

## 고전압 차단기용 솔레노이드의 특성해석

윤소남, 류재섭\*, 함영복, 노종호(한국기계연구원 첨단산업기술연구부)

### Characteristics Analysis of the Solenoid for High-Voltage Circuit Breaker

Sonam Yun, J. S. Ryu, Youngbog Ham, J. H. Noh(Dept. of Advanced Industrial Technology, KIMM)

#### ABSTRACT

In this paper, the solenoid for high-voltage circuit breaker which is composed of bobbin, solenoid coil, stationary core and plunger was studied. The solenoid is made of a soft magnetic iron bar with a large number of coil windings. when an electric current passes through this, this stationary core becomes the strong magnet used for hydraulic and pneumatic valve of a solenoid operated valve.

For the performance evaluation of the solenoid for high-voltage circuit breaker, electromagnetic characteristics and dynamic characteristics were analyzed. And, the parameters which is related to performance improvement were investigated.

**Key Words** : solenoid valve (솔레노이드 밸브), circuit breaker (차단기), transient analysis (과도해석), finite element method (유한요소법), attracting force (흡입력), eddy current (와전류)

#### 1. 서론

고전압 차단용 액츄에이터는 솔레노이드, 파이로트밸브, 유압 실린더로 구성되어 있으며, 솔레노이드와 파이로트밸브는 지렛대 방식의 힘 증폭장치에 의해 연결되고, 파이로트밸브와 유압실린더는 유압 라인에 의하여 연결되어 있다. 고전압차단용 액츄에이터는 대부하 발생과 고속 동작이 동시에 이루어져야 하기 때문에 솔레노이드의 응답특성이 매우 중요한 인자라 할 수 있다. 솔레노이드 액츄에이터(solenoid actuator)는 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, 자성체에서의 비선형 특성과 더불어 와전류(eddy current)를 고려해야 하며, 전압원을 고려한 회로방정식, 그리고 플런저(plunger)의 변위를 고려한 운동방정식 등과 결합하여 해석되어지고 있다.<sup>1-3</sup>

본 논문에서는 고전압 차단기용 솔레노이드 액츄에이터의 과도상태에서의 특성을 해석하여 솔레

노이드 밸브의 성능에 영향을 미치는 요인들을 분석하고, 성능 개선을 위한 방법을 연구하는데 기초 자료를 얻고자 한다.

#### 2. 고전압 차단기용 솔레노이드

Fig. 1 에는 연구의 대상으로 하는 고전압 차단용 액츄에이터의 외관을 보이는 것으로, 솔레노이드, 힘 증폭장치, 포켓밸브로 이루어져 있다.

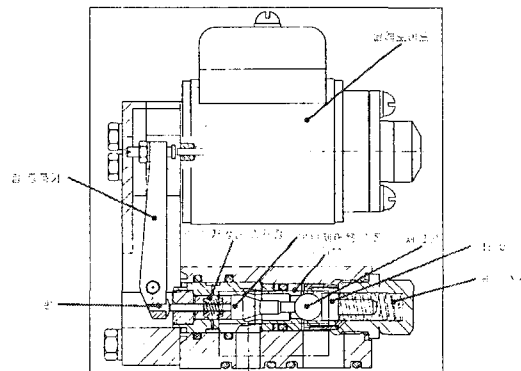


Fig. 1 Schematic of actuator for high-voltage circuit breaker

Fig. 2는 해석대상 솔레노이드를 보이는 것으로, 솔레노이드 코일에 전압을 입력하면, 요크부가 자화되어 플런저를 당기게 되고 플런저와 일체로 되어있는 로드가 힘 증폭장치를 구동시켜 최종적으로 파이로트 부의 포켓밸브를 구동시키게 된다.

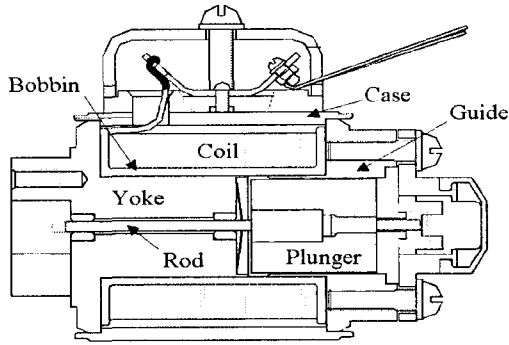


Fig. 2 Solenoid valve model

### 3. 유한요소법에 의한 과도상태 해석

#### 3.1 지배방정식

과도 상태에서 솔레노이드밸브 내부에는 와전류가 발생하므로 와전류를 고려한 시변 자기장의 지배 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \hat{A}) = \hat{J}_0 + \hat{J}_e \dots \dots \dots (1)$$

