 수 있다. 또 펄스 크기를 변화시킴으로 주입 저항력을 조절하기 위한 주입력을 조절할 수 있다. 이 장치는 기계적인 관성이 작으므로 속음 특성이 양호하다. 또한 펄스 형태를 조절하므로 주입을 마치 on/off 스위치처럼 멈추게 할 수 있다. 만일 펄스 시퀀스를 변화시킬 경우 내부의 액체를 정, 역으로 모두 이동 가능하다. 펌프를 만들고 다양한 경우에서의 주입을 측정하여 보았다. 자성유체의 모양에 대한 Numerical Algorithm은 Navier-Stokes 방정식과 비선형 유한요소법을 사용한다.

제 2 장 자성유체의 구조와 성질

2.1 자성유체의 물성

자성유체는 일반 액체(液體)와 비슷하지만 그 성질은 일반 자성체처럼 자기장에 반응하며, 자석을 가까이 가져가면 철가루처럼 자석 쪽으로 끌어당겨지는 물체이다. 이것은 3가지 기본적인 구성 요소인 자성미립자, 계면활성제 그리고 캐리어로 구성되어져 있는 안정된 콜로이드 액체로서 자성적 성질을 가지고 있다. 자성 미립자의 평균지름은 100Å(10^{-10}m)정도의 크기로 마그네타이트(Fe_3O_4)와 같은 안정된 입자로써 중력에 의한 침강이나 자기적 응집을 일으키지 않는 특성을 나타낸다. 계면 활성제는 묽은 용액 속에서 계면에 흡착하여 그 표면장력을 감소시키는 물질을 말하며, 표면 활성제라고도 한다. 비누는 그 대표적인 것으로 비누가 물의

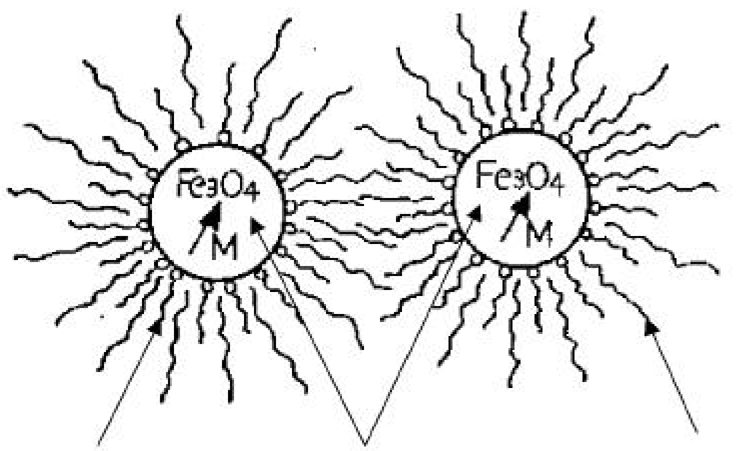


Fig. 1 The shape of magnetic fluid

표면에 잘 모이는 성질은, 비누의 분자(예를 들면, 스테아르산나트륨) 속에 긴 사슬 모양의 알킬기(基)의 친유(親油) 기와 카르복시기와 같은 친수 기가 들어 있어, 친유 기는 물의 반발을 받아 표면으로 가기 때문에 생긴다. 보통 한 개의 분자 속에 친유기와 친수기가 함께 들어 있는 양쪽 친매성(親媒性)인 물질은 계면활성제가 될 수 있다. 계면활성제중 수용액에서 이온화하여 활성제의 주체가 음이온이 되는 것을 음이온 계면활성제라고 하는데, 비누ㆍ알킬벤젠술폰산염 등이 이에 속한다. 또, 이온화하여 양이온이 되는 것을 양이온 계면활성제라 하는데, 고급아민할로겐화물ㆍ제사암모늄염ㆍ알킬피리디늄염 등이 이에 속한다. 또한 양쪽이 다 되는 것을 양쪽성 계면활성제라고 하는데, 여기에는 아미노산 등이 속한다. 한편, 전리하지 않는 것을 비(非)이온 계면활성제라 하여 구별하기도 하는데, 여기에는 폴리에틸렌글리콜류 등이 속한다. 계면활성제는 일반적으로 세척력ㆍ에멀션화력ㆍ분산력ㆍ삼투력ㆍ기포력(起泡力) 등을 지니고 있어, 각기 그 특성에 따라 세척제ㆍ섬유처리제ㆍ에멀션화제ㆍ부유선광제(浮遊選鑛劑)ㆍ시멘트용 기포제ㆍ윤활유 첨가제ㆍ살균제ㆍ도료분산제(塗料分散劑) 등으로 널리 이용되고 있다.

자성 미립자에 부착되어 있는 머리 그리고, 캐리어와 친화력을 갖는 꼬리 부분으로 이루어져 있으며 자성 미립자를 캐리어중에 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 자화(magnetization)되어 있지 않는 상태로 된다.

2.2 자성유체의 성질

자성유체의 물리적 화학적 성질은 그 대부분이 사용되는 캐리어에 따라 영향을 받는다. 밀봉(seal) 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, 활성 가스를 사용하는 경우는 파-플로오르 폴리에테르와 같이 화학적으로 안정된 캐리어를 채용한다. 소형 컴퓨터용의 방진실에서는 자성 유체의 점성에 의한 손실 토크를 모터에 부담시키지 않도록 점성이 낮은 유체를 사용한다. 원자력 관계에서는 방사선으로 분해되지 않는 용매를 캐리어로 사용하는 등 현재의 자성유체는 그 용도에 따라 선정하고 있다.

자성유체의 캐리어별 특성은 Table 1에서 제시한다.

Table 3 Characteristics table of Magnetic fluid and Ferrofluid

형명	WIL	D04	EIL	P03	M11
주 캐리어	트리에스터	다이에스트	파-폴로오르 폴리에테르	폴리페닐에테르	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・㎠)	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

자성유체의 수명은 캐리어의 증발에 의하여 유동성이 없어지는 때가 그 수명을 다하는 것이다. 일반적으로 자성유체의 증발율은 20℃이상이 되면 한자리 더 커진다. 즉 40℃에서 50년간 사용할 수 있는 것이 60℃에서는 5년의 수명으로 줄어든다.

2.3 자성유체의 응용

현재로는 자성유체의 응용가운데 가장 널리 쓰이는 경우가 밀봉 시스템이다. 응용 제품으로 실용화된 경우로는 반도체 프로세스에서의 진공장치용 진공 회전축이다. 이는 고정부와 회전부 사이에 자성 유체를 삽입하여 밀봉의 효과를 꾀하는 것이다.

그리고 밀봉을 응용한 자기 디스크 장치는 컴퓨터의 외부 기억장치의 하나로서 자기 디스크가 수납되어 있다. 디스크 팩 내부는 초청정 환경이 요구되며 0.2㎛(10^{-6}m)정도의 먼지 조차도 허용되지 않는다. 그래서 디스크 밀봉(seal)에서의 자성유체는 외부로부터의 먼지나 오염물질 등이 스핀들부의 사이에서 디스크 팩 내로 침입하여 디스크면에 부착하는 것을 방지하는 역할을 하고 있다.

