

# 자기 액츄에이터를 이용한 진공차단기 구동 메카니즘 개발

論文

52B-8-4

## Development of VCB Driving Mechanism using Permanent Magnetic Actuator

崔名俊\*·石福烈\*\*·金昌郁\*·崔永燦\*\*\*·朴日韓§

(Myung-Jun Choi · Bok-Yeol Seok · Chang-Wook Kim · Young-Chan Choi · Il-Han Park)

**Abstract** - Nowadays, Vacuum Circuit Breaker(VCB) is used in the most medium voltage level because vacuum has environment-friendly characteristics as well as excellent dielectric strength. In order to elevate the breaking performance, the improvement of vacuum interrupters and the driving mechanism should be proceeded.

In this paper, the development of a Permanent Magnet Actuator could replace the mechanical spring mechanism which is the driving mechanism of existing VCB. The holding force and opening characteristics of magnetic actuator are analysed with FEM and the result is verified through experiment.

**Key Words** : Permanent Magnetic Actuator(PMA), Vacuum Circuit Breaker(VCB), Vacuum Interrupter(VI),  
구동 메카니즘, 트립전류, 투입전류, 유한요소법

### 1. 서 론

진공은 우수한 절연특성과, 특히 환경 친화적이므로, 진공을 이용한 진공차단기(Vacuum Circuit Breaker)는 현재 중저압 차단기 분야에서 가장 많이 사용되고 있다[1][2]. 또한 1997년 교토협약(교토의정서)에 의하면, SF<sub>6</sub> 가스는 지구 온난화 가스로 규정되었으며, 그 효과는 CO<sub>2</sub>에 비하여 대략 25,000배이므로 조만간 국가별로 SF<sub>6</sub> 가스의 사용과 배출은 제어를 받을 것이며, 이런 영향으로 진공차단기(VCB)는 다른 차단기에 비해 각광을 받고 있는 상황이다. 진공차단기의 개발에는 차단능력을 향상시킬 수 있는 진공인터럽터(Vacuum Interrupter) 개발과 동작특성을 향상시킬 수 있는 구동 메카니즘 개발로 분류된다. 진공인터럽터의 개발방향은 아크 구동힘을 크게 하는 직교자계 채용 방식에서, 현재는 응축아크의 발생을 방지할 수 있는 축자계 채용 방식으로 진행되고 있는 상황이며, 동작특성을 향상시키는 구동 메카니즘 개발방향은 전동 스프링 방식에서, 영구자석을 이용한 자기 액츄에이터 방식(PMA)으로 진행되고 있는 상황이다[3][4][5]. 영구자석을 이용한 자기 액츄에이터 설계는 가동자의 상하 좌우 부분에 코일을 배치하는 양방향 구동방식과 코일을 가동자의 좌우에만 배치하는 One 코일 구동방식의 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다. 양방향 구동방

식은 유럽에서 주로 연구·설계되고 있으며, One 코일 구동방식은 일본, 중국 등에서 연구·설계되고 있다[6].

기존의 전동 스프링 방식 구동 메카니즘은 많은 부품수를 사용하기 때문에 고장이 자주 발생하는 경향이 있다. 이에 반해 영구자석을 이용한 자기 액츄에이터 방식은 전동 스프링 방식보다 부품수가 대략 50[%]정도 감소하므로, 고장이 발생될 빈도가 적을 뿐만 아니라, 높은 신뢰성이 있어 유지보수가 거의 필요하지 않다. 또한 기존 방식보다 제어가 가능한 전기적인 파라미터들이 존재하기 때문에, 차단 동작시 제어 스위칭 기법을 활용함으로써, 진공인터럽터의 접점 마모 및 변형을 방지할 수 있다[3].

본 논문에서는 자기동가회로법을 이용한 자기 액츄에이터의 개략적인 설계와 수치해석을 이용한 투입 유지력 및 동작특성 해석을 수행하며[4], 자기 액츄에이터가 취부된 진공차단기의 투입(Closing) 및 트립(Trip) 시험을 수행하여 해석기술의 타당성을 검증한다. 자기 액츄에이터의 투입 유지력을 계산하기 위해, 상용 프로그램을 이용한 2, 3차원 자체 해석을 수행하고, 동작특성 해석시에는 계산시간과 메모리를 줄이기 위해 2차원 해석을 수행한다. 또한 해석의 정확성을 위해 자기 액츄에이터에 사용되는 SUYP(전자연철판)와 S45C에 대한 B-H 특성을 측정하여, 비선형 해석시 활용하게 된다. 위 해석결과를 바탕으로 시제품을 제작하고, 자기 액츄에이터의 투입 유지력 및 투입 동작시 코일에 투입되는 투입 전류를 측정하였다. 투입 유지력 측정시에는 진공차단기에서 자기 액츄에이터를 분리하였으며, 투입 동작시 코일에 투입되는 투입 전류는 진공차단기에 자기 액츄에이터를 취부하여 측정한다. 그러므로 투입 유지력 및 투입 전류에 대한 해석값과 시험값의 일치함을 보이고자 한다.

\* 正會員 : 現代重工業 研究員  
\*\* 正會員 : 現代重工業 先任研究員  
\*\*\* 正會員 : 現代重工業 責任研究員  
§ 正會員 : 成均館大學校 教授  
接受日字 : 2003年 4月 9日  
最終完了 : 2003年 7月 1日

## 2. 유한요소법을 이용한 PMA(Permanent Magnetic Actuator) 해석

### 2.1 전압원을 이용한 과도상태 유한요소 정식화

2차원 공간에서, 전류원으로 구동되는 정자장(Magnetostatic) 시스템의 미분방정식은 다음과 같다.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J_0 \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 자기벡터포텐셜,  $\mu$ 는 투자율,  $J_0$ 는 구동 전류 밀도이다.

전압원 문제에 대한 유한요소 정식화식은 다음과 같다.

$$[B][A] + [C][I] = 0 \quad (2)$$

여기서

$$[B] = \sum_e \int_{\Omega_e} \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega_e$$

$$[C] = -T \frac{\pm 1}{S_e} \sum_e \int_{\Omega_e} N_i d\Omega_e$$

이며  $S_e$ 는 코일의 단면적,  $N_i, N_j$ 는 형상함수,  $\Omega_e$ 는 요소의 면적,  $T$ 는 코일의 turn수이다.

