

온도상승을 고려한 솔레노이드 액츄에이터의 최적 설계기법

성백주, 이재규 | 한국기계연구원 이은웅 | 충남대학교

1. 서론

솔레노이드 액츄에이터(Solenoid Actuator)는 전자기적 에너지를 기계적 운동 에너지로 변환하는 장치로서 시스템의 단순성, 신뢰성 및 경제성 때문에 자동차·항공기의 핵심 부품으로 사용되고 있으며, 유공압 밸브, 자동차 연료 분사기, 전기 릴레이, 자동차 브레이크, 전기 스위치 등 산업 기계에 광범위하게 적용되고 있다.

솔레노이드 액츄에이터의 설계를 위해 고려되는 사항으로는 솔레노이드의 최대 흡인력 결정, 자속밀도 해석, 플런저 크기 및 형상 결정, 최적의 보빈 설계, 선정된 자성재료의 해석, 공간점유율의 결정, 온도 상승을 고려한 권선 수의 계산 등이 있으며, 이 중에서 자속밀도 해석 기술은 플런저 형상결정 및 공간 점유율 결정 기술과 함께 물리적 법칙 보다는 경험적 지식이 요구된다. 코일의 형상에 따라 발생하는 발열량과 자속밀도의 크기가 결정되므로 솔레노이드 액츄에이터의 정상 운용이 가능한 온도 범위 및 소비전력에서 최대의 흡인력을 갖도록 하는 코일 나선 직경, 권선수, 코일 높이, 코일 두께 등의 설계변수를 물리적 이론 법칙과 설계경험을 토대로 설계 목표에 따라 최적의 값을 갖도록 결정해야 하며 이를 위한 설계 방안을 강구해야한다.^[1]

본 연구에서는 전자기적 이론과 경험적 변수 값을 기반으로 개폐식 솔레노이드 액츄에이터의 지배 방정식을 구성하고 최적화 기법(Optimization technique)에 근거한 문제의 정립으로 소비전력 최소화 가격함수(Cost function)의 설정을 통해 제한된 소비전력에서 최대의 흡인력을 갖는 저소비 전력형 직류 솔레노이드 액츄에이터의 설계 기법을 제안하였다. 코일 발열량을 감안하여 실제 운용 가능한 온도에서 코일형상계수 및 열소멸상수의 범위를 설정하고, 최적화 과정에 따라 제시되는 결과를 통해 목표 값으로 설정한 고정전압과 소비전력을 만족하는 코일의 형상 및 권선수, 코일 나선의 직경 등의 설계 변수를 결정하였다. 그 결과로서, 고정전압 12V와 소비전력 0.5W에서 각각에 대한 최적의 설계 변수를 정의하였고 고정공극(Fixed air gap)의 변화에 따른 설계 변수의 범위를 설정하여 솔레노이드 액츄에이터의 코일형상계수(β), 열소멸상수(λ) 등 설계변수의 정형화된 값을 제시하였다.

2. 지배방정식

개폐식 솔레노이드 액츄에이터의 지배방정식은 전자기적 이론식과 문헌 및 전문가의 자문으로 검증된 다수의

경험 값을 사용하여 도출하였다.^[2,3]

2.1 스프링 상수

솔레노이드 액추에이터는 그림 1에 나타낸것 처럼 전자장 형성을 위한 코일(Coil), 자력선의 통로인 요크(Yoke), 기계적 운동을 하는 플런저(Plunger), 플런저를 흡인하는 고정자(Stationary), 기계적 장치와 연결부인 어댑터(Adapter), 플런저를 복원시키는 스프링(Spring)으로 구성된다.

