

반응표면법을 이용한 최소동작시간을 갖는 DC 솔레노이드 밸브의 형상 최적 설계

論 文

55B-9-3

Shape Optimization of DC Solenoid Valve to Minimize the Time of Action Using Response Surface Method

尹熙盛* · 黃仁聖* · 金東洙** · 尹蘇南*** · 高彰燮*

(Hee Sung Yoon · In Sung Hwang · Dong Soo Kim · So Nam Yun · Chang Seop Koh)

Abstract - In general, a DC solenoid valve is evaluated by the performances such as the attraction force at maximum and minimum strokes, temperature rising, power consumption and time of action. The importance of each performance may be different according to the specific application purpose. When the temperature rising and power consumption are fixed, however, the performance of DC solenoid valve is usually evaluated by the attraction force at maximum and minimum strokes and time of action. In this paper, the shape of the pole face of plunger and core is optimized to increase the attraction force at maximum stroke, and thereby to minimize the time of action. For the shape optimization, (1+1) evolution strategy is incorporated with the response surface method(RSM) and finite element method(FEM).

Key Words : DC Solenoid Valve, Shape Optimization, Time of Action, Response Surface Method

1. 서 론

DC 솔레노이드 밸브(DC Solenoid Valve)는 전기적인 신호를 작은 범위의 기계적인 직선운동으로 변환시켜 압력, 유량, 방향 등을 제어하는 장치로, 모터를 이용하는 것 보다 구조가 간단하고 가격이 저렴하면서도 일정한 범위 (stroke) 내에서는 비교적 정밀제어가 가능하기 때문에 유압 및 공압 제어를 위하여 널리 이용되고 있다. 이러한 DC 솔레노이드 밸브에서 요구되는 성능은 그 적용분야에 따라 달라지나, 일반적으로는 최대 또는 최소 스트로크(stroke)에서의 흡입력, 정상상태에서의 온도 상승, 소비 전력, 전원이 인가되는 순간부터 플런저가 원하는 위치로 이동하는데 소요되는 동작 시간(time of action), 그리고 전원이 인가된 후 플런저가 실제로 움직이기 시작하는 순간부터 원하는 위치로 이동하는데 소요되는 이동시간(time of motion) 등이다. 그러나 대부분의 응용에서 정상상태에서의 온도상승과 소비전력이 정해지면, DC 솔레노이드 밸브의 성능은 주로 동작시간에 의하여 평가되어 진다[1,2]. 일반적으로 DC 솔레노이드 밸브의 동작시간은 흡입력과 매우 밀접한 관계를 가지며, 일반적으로는 흡입력이 클수록 동작시간은 짧아지는 특성을 갖는다. 이러한 이유로 종래의 설계에서는 동작시간을 단축시키기 위하여 흡입력을 증가시키는 방법을 채택하고, 이를 실현하기 위하여 기자력을 증가시키는 설계를 해왔다. 그러나 이 경우에는 정격 전류가 증가하거나 또는 권선 수가 증가하게

되어, 필연적으로 소비전력을 증가시켜 온도 상승을 초래하게 된다. 따라서 이러한 방법은 DC 솔레노이드 밸브의 소비전력과 온도상승의 제한치가 일정치 이하로 제한되는 경우에는 적용이 어렵다. 따라서 소비전력과 온도상승이 일정치 이하로 제한되는 경우에는 주어진 소비전력과 온도상승의 조건하에서 DC솔레노이드 밸브의 구조를 변경하거나 또는 코어와 플런저의 자극면(pole face)의 형상을 최적화하여 흡입력을 크게 하고, 이를 통하여 동작시간을 단축시키기 위한 연구가 필요하다.

DC 솔레노이드 밸브의 동작시간 단축을 위한 최적설계에 관한 종래의 연구는 다음과 같다. 문헌[3]에서는 유한요소법을 이용하여 DC 솔레노이드에서 발생하는 흡입력이 플런저의 이동구간 전체에서 최대가 되도록 플런저의 자극면의 형상을 최적화 하였다. 그 결과 최대 및 최소의 스트로크에서 동시에 흡입력이 증가되는 자극면의 형상을 구하였다. 그러나 이 방법은 전체적으로 흡입력이 증가하였기 때문에 솔레노이드 밸브의 동작시간이 단축된다는 점에 있어서는 그 효과가 분명히 인정되나, 이 결과가 솔레노이드 밸브의 동작시간을 최소로 하는지의 여부는 분명치 않다. 왜냐하면 DC 솔레노이드 밸브의 동작시간(time of action)에는 전원이 인가된 순간부터 플런저가 실제로 움직이기 시작하는 순간까지의 시간 (즉, 동작시간에서 이동시간을 제외한 시간)이 상당한 비중을 차지하고, 이 시간을 줄이기 위해서는 최소 스트로크에서의 흡입력이 다소 감소하더라도 최대 스트로크에서의 흡입력이 큰 설계가 더 효과적일 수 있기 때문이다. 이러한 내용은 문헌[1]에서도 언급이 되고 있으며, 플런저와 코어의 자극면의 형상에 따라 스트로크에 따른 흡입력 특성이 달라짐을 나타내고 있다. 즉, 자극면의 형상이 conical-faced 형인 경우 flat-faced 형에 비해 최대 스트로크에서의 흡입력은 증가하나 최소 스트로크에서의 흡입력은 다소 감소하는 특성을 나타낸다. 이러한 사실로 미루어 볼 때 흡입