전압원에 연결되어 있고, 외부회로의 저항과 인덕턴스만 고려하고, 외부회로의 커패시턴스를 무시한 전기적인 회로방정식은 다음과 같다.

$$V = R_c I + L_c \frac{dI}{dt} + \frac{d\lambda}{dt} \quad (3)$$

여기서  $V$ 는 인가전압,  $R_c$ 는 외부회로의 저항,  $L_c$ 는 외부회로 인덕턴스이며,  $\lambda$ 는 쇠교자속이다. 또한  $\lambda$ 는 자기벡터포텐셜  $A$ 로 표현된다.

본 논문에서는 후퇴차분법(Fully Implicit Method)을 이용하여, 과도상태 해석시 나타나는 미분항을 수치적으로 처리하였다. 후퇴차분법을 이용할 경우는  $[A]^{t+\Delta t}$  값을 계산하는 문제가 되며, 수식전개 과정에서 사용되는  $[\frac{\partial A}{\partial t}]^{t+\Delta t}$ ,  $[\frac{dI}{dt}]^{t+\Delta t}$ 는 다음과 같이 치환된다.

$$[\frac{\partial A}{\partial t}]^{t+\Delta t} \equiv \frac{A^{t+\Delta t} - A^t}{\Delta t} \quad (4)$$

$$[\frac{dI}{dt}]^{t+\Delta t} \equiv \frac{I^{t+\Delta t} - I^t}{\Delta t}$$

식(3)에 식(4)를 적용하면 다음과 같이 변형된다.

$$[C] \frac{A^{t+\Delta t} - A^t}{\Delta t} + R_c I^{t+\Delta t} + L_c \frac{I^{t+\Delta t} - I^t}{\Delta t} = V^{t+\Delta t} \quad (5)$$

식(5)을  $t + \Delta t$ 항과  $t$ 항으로 분리하고, 식(2)와 같은 형태로 정리하면 다음과 같이 된다.

$$[\frac{C}{\Delta t}] A^{t+\Delta t} + (R_c + \frac{L_c}{\Delta t}) I^{t+\Delta t} = V^{t+\Delta t} + [-\frac{C}{\Delta t}] A^t + \frac{L_c}{\Delta t} I^t \quad (6)$$

식(2)와 식(6)을 결합한 전압원을 이용한 과도상태 해석에 사용되는 행렬식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} [B] & [C] \\ [C] & [Z_z] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix}^{t+\Delta t} = \Delta t \begin{bmatrix} [0] \\ [V] \end{bmatrix}^{t+\Delta t} + \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [C] & [Z_l] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix}^t \quad (7)$$

여기서  $[Z_z] = R_c \Delta t + L_c$ ,  $[Z_l] = L_c$ 이다.

### 2.2 PMA 동작특성 해석 및 전자기력 계산

PMA(Permanent Magnetic Actuator) 동작특성은 코어내부에 존재하는 가동자(Mover)의 운동방정식을 풀음으로써 해석될 수 있다. 2차원 공간에서  $y$ 축으로 상·하 운동을 할 경우, 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다[4].

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + B \frac{dy}{dt} = F_{mag} - F_f \quad (8)$$

여기서  $M$ 은 가동자의 질량,  $B$ 는 마찰계수,  $y$ 는 변위,  $F_f$ 는 중력과 스프링등을 포함한 전체적인 반발력이며,  $F_{mag}$ 는 전자기력이다.

위 식(8)에서 가동자의 전자기력  $F_{mag}$ 을 구하기 위해, 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$f = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (9)$$

위 식(9)에서  $f$ 는 전자기력 밀도,  $B$ 는 자속밀도,  $\mu_0$ 는 진공에서의 투자율이다.

따라서 자성체인 가동자가 받는 전체적인 힘은 식(9)의  $f$ 를 이용하여 다음과 같이 구한다[7][8].

$$F_{mag} = \int_s f ds = \int_v f dv \quad [N] \quad (10)$$

여기에서  $s, v$ 는 가동자의 면적과 체적이다.

## 3. 개략설계 및 개발 Flow

### 3.1 개략설계

PMA 설계에는 제작형상의 진공차단기(VCB) 취부 적합성 검토(중량, 사이즈, 원가등) 및 상세설계 시간을 단축시키기 위한 모델의 초기 형상 및 치수를 결정하는 개략설계 과정이 필요하다. 개략설계 과정에서 결정되는 초기 형상변수

는 가동자의 단면적, 영구자석의 단면적, 코어의 단면적이다. VCB 투입시에 필요한 투입 유지력이 선정되면, 식(10)을 이용하여 가동자의 단면적을 결정하고, 투입 유지력을 발생시키는 영구자석의 체적은 다음과 같은 방법으로 결정한다. 영구자석이 포함된 개략적인 자기회로는 그림1과 같다[9].

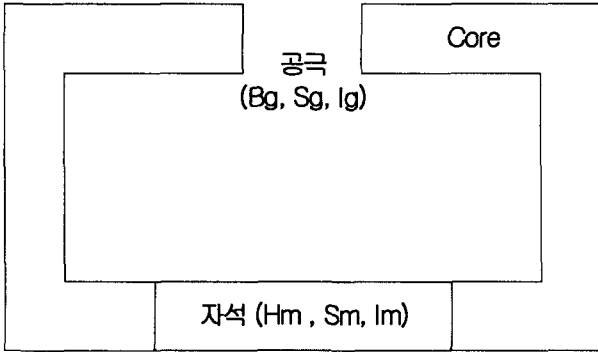


그림 1 영구자석이 포함된 자기회로  
Fig. 1 Magnetic circuit including permanent magnet

그림 1에서 영구자석의 체적을 결정하기 위해, 다음과 같은 식을 사용한다.

