솔레노이드 액추에이터의 비선형 동적응답에 대한 구조최적설계

백 석 흠¹⁾ · 김 현 수^{*1)} · 장 득 열²⁾ · 이 승 범³⁾ · 권 영 석³⁾ · 노 의 동³⁾ · 이 창 훈³⁾

동아대학교 기계공학과¹⁾ · 강원대학교 기계공학과²⁾ · (주)유니크 기술연구소³⁾

Structural Optimization for Nonlinear Dynamic Response of Solenoid Actuator

Seokheum Baek¹⁾ · Hyunsu Kim^{*1)} · Deukyul Jang²⁾ · Seungbeom Lee³⁾ · Youngseok Kwon³⁾ · Euidong Ro³⁾ · Changhoon Lee³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Kangwon National University, Gangwon 245-711, Korea

³⁾Research & Development Center of UNICK Corp., 10-1 Jukhok-ri, Jinyoung-eub, Gimhae, Gyeongnam 621-801, Korea
(Received 26 March 2012 / Revised 29 August 2012 / Accepted 30 August 2012)

Abstract : This paper proposes a design optimization approach for core of solenoid actuators by combining optimization techniques with the finite element method (FEM). A solenoid is an important element part which hydraulically controls a transmission system, etc. The demanded feature of the solenoid is that it performs an electromagnetic force output being constant regardless of the stroke and being proportional to coil current. The plunger compresses a spring with a minimum force of 12 N over an 1.7 mm travel. The orthogonal array, analysis of variance (ANOVA) techniques and response surface optimization, are employed to determine the main effects and their optimal design variables. The methodology is demonstrated as a optimization tool for the core design of a solenoid actuator.

Key words : Electromagnetic analysis(전자기 해석), Solenoid actuator(솔레노이드 액추에이터), Dynamic response(동적응답), Polynomial surrogate model(다항식 대리모델), Structural optimization(구조최적설계)

1. 서 론

차량의 변속기용 솔레노이드 밸브(Solenoid valve)는 유압을 제어하는 유압부와 밸브의 동작을 담당하는 액추에이터(Actuator)로 구성된다. 자동변속기 제어 압력을 생성하는 솔레노이드 밸브는 변속성과 품질에 밀접한 관계가 있다. 따라서 솔레노이드 액추에이터의 설계는 액추에이터 거동에 대해 정확한 제어 특성과 범위에 대한 예측이 필요하다.

솔레노이드 액추에이터는 작은 변위에 대해 직선 운동이 가능하고 구조가 간단하여 신뢰성과 제작의 편리성이 있다. 액추에이터는 플런저(Plunger)의 이

동에 따라 재료의 자기저항 특성에 의해 직선 거동을 제어할 수 있다.¹⁻³⁾

Fig. 1은 본 논문에서 사용된 자동변속기용 솔레노이드 액추에이터의 구성도를 나타낸다. 솔레노이드 액추에이터는 코어, 요크, 케이스, 코일, 플런저로 구성된다. 플런저의 이동에 따른 자속밀도(Flux density)의 변화로 인해 플런저에 작용하는 전자기력(Electromagnetic force)이 변화하여 코어방향으로 동작하게 된다. 플런저 거동 성능은 전체 이동거리(Stroke) 0 mm~1.7 mm에 대한 동일한 전자기력을 얻는 것이 가장 중요하다. 플런저 거동은 자동변속기용 클러치의 변속 성능과 내구성에 많은 영향을 끼친다.³⁾

