

## 자기 등가회로법에 의한 영구자석형 차단기 조작기의 동작 특성 해석

\*전희득°, \*권병일, \*\*우경일, \*\*\*김병택  
\*한양대학교 대학원, \*\*한양대학교 공학기술 연구소, \*\*\* (주)삼성전기

### Dynamic Analysis of the PM-type Magnetic Circuit Breaker Using Magnetic Equivalent Circuit

\*H.D.JUN°, \*B.I.KWON, \*\*K.I.WOO, \*\*\*B.T.KIM  
\*Graduate School of Hanyang University, \*\*RIET, \*\*\*Samsung Electro-mechanics Co.Ltd

**Abstract** - This paper describes the operating characteristic analysis of PM-type magnetic circuit breaker for electromagnetic field, electric circuit and mechanical motion problems. Transient calculations are based upon the magnetic equivalent circuit analysis including non-linearity of materials and using iteration routines. The analysis results of this magnetic equivalent circuit are compared with those of FEM.

#### 1. 서 론

차단기 조작기의 소요부품을 최소화한 영구자석형 차단기 조작기는 코일의 에너지를 이용하지만 동작 상태 유지는 영구 자석의 보자력을 이용하여 스스로 유지하고, 필요 부품 수를 극소화하여 수명을 극대화한 수 만회 이상의 동작에서도 원활하게 동작할 수 있도록 신뢰성을 크게 높은 액츄에이터이다[1].

영구자석형 차단기 조작기는 영구자석, 2개의 여자 코일 및 철심의 유기적인 결합으로 기기의 특성에 복잡한 영향을 주게 된다. 따라서 정확한 특성해석을 위해서는 시간 차분 유한요소법을 사용해야 하지만, 일반적인 액츄에이터는 자기 등가회로법에 의존하여 설계되고 있으므로, 회로 정수 및 전기적, 자기적, 기계적 효과와 그 상호 작용의 정확판 분석이 필요하다[2].

본 논문에서는 액츄에이터의 동작을 빠르게 시뮬레이션 하기 위해서, 액츄에이터를 세부적으로 결합된 자기 등가 형태로 모델링하고, 코일과 영구자석에 의한 내부 자속분포를 반복적으로 계산하여 가동자의 동작 및 여자 전류의 변화 특성을 해석하였다. 또한 액츄에이터에 대한 자기 등가회로 해석방법의 타당성을 입증하기 위해 시간 차분 유한요소 해석 결과와 비교하여 검토하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 해석 모델 및 구조

리니어 액츄에이터는 가동부의 종류에 따라 가동 코일형(Moving Coil Type), 가동 자석형(Moving magnet Type) 및 가동 코어형(Moving Core Type)등으로 분류할 수 있다[3].

본 논문의 해석 모델은 그림 1과 같이 영구자석을 가진 가동 코어형이다. 코일A와 코일B에 인가되는 전압을 적절히 on, off하여 조절함으로써 가동자의 움직임을 제어한다. 가동자가 그림 1의 위치에 있는 경우 코일A에 전압을 인가하면 가동자가 위로 움직인다. 코일A에 인가된 전압이 off된 경우, 영구자석에 의하여 정지상태를 유지한다. 표 1은 기본 설계된 사양을 나타낸다.

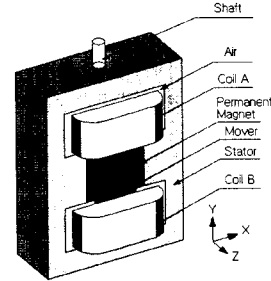


그림 1 영구자석형 차단기 조작기의 해석 모델

표 1 해석 모델의 기계적, 전기적 사양

코일 턴수	1500 [turn]
입력 전압	200 [V]
영구자석 잔류 자속 밀도	1.05 [T]
가동자 포화 자속 밀도	2.5 [T]
가동자 높이	232 [mm]
가동자 폭	100 [mm]
가동자의 이동 거리	20 [mm]
영구자석에 의한 힘	3500 [N]

##### 2.2 자기 등가회로 해석

자기 등가회로 해석을 위해 본 모델을 그림 2와 같이 세부적으로 결합된 자기 등가형태로 모델링하였다[4]. 여기서 S0은 외부 릴럭턴스의 크기 및 감자특성을 고려하여 모델링된 영구자석의 기자력이고, S1와 S2는 코일A와 코일B의 입력 전압과 쇄교 자속 변화 비율에 의해서 결정된 기자력이다. 또한 R1, R2, R9, R10, R11, R12, R13은 액츄에이터의 하우징 부분에서 나타낸 릴럭턴스이고, R5, R6은 가동자 부분, R3, R7, R15은 공극 부분, R4, R8, R14는 누설 릴럭턴스를 나타낸다.

