히스테리시스 특성을 고려한 전자계의 유한 요소 해석

論 文
48B-3-4

Finite Element Analysis of Electromagnetic Systems Considering Hysteresis Characteristics

金 洪 梘* · 洪 瑄 基** · 鄭 炫 敎***
(Hong-Kyu Kim · Sun-Ki Hong · Hyun-Kyo Jung)

Abstract - This paper describes the finite element procedure including the magnetic hysteresis phenomena. The magnetization-dependent Preisach model is employed to simulate the magnetic hysteresis and applied to each elements. Magnetization is calculated by the Fibonacci search method for the applied field in the implementation of the magnetization-dependent model. This can calculate the magnetization very accurately with small iteration numbers. The magnetic field intensity and the magnetization corresponding to the magnetic flux density obtained by the finite element analysis(FEA) are computed at the same time under the condition that these values must satisfy the constitutive equation. In order to reduce the total calculation cost, pseudo-permeability is used for the input for the FEA. It is found that the presented method is very useful in combining the hysteresis model with the finite element method.

Key Words : finite element, hysteresis, magnetization-dependent model, Fibonacci method, pseudo-permeability

1. 서 론

자기 에너지를 이용하는 대부분의 시스템은 자성체의 자기적 특성에 의해 시스템의 성능 및 특성이 결정되어진다. 영구자석을 사용하는 전동기를 예로 들면, 영구 자석의 잔류자속밀도 및 보자력에 의해 전동기의 출력 등의 특성이 계산되어진다. 자성체의 히스테리시스 현상을 직접적으로 이용하는 예로서는 자기 기록 장치를 들 수 있다. 자기기록 매체에 원하는 정보를 기록하고, 기록된 정보를 다시 정확히 복원하기 위해서는 자성체가 가지는 히스테리시스 특성을 고려하지 않으면 안된다. 자성체가 가지는 해석상의 어려움, 즉 자성체의 비선형성과 히스테리시스 현상을 해석할 수 있는 많은 방법들이 오랫동안 연구되어 왔다[1,2]. 그 중에서도 가장 안정적이고 정확하다고 평가받고 있는 것이 프라이자흐 모델이며[3], 이 모델은 실험에 의해 구하여진 분포함수를 적분함으로써 임의의 자계 변화에 대한 자화값을 계산할 수 있으며, 초기의 모델에서 정확도를 높인 많은 개선된 모델들이 제안되어 왔다[4,5].

한편 복잡한 전자기 시스템을 매우 정확히 해석할 수 있는 유한 요소법은 이제는 전기 기기 해석의 일반적인 기법으로 사용되고 있으며, 그 응용 범위는 모든 전자기 분야에 걸쳐 이용되고 있다. 유한 요소법에서는 자성체의 비선형뿐만 아니라, 이방성, 히스테리시스 현상 등의 기존의 등가 회로법으로는 해석하기 어려운 자성체의 특성을 고려한 해석이 가능하다.

본 논문에서는 자성체의 히스테리시스 현상을 고려한 전자기 시스템의 해석을 위해서 히스테리시스 모델과 유한 요소 해석법을 효과적으로 결합하기 위한 해석 기법을 제안한다. 히스테리시스 모델로서는 초기의 프라이자흐 모델에서 개선된 자화의존 프라이자흐 모델을 이용하였으며, 유한 요소 해석은 영구 자석 문제에 대한 정식화와 비슷한 과정에 의해 이루어진다. 자성체 영역을 요소 분할한 경우 각 요소별로 서로 다른 자기 이력을 보이기 때문에 각 요소별로 프라이자흐 모델이 적용된다. 히스테리시스 영역에서의 자성체를 표현하는 방법으로는 보자력을 이용하는 방법[6], 잔류 자화를 이용하는 방법[7] 등이 있다.

