

프라이자흐 모델과 유한요소법을 이용한 C.P.M의 착자 특성 해석

論 文

49B-11-3

Magnetizing Analysis of a Convergence Purity Magnet using Preisach model and Finite Element Method.

尹泰浩* · 權丙一** · 朴勝燦*** · 禹炅一§

(Tae-Ho Yoon · Byung-Il Kwon · Seung-Chan Park · Kyung-Il Woo)

Abstract - This paper deals with the characteristic analysis of magnetizer for convergence purity magnet by the finite element method. The analysis utilizes combined method of the time-stepped finite element analysis and the Preisach model with hysteresis phenomena. In the finite element analysis, the non-linearity and the eddy current of the magnetizing fixture and permanent-magnet are taken into account. The magnetization distribution in the permanent magnet is determined by using Preisach model which are composed of Everett function table and the first order transition curves is obtained by the Vibrating Sample Magnetometer. The calculated flux density values on the surface of the permanent magnet are led to the approximated gauss density values measured by the gauss meter. As a result, winding current, copper loss, eddy current loss of the magnetizing yoke, flux plot, surface gauss plot, temperature rise of the coil and resistor variation, vector diagram of magnetization distribution are shown.

Key words : Convergence purity magnet, Finite element, Magnetization, Preisach model.

1. 서 론

최근 사회전반에 걸쳐 정보화가 급속하게 전개되고 있으며, 이에 따른 컴퓨터를 비롯한 AV용 기기들의 수요가 급증하고 늘어나고 있다. 이런 기기들의 핵심 부품인 영구자석에 대한 착자상태를 정확히 모델링 하는 것이 매우 중요하며 [1-3], 영구자석 기기의 고성능화, 고효율화 및 경박 단소화를 위해서는 영구자석의 특성을 이해하는 것이 중요하다[4]. 대부분의 전기기기들은 자성재료의 특성을 이용하고 있으며 이러한 자성체들은 히스테리시스 특성을 가지고 있으므로, 자성체가 가지고 있는 히스테리시스 현상을 고려하지 않으면 정확한 해석을 할 수가 없다. 종래에는 영구자석 기기 해석 시에는 착자분포를 단순히 구형과 또는 사다리꼴로 근사화하고 있는 실정이며, 이러한 문제점으로 인해서 기기들의 수치해석 결과에 많은 오차가 발생하는 원인이 되었다[4]. 그러므로 자성체의 비선형성과 히스테리시스 현상을 해석할 수 있는 많은 연구가 진행되어 왔으며[5,6] 그 중에서도 가장 안정적이고 정확하다고 평가받고 있는 것이 프라이자흐 모델이며[7], 프라이자흐 모델은 실험에 의해서 구해진 에베렐 함수를 이용하여 임의의 자계의 변화에 대한 자화값을 정확히 계

산할 수 있게 되었다[8,9]

그러므로, 본 논문에서는 표면 자속밀도가 수십 gauss의 크기를 갖는 2극, 4극, 6극의 링형태의 영구자석 조합으로 구성되어 있고, 이들의 위치를 회전시킴으로서, 전자빔의 운동량을 미세조정하는 C.P.M(Convergence Purity Magnet)용 착자기의 영구자석 내부에 존재하는 자화의 세기분포를 해석하기 위해서[10-12] 해석루틴에 히스테리시스 현상을 잘 묘사할 수 있는 프라이자흐 모델을 도입하였으며, 유한요소 해석 시에는 커패시터 방전회로를 모델링하여 전압원 문제로 해석하고, 시간차분 유한요소법을 결합하여 수행하였다. 착자시 코일에 흐르는 대전류로 인하여 코일의 온도가 점차로 상승하게 되므로, 시간이 지남에 따라 착자특성이 변화가 되므로 착자시 코일의 온도상승과 이에 따른 코일저항 상승을 계산하여 이를 고려한 특성을 수행하였다[13]. 착자후 자석 자체만이 가지고 있는 자화의 세기를 직접 벡터 다이어그램으로 나타내고 착자가 완료된 후에는 극이방성 분포(interpolated distribution)가 됨을 고찰하였다.

2. 히스테리시스 프라이자흐 모델

히스테리시스 특성은 주기성이 없는 임의의 입력에 대하여 그 출력력이 메이저 루프와 마이너 루프를 오가는 멀티 브랜치 특성을 지니게 되어 자기력에 따라 자화량이 달라지는 등 매우 복잡한 성질을 지니므로 간단한 수식으로는 표현이 불가능하다. 이를 정밀하게 표현하기 위한 자기적 성질의 모델링에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다[14].

그 중의 한 방법이 프라이자흐 모델로써, 히스테리시스 현상에 대한 본질적이고, 이론적인 접근보다는 나타나는 현상적인 양들을 데이터로 처리하는 수치 기법이다. 이 방법은 실측곡선으로부터 얻은 각 자성체 입자들간의 상호 작용과 자기 입자들의 보자력 밀도분포와, 입력의 변화과정을 통해 자

* 準 會 員 : 三星電子(株) 冷空調 先行研究그룹 研究員

** 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 副教授, 工博

*** 正 會 員 : 東洋大 시스템制御工學部 專任講師, 工博

§ 正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 1998年 4月 21日

最終完了 : 1998年 10月 31日

화량을 얻어내는 기법이다. 이 방법은 다른 모델링에 비해 데이터가 상대적으로 많지만 실제로 복잡한 히스테리시스 특성을 가장 잘 모사할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 프라이자흐 모델은 히스테리시스 루프의 인가자계 H가 증가할때의 변화량을 X축으로 하고 감소할때의 변화량을 Y축으로 하는 삼각형 모양의 프라이자흐 평면상으로 인가자계 H에 대하여 나타나는 자화 M에 대응될 수 있는 밀도값을 기록해 두고 이로부터 히스테리시스 루프를 복원해서 표현한다. 이때 프라이자흐 평면에서 자화 M과 인가자계 H의 관계는 식 (1)과 같이 된다.

$$M(t) = \int \int_{h_a \geq h_b} P(h_a, h_b) \gamma(h_a, h_b) H(t) dh_a dh_b \quad (1)$$

여기서, $P(h_a, h_b)$ 는 밀도분포함수이고 $\gamma(h_a, h_b)$ 는 히스테리시스 오퍼레이터로 히스테리시스 곡선의 증가부분에서는 +1, 감소 부분에서는 -1의 값을 가진다.