초전도 발전기에서 사용할 경우 고속 회전축에도 적용 가능한 자성유체를 원심 밀봉에서 헬륨 가스를 밀봉하기 위한 용도로 사용되고 있다. 그리고 고음질 스피커에 사용할 경우 자기회로의 효율을 높여서 적은 전류로 큰 자기장을 만들 수 있다. 또한 코일 부분의 열발산에 좋은 재료가 되기도 한다. 그리고 금속의 작은 홈이나 crack을 발견할 때 자성유체를 위에 흘려 두고 자기장을 걸어두면 작은 홈에 자성유체가 모이는 현상을 이용하여 금(crack)이나 홈을 발견하는데 사용되고 있다. 또한

DVD DRIVER나 CD-ROM DRIVER에서 고속 회전시 발생하는 소음을 줄이기 위한 용도로 베어링 등을 대체하여 우수한 특성을 보이고 있다.

본 논문에서는 이러한 자성유체를 이용하여 Linear-Actuator를 처음으로 개발하였다. 개발한 Linear-Actuator는 정, 역방향으로 펌핑의 방향을 바꿀 수 있으며, 구조가 간단하고 기어 등의 부가장치가 필요 없다.

본 연구에서 사용한 자성유체는 삼화전자의 SMF-210으로 포화자화는 184[G] (at 10KOe), 점도 1382[cP] (at 27℃), 비중 1.12[kg/l] (at 27℃)의 특성을 가진다.

제 3 장 자성유체의 흐름해석

자성유체를 사용한 시스템의 문제점은 자성유체의 형태가 자기장의 분포와 자기장의 변화에 영향을 미친다는 것이다. 자기장의 변화가 자성유체 형태를 결정짓는다. 따라서 각각 Poisson 방정식과 Naver-Stokes 방정식이 자성유체의 표면 평형상태를 만족시키기 위해 동시에 그 방정식들을 해석하여야 한다.

3.1 선형운동량 해석

유체가 유동할 때에는 연속방정식과 함께 운동량방정식도 만족하여야 한다. 운동량방정식은 유체의 운동을 지배하는 Newton 방정식이다. 미분형 운동량방정식을 얻는 데는 적분형 운동량방정식을 미소검사역에 적용하여 얻는 방법과 미소유체요소(계)에 직접 Newton의 운동 제2법칙을 적용하여 얻는 방법이 있다. 여기서는 전자에 관해서 설명하기로 한다. 전자의 적용에서 얻은 결과는
자동적으로 후자인 Newton의 운동 제2법칙이 된다.

Fig. 2의 직육면체는 임의시각 t에 유체입자가 점유하는 체적으로서 이를 미소검사역으로 택하였다. 또 Fig. 2에 검사면을 통하여 유체유동과 더불어 관류하는 운동량속을 표시하여 놓았다.

적분형 운동량방정식은

$$F_s + \int_{CV} \mathbf{b}\rho dV = \int_{CS} \mathbf{v}\,(\rho\,\mathbf{v}\cdot dA) + \frac{\partial}{\partial t}\int_{CV} \mathbf{v}\,\rho dV \qquad (3.1)$$

와 같이 주어졌다. 여기서 **b**는 체력강도, F_s는 검사면을 통하여 계에 작용하는 표면력이다. 검사역이 미소하므로 검사역내에서 밀도 ρ는 균등하게 분포되어 있다고 생각할 수 있으므로 유체의 체력 F_b 근사적으로

$$F_b = \int_{CV} \mathbf{b} \rho dV = \rho \mathbf{b} \, dx dy dz \qquad (3.2)$$

와 같이 쓸 수 있다.

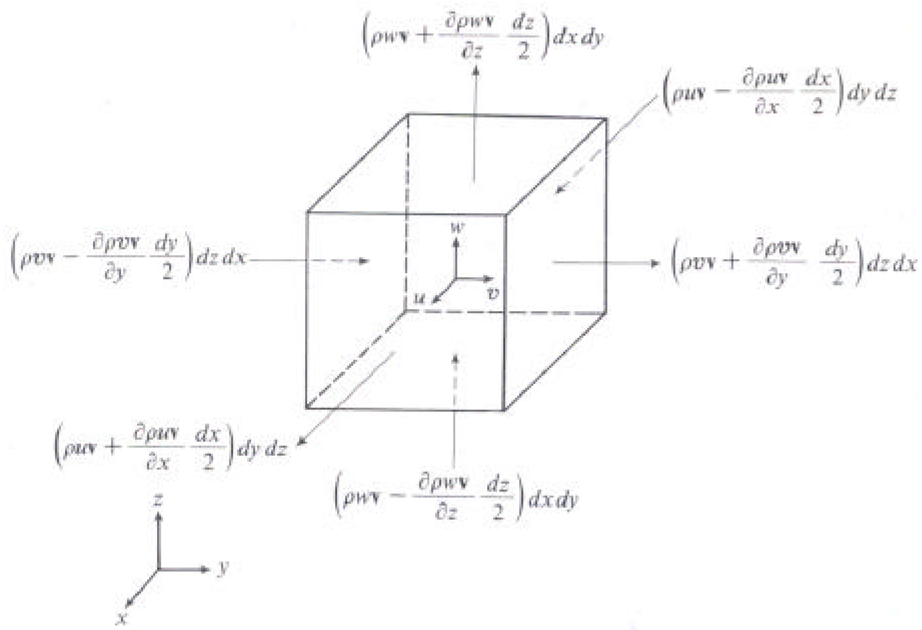


Fig. 2 Motional quantity to pass a surface

$$\int_{CS} \mathbf{v}(\rho\, \mathbf{v} \cdot d\mathrm{A})$$
$$= \left\{ \left[\rho u\, \mathbf{v} - \frac{\partial \rho u\, \mathbf{v}}{\partial x}\frac{dx}{2}\right] + \left[\rho u\, \mathbf{v} + \frac{\partial \rho u\, \mathbf{v}}{\partial x}\frac{dx}{2}\right]\right\} dy\, dz$$
$$= \left\{ \left[\rho v\, \mathbf{v} - \frac{\partial \rho v\, \mathbf{v}}{\partial y}\frac{dy}{2}\right] + \left[\rho v\, \mathbf{v} + \frac{\partial \rho v\, \mathbf{v}}{\partial y}\frac{dy}{2}\right]\right\} dz\, dx \qquad (3.3)$$
$$= \left\{ \left[\rho w\, \mathbf{v} - \frac{\partial \rho w\, \mathbf{v}}{\partial z}\frac{dz}{2}\right] + \left[\rho w\, \mathbf{v} + \frac{\partial \rho w\, \mathbf{v}}{\partial z}\frac{dz}{2}\right]\right\} dx\, dy$$
$$= \left[\frac{\partial \rho u\, \mathbf{v}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v\, \mathbf{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho w\, \mathbf{v}}{\partial z}\right] dx\, dy\, dz$$

식 (3.1)**의 우변 마지막 체적적분도 근사적으로**

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{CV} \mathbf{v}\, \rho d\mathrm{V} = \frac{\partial \rho\, \mathbf{v}}{\partial \mathrm{t}}\, dx\, dy\, dz \qquad (3.4)$$

와 같이 쓸 수 있다. 이들 값을 식 (3.1)**에 대입하고 정리하면 운동량방정식**

$$F_s + \rho\, \mathbf{b}\, dx\, dy\, dz$$
$$= \left[\frac{\partial \rho u\, \mathbf{v}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v\, \mathbf{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho w\, \mathbf{v}}{\partial z} + \frac{\partial \rho\, \mathbf{v}}{\partial t}\right] dx\, dy\, dz \qquad (3.5)$$