본 논문에서는 가투자율(pseudo-permeability)을 이용하여 히스테리시스 영역에서의 유한 요소 정식화를 하였으며, 이 방법은 다른 방법에 비해 계산량이 적으면서도 반복 계산시 수렴이 안정적이며 또한 정확한 해석이 가능한 장점이 있다. 히스테리시스를 고려한 해석의 경우 비선형 특성 때문에 반복 계산에 의해 각 요소에서의 자화 및 자계의 세기를 구하여야 한다. 본 논문에서는 유한 요소 해석에 의해 구하여진 각 요소에서의 자속 밀도로부터 Fibonacci법[8]을 이용하여 정확한 동작점을 찾을 수 있게 하였다.

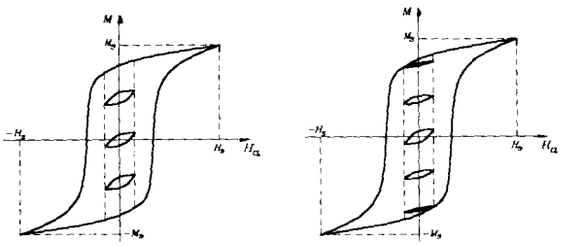
2. 자화의존 모델의 구현

프라이자흐 모델은 독일의 물리학자 프라이자흐(Preisach)가 1935년 자성체의 히스테리시스 현상을 설명하기 위해 제시하였으며 이후에도 많은 연구가 이루어져서 현재에는 히스테리시스 현상을 가장 잘 설명할 수 있는 모델로 주목받고

*正 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程(修了)
**正 會 員 : 湖西大 第 1 工學部 助敎授 · 工博
***正 會 員 : 서울大 電氣工學部 敎授 · 工博
接受日字 : 1998년 12월 17일
最終完了 : 1999년 2월 13일

있으며, 여러 응용 분야에 적용이 되고 있다. 본 연구에서는 고전적 프라이자흐 모델에서 그 특성을 개선한 자화의존 프라이자흐 모델[9]을 사용하였다.

이 모델은 고전적 프라이자흐 모델이 가지는 합동성(congruency)의 모순을 극복한 것이다. 즉 입력 자계의 극값이 동일한 경우 고전적 모델은 그림1의 (a)와 같이 마이너 루프의 형상이 동일한 결과를 보여주지만, 실제로 루프를 측정하여 보면 대부분의 자성체는 그림1의 (b)와 같이 루프 형상이 입력 극값 뿐만 아니라 이력에 따라서 서로 다른 형상을 나타낸다. 자화 의존 모델은 이러한 현상을 잘 표현할 수 있는 모델로 확인되고 있다[9].



(a) classical model (b) magnetization-dependent model

그림 1 동일 입력 극값에 대한 마이너 루프 형상
Fig. 1 Minor loops for the same applied field

고전적 프라이자흐 모델이 파라메터를 인가 자계(applied filed)로만 보아 자화를 계산하는 데 반해, 자화 의존 모델에서는 자화는 인가 자계 뿐만 아니라 자기 자신의 자화값에도 의존하게 되며, 자화값을 결정하는 자계는 인가자계 뿐만 아니라 다음 식으로 표시되는 전체 자계가 된다.

$$H_t = H_a + H_m \tag{1}$$

여기서 H_a는 인가자계, H_m은 자화의존 자계(magnetization-dependent field)이며 이것은 다음 식으로 표시된다.

$$H_m = \zeta M \tag{2}$$

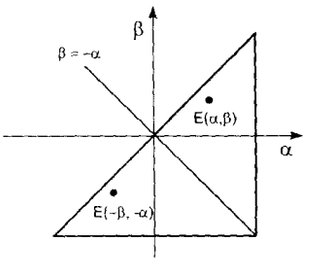
여기서 ζ를 자화 의존 상수(magnetization-dependent constant)라 하며 자성체의 종류에 따라 다른 값을 가지게 된다.

결국 자화는 전체 자계 H_t의 함수가 되고, f를 전체 자계를 입력으로 하는 히스테리시스 트랜스듀서(transducer)라고 하면 자화는

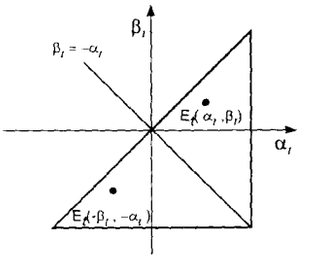
$$M = f(H_t) = f(H_a + \zeta M) \tag{3}$$

으로 표현된다.