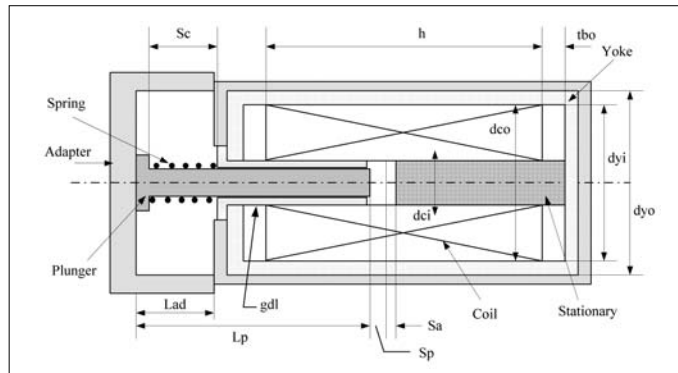


그림 1. 솔레노이드 액추에이터의 구조

유체의 공급압력을 P_s , 어댑터의 노즐 직경을 dN 이라 하면 노즐에 작용하는 유체의 힘 F_{sn} 과 스프링의 초기 인장력 F_{snc} 은 식 (1), 식 (2)로 나타낼 수 있다.

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

$$F_{snc} = C_1 F_{sn} \quad (2)$$

식 (2)의 F_{snc} 값이 클수록 스프링의 힘과 소비전력이 증가하여 응답속도가 늦어지므로 설계 목표에 따라 C_1 ($C_1 > 1$)을 적절히 선정한다. 초기 스프링이 압축된 상태에서 솔레노이드가 여자되어 플런저를 작동시키기 위한 최소 전자력(Magnetic Force) F_{min} 과 최대 스프링 인장력 F_0 는 식 (3)과 식 (4)로 각각 쓸 수 있다.

$$F_{min} = C_2 \cdot F_{sn} \quad (3)$$

$$F_0 = F_{min} \cdot C_3 \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에서 C_2, C_3 는 설계자의 경험에 따라 소비전력, 코일의 온도상승 등을 고려하여 선정한다. 식 (2)와 식(4)를 사용하면 스프링 상수 K_s 는 식 (5)와 같다.

$$K_s = \frac{(F_0 - F_{snc})}{S_p} \quad (5)$$

여기에서, S_p 는 식 (6)으로 정의되는 플런저의 스트로크(stroke)이며, C_4 는 플런저 스트로크와 노즐의 직경비를

나타낸다.

$$S_p = C_4 \cdot dN \quad (6)$$

2.2 흡인력

자기회로에서 작용하는 힘 F 와 기자력 U_m 은 재료의 자속밀도 B_{gm} , 자극면의 단면적 S_m , 공기중의 투자율 μ_0 , 자극면 사이의 거리 d 를 사용하여, 식 (7)과 식 (8)로 나타낼 수 있다.

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

$$U_m = \frac{B_{gm} \cdot d}{\mu_0} \quad (8)$$

식 (8)를 식 (7)에 대입하여 정리하면 식 (9)와 같다.

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

식 (9)에서 고정자와 플런저 간 최대 이격거리 d 를 플런저 스트로크 S_p 와 고정공극 S_a 로 나타내면 식 (10)과 같고, 이를 식 (9)에 대입하면 최대 흡인력 F_{max} 와 최소 흡인력 F_{min} 은 식 (11)과 식 (12)로 된다. 그리고, 식 (13)은 최대 흡인력과 최소 흡인력 사이의 관계를 나타낸다.

$$d = S_p + S_a \quad (10)$$

$$F_{max} = \frac{1}{S_a^2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot S_m \cdot U_m^2}{2} \quad (11)$$

$$F_{min} = \frac{1}{(S_p + S_a)^2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot S_m \cdot U_m^2}{2} \quad (12)$$

$$F_{max} = \left[\frac{(S_p + S_a)}{S_a} \right]^2 \cdot F_{min} \quad (13)$$

식 (12), (13)을 식 (7)에 대입하여 정리하면 플런저 자속밀도 B_g 는 식 (14)로 주어진다.

$$B_g = 2 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \mu_0 \cdot F_{min}}}{dl \cdot \sqrt{\pi}} \quad (14)$$

슬레노이드 액츄에이터의 기자력 U 는 식 (8)과 식 (10)을 사용하면 식 (15)와 같이 된다.

$$U = \frac{C_5 \cdot B_g \cdot d}{\mu_0} \quad (15)$$

식 (15)에서 C_5 는 자기회로에서 발생하는 자력의 손실분을 보상하기 위한 경험적 상수이다.