† 교신저자, 正會員 : 忠北大 電氣電子컴퓨터 工學部 教授
E-mail : kohcs@chungbuk.ac.kr

* 學生會員 : 忠北大 大學院 電氣工學科

** 正會員 : 韓國機械研究院 尖端産業技術硏究部

*** 學生會員 : 韓國機械研究院 尖端産業技術硏究部

接受日字 : 2006年 6月 22日

最終完了 : 2006年 7月 25日

력이 커질수록 플런저의 동작시간은 단축되는 것이 사실이나, 구체적으로는 스트로크에 따른 흡입력의 절대적인 크기 뿐만 아니라 흡입력의 파형도 솔레노이드의 동작시간에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 문헌[4]에서는 DC 솔레노이드 밸브의 고정자 철심에 슬릿(slit)을 넣어서 철심에서 발생하는 와전류를 방지하여 동작시간을 감소시키는 방법을 제안하였으나, 이 방법은 소형 솔레노이드 밸브의 경우에는 가공이 어렵다는 단점이 있다. 또한 문헌[5]에서는 자성체로 이루어진 가이드 튜브(magnetic guide tube)에 비자성 링(non-magnetic ring)을 삽입함으로써 플런저의 운동 속도를 증가시키는 방법을 제안하였다. 이 방법은 가이드 튜브가 비자성체로 이루어진 경우에는 적용할 수 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 DC 솔레노이드 밸브의 동작시간을 단축하기 위한 최적설계를 함에 있어, 기존의 연구에서와 같이 플런저에 작용하는 흡입력을 최대가 되도록 설계함으로써 간접적으로 동작시간이 단축되도록 하지 않고, 동작시간을 직접 목적함수로 하여 동작시간이 단축되는 최적설계를 시도하였다. 솔레노이드 밸브의 동작시간은 time-stepping 유한요소법을 이용한 자체해석과 전자력 해석, 그리고 플런저의 운동 방정식을 해석한 후에 계산된다. 따라서 플런저 또는 코어의 형상을 표현하는 설계변수와 목적함수인 동작시간은 그 관계가 매우 복잡하여 설계변수에 대한 목적함수의 미분치(gradient vector)를 계산하는 것이 매우 어렵다[6, 7]. 이러한 이유로 솔레노이드 밸브의 동작시간을 단축시키기 위한 최적설계에는 설계민감도해석 또는 Newton법 등과 같이 목적함수의 미분치의 계산을 필요로 하는 결정론적 최적화 방법(Deterministic optimization method)보다는, Genetic algorithm, Evolution strategy, Immune algorithm 등과 같이 목적함수의 값을 필요로 하는 확률론적 최적화 기법(Stochastic optimization method) 또는 비결정론적 방법(Non-deterministic optimization method)이 더 적절하다고 하겠다[7]. 그러나 확률론적 최적화 기법은 일반적으로 결정론적 최적화 방법에 비하여 많은 경우에 전역 최적해(Global optimal solution)를 구할 수 있는 장점이 있으나, 최적화 과정에서 목적함수의 값을 계산하는 횟수가 증가하여 계산시간이 매우 많이 걸리는 단점이 있다. 따라서 DC 솔레노이드 밸브의 동작시간을 단축하기 위한 최적설계를 위해서는 목적함수의 계산횟수를 최소로 할 수 있는 확률론적 최적화 기법이 필요하다. 이러한 이유로, 본 논문에서는 Multi-quadric radial basis function(기저함수)을 이용한 반응표면법(response surface method)을 사용하여 설계변수 공간에서 목적함수를 근사화하고, 여기에 (1+1) evolution strategy를 적용하여 목적함수를 최소화 하는 최적설계기법을 제안하였다. 또한 제안된 최적화 기법의 적용을 쉽게 하기 위하여 DC 솔레노이드 밸브의 동작시간을 단축하기 위한 플런저 자극면의 기본적인 형상을 제안하고 이를 표현할 수 있도록 설계변수를 선정하였다.

2. 본 론

2.1 기본 모델의 특성

2.1.1 기본 모델 사양

본 논문에서는 그림 1과 같이 프레임(frame)과 권선, 고

정자 코어(core)와 이동자인 플런저(plunger)로 구성되며 DC 전원에 의해 구동되는 원통형 구조를 갖는 On/Off 솔레노이드 밸브를 기본모델로 선정하였다. 본 모델의 동작은 전원이 OFF 되었을 때 스프링의 힘으로 밸브를 닫아 유체의 흐름을 막게 된다. 그리고 전원이 ON 되었을 때, 솔레노이드에서 발생하는 흡입력에 의해 밸브를 열어 유체를 흐르게 한다. 밸브를 열기 위해서 그리고 밸브가 열린 상태를 유지하기 위해서, 최대 및 최소 스트로크에서 플런저에 작용하는 흡입력은 스프링에서 발생하는 힘보다 커야 한다. 그림 2와 표 1은 기본모델의 구조와 사양을 나타낸다.

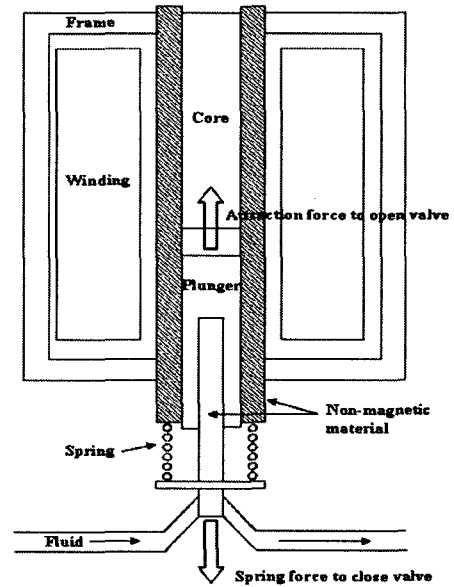


그림 1. DC 솔레노이드 밸브
Fig 1. DC solenoid valve

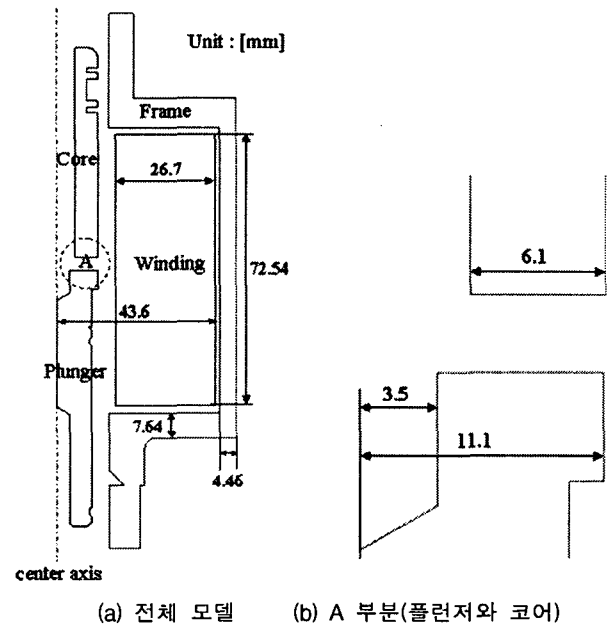


그림 2. DC 솔레노이드 밸브의 기본 모델(단위는 mm임)
Fig 2. Initial model of a DC solenoid valve where the unit is mm.

