

## 3 자유도 모터 제어를 위한 철심 솔레노이드 특성의 실험적 해석에 관한 연구

박준혁\* · 백윤수†

(2000년 12월 11일 접수, 2001년 6월 23일 심사완료)

### A Study of the Iron-Core Solenoid Analysis for 3 D.O.F. Motor Control with Experimental Method

Joon Hyuk Park and Yoon Su Baek

**Key Words :** 3 D.O.F. Motor(3 자유도 모터), Permanent Magnet(영구 자석), Iron-Core Solenoid(철심 솔레노이드), Equivalent Magnet(등가 자석), Coulomb's Law(쿨롱의 법칙), Force Distribution(힘 분포)

#### Abstract

In this paper, the experimental modeling of the force between permanent magnet and iron-core solenoid is suggested for more accurate control of 3 D.O.F. motor using the electromagnetic force. In the case of iron-core solenoid, the general equation of solenoid can't be used simply because of its nonlinearity. Therefore, the magnetic flux density is estimated through the concept of equivalent permanent magnet. The force distribution between permanent magnet and iron-core solenoid is more dependent on the magnetization of iron core caused by the permanent magnet than any other parameters. Therefore, the equation of the force estimation between these magnetic systems can be modeled by the experimental function of the magnetization of iron core. Especially, if the distance between iron-core solenoid and permanent magnet is far enough, the force equation through experiment can be expressed from only the current of coil and the distance between iron-core solenoid and permanent magnet. It means that Coulomb's law can be used for magnetic systems and it is validated through the experiment. Therefore, force calibration is performed by the concept of Coulomb's law.

#### 1. 서론

최근의 위치 제어용 기기 개발이나 액추에이터 개발에 있어서 솔레노이드와 영구자석의 관계를 이용하는 경우가 있다. 이는 둘 사이의 인력과 척력을 이용하면 회전자를 고정자로부터 부상시키거나 운동시키는데 효율을 높일 수 있기 때문이다.

한 관절에서 나타낼 수 있는 3 차원의 운동을 한 개의 모터에서 구현할 경우 3 개의 모터와 그 외의 부수 장치들을 하나의 조인트에 설치함으로써

부피와 중량을 감소시키고 기어와 링크를 사용하지 않기 때문에 백래시, 탄성변형등을 막을 수 있으며 설계 및 제작이 비교적 간단한 이점이 있다.<sup>(1)</sup> 따라서 여러 연구가들이 3 자유도 모터에 대해 연구를 하고있다.

영구자석과 솔레노이드와의 관계를 이용한 기기에 기대할 수 있는 성능은 그들의 성능에 크게 의존할 수 밖에 없다. 즉, 좀 더 큰 힘이나 토크를 얻기 위해서 또는 작업환경을 크게 하기 위해서는 영구자석과 솔레노이드의 세기를 크게 하여야 한다. 그러나 솔레노이드의 세기를 크게 하기 위하여 코어(core)를 사용하였을 경우는 히스테리시스 가 있고 자속 밀도의 포화가 존재하는 등 공심 솔레노이드가 가지고 있는 장점을 기대할 수 없으며 또한 많은 비선형성이 있어 간단한 이론식이 존재

\* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

E-mail : watchcon@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2827 FAX : (02)362-2736

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계전자공학부

하지 않는다. 따라서 이러한 많은 비선형성으로 인해 연구자들은 솔레노이드 및 강자성체에 대해 연구를 하고 있다.

Nakane 등<sup>(2)</sup>은 다점의 솔레노이드의 저항(resistivity)과 투자율을 동시에 측정하기 위한 방법을 연구하였다

Marandi<sup>(3)</sup>는 공심 솔레노이드 근처에서의 자기장에 대한 폐형해를 제시하였고 이를 수치적분을 통한 값과 비교 검증하였다.

Fouladgar<sup>(4)</sup>는 강자성체의 투자율을 센서의 임피던스로 측정하기 위하여 역해석 방법론을 제시하였으며 선형인 경우와 비선형인 경우를 나누어 그 방법을 제시하였다.