*Corresponding author, E-mail: kimhsa@dau.ac.kr

Fig. 1 Schematic of solenoid actuator

이러한 관점에서, 본 논문에서는 솔레노이드 액추에이터의 코어 형상에 대해 분산분석(Analysis of variance)과 직교다항식(Orthogonal polynomial) 기반 대리모델(Surrogate model)을 이용해서 최적설계를 수행하였다.^{4,8)} 플런저의 비선형 전자기 특성에 대한 능률적인 코어의 최적설계를 위해 직교배열표를 이용한 실험점에서 직교다항식을 이용하여 각 응답의 근사모델을 구성하였다. 이 근사모델은 플런저의 이동거리에 대하여 대표적인 플런저 위치인 0.1 mm, 0.8 mm, 1.5 mm에서 동일한 전자기력을 가지면서 코어의 중량 최소화를 설계목표로 고려해서 최적설계 루프에 통합된다. 최적설계 결과로부터 최적 코어 형상을 제안하고 플런저의 동적응답에 대한 성능향상과 그 유효성을 설명하였다.

2. 솔레노이드 액추에이터의 전자기 해석

2.1 전자기력의 계산

솔레노이드 밸브에서 전자기장 해석은 입력전류가 고정되어 있는 정적해석과는 달리 도전체인 연자성 재료의 내부에 발생하는 와전류(Eddy current)를 고려해서 해석한다. Maxwell 방정식^{9,10)}은 식 (1), (2)에 의해 자기벡터포텐셜(Magnetic vector potential) A 를 시스템 변수로 하는 시변계 자기 방정식은 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \hat{A}) = \hat{J}_0 + \hat{J}_e + \hat{J}_m \quad (3)$$

여기서 H 는 자기장의 세기(Magnetic field intensity), B

는 재료의 자속 밀도, μ_0 는 공극의 투자율(Relative permeability)을 나타낸다. 솔레노이드 내부에 발생하는 자속은 전류밀도 J_0 로 발생하는 자속과 와전류 밀도 J_e 로 발생하는 자속 그리고 연자성체(Soft magnetic material)의 자화 J_m 에 의해 발생하는 자속이 합성되어 나타낸다. 빠른 응답을 요구하는 솔레노이드 액추에이터일수록 전자기장 해석에서 와전류 성분이 중요하다.

플런저에서 발생하는 자기력은 두 영구자석 사이에서 발생하는 힘과 같이 헤밀턴의 원리에 의해 발생한다. 본 연구에서 전자기력의 계산은 가상일의 원리(Principle of virtual work)를 사용한다.^{11,12)} 코어와 플런저 판(Plate) 사이의 변위 s 의 방향에서 판은 실제로 힘을 계산하는 동안 이동되지 않으며 판에 관한 힘은 다음과 같은 관계에 의해 주어진다.

$$F_{plate} = \left. \frac{dW(s, i)}{ds} \right|_{i=const} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\int_V \left(\int_0^H B \cdot dH \right) dV \right] \quad (4)$$

여기서 $W(s, i)$ 는 시스템의 자기에너지(Magnetic co-energy)를 나타내고 전류 i 는 상수로 적용된다.

2.2 유한요소해석

Table 1은 솔레노이드 액추에이터의 각 부분에 대한 재료 물성치를 나타낸 것이다.

Fig. 2는 범용 전자기 해석프로그램 Maxwell¹²⁾을 이용한 해석모델의 경계조건과 해석방법을 나타낸 것이다. 해석 정밀도를 위해 Maxwell의 Automatic Adaptive Meshing 방법과 더미(Dummy) 방법을 이용하여 조밀한 격자를 생성하였다. 해석 모델은 축대칭 모델이며, 2D 해석이 가능한 모델이다. 해석 영역은 입력 전류로 인해 발생하는 자속이 모델 내부에만 존재하기 않기 때문에 자속의 흐름에 방해가 되지 않도록 충분히 설정하였다.