을 얻는다. 운동량 방정식은 식 (3.5)**를 그대로 사용하는 것보다 다음과 같이 변형하는 것이 편리하다. 식** (3.5)**의 우변미분을 전개하면**

$$\frac{\partial \rho u\,\mathbf{v}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v\,\mathbf{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho w\,\mathbf{v}}{\partial z}$$

$$= \mathbf{v}\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z}\right)$$

$$+ \rho\left(\frac{\partial\,\mathbf{v}}{\partial t} + u\frac{\partial\,\mathbf{v}}{\partial x} + v\frac{\partial\,\mathbf{v}}{\partial t} + w\frac{\partial\,\mathbf{v}}{\partial z}\right) \tag{3.6}$$

$$= \mathbf{v}\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bigtriangledown \cdot \rho\,\mathbf{v}\right) + \rho\frac{\mathrm{d}\,\mathbf{v}}{\mathrm{dt}}$$

$$= \rho\frac{d\,\mathbf{v}}{dt}$$

가 된다. 여기서 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bigtriangledown \cdot \rho\,\mathbf{v} = 0 \tag{3.7}$$

을 적용하였다. 식 (3.6)의 관계를 식 (3.5)에 적용하면 선형운동량방정식

$$F_s + \rho\,\mathbf{b}\;dx\,dy\,dz = \rho\frac{d\,\mathbf{v}}{dt}\;dx\,dy\,dz \tag{3.8}$$

을 얻는다. 식 (3.8)은 미소입자 $\rho dx\,dy\,dz$에 대한 Netwon의 운동법칙이다. 유체입자에 작용하는 표면력은 응력이다. 식 (3.8)을 응력으로 나타내려면 표면력 F_s를 응력항으로 나타내는 것이다.

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 대

하여)를 Ω라고 하면 체력강도 **b**는

$$\mathbf{b} = -\nabla\Omega \tag{3.9}$$

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

$$\Omega = gz \tag{3.10}$$

$$\mathbf{b} = -\nabla\Omega = -\nabla gz = -g\,\mathbf{k} = \mathbf{g} \tag{3.11}$$

이므로

$$\mathbf{b} = \mathbf{g} \tag{3.12}$$

이다. 표면력은 응력텐서

$$\sigma_{ij} = [\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yz} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

가 검사면에 작용하는 힘이다.
힘은 벡터량이므로

$$F_s = F_{sx}\,\mathbf{i} + F_{sy}\,\mathbf{j} + F_{sz}\,\mathbf{k} \tag{3.14}$$

와 같이 성분으로 나누어 표시할수 있다 그러므로

$$\begin{aligned} F_{sx} &= \left[-\left(\sigma_{xx} - \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}\frac{dx}{2}\right) + \left(\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}\frac{dx}{2}\right)\right] dy\,dz \\ &+ \left[-\left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}\frac{dy}{2}\right) + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}\frac{dy}{2}\right)\right] dz\,dx \\ &+ \left[-\left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\frac{dz}{2}\right) + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\frac{dz}{2}\right)\right] dx\,dy \\ &= \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) dx\,dy\,dz \end{aligned} \tag{3.15 a}$$

같은 방법으로 y, z방향의 성분을 계산하면

$$F_{sy} = \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right) dx\,dy\,dz \tag{3.15 b}$$

$$F_{sz} = \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\right) dx\,dy\,dz \tag{3.15 c}$$

을 얻는다. 따라서,

$$\begin{aligned} F_{s} = &\left[\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right)\mathbf{i}\right. \\ &+ \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right)\mathbf{j} \\ &+ \left.\left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\right)\mathbf{k}\right] dx\,dy\,dz \end{aligned} \tag{3.16}$$

이다. 식 (3.16)은 텐서연산으로 표현하면 간단히 표시할 수 있다. 식 (3.16)은 벡터 ▽와 텐서 $[\sigma]$와의 텐서곱으로 표시하면

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}\ \frac{\partial}{\partial y}\ \frac{\partial}{\partial z}\right)\cdot\begin{bmatrix}\sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz}\\ \tau_{yz} & \sigma_{yy} & \tau_{zz}\\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz}\end{bmatrix} = \nabla\cdot[\sigma] \tag{3.17}$$

이 된다. 이 관계를 식 (3.16)에 대입하면

$$F_s = \nabla\cdot[\sigma]\,dx\,dy\,dz \tag{3.18}$$

또

$$[\sigma] = -p[\mathbf{I}] + [\tau] = -\mathrm{p}\,\delta_{\mathrm{ij}} + \tau_{\mathrm{ij}} \tag{3.19}$$

$$\tau_{ij} = \mu\left[\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_j}\right) - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial v_k}{\partial x_k}\right] \tag{3.20}$$

를 대입하면

$$F_s = [-\nabla p + \nabla\cdot[\tau]]\,dx\,dy\,dz \tag{3.21}$$

를 얻는다. 따라서, 운동량방정식은 식 (3.21)을 식 (3.8)에 대입하면

$$\rho\frac{d\,\mathbf{v}}{dt} = -\nabla\cdot[\sigma] + \rho\,\mathbf{b} \tag{3.22 a}$$

$$\rho\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \nabla\cdot[\tau] + \rho\mathbf{b} \qquad (3.22\ b)$$

와 같은 형으로 표시된다. 식 (3.22)는 단위체적의 유체가 만족하여야 할 Netwon의 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

유체내에 작용하는 응력은 직접 측정이 어려우므로 운동방정식 식 (3.22)를 그대로 사용하여 유체의 운동을 해석할 수 없다. 그러므로 식 (3.22)는 응력 대신 속도 구배항으로 표시하여 사용하는 것이 유용하다.

Navier(1823)와 Stokes(1845)는 운동량방정식에 Newton 유체에 대한 응력-속도구배관계를 대입하여 Newton유체가 유동할 때 만족해야할 운동방정식을 도출하였다[34]. 이 운동방정식을 Navier-Stokes방정식이라 한다.

그러므로 Navier-Stokes방정식의 응력의 편차성분은

$$[\tau] = 2\mu[e] + \lambda(\nabla\cdot\mathbf{v})[\mathbf{I}] \qquad (3.23)$$

이므로

$$\nabla \cdot [\tau] = \nabla \cdot [2\mu [e] + \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v})[\mathbf{I}]]$$
$$= \nabla(\lambda \nabla \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot (2\mu[e]) \tag{3.24}$$

여기서

$$[e] = \left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{3.25}$$

이다. **이 관계를 운동방정식 식** (3.22)**에 대입하면** Navier-Stokes**방정식**.

$$\rho\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \nabla(\lambda\nabla \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot (2\mu[e]) + \rho\mathbf{b} \tag{3.26}$$

을 얻을수 있고, **텐서기호로 표시하면**

$$\rho\frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda\frac{\partial v_k}{\partial x_k}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\right] + \rho b_i \tag{3.27}$$

와 같이 쓸 수 있다.

