

# 밸브 구동용 고속 리니어 액추에이터 A Design of High-Speed Linear Actuator for Valve

성 백 주  
B. J. Sung

**Key Words :** Linear Actuator(리니어 액추에이터), Governing Equation(지배방정식), 3D Finite Element Analysis(3D 유한요소해석), Performance Test(성능 시험)

**Abstract:** The main design factors which effect on operating speed of linear actuator for valve operation are mass of plunger, electromagnetic motive force, inductance, and return spring, and these factors are not independent but related with each other in view point of design and electromagnetic theory. It is impossible to increase the operating speed by only change the value of any one design factor. The change of any one value results in change of any value related it in various design factors. This paper presents a speed increasing method of linear actuator using a solenoid design method by some governing equations which are composed of electromagnetic theory and empirical knowledge and permanent magnets as assistant material, and proved the propriety by experiments.

### 기호 설명

- |   |  |
|---|--|
| <p><math>B</math> : 자속 밀도<br/> <math>C_g</math> : 경험적 여유길이<br/> <math>C_m</math> : 기자력 보정상수<br/> <math>C_p</math> : 여유율<br/> <math>d</math> : 액추에이터의 최대 이격거리<br/> <math>d_0</math> : 절연선의 직경<br/> <math>d_{bi}, d_{bo}</math> : 보빈 내경, 외경<br/> <math>d_{yi}, d_{yo}</math> : 요크 내경, 외경<br/> <math>d_s</math> : 코일 나선의 직경<br/> <math>F</math> : 작용하는 힘<br/> <math>F_{max}</math> : 최대 흡인력<br/> <math>F_{min}</math> : 최소 흡인력<br/> <math>h</math> : 보빈의 높이<br/> <math>I</math> : 전류<br/> <math>I_h</math> : 온도상승 후 전류</p> | <p><math>l_m</math> : 1회권 코일의 평균 길이<br/> <math>m_c, n_c</math> : 코일의 두께방향, 길이방향 적층 수<br/> <math>N</math> : 권선 수<br/> <math>q</math> : 통전비 (Duty ratio)<br/> <math>R</math> : 저항<br/> <math>R_t</math> : 코일 합성 저항<br/> <math>r_{air}</math> : 플러저반경 방향 공극<br/> <math>S</math> : 방열 단면적<br/> <math>S_c</math> : 스프링 초기 압축 길이<br/> <math>S_f</math> : 고정공극 길이<br/> <math>t_b</math> : 보빈의 두께<br/> <math>T_f</math> : 온도상승<br/> <math>U</math> : 실제기자력<br/> <math>U_m</math> : 이론적 기자력<br/> <math>V</math> : 인가전압<br/> <math>W</math> 소비전력<br/> <math>w</math> : 코일의 쌓인 두께<br/> <math>X_i</math> : 점적율<br/> <math>\lambda</math> : 열소멸상수<br/> <math>\rho</math> : 비저항율<br/> <math>\mu_o</math> : 공기 중의 투자율</p> |
|---|--|

접수일 : 2010년 10월 29일  
 수정일(1차) : 2010년 12월 3일  
 수정일(2차) : 2010년 12월 17일  
 수정일(3차) : 2011년 1월 11일  
 게재확정일 : 2011년 2월 8일  
 성백주(책임저자): 한국기계연구원 시스템신뢰성연구소  
 E-mail: sbj682@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7159

## 1. 서 론

리니어 액추에이터는 전자기적 에너지를 기계적 운동 에너지로 변환하는 장치로서 시스템의 단순성으로 인해 매우 경제적인 기기이다. 리니어 액추에이터의 설계를 위해 고려되는 사항으로는 자속밀도 해석, 플런저 크기 및 형상 결정, 최적의 보빈 설계, 선정된 자성재료의 해석, 공간 점유율의 결정, 온도 상승을 고려한 권선수의 계산 등이 있다. 이러한 리니어 액추에이터의 최적의 설계를 위해서는 이론적 지식과 경험적 지식이 동시에 필요하다. 이론적 지식은 리니어 액추에이터의 동작 특성을 결정하고, 경험적 지식은 다양한 종류의 리니어 액추에이터를 제작한 경험과 설계자의 설계를 통해 이론적 바탕의 한계를 보완한다<sup>1)</sup>. 경험적 지식은 점적울의 값과 플런저 형상의 결정에 있어서 이론적 지식보다 더 필수적이어서 이들의 설계 값들은 계산이나 시뮬레이션을 통해서 단독으로 결정되어 질 수 없다. 설계자의 축적된 경험과 전문지식이 여기에 더해질 때, 가장 적절한 플런저의 형상과 점적울의 값이 그때 얻어질 수 있다. 영구자석 또한 리니어 액추에이터의 작동속도에 영향을 미치는 중요한 구성요소 중의 하나로서 최적 작동점 선정, 재료선정 등의 지식을 필요로 하지만, 본 연구에서는 하나의 고정된 값을 갖는 자속밀도체로서만 영구자석을 취급하고 나머지는 솔레노이드의 자속밀도를 가감함으로써 전체적인 흡인력을 조절하는 것으로 하여 설계를 단순화시켰다. 솔레노이드부의 설계를 위하여 전자기적 이론과 경험적 지식이 결합된 형태의 지배방정식을 도출하였고, FEM 해석과 시제품을 사용한 성능시험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

## 2. 지배방정식

### 2.1 밸브 구동용 고속 리니어 액추에이터 구조

Fig. 1은 밸브 구동용 고속 리니어 액추에이터의 구조를 나타낸다. 전자장 형성을 위한 코일, 자력선의 통로인 요크, 기계적 운동을 하는 플런저, 플런저를 흡인하는 고정자, 운동을 안내하는 베어링, 센터링 스프링 등으로 구성된다<sup>2)</sup>.

