최적화 기법을 사용한 직류 솔레노이드 액츄에이터의 설계변수 결정

성백주 이은웅° 이재규
한국기계연구원 충남대학교°

Optimal Design of Solenoid Actuator Using Empirical Coefficient and Optimization Technique

Baek-Ju, Sung Eun-Woong, Lee° Jae-Gyu, Lee
Korea Institute of Machinery & Materials Chung Nam National University°

Abstract - The development method of a pneumatic solenoid actuator which is used as key components in automobile and aircraft industry is described. For the optimal design of solenoid actuator, we applied the general electromagnetic theory and empirical knowledge. By using the governing equation for the solenoid actuator based on the electromagnetic theory and empirical coefficient, and constrained optimization technique, we proposed the optimal design technique of low consumption type DC solenoid actuator. The design results of the DC 24V, 0.5W solenoid actuator were presented.

1. 서 론

자동차·항공기의 핵심 부품으로 사용되고 있는 공압 밸브 구동용 솔레노이드 액츄에이터(Solenoid actuator)의 최적 설계를 위해서는 일반적인 전자기적 이론 지식과 함께 설계 경험을 통해 획득한 경험적 지식이 요구된다. 설계자는 물리적 법칙을 기준으로 거시적인 관점에서 설계 대상에 대한 전체적인 개괄적 설계를 수행하고, 경험적 설계 지식을 기반으로 세부적 설계를 수행하여 설계조건에 맞는 제품설계를 수행한다. 특히, 솔레노이드 액츄에이터는 코일의 형상에 따라 발생하는 발열량과 자속밀도의 크기, 흡인력 등이 결정되므로 솔레노이드 액츄에이터의 정상운용 가능한 온도범위 및 소비전력에서 최대의 흡인력과 응답특성을 갖도록 하는 코일 나선 직경, 권선수, 코일 높이, 코일 두께 등의 설계변수의 결정을 위해 물리적 법칙과 함께 설계경험을 토대로 한 경험적 지식이 요구된다.

본 연구에서는, 코일의 발열량을 고려한 솔레노이드 액츄에이터의 지배방정식과 최적화 기법(Optimization technique)을 통해 제한된 소비전력에서 최대 흡인력을 갖는 저소비 전력형 직류 솔레노이드 액츄에이터의 설계기법을 제안하였다. 이를 위해 소비전력 최소화 가격함수(Cost function)를 설정하였고, 고정전압 24V, 소비전력 0.5W, 직류 솔레노이드 액츄에이터에 대한 최적 설계 결과를 제시하였다.

2. 솔레노이드 액츄에이터의 최적 설계

솔레노이드 액츄에이터의 최적 설계를 위해 대상 제품에 대한 설계 파라메터를 결정해야 한다. 밸브 구동용 개폐식 솔레노이드 액츄에이터의 경우 노즐에서의 압력에 대한 초기 스프링 인장력과 노즐의 개폐를 위해 필요한 플런저의 흡인력을 결정해야 하고, 플런저 작동을 위해 코일에서 발생하는 기자력 및 코일의 형상, 권선수, 코일 나선 두께, 보빈의 형상, 요크의 형상 등 세부적인 설계 파라메터 값을 설계 조건에 맞도록 정의해야 한다. 또한, 실제 사용 시 코일에서 발생하는 온도상승을 제한하고 일정 소비전력에서 최대의 흡인력이 발생하도록 제품을 설계해야 한다.

본 연구에서는 전자기적 이론과 문헌 및 전문가의 자문으로 검증된 경험값을 사용하여 솔레노이드 액츄에이터의 최적 설계 방정식을 구성하고 최적화 기법에 따른 문제의 정립으로 솔레노이드 액츄에이터를 최적 설계하는 기법을 제안하였다[1,2].

