

고전압 차단기용 솔레노이드의 특성 해석

류재섭, 고창섭, \*운소남, \*함영복  
 충북대학교 전기공학과, \*한국기계연구원

Characteristics Analysis of the Solenoid for High-Voltage Circuit Breaker

Jae Seop Ryu, Chang Seop Koh, \*Sonam Yun, \*Youngbog Ham  
 Chungbuk National University, \*Korea Institute of Machinery and Materials

**Abstract** - 고전압 차단기용 액츄에이터는 솔레노이드, 파이로트 밸브, 유압 실린더로 구성되어 있으며, 차단기의 동작은 솔레노이드 액츄에이터의 동작에 의해 결정되기 때문에 솔레노이드 액츄에이터의 동작특성을 정확히 예측할 수 있어야 한다. 그러므로 차단기의 동작 성능을 개선하기 위해서는 솔레노이드 액츄에이터의 동작 특성을 정확히 해석하여 동작 특성에 영향을 미치는 인자를 알아내는 연구가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 고전압 차단기용 솔레노이드 액츄에이터의 과도상태 특성을 해석하여 응답 특성에 영향을 미치는 요인을 확인하고, 솔레노이드 액츄에이터의 응답특성을 개선시킬 수 있는 방법을 제시하였다.

발생이 동시에 이루어져야 하기 때문에 솔레노이드 액츄에이터의 응답 특성 역시 고속 동작과 큰 부하력을 동시에 갖고 있어야 한다. 솔레노이드 액츄에이터에서 발생하는 흡입력의 크기는 다음 식에 의해서 구할 수 있다[4].

$$F = \frac{1}{2\mu_0} A_s B_g^2 \quad [N] \quad (1)$$

여기에서  $A_s$ 는 솔레노이드 플런저의 단면적이고,  $B_g$ 는 공극에서의 자속밀도이다. 식 (1)에 의하면 솔레노이드의 플런저에 작용하는 흡입력은 공극자속밀도의 제곱에 비례한다. 공극의 자속밀도에 영향을 미치는 요인으로는 솔레노이드 액츄에이터의 형상과 사용된 자성체의 재질 등이 있으며, 본 논문에서는 솔레노이드 액츄에이터의 일부분의 재질을 변경하여 흡입력을 증가시킬 수 있는 방법을 제시하여 비교·검토한다.

1. 서 론

고전압 차단기용 액츄에이터(actuator)는 솔레노이드(solenoid), 파이로트 밸브(pilot valve), 유압 실린더(hydraulic cylinder)로 구성되어 있으며, 솔레노이드와 파이로트 밸브는 지렛대 방식의 힘 증폭장치에 의해 연결되고, 파이로트 밸브와 유압실린더는 유압 라인에 의하여 연결되어 있다. 고전압 차단기용 액츄에이터는 대부분 발생과 고속 동작이 동시에 이루어져야 하기 때문에 솔레노이드의 응답특성이 매우 중요한 인자라 할 수 있다.

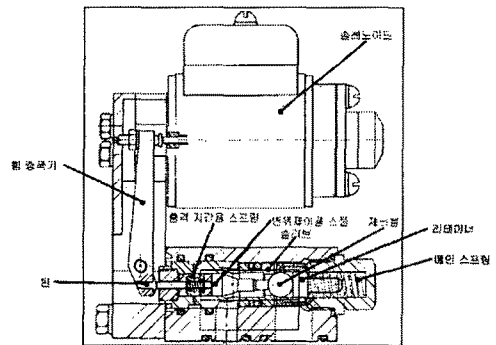
솔레노이드 액츄에이터는 전기적 신호를 작은 변위의 기계적인 직선운동으로 변환하는 장치로, 구조가 간단하고 경제적이며, 정밀제어가 가능한 장점이 있어, 밸브, 스위치, 릴레이 및 OA, FA 등의 여러 산업분야에서 이용되고 있다. 솔레노이드 액츄에이터는 직류전원을 인가하여도 과도상태에서 동작을 하기 때문에, 자성체의 비선형 특성과 더불어 와전류(eddy current)를 고려해야 하며, 전압원을 고려한 회로 방정식, 그리고 플런저(plunger)의 변위를 고려한 운동방정식 등과 결합하여 해석되어지고 있다[1,2,3].