Ohdachi 등<sup>(5)</sup>은 유한요소법을 이용하여 자기장을 계산하고 이를 이용하여 자화된 철(magnetic steel)의 저항과 비투자율을 정량적으로 구하였다. 또한 이러한 관점에서 최소 비투자율과 저항을 구할 수 있는 최적화 기법을 제시하였다.

또한 3 자유도 모터에 관해서는 다음과 같은 연구가 있다.

Lee, K-M 등<sup>(6)</sup>은 로봇 손목에 쓰이는 구형 모터의 설계에 대한 연구를 하였다. 이들은 회전축의 위치를 VR(variable reluctance) 모터의 원리를 이용하여 제어하였는데 공극(airgap) 내에 축적되는 에너지를 최소화 하는 방향으로 회전자가 움직이는 원리를 이용하였다.

Wang 등<sup>(7)</sup>은 3 자유도의 고토크를 낼 수 있는 구형 액추에이터를 제안하였다. 구형 좌표계에서 3 차원 자기장 분포를 분석적 기법을 통해 해석하여 토크 벡터와 역기전력의 폐형태로 유지되도록 하였다.

양창일 등<sup>(8,10)</sup>은 전자석에 인가되는 전류의 크기를 조절하여 전자석과 영구자석 간에 발생하는 힘을 제어함으로써 회전자를 움직이는 새로운 개념의 3 자유도 액추에이터를 제안하고 프로토타입을 제작하여 실험을 수행함으로써 그 가능성을 확인하였다.

본 연구에서는 양창일 등<sup>(8,10)</sup>이 제안한 3 자유도 모터의 철심 솔레노이드와 영구자석 간의 관계를 고려하여 철심 솔레노이드에 대한 실험적 해석을 통해 3 자유도 모터 제어에 있어서 보다 정확한 모델링을 통한 제어를 가능하게 하고 이에 따른 보다 정밀한 위치제어를 가능하도록 하고자 한다.

특히 일반적인 철심 솔레노이드의 특성에 대한 연구가 아니라 3 자유도 모터의 제어를 위한 연구이기 때문에 힘에 대한 폐형해 뿐만 아니라 전류에 대한 폐형해가 가능하고 되도록 간단한 식으로 유도하여 실제 제어시 계산 시간을 최소화하는 방

향으로 실험식을 결정하고자 한다.

## 2. 3 자유도 모터의 모델

### 2.1 3 자유도 모터

Fig. 1 은 본 연구에서 고려한 3 자유도 모터의 개략도를 나타낸 것이다.<sup>(10)</sup> 이 3 자유도 모터는 20 면체의 하반구의 다섯 꼭지점에 각각 전자석이 배치되어 고정자를 구성하고 있으며 이 전자석의 중심선들은 회전자의 회전 중심에서 만나게 되고 중심선들은 즉 전자석은 평면에 대하여 26.5° 기울어져 있다. 회전자는 두 개 또는 네 개의 영구자석을 부착시킬 수 있도록 설계되어 있으며 이때 전자석과 가까운 부분이 N 극이 오도록 영구자석을 배치시켜 극의 대칭성을 유지시킨다. 영구자석을 부착시키는 위치, 즉 회전자의 극의 위치의 사잇각은 고정자 극의 위치를 고려하여 63.5° 가 되도록 설계되었다. 이렇게 할 경우 회전자의 기울어짐이 최대  $\pm 31.75^\circ$  까지 가능하나 엔코더 및 와이어의 간섭을 고려할 경우 약  $\pm 25^\circ$  범위를 갖는다.

두 개의 극을 이용할 경우에는 두개의 N 극을, 네 개의 극을 이용할 경우에는 N 극과 S 극을 교대로 위치시켜 극의 대칭성을 유지시킨다.