2.1 설계 방정식

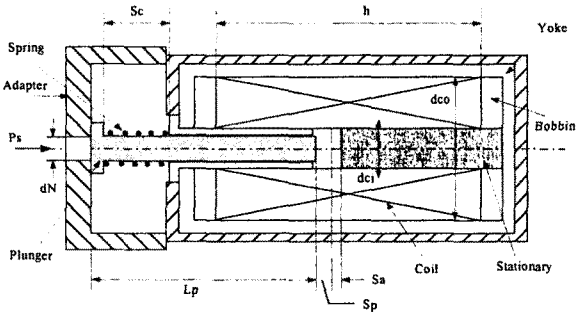
솔레노이드 액츄에이터는 전자기적 에너지를 기계적 운동에너지로 변환하는 시스템으로 그림 1에서와 같이 전자장 형성을 위한 코일(Coil), 자력선의 통로인 요크(Yoke), 기계적 운동을 하는 플런저(Plunger), 플런저를 흡인하는 고정자(Stationary), 기계적 장치의 연결부인 어댑터(Adapter), 플런저를 복원시키는 스프링(Spring)으로 구성된다.

그림 1에서 유체의 공급압력을 P_s, 어댑터의 노즐 직경을 dN이라 하면 노즐에서 유체의 힘 F_{sn}과 스프링의 초기 인장력 F_{snc}는 식 (1)과 식 (2)로 각각 표현된다.

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

$$F_{snc} = C_i F_{sn} \tag{2}$$

C_i은, 스프링의 힘, 소비전력, 응답특성 등을 고려하여 선정한다. 초기 스프링이 압축된 상태에서 솔레노이드가 여자되어 플런저를 작동시키기 위한



<그림 1> 솔레노이드 액츄에이터의구조

전자력(Magnetic Force) F_{min}은 식 (3)과 같다.

$$F_{min} = C_2 F_{sn} \tag{3}$$

식 (3)에서 C_2는 설계자의 경험에 따라 소비전력 코일의 온도상승 등을 고려하여 선정한다.

플런저의 자속밀도 Bg와 기자력 U는 식 (4)와 식 (5)로 각각 나타내진다. 여기에서 μ_0는 공기중의 투자율, S_p는 플런저 스트로크, S_a는 고정공극, dI는 플런저 직경, 그리고 식 (5)에서 C_3는 자기회로에서 발생하는 자력의 손실분을 보상하는 경험적 상수이다.

$$Bg = 2 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \mu_0 \cdot F_{min}}}{dI \cdot \sqrt{\pi}} \tag{4}$$

$$U = \frac{C_3 \cdot Bg \cdot (S_a + S_p)}{\mu_0} \tag{5}$$

솔레노이드 액츄에이터의 코일 권선저항 R과 전류 I에 의해서 발생하는 열에 대한 온도상승 T_f는 식 (6)과 같다.

$$T_f = \frac{W}{\lambda \cdot S_r} = \frac{I^2 \cdot R}{\lambda \cdot S_r} \quad , \quad S_r = 2 \cdot lm \cdot h \tag{6}$$

여기서 λ는 열소멸상수(Heat dissipation coefficient), S_r는 코일 평균 길이 lm과 코일 높이 h로 정의 되는 코일의 열방출 면적을 나타낸다. 식 (6)에 식 (7)과 점적률 X_i를 대입하여 정리하면 온도상승에 관한 식 (8)이 된다.

$$R = \rho \cdot \frac{lm \cdot N^2}{h \cdot w \cdot X_i} \quad , \quad X_i = \frac{\pi}{4}\left(\frac{d_s}{do}\right)^2 \tag{7}$$

$$T_f = \frac{q \cdot \rho}{2 \cdot \lambda \cdot X_i \cdot T_f} \cdot \left(\frac{N \cdot W}{h \cdot V}\right) \tag{8}$$

