

# 밸브 구동용 개폐식 솔레노이드 액추에이터의 설계

## A Design of On/Off Type Solenoid Actuator for Valve Operation

성 백 주  
B. J. Sung

**Key Words :** On/Off Type solenoid Actuator(개폐식 솔레노이드 액추에이터), Space Factor(점적율), Magnetic Force(전자력), Heat Dissipation coefficient(열소멸상수), Spring-Mass System(스프링-질량계), Plunger Stroke(플런저 스트로크), Fixed Air Gap(고정공극)

**Abstract:** For a design of on/off solenoid actuator for valve actuating, designer must have the experimental knowledge as well as general electromagnetic formulas to design object. It is possible for theoretical knowledge to do the out-line design, but it is impossible to optimal design without experimental knowledge which only can be achieved through many repeated experiments. In addition, in present on/off type solenoid actuator field, the smaller, lightening, lower consumption power, high response time are effected as the most important design factor. So, experimental knowledge is more needed for optimal design of solenoid actuator. In this study, we derived the governing equations for optimal design of on/off solenoid actuator for valve actuating and developed a design program composed electromagnetic theories and experimental parameter values for inexperienced designers. And we proved the propriety of this program by experiments.

### 기호 설명

- $F_{sn}$  : 노즐에 작용하는 유체의 힘
- $F_{xnc}$  : 스프링 초기 인장력
- $F_{min}$  : 스프링이 압축된 상태에서 필요로 하는 전자력
- $F_o$  : 최대 스프링 인장력
- $K_s$  : 최종적인 스프링 상수
- $S_e$  : 플런저의 스트로크
- $F$  : 힘
- $U_m$  : 기자력
- $l_g$  : 솔레노이드 액추에이터의 최대 공극길이
- $F_{max}$  : 최대흡인력
- $S$  : 플런저 단면적
- $B_g$  : 자속밀도
- $U$  : 솔레노이드 액추에이터의 기자력
- $B_{eta}$  : 보빈의 높이에 대한 길이의 비
- $d_{ci}$  : 보빈 내경
- $d_{co}$  : 보빈 외경
- $D_{2i}$  : 요크 내경
- $D_{2o}$  : 요크 외경

### 1. 서 론

밸브 구동용 개폐식 솔레노이드 액추에이터(On/Off Type Solenoid Actuator)는, 입력으로서 주어진 전기 신호를 코일을 통하여 1차적으로 전자기적 에너지로 변환한 다음, 최종적으로 밸브의 유로를 개폐할 수 있는 기계적 운동에너지를 플런저와 고정자가 형성하는 공극을 통하여 출력하는 에너지 변환장치이다.

이러한 솔레노이드 액추에이터를 설계하기 위해서, 설계자는 일반적인 전자기적 지식과 함께 설계하고자 하는 대상에 대한 고정된 표준조건들을 이해하고 있어야 한다. 전기기기 설계분야에서 필요로 하는 이러한 지식들은 특정한 기기의 동작을 지배하는 물리적 법칙과 여러 가지 기기의 수많은 설계 및 제작 경험에서 추론되는 경험적 규칙들 그 자체를 의미한다. 물리적 법칙들은 거시적 관점에서의 설계를 가능하게 하여 설계 대상에 대한 개괄적(Out-Line) 설계를 가능하게 해주지만 최적설계가 되기 위한 세부적 설계는 경험적 지식이 없이는 불가능하다. 경험적 규칙들은 마그네트(Magnet)와 전류 및 자속밀도에 대한 경제적 설계요소를 결정짓는 중요한 규칙들이므로, 설계하고자 하는 기술대상에 따라 이에 부합되는 충분한 경험을 보유하는 것이 무엇보다 중요하다.

---

접수일 : 2009년 10월 6일, 게재확정일: 2009년 11월 20일  
 성백주(책임저자) : 한국기계연구원  
 E-mail : sbj682@kimm.re.kr Tel : 042-868-7159

개폐식 솔레노이드 액추에이터의 설계를 위한 핵심기술에는 안전율을 고려한 솔레노이드의 최대 흡인력 결정기술과 자속밀도 해석기술, 플런저 Size 및 형상 결정기술, 최적의 보빈 설계기술, 자성재료 해석 및 결정기술, 점적율(Space Factor) 결정기술, 온도상승을 고려한 권선(Turn)수 계산기술 등이 있다. 이 중에서 자속밀도 해석기술은 플런저 형상 결정기술, 점적율 결정기술과 함께 물리적 법칙 보다는 경험적 지식을 훨씬 더 많이 필요로 한다. 즉, 물리적 법칙에 근거를 둔 기초계산과 함께 경험을 토대로 한 상수 결정기술이 확립될 때 비로소 자속밀도 해석기술이 완성될 수 있다. 플런저 형상에 따라 자기 회로에 분포하는 자속의 통로(Path)별 자속밀도가 큰 차이가 나고 이것은 흡인력과 소비전력, 코일의 발열량에 큰 영향을 미치며, 점적율의 적절성 여부에 따라 코일의 발열량과 솔레노이드 자체의 외관 크기(Size) 등에 직접적으로 영향을 미친다<sup>1)</sup>.

