

마이크로 솔레노이드 액츄에이터의 설계 및 3차원 유한 요소법을 이용한 특성 해석

윤희성, 고창섭, 류재섭¹⁾, 김동수²⁾, 윤소님²⁾, 박상운²⁾
충북대학교 전기공학과, LS산전¹⁾, 한국기계연구원²⁾

Design and characteristics analysis of micro-solenoid actuator using 3D finite element method

Hee Sung Yoon, Chang Seop Koh, Jae Seop Ryu¹⁾, Dong Soo Kim²⁾, So Nam Yun²⁾, Sang Woon Park²⁾
Chungbuk National University, LS Industrial Systems¹⁾, Korea Institute of Machinery & Materials²⁾

Abstract – 솔레노이드 액츄에이터의 초기 설계는 일반적으로 등가자기회로법을 이용하여 이루어지나, 프레임의 형상과 같은 국부적인 설계는 유한요소법 등을 이용하여 설계해야 한다. 본 논문에서는 등가자기회로법을 통하여 각형 마이크로 솔레노이드 액츄에이터의 설계와 3차원 유한 요소법을 이용하여 특성을 해석하고 설계 결과의 타당성을 검증하고자 한다. 그리고 프레임 구조에 따른 특성 변화를 비교해본다.

1. 서 론

솔레노이드 액츄에이터(Solenoid actuator)는 전기적 신호를 작은 범위의 기계적인 직선운동으로 변환하는 장치로, 구조가 간단하고 경제적이며 정밀제어가 가능한 장점이 있어, 밸브, 스위치, 럴레이 및 OA, FA 등 여러 산업분야에서 이용되고 있다. 특히 마이크로 솔레노이드 액츄에이터와 같은 소형 기기들의 응용이 활발하게 이루어지고 있다.

솔레노이드 액츄에이터의 초기 설계는 일반적으로 고전적 방법인 등가자기회로법을 이용하여 이루어지나, 프레임의 형상과 같은 국부적인 설계는 유한요소법을 이용하여 설계해야 한다. 특히, 최근에는 생산단가를 낮추기 위하여 솔레노이드 액츄에이터의 코어, 플런저, 그리고 코일은 원통형으로 설계하나 프레임은 각형으로 하는 경우가 많다. 이러한 경우 발생하는 전자력은 프레임이 원통형인 경우와는 달라지고, 실용화를 위해서는 원통인 경우에 비하여 어느 정도 전자력이 얻어지는지에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 등가자기회로법을 이용하여 각형 마이크로 솔레노이드 액츄에이터의 기초 설계를 하였다. 설계된 모델을 3차원 유한요소법(3D Finite Element Method)을 이용하여 특성을 해석하고 초기 설계 방법의 타당성을 검증하고자 한다. 그리고 프레임이 솔레노이드 전체를 감싸고 있는 경우, 긴 면을 감싸고 있는 경우, 짧은 면을 감싸고 있는 경우로 나누어 특성을 비교하여 프레임의 구조가 솔레노이드 특성에 미치는 영향을 알아본다.

2. 본 론

2.1 등가자기회로법을 이용한 솔레노이드 설계

일반적으로 솔레노이드 액츄에이터의 설계를 위해서는 최소흡입력, 정격스트로크, 정격전압, 전압변동, 정격파워, 시간정격, 온도상승, 주변온도, 코일절연종류, 제한치 수 등이 주어진다.