이와 같은 3 자유도 모터의 기본적인 작동 원리는 전자석의 인가 전류를 조절하여 영구자석의 위치를 결정하는 것이다. 따라서 임의의 위치에 정지시키는 스톱퍼(stopper)기능이나 고속의 회전이 동시에 가능하다.

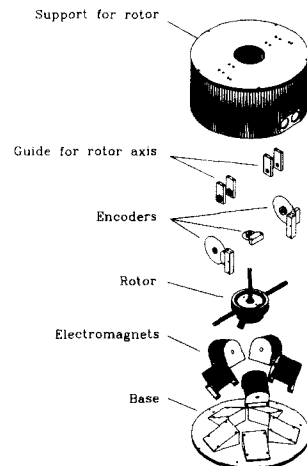


Fig. 1 Assembly view of 3 D.O.F. actuator

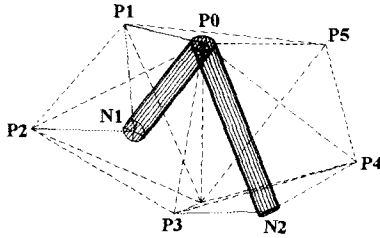


Fig. 2 Interaction between permanent and electro-magnets

2.2 영구자석과 전자석의 상호작용에 의한 토크 발생

Fig. 2 는 회전자를 구성하고 있는 두 개의 영구자석(N1, N2)을 나타내고 있으며 P0 는 회전 중심, P1 ~ P5 는 전자석의 위치를 나타낸다.<sup>(10)</sup> 영구자석의 N1 극은 P1, P2 의 전자석에 의해, 영구자석의 N2 극은 P3, P4 의 전자석에 의해 각각 영향을 받는다. 물론 모든 전자석이 각 극에 영향을 미치지 만 극 주위의 두 점에 비해 다른 점들에서 미치는 영향은 작다고 가정한다.

Fig. 2 와 같은 경우에 전자석과 영구자석에 의해 회전 중심 P0 에서 발생하는 토크는 다음과 같다.<sup>(10)</sup>

$$\vec{M}_0 = \sum_{i=1}^2 \vec{r}_{N1} \times \vec{F}_i + \sum_{i=3}^4 \vec{r}_{N2} \times \vec{F}_i \quad (1)$$

여기서  $\vec{r}_{N1}, \vec{r}_{N2}$  는 각각 N1, N2 극의 위치벡터를 나타내고,  $\vec{F}_1, \vec{F}_2$  는 N1 극과 P1, P2 간에 작용하는 힘을,  $\vec{F}_3, \vec{F}_4$  는 N2 극과 P3, P4 간에 작용하는 힘을 각각 나타낸다. 따라서 식 (1)에서 모멘트  $\vec{M}_0$  를 구하기 위해서는 영구자석의 임의의 위치에 따른 힘  $\vec{F}_i$  가 결정되어야 한다.

3. 철심 솔레노이드

3.1 철심 솔레노이드의 B-H curve 및 철심의 비투자율(relative permeability)

Fig. 3 은 본 연구에서 사용한 철심 솔레노이드를 나타내며 그 사양은 Table 1 에 나타내었다.

철심 솔레노이드의 비 투자율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(11)</sup>

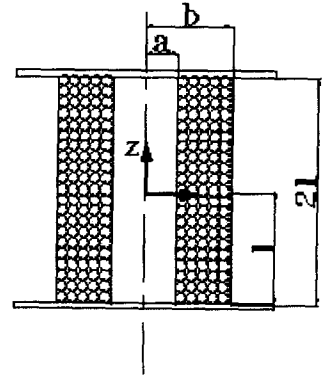


Fig. 3 Geometry of Iron-core Solenoid

Table 1 Specification of solenoids for experiment

	Solenoid 1	Solenoid 2	Solenoid 3
Height (mm)	40	40	40
Core diameter (mm)	5.99	8.1	9.99
Total diameter (mm)	35	31	32
Turns	1440	1440	1440
Coil diameter (mm)	0.5	0.5	0.4
Core material	Soft iron	Soft iron	Soft iron

$$\mu_r = \frac{B_{core}}{\mu_0 H} \quad (2)$$

여기서  $B_{core}$  는 철심 솔레노이드 표면에서의 자속 밀도로 실험을 통해서 구할 수 있으며  $\mu_0$  는 자유공간에서의 투자율로  $4\pi \times 10^{-7} N/A^2$  을 나타낸다. 따라서 전류의 함수인  $H$  를 구하면 철심의 비투자율을 구할 수 있다.