본 논문에서는 고전압 차단기용 솔레노이드 액츄에이터의 과도상태에서의 특성을 해석하여 솔레노이드 액츄에이터의 성능에 영향을 미치는 요인들을 분석하고, 성능개선을 위한 방법을 제시하여 결과를 비교·검토하였다.

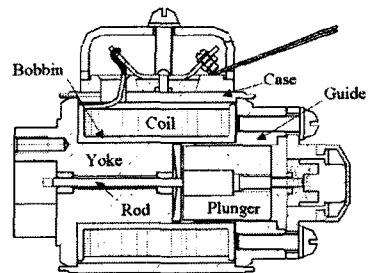
2. 고전압 차단기용 솔레노이드

Fig. 1에는 연구의 대상으로 하는 고전압 차단기용 액츄에이터의 기본 구조를 나타내는 것으로, 솔레노이드, 힘 증폭장치, 포켓밸브로 이루어져 있다. 솔레노이드 코일에 전원이 인가되면 플런저가 이동하고, 플런저와 일체형으로 되어있는 로드(rod)가 힘 증폭기를 구동시키면 지렛대의 원리에 의해 힘이 증폭되어 최종적으로 파이로트 부의 포켓밸브(poppet valve)를 구동시켜 차단기가 동작하게 된다.

고전압 차단기용 액츄에이터는 고속 동작과 큰 부하의



(a) High-voltage circuit breaker



(b) solenoid actuator

Fig. 1 Schematic of actuator for high-voltage circuit breaker

### 3. 유한 요소 해석

솔레노이드 액추에이터의 플런저에 발생하는 와전류를 고려한 해석영역의 지배방정식은 맥스웰 방정식으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_o + \vec{J}_e \quad (2)$$

식(2)에서  $J_o$ ,  $J_e$ 는 각각 전류밀도, 와전류밀도를 의미하며, 와전류 밀도는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{J}_e = -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (3)$$

식(3)에서 전위항을 무시하고, 식(2)에 대입하여 축대칭 문제를 고려하면 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{A_\theta}{r} + \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) \right] = \sigma \frac{dA_\theta}{dt} - J_{o\theta} \quad (4)$$

전압원으로 구동되는 솔레노이드의 해석을 위한 전압 방정식은 Kirchhoff의 전압 법칙을 적용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

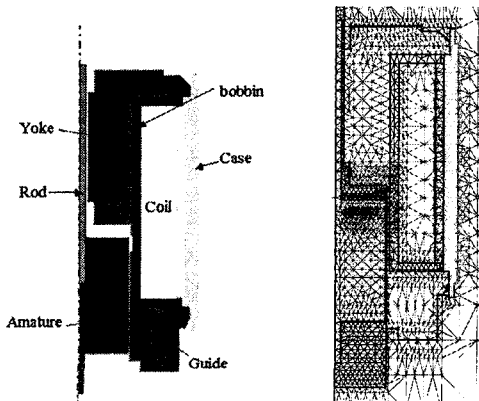
$$V = (R_1 + R_{ext})I(t) + E + L_n \frac{dI(t)}{dt} \quad (5)$$

여기에서,  $R_1$ 은 솔레노이드코일의 저항,  $R_{ext}$ 는 외부 회로 저항이고,  $E$ 는 유도기전력,  $L_n$ 은 누설 인덕턴스를 나타내며,  $I(t)$ 는 전압원에서 인가되는 여자전류이다.

식(4)의 자기방정식과 식(5)의 전압 방정식을 결합하여 전류와 자기 포텐셜을 미지수로 하는 식을 얻을 수 있다.