점성계수 μ**와** λ**가 공간좌표에 무관한 일정한 유동에서는**

$$\nabla \cdot (2\mu[\mathbf{e}]) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\right]$$
$$= \mu\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_i}\right) + \mu\frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i \partial x_i} \tag{3.28}$$
$$= \mu\nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) + \mu\nabla \cdot \nabla\mathbf{v}$$

또

$$\nabla(\lambda\nabla\cdot\mathbf{v}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\frac{\partial v_k}{\partial x_k}\right) = \lambda\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial v_k}{\partial x_k}\right) = \lambda\nabla(\nabla\cdot\mathbf{v}) \tag{3.29}$$

이므로 Navier-Stokes 방정식은

$$\rho\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + (\lambda+\mu)\nabla(\nabla\cdot\mathbf{v}) + \mu\nabla\cdot\nabla\mathbf{v} + \rho\mathbf{b} \tag{3.30 a}$$

텐서형으로 표시하면

$$\rho\frac{dv_j}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + (\lambda+\mu)\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial v_k}{\partial x_k}\right) + \mu\frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i\partial x_i} + \rho b_j \tag{3.30 b}$$

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

$$\nabla\cdot\nabla\mathbf{v} = \nabla(\nabla\cdot\mathbf{v}) - \nabla\times(\nabla\times\mathbf{v}) \tag{3.31}$$

를 적용하면 식 (3.31)는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\rho\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + (\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla\cdot\mathbf{v}) + \mu\nabla\times(\nabla\times\mathbf{v}) + \rho\mathbf{b} \qquad (3.32)$$

유동이 비압축성 유동인 경우 연속방정식에 의해 $\nabla\cdot\mathbf{v} = 0$이므로, Navier-Stokes방정식으로부터 계수 λ가 제거되며, 점성계수가 일정한 유체의 비압축성 유동에 대한 Navier-Stokes방정식은 식 (3.30)로부터

$$\rho\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mu\nabla\cdot\nabla\mathbf{v} + \rho\mathbf{b} \qquad (3.33\ a)$$

혹은

$$\rho\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p - \mu\nabla\times(\nabla\times\mathbf{v}) + \rho\mathbf{b} \qquad (3.33\ b)$$

와 같이 간단히 주어진다.
체력이 중력장에만 의한다면

$$\mathbf{b} = \mathbf{g} = -\nabla\Omega \qquad (3.34)$$

이다. 여기서 $\mathbf{g}$는 지구중력 가속도로서, 중력장에서 단위질량에 작용하는 중력, 즉 중력장의 체력강도이다. 또 h를 연직좌표라고 하면 퍼텐셜 에너지강도 Ω는

$$\Omega = gh \qquad (3.35)$$

이므로

$$\mathbf{b} = \mathbf{g} = -\nabla\Omega = -\nabla gh \qquad (3.36)$$

로부터 μ가 일정한 비압축성 유동에 대한 중력장에서 성립하는 Navier-Stokes방정식은 벡터형으로 다음과 같이 고쳐쓸수 있다.

$$\rho\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mu\nabla\cdot\nabla\mathbf{v} - \rho\nabla gh \qquad (3.37)$$

3.3 유한요소법에 의한 자기장 해석

유한요소법은 자계 문제를 해석에 가장 널리 이용되는 방법으로 특히 비선형 문제를 해석함에 있어 다른 수치해석기법보다 우수하다. 본 절에서는 정자계를 문제를 해석하기 위한 수치해석기법으로 유한요소법을 유도한 다음 이것을 Navier-Stokes방정식과 결합하여 자성유체를 해석할수 있는 알고리즘을 도출한다.

3.3.1 지배 방정식 유도

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

$$\nabla \times H = J \tag{3.38}$$

이며 매질을 고려하면

$$B = \mu H \tag{3.39}$$

자기벡타포텐셜은

$$B \equiv \nabla \times A \tag{3.40}$$

로 나타낼수 있다. 식(3.39)에 식(3.40)식을 대입하고 (3.38)에 대입하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A\right) = J \tag{3.41}$$

벡타정리에서

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A\right) = \nabla\left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot A\right) - \left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla\right)A \tag{3.42}$$

이고

$$\nabla\left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot A\right) = 0 \tag{3.43}$$

이므로

$$-(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla)A = J \tag{3.44}$$

이며 선형 등방성 매질에서

$$-\nabla^2 A = \mu J \tag{3.45}$$

이며, 이 식 (3.45)가 poisson 방정식이다.
이것을 유한요소법으로 사용하기 위하여 functional 형태로 바꾸면 $\frac{1}{2}B \cdot H$ 형태의 Kinetic Energy형태와 $-JA$ 형태의 Potential Energy 형태로 나타낼수 있다. Energy 형태의 함수를 범함수 형태로 바꾸면

$$\begin{aligned} I(A) &= \int [\frac{1}{2}B \cdot H - JA]\,dv \\ &= \int [\frac{1}{2}\frac{1}{\mu}B^2 - JA]\,dv \end{aligned} \tag{3.46}$$

로 나타낼수있으며, 다시 자기벡타포텐셜형태로 정리하면

$$I(A) = \int [\frac{1}{2}\frac{1}{\mu}(\nabla \times A)^2 - JA]\,dv \tag{3.47}$$

해는 에너지가 가장 작은값이므로 I(A)가 0일때이다.

3.3.2 유한요소 정식화

식(3.47)를 일반화시키면

$$-\nabla^2\phi = f \tag{3.48}$$

형태로 나타낼수 있다. 이것을 유한개의 요소로 나누기 위해서 2차원일 경우 보간함수

$$\phi(x,y) = \sum_{e=1}^{NE}\phi^e(x,y) \tag{3.49}$$

를 사용하며 $\phi^e(x,y)$는

$$\phi^e(x,y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \tag{3.50}$$

로 표현한다.

해석영역을 고정 경계조건(ϕ= g(s))과 자연 경계조건($\frac{\partial\phi}{\partial n}$ = h(s)) 을 만족시키는 유한요소를 정식화 시키면

$$-\nabla^2\phi = f \tag{3.51}$$

식(3.51)을 범함수 형태로 바꾸면

$$I^e(\phi^e) = \frac{1}{2}\int\int\left\{\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)^2\right\}dx\,dy - \int\int f\phi\,dx\,dy \qquad (3.52)$$

이며 식(3.52)를 식 (3.49)형태로 바꾸어서 간략화 시키면

$$\sum_{j=1}^{n} K_{ij}\phi_j = f_i \qquad (3.53)$$

로 나타낸후, 이것을 결합한다. 그후 이 행렬의 해에 고정경계조건과 자연경계조건을 대입한후 해를 구할수 있다.

3.4 유체의 형태를 결정하는 수치해석

자성유체는 압축할수도 없고 무점도이며 균질인 것으로 추정하여 μ항이 제거된 식을 적분하면 Navier-Stokes방정식의 압력은 다음과 같다.

$$P_i = \int M dH - \rho g h + C \qquad (3.54)$$

여기서 P_i, M, H, ρ, g, h는 각각 압력, 자화, 자기장, 질량밀도, 중력상수, 액체높이이다. 유체역학적으로 C는 액체 표면을 따라 일정하다. 표면평형상태를 만족하기 우해 자속밀도의 법선 성분과 자계의 세기의 접선성분은 자성유체의 표면에서 연속적이다. 그래서 유체표면에서의 압

력은

$$P_o = P_i + \int MdH + \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 \qquad (3.55)$$

이다. 여기서 P_o와 M_n은 각각 입력과 자화의 법선 성분이다. 표면경계에서 식(3.54)을 식(3.55)에 대입하여 C에 대하여 정리하면

$$C = P_o - 2\int MdH + \rho g h - \frac{1}{2\mu_o} M_n^2 \qquad (3.56)$$

이다.

이방정식은 동력상수 C는 자성유체의 곡선 S를 결정한다. 그림 3의 알고리즘은 일정한 자성유체의 부피를 가지고 곡선 S를 구할수 있다.

이 방정식의 동력상수 C는 자성유체의 곡선 S를 결정한다. 이 알고리즘은 일정한 자성유체의 부피이다. 이것을 이용하여 유체의 형상을 구하기 위해 Fig. 3과 같은 알고리즘에 따라 유한요소법을 이용한 반복계산이 수행되어야 한다.

step 1 : 유체부피 V_o와 외부압력 P_o를 입력시킨다.

step 2 : 유한요소법을 사용하여 영역에서의 자계의 세계 H^i를 계산한다.

step 3 : P_o를 사용하여 식 (3.40)에 의해 영역내의 C를 계산한다.

step 4 : 영역 안에서 유체의 경계면상의 좌표값을 임의의 x_k로 취하여 C를 계산한다.