철심 솔레노이드가 Fig. 3 과 같을 때  $H$  는 비오-사바르 법칙(Biot-Savart law)에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(z) = \frac{NI}{4l(b-a)} \left[ (l+z) \ln \left\{ \frac{b + \sqrt{b^2 + (l+z)^2}}{a + \sqrt{a^2 + (l+z)^2}} \right\} + (l-z) \ln \left\{ \frac{b + \sqrt{b^2 + (l-z)^2}}{a + \sqrt{a^2 + (l-z)^2}} \right\} \right] \quad (3)$$

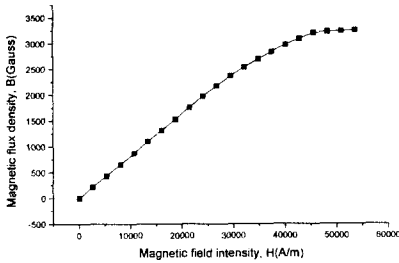


Fig. 4 B versus H curve for the iron-core solenoid

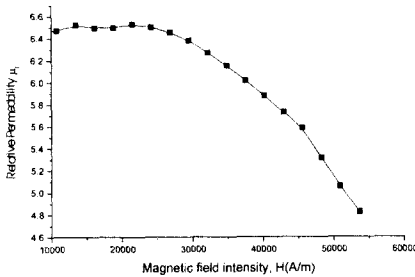


Fig. 5 Relative permeability with respect to H for the iron-core solenoid

여기서  $z$  는 원점(솔레노이드의 중심)으로부터의 거리,  $2l$  은 철심의 길이,  $a$  는 철심의 반지름,  $B(i)$  는 전류에 대한 철심 솔레노이드의 표면의 자속 밀도를 의미한다.

Fig. 4 는 철심 솔레노이드의 표면에서의 자속 밀도를 실험적으로 구하고 이 때의  $H$  를 구하여 나타낸 B-H curve 이다. 이때의 최대 인가 전류는 3A 로 이미 자속 밀도가 포화 상태에 이르러 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 은 지름이 8mm 인 철심의 비 투자율을 나타낸 것이다. 비 투자율 역시 자속 밀도가 포화에 이르렀기 때문에 감소하고 있다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 철심 솔레노이드의 자속 밀도 모델링

솔레노이드로부터의 자속 밀도와 영구자석으로부터의 자속 밀도는 실질적으로 동등하다. 그러므로 등가의 영구자석이나, 또는 그 조합에 의해 솔레노이드의 전류에 의한 자속 밀도를 분석할 수 있다.<sup>(12)</sup> 이 때 영구자석으로 모델링 함으로서 생기는 자화밀도에 대한 영향은 코일의 자기장에 의해 생기는 자속 밀도를 의미한다.

본 연구에서는 철심 솔레노이드를 하나의 등가 영구자석으로 모델링하기 위해 다음과 같은 가정을 한다.

가정 1: 등가 영구자석은 철심 솔레노이드와 길이는 같고 반지름에 차이가 있다.

가정 2: 전류의 변화에 따른 철심 솔레노이드 끝단의 자기장에 따라 등가 영구자석의 끝단의 자기장도 다르다. 즉, 등가 영구자석의 자화밀도는 철심 솔레노이드의 자속 밀도를 따른다.