2.3 보빈 형상 및 코일 직경

솔레노이드 액츄에이터의 가이드 튜브의 두께를 gdI , 보빈두께를 tbo , 코일 폭을 w , 코일 높이를 h 로 나타내면, 보빈의 내경 dci 및 외경 dco , 요크의 내경 dyi 및 외경 dyo , 1회 권선한 코일의 평균길이 lm 은 식 (16)~식(20)으로 각각 표현된다.

$$dci = dl + 2(gdI+tbo) \quad (16)$$

$$dco = dci + 2w \quad (17)$$

$$dyi = dco + C_6 \quad (18)$$

$$dyo = \sqrt{dyi^2 + C_7 \cdot dl^2} \quad (19)$$

$$lm = \frac{\pi (dco + dci)}{2} \quad (20)$$

식 (18)에서 C_6 은 코일에서 발생하는 열의 발산을 원활하게 하기 위해 설정하는 값이며, 식 (19)에서 C_7 은 요크와 플런저에서의 지속흐름을 원활하게 하기 위한 여유율이다. 이 때, 절연 코일의 직경을 d_0 , 각 층에서의 권선 손실을 1이라 가정하면, 보빈에 감기는 코일의 길이방향 적층 수 n_c 는 식 (21), 두께 방향 적층 수 m_c 는 식 (22)와 같고 따라서 총 권선 수 N 은 식 (23)으로 표현된다.

$$n_c = \left(\frac{h}{d_0} \right) - 1 \quad (21)$$

$$m_c = \frac{w}{d_0} \quad (22)$$

$$N = n_c \cdot m_c \quad (23)$$

동선 비저항률 ρ 와 식 (20), 식 (23)을 사용하면, 코일에서의 전압 V 와 전류 I 의 상관관계는 식 (24)로 된다.

$$V = 4 \cdot \rho \cdot \left[\frac{lm \cdot N}{\pi \cdot d_s^2} \right] \cdot I \quad (24)$$

식 (24)를 통해 코일 나선의 직경 d_s 는 식 (25)로 된다.

$$d_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot (dci + dco) \cdot U}{V}} \quad (25)$$

그리고, 코일의 총 저항값 R_t 은 식 (24)와 식 (25)를 사용하면 식 (26)과 같이 계산된다.

$$R_t = \frac{2 \cdot \rho \cdot (dco + dci) \cdot N}{d_s^2} \quad (26)$$

3. 최적화 기법을 사용한 솔레노이드 액츄에이터의 설계

3.1 설계 방정식

솔레노이드 액츄에이터의 작동 시 코일 권선저항 R과 전류 I에 의해서 발생하는 열에 대한 온도상승 T_f 는 식 (27)과 같이 쓸 수 있다.

$$T_f = \frac{W}{\lambda \cdot S_r} = \frac{I^2 \cdot R}{\lambda \cdot S_r} \quad (27)$$

$$S_r = 2 \cdot lm \cdot h \quad (28)$$

식 (27)과 식 (28)에서 λ 는 열소멸상수(Heat dissipation coefficient), S_r 는 코일 평균길이 lm 과 코일 높이 h 로 정의되는 코일의 열 방출 면적을 나타낸다. 코일에서 발생하는 저항을 나타내는 식 (29)와 점적을 관계식 (30)을 식 (27)에 대입하여 정리하면, 코일 온도상승에 관한 식은 식 (31)로 나타낼 수 있다.^[4]

$$R = \rho \cdot \frac{lm \cdot N^2}{h \cdot w \cdot X_i} \quad (29)$$

$$X_i = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_s}{d_o} \right)^2 \quad (30)$$

$$T_f = \frac{q \cdot \rho}{2 \cdot \lambda \cdot X_i \cdot T_f} \cdot \left(\frac{N \cdot W}{h \cdot V} \right) \quad (31)$$