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

step 6 : S에 의해 결정된 유체부피 V_k를 계산한다.

step 7 : 만약 $|V_k - V_o|$이 충분히 적지 않으면 x_k값을 조정하고 step 4로 되돌아 간다.

step 8 : 만약 $|H^i - H^{i-1}|$이 충분히 적지 않으면 step 2로 되돌아 간다.

Fig. 4는 그중 한가지 예를 보여준다. Fig. 7의 mode2에 해당하는 전류를 흘릴때 자성유체의 양에 따라 Fig. 4에서는 ① ② ③ ④의 4가지 경우의 평형상태의 일 예가 있다. 자성유체의 체적을 만족하는 한 개의

곡선이 마지막 형태이다.

알고리즘을 증명하기 위해 평평한 표면 위에 하나의 코일에 의해 존재하는 자성유체의 모습이 컴퓨터에 의해 구현되고, 측정되었다. Fig. 5에서 보여진 바와 같이 컴퓨터와 구현된 모습과 사진이 찍힌 모습이 잘 일치한다. Fig. 5의 (b)의 그림에서 자성유체 아래의 자석의 크기는 직경과 높이 각각 10mm이다.

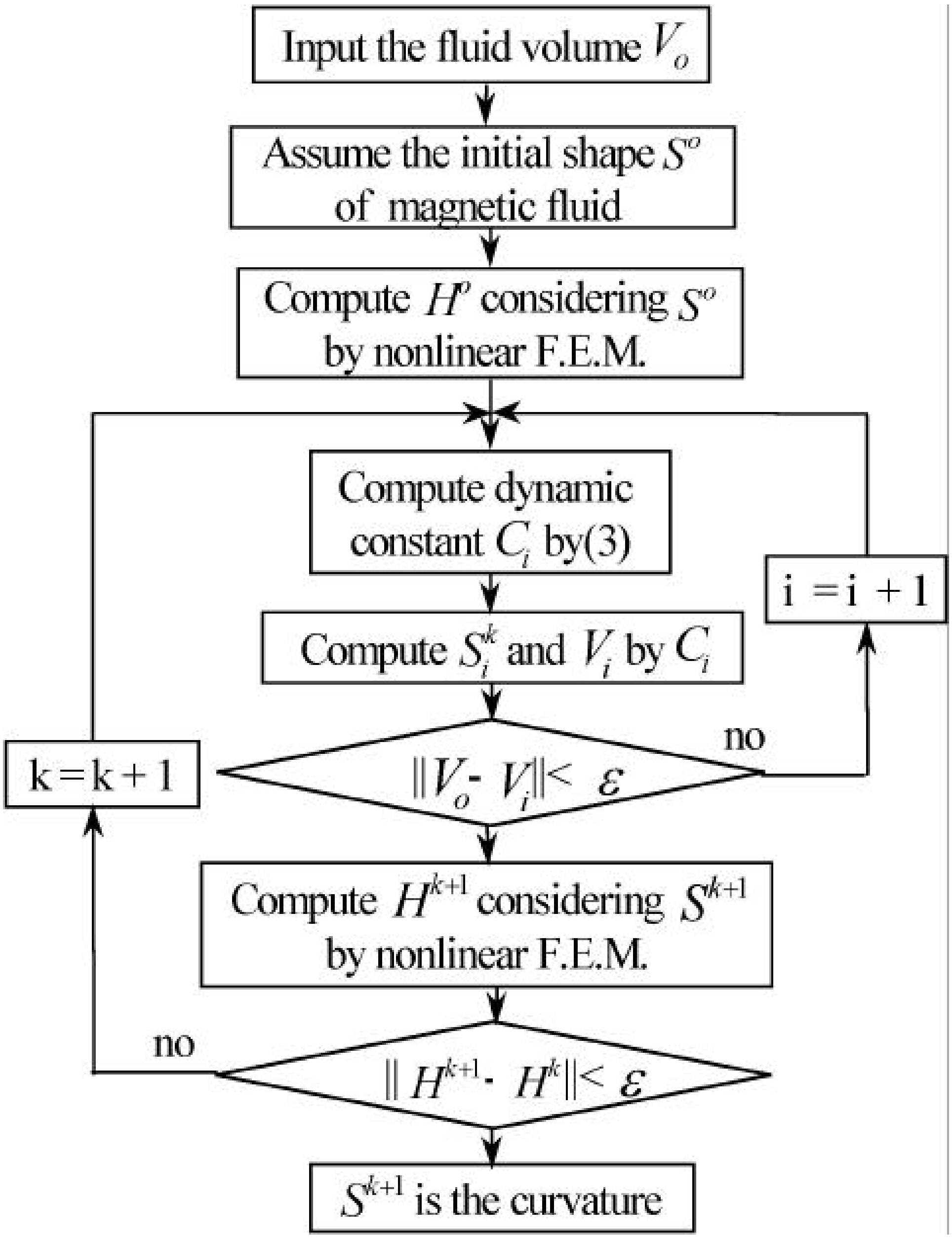


Fig. 3 Numerical algorithm for magnetic fluid shape

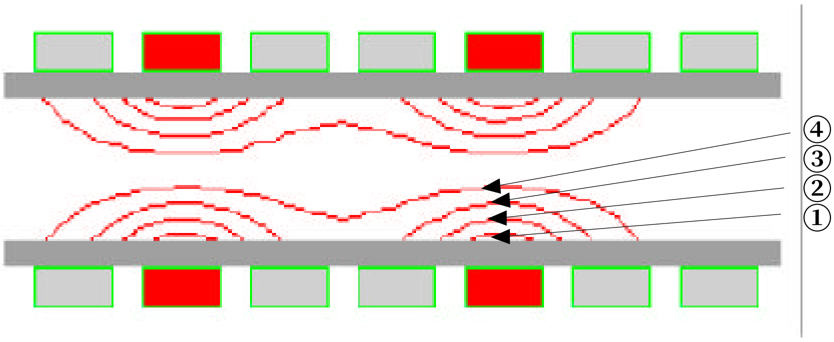
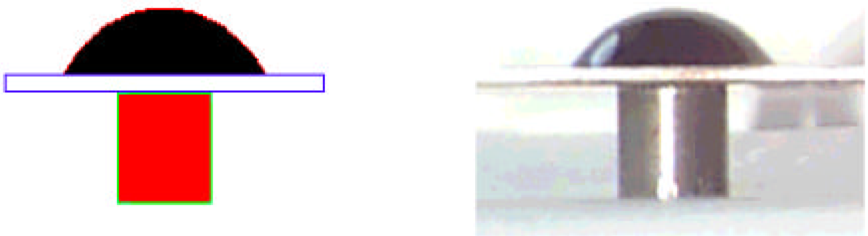


Fig. 4 Examples of the magnetic fluid shape



(a) computed shape (b) Photographed shape

Fig5 The shapes of magnetic fluid under the magnetic field and gravitation

제 4 장 Linear Actuator의 구조 및 설계

4.1 Linear Actuator의 구조

Fig. 6은 Linear Actuator의 구조를 보여준다. 튜브 안에 자성유체를 얇은 고무 막으로 차폐시킨다. 이때 차폐 고무 막은 자성유체의 흐름을 방해하지 않을 정도로 부드러워야 하고 찢어지지 않을 만큼 튼튼해야 한다. 그리고 7개의 코일에 자기장을 발생시킨다.