먼저 전압변동을 고려하여 최소 흡입력(F_{min})을 충분히 크게 산정한다. 주어진 흡입력을 발생시키기 위해 공극자속밀도를 결정한다. 본 논문에서는 Index-number를 이용하여 공극자속밀도(B_g)를 산정하였다.

$$\text{Index-number} = \sqrt{F_{min}} / I_s \quad (1)$$

$$B_g = 0.4927[\log(\text{Index-number}) - 2]\nu \quad (2)$$

계산된 공극자속밀도와 흡입력을 이용하여 플런저의 면적을 계산한다. 다음으로 산정된 자속밀도를 공급하기 위한 기자력(U)을 계산한다. 플런저(Plunger), 코어(Core), 프레임(Frame)에서 소요되는 기자력을 산정할 수 없기 때문에 공극에서 소요되는 기자력에 적당한 계수(ζ)를 곱하여 전체 기자력을 산정한다.

$$U = \frac{\zeta B_g I_s}{\mu_0} \quad (3)$$

코일에서 발생된 열의 방출면으로 코일의 외면만을 고려하는 경우, 온도상승식은 다음과 같다.

$$\theta_f = \frac{W}{\lambda S_{out}} = \frac{W}{\lambda(I_m + 4T)h} \quad (4)$$

여기에서, λ 는 열방출계수, S_{out} 은 권선 외부면적, I_m 은 권선의 평균길이를 의미한다. 식 (4)로부터 권선의 높이(h)와 폭(T)의 비율 $\beta = h/T$ 를 적절히 가정하면, 주어진 설계사양으로부터, 권선의 높이와 폭을 구할 수 있다. 코일의 선경은 다음식으로부터 결정된다.

$$d = \sqrt{\frac{4\rho_h I_m N T}{\pi V}} \quad (5)$$

여기에서 ρ_h 는 최대온도에서의 저항율을 의미한다. 코일의 선경이 결정되면 코일의 단 수를 계산하고 프레임을 설계한다. 프레임 설계 시 가장 중요한 부분은 충분한 자속이 통과할 수 있도록 프레임의 두께를 산정하는 것이다. 일반적으로 프레임의 두께는 프레임 면적의 플런저 면적의 25%정도 크게 산정한다. 솔레노이드 설계가 완료되면 설계 데이터를 바탕으로 계산된 전류, 소모전력, 온도상승, 기자력이 설계 목표와 적합한지를 판단한다. 정격을 넘어간 경우는 코일의 선경을 한 단계 작은 것으로 설정하여 재계산을 실시한다. 재계산 결과 기자력이 충분하지 못한 경우 코일의 형상비를 조절하여 재설계를 진행한다. 이 때 코일의 형상은 코일의 높이 제한치수를 넘지 않아야 한다. 제한 치수를 넘었음에도 불구하고 기자력이 작은 경우, 공극자속밀도를 높게 산정하여 처음부터 재계산을 한다. 그럼 1은 전체적인 설계 과정을 나타낸 것이다.

본 논문에서는 이 설계 과정을 프로그램으로 제작하여 설계를 진행하였다. 제안한 설계방법을 이용하여 표 1과 같이 주어지는 마이크로 솔레노이드 액츄에이터를 설계하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 이때 전압변동을 고려하여 최소흡입력은 1.6[N]으로 산정하였다.

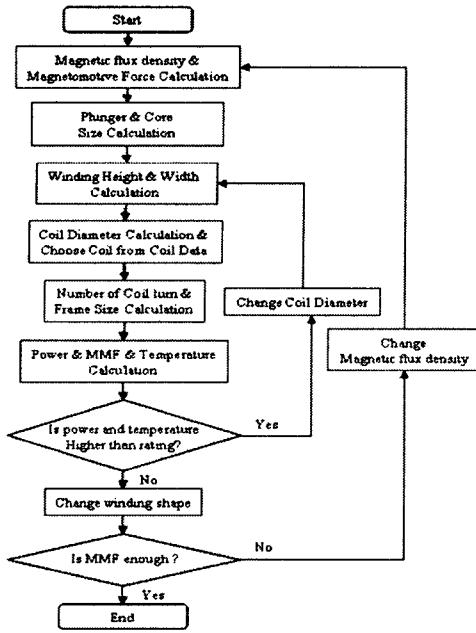


그림 1. 설계 과정 흐름도

Fig 1. Flow chart of design process

표 1. 설계 사양

Table 1. Design specification

흡입력(F)	1.3[N]	시간정격	1
스트로트	0.1[mm]	온도상승	80°C
정격전압	24[V]	주변온도	20°C
전압변동	90~110[%]	코일절연	A종
정격파워	0.35[W]	제한치수	20[mm]