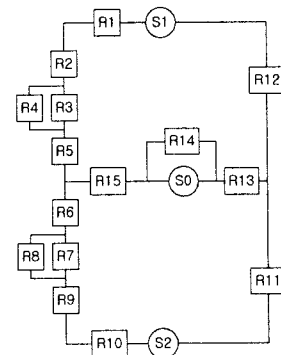


그림 2 액츄에이터의 자기 등가회로 모델

각 부분의 자속 밀도는 가동자의 동작 위치에서 릴럭턴스, 기자력과 자속에 대해 중점의 원리를 적용함으로써 계산할 수 있다.

### 2.2.1 개방 자기회로에서 릴럭턴스 모델링

해석 모델의 누설 퍼미언스를 계산하기 위하여 누설자속을 그림 3과 같이 모델링 하였다. 발생 기자력에 의해 발생된 자속  $\phi$ 는 그림 3(a)과 같이 공극을 지나는 자속  $\phi_g$ 와 누설 자속  $\phi_l$ 로 분리된다. 발생 기자력에 의한 발생 자속  $\phi$ 는 식 (2.1)과 같다.

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{R_g + R_l} \quad (2.1)$$

여기서  $\mathcal{F}$  : 발생기자력,  $R_g$  : 공극 릴럭턴스,  $R_l$  : 프린징에 의한 릴럭턴스이다.

공극 릴럭턴스  $R_g(x)$ 는 그림 3으로부터 식 (2.2)와 같다.

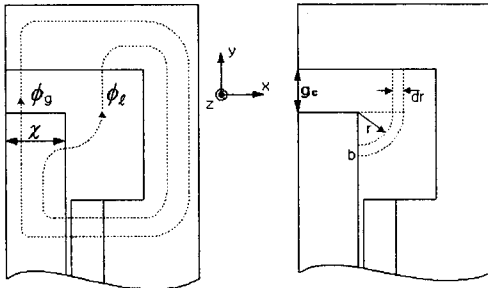
$$R_g(x) = \frac{g_c}{\mu_0 x L} \quad (2.2)$$

여기서  $x$  : 가동자의  $x$ 축 길이,  $L$  :  $z$ 축 방향의 길이  $g_c$  : 공극길이를 나타낸다.

한편, 프린징에 의한 퍼미언스는 그림 3(b)을 통해 모델링 하면 식 (2.3)과 같다.

$$P_l = \int_0^b \frac{\mu_0 dA}{l} = \frac{2\mu_0 L}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi b}{2g}\right) \quad (2.3)$$

여기서  $dA = Ldr$ ,  $l = g_c + \frac{\pi r}{2}$  이고  $b$  : 프린징 자속을 고려한 길이를 나타낸다[5].



(a) 공극자속과 누설자속 (b) 누설 퍼미언스

그림 3 프린징에 의한 릴럭턴스 계산을 위한 모델

### 2.2.2 영구자석의 자기 회로 모델링

정상상태동작에서 영구자석 동작점은 외부 자속이 적용되는 외부 퍼미언스에 의해서 결정된다. 영구자석은 모든 동작 상태에서 자화곡선이 선형적임을 가정하여 자기 회로로 모델링 할 수 있다[5].

결과적으로 영구자석의 감자특성은 식 (2.4)와 같이 표현할 수 있다.

$$B_m = B_r + \mu_R \mu_0 H_m \quad (2.4)$$

이 때 영구자석에서 발생하는 자속은 식 (2.5)처럼 나타내어진다.

$$\phi_m = B_m A_m = B_r A_m + \mu_R \mu_0 A_m H_m \quad (2.5)$$

여기서  $A_m$  : 자화방향에 대한 자석 표면의 면적,  $H_m$  : 자석내의 감자계이다.