프라이자흐 모델의 기본 계산방법은 분포함수를 프라이자흐 다이어그램 영역에서 적분하여 자화를 계산하는 것이다. 그러나, 실측곡선으로부터 구한 밀도값을 적분하는 과정이 복잡하고 미분 또는 적분 과정에서 발생하는 오차로 인해 수치 해석에 적용하기가 불편하다. 이에 반해, 에베렐 함수를 사용할 경우 극값의 변환점에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 이 변환점들에서의 자화값을 미리 구해 놓는 다음, 밀도값의 적분 과정없이 덧셈과 뺄셈만으로 출력을 구할 수 있다[15]. 프라이자흐 밀도 $P(\alpha, \beta)$ 와 에베렐 밀도 $E(\alpha, \beta)$ 의 관계를 수식으로 나타내면 식(2)와 같고 영역 $T(\alpha, \beta)$ 에 해당하는 분포함수를 적분한 것으로 정의한다.

$$E(\alpha, \beta) = \int \int_{T(\alpha, \beta)} P(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (2)$$

그 계산 방법은 식(3)와 같고, 그림1과 같이 실측곡선으로부터 얻을 수 있다.

$$E(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} (M_1 - M_{12}) \quad (3)$$

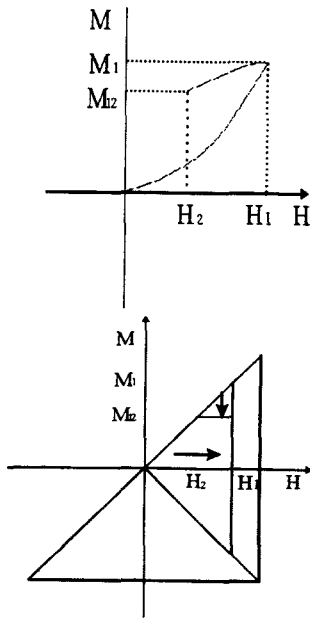


그림 1 히스테리시스 루프와 에베렐 함수 평면과의 관계
Fig. 1 Relation of the hysteresis loop and the everret function plan

그림2와 같이 평면에서 표현된 밀도는 도색된 부분을 적분할 수 있지만 그림 3과 같이 에베렐 밀도로 표현된 다이어그램에서 그 변환점을 알 수 있다면 그 점에서 미리 구해둔 밀도 값으로 자화값을 구할 수 있다.

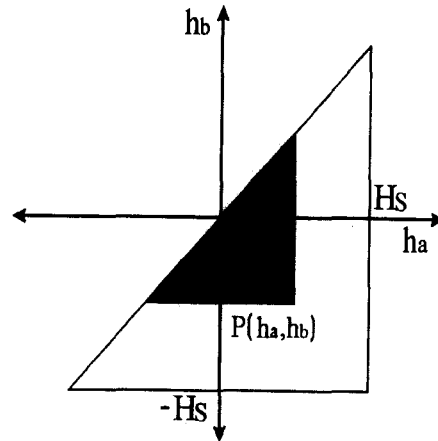


그림 2 프라이자흐 밀도
Fig. 2 Preisach density

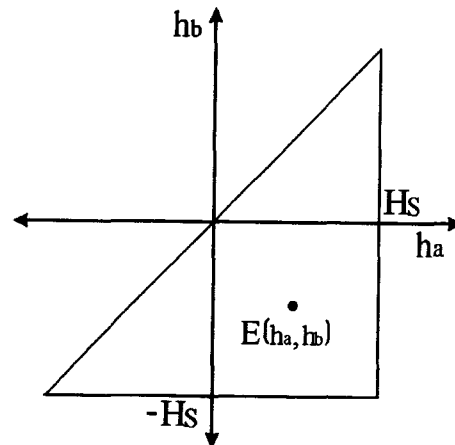


그림 3 에베렐 밀도
Fig. 3 Everett density

프라이자흐 모델을 수치해석적으로 적용하기 위해서는 우선 해석 대상시료인 대한 에베렐 테이블 구성해야 한다. 본 논문의 해석 대상은 알니코이므로 이를 위해서 V.S.M(Vibrating Sample Magnetometer)측정장비를 이용하여 실험에서 얻은 1차 전이곡선 데이터로부터 식 (3)에 의해서 에베렐 함수값을 바로 다이어그램에 대입한다. 그림 4는 C.P.M 용 알니코 재료에 대한 1차 전이곡선이며, 여기서 O들은 에베렐 함수 다이어그램을 만드는데 이용된 데이터를 나타낸다. 그림 5는 그 때의 에베렐 밀도분포를 3차원으로 보여주고 있다. 그림 6은 구성된 에베렐 함수로부터 계산에 의해 구한 히스테리시스 루프이다.