위의 가정에 의해 등가 영구자석의 반지름을 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$r_{eq} = k_{eq} r_{core} \tag{4}$$

$$k_{eq} = \frac{\mu_{core} r_{core}}{\mu_{core} r_{core} + \mu_{coil} r_{coil}} \tag{5}$$

여기서  $\mu_{core}$  는 철심의 비투자율,  $r_{core}$  는 철심의 반지름,  $\mu_{coil}$  은 코일의 비투자율,  $r_{coil}$  은 코일에 의해 만들어진 솔레노이드의 반지름을 의미한다.

철심 솔레노이드의 자화 밀도  $M$  은 자속 밀도를 실험적으로 구하면 식 (6)에 의해 구할 수 있다.<sup>(11)</sup>

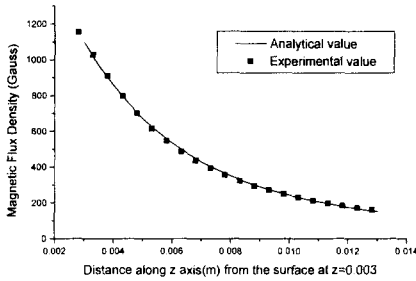
$$M(i) = \frac{2B(i)}{\mu_0} \left\{ (z+l) \left[ a^2 + (z+l)^2 \right]^{-1/2} - (z-l) \left[ a^2 + (z-l)^2 \right]^{-1/2} \right\} \tag{6}$$

따라서 전류와 거리의 함수인 철심 솔레노이드의 자속 밀도는 비오-사바르 법칙(Biot-Savart law)에 의해 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(11)</sup>

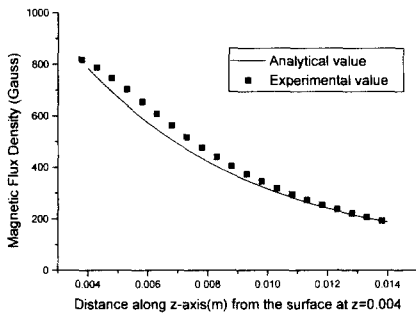
$$B_z(i, z) = \frac{1}{2} \mu_0 M(i) \cdot \left\{ (z+l) \left[ r_{eq}^2 + (z+l)^2 \right]^{-1/2} - (z-l) \left[ r_{eq}^2 + (z-l)^2 \right]^{-1/2} \right\} \tag{7}$$

식 (6)으로부터 자화 밀도  $M(i)$ 를 구하여 식 (7)에 대입하면 각 전류에서 거리에 따른 자속 밀도를 구할 수 있다.

Fig. 6 은 6mm 와 10mm 의 지름을 가진 철심 솔레노이드에 대하여 1A 의 전류를 인가하였을 때 철심 솔레노이드의 표면으로부터의 높이에 따른 실험값과 식 (7)에 각 철심의 평균 비 투자율을



(a) 6mm core



(b) 10mm core

Fig. 6 The magnetic flux density with respect to distance in the case of 1A

대입하여 모델링한 값을 비교한 것으로 철심의 지름이 6mm 인 경우에는 높이를 3mm 부터, 철심의 지름이 10mm 인 경우에는 높이를 4mm 부터 측정하였다. 대체적으로 근사 값을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 철심 솔레노이드와 영구자석 간의 힘 모델링

##### 4.1 철심 솔레노이드와 영구자석 간의 관계

일반적으로 두 영구자석 간이나 솔레노이드와 영구자석 간의 힘을 나타낼 때 두 계는 서로 영향을 주지 않는다는 가정을 한다. 즉, 다른 계의 자속 밀도 등에 의해 또 다른 계의 특성이 바뀌는 것을 고려하지 않는다. 그러나 본 연구에서 사용한 철심 솔레노이드는 영구자석에 의해 철심의 자화 밀도가 영향을 받는다.