Fig. 2는 영구자석을 배제한 상태의 단순화된 리니어 액추에이터 구조도이다. 영구자석은 솔레노이드가 발생하는 전자력을 독립적으로 보완하여, 동일 흡인력 발생대비 소비전력 저감, 작동속도 향상에

기여하지만, 일단 특정 값으로 선정이 되면 추가적으로 동작 메커니즘에 영향을 미치지 않으므로 지배방정식 유도와는 무관하다.

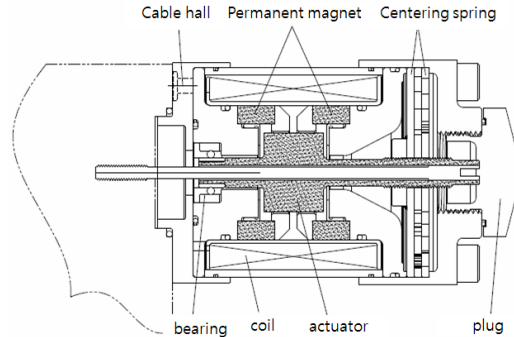


Fig. 1 Structure of linear actuator

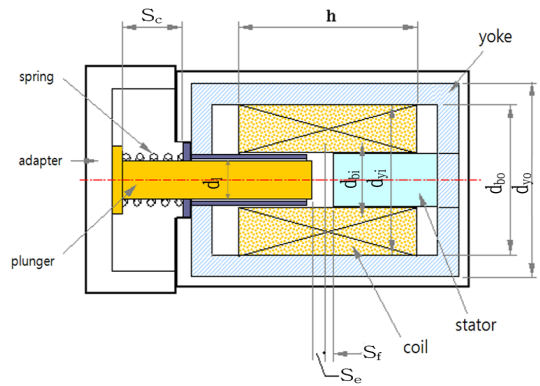


Fig. 2 Simple structure of linear actuator

### 2.2 공극의 자속밀도와 기자력

Fig. 2와 같은 자기회로에서 흡인력  $F$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>1),3~4)</sup>.

$$F = \frac{B^2 \cdot S}{2\mu_0} [N] \quad (1)$$

그러므로 공극에서 필요한 자속밀도  $B$ 는 식 (1)로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$B = \sqrt{\frac{F \cdot 2\mu_0}{S}} \quad (2)$$

$$\text{플런저 단면적 } S = \pi \left( \frac{d_l}{2} \right)^2$$

$$U_m = \frac{B \cdot d}{\mu_0} \quad (3)$$

설계상수  $K_f$ 를 식 (4)와 같이 가정하고, 자속밀도  $B$ 를 식(3)과 같이 가정할 때, 식 (1)은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_f = \frac{\mu_0 \cdot S \cdot U_m^2}{2} \quad (4)$$

$$F = \frac{K_f}{d^2} \quad (5)$$

고정공극 길이가  $S_f$ 일 때, 액추에이터의 최대 이격거리  $d$ 는 고정공극길이  $S_f$ 와 플런저 스트로크  $S_e$ 의 합인 식 (6)이 되므로, 최대 흡인력  $F_{max}$ 는 식 (7)이고 최소 흡인력  $F_{min}$ 은 식 (8)이고 식 (4)과 같다.

$$d = S_f + S_e \quad (6)$$

$$F_{max} = \frac{K_f}{S_f^2} \quad (7)$$

$$F_{min} = \frac{K_f}{d^2} \quad (8)$$

따라서 식 (7)과 식 (8)에서 최소흡인력과 최대흡인력의 관계는 식 (9)으로 된다.

$$F_{max} = \left(\frac{d}{S_f}\right)^2 \cdot F_{min} \quad (9)$$

플런저 단면적  $S = \pi\left(\frac{d_l}{2}\right)^2$ 와 플런저 접촉면  $S_m$  사이의 누설자속을 무시하면, 자속밀도  $B$ 는 식 (1)에 플런저 단면적을 대입하여 식 (10)과 같이 얻을 수 있다.

$$B = 2 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \mu_0 \cdot F_{min}}}{d_l \cdot \sqrt{\pi}} \quad (10)$$

리니어 액추에이터가 필요로 하는 실제 기자력  $U$ 은 액추에이터의 효율을  $C_m$ 이라고 가정할 때 식 (3)으로부터 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$U = \frac{C_m \cdot B d}{\mu_0} \quad (11)$$

여기서,  $C_m$ 은 기자력 보정상수로서 자기회로에서 발생하는 자력의 손실분을 보상하는 경험적 상수이다<sup>1),5)</sup>.

### 2.3 요크 두께의 산정

Fig. 2를 참조로 하여 요크내경  $d_{yi}$ , 요크외경  $d_{yo}$ 은 각각 식 (12), (13)과 같다.

$$d_{yi} = d_{bo} + C_g \quad (12)$$

$$d_{yo} = \sqrt{d_{yi}^2 + C_p \cdot d_l^2} \quad (13)$$

$$\text{요크 두께} = (d_{yo} - d_{yi})/2 \quad (14)$$

식 (12)에서  $C_g$ 는 코일의 원활한 열방출을 위해 설계대상에 따라 정해지는 경험적 여유길이이고, 요크 외경  $d_{yo}$  식 (13)에서 상수  $C_p$ 는 요크와 플런저에서의 자속 흐름을 원활히 하기 위한 여유율이다<sup>6),8-9)</sup>.