본 연구에서는, 밸브 구동용 개폐식 솔레노이드 액추에이터의 설계를 위해서 간단하면서도 현실성 있는 지배방정식을 유도하였다. 그리고 이 지배방정식과 경험적 변수값들을 합성한 설계 프로그램을 작성하여 경험이 없는 설계자라도 힘과 소비전력, 스트로크 등 원하는 설계사양을 입력하면 최종적으로 최적의 개폐식 솔레노이드 액추에이터의 제작사양이 출력되도록 하였고, 시제품을 제작한 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

## 2. 개폐식 솔레노이드 액추에이터의 구조

개폐식 솔레노이드 액추에이터는 전자장 형성을 위한 코일과 자력선의 통로인 요크(Yoke), 실질적인 스트로크를 형성하여 기계적 운동을 발생하는 플런저(Plunger), 플런저를 흡인하는 고정자(Stationary), 기계적 장치에 연결부를 제공하는 어댑터(Adapter), 플런저를 복원시키는 스프링(Return Spring) 등으로 구성된다. Fig. 1은 개폐식 솔레노이드 액추에이터의 구조도를 나타낸다.

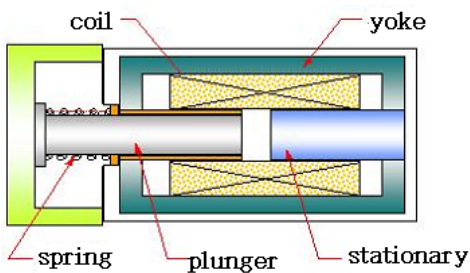


Fig. 1 Structure of Solenoid Actuator

## 3. 지배방정식

### 3.1 정상상태 지배방정식

개폐식 솔레노이드 액추에이터의 기계적 방정식들은 솔레노이드 액추에이터의 외관 사이즈와 작동유체에 직접적으로 관련이 있으므로, 설계자가 적절한 변수값을 선택하므로써 동일 흡인력을 발휘하며 원하는 크기를 갖는 액추에이터를 설계할 수 있도록 하였다. 전자기적 방정식은 같은 의미를 갖지만 여러 가지 형태로 표현될 수 있으므로, 실제 설계에 있어 사용자의 손쉬운 변수선택에 주안점을 두고 유도하였다.

솔레노이드 액추에이터의 전기적 등가회로는 Fig. 2와 같지만, 정상상태에서는 Fig. 3과 같이 통합저항  $R_t$ 만의 회로로 단순화될 수 있다. 본 연구에서의 전자기적 방정식은 Fig. 3의 등가회로와 플런저, 고정자, 요크 등이 구성하는 자기적 통로를 고려하여 유도하였다. Fig. 4는 지배방정식 유도를 위한 솔레노이드 액추에이터의 구성도를 나타낸다<sup>2-4)</sup>.

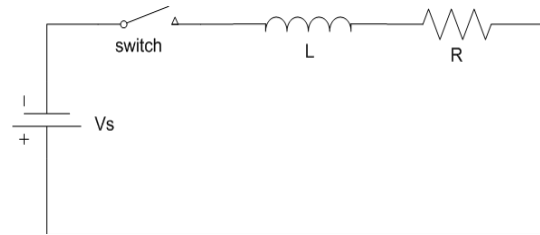


Fig. 2 Electrical Equivalent Circuit

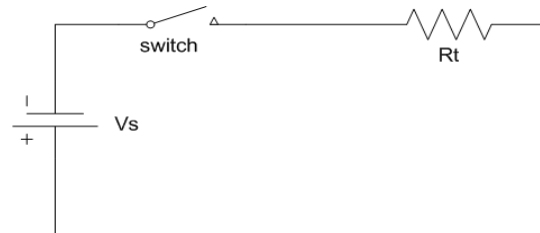


Fig. 3 Electrical Equivalent Circuit in Static State

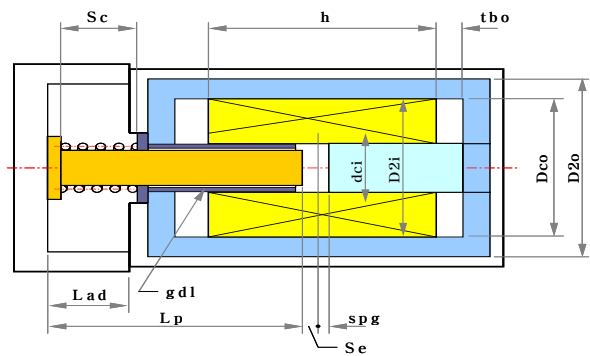


Fig. 4 Composition of Solenoid Actuator

### 3.1.1 스프링 지배방정식

솔레노이드가 여자되기 전에 플런저가 막고 있는 유체출입의 통로인 어댑터 노즐 직경을  $dN$ 이라 하고, 공급압력을  $P_s$ 라 하면 노즐에 작용하는 유체의 힘  $F_{sn}$ 은 다음식과 같다.

$$F_{sn} = \frac{\pi \cdot dN^2}{4} \cdot P_s \quad (1)$$

식(1)에 의해서 스프링 초기 인장력  $F_{snc}$ 를 산출할 수 있는데, 일반적으로 유체의 작용 힘 보다 약 25% 정도 큰 값으로 한다. 이 값이 클수록 스프링 힘이 증가하고 이에 따라 코일 소비전력 증가하고 응답속도가 늦어지는 특성이 있으므로, 설계의 주안점에 따라 변경될 수 있다.

$$F_{snc} = 1.25 \cdot F_{sn} \quad (2)$$

그림 4에 나타난 어댑터 길이  $L_{ad}$ 만큼 스프링이 압축된 상태에서 필요로 하는 전자력(Magnetic Force)  $F_{min}$ 과 최대 스프링 인장력  $F_o$ 를 각각 식(3), 식(4)와 같이 유도할 수 있다.

$$F_{min} = alf \cdot F_{sn} \quad (3)$$

$$F_o = F_{min} \cdot alfspr \quad (4)$$

여기서, 상수  $alf$ 와  $alfspr$ 는 전자력과 스프링 인장력에 대한 보정상수로서 설계자의 경험과 소비전력, 코일 온도상승 등 주어진 설계제한요소를 감안하여 산정할 수 있다.