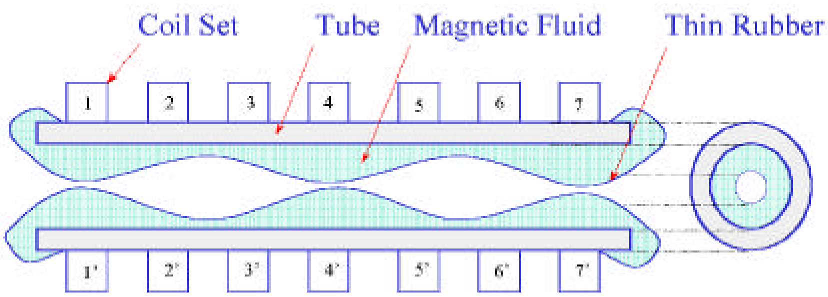


Fig. 6 The structure of magnetic fluid Linear Actuator

4.2 Linear Actuator의 흐름해석

유체의 추진운동에는 세가지 다른 형태가 있다. Fig. 7에서 보여진 바와 같이 형식 1에서는 코일 1-4-7이 형식 2에서는 코일 2-5가 코일 3에서는 3-6이 작동된다. 형식 1-2-3의 순서의 흐름은 추진 운동을 하게 되고 Fig. 8에서처럼 1-3-2순서의 흐름은 펌핑의 방향을 역으로 변화시킨다. 각 모드에서의 펄스간격을 유출속도로 제한하고, 각 코일에서 펄스의 크기는 유출하는 유출압을 결정한다. 흐름을 막기 위해서는 코일 4-5를 Fig. 9와 같이 전류를 흘릴 경우 스위치로 구동된다.

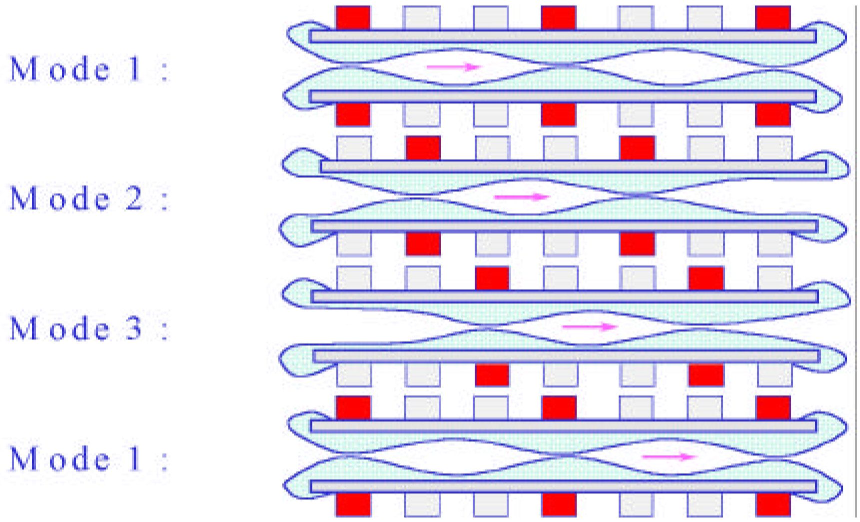


Fig. 7 The driving of Linear Actuator (forward pumping)

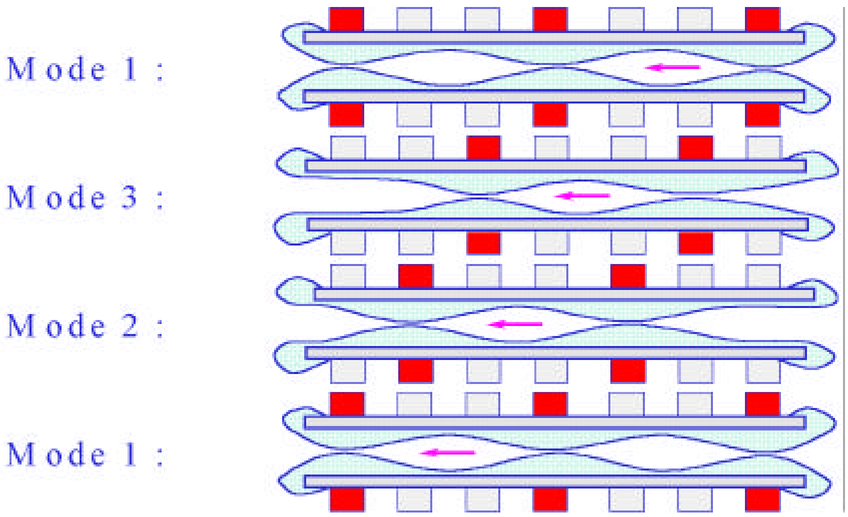


Fig. 8 The driving of Linear Actuator (backward pumping)

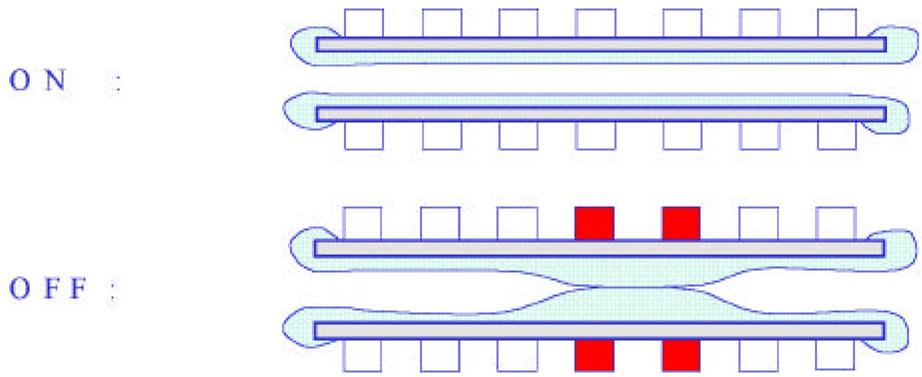


Fig. 9 on/off switch

제 5 장 Linear Actuator의 실험 및 고찰

Fig. 10은 설계한 Linear Actuator이다. 코일에서 발생된 열을 방출하기 위하여 알루미늄 판으로 방열판을 만들었으며 자성유체 Linear Actuator의 길이는 92mm, 직경은 10mm, 튜브관의 두께는 1.2mm이다. 하나의 감은 코일의 횟수는 1000번이고 coil의 넓이는 5mm 높이는 15mm이다. 유체의 포화자화는 16kA/m이다.

Fig. 10의 (a)는 코일간의 간격이 1mm이며 (b)는 2mm이고 (c)는 4mm이다.

(a) (b) (c)

Fig. 10 The Linear Actuator

5.1 최적 코일거리

유체 부피 V에서 가장 중요한 것은 이웃하는 코일간의 자기장이다. 외부에서 가하는 압력이 없을 경우, 각각의 경두 상태에서 이웃하는 코일에 의한 자기장은 Fig. 11에서 보는 바와 같이 자성유체를 만들 수 있다. 그림에서 a는 자성유체의 높이고, d는 이웃하는 코일 사이의 거리, h는 이웃하는 코일 사이에 자성유체 윤곽이 중복된 높이이다. V는 d에 비례하나 코일 간격이 너무 멀어지면, 유체는 자기장내에 도달하지 못하게 된다. 그래서 최적 값이 하나있다. 수치적인 결과는 실험 값과 일치하며 a와 d의 최적의 비율은 약 1.2 하는 것을 보여준다. 이웃하는 코일사이의 최적코일간격은 자성유체의 높이보다 20% 길다는 것이다.