본 연구에서 사용한 영구자석은 네오뎀 계열의 영구자석으로 자화밀도는  $7.7701e5$  A/m, 표면에서의 자속 밀도는 약 4450Gauss 를 가지고 있다.<sup>(11)</sup>

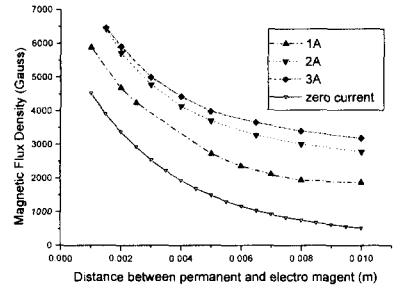


Fig. 7 The relationship between magnetization of iron core and the magnetic flux density of the surface of the iron-core solenoid

Fig. 7 은 영구자석의 영향에 의한 철심 솔레노이드 표면에서의 자속 밀도의 분포를 나타낸 것으로 자속 밀도의 거리에 따른 기울기가 철심의 자화 정도와 유사한 것을 알 수 있다. 전류를 인가하지 않았을 때도 영구자석과 철심의 영향에 의해 거리가 1mm 떨어져 있는 곳에서도 자속 밀도가 4500Gauss 이상 나타났다. 또한 철심 솔레노이드의 자속 밀도와 영구자석의 자속 밀도를 더한 값보다 더 큰 자속 밀도가 나타났다. 이는 영구자석에 의해 철심이 자화되었기 때문이다.<sup>(11)</sup>

##### 4.2 철심 솔레노이드와 영구자석 간의 힘에 대한 모델링

영구자석과 철심 솔레노이드 간의 힘을 실험적으로 모델링 하기 위해 영구자석을 자속을 발생하는 소스(source)로, 철심 솔레노이드를 자기 쌍극자로 가정한다. 그러나 철심 솔레노이드의 자기 쌍극자 모멘트  $m$  을 구하는 것은 매우 어렵다.  $m$  은 코일에 의해서 생성될 뿐만 아니라 영구자석에 의해서도 형성되고 이로 인해 철심의 길이에 따라 자기 쌍극자 모멘트가 균일하게 존재하지 않기 때문이다. 따라서 철심의 자기 쌍극자 모멘트를 다음과 같이 정의하여 힘에 대한 보정 식을 구한다.

철심 솔레노이드와 영구자석 간의 거리가 일정하고 철심 솔레노이드에 인가되는 전류 또한 고정되어 있다면 철심을 미소 단위의 길이로 나누어 철심의 총 자기 쌍극자 모멘트를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_{total} = m_s \sum k_i \tag{8}$$

여기서  $m_s$  는 영구자석과 가까운 철심 표면의 자기 쌍극자 모멘트이고,  $k_i$  는 철심의 길이에 따른 상수로 표면 자기 쌍극자 모멘트와 그 부분에서의 총 자기 쌍극자 모멘트와의 비를 나타낸다.

일반적으로 두 자계 사이의 힘은 상호에너지로부터 정의되며 두 자계는 관심을 갖고 있는 계와 이 계에 영향을 미치는 외부의 소스로 나누어진다. 이 경우에는 로렌츠 힘(Lorenz force)에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(13)</sup>

$$F = \nabla(m \cdot B) \tag{9}$$

여기서  $m$  은 관심을 가지고 있는 자계의 자기 쌍극자 모멘트,  $B$  는 소스에서 생성된 자속 밀도를 나타낸다.

식 (8)과 식 (9)에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \nabla(m_s \sum k_i \cdot B) \tag{10}$$

$M_s$  를 거리에 대한 함수로,  $K$  를 전류에 대한 함수로 정의하면 식 (10)은 다음과 같다.

$$F = \nabla(m_s \sum k_i \cdot B) = M_s \cdot K \tag{11}$$

식 (11)에 의해서 철심 솔레노이드와 영구자석 간의 힘은 철심의 표면 자기 쌍극자 모멘트의 기울기, 즉 자화 밀도의 기울기( $M_s$ )에 비례하며 이때 보정 상수  $K$  를 실험적으로 구하면 힘에 대한 실험 식을 구할 수 있다.