식(4)와 식(2)에 의하여, 최종적인 스프링 상수  $K_s$ 를 구하는 식이 식(5)와 같이 유도된다.

$$K_s = \frac{(F_o - F_{snc})}{S_e} \quad (5)$$

여기서,  $S_e$ 는 식(6)으로 표현되는 플런저의 스트로크를 나타내는 것으로서  $alfs$ 는 스트로크와 노즐직경의 비를 나타내는 상수이다.

$$S_e = alfs \cdot dN \quad (6)$$

### 3.1.2 솔레노이드 흡인력 지배방정식

일반적인 자기회로에서 힘( $F$ )과 기자력( $U_m$ ) 사이의 관계는, 재질의 자속밀도  $Bg_m$ , 자극면의 단면적  $S_m$ , 공기중의 투자율  $\mu_0$ , 자극면 사이의 거리  $D_{ist}$ 가 주어지면, 식(7)과 식(8)로 표현된다<sup>1)</sup>.

$$F = \frac{Bg_m^2 \cdot S_m}{2\mu_0} \quad (7)$$

$$U_m = \frac{Bg_m \cdot D_{ist}}{\mu_0} \quad (8)$$

식(8)의  $D_{ist}$ 를 식(7)에 대입하여 다음의 변형된 힘 방정식을 얻는다.

$$F = \frac{1}{D_{ist}^2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot S_m \cdot U_m^2}{2} \quad (9)$$

$\frac{\mu_0 \cdot S_m \cdot U_m^2}{2}$ 을  $K_f$ 라 두면, 식(9)는 식(10)으로 단순화 된다.

$$F = \frac{K_f}{D_{ist}^2} \quad (10)$$

여기서, 고정자와 플런저 간의 최대 이격거리, 즉 솔레노이드 액추에이터의 최대 공극길이인 식(11)의 관계를 적용하면 최대 흡인력과 최소 흡인력은 각각 식(12)와 식(13)으로 된다.

$$l_g = S_{pg} + S_e \quad (11)$$

$$F_{max} = \frac{K_f}{spg^2} \quad (12)$$

$$F_{min} = \frac{K_f}{[spg + S_e]^2} \quad (13)$$

따라서, 식(12)와 식(13)을 이용하여 솔레노이드의 최대흡인력을 나타내는 관계식인 식(14)를 유도할 수 있다.

$$F_{max} = \left[ \frac{spg + S_e}{spg} \right]^2 \cdot F_{min} \quad (14)$$

여기서,  $spg$ 는 그림 4에 나타난 고정공극(Fixed Air Gap),  $S_e$ 는 플런저 스트로크(Plunger Stroke)이다.

플런저 단면적  $S$ 는 플런저 직경  $d$ 이 주어지면 식(15)로 되므로,

$$S = \frac{\Pi \cdot d^2}{4} \quad (15)$$

식(7)에 플런저 자속밀도  $B_g$ 와 힘  $F_{min}$ , 식(14)를 대입하면 자속밀도  $B_g$ 를 나타내는 방정식이 얻어진다.

$$B_g = 2 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \mu_0 \cdot F_{min}}}{d \cdot \sqrt{\pi}} \quad (16)$$

그리고, 솔레노이드 액추에이터의 기자력 관계식 U는 식(8)과 식(11)을 사용하여 얻는다.

$$U = \frac{ng \cdot B_g \cdot l_g}{\mu_0} \quad (17)$$

여기서, ng는 기자력 보정상수로서 자기회로에서 발생하는 자력의 손실분을 보상하는 경험적 상수이다.

### 3.1.3 열소멸상수와 온도상수 지배방정식

열소멸상수(Heat Dissipation Coefficient)  $\lambda$ 는 코일 표면으로부터 방출되는 열 에너지의 양을 나타내는 것으로서 경험적 상수에 해당되는데, 본 연구에서는 Roters 교수의 실험결과 값을 사용하였다. Fig. 5에 온도상수에 대한 열소멸 상수값을 나타내었다<sup>5)</sup>.

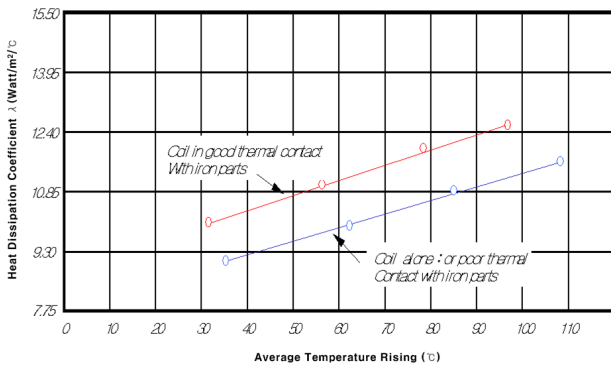


Fig. 5 Heat Dissipation Coefficient for Temperature rising

코일 권선저항과 전류에 의해서 발생하는 열에 기인하는 온도상승은 식(18)과 같다. 여기에 저항과 비저항율의 관계식 (19)와 점적율 관계식 (20)을 적용하면 온도상승을 지배하는 식(21)이 유도된다.