### 2.4 코일의 온도 상승과 보빈길이

열소멸상수(Heat Dissipation Coefficient)  $\lambda$ 는 코일 표면으로부터 방출되는 열에너지의 양으로 Fig. 3에서 찾을 수 있다<sup>1)</sup>.

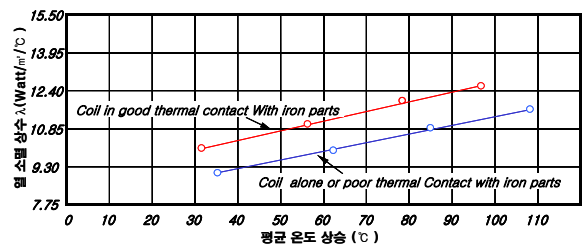


Fig. 3 Heat dissipation coefficient according to rising temperature

코일 권선저항  $R$ 에 전류  $I$ 가 흘러서 발생하는 열에 의한 온도상승  $T_f$ 는 식 (15)과 같다. 이 식 (15)에 저항  $R$  (16), 점적율  $X_i$  식 (17)를 대입하면 식 (18)으로 된다<sup>1)</sup>.

$$T_f = \frac{W}{2 \cdot \lambda \cdot S} = \frac{I^2 \cdot R}{2 \cdot \lambda \cdot S} \quad (15)$$

여기서,  $S$ 는 방열 단면적 =  $l_m \cdot h$

$$R = \rho \cdot \frac{(l_m \cdot N^2)}{h \cdot w \cdot X_i} \quad (16)$$

$$X_i = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_s}{d_0}\right)^2 \quad (17)$$

$$T_f = \frac{q \cdot \rho}{2 \cdot \lambda \cdot X_i \cdot w} \cdot \left(\frac{N \cdot W}{h \cdot V}\right)^2 \quad (18)$$

식 (18)에서 보빈의 길이(코일 높이)  $h$ 는 식 (19)으로 구해진다<sup>1)</sup>.

$$h = \sqrt[3]{\frac{(q \cdot \rho \cdot U^2)}{2 \cdot \lambda \cdot X_i \cdot T_f}} \quad (19)$$

여기서,  $\beta$ 는 보빈의 높이  $h$ 에 대한 코일의 쌓인 두께  $w$ 의 비( $\frac{h}{w}$ )를 나타내는 상수이다<sup>6)</sup>.

2.5 권선 수 및 소비전력

1회권 코일의 평균 길이  $l_m$ 은 식 (20)으로 나타낼 수 있다.

$$l_m = \frac{\pi(d_{bo} + d_{bi})}{2} \tag{20}$$

그리고 비저항율  $\rho$ 의 동선을 사용한 회로의 전압  $V$ , 전류  $I$ 로 나타낸 합성 저항  $R_t$ 는 식 (21)이 된다.

$$R_t = \left(\frac{V}{I}\right) = 4\rho \left[\frac{l_m \cdot N}{\pi \cdot d_s^2}\right] \tag{21}$$

식 (20)에서, 코일 나선의 직경  $d_s$ 는 식(24)으로 유도되어진다.

$$d_s = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \rho \cdot (d_{bi} + d_{bo}) \cdot U}{V}\right)} \tag{22}$$

그리고 절연코일의 직경  $d_o$ 의, 각 층에서 발생하는 권선 손실을 1이라 가정하면, 보빈에 감기는 코일의 길이방향 적층 수  $n_c$ 는 식(23)으로 된다.

$$n_c = \left(\frac{h}{d_o}\right) - 1 \tag{23}$$

코일의 두께방향 적층 수  $m_c$ 는 식 (24)이다.

$$m_c = \frac{w}{d_o} \tag{24}$$

따라서 보빈에 감기는 총 코일 권선 수  $N$ 은 식 (25)으로 된다.

$$N = n_c \cdot m_c \tag{25}$$

식 (21)과 식 (22)으로 부터 코일의 총 저항을 나타내는 합성 저항  $R_t$ 를 유도할 수 있다.

$$R_t = \frac{2 \cdot \rho \cdot (d_{bo} + d_{bi}) \cdot N}{\pi d_s^2} \tag{26}$$

이  $R_t$ 의 값이 결정되면, 코일전류  $I$ 의 식 (27)과 소비전력  $W$ 의 식 (28)이 결정된다.

$$I = \frac{V}{R_t} \tag{27}$$

$$W = V \cdot I \tag{28}$$

권선 소비전력을 설계할 때는 switching on time 을 고려한 권선의 온도상승허용치와 권선 데이터를 확정하여야 한다. 스위칭 주파수가 낮고 정지시간이 길어 냉각시간이 긴 밸브에서는 높은 전류를 흐르게 하는 것이 동적인 스위칭 특성을 얻을 수 있다. 전류가 계속해서 흐르는 밸브의 경우에는 최대 허용온도에 의하여 전류가 제한되고 따라서 스위칭 동특성은 제한적이다.