3. 프라이자흐 모델이 결합된 유한요소법의 정식화

커패시터 방전 펄스 착자기는 커패시터 방전으로 인한 전압원 구동의 초기치 문제에 해당하며 착자시 급격한 자계의 변화로 의하여 요오크에 발생하는 와전류와 철심의 자기적 비선형성을 고려하여 해석해야 한다. 본 논문에서 해석과 실험에 사용된 착자기의 제원은 표1과 같고, 그림7과 같이 착자 요오크는 성층하지 않은 C.P.M용 착자기의 해석 모델 및 등가회로이다.

표 1 착자기의 제원
Table 1 The parameters of the magnetizer

외부저항 및 권선저항	커패시터 의정전용량	초기 충전전압	극수	극당 턴수	요오크 길이	요오크 재질
0.034[Ω]	4950[μF]	75[V]	4극	2턴	10[cm]	순철

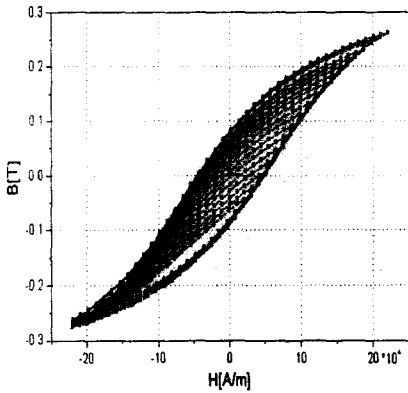


그림 4 1차 전이곡선
Fig. 4 First order transition curve

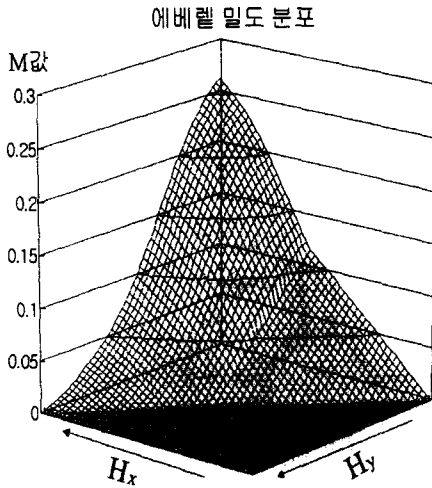


그림 5 에버렐 함수의 3차원적 도시
Fig. 5 Everret density distribution

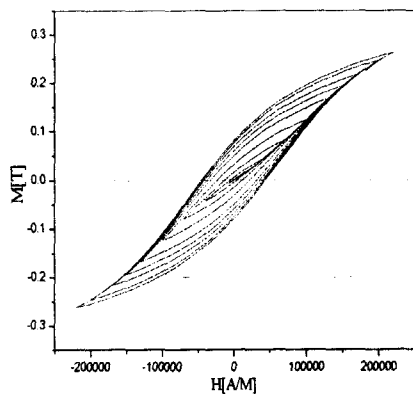
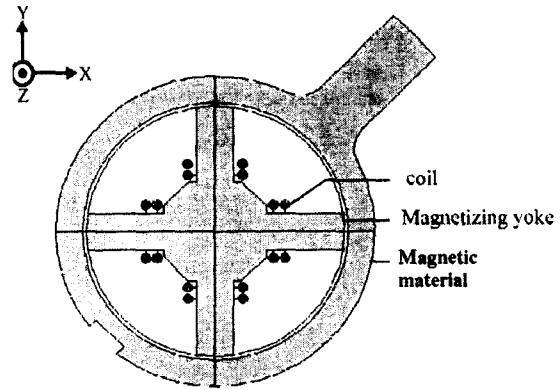
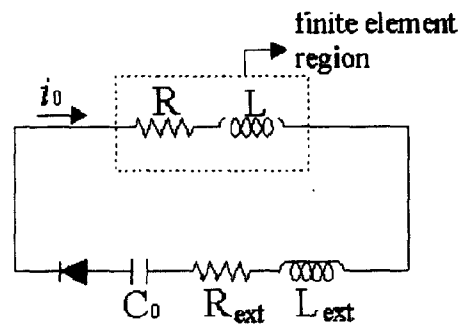


그림 6 에버렐 테이블로부터 계산되어진 히스테리시스 루프
Fig. 6 Calculated hysteresis loop by everett table



(a) 착자 요오크 및 권선의 2차원 모델
(a) 2-dimensional model of magnetizing yoke



R_{ext}, L_{ext} : 해석영역 외부의 저항 및 인덕턴스
 R_{ext}, L_{ext} : Resistance and inductance of external region from analysis region

(b) 등가회로
(b) Equivalent circuit

그림 7 해석 모델 및 등가회로
Fig. 7 Analysis model and equivalent circuit

해석모델의 지배 방정식은 자기 벡터 포텐셜을 계변수로 하여 표현하면, 식(4)와 같다. [16,17]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_0 - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (4)$$

여기서, A 및 J_0 는 각각 \mathbf{A} , \mathbf{J}_0 의 Z 축방향성분값이다. 또한 J_0 는 권선의 전류밀도 M_x, M_y 는 각각 x, y 축 방향으로의 자화의 세기를 나타내며, σ 는착자요오크의 등가도전율, ϕ 는 착자요오크에서의 전기 스칼라 포텐셜이다.

한편, 착자기 회로에 대하여 키르히호프의 제 2법칙을 적용하면 다음과 같은 식이 얻어진다[18].