Fig. 8 은 영구자석에 의한 철심의 자화밀도에 대한 기울기와 코일의 전류에 따른 힘에 대한 그래프로 개형을 나타낸 것으로 영구자석과 철심 솔레노이드 사이의 힘이 철심의 자화 밀도와 관계가 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 사용한 철심 솔레노이드는 거리가 충분히 멀면 임의의 위치에서의 힘이나 자속 밀도가 종방향에 대한 값에 근사적으로 같은 값을 갖는다. 따라서 종방향에 대한 힘을 구하면 임의의 위치에서의 힘을 나타낼 수 있다.<sup>(11)</sup> 이는  $M_s$  가 거리만의 함수이며 이를 쿨롱의 법칙(Coulomb's law)의 형태로 유도할 수 있음을 의미한다. 따라서  $M_s(z)$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_s(z) = \frac{0.02219^3}{z^2} \tag{12}$$

또한  $K(i)$  는 비선형성을 감안하기 위하여 곡선 적합을 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K(i) = \begin{cases} 0 & i = 0 \\ 11.87699 \cdot i^{0.4157} & i \neq 0 \end{cases} \tag{13}$$

Fig. 9 는 식 (12), (13)을 식 (11)에 대입하여 실험 값과 비교한 것으로 이때의 인가 전류는 2A, 2.5A 이다. 대부분 만족할 만한 값을 보이는 것을 알 수 있다.

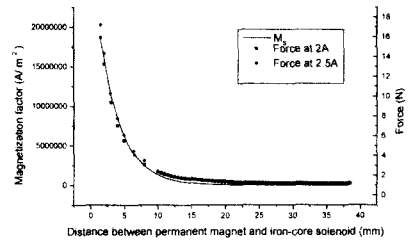
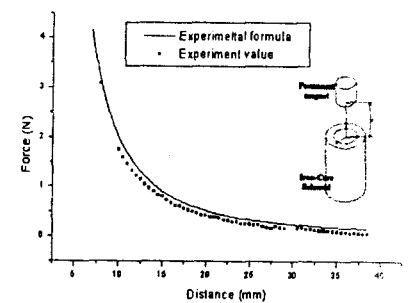
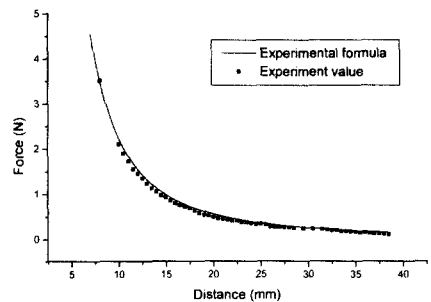


Fig. 8 The relationship between z-axis force and magnetization factor at the surface of the iron-core solenoid



(a) 2A



(b) 2.5A

Fig. 9 The experimental formula of the attractive force between permanent magnet and iron-core solenoid

## 5. 결론

본 연구에서는 3 자유도 모터의 보다 정확한 제어를 위하여 철심 솔레노이드의 특성 및 영구자석 사이의 힘에 대하여 실험식을 구하고 이에 따라 제어를 위한 기본 식을 제시하였다.

철심 솔레노이드는 철심의 추가로 인하여 비선형적 거동을 함에 따라 일반적인 이론을 적용하기에는 많은 문제점이 있다. 이에 따라 등가 영구자석의 개념을 도입하여 철심 솔레노이드의 자속 밀도를 모델링 하였다.

본 연구에서 사용한 철심 솔레노이드와 영구자석 사이의 힘은 영구자석의 영향에 의해 철심이 자화되어 철심 솔레노이드 단독으로 있을 때와 다른 특성을 나타내었다. 즉, 영구자석의 간섭에 의하여 철심 솔레노이드의 자속 밀도의 비선형성이 크게 증가하였다. 따라서 등가 영구자석의 개념만으로는 힘을 모델링 할 수 없다.