여기서 ρ는 동선 비저항률, N은 권선수, w는 코일 폭, d_s는 코일 나선직경, d_0는 절연선 직경, q는 통전률(Duty ratio)을 각각 나타낸다. 식 (8)을 통해 코일의 높이 h는 열소멸상수 λ와 코일형상계수 $\beta(\beta = h/w)$의 함수로 식 (9)와 같이 정의된다.

$$h(\beta,\lambda) = \sqrt[3]{\frac{q \cdot \beta \cdot \rho \cdot U^2}{2 \cdot \lambda \cdot X_i \cdot T_f}} \tag{9}$$

코일이 감기는 보빈(bobbin)의 외경, 코일의 평균길이, 코일 나선의 직경을

나타내는 식은 β, λ의 함수로 식 (10)-(12)와 같이 쓸 수 있다[3].

$$dco(\beta,\lambda) = dci + 2w(\beta,\lambda) \tag{10}$$

$$lm(\beta,\lambda) = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (dci \cdot dco(\beta,\lambda)) \tag{11}$$

$$d(\beta,\lambda) = \sqrt{2\rho \cdot (dci + dco(\beta,\lambda)) \cdot \frac{U}{V}} \tag{12}$$

여기서, dci는 보빈의 내경이다. 코일 권선 수와 코일의 총 저항 또한 β, λ의 함수로 식 (13)과 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다[3].

$$N_0(\beta,\lambda) = \frac{h(\beta,\lambda)^2}{1.25^2 \cdot \beta \cdot d(\beta,\lambda)^2} \tag{13}$$

$$R_0(\beta,\lambda) = \rho \frac{lm(\beta,\lambda) \cdot N_0(\beta,\lambda)^2 \cdot \beta}{h(\beta,\lambda) \cdot X_i} \tag{14}$$

2.2 최적화 기법을 사용한 설계

솔레노이드 액츄에이터의 작동 시 발생하는 코일의 온도상승을 고려한 설계 방정식 식 (9)-(14)와 최적화 기법(Optimization technique)을 활용하여 주어진 소비전력 W_{obj}에서 최대의 흡인력을 갖도록 하는 코일 형상, 권선수, 코일 나선의 직경 등 설계변수를 결정하였다. 솔레노이드에 인가되는 고정전압 V과 소비전력 W_{obj}을 사용하면, 코일에서의 저항은 식 (15)와 같다.

$$R_{obj} = \frac{V^2}{W_{obj}} \tag{15}$$

식 (15)로 정의되는 목표 저항값 R_{obj}을 획득함으로서 목표 소비전력 W_{obj}을 추종하도록 하기 위해서. 식 (14),(15)를 통해 식 (16)과 같은 소비전력 최소화 가격함수(Cost function)를 설정하였다.

$$J = |1 - R_\alpha| \quad , \quad R_\alpha = R_0 / R_{obj} \tag{16}$$

최적화 기법을 통해 식 (16)에서 설정한 가격함수를 최소화하는 식 (14)의 β, λ를 계산하고 코일치수, 권선수 등의 설계변수를 순차적으로 계산한다. 설계시 반영되는 코일의 형상과 코일에서 발생하는 발열량을 감안하여 β, λ의 구속조건(Constraint)을 식 (17)과 식 (18)로 설정하였다.

$$\beta_{min} \le \beta \le \beta_{max} \tag{17}$$

$$\lambda_{min} \le \lambda \le \lambda_{max} \tag{18}$$

최적 설계를 통해 계산되는 온도상승 T_f에서 소비전력 W_{opt}은 식 (19)와 같이 쓸 수 있다.

$$W_{opt} = \frac{V^2}{R_0} \tag{19}$$

3. 최적 설계 결과

솔레노이드 액츄에이터의 설계를 위해 먼저 설계방정식에 정의된 초기 설계 변수와 경험상수 C_1, C_2, C_3를 표 1에 나타내었고, 최적화 과정에서 사용된 목표 설계변수와 β, λ의 허용범위는 표 2에 나타내었다.