이제 자화는 인가 자계만의 함수가 아니라 자신의 자화에도 다시 의존하게 된다. 자화의존 상수가 주어지면, 전체 자계도 결정되고 인가 자계에 따른 프라이자흐 다이어그램으로부터 전체 자계에 대한 프라이자흐 다이어그램을 얻을 수 있다. 고전적 모델에서는 분포함수 다이어그램 또는 에버렛 다이어그램의 좌표축이 인가 자계 항이었으나, 자화의존 모델에서는 전체 자계 항이 되며, 그림2에서와 같이 전체 자계에 대하여 분포함수 또는 에버렛 함수는 대칭 분포를 가정하게 된다. 따라서 자화의존 상수는 전체 자계에 대한 에버렛 함수가 대칭인 값을 선택하여야 하며, 이 값은 자성체의 종류에 따라서 일정한 값이 된다.



(a) in the classical Preisch model



(b) in the magnetization-dependent model

그림 2 에버렛 함수 분포의 가정
Fig. 2 Distribution of the Everett function

식(3)에서 보듯이 자화는 다시 자화 자신의 함수이며, 히스테리시스 트랜스듀서 $f(H_t)$는 비선형이기 때문에 반복 계산에 의해 식(3)을 만족하는 자화값을 계산하여야 한다. 이 때 일반적인 방법은 먼저 주어진 자계의 세기 H_a에 대한 자화를 가정하여 전체 자계 H_t에 대한 자화를 계산하고 이 값을 가정된 자화값과 비교하면서 수렴이 될 때까지 이러한 과정을 반복한다. 이 경우 보자력 부근에서는 자화값의 변화가 심하기 때문에 수렴이 어려운 단점이 있다.

여기서는 이러한 자화의 심한 변동을 막고 반복 계산 회수를 줄이면서도 정확한 자화값을 구하기 위해서 Fibonacci법[8]을 이용하여 자화의 범위를 줄여가면서 식(3)을 만족하는 자계의 세기 및 자화값을 구하는 방법을 사용하였다. k번째 스텝에서 자계의 세기가 이전 스텝에 비해 증가하면 자화값도 이전 스텝의 값에 비해 증가하며, 따라서 구하고자 하는 자화값은 이전 스텝의 자화와 포화 자화값 사이인 [M_{k-1} , M_s]사이에 있게 된다. 이 구간 내의 임의의 자화값을 가정하면, 식(1) 및 (2)로부터 전체 자계를 구할 수 있으며, 이 전

체 자계 값에 해당하는 자화값을 프라이자흐 모델로부터 구할 수 있다.

이제 전체 자계 및 자화값을 알기 때문에 다시 인가 자계를 식(1)로부터 계산하여 이 값이 입력으로 준 인가자계와 일치할 때까지 자화값을 변화시키면서 이러한 계산을 반복한다. Fibonacci법을 사용하여 반복 계산에 의해 자화값을 구하는 경우, 그 과정은 다음과 같다.