Fig. 3은 정적 자기장(Static magneto) 해석에 대한 Flux Intensity와 Flux Density의 결과를 나타낸 것이다. 해석조건은 코일의 턴 수 510회, 입력 전류는 0 mA~1100 mA, 플런저의 이동 공극은 1.7mm이다. 본 논문의 승용차 자동변속기용 솔레노이드 밸브는 약

Fig. 2 Axisymmetric FE modeling for design domain of solenoid actuator

Table 1 Material property of the solenoid actuator

Part	Material	Relative permeability
Core	SUM24L	BH nonlinear characteristic
Yoke	SUM24L	BH nonlinear characteristic
Case	SPCE	BH nonlinear characteristic
Plunger	KM35F	BH nonlinear characteristic
Others	Stainless	1.0

20 bar 정도의 유압제어를 위해 솔레노이드 액추에이터에서 플런저의 이동거리에 따라 높은 전자기력과 일정한 선형적 특성을 유지하는 것이 필요하다. 선형적 특성을 유지하는 것은 제어 가능한 범위가 넓어짐을 의미함으로 유압 및 유량을 제어하기에도 유리하다.

Fig. 4 Magnetic force distribution versus plunger stroke

Fig. 4는 다양한 코어 재료에 대한 플런저의 이동 거리에 따른 전자기력의 변화를 나타낸 것이다. 전자기력은 재료의 종류에 따라 플런저 이동 거리에 대해 비선형성이 강하게 나타난다. 또한 전자기력의 전체 변동 폭이 약 10 N으로 매우 크다. 이러한 결과는 솔레노이드 액추에이터의 작동구간에 대한 정밀한 유압(또는 유량) 제어가 어렵고 사용 범위가 제한적이다. 따라서 플런저 이동 거리에 대한 좀 더 안정적이고 일정한 전자기력을 가지는 거동을 얻기 위해서 최적설계가 요구된다.

3. 코어 형상의 구조최적설계

3.1 설계모델과 최적설계문제의 정식화

본 논문은 솔레노이드 액추에이터의 성능 향상에

Fig. 3 Typical results of the numerical analysis for solenoid actuator : (a) 2D flux line, (b) 2D flux intensity and (b) 3D flux density

Table 2 Design variables and their levels

Design variable	Description	Unit	Level1	Level2	Level3	Level4
x_1	Inside diameter	mm	7.5	8	8.5	9
x_2	Tip length	mm	0.3	0.5	0.7	0.9
x_3	Conical angle	Deg.	10	25	40	55
x_4	Tip thickness	mm	0.2	0.4	0.6	0.8

Fig. 5 Design variable of core shape for solenoid actuator

주요 요인을 코어의 형상으로 판단하고 코어의 형상에 대한 설계변수: 내부직경(x_1), 팁의 길이(x_2), 콘의 각도(x_3), 팁의 두께(x_4)로 선정하였다. Fig. 5는 선정된 코어 형상의 설계변수를 나타내며, Table 2는 설계변수와 그 수준수이다.

설계목표는 플런저의 전체 이동거리 0 mm-1.7 mm에 대하여 대표적인 구간 위치인 0.1 mm, 0.8 mm, 1.5 mm에 요구되는 전자기력의 범위 12 N~13 N을 얻으면서 코어의 중량 최소화를 결정하는 것이다.

코어의 재료 밀도가 일정하다고 가정하면 축대칭 단면영역의 $y = wx_i$ 를 최소화 하고 플런저의 이동거리의 대표적인 위치에서 요구되는 전자기력의 범위를 만족하는 최적설계문제를 정식화하면 다음의 식 (5)와 같다.

Find x_1, x_2, x_3, x_4

to minimize $y_{area} = wx_i$

subject to $12 \text{ N} \leq y_{0.1}(x_i) \leq 13 \text{ N}$

$12 \text{ N} \leq y_{0.8}(x_i) \leq 13 \text{ N}$

$12 \text{ N} \leq y_{1.5}(x_i) \leq 13 \text{ N}$

$x_i^{lower} \leq x_i \leq x_i^{upper}, i = 1, 2, 3, 4$ (5)

여기서 $y_i(x_i)$ 는 각 응답에 대한 근사모델이다. 근사모델에 대한 최적해는 ANSYS V.11의 최적설계 모델과 연결해서 유용방향법(Feasible direction method)^{13,14}을 이용해서 계산하였다.