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} + (R+R_c)i(t) + L_0 \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \left(\int i(t)dt + Q_0 \right) = 0 \quad (5)$$

- 여기서, Φ : 착자요오크 권선에 쇄교하는 자속
- R, L_0 : 착자기 외부회로의 저항 및 누설 인덕턴스
- R_c : 착자요오크의 권선의 저항
- Q_0 : 캐패시터의 초기 충전전하량
- $i(t)$: 권선에 흐르는 전류

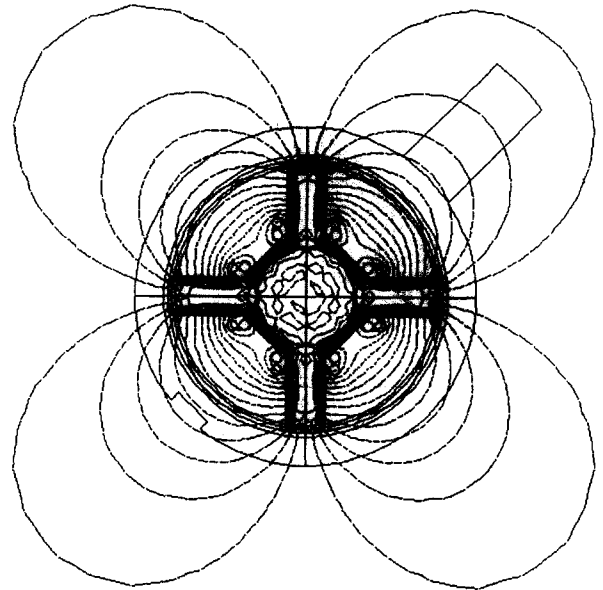
Galerkin 법을 이용하여 식(4)를 유한요소정식화 하고, 전압방정식 식(5)를 결합하면 식(6)과 같이 해석영역내의 각 절점 포텐셜, 전하량, 착자요오크의 $\frac{\partial \phi}{\partial z}$ 를 미지값으로 하는 시스템 행렬 방정식을 얻게 된다[19].

$$\begin{bmatrix} K+C/\Delta t & M & G \\ D/\Delta t & Z & 0 \\ S/\Delta t & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ Q \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} C/\Delta t & M & 0 \\ D/\Delta t & Y & 0 \\ S/\Delta t & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ Q \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} P \\ V \\ 0 \end{bmatrix}_{t+\Delta t} - L \begin{bmatrix} 0 \\ Q \\ 0 \end{bmatrix}_{t-\Delta t} \quad (6)$$

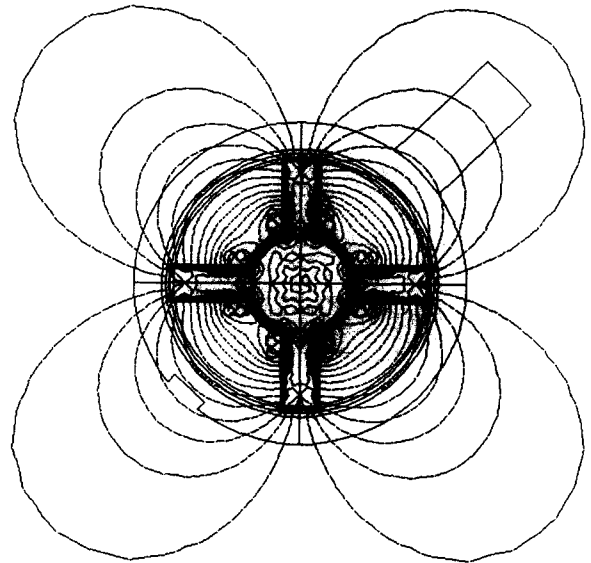
4. 해석 및 고찰

4.1 착자중의 해석 결과

그림8은 착자기의 커패시터가 75 [V] 로 충전되어 있다가 방전될때 시간에 따른 착자 요오크의 자속분포를 보여준다. 이때, 요오크의 재질은 순철이며 자성 재료는 알니코이다. 요오크 내부에는 자속의 시간적 변화에 의하여 와전류가 발생하여 자속이 요오크의 장자리로 밀집하게 됨을 알 수 있다.



(a) t = 100 μsec



(b) t = 340 μsec

그림 8 자속 분포의 시간적 변화
Fig. 8 Flux plots with time

그림 9는 콘덴서 방전회로에 의하여 착자 요오크의 권선에 흐르는 전류를 유한 요소 해석 결과로부터 구한 것이다. 방전 직후에 급격한 자속의 변화에 의하여 요오크에 흐르게 되는 와전류의 고려 유무에 따라서, 권선의 전류 특성 해석결과가 다소 차이가 존재함을 알 수 있다. 그림 10의 실험 결과와 비교해 볼때, 시뮬레이션 결과 전류의 최대값은 880[A]로 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