$$T_f = \frac{W}{\lambda \cdot S_c} = \frac{I^2 \cdot R}{\lambda \cdot S_c} \quad (18)$$

$$R = \rho \cdot \frac{(l_m \cdot N^2)}{h \cdot w \cdot X_i} \quad (19)$$

$$X_i = \frac{\Pi}{4} \left( \frac{d_s}{d_0} \right)^2 \quad (20)$$

$$T_f = \frac{q \cdot \rho}{2 \cdot \lambda \cdot x_i \cdot w} \cdot \left( \frac{N \cdot W}{h \cdot V} \right)^2 = \frac{I_h^2 \cdot R_h}{2 \cdot \lambda \cdot l_m \cdot h} \quad (21)$$

여기서,  $d_s$ 는 나선의 직경이고,  $d_0$ 는 절연선의 직경이며,  $l_m$ 은 1회 권선한 코일의 평균 길이를 나타낸다.

### 3.1.4 보빈과 요크 계산 방정식

보빈의 길이(코일 높이)는 식(21)로부터 구해지고, 식(22)와 같다.

$$h = \sqrt[3]{\frac{(q \cdot B_\eta \cdot \rho \cdot U^2)}{2 \cdot \lambda \cdot X_i \cdot T_f}} \quad (22)$$

여기서,  $B_\eta$ 는 Fig. 5에 나타난 보빈의 높이에 대한 길이의 비를 나타내는 상수로서  $B_\eta = \frac{h}{w}$ 의 관계가 성립한다.

Fig. 6은 Fig. 4에서의 보빈과 요크 부분만을 상세히 나타낸 것이다. Fig. 4와 Fig. 6을 참조로 하여, Guide Tube의 두께를  $gdl$ , 보빈두께를  $tbo$ , 코일 폭을  $w$ , 플런저 직경을  $d$ 이라 하면,

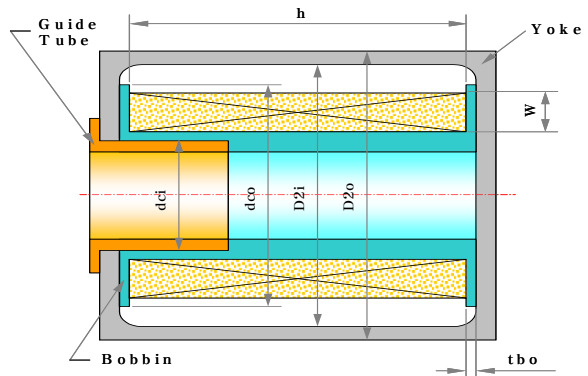


Fig. 6 Bobbin and Yoke

보빈 내경은,

$$d_{ci} = dl + 2(gdl + tbo) \quad (23)$$

보빈 외경은,

$$d_{co} = d_{ci} + 2w \quad (24)$$

요크 내경은,

$$D2_i = d_{co} + 0.004 \quad (25)$$

요크 외경은,

$$D2_o = \sqrt{D2_i^2 + 1.25 \cdot dl^2} \quad (26)$$

으로 각각 표현된다. 요크 내경에서의 상수는 일반적으로 사용하는 가이드튜브(Guide Tube)의 두께 치수이고, 요크 외경에서의 상수는 요크와 플런저에서의 자속 흐름을 원활히 하기 위한 여유율이다<sup>6-7)</sup>.

### 3.1.5 코일 지배방정식

Fig. 6을 참조로 하면, 1회 권선한 코일의 평균 길이는 식(27)로 나타낼 수 있다.

$$l_m = \frac{\pi(d_{co} + d_{ci})}{2} \quad (27)$$

그리고 저항과 동선의 비저항율을 사용한 전압, 전류 관계식이 다음과 같이 성립하므로,

$$V = 4\rho \left[ \frac{l_m \cdot N}{\pi \cdot d_s^2} \right] \cdot I \quad (28)$$

코일 나선의 직경  $d_s$ 는 식(29)로 유도되어진다.

$$d_s = \sqrt{\left( \frac{2 \cdot \rho \cdot (d_{ci} + d_{co}) \cdot U}{V} \right)} \quad (29)$$

여기서,  $V$ 는 전압,  $I$ 는 전류,  $\rho$ 는 동선의 비저항율을 나타낸다.

그리고, 절연코일의 직경을  $d_o$ 라 하고, 각 층에서의 권선 손실을 1이라 가정하면, 보빈에 감기는 코일의 길이방향 적층 수는 식(30)으로 표현되고,

$$nc = \left( \frac{h}{d_o} \right) - 1 \quad (30)$$

코일의 두께방향 적층 수는 식(31)로 나타낼 수 있으므로,

$$mc = \frac{w}{d_o} \quad (31)$$

보빈에 감기는 총 코일 권선 수는 식(32)로 표현된다.

$$N = nc \cdot mc \quad (32)$$

### 3.1.6 전류 및 소비전력 지배방정식

식(28)과 식(29)로부터 코일의 총 저항을 나타내는 관계식을 유도할 수 있다.