3.2 직교다항식 기반 근사모델

솔레노이드 액추에이터의 코어 형상에 대한 최적설계 방법은 반응표면방법론이 포함된 실험계획법으로 구성된다. 반응표면모델에 대한 전통적인 접근의 두가지 중요한 부분은 어떤 설계점의 값이나 미분값을 이용하는 테일러 전개(Taylor series)와 적분법을 이용하는 직교다항식 전개(Orthogonal polynomial series)가 있다. 직교다항식 전개에 비해 테일러 전개 형태의 반응표면모델은 설계변수의 범위와 응답의 변동이 작은 변화에 대해서만 적합하다.

설계변수가 직교한다는 것은 어떤 변수의 효과가 다른 변수의 효과에 영향을 미치지 않는다는 것이다. 따라서 응답의 변동크기를 해석하는 경우(예를 들면 불확실성, 피로해석) 설계변수를 직교시킨 실험계획이 효율적이다. 또한 직교다항식은 각항이 서로 독립적이기 때문에 계수의 추정을 저차항에서 고차항으로 축차적으로 구한다. 이것은 고차항의 계수를 모르거나 계수차이가 크게 되더라도 기저(Base)를 정규화(Normalize)할 수 있어 효율적인 회귀식의 표현이 가능하다.^{6,7)} 본 논문의 코어 형상에 대한 반응표면모델은 설계변수 x 의 차수가 n 인 Chebyshev 직교다항식 $p_n(x)$ 을 이용한다. 2차 다항회귀 모델 형태로 나타내면 아래의 식 (6)으로 전개된다.

$$y = b_0 + b_1(x - \bar{x}) + b_2\left[(x - \bar{x})^2 - \frac{a^2 - 1}{12}h^2\right] + b_3\left[(x - \bar{x})^3 - \frac{3a^2 - 7}{20}(x - \bar{x})h^2\right] + b_np_n(x) + \dots \quad (6)$$

$$p_0(x) = 1, n = 0$$

$$p_1(x) = x - \bar{x}, n = 1$$

$$p_2(x) = (x - \bar{x})^2 - \frac{(a^2 - 1)}{12}h^2, n = 2$$

$$p_n(x) = p_{n-1}(x)p_1(x) - (n-1)^2\{a^2 - (n-1)^2\}h^2p_{n-2}(x)/[4\{4(n-1)^2 - 1\}], n = 3, 4, 5 \dots$$

여기서 $\bar{x}$: 설계변수의 평균, a : 수준수, h : 수준간격 계수이다. 차수 n 은 수준수 a 보다 작아야 하며 각 설계변수의 최대 차수는 $a-1$ 이 된다. b_0 , b_i 는 회귀 계수로 식 (7), (8)로 나타낸다.

$$b_0 = T/lm = \bar{y} \quad (7)$$

$$b_i = \sum_{k=1}^a p_i(x_k) y_k / \sum_{k=1}^a p_i^2(x_k), \quad k=1, 2, \dots, a \quad (8)$$

여기서 $p_i(x_k)$ 의 x_k 는 x 의 각 수준수, y_k 는 각 수준에 대한 해석의 평균을 나타낸다. 직교다항식을 이용하는 장점은 분산분석(Analysis of variance: ANOVA)에 있다. ANOVA를 이용한 직교다항식은 응답의 총 변동을 1차, 2차, $n-1$ 차의 성분으로 분해가 가능하다. 따라서 각 차수의 상관관계와 민감도 평가에 의해 어떤 차수까지 표현하는 것이 적절한가의 평가를 할 수 있다.