3. 설계 프로그램

본 연구에서 목표로 하는 고속 리니어 액추에이터의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Objective specifications

항목	목표 성능값
사용 전압 [V]	24 [V]
소비전력	55 [W]
작동 주파수	100 [Hz]
흡인력	80 [N]

Fig. 4는 2 절의 지배방정식을 이용하여 리니어 액추에이터의 설계값을 산출하기 위한 설계프로그램의 간략화된 흐름도이고, Fig. 5는 설계 결과를 나타낸다.

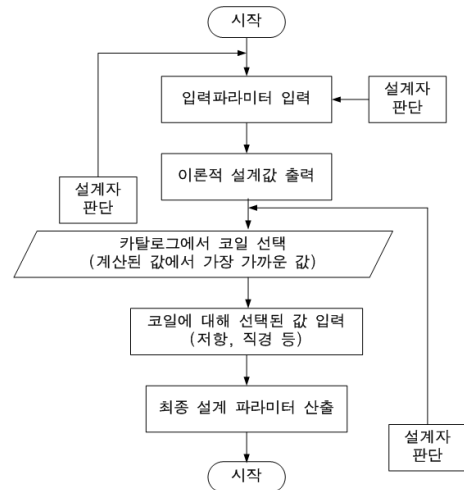


Fig. 4 Flow chart of design program

중요 출력변수를 산출하기 위한 입력 파라미터는 다음 Table 2와 같다.

Table. 2 Input parameter

항목	입력값
$F_{min}$	80 [N]
$dl$	4[mm]
$t_b$	1[mm]
$n_c$	59[회]
$m_c$	8[회]
$C_g$	0.004
$C_p$	1.25
$V$	24[V]

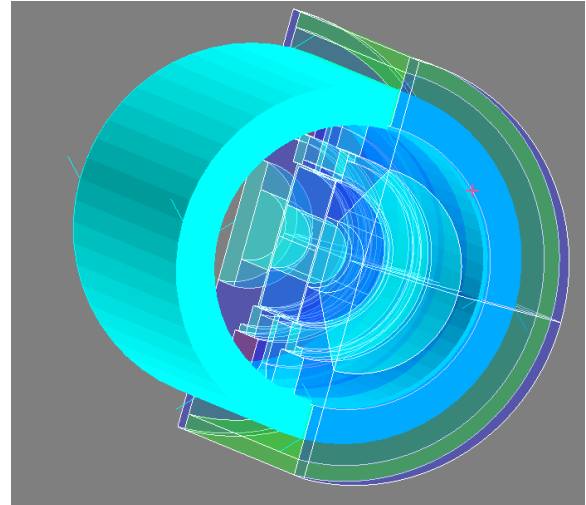


Fig. 6 Linear Actuator modeling

중요 출력변수	
흡인력[N]	
$F_{min}$	80
자속밀도[T]	
$B=2*\sqrt[3]{\mu_0 * F_{min}} / (dl * \sqrt{\pi})$	2.334
보빈 내경[mm]	
$d_{bi}=d_i+2(r_{air}+t_b)$	38
보빈 외경[mm]	
$d_{bo}=d_{bi}+2w$	50
코일 turn 수[No]	
$N=n_c * m_c$	502.775
요크 내경[mm]	
$d_{yi}=d_{bo}+C_g$	50.004
요크 외경[mm]	
$d_{yo}=\sqrt{d_{yi}^2+C_p * d_i^2}$	54.17
코일 합성저항[Ω]	
$R_t=(2 * \rho * (d_{bo}+d_{bi}) * N) / d_s^2$	10.95
코일 전류[A]	
$I=V/R_t$	2.191780822
기자력(at 20°C)[A·T]	
$U_{20}=I * N$	1101.972603
소비전력(at 20°C)[W]	
$W_{20}=V * I$	52.60273973

Fig. 5 Results of design

#### 4. 전자장 해석

앞 절의 설계결과를 기초로 하여 FEM 해석을 수행하였다. Fig. 6은 3차원 해석을 위한 리니어 액추에이터의 모델링을 나타낸다. FEM 해석은 Flux 3D를 사용하였다. Fig. 7은 영구자석만이 존재할 때의 자속밀도이다. 본 연구에서의 영구자석은 공극에서의 적절한 추력 형성을 위하여 솔레노이드가 발생하는 자속밀도의 절반수준인 1.1T급 Nd계를 사용하였다<sup>7)</sup>.

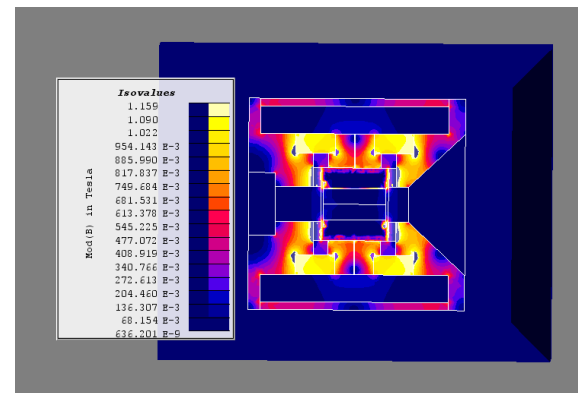


Fig. 7 Magnetic flux density distribution only permanent magnet

Fig. 7에서 보는 바와 같이 전류가 0인 상태에서 영구자석의 자계는 좌우 양측이 동일하다 따라서 이 때 추력이나 흡인력은 발생되지 않는다.