$$R = \frac{2 \cdot \rho \cdot (d_{co} + d_{ci}) \cdot N}{d_s^2} \quad (33)$$

식(33)에서의 저항  $R$ 이 Fig. 3의 등가저항  $R_t$ 를 나타내는 저항이 되고, 이 값의 크기가 결정되고 나면, 코일의 전류  $I$ 와 소비전력  $W_p$ 가 계산되어진다.

$$I = \frac{V}{R} \quad (34)$$

$$W_p = V \cdot I \quad (35)$$

### 3.1.7 응답특성 지배방정식

솔레노이드 액추에이터는 Fig. 7과 같이 스프링-질량계(Spring-Mass System)로 등가되어질 수 있다. 질량  $m$ 에 의한 변위는 제어전압이 ON되고 난 뒤의 플런저 변위로 볼 수 있고, 솔레노이드 액추에이터는 반드시 복귀스프링을 가져야 하기 때문에 Fig. 7과 같은 묘사가 가능해진다<sup>8)</sup>.

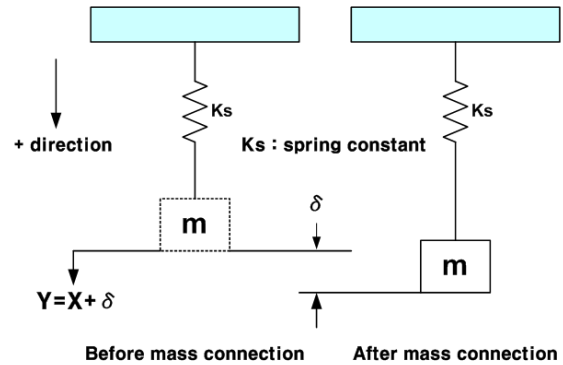


Fig. 7 Mechanical Equivalent Model of Solenoid Actuator

Fig. 7에서 질량  $m$ 으로 표현된 플런저 질량은 식(36)으로 표현된다.  $\rho_p$ 는 재료의 밀도,  $L_p$ 는 플런저 길이,  $d_l$ 은 플런저 직경을 각각 나타낸다.

$$m_p = \frac{d_l^2 \cdot \pi \cdot L_p \cdot \rho_p}{4} \quad (36)$$

Fig. 7에서는 마찰에 기인한 댐퍼는 없는 것으로 가정을 한다. 정상상태 방정식에서 플런저의 마찰을 최소화하고 편심현상을 방지하기 위하여, 플런저 외곽에 반경방향으로 별도의 가이드튜브를 기구적으로 설치하였기 때문에 마찰력이 없다는 가정은 타당성이 있다.

이러한 가정과 함께 Fig. 6에서 힘 방정식을 구하면,  $m\ddot{y} = \Sigma Force = -k_s y + mg$  이고,

$$m\ddot{y} + k_s y = mg$$

$$y = x + \delta, \delta : Const$$

$$m\ddot{x} + k_s x = 0 \text{ 이다.}$$

따라서, Fig. 7의 시스템에 대한 수학적 모델은

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0$$

이므로, 액추에이터의 작동속도를 결정하는 식(37)의

관계식과 작동 주파수 관계식을 나타내는 식(38)을 각각 유도할 수 있다.

$$\omega = \sqrt{\frac{K_s}{m_p}} \quad (37)$$

$$f_b = \frac{\omega}{2\pi} \quad (38)$$

#### 4. 설계프로그램

3절의 지배방정식들을 기본으로 하여 비주얼 베이직(Visual Basic)을 사용한 설계 프로그램을 작성하였으며, 프로그램의 플로우차트를 요약한 흐름도를 Fig. 8에 나타내었다<sup>4,6)</sup>.

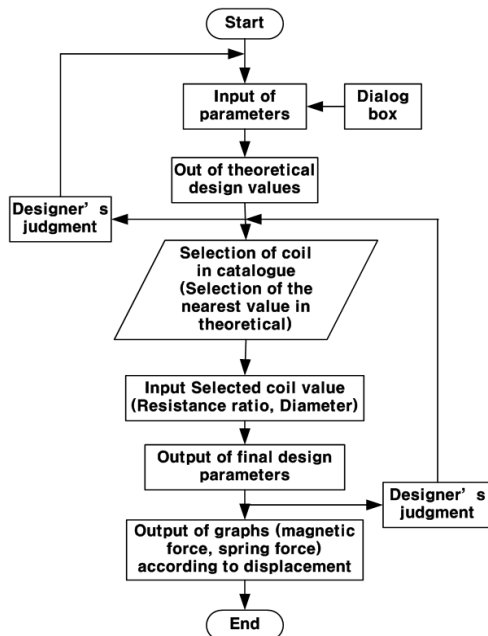


Fig. 8 Flow of Design Program

그리고, 설계 프로그램의 초기화면, 설계중 화면, 최종결과 화면을 Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11에 각각 나타내었다.