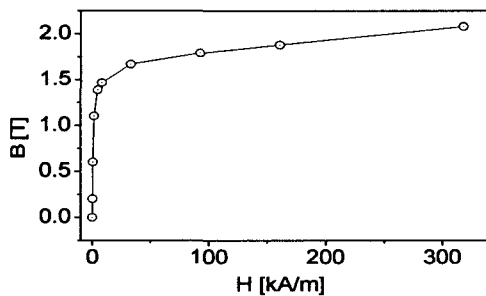
표 1. 기본 모델 사양

Table 1. Specification of initial model

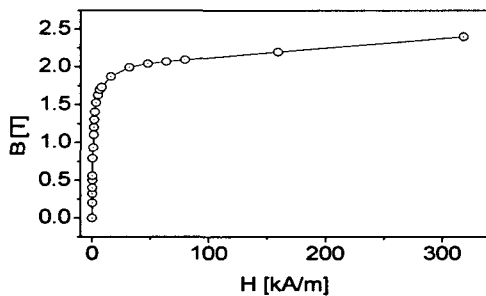
전압		125[V]
소비전력		60[W]
스트로크		3[mm]
잔류자기방지공극		0.5[mm]
권선 저항		261.18[Ω]
권선 수		10354
스프링	스프링상수	1.18[N/mm]
	초기 압축 길이	21.55[mm]
플런저, 코어	재질	SS430
	도전율	2.78×10^5 [S/m]
	무게(플런저)	0.17387[kg]
프레임	재질	CS1010
	도전율	2×10^6 [S/m]

2.1.2 동특성 해석

DC 솔레노이드 밸브의 동작시간을 계산하기 위하여 솔레노이드 밸브의 동특성을 유한 요소법과 회로방정식, 그리고 플런저의 운동방정식을 결합하여 해석하였다. 본 논문에서 다루는 모델은 프레임, 코어 그리고 플런저에 와전류가 발생하기 때문에 특성해석 과정에서 와전류를 고려하였고, 원통형의 구조를 갖고 있기 때문에 3차원 축대칭 유한요소해석을 수행하였으며, 플런저와 코어, 그리고 프레임의 자기적 비선형성을 고려하여 특성을 해석하였다. 그림 3은 이용된 각 재료의 B-H곡선을 나타낸다.



(a) SS430



(b) CS1010

그림 3. B-H 곡선

Fig 3. B-H curve

플런저의 운동과 플런저, 코어 및 프레임에 발생하는 와전류를 고려한 지배 방정식은 맥스웰 방정식으로부터 다음과 같이 유도 된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 - \sigma (\vec{v} \times \vec{B} - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi) \quad (1)$$

여기에서, μ 는 투자율, \vec{A} 는 자기 벡터 포텐셜, \vec{J}_0 는 입력 전류, σ 는 도전율, \vec{v} 는 플런저의 운동 속도 그리고 ϕ 는 스칼라 포텐셜이다. 전압원 해석을 위한 전압방정식은 다음과 같다.

$$V(t) = Ri(t) + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2)$$

여기서, V 는 입력전압, i 는 입력 전류, R 는 권선 저항이고 λ 는 권선의 쇄교자속이다. 플런저의 운동은 플런저에 작용하는 전체 힘 즉, 플런저에서 발생하는 흡입력, 스프링에 의한 힘, 마찰력에 의하여 이루어진다. 여기에서 마찰력을 무시하면 플런저의 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$F_m - F_s = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3)$$

여기서, F_m 는 플런저에서 발생하는 흡입력, F_s 는 스프링 힘, m 는 플런저의 질량이고 x 는 플런저의 z-방향 변위이다. 스프링 상수를 k 라고 하면 스프링 힘은 다음과 같이 주어진다.

$$F_s = k\Delta x \quad (4)$$

여기서 Δx 는 스프링의 길이의 변화를 나타낸다. 플런저에 작용하는 흡입력은 유한요소법을 이용한 지배방정식 (1)의 해석 결과로부터 맥스웰 응력법(Maxwell's stress tensor method)을 이용하여 계산된다. 이들 계산은 step-by-step 법에 의해 진행되며, 계산은 상용프로그램인 Maxwell EM 2D를 이용하였다. 전체 해석 시간은 전압이 인가된 순간부터 50[ms] 동안으로 하였고, 식 (1)에 포함된 시간미분의 근사화를 위한 시간 간격은 0.125[ms]로 하였다.

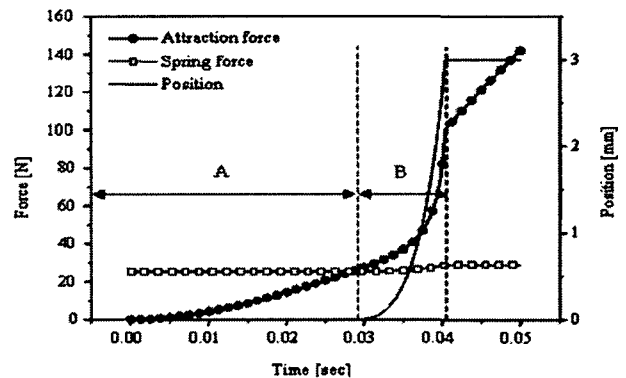


그림 4. 기본 모델의 시간-힘, 부하, 위치 곡선

Fig 4. Time-attraction force, load force and position graph of initial model

그림 4는 기본모델에 대하여 해석 결과 얻어진, 시간에 따른 흡입력의 크기, 플런저의 위치, 그리고 스프링 힘의 변

화를 나타낸 것이다. 스프링 힘은 약 25.37[N]으로, 흡입력이 스프링 힘보다 크게 되는 순간(시간 $t=28.5[ms]$)부터 플런저의 움직임이 시작되어 플런저의 운동시간(time of motion)이 시작됨을 알 수 있다. 그림 4의 A구간은 플런저가 움직이기 전의 구간으로 약 28.5[ms]이고 B구간은 플런저가 움직이는 구간으로 약 12[ms]이며, 플런저의 운동시간에 해당한다. 플런저가 완전히 흡착되는데 필요한 시간, 즉 동작시간(time of action)은 A구간과 B구간을 합한 것으로 40.5[ms]임을 알 수 있다. 결과에서 보듯이, A구간의 시간이 B구간의 시간보다 약 2.4배 정도 크기 때문에 동작시간을 단축시키기 위해서는 A구간의 시간을 단축시키는 것이 더 효과적이다. 따라서 동작시간을 단축하기 위해서는 최대 스트로크에서의 흡입력을 증가시켜 스프링 힘보다 커지는데 소요되는 시간을 단축시켜야 함을 알 수 있다.

2.2 설계변수

동작시간을 단축하기 위하여 최대 스트로크에서의 흡입력이 증가하도록, 그림 5와 같이 코어와 플런저의 표면에 각각 요철(凹凸)을 설치한 새로운 자극면의 형상을 제안하였다. 제안된 형상을 표현하기 위하여 설계변수는 그림에서와 같이 (α, x_1, x_2) 로 정의 할 수 있다. 그러나 변수 α 는 너무 작아지면 플런저의 철(凸) 부분의 기계적인 강도가 문제가 되고, 또한 너무 커지면 코어의 기계적인 강도가 문제가 된다. 따라서 본 논문에서는 기계적인 강도와 가공성을 고려하여 $\alpha=2[mm]$ 로 고정하였다.