$$B_m S_m = \gamma \cdot B_g S_g \quad \text{자속} \quad (11)$$

$$H_m l_m = g \cdot B_g l_g / \mu_0 \quad \text{기자력} \quad (12)$$

여기서  $B_g$ 는 공극의 자속밀도,  $S_g$ 는 공극의 단면적,  $l_g$ 는 공극의 길이,  $B_m$ 는 영구자석에서 발생하는 자속밀도,  $H_m$ 는 영구자석의 자화력,  $l_m$ 는 영구자석의 길이,  $S_m$ 는 영구자석의 단면적,  $g$ 는 기자력의 손실계수,  $\gamma$ 는 자속의 누설계수이다.  $\gamma$ 는 자기회로의 형상에 따라 변하며, 영구자석이 포함된 자기회로에서는 일반적으로 2.5~10정도이며,  $g$ 는 대략 1.1~1.3정도이다[9]. 식(11)을  $S_m$ 에 대하여 정리하고, 식(12)을  $l_m$ 에 대하여 정리하여 두 항을 곱하면 식(13)이 된다.

$$S_m l_m = V_m = \frac{\gamma \cdot g \cdot B_g^2 S_g l_g}{\mu_0 B_m H_m} \quad (13)$$

여기서  $V_m$ 은 영구자석의 체적이다.

위 식(13)은 주어진 설계사양에 대하여,  $B_m H_m$ 이 최대가 되는 동작점 [ $(BH)_{max}$ ]에서 영구자석을 설계하면, 영구자석의 체적이 최소로 되는 것을 나타내며, 또한  $(BH)_{max}$  값이 큰 영구자석을 사용하면, 자기회로를 작게 할 수 있다는 것을 나타낸다. 또한 식(11)을  $B_m$ 에 대하여 정리하고, 식(12)을  $H_m$ 에 대하여 정리한 후 두 항을 나누면 식(14)이 된다.

$$B_m / H_m = \mu_0 \cdot \frac{l_m}{S_m} \cdot \frac{S_g}{l_g} \cdot \frac{\gamma}{g} \quad (14)$$

식(14)은 영구자석의 동작을 결정하는 식으로, 좌변의  $B_m/H_m$ 을 퍼미언스 계수라 부르며, 영구자석의 감자곡선과 교차하는 점을 동작점이라 한다. 또한 우변의 제 3항 이하의 설계사양과 자기회로에 의해 결정되므로, 퍼미언스 계수가 최적동작점이 되도록 영구자석 면적과 길이를 결정하면 개략설계가 종료된다[9].

### 3.2 개발 Flow

PMA 개발에는 3.1절에서 언급한 개략설계와 수치해석을 이용한 상세설계 및 동작특성 해석을 수행해야 한다. 개략설계 과정에서는 가동자의 투입 유지력이 만족하도록 코어, 가동자 및 영구자석의 크기가 설계변수가 된다. 그러나 개략설계 과정에서는 코어의 비선형 특성을 고려되지 않는 관계로 계산된 크기가 정확하다고 볼 수 없다. 그러므로 수치해석 방법을 이용하여 코어의 비선형 특성을 고려하여 가동자의 투입 유지력을 계산함으로써, 코어, 가동자 및 영구자석의 크기를 수정하는 상세설계를 수행한다. PMA 개발에 대한 전반적인 Flow는 아래 그림과 같다.

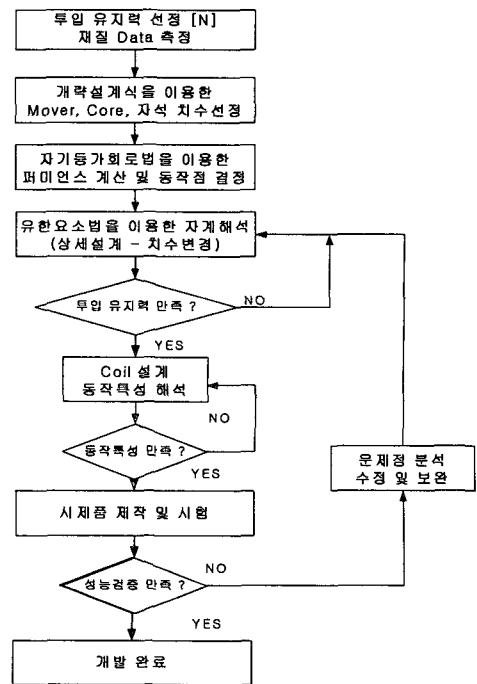


그림 2 PMA 개발 Flow  
Fig. 2 Development Flow of PMA

위 그림2를 보면, 가장 중요한 설계 변수가 투입 유지력임을 알 수 있고, Coil 설계시 고려할 점은 투입 동작시 코일에 투입되는 투입 전류와 동작 완료시간이 개발사양에 만족하도록 해야한다. 특히 코일의 투입 전류는 PMA 앞단에 설치되는 전자 제어부의 주요한 설계변수이며, 전류의 크기가 증가할수록 제어회로 크기의 증가를 유발한다.