식 (29)~식 (31)에서 ρ 는 동선 비저항률, N 은 권선 수, w 는 코일 폭, d_s 는 코일 나선직경, d_o 는 절연선 직경, q 는 통전률(Duty ratio)을 각각 나타낸다. 식 (31)을 통해 온도 상승을 고려한 코일의 높이 h 는 열소멸상수 λ 와 코일 형상계수 β ($\beta = h/w$)의 함수로 식 (32)와 같이 쓸 수 있다.

$$h(\beta, \lambda) = \sqrt[3]{\frac{q \cdot \beta \cdot \rho \cdot U^2}{2 \cdot \lambda \cdot X_i \cdot T_f}} \quad (32)$$

$$w(\beta, \lambda) = \frac{h}{\beta} \quad (33)$$

식 (32)와 식 (33)을 통해, 코일이 감기는 보빈의 외경, 코일의 평균길이, 코일 나선의 직경을 나타내는 식은 β , λ 의 함수로 식 (34)~식 (36)과 같이 각각 쓸 수 있다.

$$dco(\beta, \lambda) = dci + 2w(\beta, \lambda) \quad (34)$$

$$lm(\beta, \lambda) = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (dci \cdot dco(\beta, \lambda)) \quad (35)$$

$$d(\beta, \lambda) = \sqrt{2\rho \cdot (dci + dco(\beta, \lambda)) \cdot \frac{U}{V}} \quad (36)$$

코일 권선 수와 코일의 총 저항 또한 β , λ 의 함수로 식 (37)과 식 (38)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$N_0(\beta, \lambda) = \frac{h(\beta, \lambda)^2}{1.25^2 \cdot \beta \cdot d(\beta, \lambda)^2} \quad (37)$$

$$R_0(\beta, \lambda) = \rho \frac{\text{Im}(\beta, \lambda) \cdot N_0(\beta, \lambda)^2 \cdot \beta}{h(\beta, \lambda) \cdot X_i} \quad (38)$$

3.2 최적화 기법에 따른 설계 전략

코일의 온도 상승을 고려한 솔레노이드 액츄에이터의 최적 설계를 위해 최적화 기법으로 주어진 소비전력 W_{obj} 에서 최대의 흡인력 F_{min} 을 갖도록 하는 코일형상계수 β 와 열소멸상수 λ 의 최적 값을 계산하고, 이를 통해 코일의 형상 및, 권선 수, 코일 나선의 직경 등 솔레노이드 액츄에이터의 설계 파라미터를 결정한다.

솔레노이드에 인가되는 고정전압 V 과 소비전력 W_{obj} 을 사용하여, 코일에서의 저항을 표현하면 식 (39)와 같이 쓸 수 있다.

$$R_{obj} = \frac{V^2}{W_{obj}} \quad (39)$$

본 연구에서는 식 (39)로 정의되는 목표 저항값 R_{obj} 을 획득함으로써 목표 소비전력 W_{obj} 를 추종하도록 하는 설계 전략을 구상하였다. 식 (38)과 식 (39)를 사용하여 식 (40)과 같은 소비전력 최소화 가격함수(Cost function)를 설정한다.

$$J = |1 - R_\alpha|, \quad R_\alpha = \frac{R_0}{R_{obj}} \quad (40)$$

그리고, 최적화 기법으로 식 (40)에서 설정한 가격함수를 최소화하는 설계 변수를 계산한다. 예를 들어 식 (40)으로 나타낸 가격함수 J 의 변화인 그림 2에서처럼 β, λ 에 따라 다양한 값을 갖게 됨을 확인할 수 있다. 최적화 과정에 따라 J 가 최소가 되는 β, λ 를 결정하고, β, λ 의 함수로 정의되는 설계 변수들 순차적으로 계산하여 솔레노이드 액츄에이터의 최적설계를 수행한다.