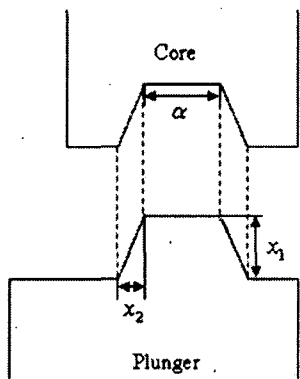


그림 5. 설계 변수 (x_1, x_2)

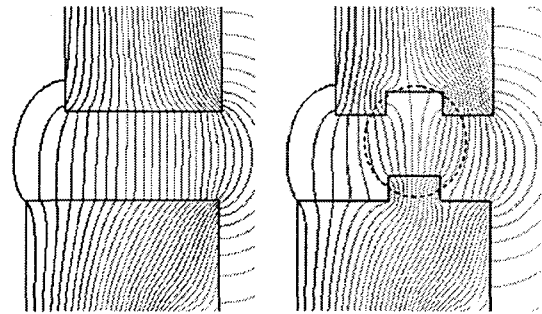
Fig 5. Design variables (x_1, x_2)

2.2.1 설계변수 x_1

그림 6은 기본 모델의 자극 면에 요철을 설치한 경우 즉, 설계 변수 x_1 을 적용하였을 때의 자속분포를 비교한 것이다. 그림 6(b)의 점선 부분을 보면 기본 모델에 비해 자속경로가 짧아지고, 따라서 자기저항이 작아지고 자속이 증가하게 된다. 이로 인하여 공극 자속밀도가 증가하고 흡입력의 상승을 가져오게 된다.

그림 7은 x_1 의 변화에 따른 시간에 대한 흡입력과 플런저의 위치를 비교한 것이다. x_1 이 증가함에 따라 최대 스트

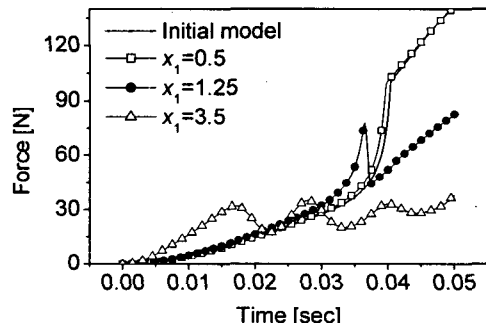
로크에서 발생하는 흡입력이 증가하고 동작시간이 감소함을 볼 수 있다. x_1 이 잔류자기 방지공극인 0.5[mm]보다 큰 경우 그림 8과 같이 일정 스트로크가 되었을 때 플런저의 철(凸) 부분이 코어의 요(凹) 부분으로 들어가게 되고 이 순간에 흡입력이 순간적으로 감소하였다가 다시 증가하게 된다. 그림 7의 $x_1=3.5[mm]$ 일 때의 경우, 이러한 현상은 플런저의 움직임에 악영향을 미쳐 오히려 동작시간을 증가시키게 된다. 따라서 설계 변수 x_1 의 최적치가 존재함을 알 수 있다. 또한 이 사실로부터 설계변수 x_1 의 범위를 표 2와 같이 3.5[mm]로 제한하였다.



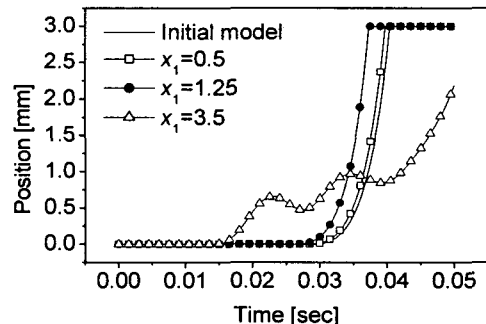
(a) 기본 모델 (b) 설계 변수 x_1 이 적용된 모델

그림 6. 설계변수 x_1 에 따른 자속 분포 변화

Fig 6. Variation of flux distribution due to x_1



(a) 시간-흡입력 곡선



(b) 시간-위치 곡선

그림 7. 설계변수 x_1 에 따른 시간-흡입력, 시간-위치 특성 비교

Fig 7. Comparison of characteristic graph due to variation of x_1

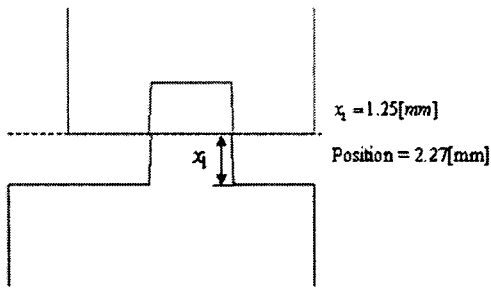


그림 8. 흡입력이 감소하는 순간의 플런저 위치
 Fig 8. Position of plunger when attraction force is decreased

2.2.2 설계 변수 x_2

표 2. 설계 변수의 범위

Table 2. Range of design variables

Variable	Lower limit (mm)	Upper limit (mm)
x_1	0.5	3.5
x_2	0.05	2.05

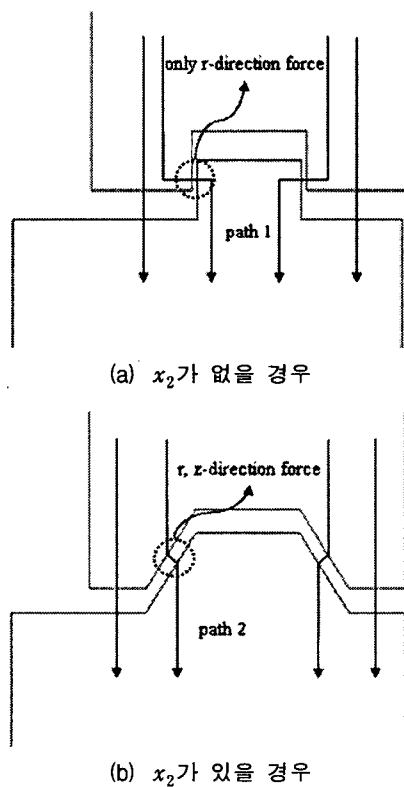
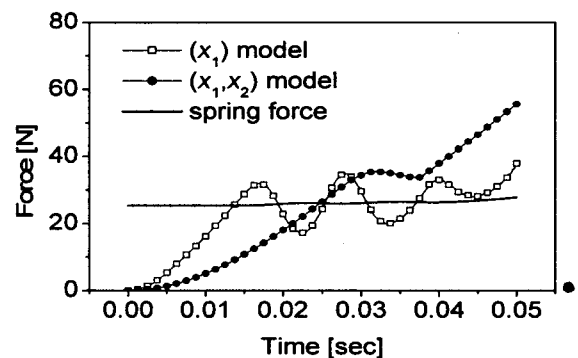


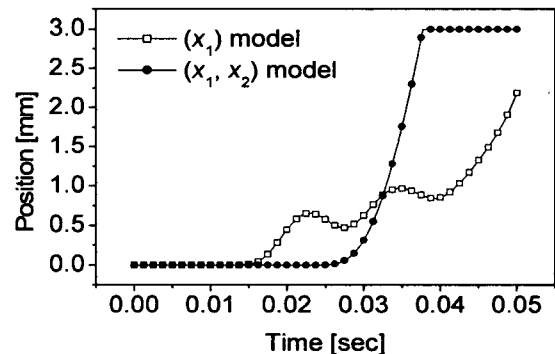
그림 9. 설계 변수 x_2 의 효과
 Fig 9. Effect of design variable x_2