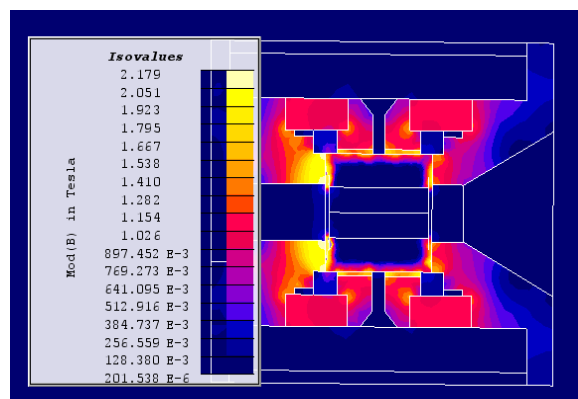


Fig. 8 Magnetic flux distribution at 2.2A

Fig. 8은 정격전류 2.2A가 흐를 때의 자속밀도 분포이다. 그림에서 보는 바와 같이 코일에 전류가 흐

르면 코일에서 발생하는 자장과 영구자석에서 발생하는 자장이 합하여 왼편에서 증가하고 오른 편에서는 서로 충돌하여 약해지기 때문에 흡인력이 발생하여 플런저는 왼편으로 이동하게 된다. 전류의 방향을 반대로 하면 자속밀도가 오른편이 증가하게 되고 흡인력도 오른편으로 발생하여 플런저가 오른 편으로 이동하게 된다. 그림에서 보듯이 왼편 공극 주위의 자속밀도가 약 2.2T 까지 증가하는 것을 볼 수가 있다. 영구자석을 감안한 산술적 최대 자속 밀도는 약 3.3T가 되어야 하지만, 각 공극과 자성재료에서 발생한 손실 때문에 2.2T 정도로 자속이 감쇠되었다.

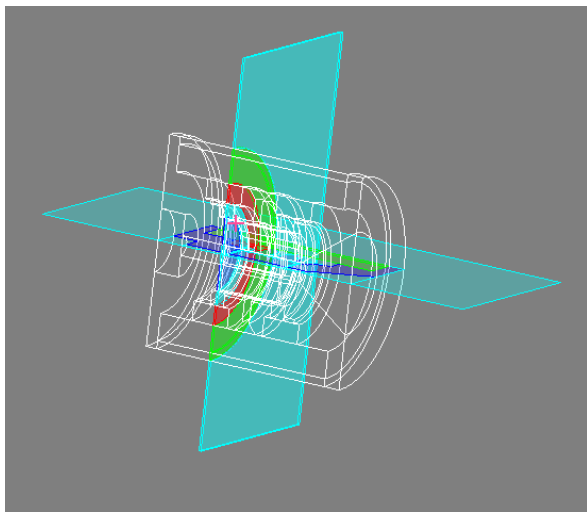


Fig. 9 Cut plane to observe the magnetic flux density distribution

Fig. 9는 Fig. 8에서의 플런저 좌측 부분 공극의 자속밀도 분포를 보기 위하여 단면을 자른 cut plane이고 이때의 공극 자속 밀도 분포를 Fig. 10에 나타내었다.

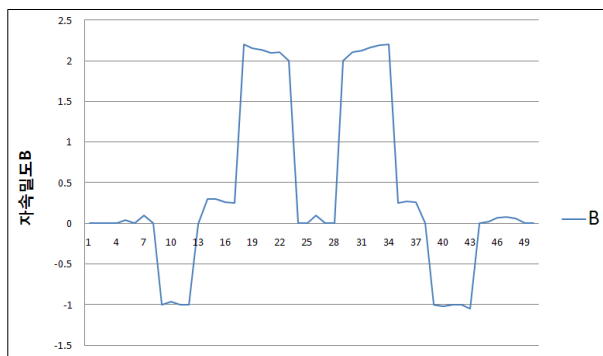


Fig. 10 Magnetic flux density distribution of air gap to use cut plane

Fig. 10에서 7-13은 Fig. 8의 좌측상단에 설치된 영구자석의 잔류자속밀도, 13-24는 그 하부의 플런저 상단 공극의 자속밀도, 28-36은 플런저 하단 공극의 자속밀도, 38-44는 좌측 하단에 설치된 영구자석의 자속밀도를 나타낸다.

이들 해석모델을 통해 정격전류를 액추에이터에 흐르게 했을 때, 플런저를 이동시키는 공극의 자속 밀도가 약 2.2T까지 증가하는 것을 알 수 있었다.

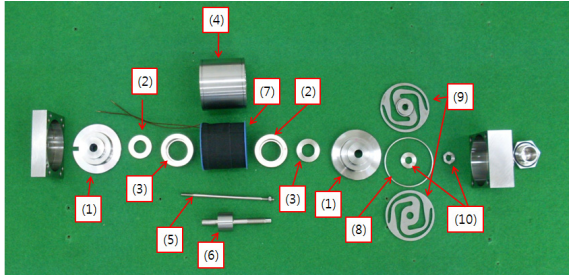
## 5. 시제품 제작

### 5.1 리니어 액추에이터의 구성

앞 절의 설계 결과와 FEM 해석을 근거로 시제품을 제작하였다. 리니어 액추에이터의 구동부는 플라스틱 보빈에 코일을 감은 솔레노이드(solenoid)와 누설자속을 방지하기 위한 요크 튜브로 되어 있으며, 흡인력을 발생하는 전자석인 플런저는 순철로 가공·제작하였다. 그리고 고응답 실현을 위해 플런저 앞뒤에 영구자석을 이용하였다. 여기에 사용한 영구자석은 최근에 여러 분야에 응용되고 있는 네오디움 계열 자석인 N35EH를 사용하였으며, 코아 튜브에는 약 0.3~0.5t의 비자성체 부싱을 앞뒤로 삽입하여 영구자석에 의해 플런저가 코아 튜브에 부착되는 것을 방지하였다. 영구자석은 동일한 극성이 마주보게 조립되어야 하며, 여기서는 플런저를 기준으로 S극을 서로 마주보게 조립하였다. 그리고 플런저가 항상 양쪽 영구자석의 중심에 위치하게 하도록 하기 위해 센터링 스프링을 2개 겹치게 제작되었다.

