

에 의한 영향으로 자기회로를 하나로 근사화할 수 없고, Fig. 1(a)와 같이 제어각 부근에서의 자기회로를 여러 개로 나누어 취급하여야 한다^{2~4}. 제어영역 내에서 발생하는 비례전자 솔레노이드의 흡인력은 Fig. 1(b)에 보이는 것처럼 변위에 관계없는 일정한 흡인력을 얻을 수 있다. 이것은 플런저를 통해서 흐르는 자속(magnetic flux)이 공극을 통해서만 흐르는 것이 아니라 제어각을 통해서 흐르는 누설 자속(leakage flux)이 발생하기 때문이며, 제어각에서는 자기 포화가 발생하기도 하여 제어각을 통해서 흐르는 자속의 양이 제한되기도 한다. 따라서 비례 전자 솔레노이드의 경우에 등가자기 회로법에 의한 흡인력의 계산은 복잡한 자기회로, 자성체의 비선형성 및 자기 포화와 같은 현상을 고려하여 계산하기가 매우 어렵고, 정확한 계산결과를 기대하기 힘들다. 또한 비례솔레노이드의 특성에 영향을 미치는 제어각의 형상을 경험적인 방법에 의해서 최적의 형상으로 설계하기는 어렵기 때문에 최적화기법을 이용한 형상 최적화가 필요하다.

본 논문에서는 유한요소 해석에 의하여 제어각의 형상에 따라 변화하는 비례전자 솔레노이드의 특성을 비교·분석하고, 제어각의 형상을 결정짓는 변수의 값을 (1+1) 진화전략(evolution strategy)을 이용함으로써 변위에 관계없이 일정한 흡인력을 발생시킬 수 있도록 하는 비례솔레노이드의 형상을 설계하였다¹⁰.

2. 제어각의 형상에 따른 특성 해석

Fig. 2에는 제어각의 형상과 제어각의 형상을 결정짓는 설계변수를 보이고 있다. 본 연구에서 사용된

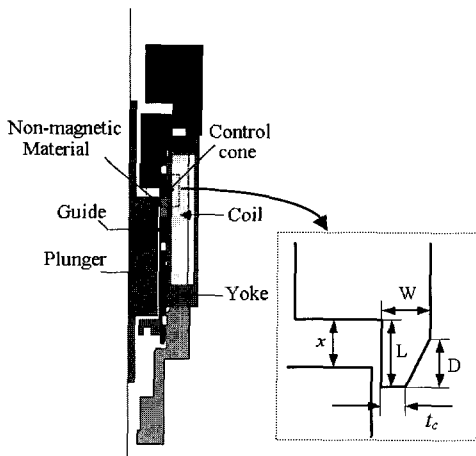


Fig. 2 Shape of control cone and design parameters

Table 1 Dimensions of control cone

Type	L	D	tc
Type1	3.5mm	2.5 mm	2.25 mm
Type2		2.5 mm	1.34 mm
Type3		2.5 mm	0.65 mm
Type3-2		3.5 mm	0.65 mm
Type4		2.5 mm	0.00 mm
Type4-2		3.5 mm	0.00 mm

모델의 경우 플런저의 동작 변위는 1.6mm, 자화 방지 공극 1.4mm를 포함하여 3.5mm 정도의 변위를 확보해야 한다. 제어각의 형상의 변화에 따른 특성을 비교하기 위하여, 설계변수인 제어각의 길이 L , 제어각의 두께 tc , 그리고 테이퍼 면의 길이 D 를 변화시켜 해석하여 각각의 특성을 비교하였다. Table 1에는 해석 모델에 대한 각각의 치수를 나타내었다. 해석에 사용된 솔레노이드의 입력 전류는 1.0A, 권선수는 1419turn 이다.

2.1 길이(L) 변화에 의한 특성

Fig. 3에는 제어각의 두께가 최대($tc = W$) 일 때, 제어각의 길이 L 에 대한 변위-흡인력 특성 곡선을 보이고 있다. 플런저 변위 x 가 제어각의 길이 보다 큰 경우 ($x \geq L$)에는 제어각이 없는 경우($L = 0$)와 비교해서 자기저항이 작아지기 때문에, 플런저에 작용하는 흡인력이 커짐을 알 수 있다. 그러나 변위가 감소하여 제어각의 길이보다 작은 경우에는 제어각을 통해서 흐르는 자속이 많이 발생하여 공극에서의 자속밀도가 작아져 흡인력이 작아진다. 변위가 작아질수록 흡인력은 감소하며, 변위가 충분히 작아지면 흡인력은 다시 증가한다.