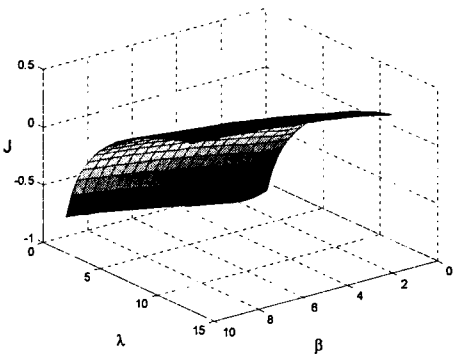
<표 1> 초기 설계 변수

변수	기호	초기값
노즐 압력[N/m^2]	P_s	98000
노즐 직경[m]	dN	0.0005
플런저 직경[m]	dI	0.004
플런저 길이[m]	L_p	0.01
보빈 내경[m]	dci	0.0068
통전률	q	1
투자율[Wb/a.T]	μ_0	1.257×10^{-6}
동선 비저항률	ρ	2.27×10^{-8}
스프링보정상수	C_1	1.25
흡인력보정상수	C_2	1.2
기자력보정상수	C_3	1.1

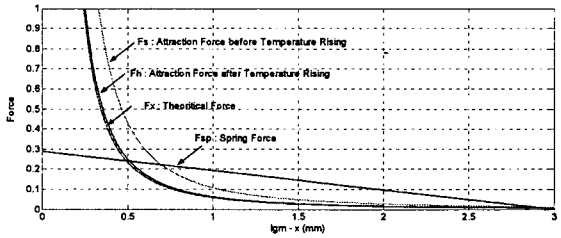
<표 2> 목표 설계 변수

항목	설정값		
고정전압 V [v]	24		
소비전력 W_{obj} [W]	0.5		
온도상승 T_f [°C]	80		
고정공극 S_a [mm]	0.001 ~ 0.01		
β, λ의 허용범위			
β_{max}	10	λ_{max}	13
β_{max}	1	λ_{max}	2

그림 2는 솔레노이드의 고정공극이 0.001mm일 때 식 (16)의 가격함수 변화를 나타낸 것으로 최적화 과정에 따라 이를 최소화 하는 β, λ의 값을 알 수 있다. 그리고, 설계 결과로서 나타나는 플런저 스트로크에 따른 흡인력과 스프링 압축력 변화는 그림 3에 나타내었다.



<그림 2> β, λ에 따른 가격함수의 변화



<그림 3> 플런저 스트로크에 따른 흡인력 변화

최적화 기법으로 표 2에서 설정한 고정공극의 변화에 따른 설계변수 값의 범위를 사용한, 24V, 0.5W 직류 솔레노이드 액츄에이터에 대한 최적설계 결과를 표 3에 나타내었다.

<표 3> 최적 설계 결과

설계변수	범위
코일형상계수 β	$3 \le \beta \le 9.7$
열소멸상수 λ	$3.8 \le \lambda \le 6.7$
코일높이 h [mm]	$9.8 \le h \le 19.5$
코일두께 w [mm]	$1.8 \le w \le 3.8$
코일나선직경 d [mm]	$0.0565 \le d \le 0.0659$
권선수 N	$4333 \le N \le 6573$

4. 결 론

본 연구에서는 전자기이론과 경험 값을 사용하여 솔레노이드 액츄에이터의 설계방정식을 구성하고, 최적화 기법에 따른 가격함수의 설정으로 제한된 소비전력에서 최대 흡인력을 갖는 저소비 전력 형 솔레노이드 액츄에이터의 설계기법을 제안하였다. 그리고 저소비 전력 형 솔레노이드 액츄에이터의 주요 설계변수에 대한 설계 값의 선택범위를 도출하였다.

[참 고 문 헌]

[1] C. Roters, "Electro magnetic device", John Wiley & Sons, Inc, 1970.
[2] William H.Hayt, "Engineering Electromagnetics", Mc Grawhill, 1986.
[3] 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, 2004.