표 2. 설계 결과

Table 2. Design result

플런저	가로	4.4[mm]
	세로	1.64[mm]
코어	가로	4.5[mm]
	세로	1.7[mm]
프레임	두께	0.72[mm]
	높이	21.5[mm]
권선	코일직경	0.05[mm]
	두께	1.47[mm]
	높이	18.5[mm]
	턴 수	5698 [turn]
총 저항		1679 [Ω]
전류		0.0143[A]
소모전력		0.343[W]
온도상승		50 °C
기자력		81.4[At]

2.2 3차원 유한요소법을 이용한 특성 해석

설계된 데이터를 바탕으로 3차원 유한요소법을 이용하여 설계된 데이터를 검증한다. 그리고 프레임의 구조변화에 의한 흡입력의 크기를 비교해 봄으로서 프레임의 구조가 특성에 미치는 영향을 알아본다.

2.2.1 특성 해석

먼저 설계된 데이터를 검증하기 위해 사용 프로그램인 Maxwell을 이용하여 정특성과 동특성 해석을 시행하였다. 특성해석 시 정특성해석은 공극 0.1[mm], 전류

0.0143[A]에서 행하였고, 동특성 해석은 입력전압 24[V], 권선의 전체 저항 1679 Ω 에서 행하였다.. 그리고 플런저와 코어는 QMR5L, 그리고 프레임은 순철을 사용하였다.

그림 2는 설계된 마이크로 솔레노이드 엑츄에이터를 나타낸다. 그림 3은 정특성 해석 결과 얻어진 자속 밀도 분포를 나타낸 것이다. 플런저와 코어의 대부분에서 거의 포화가 일어남을 알 수 있다. 프레임 부분을 살펴보면 위쪽 프레임이 양 옆쪽 프레임에 비해 자속밀도가 높음을 보여준다. 이는 설계 시 옆쪽 프레임을 기준으로 프레임의 두께를 산정하였기 때문이다. 이처럼 프레임과 같은 국부적인 설계는 유한요소법을 이용하여 재설계를 할 필요성이 있음을 의미한다.

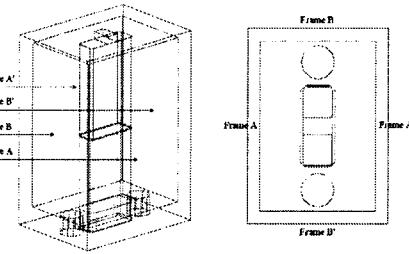


그림 2. 해석 모델

Fig 2. Analysis model

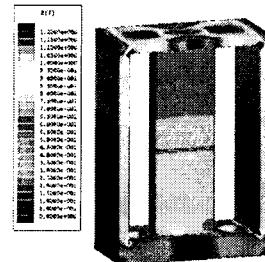


그림 3. 자속밀도 분포

Fig 3. Distribution of magnetic flux density

플런저에 작용하는 흡입력은 1.5[N]으로 나타났다. 이는 설계 목표로 잡았던 1.3[N]에 비해 충분하나 전압 변동을 고려했을 때는 0.1[N]정도 오차가 나타났다. 이는 기자력이 충분하지 않기 때문이라 생각한다. 초기 설계 시 기자력의 크기를 가정하기 때문에 이 가정부분에서 오차가 발생한 것이라 판단된다.

그림 4는 동특성 해석 결과 얻어진 시간-변위, 시간-흡입력 곡선을 나타낸다. 그림 5는 시간-전류곡선을 나타낸 것이다. 플런저는 약 0.5ms후에 이동을 시작했으며, 2ms 후에 이동을 완료하였다. 전류가 5ms에서 약 0.01A 까지 증가하였으나, 권선의 저항이 1.68k Ω 이므로 정상상태에서의 전류는 약 0.014[A]까지 증가할 것으로 보인다.