### 4. 해석 및 고찰

본 논문의 해석 모델인 고전압 차단기용 솔레노이드 액추에이터의 형상이 Fig. 2-(a)에 보이고 있다. 해석 영역은 축대칭을 고려하여 단면의 1/2만을 해석하였으며, 해석영역의 요소 분할도를 Fig. 2-(b)에 보이고 있



(b) analysis region (c) finite element mesh  
Fig. 2 Analysis model

Table 1. Specifications of solenoid

Voltage [V]	Number of Turns [Turns]	Resistance [Ω]	Weight of plunger [g]
75~125	1100	14	40.8

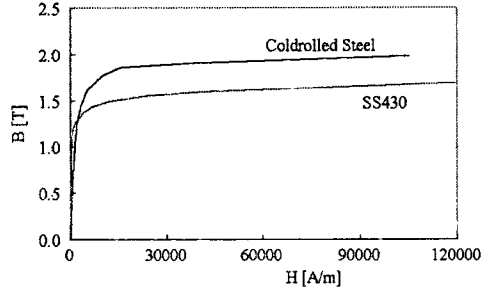


Fig. 3 B-H curves of magnetic materials

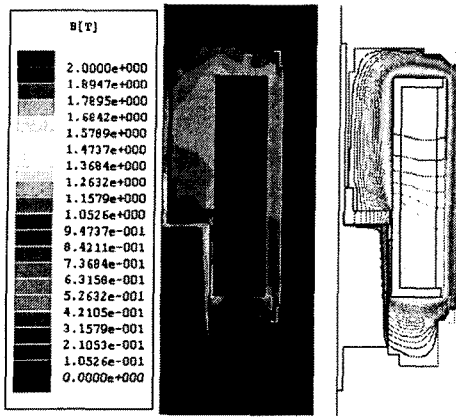
다. 본 연구에서는 솔레노이드 액추에이터의 입력전압으로 75~125[V]의 직류전원을 사용하였으며, 권회수 및 권선저항 등에 관한 사양은 Table 1에 표시되어 있다. 자성체의 비선형성을 고려하기 위하여 Fig. 3에 보이고 있는 자성체의 B-H 특성 곡선을 사용하였다.

Fig. 4에서는 플런저의 이동이 시작되는 순간과 이동이 완료된 후의 시간에서 자속의 흐름과 자속밀도 분포를 보여주고 있다. Fig. 4(a)는  $t=1$ [ms]에서의 자속의 흐름 및 자속밀도 분포를 보여주고 있으며, 이 때는 플런저의 표면에 발생하는 와전류의 영향으로 대부분의 자속이 플런저의 표면을 타고 흐르게 된다. 그리고 요크와 플런저 사이의 공극이 매우 크기 때문에 플런저와 일체형으로 되어 있는 로드(rod)부분에도 많은 양의 자속이 집중되어 자속밀도가 공극보다 높게 됨을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 플런저가 이동을 완료한 후인  $t=3.5$ [ms]에서의 자속의 분포를 보이고 있다. 이 때는 와전류의 영향이 많이 줄어들어 플런저의 안쪽까지 자속이 침투하였고, 요크와 플런저 사이의 공극도 충분히 작아져 많은 양의 자속이 이 공극을 통과하여 흐르기 때문에 공극의 자속밀도도 많이 높아졌다.

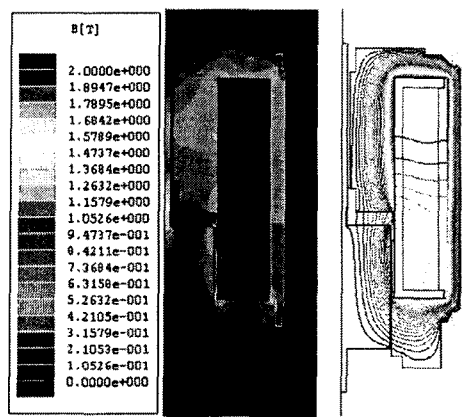
본 연구에서는 공극의 자속밀도를 높여 플런저의 흡입력을 높이기 위한 방법으로 플런저의 구조를 적층형(lamination type)으로 변경하여 특성을 해석하였다. 플런저의 구조를 적층형으로 하면 회전기의 코어를 적용해서 사용하는 것과 마찬가지로, 플런저에 발생하는 와전류를 억제할 수 있다.

Fig. 5에는 플런저를 적층형으로 제작하였을 경우의 자기장의 분포를 해석한 결과이다. Fig. 5(a)에는 플런저의 이동 초기인  $t=1$ [ms]에서의 자속의 흐름 및 자속밀도 분포를 보여주고 있다. 플런저에 와전류가 발생하지 않는 경우에는 자속이 플런저의 내부로 침투할 수 있어 결과적으로 많은 양의 자속이 발생하여 요크와 플런저 사이의 공극을 통해서 흐를 수 있다. Fig. 5(b)는  $t=3.5$ [ms]에서도 플런저의 내부까지 자속이 흐르는 것을 볼 수 있으며, 대부분의 자속은 플런저와 요크 사이의 공극을 통해서 흐른다.