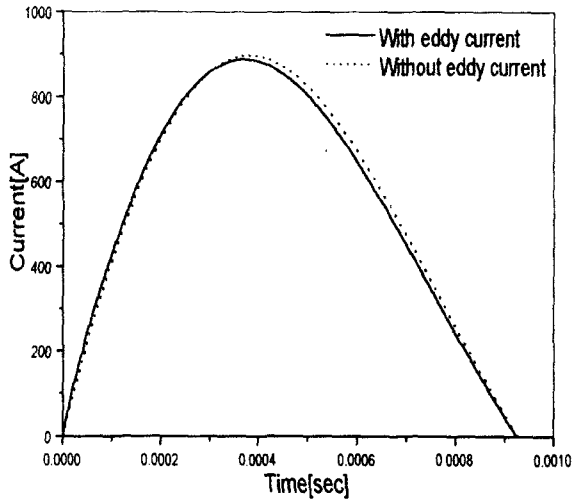


그림 9 시뮬레이션 전류값
Fig. 9 Simulated current values

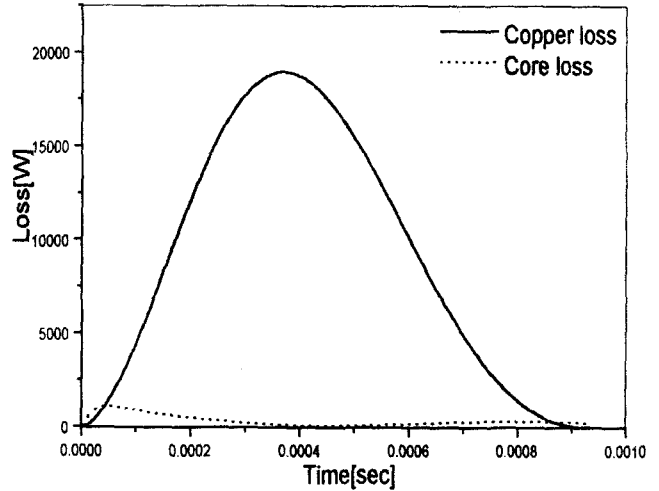


그림 11 착자과정중의 손실 특성
Fig. 11 Loss characteristics during magnetization

4.2 착자후의 해석 결과

그림12는 알니코 자석을 착자한 후 자석 자체만이 가지고 있는 자화의 크기와 방향을 직접 벡터 다이어그램으로 나타낸 것으로 알니코 자석의 1/4 만을 나타내었다. 그림8에서 나타내었던 착자과정중의 자속분포로부터 유추할 수 있듯이 착자가 완료된 후의 자화 분포는 극이방성 분포(interpoler distribution)가 됨을 알 수 있다.

착자 요오크를 이용하여 알니코 자석을 착자한 후 자석 자체만이 가지고 있는 자화의 세기에 의한 자속 분포를 그림13에 나타내었다.

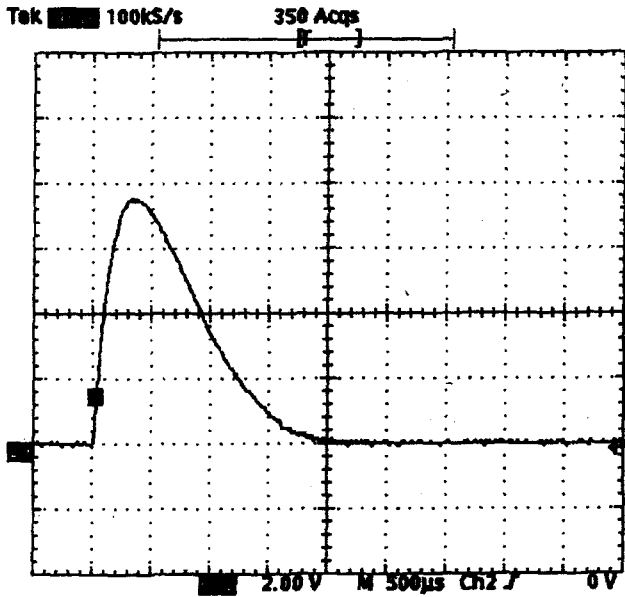


그림 10 실측 전류값(250A/div.,Max.880A)
Fig. 10 Measured current values

착자과정중에는 권선에 흐르는 전류에 의한 동손과 요오크 내부의 와전류에 의한 손실이 발생하게 된다. 이 손실들은 결국 착자 요오크의 온도상승을 유발하므로, 온도상승을 고려한 착자과정 해석을 위해서는 손실 특성해석이 중요하다. 특히, 요오크 내부의 와전류는 착자후 영구자석의 자화의 분포에 영향을 미친다. 그림 11에 착자 과정 중 발생하는 손실 특성을 나타내었다. 와전류 손실은 착자회로의 방전 직후에 크게 발생하여 곧 소멸되며, 권선의 동손에 비하여 상대적으로 작음을 알 수 있다. 즉 권선의 동손이 온도상승의 원인임을 알 수 있다.

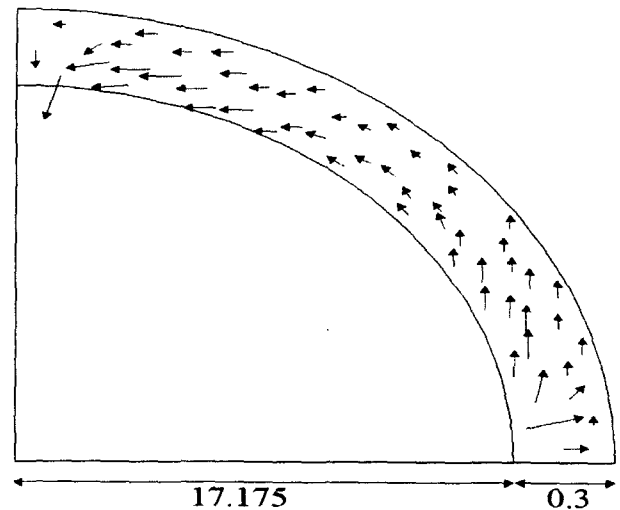


그림 12 자화의 분포
Fig. 12 Distribution of magnetization

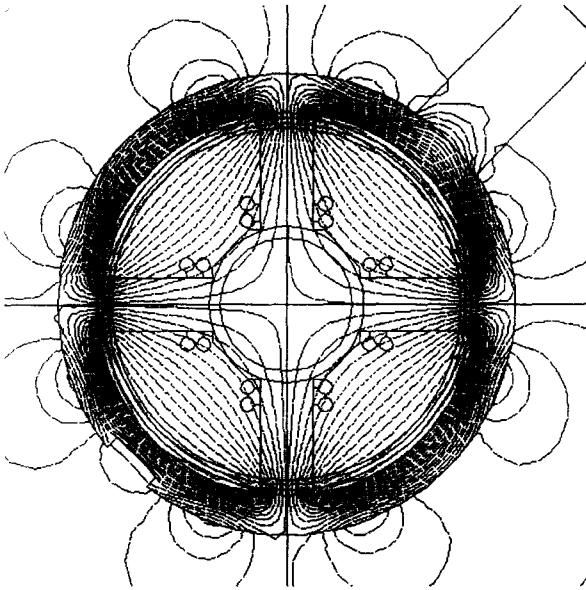


그림 13 착자 완료후 알니코 자석의 자속분포
Fig. 13 Flux plot of alnico permanent magnet after magnetization