(1)초기 구간 설정

자계 증가시 : $M_{a0} = M_{k-1}$, $M_{b0} = M_s$

자계 감소시 : $M_{a0} = -M_s$, $M_{b0} = M_{k-1}$

(2)자화 M 가정 및 전체 자계 계산

$r = 1-F(N-i+1)/F(N-i+2)$

$M_{a1} = M_{a0} + r\times(M_{b0}-M_{a0})$

$M_{b1} = M_{a0} + (1-r)\times(M_{b0}-M_{a0})$

$H_{t1} = H_{ak}+\zeta M_{a1}$, $H_{t2} = H_{ak}+\zeta M_{a2}$

$F(N)$: Fibonacci 수열 , H_{ak} : k 스텝의 인가 자계

(3)자화의존 모델에서 가정된 전체 자계에 대한 자화 계산

$M_{out1} = f(H_{t1})$, $M_{out2} = f(H_{t2})$

(4)주어진 인가자계와 계산된 인가자계의 ,차이 계산

$H_{a1} = H_{t1} - \zeta M_{out1}$, $H_{a2} = H_{t2} - \zeta M_{out2}$

$f_1 = |H_{ak} - H_{a1}|$, $f_2 = |H_{ak} - H_{a2}|$

(5)자화 구간 재설정

if ($f_1 \le f_2$) then

$M_{a0} = M_{a0}$, $M_{b0} = M_{b1}$

else

$M_{a0} = M_{a1}$, $M_{b0} = M_{b0}$

end

(6)수렴 판정

if ($f_1+f_2 \le \varepsilon_H$) then

goto exit

else

goto (2)

end

이와 같은 과정에 의해 주어진 인가 자계에 대한 자화값을 구하면 기존의 단순 반복법보다 반복횟수가 적으면서도 정확한 자화값을 얻을 수가 있었으며, 특히 보자력 부근에서도 매우 정확한 값을 구할 수가 있다.

그림3은 자계가 변하는 경우 이 방법에 의해 구하여진 루프와 실험에 의해 구하여진 루프를 비교한 것이며, 매우 정확히 자화값을 구할 수 있음을 확인할 수 있다. 이 때 10번 미만의 반복 계산으로 인가 자계와의 오차가 1[A/m]이내에서 정확히 자화값을 찾을 수 있었다.

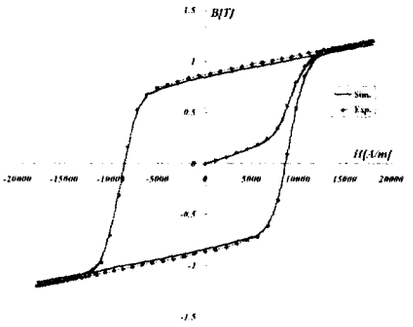


그림3 자화의존 모델 및 실험에 의한 루프 비교

Fig. 3 Comparison of hysteresis loop

3. 유한 요소법과 히스테리시스 모델의 결합 알고리즘

유한 요소법은 복잡한 형상의 전자기 시스템도 매우 정확하게 해석할 수 있는 수치해석 기법으로서 근래에는 대부분의 전기 기기 해석 시에 이 방법을 이용하고 있을 정도로 그 응용 범위가 넓다. 히스테리시스 특성을 고려한 유한 요소 해석의 경우 자성체 영역에 대한 정식화를 위해서 자속밀도와 자계의 세기 간의 관계를 표현하는 식이 필요하다.

스칼라 히스테리시스 모델을 이용하는 경우 자성체 영역에서의 구성 방정식(constitutive equation)은 다음과 같다.

$$B = \mu_0 H + M = \mu_0 H + f(H) \tag{4}$$

식(4)에서 보듯이 자화는 자계의 세기의 함수이며, 히스테리시스 트랜스듀서 f 는 비선형이기 때문에 식(4)를 만족시키는 자계 및 자화를 구하기 위해서는 반복 계산이 필요하다.

유한 요소 해석 루틴에서 자성체를 표현하는 방법은 식(4) 이외에도 보자력을 이용하는 방법[6], 잔류 자화를 이용하는 방법[7] 등이 있으며 이 경우 식(4)는 다음과 같이 바뀌어서 이용된다.

$$H = \nu(B)B + H_c \tag{5}$$

$$B(H) = \mu_n H + M_n \tag{6}$$

식(5)을 이용하는 경우 히스테리시스 루프 상의 임의의 점이 주어지면, 이 점을 지나는 루프로부터 보자력을 계산하여야 하며, (6)을 이용하는 경우에는 자계의 세기가 0이 되었을 때의 잔류 자화값 M_n 을 계산하여야 하며, 이들 값은 히스테리시스 모델로부터 계산되어지기 때문에 전체 해석 시간에서 상당한 부분을 차지하게 된다.