2.2 두께(tc) 변화에 의한 특성

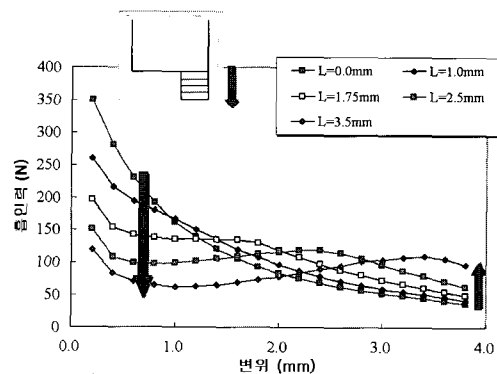


Fig. 3 Effects of control cone length variation

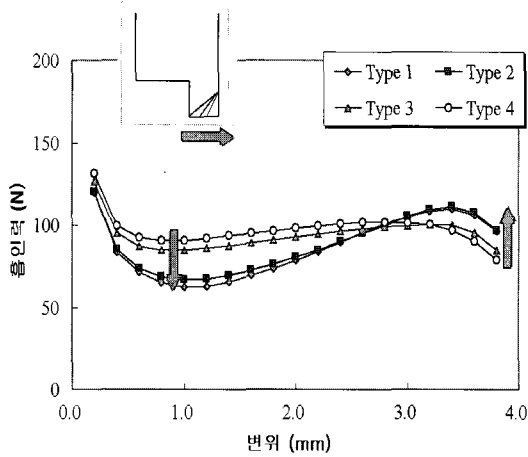


Fig. 4 Effects of control cone thickness variation

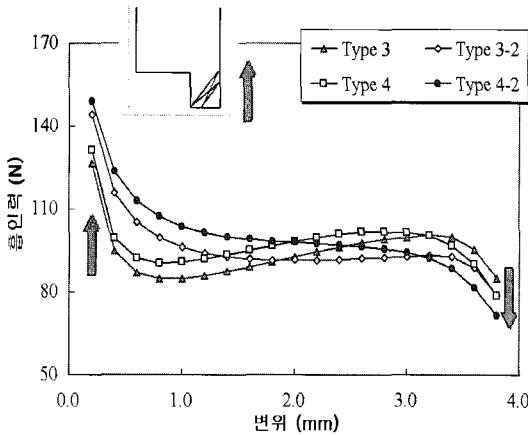


Fig. 5 Effects of control cone taper length variation

제어각의 길이 L 을 3.5mm, 테이퍼 면의 길이 D 를 2.5mm로 하고 두께 tc 를 변화시켜 액추에이터의 흡인력 특성을 해석한 결과를 Fig. 4에 나타낸다. 제어각의 두께가 작아질수록 흡인력 특성은 개선되어 Type 3과 Type 4의 경우에는 변위가 작아지면서 흡인력이 약간 작아지는 경향은 있지만 거의 일정한 값을 갖는다. 따라서 제어각의 두께는 제어각 전체 폭 W 의 1/4 정도가 적당한 것으로 판단된다.

2.3 테이퍼 면의 길이(D) 변화에 의한 특성

2.2절의 결과로부터 흡인력 특성이 비교적 좋은 Type 3과 4에 대해서 테이퍼 면의 길이 D 를 변화시켜 특성을 비교하였다. Fig. 5의 결과에 의하면, 테이퍼 면의 길이가 길수록 플런저의 변위가 작아지면서 흡인력이 작아지는 특성이 개선되는 것을 알 수 있

다. 테이퍼 면의 길이와 제어각의 두께를 동시에 고려하면, $tc = 0$ 인 것 보다는 약간의 두께를 가지면서 테이퍼 면의 길이를 조절할 때 더 좋은 특성을 얻을 수 있음을 예측할 수 있다.