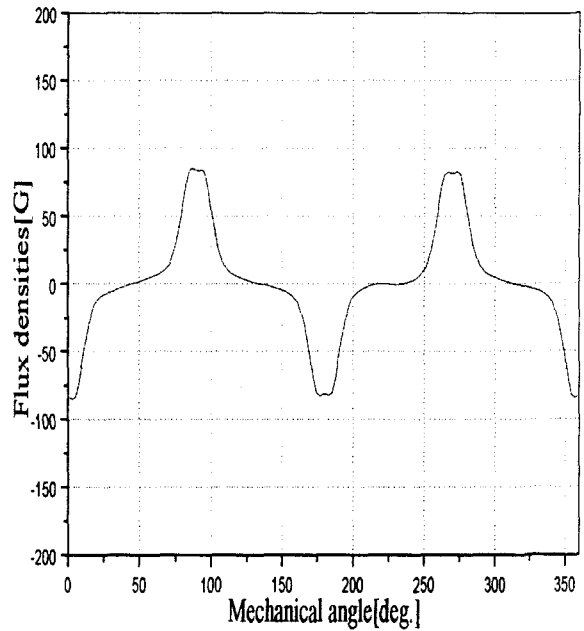


그림 15 측정된 표면 자속밀도분포
(코일의 온도 25[° C], 착자전압75 [V])
Fig. 15 Surface gauss distribution (experimental values)

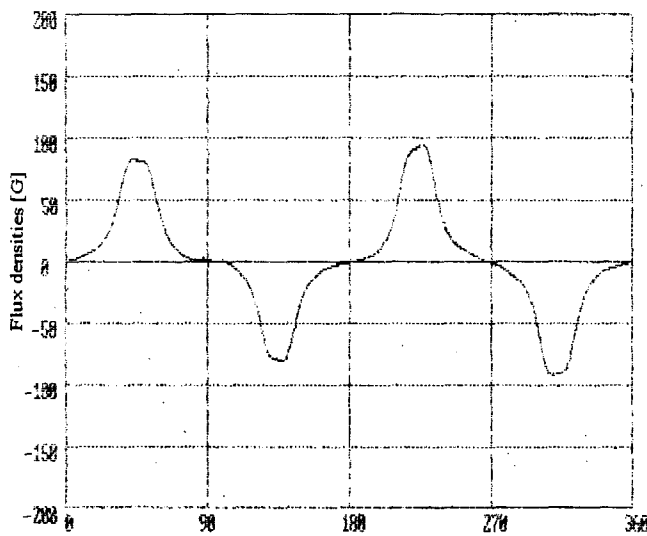


그림 14 알니코 자석의 표면 자속밀도분포
(코일의 온도 25[° C], 착자전압75 [V])
Fig. 14 Surface gauss distribution (simulation values)

C.P.M에 있어서는 자석의 표면 자속밀도 특성이 전 자축의 빔 운동량에 큰 영향을 미치므로, 표면 자속밀도 특성이 매우 중요하다. 그림14는 착자 완료후의 알니코 자석의 표면 자속밀도 분포를 보여주고 그림15는 이때의 가우스미터로 측정된 실험결과이다. 시뮬레이션 결과와 실험치의 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

착자를 하게 되면, 코일 부분은 착자기의 방전 전류에 의하여 동손이 발생하여 점차로 온도가 상승하게 된다. 본 연구에서는 착자 과정에서 온도상승에 따른 저항 상승분과 코일의 실제 온도 상승분을 식(7) 과 식(8)에 의하여 계산하였다.[20,21]

$$\Delta R = \frac{R_0 \times \alpha \times \int_t^{t+\Delta t} I^2 R dt}{A_c \times l_c \times \rho_{cu} \times C_h} \quad (7)$$

$$\Delta T = \frac{\int_t^{t+\Delta t} I^2 R dt}{A_c \times l_c \times \rho_{cu} \times C_h} \quad (8)$$

여기서, A_c : 도체의 단면적[m²]
 l_c : 권선의 총길이 [m]
 C_h : 구리의 비열 [385 J/kg/°C]
 ρ_{cu} : 구리의 비중 [8900 kg/m³]

그림16과 그림17은 코일의 온도상승 및 저항상승을 나타내었다. 실제 한번 착자시에는 코일 온도의 상승이 적으므로, 온도상승이 착자후 표면 gauss 분포에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 코일의 온도가 25°C 일 경우와 75°C 경우에 대하여 착자과정을 시뮬레이션하였다.