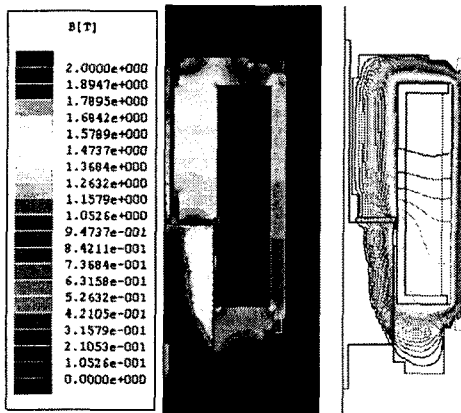
Fig. 6은 플런저를 솔리드 형과 적층형으로 하였을 때 발생하는 흡입력의 크기와 이동 시간을 비교한 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 플런저를 적층형으로 하였을 경우에 발생하는 흡입력이 크고, 플런저의 이동 시간도 단축됨을 알 수 있다.



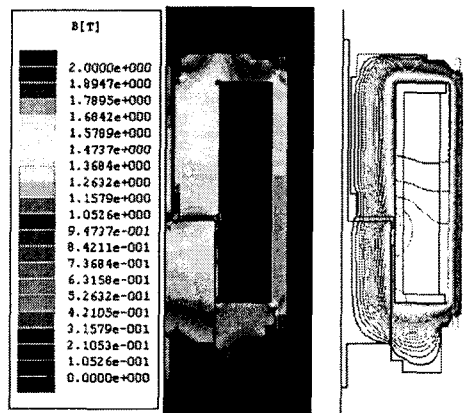
(a) time = 1 [ms]



(a) time = 1 [ms]



(b) time = 3.5 [ms]



(b) time = 3.5 [ms]

Fig. 4 Flux density distribution with solid type plunger

Fig. 5 Flux density distributions with laminated plunger

## 5. 결 론

본 논문에서는 고전압 차단기에 사용되는 솔레노이드의 과도 상태 특성을 해석하였다. 차단기의 차단 동작은 솔레노이드의 동작에 의하여 이루어지므로, 솔레노이드의 동작을 해석하여 차단기의 동작을 예측하기 위한 방법으로 사용되었다. 해석 결과로부터 솔레노이드 액츄에이터의 플런저를 직층형으로 제작하는 경우에 응답 특성이 개선됨을 알았으며, 제안된 방법이 솔레노이드 액츄에이터의 성능을 개선하기 위한 방법으로 유용함을 알 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 최인호, 고창섭, 정태경, 한송업, "솔레노이드 액츄에이터 전자기 시스템의 유한요소 해석," 대한전기학회논문지, 제 40권, 제11호, pp. 1105-1113, 1991.
- [2] 권기태, 한희택, "비정상 유한요소법을 이용한 고속응답 솔레노이드 밸브의 동적거동해석," 대한기계학회논문집B, 제 26권, 제7호, pp. 959-965, 2002.
- [3] 정인성, 허진, 윤상백, 현동석 "솔레노이드 액츄에이터의 형상최적화에 관한 연구," 대한전기학회논문지, 제47권, 제 9호, pp. 1325-1330, 1998.

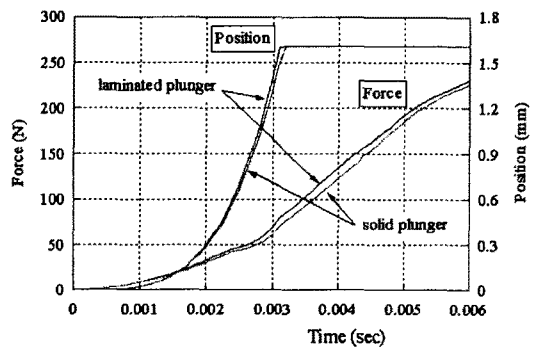


Fig. 6 Magnetic force comparison (125 [V])

- [4] Herbert C. Roters, Electromagnetic devices, John Wiley & Sons, 1941