영구자석의 기자력  $\mathcal{F}_m = H_m l_m$ , 잔류자속밀도

$\phi_r = B_r A_m$ , 퍼미언스  $P_m = \frac{\mu_R \mu_0 A_m}{l_m}$  을 이용하여 식 (2.5)를 식 (2.6)와 같이 발생 자속으로 표현할 수 있다.

$$\phi_m = \phi_r + P_m \mathcal{F}_m \quad (2.6)$$

### 2.3 동작 특성

가동자가 그림 1과 같이 아래에 위치할 때, 전압이 인가된 coil A의 전압 방정식은 식 (2.5)와 같고, 전류는 초기부터 지수함수로써 나타낸다.

$$V_1 = I_1 R_1 + N_1 \frac{d\phi_1(x, I_1)}{dt} \quad (2.5)$$

여기서  $V_1$ 은 인가전압,  $R_1$ 은 코일 저항,  $I_1$ 은 순시 전류,  $\phi_1(x, I_1)$ 는 코일의 전류와 가동자 위치  $x$ 의 함수로 된 자속을 나타낸다.

전류가 임의의 값에 올라갔을 때, coilA에 의해서 발생하는 자속이 영구자석에 의한 정지 힘을 극복하기에 충분하게 되면, 가동자가 움직이게 된다. 가동자가 움직이기 전에는  $x=0$ 이기 때문에 전압 방정식은  $R-L$  circuit로 단순화할 수 있다.

$$V_1 = I_1 R_1 + N_1 \frac{d\phi_1(x)}{dI_1} \frac{dI_1}{dt} \quad (2.6)$$

자속에 의해서 가동자가 위로 향하는 힘은 간단히 식 (2.7)처럼 나타낼 수 있다.

$$F_{mag} = \frac{\phi^2}{2\mu_0 A_g} \quad (2.7)$$

여기서  $\phi$ 는 위 유효 공극을 통과하는 자속,  $A_g$ 는 위 유효 공극의 면적을 나타낸다. 가동자가 움직일 때의 전압 방정식은 식 (2.8)과 같다.

$$V_1 = I_1 R_1 + N_1 \frac{d\phi_1(x)}{dI_1} \frac{dI_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_1(I)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (2.8)$$

위 식에서 마지막 부분은 가동자 움직임에 위해서 발생하는 Back emf를 나타낸다. 가동자에 대한 운동 방정식은 식 (2.9)와 같다.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{mag} - F_f \quad (2.9)$$

여기서  $m$ 은 가동자의 무게,  $F_f$ 는 마찰력을 나타낸다. 특성계산에서는 마찰력을 무시하였다.

동적인 운동 반복식은 식(2.10)과 같이 나타낸다.

$$\frac{dx_{n+1}}{dt} = \frac{dx_n}{dt} + \frac{d^2 x_{n+1}}{dt^2} (t_{n+1} - t_n) \\ x = \frac{dx_n}{dt} (t_{n+1} - t_n) + \frac{1}{2} \frac{d^2 x_n}{dt^2} (t_{n+1} - t_n)^2 \quad (2.10)$$

이러한 반복식은 각 시간의 가동자의 힘, 부분의 자속, 코일의 전류 및 가동자 움직임을 계산하는데 이용된다. 그림 4는 액츄에이터의 자기 등가회로 해석 과정을 나타낸다.

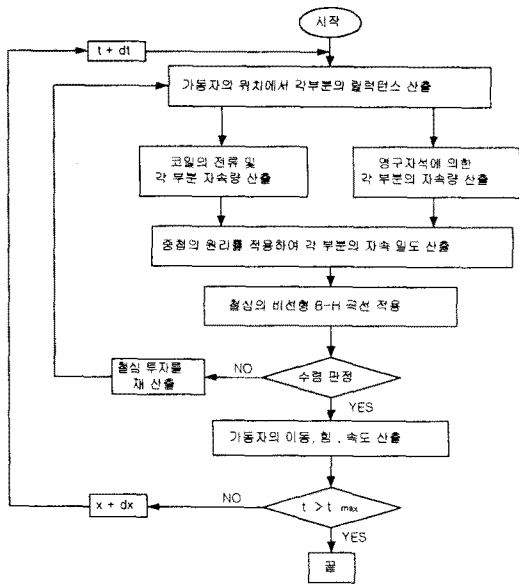
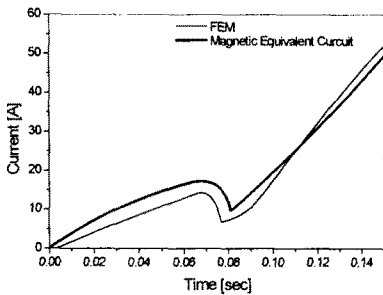