또한, 코아 튜브 앞쪽에는 리니어 베어링을 넣어 뒤쪽 센터링 스프링과 동심을 유지시켜 마찰을 최소화시키며, 동시에 플런저를 코아 튜브 내부에 공간적인 중심에 위치하게 하는 역할을 한다. 또한 플런저에서 푸시 로드는 압입 후 레이저 용접으로 일체화 시켰으며, 로드 바는 플런저에 발생한 흡인력을 스톱으로 전달하는 역할을 하며, 스톱의 초기 위치를 조정하는데 사용되기도 한다. 제작된 리니어 액추에이터의 각 부품들을 Fig. 11에 나타내었고 그 조립체는 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에 나타낸 조립체에서 사용된 액추에이터 구동 Amp.의 사양은 Amp.구동을 위한 정격 전압이 24Vdc, 소비전력이 55W, 정격 출력전류가 2.2A, 리니어 액추에이터에 입력되는 Amp.의 출력신호가 ±10Vdc이다.





- |                |           |
|----------------|-----------|
| 1 :코아 튜브       | 6 :플런저    |
| 2 :부싱          | 7 :보빈과 코일 |
| 3 :영구자석        | 8 :링      |
| 4 :요크 튜브       | 9 :센터링스프링 |
| 5 :LVDT 코아및지지대 | 10 :와셔    |

Fig. 11 Component of linear actuator

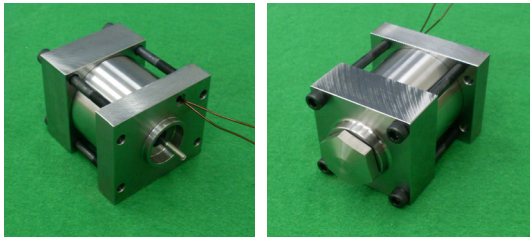


Fig. 12 Prototype of linear actuator

## 6. 성능시험 및 결과

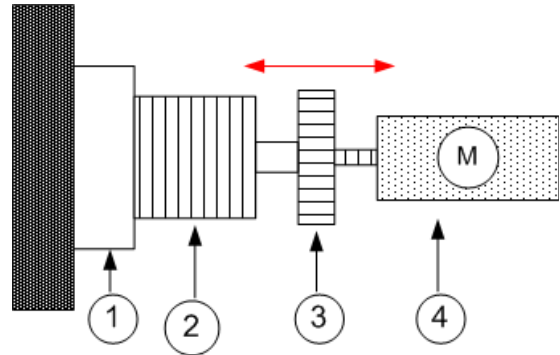
### 6.1 흡인력 및 직진성 시험

흡인력 시험은, 리니어 액추에이터를 흡인력 시험 장치의 상부에 고정시킨 후 커플링을 이용하여 로드 셀과 연결시킨다. 커플링으로 연결할 때 리니어 액추에이터의 플런저가 한쪽으로 치우치지 않게 체결을 해야 하며, 로드 셀의 값이 0인 것을 확인한다. 리니어 액추에이터에 전류를 0에서 +3A까지, 0에서 -3A까지 변화시키면서 흡인력을 측정한다. Fig. 13 은 흡인력 측정 장면을 나타낸다. 흡인력을 측정하는 로드셀은 비선형 0.1%, 히스테리시스 0.1%, 재현



Fig. 13 Attraction force test equipment of linear actuator

성 0.05%로 인장(-)과 압축(+) 양 방향으로 사용이 가능하다. 또한 최대  $\pm 490$  N까지 측정 가능하다. 변위를 측정하는 포텐쇼미터(potentiometer)는 선형성  $\pm 0.15\%$ , 반복성 0.002 mm으로 최대 50 mm까지 측정 가능한 사양을 가진다.



- |             |                   |
|-------------|-------------------|
| 1: clamp    | 3: loadcell       |
| 2: actuator | 4: stepping motor |

Fig. 14 Schematic diagram of attraction force test equipment

처음 시제품은 흡인력이 제대로 발생되지 않았다. Fig. 15는 최초의 시제품에 대한 흡인력 측정 결과이다.

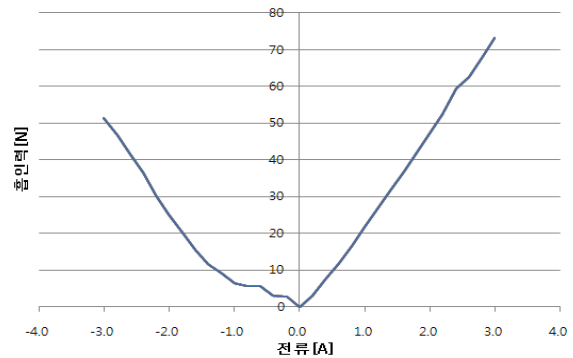


Fig. 15 Attraction force of the first prototype

이에 대해 다음과 같은 원인이 있었으며, 이를 개선한 후 2차 시제품을 제작하였다.