4. PMA에 대한 자기등가회로 설계

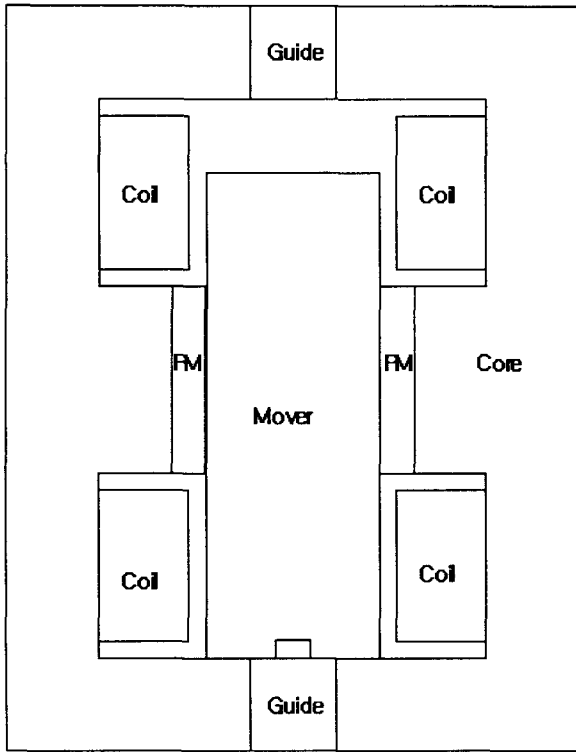


그림 3 PMA 개발 형상  
Fig. 3 Development model of PMA

그림 3은 본 연구에서 7.2[kV] 25[kA] VCB에 적용하기 위해 개발하고 있는 PMA의 형상이다. VCB의 차단 방식을 하나의 PMA를 이용하여 3개의 VI를 동시에 차단할 수 있는 3상 일괄 방식을 채택하였고, PMA 설계시 접점간의 접촉 전자반발력을 충분히 견딜 수 있도록 투입 유지력을 5000[N]으로 선정하였으며, 가동자의 이동거리는 Breaker Shaft 변환비를 고려하여 20[mm]로 결정하였다. 그림 3처럼 현재 개발하고 있는 PMA의 코어 내부에는 쌍안정성(Bistable) 동작원리를 이용한 가동자가 위치하고 있으며, 투입과 트립 동작시 사용되는 코일이 상·하에 배치되어 있다. 가동자의 좌·우에는 VCB의 투입상태를 지속적으로 유지할 수 있도록, 투입 유지력을 발생시키는 영구자석이 위치하고 있으며, 코일 전류에 의해 발생하는 역자계에 자성을 잃지 않도록, 보자력이 큰 희토류 계열의 NdFeB 자석을 사용하였다. 또한 희토류 자석을 사용함으로써 위 절에서 언급한 것처럼 영구자석과 자기회로의 크기를 작게 할 수 있다[5]. 그림4는 PMA 개략설계 과정에서 사용되는 자기등가회로이다.

그림 4에서  $R_{gbm}$ 은 영구자석과 가동자의 공극 자기저항,  $R_{mo1}$ 은 가동자 상단부 자기저항,  $R_{mo2}$ 은 가동자 하단부 자기저항,  $R_{co1}$ 은 코어 상단부 자기저항,  $R_{co2}$ 은 코어 하단부 자기저항,  $R_{g1}$ 은 코어와 가동자의 상부 공극 자기저항,  $R_{g2}$ 은 코어와 가동자의 하부 공극 자기저항이다. 위와 같은 자기등가회로는 투입 동작시 PMA의 가동자가 코어 하단부에 접촉되어 유지되므로, 하단부의 자기저항이 상단부의 자기저항에 비해 상당히 작기 때문에, 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

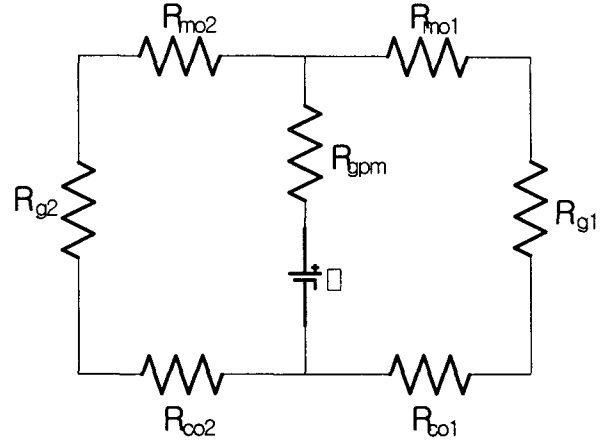


그림 4 PMA 자기등가회로  
Fig. 4 Equivalent magnetic circuit of PMA

기저항,  $R_{co1}$ 은 코어 상단부 자기저항,  $R_{co2}$ 은 코어 하단부 자기저항,  $R_{g1}$ 은 코어와 가동자의 상부 공극 자기저항,  $R_{g2}$ 은 코어와 가동자의 하부 공극 자기저항이다. 위와 같은 자기등가회로는 투입 동작시 PMA의 가동자가 코어 하단부에 접촉되어 유지되므로, 하단부의 자기저항이 상단부의 자기저항에 비해 상당히 작기 때문에, 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

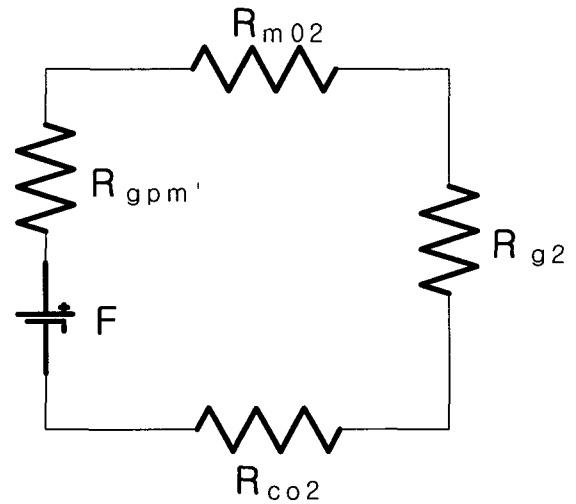


그림 5 VCB 투입시 PMA 자기등가회로  
Fig. 5 Equivalent magnetic circuit of PMA in VCB closing

그림 5에서  $R_{gbm}'$ 은 영구자석과 가동자의 공극 두 부분을 합해 나타낸 자기저항이다. 그림 5처럼 구성된 자기등가회로에서 계산된 퍼미언스 계수와 영구자석의 감자특성 그래프를 이용하여 자기시스템의 동작점을 결정한다.

5. 수치해석 결과 및 측정 시험 Data 비교

5.1 투입 유지력 결과 비교

본 논문에서는 그림 3과 같은 PMA 형상의 자계해석을 수행하기 위해, 유한요소법을 기반으로 하는 전자장 해석 상용프로그램을 사용하였다. PMA 투입 유지력 해석시 NdFeB계열의 영구자석을 구동원으로 사용하였고, 가동자와 코어의 재질은 S45C와 SUYP(전자연철판)이고, 자기적인 특성을 일본의 EM/C 전자자기공업주식회사에 의뢰하여 측정하였으며, 해석의 정확성을 위해 비선형 해석시 활용하였다. 2차원 해석의 경우는 해석모델이 좌·우 대칭이므로, 해석시간과 메모리를 줄이기 위해 해석영역의 1/2만 해석하였다.