3. (1+1) 진화전략을 이용한 형상 최적 설계

(1+1) 진화전략은 자연계의 진화과정을 수치적으로 모사한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)과 열역학의 어닐링(Annealing) 개념을 결합한 것으로, 재생산, 돌연변이 및 어닐링으로 구성된다⁵⁾.

초기형상과 설계변수가 만족해야 할 구속조건이 입력되고, 설계변수 및 목적함수가 정의되면, 경계요소해석을 통하여 초기형상에 대한 목적함수가 계산된다. 새로운 설계변수 $[X]_n$ 은 현재의 설계변수 $[X]_o$ 를 기준으로 다음 식에 의하여 무작위로 생성된다.

$$[X]_n = [X]_o + \alpha[R] \quad (1)$$

여기서, α 는 변화폭이고, $[R]$ 은 구간 $(-1,1)$ 에서 균등분포를 갖는 난수로 구성된 벡터이다.

Table 2에는 설계변수로 사용된 제어각의 길이 L , 두께 tc , 테이퍼 면의 길이 D 의 범위를 보이고 있다. 테이퍼 면의 길이는 변위가 0인 지점을 기준으로 범위를 설정하였다.

목적함수는 동작영역 내에서의 흡인력이 일정한 값을 갖도록 하는 것으로 설계목표 흡인력과 각 변위에서의 흡인력 사이의 오차로 설정하였으며 다음과 같이 계산하였다.

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^N (F_o - F_i)^2 \quad (2)$$

여기에서 N 은 흡인력을 계산하는 위치의 개수이며, F_o 는 원하는 흡인력으로 각 세대에서의 평균 흡인력으로 설정하였다.

또한, Fig. 2에 보이는 솔레노이드에 있어서 흡인력을 0.8A, 1419turn에서 45N 이상이 되도록 하는 제어각의 형상을 최적 설계하였다.

Fig. 6은 식(2)에 보이는 목적함수의 변화를 보이고 있는 것으로, 초기에는 목적함수의 변화가 크게 일어났지만, 약 70세대 이후에는 0점 근방으로 수렴하고 있음을 확인할 수 있다.

Table 2 Design parameters (unit : mm)

parameter	range	initial value
Length	$3.00 \leq L \leq 4.00$	3.5
Thickness	$0.05 \leq tc \leq 0.30$	0.25
Taper Length	$-2.50 \leq D \leq 2.50$	2.5

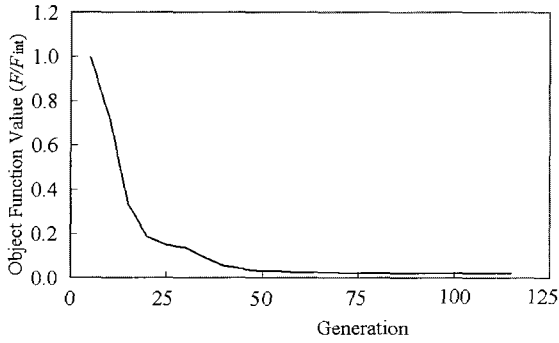


Fig. 6 Variation of the objective function value

Table 3 Optimal Design parameters

(unit : mm)

parameter	Optimal value
Length (L)	3.45
Thickness (tc)	0.17
Taper Length (D)	-1.88

Table 3에는 최적화 알고리즘을 통해서 얻어진 설계변수의 최종값을 보이고 있으며, Fig. 7은 Table 3으로부터 얻어진 비례솔레노이드 액추에이터의 최종 형상에 의한 흡인력을 전류에 대해서 해석한 결과를 보이고 있다. 해석 결과에 의하면, 플린저의 변위가 약 1.3~3.3mm의 구간에서 변위에 관계없이 일정하고 전류에 비례하는 흡인력을 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 8에는 변위가 1.3mm일 경우와 3.3mm일 경우의 자속선 분포도를 보이고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전자 비례 솔레노이드 액추에이터의 특성에 대해서 연구하였다. 비례 솔레노이드의 제어각의 형상에 따른 특성을 유한요소법에 의하여 해석하여 비교하였으며, (1+1) 진화전략을 이용하여 제어각의 형상을 최적설계 하였다.