- 플런저의 코아 튜브 내에서의 초기 위치 설정의 어려움
- 센터링 스프링의 가공 정도와 체결 상태 불량
- 센터링 스프링과 베어링에 의한 공간 센터링 불량(코아튜브와 플런저의 공차)
- 비자성 링의 소재 및 두께 편차에 의한 플런저의 스트로크 부족

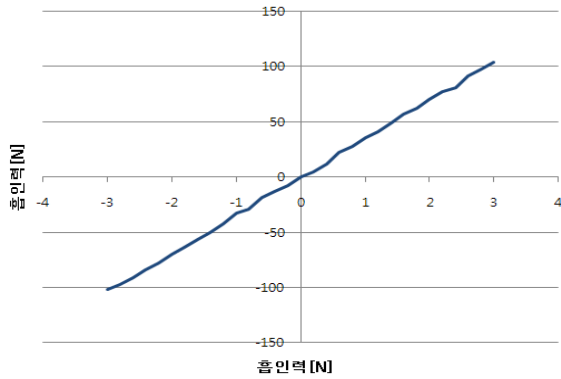


Fig. 16 Attraction force of the second prototype

Fig. 16는 2차 시제품의 흡인력 측정결과이다. 흡인력은 최대 전류  $\pm 3A$ 에 대해서 약 102.9N이었으며, 정격 전류인 2.2A에서는 77.42N임을 확인할 수 있다. 직선성은  $f(x)=3.5x$ 에 거의 근접함을 볼 수 있다. 이때, 전 구간에 대해서 직선성은 약 1.90%의 오차율을 보였으며, 대칭성은 3.05~ $-2.00\%$ 의 오차를 보이고 있다.

리니어 액추에이터 시제품의 성능 시험 결과 흡인력은  $7.9\pm 1\%$ , 직선성은  $-0.02 \sim 1.9\%$ , 대칭성은  $-2.00 \sim 3.05\%$ 로 비교적 양호한 결과를 얻었다.

### 6.2 스텝 응답 시험

스텝 응답 시험은 액추에이터 구동 전압의 80%인 8[V]를 인가하여 그에 대한 액추에이터의 LVDT 응답속도를 측정하였다. 입력되는 전압이 3030[ms]지점에서 8[V]가 인가되고, 이에 따른 응답 특성으로 액추에이터가 구동되어 이동되는 변위를 LVDT의 출력신호로 알 수 있다. 입력신호에 대한 응답신호는 3065[ms]지점에서 5[V]가 형성되어 응답속도가 약 30[ms]임을 알 수 있었다. 시험 결과를 Fig. 17에 표시하였다.

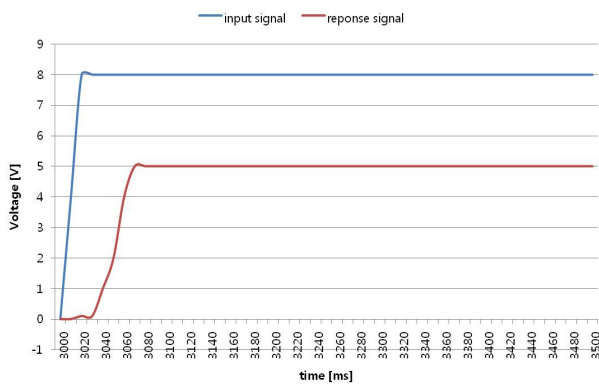


Fig. 17 Test result of step response

### 6.3 주파수 응답 시험

주파수 응답 시험의 시험은 입력 신호를 각각  $\pm 25\%$ ,  $\pm 100\%$ 에 대하여 주파수 응답을 구한다. 입력 주파수는 0.01Hz~200Hz의 범위에서 구한다. 각각에 대한 결과를 Fig. 18 ~ Fig. 19에 나타냈다. 입력  $\pm 25\%$ 에서  $-3dB$  주파수는 약 102Hz이며,  $\pm 100\%$ 에서는 40Hz로 측정되었다.