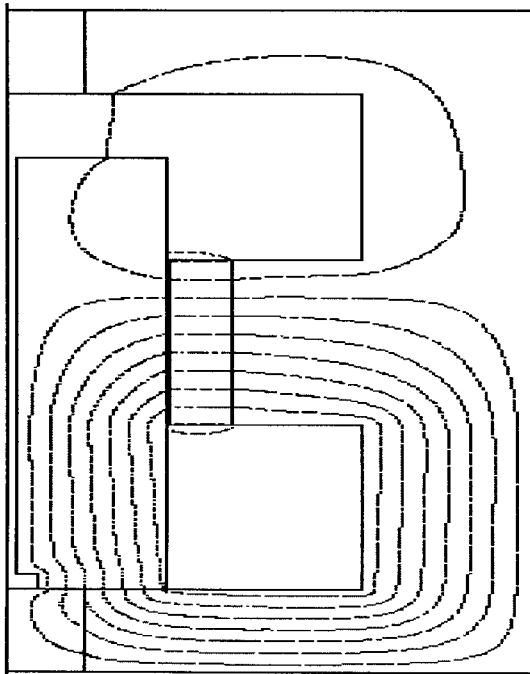


그림 6 2차원 자기벡터포텐셜  
Fig. 6 2-D magnetic vector potential

그림 6을 보면, 영구자석에 의해 발생한 자계의 대부분이 공극이 적은 PMA 하단부에 집중되는 것을 알 수 있으며, 단지 약간만이 영구자석 상부에서 코어의 상단부로 흘러가는 것을 알 수 있다. 그림 6의 해석결과는 4.2절에서 언급했던 것처럼, 퍼미언스 계수를 계산하기 위해 본 연구에서 사용한 그림 5의 간략화된 자기등가회로가 타당성이 있다는 것을 보여준다. 정확한 투입 유지력을 계산하기 위해, 상용프로그램을 이용한 3차원 비선형 정자계해석을 수행하였다.

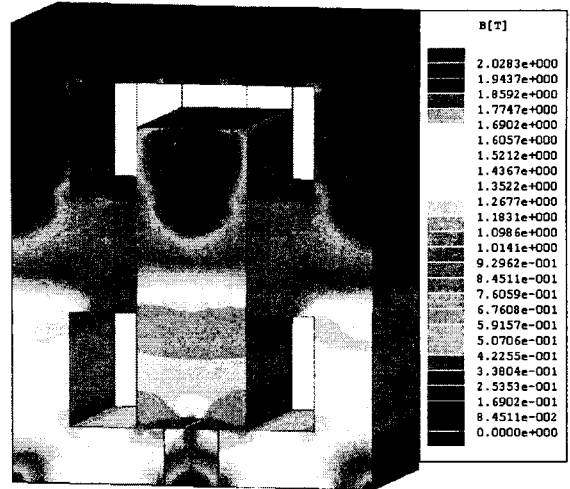


그림 7 3차원 자속밀도 분포  
Fig. 7 3-D flux density distribution

그림 7은 3차원 자계 해석결과인 자속밀도 분포를 나타낸 것이며, 자속밀도가 가동자 하단부에서 집중되며 코어의 상단부는 상당히 적은 것을 알 수 있다. 자계 해석의 정확성을 위해, 측정된 물질 특성을 적용한 비선형 해석을 수행한 결과, 형상의 각 부분에서 각 재질의 포화점 부근의 자속밀도가 발생하였고, 위 해석결과들을 이용하여 PMA 투입 유지력을 계산하였다. 해석결과의 타당성을 검증하기 위해, PMA 시제품을 제작해 가동자의 투입 유지력을 측정하였으며, 해석값과 측정값을 비교하였다.



그림 8 PMA 시제품 제작 모델  
Fig. 8 PMA prototype model

그림 8은 직접 제작한 PMA를 VCB에 취부한 그림이다. 코일은 VCB 투입시 동작전류를 측정하기 위해 하단부에만 설치하였다. 본 절에서는 PMA만을 단독적으로 자체 해석을 한 후, 가동자가 받는 투입 유지력을 계산하였으므로, PMA의 투입 유지력 시험시에는 장착된 PMA를 VCB에서 분리해 측정하였다. PMA의 투입 유지력은 재료의 인장강도를 측정할 수 있는 만능 인장시험기에 PMA를 삽입하여 압축 시험을 통해 측정하였다. 만능 인장시험기를 이용한 PMA 투입 유지력 측정시 사용된 개략 시험도는 그림 9와 같다. 투입 유지력은 가동자가 코어의 하단부에 접촉되어 있을 경우 당겨 분리하는데 필요한 힘이므로, 인장 시험기에 PMA를 삽입하여 위쪽으로 돌출된 샤프트(Shaft)를 압축함으로써 가동자가 코어의 하단부에서 분리되는 힘을 측정하여도 동일한 결과를 나타낼 것으로 판단된다. 해석결과와 측정결과를 표 1에 정리하였으며, 두 결과를 비교해 보면, 오차율이 2[%] 이내로 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 단 측정된 결과값에 수반될 인장시험기의 오차에 대한 부분은 고려하지 않았다. 또한 3차원 해석으로 계산된 가동자의 투입 유지력이 2차원 해석으로 계산된 투입 유지력보다 측정값과 잘 일치함을 알 수 있다.