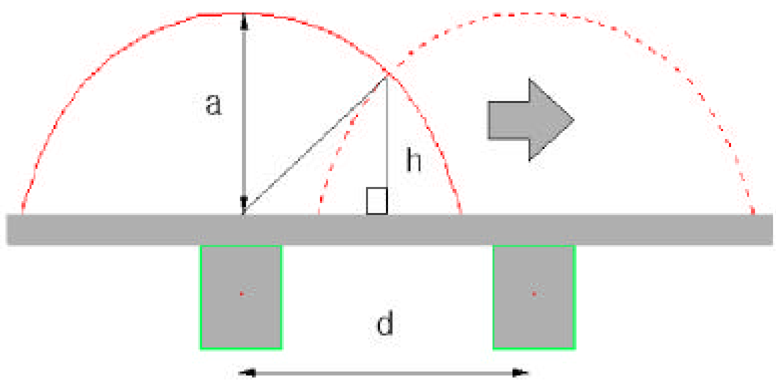


Fig. 11 Dragging magnetic fluid by the neighboring coil field

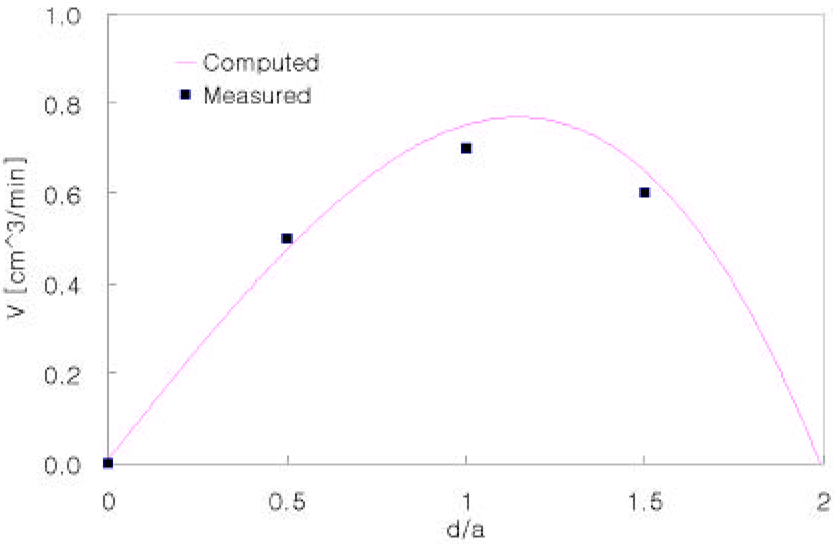


Fig. 12 Optimum distance between neighboring coils

5.2 자성유체의 최적 양

만일 자성유체의 양이 너무 적다면, 그 유체는 끌 힘이 없어진다. 또 만일 유체의 양이 너무 많다면 자성유체의 형태는 높이가 증가하는 대신 그냥 퍼져버린다. 그래서 역시 자성유체의 최적의 양도 있다. Fig. 13에서의 컴퓨터로 계산된, 그리고 실험 관찰된 결과는 같은 것을 보여준다. Fig. 13에서는 고무막의 장력 때문에 측정값이 컴퓨터의 계산값보다 더 작게 나왔다.

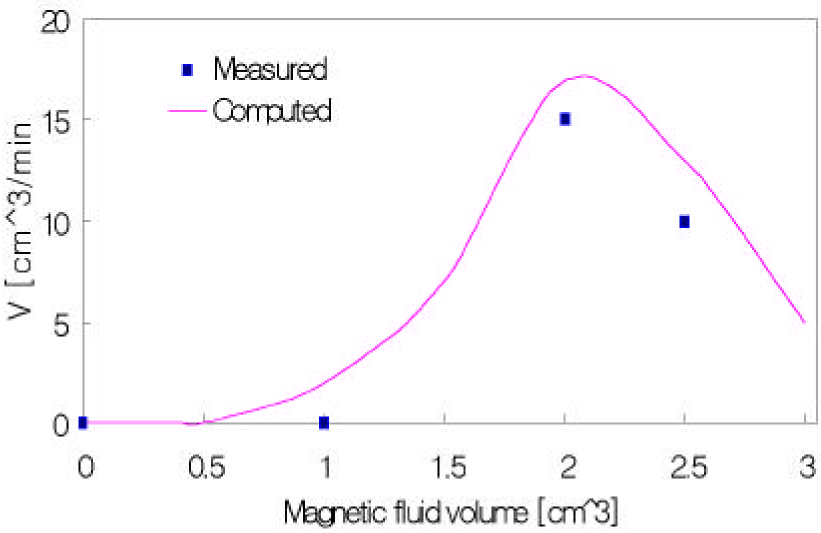


Fig. 13 Optimum volume of magnetic fluid

5.3 최적의 자계의 세기

자기장이 너무 작으면 자성유체를 움직일 수 없다. 그러나 일정값 이상의 자기장에서는 자성유체가 자기적으로 포화되어 버린다. 그래서 여기서도 역시 자기장의 최적 값이 있다. Fig. 14는 driving 코일에서 전류를 2A이상 흘려도 자기포화로 인해서 펌핑의 양은 더 이상 증가하지 않는다.

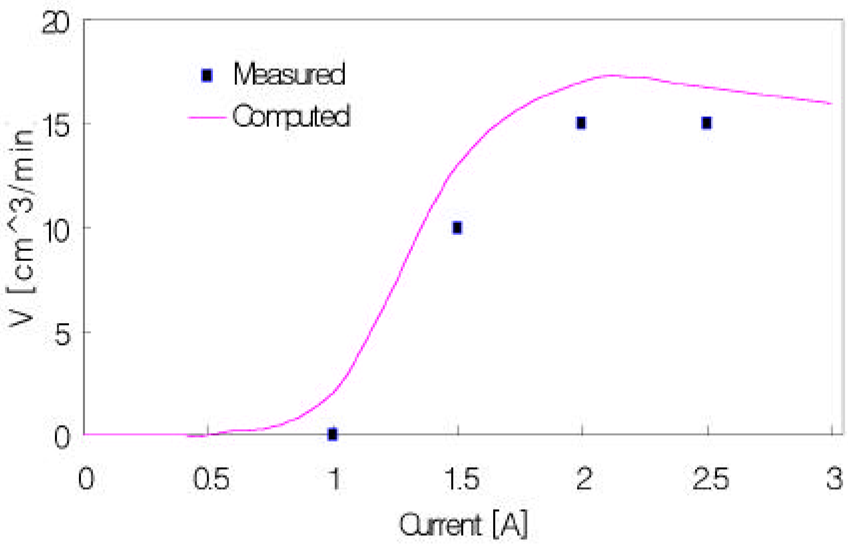


Fig. 14 Optimum driving field

제 6 장 결 론

본 논문에서는 자성유체를 이용하여 Linear Actuator를 개발하였다.

본 논문에서는 자성유체에 의해 움직이는 Linear Actuator가 외부조건에 따라 유체의 부피가 주어지면 그에 해당하는 유체의 형상을 구할 수가 있었는데, 이를 위해서는 알고리즘을 작성하여 유한요소법을 이용한 반복계산을 수행하는등 수치해석을 통하여 설계되었고 이 Linear Actuator의 구조와 동작에 대하여 설명하였다. 자성유체의 형태와 상호작용하는 알고리즘의 수치해석적인 결과는 사진에 의한 측정결과와 잘 일치하였다. 자성유체의 높이와 이웃하는 코일간격의 최적의 치수비는 컴퓨터로 계산되고 계산된 값으로 1.2이다. 자성유체의 최적 부피와 코일전류의 최적 자계는 컴퓨터로 계산한 값과 측정치를 확인하였다.