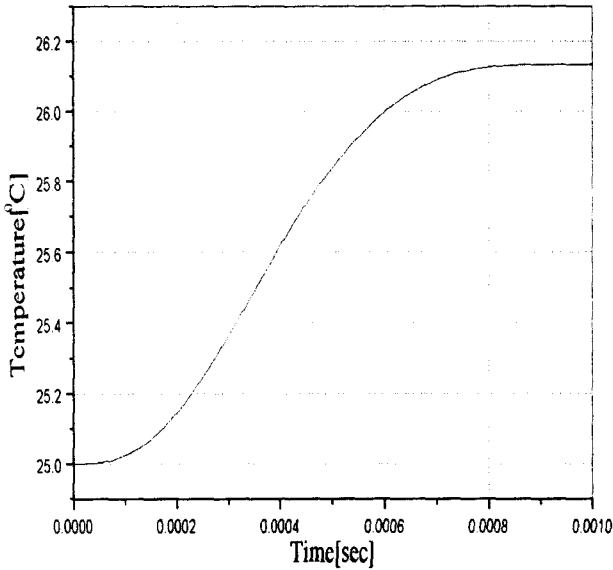


그림 16 착자중 코일의 온도 상승
Fig. 16 Temperature rise of coil during magnetization

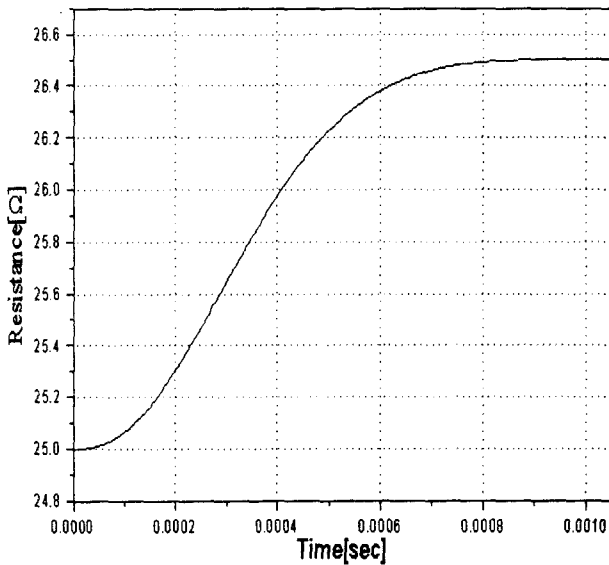


그림 17 착자중 코일의 저항 변화
Fig. 17 Resistance variation of coil during magnetization

그림18은 코일의 온도가 25[°C] 일때와 75[°C] 일 때 착자를 행하였을 때의 알니코 자석의 표면 자속밀도를 비교한 것이다. 시뮬레이션 결과로부터 50[°C]의 온도 상승은 알니코 표면 자속밀도 분포에 약 5 [%]의 상대 편차를 초래하므로 제품 생산시에는 착자시의 코일 온도 관리가 필요함을 알 수 있다.

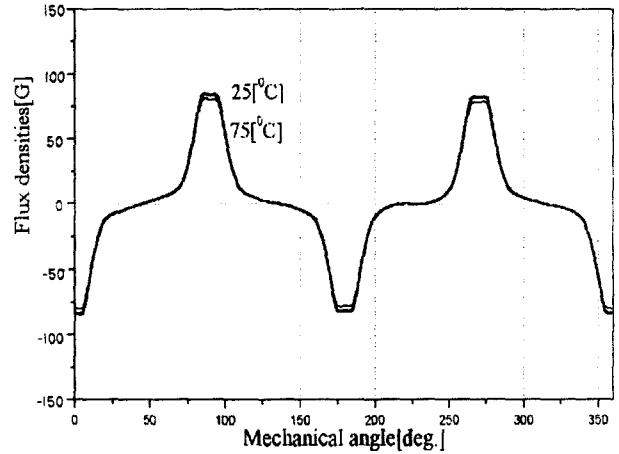


그림 18 온도변화에 따른 표면자속밀도분포(C.P.M)
재료: Alnico, 착자전압 : 75 [V]
Fig. 18 Surface gauss plot with temperature variation

5. 결론

본 연구에서는 유한요소법과 프라이자흐 모델을 결합하여 영구자석 잔류 자화의 크기와 방향을 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 권선 전류 파형 실험을 통하여 방전회로 해석의 정확성을 입증하였다. 유한요소해석시에는 착자기의 커패시터 방전회로를 모델링하여 전압원 문제로 해석하였고, 착자시 급격한 자계의 시간적 변화에 의하여 요오크 및 영구 자석에서 발생하는 와전류를 고려하였다. 유한요소법에 의한 착자 과정 해석을 위해서는 기본적으로 착자하고자 하는 자성재료에 대한 초기자화특성 곡선이 필요하여 이를 VSM(Vibrating Sample Magnetometer) 장비를 이용해서 구하였다.

한편, 착자과정중에 발생하는 권선의 저항손과 요오크에서의 와전류 손실을 계산하므로써 온도 상승을 고려한 착자 특성을 해석하였으며, 코일의 온도상승이 착자후 자석의 표면 자속밀도 분포에 미치는 영향을 고찰한 결과, 코일의 온도가 75[°C]일때는 상온 25 [°C] 때보다 자속밀도 분포값이 약 5% 감소하였으므로 착자과정에는 코일의 온도를 일정하게 관리하여야 함을 알 수 있었다. 또한 알니코 자석을 착자한후 자석 자체만이 가지고 있는 자화의 세기를 직접 벡터 다이어그램으로 나타내고 착자가 완료된 후에는 극이방성 분포 (interpolar distribution)을 가짐을 입증하였다.

따라서, 본 연구에서 개발한 C.P.M의 착자 과정 해석 프로그램은 착자기의 인가전압, 착자 요오크의 형상 변경, 코일의 위치 선정 등에 따라서 C.P.M 자석의 표면 자속밀도 분포를 얻을 수 있으므로, C.P.M의 원가 절감과 최상의 품질을 얻을 수 있는 착자 전압, C.P.M의 형상, 착자요오크 및 코일의 설계가 가능하리라 본다.