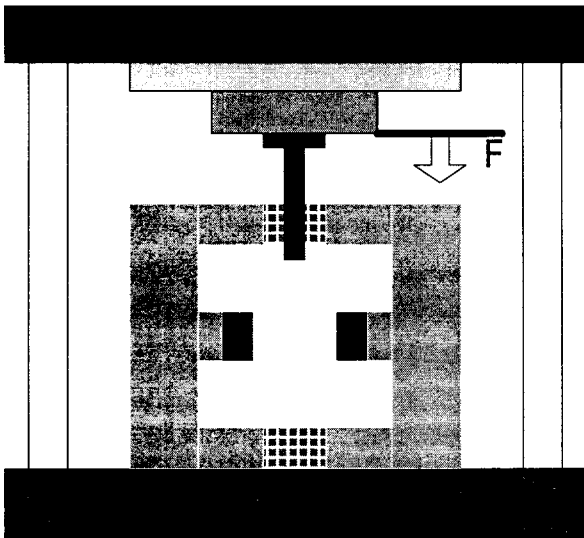


그림 9 만능 인장시험기를 이용한 시험 개략도  
 Fig. 9 Schematic diagram of test using universal tensile testing machine

표 1 해석결과와 측정결과와의 비교  
 Table 1 Comparison of analysis result and measurement result

	가동자의 투입 유지력	오차율
해석값(2차원)	5250 [N]	1.94 [%]
해석값(3차원)	5210 [N]	1.16 [%]
측정값	5150 [N]	기준값

5.2 동작특성 결과 비교

PMA의 동작특성 해석과 측정 시험에 적용된 전원전압은 DC 80[V]이다. PMA 자체 해석은 전압원을 이용한 과도상태 해석을 하였으며, 출력 전류의 파형을 세밀하게 보기 위해  $\Delta t$ 을 0.001[sec]로 선정하였고, 이때 적용된 하부 코일의 권선수는 290 [turn]이며, 코일의 저항은 1.1[Ω]이다. 또한 PMA 동작특성을 해석하기 위해, 가동자의 운동방정식을 계산하였다. 계산과정에 사용된 PMA의 가동자 이동거리 (Stroke)는 20[mm]이고, 질량은 4[kg]이며, 마찰 및 스프링 계수는 그 영향이 미비할 것으로 판단하여 해석시 고려하지 않았다. PMA 동작특성 해석의 타당성을 검증하기 위해, 전압원 과도상태 해석의 출력인 코일의 투입 전류와 시험에 의해 측정된 투입 전류를 비교 검토하였다. 또한 동작특성 해석의 출력인 가동자의 이동거리 및 속도는 본 시험에서는 측정하지 못했고, 추후 별도의 지그를 설치하여 측정할 예정이다. PMA 동작특성 시험은 PMA만을 독립적으로 설치한 후, 시험을 진행하는데 여러 가지 문제점이 발생하여, PMA를 VCB에 취부한 후 수행되었다. PMA 동작특성 시험에서 가장 중요한 파라미터는 PMA 투입 동작시 PMA 코일에 투입되는 투입 전류와 동작 완료시간이며, 이는 PMA 구동 드라이브의 용량과 크기를 결정하는데 이용된다. PMA 코일에 투입되는 투입 전류 및 동작 완료시간을 측정하기 위해 전류를 측정할 수 있는 CT와 시간에 따른 CT 파형을 기록할 수 있는 오실로스코프를 사용하였고, CT의 출력단을 오실로스코프와 연결한 측정시스템을 구성하였다. 또한 PMA의 투입 동작시 이용되는 입력전압은 전원설비에서 DC 80[V]를 설정하여 사용하였다. 그림 10은 PMA 동작특성 시험을 측정하기 위해 구성한 시스템이다.

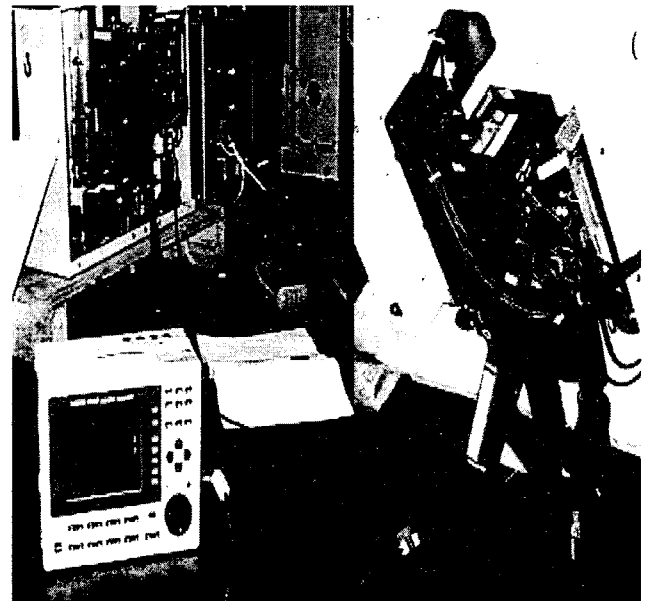


그림 10 PMA 동작특성 측정 시스템  
 Fig. 10 Measurement system of PMA dynamic characteristic

PMA 코일에 투입되는 투입 전류와 동작 완료시간을 정확히 측정하기 위해 10회 이상의 반복시험을 수행하였으며, 매 반복시험시 거의 동일한 결과 파형이 측정되었다. PMA 투입 동작시 코일에 투입되는 투입 전류를 2차원 형상을 이용한 수치해석 결과와 시험을 통해 측정된 결과를 그림 11과 그림 12에 나타내었다.

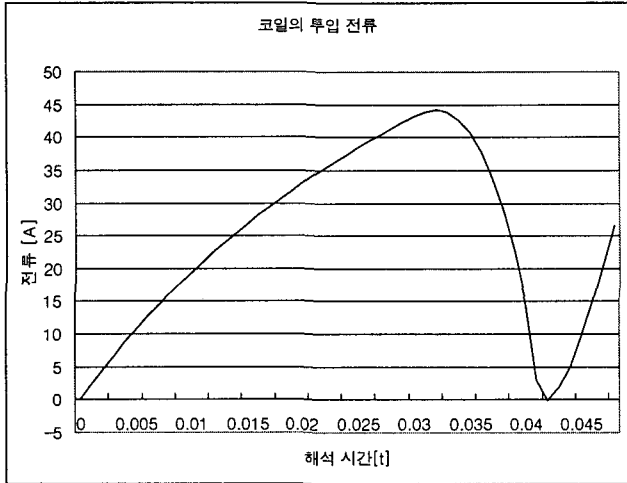


그림 11 수치해석을 이용한 코일의 투입 전류  
Fig. 11 Closing current of coil using numerical analysis