식(1)에서  $\hat{J}_0, \hat{J}_e$ 는 각각 전류밀도, 와전류밀도를 의미하며, 와전류 밀도는 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{J}_e = -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \Phi \right) \dots \dots \dots (2)$$

식(2)에서 전위항을 무시하고, 식 (1)에 대입하여 축대칭 3 차원 문제를 고려하면 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{A_\theta}{r} + \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) \right] = \sigma \frac{dA_\theta}{dt} - J_{,0\theta} \dots \dots \dots (3)$$

식(3)을 각 요소  $e$ 에 대하여 갤러킨 법으로 정식화하면 요소 ( $e$ )에서 요소 행렬 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[S_0]^{(e)} \{A\}^{(e)} + [P]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)} - [Q]^{(e)} I^{(e)} = 0 \dots \dots \dots (4)$$

#### 3.2 회로 방정식의 결합

전압을 입력으로 하는 솔레노이드 액츄에이터의 등가 전기회로에 대한 회로 방정식은 누설 리액턴스 성분을 무시하면 다음과 같다.

$$V = R_a I(t) + \frac{d\lambda}{dt} \dots \dots \dots (5)$$

여기에서,  $R_a$ 는 솔레노이드코일의 저항,  $E$ 는 자속의 변화에 의한 유도기전력을 의미하며,  $\lambda$ 는 쇄교 자속량을 나타낸다. 과도상태를 해석하는 경우에는 전류가 변화함에 따라서 솔레노이드에 쇄교하는 자속이 변화하기 때문에 코일에 유도기전력이 발생하는데, 이 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{2\pi N}{S} \frac{d}{dt} \int_{S^{(e)}} r_0 A^{(e)} ds = [G]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)} \dots \dots \dots (6)$$

여기에서  $N$ 은 솔레노이드 코일의 권선수이고,  $S$ 는 코일영역의 단면적, 그리고  $r_0$ 는 요소( $e$ )의 중심의 반경이다. 식(5)의 회로방정식에 식(6)을 대입하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$[G]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)} + R_l I(t) = V \dots \dots \dots (7)$$

따라서 식(4)의 지배방정식과 식(7)의 회로 방정식을 결합하여, 미지수가 자기벡터 포텐셜과 전류로 표현되는 식을 얻어 유한요소해석을 한다.

### 4. 모델 해석

본 논문의 해석 모델인 고전압 차단기용 솔레노이드 액츄에이터의 형상이 Fig. 3-(a)에 보이고 있다. 해석영역은 축대칭을 고려하여 단면의 1/2 만을 해석하였으며, 해석영역의 요소 분할도를 Fig. 3-(b)에 보이고 있다. 본 연구에서는 솔레노이드 액츄에이

터의 입력전압으로 75~125[V]의 직류전원을 사용하였으며, 권회수 및 권선저항 등에 관한 사양은 Table 1.에 표시되어 있다. 자성체의 비선형성을 고려하기 위하여 Fig. 4 에 보이고 있는 자성체의 B-H 특성 곡선을 사용하였다.

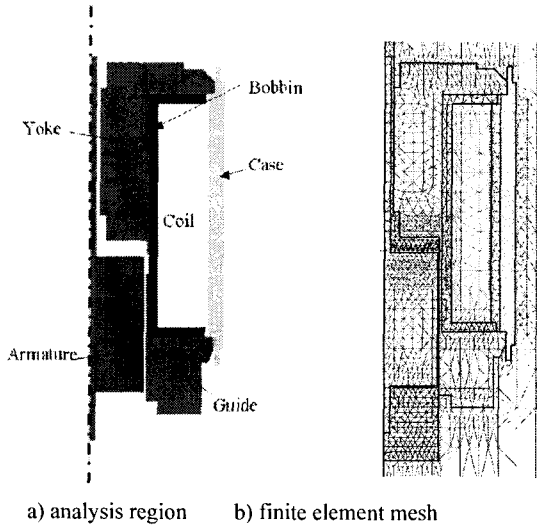


Fig. 3 Analysis model

Table 1. Specifications of solenoid

Voltage [V]	Number of Turn [Turns]	Resistance [ $\Omega$ ]	Weight of plunger [g]
75 ~ 125	1100	14	40.8