본 논문에서는 이러한 부가적인 계산량을 줄이기 위해서 식(4)를 가투자율(pseudo-permeability) μ_{sp} 을 이용하여 다음과 같이 바꾼 후, 유한 요소 정식화를 하였다.

$$B = \mu_0 H + M = \mu_0 H + \mu_0 \mu_{sp} H + M' \tag{7}$$

$$M' = M - \mu_0 \mu_{sp} H \tag{8}$$

이제 식(7)을 이용하여 유한 요소 정식화를 하면, 각 요소별 물질 값은 투자율 $\mu_0(1+\mu_{sp})$와 이로부터 계산된 자화 M'가 된다. 그림4는 가투자율을 이용한 경우, 주어진 전류에 대해서 자성체 한 요소에서의 자화 및 자계의 세기를 반복계산에 의해서 구할 때, 동작점을 찾아가는 과정을 보여준다. (k)번째 전류 스텝에서의 정확한 동작점을 (H_k, B_k)라고 하면 직선의 기울기는 식(7)로부터 $\mu_0(1+\mu_{sp})$가 되며, y축과의 교점은 식(8)에서 구한 M'가 된다.

자기 벡터 포텐셜을 이용한 일반적인 유한 요소 정식화의 경우, 전류가 주어지면 각 요소별로 자기 벡터 포텐셜이 계산되어 이로부터 요소별 자속밀도를 알 수가 있다. 하지만 히스테리시스 모델에서는 자계의 세기를 입력으로 하여 자화 및 자속밀도를 계산하기 때문에 유한 요소법과 히스테리시스 모델을 결합하는 경우에는 자속밀도로부터 자화 및 자계의 세기를 구하여야 하는 역문제(inverse problem)가 된다.

이 경우 자속밀도 값은 알고 있기 때문에 이전 스텝의 자화로부터 자계의 세기를 구하고, 이 자계의 세기를 이용하여 자화를 구하는 단순 반복법[10]을 사용할 수 있지만, 여기서는 $B=\mu_0 H+M$ 을 만족하는 자화와 자계의 세기를 동시에 구하는 방법을 이용한다. 즉 유한 요소 해석으로부터 자속 밀도가 계산되어지면, 구성 방정식을 만족하는 H와 M을 자화의존 모델로부터 동시에 구하게 된다.

(k-1)번째 전류 스텝에서 수렴된 자화와 자계의 세기를 M_{k-1}, H_{k-1} 라고 할 때, (k)번째 스텝에서 전류가 증가하면, 자속밀도가 증가하며, 이에 따라 자계의 세기 및 자화가 증가하므로 (k)번째 스텝에서의 자화 및 자계의 세기는 각각 [M_{k-1}, M_s] 및 [H_{k-1}, H_s] 사이에 있게 되며, 따라서 Fibonacci법을 먼저 자계의 세기에 대해서 적용하고, 다음에는 자화에 대해서 적용하면 매우 안정적이면서도 정확히 자화 및 자계의 세기를 구할 수 있게 된다.

만약 전류가 감소하는 경우에는 자속 밀도, 자화 및 자계의 세기가 감소하므로 이 경우에는 [$-M_s$, M_{k-1}] 및 [$-H_s$, H_{k-1}] 사이에 자화 및 자계의 세기가 위치하게 되며 전류가 증가하는 경우와 똑같은 방법에 의해 (k)번째 스텝에서의 값을 구할 수 있다.

그림5는 전류가 임의로 변할 때 자성체 내의 히스테리시스 현상을 고려한 유한 요소 해석을 위해서 본 논문에서 제시한 해석 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 순서도는 전류가 변화하는 스텝과, 임의의 전류 스텝에서 자성체 각 요소 내의 자화 및 자계의 세기를 구하기 위한 반복 스텝으로 구성되어 있다. 수렴 기준은 각 자성체 요소 내에서의 자계의 세기를 기준으로 한 다음 식을 사용하였으며, 수렴 오차 ε_H는 0.1[%]로 하였다.

$$\sum \left| \frac{H_k^{i+1} - H_k^i}{H_k^{i+1}} \right| < \varepsilon_H \qquad (9)$$

그림 6은 유한 요소 해석으로부터 구하여진 자속밀도를 이용하여 이 자속밀도에 해당하는 자계의 세기와 자화를 계산하는 과정을 보여주는 순서도이다. 여기서 자계의 세기 H는 Fibonacci법에 의해서 변하며, 이 값에 따라서 자화 M이 계산되어지며, B, H 및 M이 구성방정식을 만족할 때까지 반복된다.