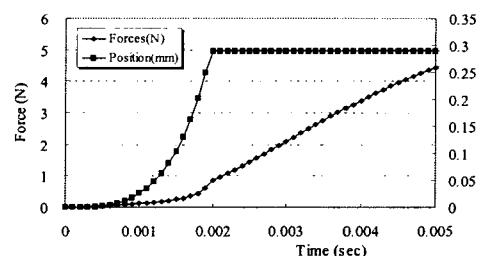


그림 4. 시간-흡입력과 시간-위치 파형

Fig 4. Time-attraction force and time-position waveform

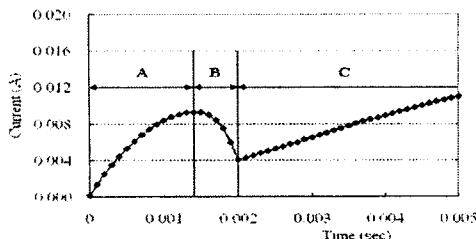


그림 5. 시간-전류 파형

Fig 5. Time-current waveform

그림 5를 살펴보면 A구간에서는 플런저의 움직임이 거의 없어 인덕턴스가 일정한 상태이다. 이는 다음의 식으로 설명된다.

$$V = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \quad (6)$$

B구간에서는 플런저의 속도가 증가하면서 전류가 감소하는 구간으로 인덕턴스가 변화하기 때문에 다음의 식으로 설명할 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= i(t)R + L \frac{d}{dt}(L(t)i(t)) \\ &= i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \Big|_{L=c} + i(t) \frac{\partial L}{\partial t} \frac{\partial i(t)}{\partial t} \Big|_{c=c} \\ &\quad + i(t) \frac{\partial L}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \Big|_{i=c} \end{aligned} \quad (7)$$

이 구간에서는 플런저의 속도가 매우 빠르기 때문에 우변의 4항이 매우 우세한 경우이다. 즉, 전류가 일정한 상태에서 공극이 감소하면 인덕턴스가 증가하고 코일의 유기전압에 의해 전류가 감소하는 구간이다. C구간에서는 플런저의 이동의 끝난 상태로 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V &= i(t)R + \frac{d}{dt}(L(t)i(t)) \\ &= i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \Big|_{L=c} + i(t) \frac{\partial L}{\partial t} \frac{\partial i(t)}{\partial t} \Big|_{x=c} \end{aligned} \quad (8)$$

이 구간에서는 자기회로의 대부분이 포화가 되는 상태이기 때문에 $\partial L / \partial i$ 는 통상 음이 되어, 전류가 증가하는 경우 제 2항과 제 3항은 서로 다른 부호를 갖게 된다. 따라서 우변 2항이 우세한 경우 전류가 증가하여 정상상태에 이르게 되고, 우변 3항이 우세한 경우 전류가 감소하여 정상상태에 이르게 된다. 본 모델의 경우 그림에서 알 수 있듯이 우변 2항이 우세한 경우임을 알 수 있다.

2.2.2 프레임의 구조 변화에 따른 특성 변화

다음으로 프레임의 구조를 변화시켰을 때의 흡입력 차이를 비교해보았다. 프레임이 솔레노이드 전체를 둘러싸고 있는 경우를 Full Model(Frame A'-A', B'-B'), 긴 면을 둘러싸고 있는 경우를 Long Model(A'-A'), 짧은 면을 둘러싸고 있는 경우를 Short Model(B'-B')이라고 부른다.

프레임의 구조를 자기회로로 생각해 보았을 때 면적은 Full Model > Long Model > Short Model이 되고 자기 저항은 Full Model < Long Model < Short Model이 될 것이다. 힘은 면적에 비례하기 때문에 흡입력은 Full Model > Long Model > Short Model의 순서를 보일 것이다. 해석 시 전류의 크기는 0.005A에서부터 0.02A까지 증가시키면서 흡입력의 변화를 측정하였다.