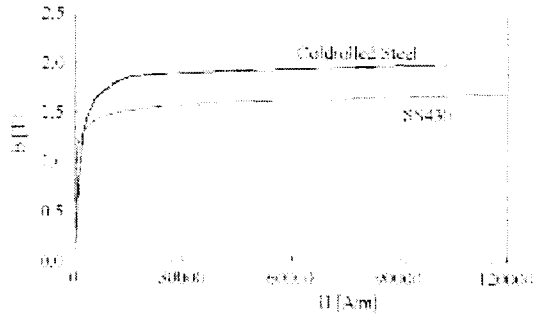
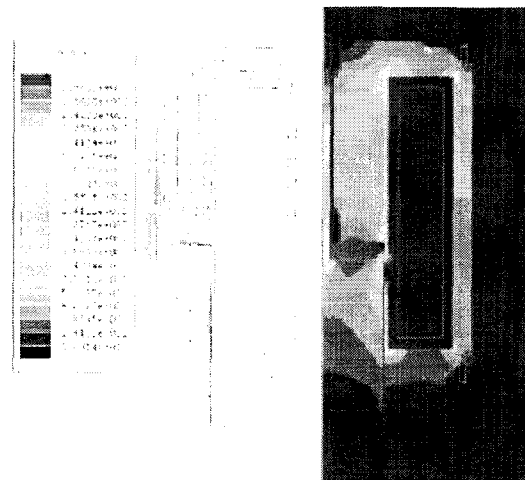


Fig. 4 B-H characteristics of magnetic materials

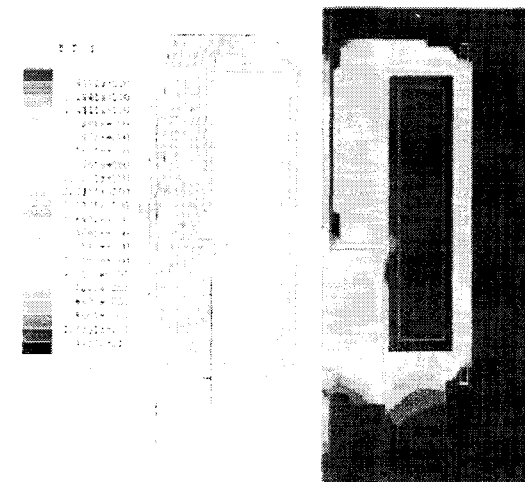
Fig. 5 에서는 시간 변화에 따른 자속의 흐름의 변화를 보여주고 있다. Fig. 5(a)는  $t=0.001$ [sec]에서의 자속의 흐름 및 자속밀도 분포를 보여주고 있으며, 이 때는 전압이 인가된 직후이기 때문에 코일에 흐르는 전류가 매우 작아서 발생된 자속은 매우 적다. 그리고 발생하는 흡입력도 작아 플런저의 위치에는 거의 변화가 없다. 따라서 공극을 통한 자속의 흐름보다는 로드를 통한 자속의 흐름이 많음을 알 수

있다. Fig. 5(b)는  $t=0.003$ [sec]에서의 자속 분포를 보여주고 있다. 이 때는 플런저의 이동이 거의 완료된 상태로 대부분의 자속이 공극을 통해서 흐르며, 자속이 전 영역에 퍼져서 흐름을 알 수 있다.

Fig. 6 에는 솔레노이드 액추에이터의 과도상태 해석의 결과로 시간에 대한 위치, 속도, 힘, 그리고 전류의 변화에 대한 그래프를 보이고 있다. (a)에는 플런저의 위치변화를 보이는 그래프로 인가전압에 따라서 플런저가 이동을 완료하는 시간은 약 3-4[ms]임을 알 수 있으며, 이 때 플런저의 속도가 최대가 됨을 (b)에서 알 수 있다. (c)에는 코일에 흐르는 전류의 변화를 나타내는 것으로 초기에는 전류의 변화가 작지만 플런저의 이동이 완료된 후에 급격하게 증가하여 약 10[ms] 후에는 정상전류까지 도달하였다. 이 때 발생하는 힘을 (d)에 보인다.