모든 히스테리시스 영역의 요소에 대해서 이러한 계산이 이루어지며, 수렴이 되면 각 요소별로 자계의 세기 및 자화값이 구하여지므로 유한 요소 해석의 입력 자화 값을 (8)로부터 구한다.

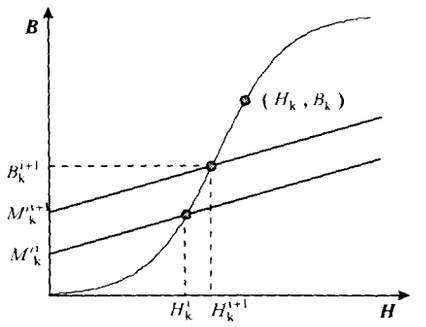


그림 4 가투자율을 이용한 반복 계산

Fig. 4 Iterative calculation procedure using pseudo-permeability

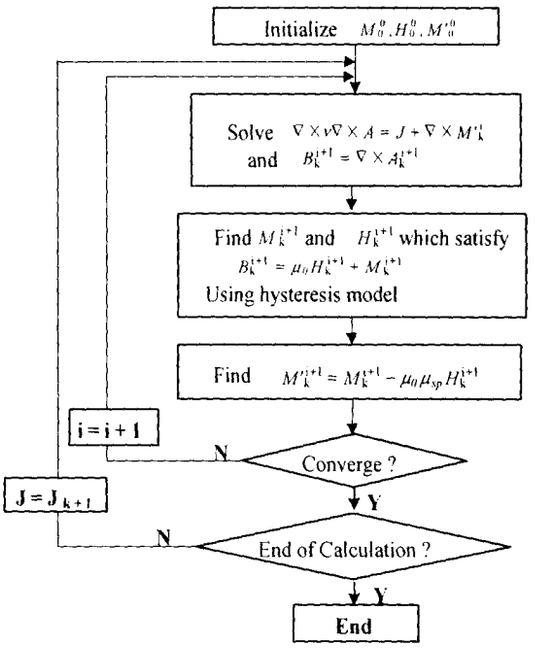


그림 5 히스테리시스 모델과 유한 요소법을 결합한 해석 알고리즘

Fig. 5 Flow chart of finite element method combined with hysteresis model

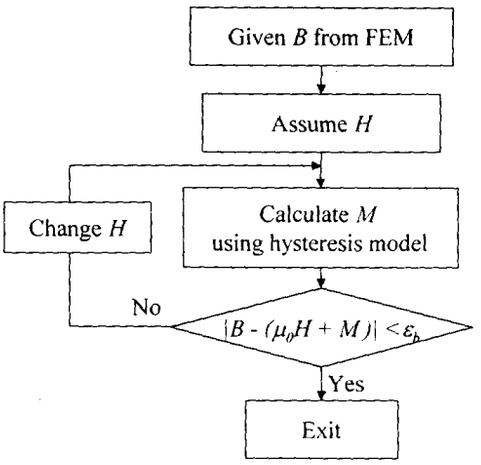


그림 6 자속밀도로부터 자계의 세기 및 자화 계산
Fig. 6 Calculation of field intensity and magnetization from flux density

4. 시뮬레이션 및 검토

본 논문에서 제시한 히스테리시스 모델과 유한 요소 해석 결합 알고리즘을 그림7과 같은 자기 리프터(magnetic lifter) 시스템에 적용하여, 본 해석 방법에 의한 여러 가지 특성들을 살펴보았다. 자기 리프터는 그림7에서처럼 크게 코일 부분, 코어 부분 및 히스테리시스 영역으로 나누어져 있으며, 일반적으로 히스테리시스 영역에는 영구 자석을 사용한다[11]. 물체를 흡착하여 이동시킬 경우에는 영구 자석의 자화 방향으로 자속이 흐르게 전류를 인가하고, 물체를 탈착할 경우에는 이와 반대 방향으로 전류를 인가하여 자석을 탈자시켜서 쉽게 물체를 뗄 수 있게 한 구조로 되어 있다.