앞에서 설명한 바와 같이, x_1 이 잔류자기방지공극보다 클 경우 플런저의 철(凸) 부분이 코어의 요(凹) 부분으로 들어가는 순간 흡입력이 순간적으로 감소함을 볼 수 있다. 플런저의 철(凸) 부분이 코어의 요(凹) 부분으로 들어가면 그림 9(a)와 같이 자속이 경로 1을 따라 통과하게 되고 이 자속

은 r-방향으로의 힘을 발생시키게 된다. 즉, 경로 1을 통과하는 자속은 z-방향으로의 흡입력에 전혀 영향을 주지 않고 오히려 흡입력을 감소시키게 된다. 그림 10은 (x_1)모델과 (x_1, x_2) 모델 즉, 설계변수 x_2 가 정의되지 않은 경우와 정의된 모델에 대하여 $x_1=3.5$ [mm] 인 경우 시간에 따른 흡입력과 위치를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 설계변수 x_2 가 정의되지 않은 경우에는 (x_1 모델) 플런저의 철(凸) 부분이 코어의 요(凹) 부분으로 들어가는 순간 흡입력이 감소함을 보여준다. 그 결과 스프링 힘보다 작게 됨으로써 플런저가 반대방향으로 이동하여 동작시간이 증가하게 되는 것이다. 한편 설계변수 x_2 가 정의된 경우에는 즉, (x_1, x_2) 모델의 경우에는 그림 9(b)의 경로 2와 같이 대각선방향의 자속이 발생되고, 따라서 z-방향의 힘을 발생시켜 전체적인 흡입력의 감소를 다소 방지할 수 있다. (x_1, x_2) 모델의 경우, 시간에 따른 흡입력과 위치의 변화는 그림 10에서와 같이 최대 스트로크에서의 흡입력은 감소하였지만 플런저의 철(凸) 부분이 코어의 요(凹) 부분으로 들어가는 순간에 흡입력이 많이 감소하지 않아 동작시간이 줄어들음을 알 수 있다. $x_2 > 2.05$ [mm] 일 경우, 요(凹)부분의 양 끝의 두께가 얇아지기 때문에 기계적인 강도를 고려하여 x_2 의 범위를 표 2와 같이 2.05[mm]로 제한하였다.



(a) 시간-흡입력 곡선



(b) 시간 - 위치 곡선

그림 10. x_2 유무에 따른 시간-흡입력, 시간-위치 특성 비교 ($x_1=3.5$ (mm))

Fig 10. Comparison of characteristics graph due to existence of x_2 ($x_1=3.5$ (mm))

2.3 Response Surface Method을 이용한 최적화

Multi-quadric Radial Basis 함수를 사용한 반응 표면법(response surface method)은 제한된 설계 범위에서 제한된 개수의 표본점을 이용하여 목적 함수(Objective function)를 보간(Interpolation)하는 방법으로, 다항식을 이용한 보간법 등 다른 방법에 비하여 상대적으로 적은 수의 표본점으로도 목적함수를 잘 보간 할 수 있는 방법이다. 이 때 반응표면(Response Surface)은 다음과 같이 정의된다[8, 9].

$$S(x) = \sum_{i=1}^N c_i g(x-x_i) \quad (5)$$

$$g(x) = \sqrt{|x|^2 + h^2} \quad (6)$$

$$X = \{(x_i, f(x_i)), i=1, 2, \dots, N\} \quad (7)$$

여기서 x 는 설계 변수 벡터, c_i 는 i 번째 표본점(sampling point) x_i 에 대응하는 계수, $g(\cdot)$ 는 Multi-quadric radial basis function, 그리고 h 는 형상 파라미터(shape parameter)이고, X 는 크기가 N 인 표본점들의 집합이다. N 개의 표본점들을 식 (5)에 대입하면, 다음 식으로부터 계수 c_i 가 구해진다.

$$f(x_k) = \sum_{i=1}^N c_i g(x_k - x_i), k=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

계수 c_i 가 구해지면, 식 (5)으로부터 N 개의 표본점을 이용한 반응표면을 구성할 수 있으나, 이때 구성된 반응표면은 식 (6)의 형상 파라미터의 함수가 되고, 따라서 보간 오차를 최소화 하는 적절한 형상 파라미터를 결정해야 한다. 특정한 형상 파라미터 h 에 대하여 보간 오차 $E(h)$ 는 연속적인 Leave One Out법을 사용하여 다음과 같이 정의 된다.

$$E(h) = \sum_{k=1}^N \sqrt{E_k(h)^2} / N \quad (9-a)$$

$$E_k(h) = f(x_k) - S^{(k)}(x_k), k=1, 2, \dots, N \quad (9-b)$$

$$S^{(k)}(x_k) = \sum_{i=1, i \neq k}^N c_i g(x_k - x_i) \quad (9-c)$$

식 (9)에서 알 수 있듯이 반응표면의 보간 오차는 형상 파라미터의 함수이고, 적절한 형상 파라미터는 보간 오차를 최소화 하는 형상 파라미터를 구함으로써 찾을 수 있으며, 본 논문에서는 (1+1) evolution strategy를 이용하여 최적의 형상 파라미터를 구하였다.

적절한 형상 파라미터의 값을 구하고 이로부터 표본 데이터를 이용하여 반응 표면이 구성되면 즉, 설계변수 공간에서 목적 함수가 보간되면 Genetic algorithm, Evolution strategy 등의 최적화 기법을 이용하여 목적함수를 최소화 하는 최적설계를 구할 수 있다. 그러나 이 결과는 표본 데이터가 충분히 많은 경우에는 설계 변수 공간 전역에서 목적함수가 적절히 보간되기 때문에 적절한 최적설계로 간주할 수 있으나, 실제 문제에서는 충분히 많은 표본 데이터를 확보하는 것이 어렵기 때문에, 최소의 표본 데이터만을 이용하여 최적설계를 구할 수 있는 전략이 필요하다.

본 논문에서는 초기의 표본점을 정의하고 유한요소법을 이용하여 각각의 표본점에 해당하는 목적함수를 계산하여

표본 데이터를 구성하고, 이로부터 반응표면을 구성한다. 구성된 반응 표면에 대하여 (1+1) evolution strategy법을 적용하여 목적함수를 최소화 하는 준 최적설계(pseudo-optimal design)를 구한다. 그리고 나서 구해진 준 최적설계를 중심으로 하여 설계 변수의 공간을 1/2 로 줄인 범위에서 새로운 표본점을 추가로 발생시키고, 이전의 표본점을 포함한 전체 표본점을 이용하여 새로운 반응 표면을 구하고, 다시 목적 함수를 최소화 하는 설계를 구하였다. 이러한 과정을 목적함수를 최소화 하는 최적점에 수렴할 때까지 반복하였으며, 반복과정에서 수렴된 최소점을 최적점으로 판단하였다. 그림 11은 반응 표면법과 (1+1) evolution strategy를 이용한 최적화 알고리즘의 흐름도를 나타낸다.