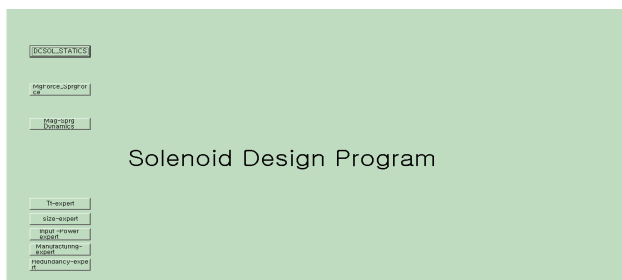


Fig. 9 Intro Screen of Design Program

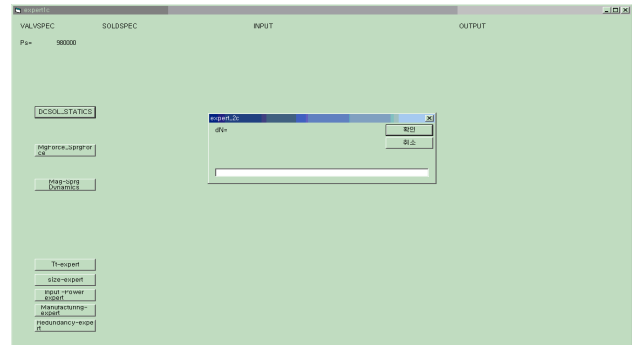


Fig. 10 Designing Screen

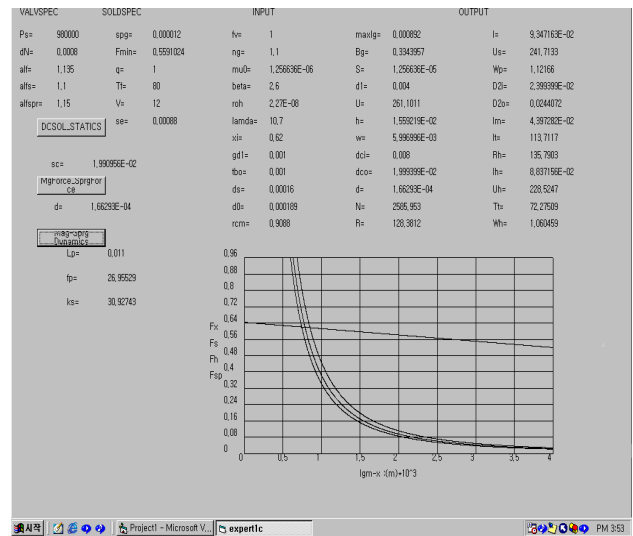


Fig. 11 Final Design Result Screen Example

#### 5. 샘플 설계

##### 5.1 목표 성능

공압 솔레노이드 밸브용 DC 24V 솔레노이드 액추에이터를 설계프로그램에 의해서 설계하였다. 목표 성능값은 Table 1과 같이 정하여 설계하였다.

Table 1 Goal Efficiency Value

item	goal value
rated voltage[V]	DC 24
rated pressure[N/m <sup>2</sup> ]	980000
power consumption[W]	0.5
operating frequency[Hz]	25
temperature rising[°C]	8

##### 5.2 프로그램 입력 변수의 입력

본 샘플설계에 사용된 파라메터와 설계 프로그램에 입력한 값들을 요약하면 Table 2와 같다. 이 변수

값들은 솔레노이드 액추에이터의 요구성능이 변하면 조건에 적합하게 바뀌어 입력되어야 한다. 모든 설계 변수의 단위는 MKS 단위를 사용한다.

Table 2 Input Variable and Input Value

INPUT PARAMETER		
symbol	name	input value
$P_s$	supply pressure[N/m <sup>2</sup> ]	980000
dN	nozzle diameter[m]	0.0005
spg	static gap[m]	0.00023
dI	plunger diameter[m]	0.004
$T_f$	temperature rising[°C]	80
V	voltage[V]	24
$L_p$	plunger length[m]	0.01
alf	F compensation constant(F/Fsn)	1.1
alfs	stroke & nozzle diameter ratio (Se/dN)	1
alfspr	maximum Magnetic Force ratio for maximum spring force	1.2
fv	voltage fluctuation ratio	1
ng	magnetomotive force compensation constant	1.1
$\beta$	coil height(h)/coil width(w)	2.86
lamda	heat dissipation coefficient	10.7(at80°C)
gdI	guide tube thickness[m]	0.00065
tbo	bobbin thickness[m]	0.00155
$d_s$	spiral coil diameter(standard coil)	refer to Coil Catalog
$d_0$	insulation coil diameter(standard coil)	refer to Coil Catalog
rcm	coil resistance per unit length(at 20°C)	refer to Coil Catalog
q	duty ratio(=1)	internal input
$\mu_0$	permeability of air	internal input
$\rho$	copper wire resistance ratio	internal input

5.3 설계결과 출력

Table 2의 변수와 입력값을 설계프로그램에 입력하여, Fig. 12와 같은 최종 설계 결과를 얻었다. 여기에는, 숫자로 출력되는 설계변수들과 스트로크 대비 스프링 힘과 흡인력 곡선이 포함된다. 곡선에서  $F_x$ 는 이론적 흡인력,  $F_s$ 는 상온에서의 흡인력,  $F_h$ 는 온도 상승 후의 흡인력,  $F_{sp}$ 는 스프링 힘을 각각 나타낸다.