그러나 영구자석의 세기가 철심 솔레노이드에 미치는 영향이 미미하거나 영구자석이 아닌 자성체와 철심 솔레노이드 사이의 관계를 구할 때는 등가 영구자석의 방법이 유용하게 사용될 수 있다.

실험 결과 특정 거리 이후에서는 철심 솔레노이드와 영구자석 사이의 힘은 거리만의 함수로 나타낼 수 있었다. 즉, 두 물체의 종축이 일치하지 않을 때에 나타나는 토크도 그 토크를 발생시키는 힘은 거리만의 함수로 나타낼 수 있었다.<sup>(11)</sup> 이는 쿨롱의 법칙을 따를 수 있다는 것을 의미하며 이를 바탕으로 두 자계(magnetic system)사이의 힘에 대하여 실험식을 유도하였다.

본 연구에서 제안한 실험식은 충분히 거리가 멀면 임의의 위치에서의 힘을 나타낼 수 있지만, 두 자계가 근접한 경우에는 사용할 수가 없다.

그러나 본 연구에서 사용한 3 자유도 모터는 그 거리가 충분하므로 본 연구에서 제안한 실험식을 사용하여 실제 제어시 계산 시간을 최소화하고 힘에 대한 폐형해 뿐만 아니라 전류에 대한 폐형해로 나타낼 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Zhi Zhou and Kok-Meng Lee, 1996, "Real-time Motion Control of A Multi-Degree-of-Freedom Variable Reluctance Spherical Motor," *IEEE, International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2859~2864.
- (2) Hiroshi Nakane, Yoshio Sohara and Shunichi Omori, 1989, "A Method for Simultaneously Measuring Resistivity and Permeability with A Multi-layer Solenoid Coil," *Instrumentation and Measurement Technology Conference 6th IEEE*, pp. 284~287.
- (3) Said R. Marandi, 1996, "The Magnetic Near-Field of a Solenoid," *IEEE Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference*, Vol. 1, pp. 1~4.
- (4) Fouladgar, J., 1997, "The Inverse Problem Methodology For the Measurement of the Permeability of the Ferromagnetic Materials," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 2, pp. 2139~2142.
- (5) Ohdachi, Y., Inaguma, Y., Iwama, N., Watarai, A., Fujii, H. and Honkura, Y., 1990, "Effects of Magnetic Properties of Steel on Flux Response," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 26, No. 2, pp. 517~519.
- (6) Lee, K.M., Vachtsevanos, G. and Kwan, C.K., 1988, "Development of a spherical Stepper Wrist Motor," *Proc. of the IEEE 1988 International conference of Robotics and automation, Philadelphia, PA.*, Also in *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 1(1988), pp. 225~142.
- (7) Wang, J., Wang, W., Jewell, G.W., Howe, D., Jul. 1998, "A Novel Spherical Permanent Magnet Actuator with Three Degrees-of-freedom," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 34, No. 4, pp. 8/1~8/6.
- (8) 양창일, 백윤수, 1999, "자기력 제어를 이용한 3 자유도 액추에이터의 메커니즘 및 제어기 설계," *대한기계학회논문집 A 권, 제 23 권 제 9 호*, pp. 1476~1483.
- (9) Yang, C.I., Baek, Y.S., Sep. 1999, "Design and Control of the 3 D.O.F. Actuator by Controlling the Electromagnetic Force," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 3607~3609.
- (10) Yang, C.I., 1999, *Design and Control of 3 D.O.F. Actuator using the Magnetic Force of the Electromagnet*, Ph.D. dissertation, Dep. Mech. Eng., Yonsei University.
- (11) 박준혁, 1999, 3 자유도 모터 제어를 위한 영구자석과 철심 솔레노이드간의 힘 특성에 관한 연구, 석사학위 논문, 연세대학교.
- (12) Craik, D., 1995, *Magnetism*, John Wiley & Sons.
- (13) Wangsness, R.K., 1997, *Electromagnetic fields*, John Wiley & Sons, 2nd edition.