여기서는 코일의 전류가 정현적으로 변할 때, 히스테리시스 영역 내의 요소에서의 자계의 세기 및 자화를 계산하였다. 시뮬레이션에서 히스테리시스 영역의 자성체로서 H_c 8,500[A/m], H_s 25,000[A/m], M_s 1.2[T]의 반강자성체(semi-hard magnetic material)를 이용하였다. 또한 유한 요소 해석시의 입력으로 필요한 가투자율의 값은 M_s / $\mu_0 H_s$ 에 해당하는 값을 주었다. 가투자율이 너무 작은 경우 수렴 속도가 느리고, 반대로 너무 큰 경우에는 자화값의 변동 폭이 커서 수렴이 안정적이지 못하게 되는 데, 이 값을 사용하면 적당한 수렴 특성을 보여준다.

그림8의 (a)는 공극이 0[mm]인 경우, 즉 흡착시의 히스테리시스 영역의 가운데 요소에서 계산되어진 B-H 루프를, (b)는 공극이 1[mm]인 경우의 B-H 루프를 보여준다. 공극에서의 감자계에 의해 최대 자계 및 자속밀도가 흡착 시에 비해 많이 줄어든 것을 확인할 수가 있다. 또한 그림 8의 (a)와 같이 흡착시의 루프가 구해지면, 히스테리시스 영역의 자성체를 탈자시키기 위해서는 어느 정도의 전류를 흘려주어야 하는지 알 수가 있다. 이러한 전류의 크기 결정은 히스테리시스 특성을 고려하지 않으면 구할 수가 없으며, 시스템의 설계시 매우 중요한 값이 된다.

본 논문에서 제시한 해석 방법의 타당성을 검증하기 위해서 초기 자화 곡선을 이용한 비선형 유한 요소 해석 결과와 본 논문에 의한 결과를 비교하였다. 즉 자성체가 초기 탈자시에는 초기 자화 곡선 상을 따라서 동작점이 이동하기 때문에 이 경우에는 초기 자화 곡선을 이용한 비선형 유한 요소법에 의해 정확한 해를 구할 수가 있다. 그림9는 Newton-Raphson법을 이용한 비선형 해석 결과와 본 논문에 의한 결과를 비교한 것이며, 본 논문에 의한 방법이 정확히 해를 구할 수 있음을 확인할 수 있다.

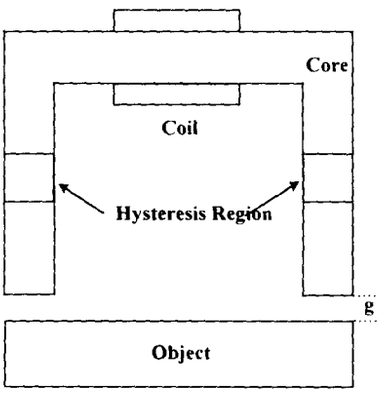
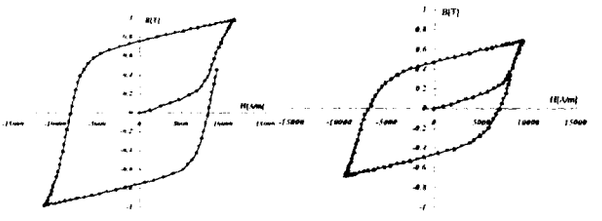


그림 7 자기 리프터의 구조
Fig. 7 Structure of the magnetic lifter



(a) air gap = 0 [mm] (b) air gap = 1 [mm]