3.3 최적설계 과정 및 결과

Table 3은 코어에 대한 4개의 설계변수에 대한 L16 직교배열표의 실험배치(Design matrix)와 그 해석결과를 나타낸 것이다. 각 응답의 반응표면모델을 위한 설계변수와 차수선택은 ANOVA 결과에서 유의하다고 판단되는 차수항을 선택하고 Chebyshev 직교다항식 계수(Orthogonal polynomial coefficient)^{5,7)}를 이용한다. Chebyshev 직교다항식은 저차항이 우선된 각 차수의 항이 서로 독립하고 있는 특징을 가지고 있기 때문에 고차항의 계수를 모르거나 계수 차이가 크게 되더라도 계수의 추정은 저차항에서 고차항으로 축차적으로 구한다.

Table 4에서 7은 코어의 단면적과 코어 각 위치의 자기력에 대한 ANOVA 결과를 나타낸다. ANOVA

Table 4 Analysis of variance for core area

Design variable		Sum of squares	DOF	Variance	F-ratio	Effective ratio(%)
x_1	Linear	32.6210	1	0.0775	0.69	1
	Quadratic	0.0153	1	0.0153	0.14	0.2
x_2	Linear	0.568	1	0.7449	6.6	9.6
	Quadratic	0.578	1	0.578	5.12	7.4
x_3	Linear	11.3877	1	4.0654	36	52
	Quadratic	1.8557	1	1.8557	16.43	24
x_4	Linear	6.7286	1	0.4154	3.68	5.3
	Quadratic	0.0364	1	0.0364	0.32	0.46
Error		0.7904	7	0.1129		
Total		54.5811	15		68.98	100

는 각 설계변수와 교호작용(Interaction)이 응답에 미치는 영향에 대해 다항식 성분으로 분리해서 평가한다. 모델의 각 항에 대해 제곱합(Sum of square), 자유도(DOF), 분산(Variance)으로부터 F-통계량과 영향도가 표시된다. 제곱합은 순차제곱합을 이용한다. 순차제곱합 이전에 포함된 항에 하나의 새로운 항이 추가된 모델에서의 제곱합이다. 변수의 선택은 F-통계량과 전체 분산의 합에 대한 백분율로 나타내는 영향도(Effective ratio)와 단계별(Forward and backward elimination) 회귀방법으로 결정된다. 예를 들면, Table 4는 코어 단면적에 대한 ANOVA 결과이다. 코어 면적의 근사모델에 대한 통계적으로 유의한 모델 설명력에 영향을 미치는 변수는 설계변수 x_3 이다. 설계변수 x_3 은 1차 및 2차항의 영향도 합이 76%로 가장 많은 영향을 미친다.

Table 5-7은 플런저 각 위치에서 전자기력에 대한 ANOVA 결과를 나타낸다. 플런저 위치가 0.1 mm와 1.5 mm에서 전자기력에 영향을 많이 미치는 설계변수는 x_4 로 각각 51%, 48.7%이다. 이와 반대로, 플런저 위치 0.8 mm는 x_3 이 22.1%로 가장 영향이 크다. 플런저 중간 위치는 교호작용의 영향이 약 56%로 매우 크다. 특히 코어에 대한 콘의 각도와 팁의 두께의 교호작용 x_3x_4 가 47%이다. 플런저 전체 이동거리에 대한 전자기력의 비선형성은 설계변수가 각 위치마다 영향을 미치는 기여율이 다르기 때문이다. 따라서 ANOVA 기능은 본 연구의 동일한 전자기력을 얻기 위한 통계적 모델링에 대해 설계변수가 주는 영향도를 다항식 성분으로 평가하고 설계 문제

Table 3 Layout and FEA results for L₁₆ orthogonal arrays

Exp.	x_1	e	x_2	x_3	x_4	Area (mm ²)	Magnetic force y_i (N)		
							0.1mm	0.8mm	1.5mm
1	1	1	1	1	1	50.058	10.601	11.212	16.643
2	1	2	2	2	2	53.433	15.247	14.279	10.651
3	1	3	3	3	3	54.405	16.074	13.352	7.004
4	1	4	4	4	4	54.987	15.609	10.565	5.223
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
16	4	4	1	3	2	50.391	9.991	9.884	13.074