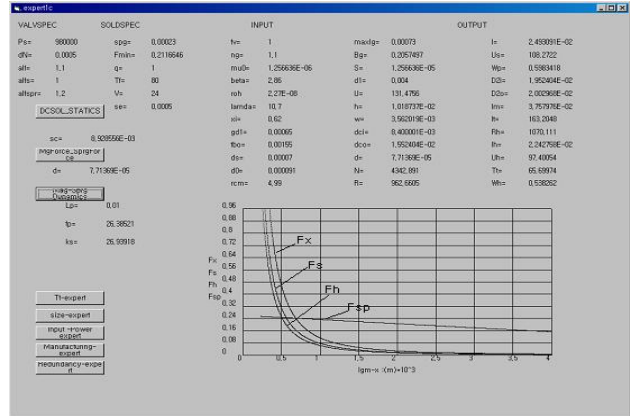


Fig. 12 Final Result Screen of Sample Design

6. 시제품 제작 및 실험결과

6.1 시제품 제작

Fig. 12의 설계결과를 사용하여 시제품 솔레노이드 액추에이터를 제작하였다. 요크, 고정자, 플런저에 사용할 자성재료로는, 설계결과에서 자속밀도가 약 0.2Web/m<sup>2</sup> 이므로, 이 값에서 포화되지 않는 재질인 일본 동북 특수강의 K-M Series를 사용하였다. 그리고 권선을 위한 코일로는 설계결과 0.077mm에 가장 근접한 표준제품인 나선 직경 0.07mm의 국내산을 사용하였다. 시제품 솔레노이드 액추에이터의 주요 구성품을 Fig. 13에 나타내었다.

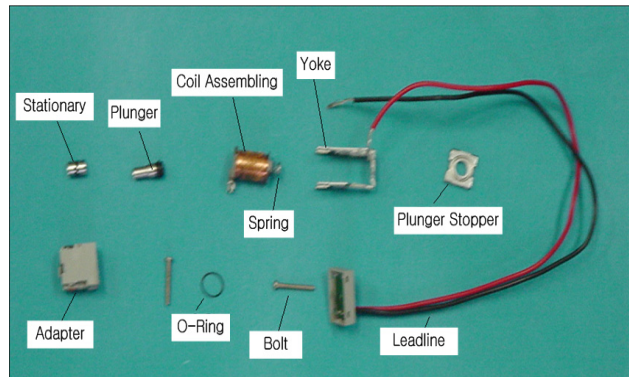


Fig. 13 Main Composition of Solenoid Actuator

6.2 실험 결과

Fig. 14는 스텝입력에 대한 솔레노이드의 전류파형을 나타내는 것으로서, 전류상승 구간, 자기저항 (Reluctance) 감소에 의한 일시적 전류감소 구간, 정격전류로 다시 상승하는 구간의 3단계 전류변화를 가지는 전형적인 밸브 구동용 솔레노이드 액추에이터의 전류파형을 보이고 있다. 그림에서 a는 스텝입력의 시작점, b는 플런저가 고정자에 완전히 흡인되

어야 하는 시점을 각각 표시한 것이다. 이 그림을 통하여 솔레노이드 액추에이터의 작동시간을 예측해 볼 수 있다. 즉, a시점에서 b시점까지의 소요시간이 플런저가 고정자에 흡인되는 시간으로서 약 2.5ms이다.

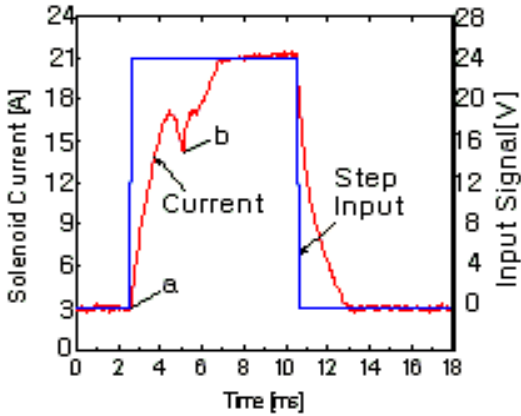


Fig. 14 Current Wave for Step-Input

Fig. 15는 실질적인 플런저 흡착시점을 확인하기 위하여 솔레노이드 액추에이터의 표면에 가속센서를 부착하여 흡착시의 진동을 측정된 파형으로서, 전류형성에 따른 플런저의 전체적 거동을 나타낸다. 가속센서가 출력하는 진폭이 역기전력에 의해서 전류가 감소하는 시점에서부터 커지는 것을 알 수 있고, 이것은 플런저가 이 시점에서 정확히 고정자 표면에 흡착되었다는 것을 의미한다.

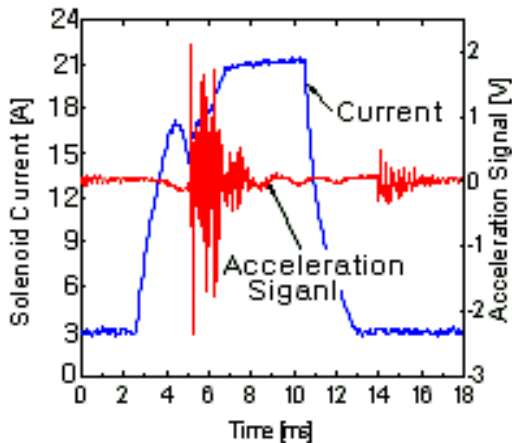


Fig. 15 Plunger's Behavior for Current Formation

Fig. 16과 Fig. 17은 솔레노이드 액추에이터의 소비전력 측정 결과와 온도상승 측정 결과를 각각 나타내는 그래프이다.