그림 8 자성체 요소에서의 히스테리시스 루프
Fig. 8 Hysteresis loop in the hysteresis element

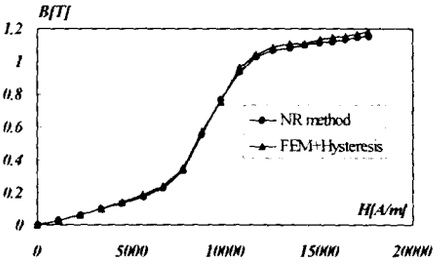


그림 9 초기 자화 곡선 해석 비교
Fig. 9 Initial magnetization curve simulation

5. 결 론

본 논문에서는 자성체의 히스테리시스 특성을 고려한 유한 요소 해석 알고리즘의 효과적인 구현 방법을 제시하였다. 히스테리시스 모델로서는 자화의존 프라이자흐 모델을 이용하였으며, Fibonacci법에 의한 자화값의 추정 방법은 계산 시간이 짧으면서도 매우 정확히 주어진 자계 값에 대한 자화값을 구할 수 있었다.

히스테리시스 영역에서는 가투자율을 이용하여 유한 요소 정식화를 하였으며, 이 방법은 잔류 자화 혹은 보자력을 구하기 위한 부가적인 계산이 필요 없는 장점이 있다. 유한 요소 해석의 결과로 구하여진 자속밀도로부터 자계의 세기 및 자화를 구하기 위해서, 구성 방정식을 만족하는 자계의 세기 및 자화를 Fibonacci법에 의해 구하는 방법을 이용하였으며, 이 방법에 의해서 반복 계산시 수렴이 안정적이며 정확한 값을 찾을 수 있음을 확인하였다.

히스테리시스 현상이 시스템의 특성에 중요한 영향을 미치는 히스테리시스 전동기, 자기 기록 장치, 리액터, 자기 리프터 등의 해석에 이 방법은 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 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.

[2] Kohshi Okumura and Akira Kishma, "Digital Simulation of Hysteretic Characteristics and its Applications", *IEE Japan Transactions part B*, Vol.103, No.7, pp.451-458, July 1983.

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

[4] Goergy Kadar and Edward Della Torre, "Determination of the Bilinear Product Preisach Function", *J.Appl.Phys.*, Vol.68(3), No.15, pp.3001-3003, April 1988.

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

[6] Francois Henrotte, Andre Nicolet, "Modeling of ferromagnetic materials in 2D finite element problem using Preisach's model", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol.28, No.5, pp.2614-2616, 1992

[7] P.J. Leonard, D.Rodger and P.C. Coles, "Finite Element Modelling of Magnetic Hysteresis," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol.31, No.3, pp.1801 - 1804, May 1995.

[8] S.Rao, *Engineering Optimization-Theory and Practice*, John Wiley & Sons, Inc., 1996

[9] 홍선기, "등방성 자성재료에서의 일반화된 벡터 히스테리시스 모델링", 공학박사 학위 논문, 서울대학교, 1993.

[10] F.Ossart, G.Meunier, "Results on modelling magnetic hysteresis using the finite-element method", *J.Appl. Phys.*, 69(8), pp.4835-4837, 1991

[11] K.J. Han, J.S. Chun and H.K. Jung, " Analysis of the Three Dimensional Magnetic System Using Permeance Method ", *Proceedings of ICEE*, Vol.1 , pp.856 - 859, 1998

저 자 소 개

김 홍 규 (金 烘 槿)

1969년 출생. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사) .1997년 서울대 공대 전기공학부 대학원 졸업(석사). 현재 서울대 공대 전기공학부 대학원 박사과정.

홍 선 기 (洪 瑄 基)

1965년 1월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1993년 ~ 1995년 렉스 산전(주) 선임 연구원. 1995년 ~ 현재 호서대 공대 제 1 공학부 조교수.

정 현 교 (鄭 炫 敎)

1955년생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~1989년 뉴욕 Polytechnic Univ. 객원교수. 1984년~1993년 강원대 전기공학과 교수. 현재 서울대 전기공학부 부교수