참고 문헌

[1] C.S.Koh, H.S.Yoon, K.W.Nam and H.S.Choi, "Magnetic pole shape optimization of permanent magnet motor for reduction of cogging torque", IEEE Trans. on Mag., Vol.33, No. 2. pp. 1822-1827, March 1997.
[2] 백수현, 김필수, "Spice를 이용한 커패시터 방전 임펄스

착자회로의 특성해석”, 대한전기학회논문지, 43권 2호, pp.206-214, 1994.

[3] 김창업, 유한요소법에 의한 착자회로 해석, 석사학위논문, 서울대학교 1990.

[4] 고창섭, 윤희수, 한송엽, “프라이자흐 모델을 이용한 커패시턴스 방전 펄스 착자기의 특성해석”, 대한전기학회 논문지, 제47권 10호, pp.1627-1634, 1998.

[5] I. D. Mayergoyz, “Hysteresis Models from the Mathematical and Control Theory Points of View”, J.Appl. Phys., Vol.57, No.1, pp.3803-3805, April 1985.

[6] Kohshi Okumura and Akira Kishima, “Digital Simulation of Hysteretic Characteristics and its Applications”, IEE Japan Transactions part B, Vol.103, No.7, pp.451-458, July 1983.

[7] F. Ossart, “Comparison between Various Hysteresis Models and Experimental Data”, IEEE Trans. on Magn., Vol.26, No. 5, pp.2837-2839, September 1990.

[8] Goerhy Kadar and Edward Della Torre, “Determination of the Bilinear Product Preisach Function”, J.appl. phys., Vol.68, No.15, pp.3001-3003, April 1988.

[9] D.L.Atherton, J.A.Szpunar, “A New Approach to Preisach Diagrams”, IEEE Trans. on Magn., Vol. 23, No. 3, May 1987.

[10] G.W. Jewell, D.Howe, “Computer-Aided Design of Magnetizing Fixtures for the Post-Assembly Magnetization of Rare-Earth Permanent Magnet Brushless DC motors”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.28, No.5, pp.3036-3038, 1992.

[11] T.Nakata, N.Takahashi, K.Fujiwara and I. Hayase, “Numerical Design Method for Magnetizers”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.41, pp.418-420, 1984.

[12] T.Nakata, N.Takahashi, G.Kawashima and K.Fujiwara, “New Technique for Producing a Strong Multi-PoleMagnet”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.22, No.5, pp.1072-1074, 1986.

[13] 백수현, 김필수, “임펄스 착자요크의 열전달 모델링 및 특성해석”, 대한전기학회 논문지, 제 43권, 3호, pp. 381-387, 1994.

[14] Amália Iványi, *Hysteresis Models in Electromagnetic Computation*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1996[10] Isaak D. Mayergoyz and G. Friedman, “Generalized Preisach model of hysteresis”, IEEE Trans. on Mag., Vol. 24, No. 1, pp. 212-217, 1988.

[15] 홍선기, 등방성 자성재료에서의 일반화된 벡터히스테리시스 모델링, 공학박사학위논문, 1993.

[16] 임달호, 유한요소법, 동명사, 1995.

[17] 中田高義, 高橋則雄, 電氣工學の有限要素法, 森北出版(株), 東京, 1992.

[18] T.Nakata and N.Takahashi, “Numerical Analysis of Transient Magnetic Field in a Capacitor-Discharger Impulse Magnetizer”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.22, No.5, pp. 526-528, 1986.

[19] 윤태호, 권병일, 박승찬, 김영태, 이종배, “유한요소법을 이용한 C.P.M용 착자요크의 과도 자계 해석” 대한전기학회 춘계 합동학술대회, 40회, pp. 81-85, 1999.

[20] G.W.Jewell, D.Howe, T.S.Birch, “Simulation of Capacitor Discharge Magnetization”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.2, No.5, pp.1638-1640, 1990.

[21] G.W.Jewell, D.Howe, C.D.Riley, “The Design of Radial-Field Multipole Impulse Magnetizing Fixtures for Isotropic NdFeB Magnets” IEEE Trans. on Magnetics, Vol.33, No.1, pp.708-722, 1997.

저 자 소 개



윤 태 호 (尹 泰 浩)

1970년 12월 2일 생. 1998년 서울 산업대 전기공학과 졸업. 1998년~2000년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 (주)삼성전자 근무
Tel : 031-200-6232

E-mail : freeyoon@popmail.com



권 병 일 (權 丙 一)

1956년 2월 1일 생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 동경대 대학원 졸업(공학). 1990년 도시바(주) 시스템 소프트웨어 연구소 연구원. 1991년 한국 기계 연구소 자기 부상 열차 사업단 선임연구원. 1991년 ~ 현재 한양 대학교 전자 컴퓨터 공학부 부교수.

Tel : 031-400-5165

E-mail : bikwon@email.hanyang.ac.kr



박 승 찬 (朴 勝 燦)

1968년 3월 24일 생. 1990년 한양대 전기공학과 졸업. 1992년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~2000년 한양대학교 공학기술연구소 선임 연구원. 2000년~현재 동양대학교 시스템 제어 공학부 전임강사.

Tel : 054-630-1106

E-mail : scpark@phenix.dyu.ac.kr



우 경 일 (禹 景 一)

1969년 9월 6일생. 1995년 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997~현재 동 대학원 박사과정.

Tel : 031-409-1277

E-mail : cogging@hanmail.net