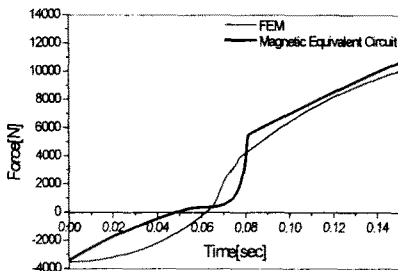
그림 4 등가회로 해석 과정

### 3. 해석 결과 및 고찰

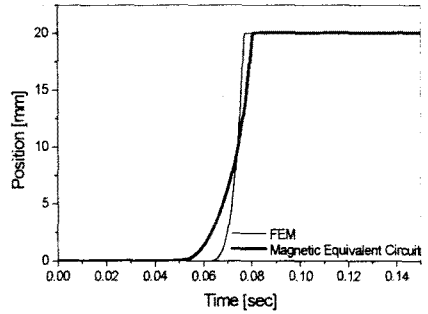
자기 등가회로법의 타당성을 검증하기 위해 그림 5에 자기 등가회로 해석결과와 시간 차분 유한요소해석 결과[1]를 비교하여 나타내었다. 전압 투입시, 영구자석에 의한 힘 3450[N] 이상이 될 때 가동자는 움직이게 되고, 차단속도는 가동자가 20[mm] 이동하는데 각각 3.5[m/s](FEM), 2.7[m/s](Magnetic Equivalent Circuit)정도 되었다. 두 해석 결과에서 차이가 발생하는 이유는 각 샘플링 시간에 있어서 그림 3(b)와 같은, 누설 퍼미언스를 계산하기 위한, 모델링에서 발생하는 오차에 의한 공극 자속 밀도의 차이, 영구자석의 동작점 결정에서의 오차 그리고 자기 등가 회로법에서의 부분적인 자속의 포화를 고려하기 어려움 등으로 생각된다.



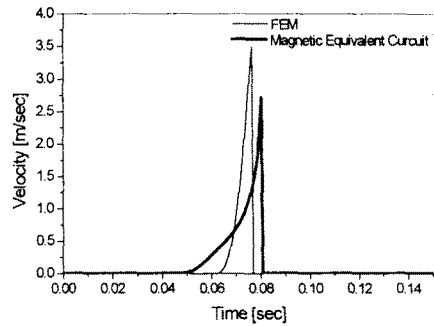
(a) 코일A의 여자 전류



(b) 가동자의 추력



(c) 가동자의 변위



(d) 가동자의 속도

그림 5 등가회로와 유한요소 해석의 특성 비교

### 4. 결 론

본 논문에서는 액추에이터의 동작을 빠르게 시뮬레이션 하기 위해서 액추에이터를 자기 등가 형태로 모델링 함으로써, 코일과 영구자석의 의한 내부 자속 분포를 반복적으로 계산하여 가동자의 발생 추력, 반응 속도 및 코일에 흐르는 전류 등 동작 특성을 해석하였다. 또한, 액추에이터의 자기 등가회로 해석 방법의 타당성을 검증하기 위해 시간 차분 유한요소해석 결과와 비교하였다.

자기 등가 해석결과는 유한요소 해석결과와 어느 정도 일치하는 것으로 나타났으며, 해석시간을 10배 이상 단축 할 수 있었다. 또한, 회로 정수 및 전기적, 자기적 기계적 효과의 상호 작용을 파악할 수 있으므로 액추에이터의 최적설계에 적용 될 수 있을 것이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 전희득, 권병일, 우경일, 김병택, "영구자석형 차단기 조작기의 동작 특성 해석", 대한 전기학회 추계부문학술대회 논문집.B권, pp.253-255, 2000
- [2] Boldea, S.A.Nasar, "Linear electric actuators and generator", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.14, No.3, pp. 712-717, 1999
- [3] Xiong, Guangyu, Yamada, "Dynamic Analysis of a Cylindrical Moving-core Linear Oscillator Actuator", *LDIA'95 Nagasaki, JAPAN*, pp. 405-408, 1999
- [4] Z.Li, B.R. Varlow, "Optimal design of autorecloser electromagnetic actuator", *IEE Proc-Electr. power Appl*, Vol.147, No.5, pp.431-435, 2000
- [5] Duane C. Hanselman. *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. McGraw-Hill, 1994