Table 5 Analysis of variance for magnetic force at the plunger stroke 0.1 mm

Design variable		Sum of squares	DOF	Variance	F-ratio	Effective ratio(%)
x_1	Linear	0.1786	1	0.3012	2.24	4
	Quadratic	0.3819	1	0.304	2.26	4
x_2	Linear	18.0481	1	0.0002	0.01	0.018
	Quadratic	8.7675	1	0.0023	0.02	0.036
x_3	Linear	10.2445	1	0.0069	0.05	0.09
	Quadratic	1.4256	1	0.0929	0.69	1.2
x_4	Linear	66.0625	1	2.0632	15.36	28
	Quadratic	0.6328	1	1.7335	12.91	23
x_2x_4	Interaction	0.1023	1	0.5417	4.03	7.2
x_3x_4	Interaction	0.4829	1	0.1271	0.95	1.7
$x_2x_4^2$	Interaction	1.6919	1	1.5398	11.46	21
$x_3^2x_4$	Interaction	0.7859	1	0.7859	5.85	10
Error		0.4029	3	0.1343		
Total		109.2075	15		55.83	100

Table 6 Analysis of variance for magnetic force at the plunger stroke 0.8 mm

Design variable		Sum of squares	DOF	Variance	F-ratio	Effective ratio(%)
x_1	Linear	3.7144	1	0.4149	6.87	4.2
	Quadratic	5.128	1	0.4202	6.96	4.2
x_2	Linear	22.7314	1	0.0754	1.25	0.76
	Quadratic	0.3975	1	0.9797	16.22	9.9
x_3	Linear	27.3406	1	1.2681	20.99	13
	Quadratic	10.2816	1	0.9031	14.95	9.1
x_4	Linear	3.6603	1	0.1374	2.27	1.4
	Quadratic	0.0435	1	0.1713	2.84	1.7
x_1x_2	Interaction	0	1	0.0892	1.48	0.9
x_1x_3	Interaction	0.1806	1	0.2815	4.66	2.8
x_2x_3	Interaction	0.5038	1	0.2409	3.99	2.4
x_3x_4	Interaction	4.6347	1	4.6347	76.71	47
$x_1^2x_2$	Interaction	0.017	1	0.0933	1.54	0.94
$x_2x_3^2$	Interaction	0.1905	1	0.1905	3.15	1.9
Error		0.0604	1	0.0604		
Total		78.8842	15		163.88	100

에 대한 통찰력을 얻을 수 있다. ANOVA를 기반으로 설계변수의 유의한 차수와 교호작용을 고려해서 코어의 면적과 플런저 위치에 대한 전자기력의 근사모형을 나타내면 식 (9)-(12)와 같다.

$$y_{area} = 72.24 - 4.596x_1 + 0.1237x_1^2 + 6.545x_2 - 4.752x_2^2 + 0.14869x_3 - 0.001514x_3^2 + 4.092x_4 - 1.192x_4^2 \quad (9)$$

Table 7 Analysis of variance for magnetic force at the plunger stroke 1.5 mm

Design variable		Sum of squares	DOF	Variance	F-ratio	Effective ratio(%)
x_1	Linear	4.252	1	1.446	22.55	5.5
	Quadratic	1.585	1	1.585	24.71	6
x_2	Linear	4.554	1	4.229	65.94	16
	Quadratic	3.101	1	3.101	48.35	12
x_3	Linear	22.676	1	2.627	40.96	10
	Quadratic	0.452	1	0.452	7.04	1.7
x_4	Linear	99.342	1	10.546	164.43	40
	Quadratic	2.298	1	2.298	35.83	8.7
Error		0.499	7	0.064		
Total		138.71	15		409.81	