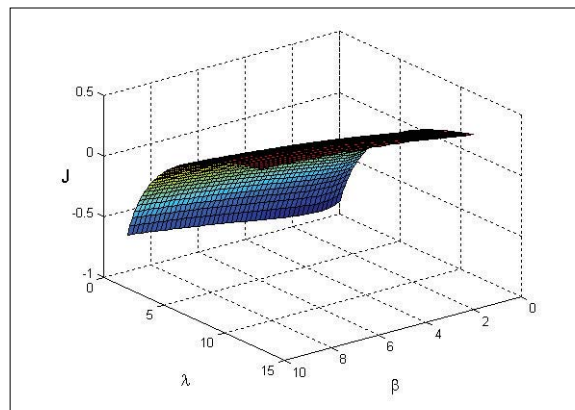


그림 2. β, λ 의 변화에 따른 가격함수

슬레노이드의 코일 형상과 코일에서 발생하는 발열량을 고려하여 β, λ 의 구속조건(Constraint)을 식 (41)과 식 (42)로 설정한다.

$$\beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max} \quad (41)$$

$$\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max} \quad (42)$$

최적화 과정을 통해 계산되는 온도상승 T_1 에서의 소비전력 W_{opt} 는 식 (43)로 표현된다.

$$W_{opt} = \frac{V^2}{R_0} \quad (43)$$

4. 슬레노이드 액츄에이터의 최적 설계

4.1 초기 설계변수

슬레노이드 액츄에이터의 최적 설계를 위해, 먼저 2장의 경험적 지배방정식에 포함된 초기 설계 변수와 경험상수 $C_1, C_2 \dots C_7$ 를 각각 표 1, 표 2에 정리하였다. 노즐에서의 압력 10 bar, 노즐 직경 0.5mm, 플런저 직경 4mm로 설정하였고, 경험상수는 문헌과 전문가의 자문으로 검증된 값을 사용하였다.

표 1. 초기 설계 변수

Parameters	Symbols	Initial values
Supply pressure [N/m ²]	Ps	980000
Nozzle diameter [m]	dN	0.0005
Plunger diameter [m]	dl	0.004
Plunger length [m]	L _p	0.01
Guide tube thickness [m]	gdl	0.0004
Bobbin thickness [m]	tbo	0.001
Duty ratio	q	1
Permeability in free space [Wb/A.T]	μ_0	1.257×10^{-6}
Relative resistance of copper wire [$\Omega \cdot m$]	ρ	2.27×10^{-8}

표 2. 경험적 상수값

Parameters	Symbols	Values
Compensation coefficient for spring initial force	C ₁	1.25
Compensation coefficient for minimum attraction force	C ₂	1.2
Compensation coefficient for maximum attraction force	C ₃	1.25
Ratio of stroke and nozzle diameter	C ₄	1
Compensation value of magnetic motive force	C ₅	1.1
Empirical coefficient	C ₆	0.004
Margin of magnetic flux path	C ₇	1.25

4.2 목표 설계변수

사용전압 DC 12V의 솔레노이드 액츄에이터에 대한 목표 설계 변수값을 표 3에 나타내었다. 소비전력 0.5W, 온도상승 80°C, β , λ 의 허용범위는 코일의 형상 및 온도상승을 고려하여 설정하였다.