특성해석 결과로부터 제어각의 형상이 비례솔레노이드의 특성과 매우 밀접한 관계를 가지고 있음이

확인되었다. 제어각의 형상최적 설계에 의해서 0.8A의 입력 전류에 의해 동작구간에서의 약 45N 정도의 일정한 흡인력이 발생하는 최종 형상을 얻을 수 있었다.

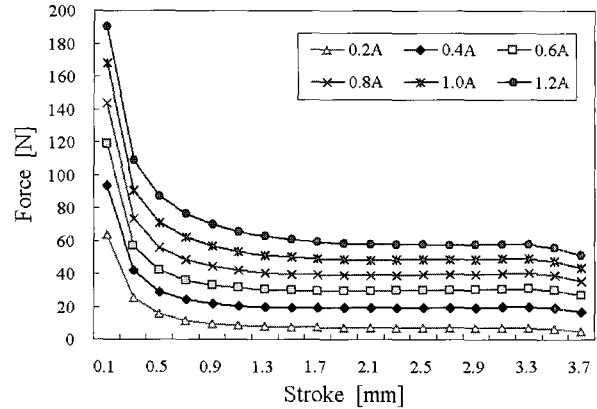


Fig. 7 Stroke-force characteristics of optimal shape

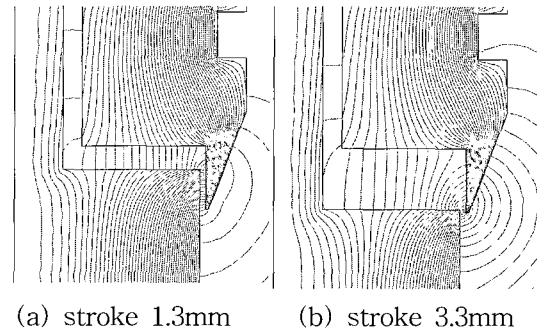


Fig. 8 Magnetic flux line for optimized control cone shape

본 연구에서 제안하는 (1+1) 진화전략 방식의 최적화 기법은 시행착오에 의하여 대상 액추에이터를 설계하는 과정에서 생겨나는 인적, 시간적 투자를 현저히 감소시킬 것이며, 비례솔레노이드 성능향상 연구에 매우 유용한 틀이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) 윤소남, 함영복, "배기브레이크용 솔레노이드밸브의 특성 해석", Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 1, pp. 190~195, 2004.
- 2) B. P. Lequesne, "Finite Element Analysis of a Constant-Force Solenoid for Fluid Flow Control," IEEE, Tran. Industrial Application, Vol. 24, No. 4, pp. 574~581, 1988.

- 3) 윤소남 외 4인, "비례전자솔레노이드의 기본특성에 관한 연구", 한국동력기계공학회 추계학술대회 논문집, pp. 193~198, 2003.
- 4) 송창섭, 윤장상, 서종범, "비례전자식 유량제어밸브의 해석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 10권, 제 1호, pp. 100~107, 1993.
- 5) 고창섭 외 4인, "경계요소법을이용한보이스코일 모터의 형상최적설계", 전기학회지, 44권 3호, pp. 274~278, 1993.
- 6) J. S. Ryu et al., "Optimal Design of Constant-force Solenoid for Pressure Control Using Axisymmetric Nonlinear Parameterized Sensitivity Analysis", The 11th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, pp. 390, 2004.
- 7) S. N. Yun, "Electro-Magnetic Proportional Solenoid", JFPS(Journal of the Japan Fluid Power System Society), Vol. 35, No. 5, pp. 342~347, 2004.
- 8) S. N. Yun et al., "Optimal Design of Electro-Magnetic Proportional Solenoid using Genetic Algorithm", Proceedings of the 50th national conference on fluid power(NCFP 105-7.6), pp. 243~247, 2005.
- 9) S. N. Yun et al., "Pressure control technique using proportional solenoid actuator", 9th Scandinavian International Conference on Fluid Power, pp. 1~15, 2005.
- 10) J. S. Ryu et al., "Optimal Shape Design of 3D Nonlinear Electromagnetic Devices Using Parameterized Design Sensitivity Analysis, IEEE, Transaction on Magnetics, Vol. 41, No. 5, pp. 1792~1795, 2005.