$$y_{stroke\ 0.1} = -350 + 87.52x_1 - 5.43x_1^2 + 0.92x_2 + 1.4x_2^2 + 0.0789x_3 + 0.003195x_3^2 + 70.88x_4 - 79.44x_4^2 - 86.31x_1x_4 + 124.11x_2x_4 - 0.015763x_3^2x_4 \quad (10)$$

$$y_{stroke\ 0.8} = -257.3 + 65.32x_1 - 3.994x_1^2 + 188.7x_2 + 8.391x_2^2 + 0.9899x_3 - 0.006516x_3^2 + 3.511x_4 + 2.881x_4^2 - 49.81x_1x_2 - 0.03607x_1x_3 - 0.362x_2x_3 - 0.32885x_3x_4 + 3.092x_1^2x_2 + 0.004922x_2^2x_3 \quad (11)$$

$$y_{stroke\ 1.5} = -52.94 + 19.851x_1 - 1.259x_1^2 - 15.594x_2 + 11.006x_2^2 - 0.11952x_3 + 0.000747x_3^2 - 20.618x_4 + 9.475x_4^2 \quad (12)$$

Fig. 6은 식 (9)~(12)의 직교다항식 기반 근사모형과 직교배열표를 이용한 전자기장 해석결과를 비교한 것이다. 근사값이 오차는 존재하지만 추정값의 위치와 함수값이 효과적으로 근사되고 있음을 알 수 있다. 근사모형의 정확도는 결정계수(Coefficient of determination) R^2 및 수정결정계수(Adjusted R^2) R_{adj}^2 에 의해 평가된다. 코어의 면적은 $R = 98.55\%$ ($R_{adj}^2 = 98.9\%$)이고, 플런저 위치 0.1 mm, 0.8 mm, 1.5 mm에 대해 각각 99.63% (98.16%), 99.92% (98.85%), 99.68%(99.31%)로 근사화는 좋은 품질을 나타낸다.

Table 8과 Fig. 7은 근사모형과 유용방향법을 이용해서 최적설계를 수행한 결과를 나타낸 것이다. 최적설계는 초기설계보다 플런저의 주요 이동거리에 대해 선형적 특성을 가지며 전자기력이 향상된

(a) Core area

(b) Stroke 0.1 mm

(c) Stroke 0.8 mm

(d) Stroke 1.5 mm

Fig. 6 Relation between electromagnetic analysis and run number in DOE

Table 8 Optimal solution

Step	Area (mm ²)	y _{0.1} (N)	y _{0.8} (N)	y _{1.5} (N)
Initial	50.6	10.83	15.32	11.99
Optimal	50.7	12.01	12.98	12.08
Reanalysis	50.8	11.54	12.9	12.55

Fig. 7 Comparison between optimal and reanalysis

성능을 보인다. 최적해는 근사모델을 이용하여 얻었기 때문에 실제 모델을 통하여 재해석을 수행하였다. 최적해에 대한 재해석의 결과로부터 코어의 단면적은 50.8 mm², 플런저 위치 0.1 mm에서 11.54 N, 0.8 mm에서 12.9 N, 1.5 mm에서 12.55 N이다. 근사모델과 유한요소해석의 재해석 결과를 비교하면, 코어의 단면적은 0.13%, 플런저 위치에서의 힘은 각각 4%, 0.6%, 3.7%의 오차가 발생하였다. 따라서 근사모델은 실제의 경향을 잘 나타내고 있다.