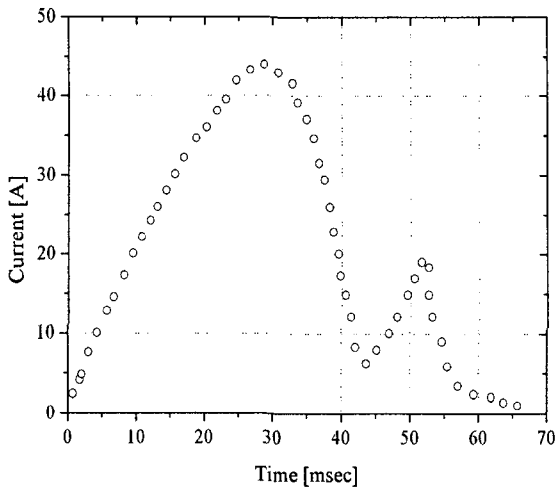


그림 12 측정된 코일의 투입 전류  
Fig. 12 Closing current of coil using measurement

그림 11과 12을 비교해 보면, 코일에 투입되는 투입 전류의 최대치는 44[A]로 거의 일치하며, 동작 완료시간도 42[ms]로 거의 일치한다. 이는 PMA 동작특성 개발에 수치해석 방법이 타당성이 있다는 것을 나타내며, 수치해석을 이용해 계산된 결과들은 PMA 설계기술 개발에 직접적으로 활용될 수 있다고 판단된다. 그림 11과 12에서 투입 동작완료 후, 투입 전류의 파형이 다른 것을 알 수 있다. 그림 11은 수치해석 과정에서 PMA 가동자가 코어 하단부에 정지함으로

코일에 발생하는 역기전력의 감소를 초래하며, 이에 코일의 투입 전류가 증가되는 것을 나타낸다. 그러나 그림 12는 PMA 가동자가 코어 하단부에 접촉한 후, 물체의 반발력에 의해 위쪽으로 상승된 가동자를 다시 접촉시키기 위해 투입 전류가 일시적으로 증가하다 감소하는 것을 나타낸 그림이며, 시험시 투입 동작이 완료된 후, 곧바로 전원전압을 제거하였기에 전류 파형의 마지막 부분이 0으로 측정되었다. 그림 13과 14는 VCB의 차단성능에 적용되는 PMA 가동자의 이동거리 및 속도에 대해 수치해석을 수행한 결과를 나타낸 그림이다.

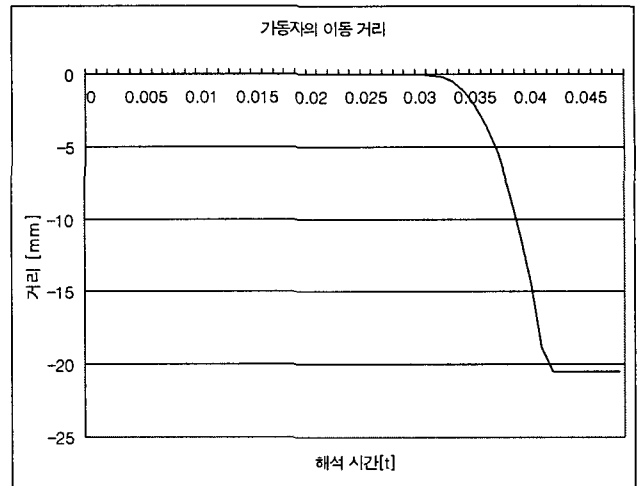


그림 13 수치해석을 이용한 가동자의 이동 거리  
Fig. 13 Moving distance of Mover using numerical analysis

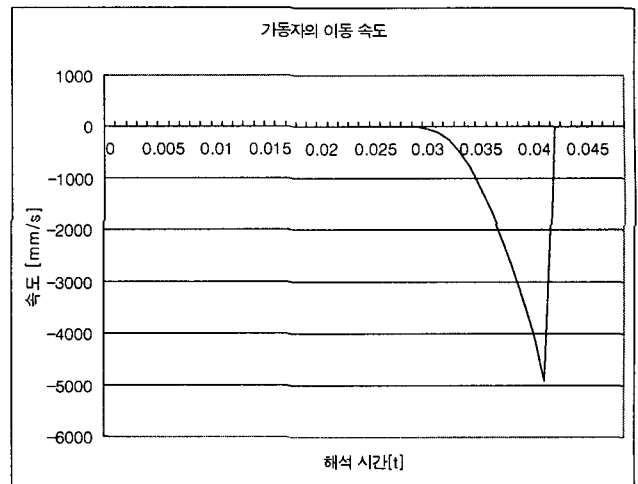


그림 14 수치해석을 이용한 가동자의 이동 속도  
Fig. 14 Moving velocity of mover using numerical analysis.

VCB 개발에는 VCB 투입 동작시 PMA 평균 이동속도가 1500[mm/s] 이상을 만족하도록 설계해야 하므로, 그림 14을 검토하면 평균 이동속도가 충분히 만족되는 것을 알 수 있다. PMA 트립 동작시에 코일에 투입되는 트립 전류 파형도 중요하므로 시험을 통해 측정하였다.