그림 6은 인가전류 크기에 따른 공극자속밀도의 크기를 나타낸 것이고, 그림 7은 전류변화에 따른 흡입력 크기를 나타낸 것이다. 전류가 작을 시에는 자속밀도의 차이가 크게 나지 않음을 볼 수 있다. 이는 발생하는 자속

이 작기 때문에 프레임의 단면적의 크기가 문제 되지 않음을 나타낸다. 이는 흡입력의 차이 역시 크지 않음을 나타낸다. 전류의 크기가 증가함에 따라 자속밀도의 차이가 벌어짐을 볼 수 있다. 이는 자속이 증가함에 따라 상대적으로 프레임의 면적이 작은 모델의 자기저항이 증가하게 되고 이에 의해 자속밀도의 차이가 점점 커지는 것이라고 볼 수 있다. 흡입력 역시 전류의 크기가 증가함에 따라 차이가 커짐을 볼 수 있다. 이는 인가전류가 커짐에 따라 프레임의 단면적이 중요한 요소로 작용함을 나타낸다.

Full Model의 경우 흡입력을 크게 작용하나 생산 공정이 어렵고 단가가 비싸기 때문에 실용화에 문제점이 있을 것이다. 그러므로 Long, Short Model처럼 일부만 둘러싸는 방법이 유용하다고 볼 수 있다. 그리고 적절한 프레임 두께를 산정하는 것이 매우 중요할 것이다.

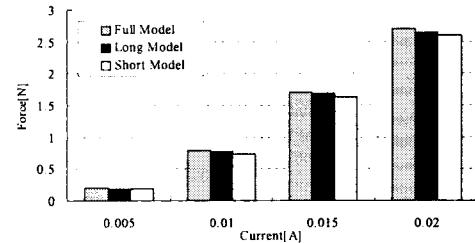


그림 6. 전류 변화에 따른 공극 자속밀도 비교

Fig 6. Comparison of Magnetic flux density for current

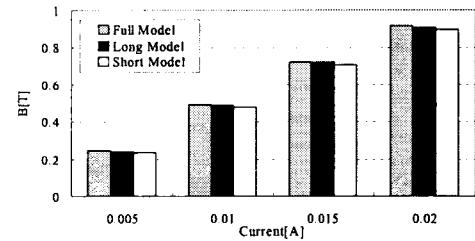


그림 7. 전류 변화에 따른 흡입력 비교

Fig 7. Comparison of Attraction force for current

3. 결 론

본 논문에서는 동가자기회로법을 이용하여 각형 마이크로 솔레노이드 엑츄에이터를 설계하였고 설계 프로그램은 통해 설계된 데이터를 바탕으로 3D 유한요소법을 이용하여 결과를 검증하였다. 설계 결과를 유한요소법으로 비교한 결과 크게 오차가 발생하지 않았다. 그러나 설계 목표를 맞춰가는 과정 중에 factor 선정의 어려움, 권선 형상의 조절 부분 등에서 미흡한 부분이 있음을 알 수 있었다. 그리고 프레임의 구조가 특성에 미치는 영향을 확인하였고 설계의 중요한 요소로 작용함을 확인할 수 있었다. 이러한 부분에 대한 보완이 이루어진다면 초기 설계의 신뢰성을 높일 수 있을 것이라 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 中田高義, 有限要素法による直交電磁石の設計と応用, 森北出版株式会社, Japan, 1991
- [2] Herbert C. Roters, Electromagnetic Devices, John Wiley & Sons, USA, 1995
- [3] 최인호, 고창섭, 정태경, 한송엽, “솔레노이드 엑츄에이터 전자기 시스템의 유한요소 해석”, 대한전기학회 논문집, 제40권 11호, 1991
- [4] B. J. Sung, E. W. Lee and H. E. Kim, "Empirical Design of an On and Off Type Solenoid Actuator For Valve Operation", KIEE International Trans on EMECS, Vol 4-B, No. 2, pp39-46, 2004