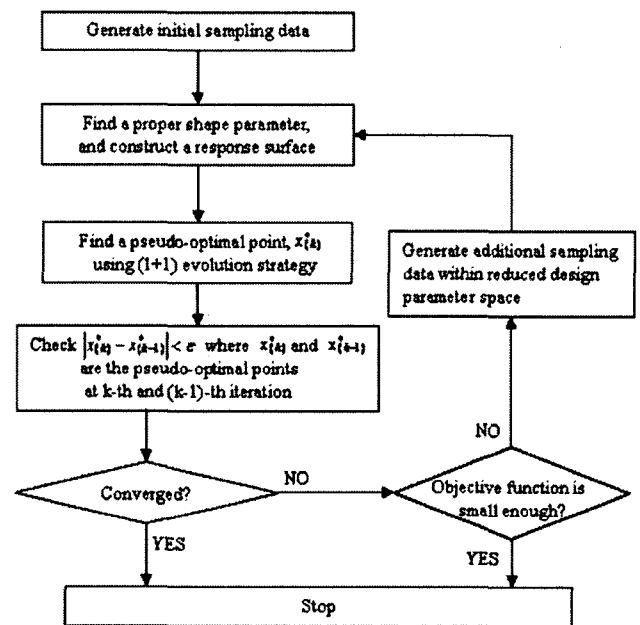
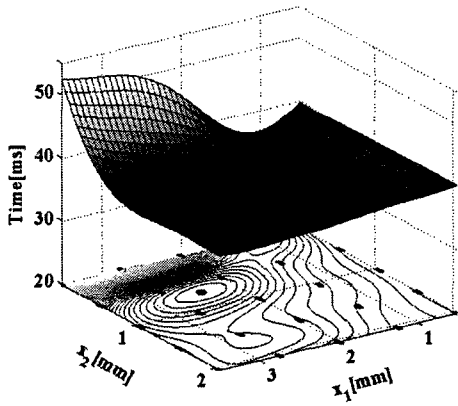


그림 11. 최적화 알고리즘의 흐름도
Fig 11. Flow chart of optimization algorithm

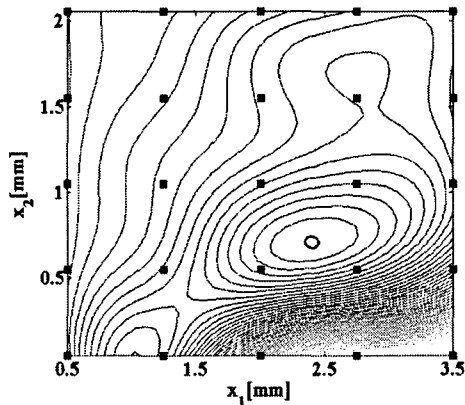
2.4 최적설계

최적 설계를 위한 목적함수는 동작시간 (time of action)[msec]으로 설정하였으며, 설계변수의 범위를 표2에 나타내었다. 목적함수를 최소화 하는 최적설계를 찾기 위하여 우선 설계변수 전체 공간을 균등하게 분할하여 25개의 표본점을 생성하고, 각각의 표본점에서 유한요소법을 이용하여 동작시간을 구하였다. 그림 12는 25개의 표본점에서의 목적함수 값(동작시간)을 이용하여 구성된 반응표면과 등고선 그래프이다. 이때 구해진 목적함수를 최소화하는 최적점은 그림 12에서 원형으로 크게 표시된 점으로 (2.4, 0.71)이고, 이점은 통상 준 최적점 (pseudo-optimal point)이라 불린다. 여기서 구한 준 최적점은 목적함수가 적당히 보간된 반응표면으로부터 구한 것이기 때문에, 경우에 따라서는 올바른 최적점이 아닐 수 있다. 즉 예를 들면 표본점의 개수가 충분히 많은 경우에는 반응표면은 목적함수를 적절히 보간할 수 없고, 결과적으로 구해진 준 최적점은 올바른 최적점이라 할 수 없게 된다. 따라서 본 논문에서는 앞에서 구

해진 준 최적점을 중심으로 표본점을 추가로 생성하고, 동일한 과정을 반복하였다. 이때 표본점들은 준 최적점을 중심으로 초기 설계변수 공간의 1/2로 하였다. 그림 13은 두 번째 반복과정에서 생성된 반응표면과 등고선 그래프이다. 이때 목적함수를 최소화하는 준 최적점은 (2.57, 0.6)으로 이동했음을 볼 수 있으며, 이때 동작시간은 초기 모델에서의 40.5[msec]에서 34.875 [msec]로 충분히 감소하였다. 따라서 2회 반복에서 구해진 준 최적점을 최적점으로 간주하였다.



(a) 표면 그래프



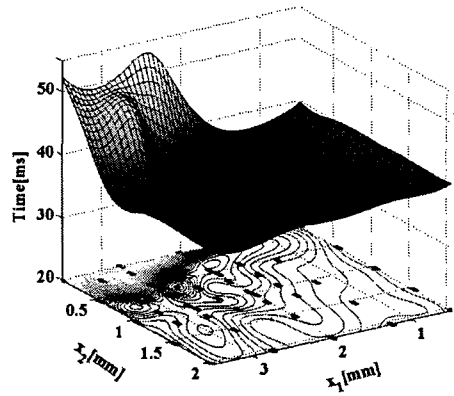
(b) 등고선 그래프

그림 12. 반응표면과 준 최적점 - 1st iteration

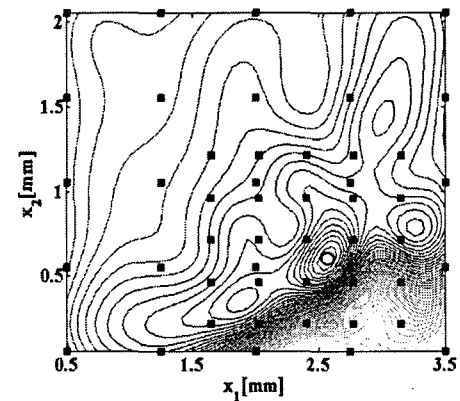
Fig 12. Response surface and a pseudo optimal point at 1st iteration

그림 14는 기본 모델과 최적 형상을 비교한 것이다. 최적형상의 크기는 앞서 구해진 최적점으로부터 $x_1 = 2.57 [mm]$, $x_2 = 0.6 [mm]$ 이다. 그림 15는 최적형상의 시간에 따른 자속분포를 나타낸 것이다. 그림 15(a)는 플런저가 움직이지 않은 상태로 자속의 대부분이 플런저의 A부분으로 지나감을 볼 수 있다. 자속의 경로가 짧아지고 A부분의 자속밀도가 증가함에 따라 기본모델에 비해 흡입력이 증가할 것이다. 그리고 자속의 대부분이 A부분으로 지나감에 따라 z-방향의 흡입력을 발생시키게 된다. 그림 15(b)는 플런저의 철(凸)부분이 코어의 요(凹)부분으로 들어가는 순간의 자속분포를 나타낸 것이다. B부분을 보면 철(凸)과 요(凹)의 옆부분으로 지나가는 자속이 증가했음을 볼 수 있고 이런 자속