본 논문에서 설계 제작된 Linear Actuator는 소음, 진동이 없으며 소형, 경량으로써 간단한 구조를 가지고 있다. 또한 펄스 주파수를 조절함으로써 펌핑속도 조절이 가능하며, 펄스 순서를 제어함으로써 펌핑 방향 제어가 가능하며, 펄스 크기를 제어함으로써 펌핑 force를 조절할수 있으며, On/Off 스위치로도 사용이 가능하다.

현재 개발된 Linear Actuator는 자기회로가 솔레노이드 형식으로써 대부분 공기중으로 형성되어 있으므로 많은 전류를 흘림에도 불구하고 분출압력이 작다. Linear Actuator의 구조를 개선하여 자기회로의 공기부분을 최대한 작게하면 이 장치의 성능을 증가시킬 수 있을것이다.

참 고 문 헌

[1] S. Taketomi and S. Chikazumi, Magnetic Fluid, Nikka Kogyo Simbunsha, 1987.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] Gwan Soo Park and Sang Ho Park. “Design of Magnetic Fluid Linear Pump”, *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 35, No. 5, pp. 4058-4061, September 1999.

[6] 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.

[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] Olaru R., Salceanu A., Calarasu D., and Cotae C., "Magnetic fluid actuator", *Sens. actuators. A Phys*, Vol. 81, pp. 290-293, 2000.

[9] Hadgia S., Iusan V.,and Stanci, "A method for magnetic field determination inside magnetic fluids", *J. Mag. Mater*, Vol. 201, pp. 404-406 , 1999.

[10] 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.

[11] Nii K. and KohNo T., "Magnetic Fluid Bearings", *Jpn. j. tribol*, Vol. 41, No. 6, pp. 575, 1996.

[12] Shimada K., "Magnetic Fluid Damper", *Jpn. j. tribol*, Vol. 41 No. 6, pp. 583, 1996.

[13] Kouda Y. and KanNo T., "Magnetic Fluid Vacuum Seals", *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol. 42 No. 6, pp. 442, 1997.

[14] 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.

[15] 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.

[16] Robert I. Potter, "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. 4677-4679, November 1994.

[17] Hideo Oka, "Metrology of Complex Magnetic Permeability of Magnetic Fluid in 1 Mhz to 1.8 GHz Band", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 31, No. 6, pp. 4172-4174, November 1995.

[18] H. Oka, F.P. Dawson, T. Sakuta, and J.D. Lavers, "Magnetic Fluid Based Variable Inductors for Inductively Coupled Plasma Applications", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 31, No. 6, pp. 4175-4177, November 1995.

[19] M.S. Dababneh and N.Y. Ayoub, "The Effect of Oleic Acid on the Stability of Magnetite Ferrofluid", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 31, No. 6, pp. 4178-4180, November 1995.

[20] Zou Jibin and Lu Yongping, "Numerical Calculations for Ferrofluid Seals", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 28, No. 6, pp. 3367-3371, November 1992.

[21] 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.

[22] P. Kopcansky, D. Horvath, V. Kellnerova, M. Koneracka, V. Svidron, T. Tima, P. Slanco, D. Macko, and M. Kasparkova, "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.

[23] Stanislaw K. Krzeminski, Michal Smialak, and Macij Wlodarczyk, "Analysis of Magnetogydrodynamic Pressure in Conducting Fluids", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 34, No. 5, pp. 3138-3141, September 1998.

[24] 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.

[25] 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.

[26] M. Timko, A. Zenko, M. Zentkova, M. Koneracka, and V. Kellnerova, "Magnetorheological Properties of some Ferrofluids", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 30, No. 2, pp. 1117-1119, March 1994.

[27] 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.

[28] Andreas Binner, Stefan Roth, and Cornelia Stiller, "Calculation of Demagnetisation Curves of NdFEB-Magnets Using the Finite-Element-Method", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 30, No. 2, pp. 622-624, March 1994.

[29] Nicolae Calin Popa, Iosif Potencz, and Ladislan Vekas, "Magnetic Fluid Flow Meter for Gases", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 30, No. 2, pp. 936-938, March 1994.

[30] Victor G. Bashtovoi and Yuri P. Yarmolchik, "Magnetofluid Emulsion - New Magnetocontrolled Media", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 30, No. 2, pp. 1090-1094, March 1994.

[31] 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.

[32] Vasile Z. Iusan and Aurora Gh. Stanci, "Inertial Magnetofluidic Sensor", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 30, No. 2, pp. 1104-1106, March 1994.

[33] 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.

[34] **손병진**, **맹주성**, **이상환 편저**, **해설 유체역학**, **희중당**, pp459-484, 1992

[35] **손병진**, **조강래 편저**, **유체역학**, **희중당**, pp390-400,1992

자성유체를 이용한 무소음 · 무진동의 Linear Actuator 설계와 제작

석사과정 전기공학과 박 상 호
지도교수 박 관 수

자성유체는 자성체의 성질을 갖는 액체이다. 자성유체는 다른 액체와는 달리 외부의 힘에 의해서 이동한다. 즉, 자성유체는 외부에서 자기장을 걸어줄 경우 자기장의 모양으로 모이게 된다. 이러한 매우 독특한 성질은 다양한 형태의 actuator나 센서에 응용될 수 있다. 지금까지는 자성유체(磁性流體)의 적용 범위가 그리 넓지는 않으나 응용범위를 개척하기에 따라 액상 자성체의 성질을 이용한 특수용도로 활용될수 있다

본 논문에서는 자성유체의 특징 및 이를 응용하여 의료용 기기 등에 적용 가능한 Linear Actuator를 설계하였다.

본 논문에서는 자성유체를 이용하여 Linear Actuator를 개발하였다. 가는 튜브관내에, 자성유체를 얇은 고무 막으로 차폐시킨후 자기장의 이동 펄스에 의해서 자성유체는 관내의 액체를 이동시켰다.

본 논문에서는 자성유체에 의해 움직이는 Linear Actuator가 외부조건에 따라 유체의 부피가 주어지면 그에 해당하는 유체의 형상을 구할 수가 있었는데, 이를 위해서는 알고리즘을 작성하여 유한요소법을 이용한 반복계산을 수행하는등 수치해석을 통하여 설계되었고 이 Linear Actuator의 구조와 동작에 대하여 설명하였다. 자성유체의 형태와 상호 작용하는 알고리즘의 수치해석적인 결과는 사진에 의한 측정결과와 잘 일치하였다. 자성유체의 높이와 이웃하는 코일간격의 최적의 치수비는 컴퓨터로 계산되고 계산된 값으로 1.2이다. 자성유체의 최적 부피와 코일전류의 최적 자계는 컴퓨터로 계산한 값과 측정치를 확인하였다.

본 논문에서 설계 제작된 Linear Actuator는 소음, 진동이 없으며 소형, 경량으로써 간단한 구조를 가지고 있다. 또한 펄스 주파수를 조절함으로써 펌핑속도 조절이 가능하며, 펄스 순서를 제어함으로써 펌핑 방향 제어가 가능하며, 펄스 크기를 제어함으로써 펌핑 force를 조절할수 있으며, On/Off 스위치로도 사용이 가능하다.

현재 개발된 Linear Actuator는 자기회로가 솔레노이드 형식으로써 대부분 공기중으로 형성되어 있으므로 많은 전류를 흘림에도 불구하고 분출압력이 작다. Linear Actuator의 구조를 개선하여 자기회로의 공기부분을 최대한 작게하면 이 장치의 성능을 증가시킬 수 있을것이다.