a) Time = 0.001 s



b) Time = 0.003 s

Fig. 5 Flux density distributions

## 5. 결론

본 논문에서는 고전압 차단기에 사용되는 솔레노이드의 과도 특성 해석에 관하여 연구하였다. 차단기의 차단 동작은 솔레노이드의 동작에 의하여 이루어지므로, 솔레노이드의 동작을 해석하여 차단기의 동작을 예측하기 위한 방법으로 사용되었다. 제안된 솔레노이드는 4[ms]의 동작시간을 갖도록 설계되었으며 해석 결과가 설계치와 잘 일치함을 알 수 있다. 유한요소법에 의한 솔레노이드의 과도 해석결과는 성능 개선 및 설계에 이용될 설계 변수의 계산에 매우 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 권기태, 한희택, "비정상 유한요소법을 이용한 고속응답 솔레노이드 밸브의 동적거동해석," 대한기계학회논문집 B, 제 26 권, 제 7 호, pp. 959-965, 2002.
2. 최인호, 고창섭, 정태경, 한송엽, "솔레노이드 액츄에이터 전자기 시스템의 유한요소 해석," 대한전기학회논문지, 제 40 권, 제 11 호, pp. 1105-1113, 1991.
3. 정인성, 허진, 윤상백, 현동석 "솔레노이드 액츄에이터의 형상최적화에 관한 연구," 대한전기학회논문지, 제 47 권, 제 9 호, pp. 1325-1330, 1998.
4. 성백주, 이은용, 김형의, "공기압 밸브 개폐용 솔레노이드 액츄에이터의 속응성 해석," 대한전기학회 EMECS 학회 추계학술대회 논문집, pp. 84-87, 2002.

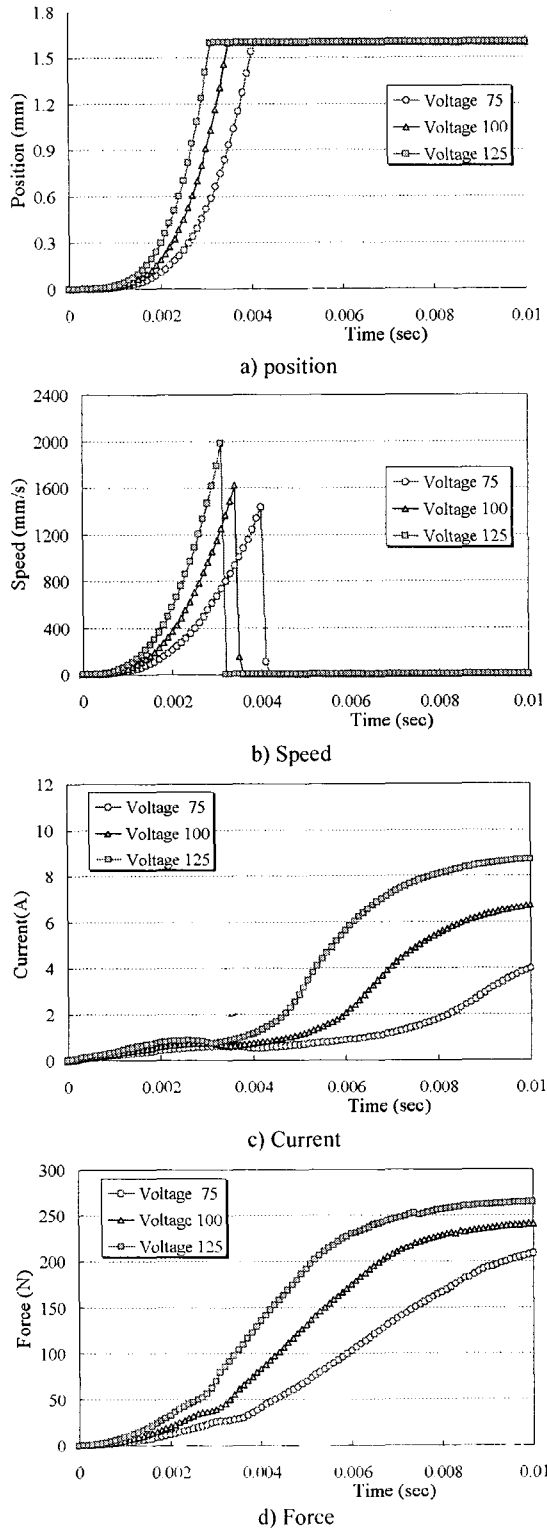


Fig. 5 Results of the transient analysis