은 r-방향의 흡입력을 증가시키고 z-방향의 흡입력을 감소시키게 된다. 이 때까지는 철(凸)과 요(凹)의 옆부분으로 지나가는 자속량이 작아 흡입력의 감소에는 크게 영향을 주지 않는다. 그러나 그림 15(c), (d)와 같이 철(凸)부분이 요(凹)부분으로 점점 들어감에 따라 C, D부분(철(凸)과 요(凹)의 옆부분)으로 지나가는 자속량이 증가하고 이에 의해 r-방향의 흡입력은 증가하지만 z-방향의 흡입력은 감소하게 된다.



(a) 표면 그래프



(b) 등고선 그래프

그림 13. 반응표면과 준 최적점 - 2nd iteration

Fig 13. Response surface and a pseudo optimal point at 2nd iteration

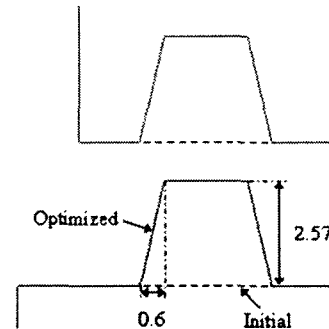
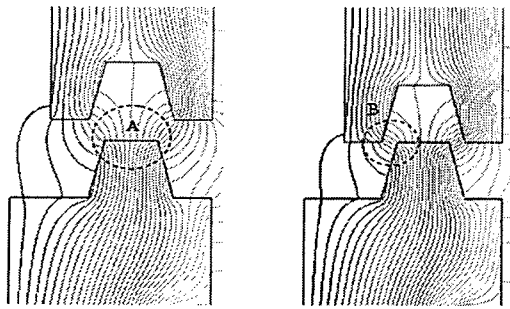
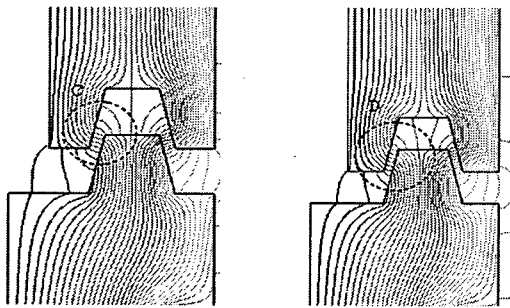


그림 14. 기본 모델과 최적 형상의 비교

Fig 14. Comparison of the initial model and optimized pole face shape



(a) $t = 23[ms], s = 0[mm]$ (b) $t = 30.875[ms], s = 0.936[mm]$

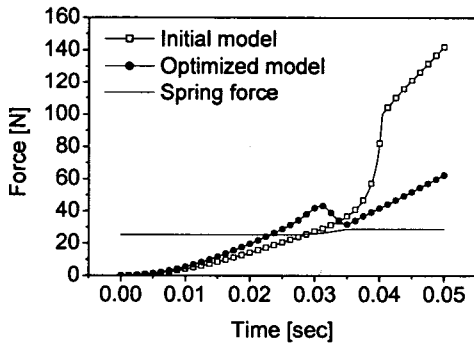


(c) $t = 32.25[ms], s = 1.54[mm]$ (d) $t = 33.125[ms], s = 2[mm]$

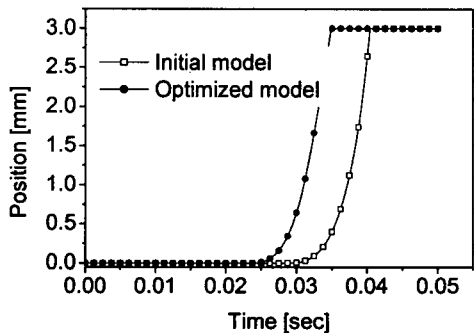
그림 15. 최적형상에서의 자속분포

Fig 15. Distribution of the flux lines at the optimized design

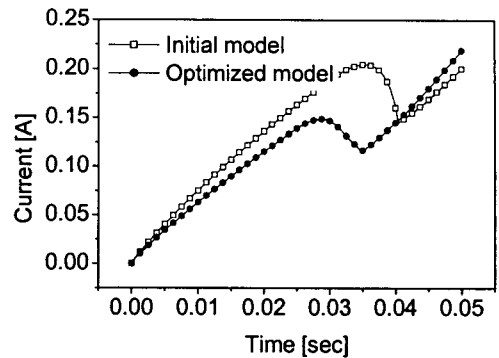
그림 16은 기본 모델과 최적화 모델의 특성 곡선을 비교한 것이다. 그림 16(a)는 최적화 모델의 흡입력 곡선으로 앞서 설명한 바와 같이 플런저의 철부분이 코어의 요부분으로 들어가는 순간 흡입력이 순간적으로 감소함을 볼 수 있다.



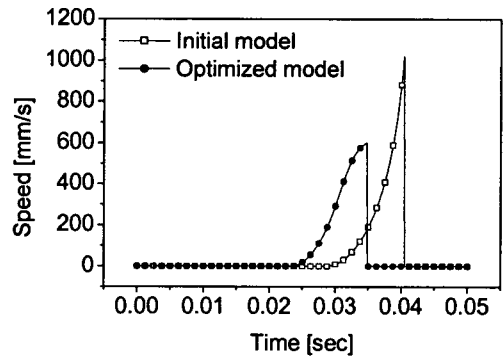
(a) 시간 - 흡입력 곡선



(b) 시간 - 위치 곡선



(c) 시간 - 전류 곡선



(d) 시간 - 속도 곡선

그림 16. 기본 모델과 최적화 모델의 특성 곡선 비교

Fig 16. Comparison of characteristic graph of initial model and optimized model

그러나 스프링에 의한 힘보다는 크기 때문에 플런저의 동작 시간에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 예상되며, 그림 16(b)에서 흡입력의 순간적인 감소가 플런저의 움직임에 크게 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 그림 16(c)는 전류곡선을 비교한 것으로 최적화 모델의 전류가 기본 모델에 비해 천천히 상승함을 알 수 있다. RL 회로에서 전류의 과도 상태는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$i(t) = \frac{V_s}{R} (1 - e^{-t/\tau}), \tau = \frac{L}{R} \quad (10)$$