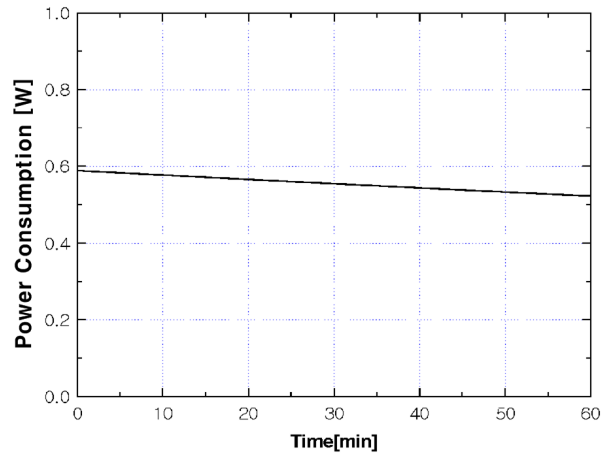


Fig. 16 Power Consumption Measurement Result

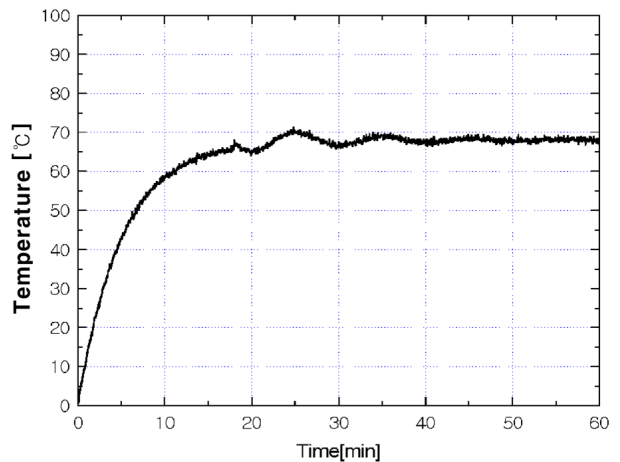


Fig. 17 Temperature Rising Measurement Result

그리고 Fig. 18은 시제품 솔레노이드 액추에이터의 주파수 추종특성을 나타낸다.

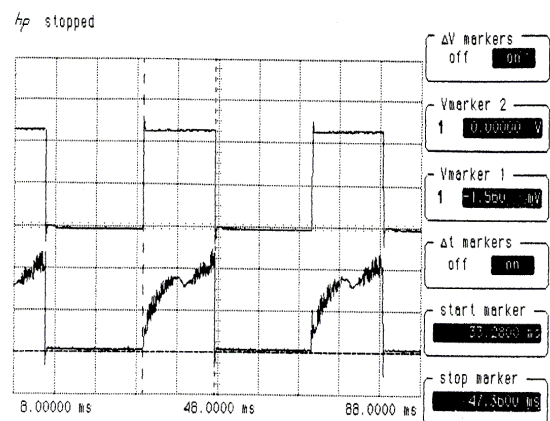


Fig. 18 Frequency Follow-up Characteristic

## 7. 결 론

(1) 전류파형으로 플런저의 흡인시점을 예측한 Fig. 14와 가속센서를 사용하여 실측한 Fig. 15에서



흡인시점이 서로 일치하고 있는 결과를 통하여, 시제품 솔레노이드 액추에이터의 기본적 운동 특성이 정상임을 알 수 있다.

(2) Fig. 16에서 솔레노이드의 소비전력은 약 0.52W에서 안정화됨을 알 수 있고, 이것은 설계 프로그램의 출력 결과인 0.538W와 당초 목표 성능값인 0.5W에 매우 근사되는 값이다.

(3) Fig. 17에서는 온도 상승이 약 70℃인 것을 보여주고 있고, 이것은 당초 목표 성능값인 80℃ 이하로 온도가 상승되어 안정화되었다는 것을 나타낸다.

(4) Fig. 18은 25Hz의 입력주파수에 대한 솔레노이드의 전류추종 파형을 나타내는 것으로서, 작동주파수에 대한 설계프로그램의 결과인 26Hz와 목표 성능값인 25Hz에 근접함을 알 수 있다.

향후, 몇 가지의 시제품을 더 제작하여 설계이론과 설계 프로그램의 완성도를 높일 것이다. 그리고 설계 프로그램의 반복 시뮬레이션을 통하여, 입력변수에 해당하는 몇 가지 경험적 상수에 대한 값의 범위를 지정하는 연구를 수행하여 프로그램의 실용성을 높일 것이다.

### 참고 문헌

- 1) H. C. Roters, "Electro Magnetic Device", John Wiley & Sons, Inc, 1970.
- 2) H. H. William, "Engineering Electromagnetics", Mc Grawhill, 1986.
- 3) Fitzgerald, "Electric Machinery", Mc Grawhill, 1987.
- 4) 성백주, 이은웅, 김형의, "개폐식 솔레노이드 액추에이터용 설계 프로그램 개발", 2002 대한전기학회 하계학술대회 논문집B, pp. 929~931, 2002.
- 5) 성백주, 이은웅, 이재규, "온도 상승을 고려한 솔레노이드 액추에이터의 최적 설계기법", 기계와 재료, 한국기계연구원, pp. 90~99, 제18권 제 3호, 2006.
- 6) B. J. Sung, E. W. Lee and J. G. Lee, "A Design Method of Solenoid Actuator Using Empirical Design Coefficients and Optimization Technique", International Electric Machines and Drives Conference 2007(IEMDC'07), pp. 279~284, Antalya, TURKEY, 2007.
- 7) 성백주, 이은웅, 이재규, "최적화 기법을 사용한 직류 솔레노이드 액추에이터의 설계변수 결정", 2006 대한전기학회 하계 학술대회논문집 B, pp. 689~690, 2006.
- 8) K. Ogata, "System Dyanamics", Prentice Hall, 1998.