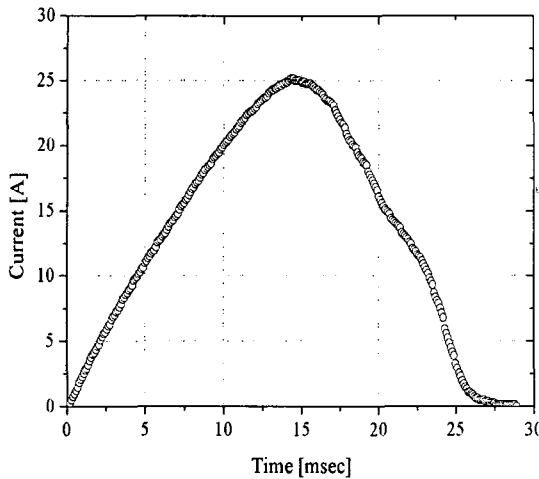


그림 15 측정된 코일의 트립 전류  
Fig. 15 Trip current of coil using measurement

그림 15는 PMA 트립 동작시 코일에 투입되는 트립 전류 파형을 측정한 그래프이다. 그림 15에서 트립 전류의 최대치는 25[A]로 투입 전류에 비해 대략 1/2로 감소하는 것을 알 수 있었으며, 이는 VI 하단부에 위치한 스프링에 PMA 투입 동작시 에너지가 축적되며, 이 축적된 에너지가 PMA 트립 동작시 작용하기 때문이다. 또한 스프링의 기계적인 반작용에 의해 PMA 트립 완료시간도 25[ms]로 감소한다는 것을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 VCB(Vacuum Circuit Breaker)의 구동 메카니즘으로 사용되어온 전동스프링 방식을 대체할 수 있는 PMA(Permanent Magnetic Actuator) 개발에 수반되는 개략 설계 및 수치해석을 이용한 상세설계, 동작특성 해석, 시제품 제작을 이용한 동작특성 시험에 대하여 기술하였다. VCB 투입 동작시 필요한 PMA 투입 유지력이 결정되면 자기등가회로를 구성한 후 PMA 형상을 개략설계 하였으며, 수치해석방법을 이용하여 PMA 형상을 상세설계 하였다. 또한 PMA 투입 유지력 계산은 영구자석 구동원을 이용한 물질의 비선형 해석을 이용하였으며, 해석의 타당성을 검증하기 위해 시제품을 제작한 후 수치해석값과 측정값을 비교한 결과 2[%] 이내로 거의 일치하는 것을 확인하였다. PMA 동작특성은 투입 동작시 코일에 투입되는 투입 전류를 해석 하였으며, 자계해석시에는 DC 80[V] 구동원을 이용한 시간차분법을 이용했고, 동특성해석시에는 마찰 및 스프링 계수를 무시한 운동방정식을 이용하였다. PMA 투입 동작시 코일에 투입되는 최대전류는 44[A]로 수치해석 및 측정결과가 거의 일치하였고, 투입 동작 완료시간도 42[ms]로 일치하는 것을 확인하였다. 또한 PMA 트립 동작시 코일에 투입되는 트립 전류는 축적된 스프링 에너지가 트립 동작시 작용하므로 최대전류가 25[A]로 감소되며, 트립 동작 완료시간도 25[ms]로 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 위 결과들을 보면 PMA 개발에 수치해석방법을 적절히 활용하면 개발비 및 개발시간을 단축할 수 있다고 생각된다.

기존의 전동스프링 방식을 대체할 수 있는 PMA을 개발하는 주된 이유는 부품수를 줄임으로써 유지보수가 필요없는 구동 메카니즘을 개발하는 것이다. 그러므로 향후에는 부품수를 보다 더 줄일 수 있는 One 코일 구동방식, 최적설계를 통한 소형·경량화 및 차단성능을 향상시킬 수 있는 고속 차단방식이 가능한 PMA 개발에 집중적인 연구를 진행해야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] R. Mckean, C Reuber, "Magnets & Vacuum - The Perfect Match", IEE Trends in Distribution Switchgear, Conference Publication No.459, pp73-79, 1998.
- [2] H. Okubo, S. Yanabu, "Feasibility Study on Application of High Voltage and High Power Vacuum Circuit Breaker", IEEE 20th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp275-278, 2002.
- [3] Edgar Dullni, "A Vacuum Circuit Breaker with Permanent Magnetic Actuator for Frequent Operations", IEEE 18th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp688-691, 1998.
- [4] Lin Xin, Gao Huijun, Cai Shiyuan, "Magnetic Field Calculation and Dynamic Behavior Analysis of the Permanent Magnetic Actuator", IEEE 19th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp532-535, 2000.
- [5] Z. Li, L. A. Renforth et al., "Computer Aided Optimal Design of Magnetic Actuator for Autorecloser Application", IEE Trends in Distribution Switchgear, Conference Publication No.459, pp80-85, 1998.
- [6] Yundong Cao, Xiaoming Liu et al., "Design and Research on Novel Permanent Magnetic Actuator in Low Voltage and High Current Vacuum Circuit Breaker" IEEE 20th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp471-474, 2002.
- [7] 김용권, 도해 전자기학, 대영사, 1993.
- [8] 이세희, 최명준, 박일한, "Comparison of Korteweg - Helmholtz Electromagnetic Force Density and Magnetic Charge Force Density in Magnetic Systems", KIEE Trans. electrical engineers B, v.49 pt.4, pp.226-232, 2000.
- [9] 中田高義, 伊藤昭吉, 河瀬順洋, 有限要素法による交直電磁石の設計と應用, 森北出版株式會社, 1991.



## 저 자 소 개



### 최 명 준 (崔 名 俊)

1969년 11월 28일생. 1995년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 현대중공업 기계전기연구소 연구원

Tel:031-289-5163, Fax:031-289-5150

E-mail : result98@hhi.co.kr



### 최 영 찬 (崔 永 燦)

1962년 6월 11일생. 1988년 단국대학교 전자공학과 졸업. 1994년 일본 東海大 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 현대중공업 기계전기연구소 책임연구원

Tel:031-289-5160, Fax:031-289-5150

E-mail : choiyc@hhi.co.kr



### 석 복 렬 (石 福 烈)

1971년 2월 16일생. 1994년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년3월일본 큐슈대학 시스템정보과학연구과 졸업(박사), 현재 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원

Tel : 031-289-5162, Fax : 031-289-5150

E-mail : bokyeol@hhi.co.kr



### 박 일 한 (朴 日 韓)

1960년 5월 7일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 성균관대학교 정보통신공학부 전자전기전공 교수

Tel : 031-290-7146, Fax : 031-290-7179

E-mail : ihpark@yurim.skku.ac.kr



### 김 창 욱 (金 昌 郁)

1974년 10월 17일생. 1997년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 현대중공업 기계전기연구소 연구원

Tel : 031-289-5172, Fax : 031-289-5150

E-mail : cwkim@hhi.co.kr