Fig. 8은 코어 형상에 대한 초기설계(녹색)와 최적설계(적색)의 형상을 비교한 것이다. 코어의 최적모델은 초기모델에 비해 내부 직경이 늘어나고 콘의 각도가 작아지는 형상이다. 또한 팁 길이가 작아진 구조이다. 이것은 고전류에서 높은 힘을 사용할 수

Fig. 8 Initial design vs. optimal design

있기 때문에 넓은 범위에서 유압을 제어할 수 있다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 논문은 직교다항식 기반 근사모델을 이용하여 차량 변속기용 솔레노이드 액추에이터의 성능 향상을 위한 구조최적설계를 수행하였다. 능률적인 최적설계를 위해 직교배열표를 이용한 실험점에서 ANOVA와 직교다항식을 이용하여 각 응답의 근사모델을 구성하였다. 최적설계 결과로부터, 플런저 위치에 따른 성능을 비교하면 초기모델 대비 0.1 mm 구간에서 0.7 N 증가로 6.5%, 0.8 mm 구간에서의 성능은 2.4 N 감소로 15%, 1.5 mm 구간에서는 0.6 N 증가로 4.7% 향상되었다. 따라서 Fig. 7에서 나타내듯이 플런저 전체 이동거리에서 전자기력은 선형적 거동 특성을 가지며 약 12 N이 전 구간에서 유지할 수 있도록 개선되었다. 본 논문의 코어 형상은 (주)UNICK에서 특허 출원하여(10-2010-0082043) 현재 특허 등록(10-1016189-0000)이 되어 있다.

후 기

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- 1) S. N. Yun, D. W. Yun and Y. B. Ham, "Characteristics Analysis of Solenoid Actuator for Common Rail System," Transactions of KSAE, Vol.17, No.6, pp.31-38, 2009.
- 2) L. Encica, D. Echeverría, E. A. Lomonova, A. J. A. Vandenput, P. W. Hemker and D. Lahaye, "Efficient Optimal Design of Electromagnetic Actuators Using Space Mapping," Struct. Multidisc. Optim., Vol.33, No.6, pp.481-491, 2007.
- 3) G. S. Lee, H. J. Sung, H. C. Kim and H. W. Lee, "Flow Force Analysis of a Variable Force Solenoid Valve for Automatic Transmissions," ASME J. Fluids Eng., Vol.132, No.3, pp.031103 (1-7), 2010.
- 4) W. Gautschi, Orthogonal Polynomials: Applications and Computations, Acta Numerica, Cambridge University Press, 1996.
- 5) S. H. Park, Robust Design and Analysis for Quality Engineering, Chapman & Hall, London, 1996.
- 6) S. H. Baek, S. S. Cho, H. S. Kim and W. S. Joo, "Trade-off Analysis in Multi-objective Optimization Using Chebyshev Orthogonal Polynomials," J. Mech. Sci. Technol., Vol.20, No.3, pp.366-375, 2006.
- 7) S. H. Baek, S. S. Cho and W. S. Joo, "Response Surface Approximation for Fatigue Life Prediction and Its Application to Multi-Criteria Optimization with a Priori Preference Information," Trans. of the KSME(A), Vol.33, No.2, pp.114-126, 2009.
- 8) S. H. Baek, K. M. Kim, S. S. Cho, D. Y. Jang and W. S. Joo, "A Sequential Optimization Algorithm Using Metamodel-Based Multilevel Analysis," Trans. of the KSME(A), Vol.33, No.9, pp.892-902, 2009.
- 9) J. L. Coulomb and G. Meunier, "Finite Element Implementation of Virtual Work Principle for Magnetic for Electric Force and Torque Calculation," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-2D, No.5, pp.1894-1896, 1984.
- 10) M. Gyimesi, D. Lavers, T. Pawlak and D. Ostergaard, "Application of the General Potential Formulation in the ANSYS® Program," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.29, pp. 1345-1347, 1993.
- 11) F. C. Moon, Magneto-Solid Mechanics, New York, John Wiley and Sons, 1984.
- 12) Maxwell 14.0, ANSYS Mechanical and Workbench Release 13.0, ANSYS, Inc., 2010.
- 13) J. J. More and S. J. Wright, Optimization Software Guide, SIAM Publications, Philadelphia, 1993.
- 14) ANSYS, Release 11.0 Documentation, SAS IP, Inc., 2007.