표 3. 목표 설계 변수값

Items	Values
Usage Voltage V [V]	12
Consumption Power W_{obj} [W]	0.5
Temperature Rising T_f [°C]	80
Plunger stroke [mm]	0.5
λ_{max}	13
λ_{min}	2
β_{max}	10
β_{min}	1
S_a [mm]	0.001 ↔ 0.01

4.3 최적 설계 결과

솔레노이드의 고정공극이 0.001mm일 때, 최적화 기법을 통해 식 (40)에서 설정한 소비전력 최소화 가격함수의 변화는 그림 3에 나타내었고, 가격함수를 최소화 하는 식 (41)과 식(42)의 β , λ 의 결과와 코일 폭, 코일 높이, 권선 수 등 설계변수 값은 표 4에 각각 나타내었다. 플런저 스트로크에 따른 흡인력과 스프링 압축력 변화는 그림 4에서 확인할 수 있다.

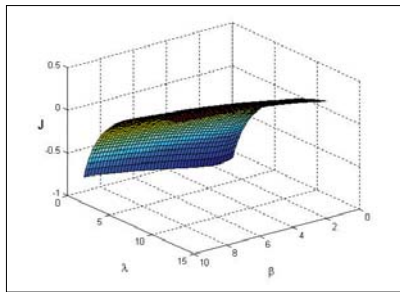


그림 3. β , λ 의 변화에 따른 가격함수

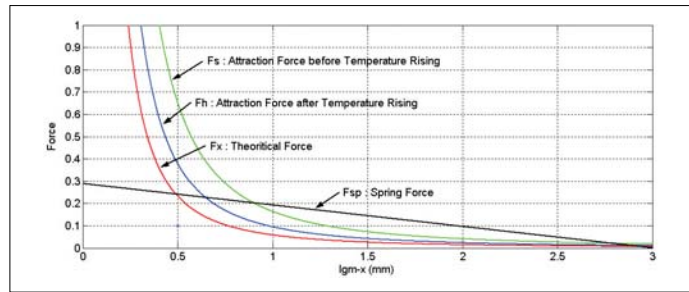


그림 4. 플런저 스트로크에 따른 흡인력 변화

표 4. 최적화 결과

Design parameters	Values
Cost function J	4.5351×10^{-6}
Coil shape coefficient β	3.1
Heat dissipation coefficient λ	6.7
Coil height h [m]	0.0097972
Coil width w [m]	0.0031604
Coil diameter d [m]	8.4279×10^{-5}
Turn number of coil N	2887.9
Consumption power W_{opt} [W]	0.5