여기서 V_s 는 입력 전압, R 은 권선 저항, τ 는 시정수, L 은 자기회로의 인덕턴스이다. 식 10에서 전류의 상승 속도는 시정수에 의해 결정된다. 최적화 모델의 경우 기본모델에 비해 자속경로의 길이가 짧아 자기저항이 작고 인덕턴스는 크다. 즉, 시정수가 크기 때문에 전류의 상승속도가 기본모델에 비해 느리다. 동일한 시간에서 최적모델의 전류가 기본 모델의 전류보다 작음에도 불구하고 최적 모델의 흡입력이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 그림 16(d)는 플런저의 속도 곡선을 비교한 것이다. 기본 모델의 경우 시간이 지남에 따라 속도의 변화량이 점점 커지지만 최적화 모델의 경우는 속도의 변화량이 증가하다가 다시 감소함을 볼 수 있다. 이는 플런저에 발생하는 흡입력의 감소로 인해 플런저의 가속도가 감소하기 때문에 발생하는 현상이다. 표 3은 기본 모델과 최적화된 모델에서 동작시간을 비교한 것이다. 표본점을 증가시켜 최적화를 반복함에 따라 동작시간이 점점 감소

함을 볼 수 있다. 최적화된 모델의 동작시간은 기본 모델에 비해 약 14[%]정도 감소되었다.

표 3. 동작 시간의 비교

Table 3. Comparison of the time of action

Model	Time of action[msec]
initial design	40.5
pseudo-optimal design	35.625
optimized design	34.875

3. 결 론

본 논문에서는 DC 솔레노이드 밸브의 동작시간을 단축하기 위하여 코어와 플런저의 표면에 각각 요철을 설치한 새로운 자극면의 형상을 제안하였다. 그리고 반응표면법과 (1+1) Evolution Strategy를 이용하여 형상 최적화를 수행하였고 그 결과를 유한요소해석을 통하여 검증하였다. 제안된 형상은 최대 스트로크에서의 흡입력을 증가시켜 흡입력이 스프링 힘보다 커지는데 소요되는 시간을 단축시켰고 그 결과 DC 솔레노이드 밸브의 동작시간을 기본 모델에 비해 약 14[%]정도 감소시킬 수 있었다.

본 논문에서 제안한 형상은 플런저의 철부분이 코어의 요 부분에 들어가는 순간 흡입력이 감소하는 단점을 가지고 있다. 최적화 결과 흡입력은 스프링 힘보다 크기 때문에 동작 시간에 크게 영향을 미치지 않음을 확인 할 수 있었다. 그러나 제조 공정상에서 오차가 발생한다면 이러한 흡입력의 감소 현상은 유한요소해석상의 결과보다 커져 동작시간을 증가시킬 수도 있다. 따라서 추후 흡입력의 감소를 막을 수 있는 방법에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 에너지관리공단 “초절전형 마이크로 밸브 개발”과제의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Herbert C. Roters, Electromagnetic Devices, John Wiley & Sons, USA, 1995
 [2] 中田高義, 有限要素法による直交電磁石の設計と応用, 森北出版株式會社, Japan, 1991
 [3] Sang-Baeck Yoon, Jin Hur, Yon-Do Chun and Dong-Seok Hyun, "Shape Optimization of Solenoid Actuator Using the Finite Element Method and Numerical Optimization Technique", IEEE Trans. on Magn., Vol 33, No. 5, pp4140~4142, 1997.

[4] Y. Ohdachi, Y. Kawase, Y. Murakami and Y. Inaguma, "Optimum Design of Dynamic Response in Automotive Solenoid Valve", IEEE Trans. on Magn., Vol 27, No. 6, pp.5226-5228, Nov 1991
 [5] Baek-Ju Sung and Eun-Woong Lee, "Non-Magnetic Ring Effect for Speed Increase of Solenoid Actuator", KIEE International Trans. on Electrical Machinery and Energy Conversion Systems, Vol 5-B, No. 4, pp 317-323, 2005
 [6] I. H. Park, I. G. Kwak, H. B. Lee, S. Y. Hahn, and K. S. Lee, "Design sensitivity analysis for transient eddy current problems using finite element discretization and adjoint variable method," IEEE Trans. on Magn., Vol. 32, No. 3, Part 1, pp. 1242-1245, May 1996
 [7] Y. Yao, D. Xie, C. S. Koh, J. S. Ryu, and T. G. Um, "Utilizing Design Sensitivity Analysis for 3D Optimization of Transformer Tank Shields Considering Eddy Currents," COMPEL, Vol. 23, pp. 506-517, Issue 2, 2004
 [8] D. Tsao, and J. P. Webb, "Construction of device performance models using adaptive interpolation and sensitivities", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 41, No.5, pp.1768-1771, May 2005
 [9] S. Rippla, "An algorithm for selecting a good value for the parameter c in radial basis function interpolation", Advances in Computational Mathematics, Vol. 11, pp.193-210, 1999
 [10] R. H. Myers, and D. C. Montgomery, Response surface methodology, John Wiley & Sons, Inc., pp.321-328, 2002
 [11] 최인호, 고창섭, 정태경, 한송엽, "솔레노이드 액츄에이터 전자기 시스템의 유한요소 해석", 대한전기학회 논문집, 제40권 11호, 1991

저 자 소 개



윤희성 (尹熙盛)

1982년 1월 17일생. 2005년 충북대학교 전기전자공학부 졸업(학사). 2005년~현재 동대학원 전기공학과 석사과정.
 Tel : 043-274-2426
 E-mail : hsyoon@chungbuk.ac.kr



황인성 (黃仁聖)

1980년 2월 22일생. 2006년 홍익대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업(학사). 2006년~현재 충북대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 043-274-2426

E-mail : his0473@hanmail.net



고창섭 (高彰燮)

1986년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~1994년 미국 Florida International University 전기컴퓨터 공학과 박사 후 연구원. 1994~1996년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 2003년 2월~2004년 1월 미국 Texas A&M University, 전기컴퓨터공학과 객원 교수, 1996년~현재 충북대학교 전기전자컴퓨터 공학부 교수.

Tel : 043-261-2426

Fax : 043-274-2426

E-mail : kohcs@chungbuk.ac.kr



김동수 (金東洙)

1988년 영남대학교 기계공학과 졸업(학사). 1991년 동 대학원 기계공학(열유체전공) 졸업(석사). 2001년 동 대학원 기계공학(공압 제어) 졸업(박사). 2004년 미국 UCLA Visiting Scholar. 1991년~현재 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부 책임연구원, 팀장

Tel : 042-868-7152

Fax : 042-868-7176

E-mail : kds671@kimm.re.kr



윤소남 (尹蘇南)

1986년 제주대학교 기관공학 졸업(학사). 1990년 부경대학교 대학원 기계공학(유압 제어) 졸업(석사). 1994년 동 대학원(유압 제어) 졸업(박사). 2005년 6월~2005년 9월 미국 어번대학교 객원연구원. 1994년~현재 : 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부 책임연구원

Tel : 042-868-7155

Fax : 042-868-7176

E-mail : ysn688@kimm.re.kr