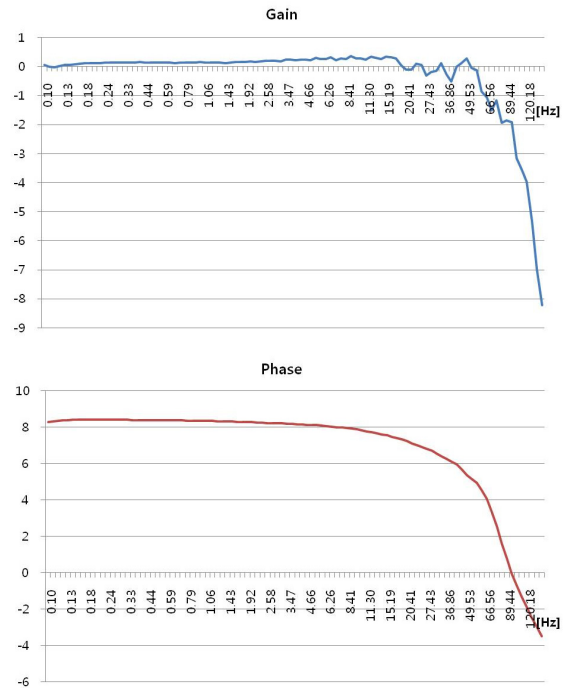


Fig. 18 Frequency response at input signal 25%

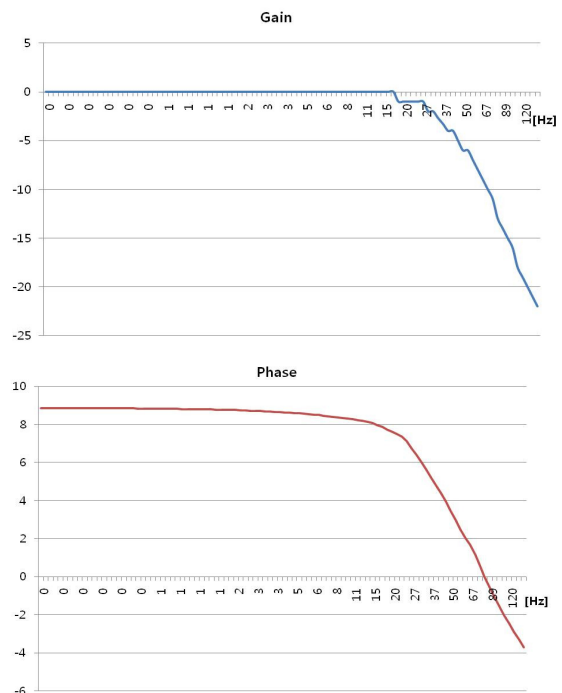


Fig. 19 Frequency response at input signal 100%



6.4 소비전력 측정 시험

소비전력 측정 시험은 리니어 액추에이터의 흡인력 80[N]을 유지하고 전력계를 이용하여 액추에이터로 입력되는 전력을 측정하는 방법으로 시험하였다. Fig. 20은 상온에서 리니어 액추에이터의 소비전력을 측정한 것으로서, 솔레노이드의 소비전력이 약 52W에서 안정화됨을 알 수 있고, 이것은 설계 프로그램의 출력 52.6W와 당초 목표 소비전력인 55W에 근사한 값이다.

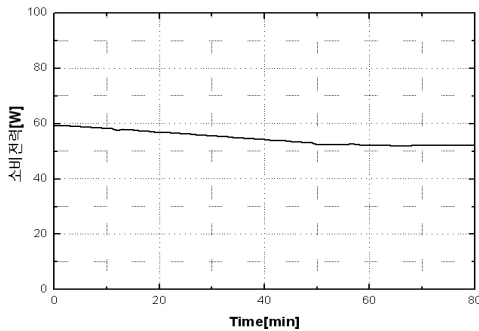


Fig. 20 Result of consumption power

7. 결론

밸브 구동용 리니어 액추에이터의 지배방정식과 그것을 이용한 설계프로그램을 작성하였다. 기본적인 설계 값과 경험적 설계상수를 설계 프로그램에 대입하여 주요 설계변수를 산출하였으며, FEM 해석을 통하여 주요 설계 변수를 검증하고, 이를 근거로 제작한 시제품을 실험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 이론적 지배방정식을 기본으로 하여 산출한 자기적 주요 설계변수 값들이 FEM 해석 결과와 유사함을 알 수 있었다.
- 2) 시제품의 성능시험 결과, 흡인력은 7.9±1Kgf, 직진성은 -0.02~1.9%, 대칭성은 -2.00~3.05%, 스텝응답속도는 30ms, 주파수응답특성은 입력±25%에서 102Hz, ±100%에서 40Hz, 소비전력은 55W로 나타났다.
- 3) 이러한 실험결과를 통하여, 본 연구에서의 시제품이 일반적 비례 및 서보밸브용 리니어 액추에이터로서 사용 가능한 정도로 만족할 만하고, 주요

성능 특성이 당초 목표 값들을 대체로 만족시킴으로서 도출한 지배방정식이 타당하다는 것을 확인할 수 있었다.

- 4) 향후, 본 시제품을 밸브 바디에 탑재한 밸브 조립체를 사용하여 일반적 유압밸브의 성능시험인 제어압력, 제어유량, 히스테리시스, 내부누설 등의 시험을 수행하여 밸브 구동용 고속 리니어 액추에이터로서의 성능을 확인할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) C. Roters, "Electro magnetic device", John Wiley & Sons, Inc, 1970
- 2) B.J.Sung, E.W.Lee, H.E.Kim, "Development of design Program for on and off type Solenoid Actuator", Proceedings of the KIEE Summer Annual Conference 2002(B), pp929~931, 2002.7.10
- 3) William H.Hayt, "Engineering electromagnetics", Mc Grawhill, 1986.
- 4) K.Ogata, "System Dynamics", Prentice Hall, 1998.1.
- 5) T.Kajima, "Dynamic Model of the Plunger type Solenoid at deenergizing State", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31, No.3, pp2315~2323, May 1995
- 6) Hydraulic and Pneumatic Lap. of KIMM, "Development of low consumption power type solenoid valve", KIMM-CSI annual report, 2001. 12
- 7) 김영희, "자기 및 자성재료", 1997
- 8) B. J. Sung, E. W. Lee, H. E. Kim, "Characterristics of Non-magnetic Ring for High-Speed Solenoid Actuator" , The eleventh Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, pp342, Korea, June 2004,
- 9) Kanda Kunio, "Design Concept for DC Solenoid of Pneumatic Valve", 한국기계연구원 보고서, 1997