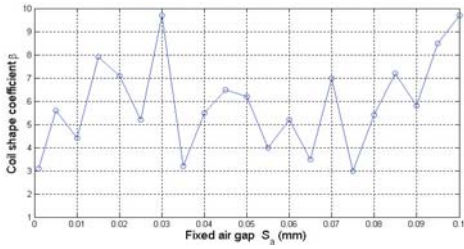


그림 5. 코일 형상계수 β

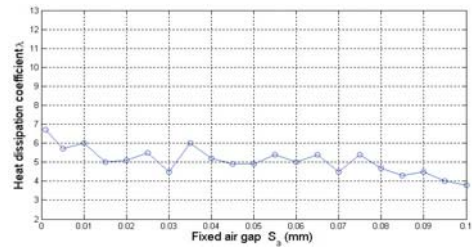


그림 6. 코일 열 소멸 상수 λ

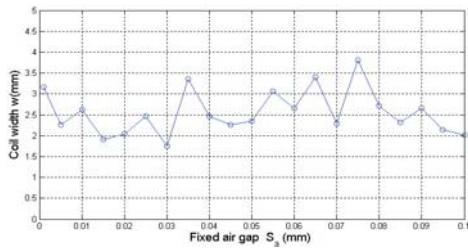


그림 7. 코일 폭 w

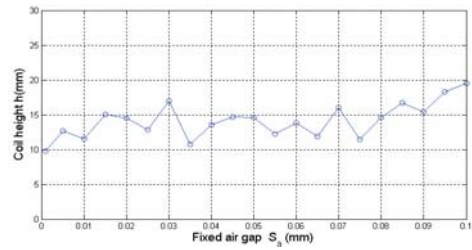


그림 8. 코일 높이 h

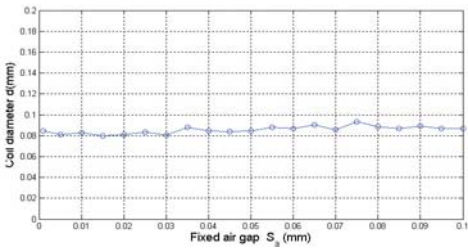


그림 9. 코일직경 d

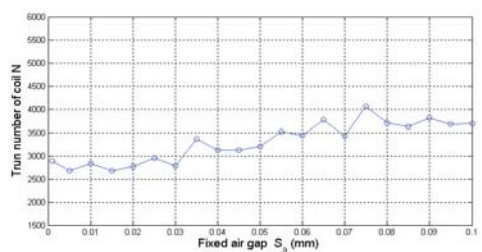


그림 10. 코일 권선 수 N

표 5. 설계 변수 값의 범위

Design parameters	Boundaries
Coil shape coefficient β	$3 \leq \beta \leq 9.7$
Heat dissipation coefficient λ	$3.8 \leq \lambda \leq 6.7$
Coil height h [mm]	$9.8 \leq h \leq 19.5$
Coil width w [mm]	$1.8 \leq w \leq 3.8$
Coil diameter d [mm]	$0.0799 \leq d \leq 0.0932$
Turn number of coil N	$2676 \leq N \leq 4057$

그림 5~그림 10은 고정공극의 변화에 따른 설계변수의 변화 추이를 나타내며, 이를 통해 솔레노이드 액츄에이터의 설계변수 범위를 표 5에서 정형화된 값으로 나타내었다.

5. 결 론

저소비 전력형 개폐식 솔레노이드 액츄에이터 설계에 관한 연구로 전자기적 이론과 경험적 변수 값을 기반으로 지배방정식을 구성하고, 최적화 기법을 사용하여 설계전략을 구상하였으며, 이를 사용하여 제한된 소비전력에서 최대 흡인력을 갖는 솔레노이드 액츄에이터의 설계기법을 제안하였다. 설계 결과를 이용하여 사용전압 12V, 소비전력 0.5W에서의 정형화된 설계변수 값을 제시하였다.

- 1) 전자기 이론과 문헌 및 전문가의 자문으로 검증된 경험 값을 사용하여 솔레노이드 액츄에이터의 지배 방정식 구성.
- 2) 최적화 기법에 따른 가격함수의 설정으로 코일의 온도상승을 고려한 저소비 전력형 솔레노이드 액츄에이터의 최적설계 기법 제안.
- 3) 사용전압 12V, 소비전력 0.5W의 솔레노이드 액츄에이터에 대한 설계 결과와 설계변수의 정형화된 값 제시.

✻ 참고 문헌

- [1] C. Roters, "Electro magnetic device", John Wiley & Sons, Inc, 1970.
- [2] 성백주, 이은웅, 김형의, "개폐식 솔레노이드 액츄에이터용 설계 프로그램 개발", 2002 대한전기학회 하계 학술대회 논문집B, pp929~931, 2002. 7. 10
- [3] William H.Hayt, "Engineering Electromagnetics", Mc Grawhill, 1986.
- [4] B. J. Sung, E. W. Lee, H. E. Kim, "Empirical Design of an On and Off Type Solenoid Actuator for Valve Operation," KIEE International Sections on Electrical Machine and Energy Conversion Systems, Vol. 4B, No. 2, pp. 39~46, June, 20



성 백 주

· 한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터 선임연구원
· 관심분야 : 전기식 액츄에이터, 솔레노이드 밸브
· E-mail : sbj682@kimm.re.kr



이 은 웅

· 충남대학교 전기공학과 교수
· 관심분야 : SRM, 액츄에이터, 전력품질
· E-mail : ewlee@cnu.ac.kr



이 재 규

· 한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터 위촉연구원
· 관심분야 : 시스템제어, 궤도역학
· E-mail : jglee@kimm.re.kr