

회전 히스테리시스 특성을 고려한 전자계의 유한요소 해석

홍선기* · 김홍규** · 정현교**

* 호서대학교 공과대학 전기전자제어계측공학부

** 서울대학교 공과대학 전기공학부

(1997년 3월 3일 받음, 1997년 3월 20일 최종수정본 받음)

교번 히스테리시스와 회전 히스테리시스를 동시에 고려할 수 있는 벡터 히스테리시스 모델을 이용하여, 회전 히스테리시스 특성을 갖는 전자계의 유한 요소 해석 알고리즘을 제안한다. 벡터 히스테리시스 모델은 자화의존 프라이자흐 모델에서 확장된 모델을 이용하였다[1]. 회전 자계가 자성체에 가해진 경우, 각 요소에서의 자화값이 벡터 모델로부터 구해지며, 이 값은 다시 유한요소 해석의 입력이 되어서 인가자계와 자화와의 지연각을 구할 수 있다. 실험 결과와의 비교를 통해, 제안된 방법이 회전자계의 영향을 받는 전자계 시스템의 자화특성을 정확히 해석 할 수 있음을 확인하였다.

I. 서 론

모든 자성 재료는 히스테리시스 특징을 가지고 있기 때문에 전자계 시스템을 정확히 해석하기 위해서는 히스테리시스 특성이 고려되어야 한다. 히스테리시스는 크게 교번(alternating)과 회전(rotational)의 두 가지로 나뉘어진다. 교번 히스테리시스는 자계가 한 축상에서만 시간적으로 변화할 때 일어나는 현상이며, 이 현상을 가장 잘 표현할 수 있는 모델로 평가받고 있는 것이 프라이자흐 모델이다. 이 모델은 히스테리시스 현상에 대한 본질적이고 이론적인 접근을 지양하는 대신 나타나는 현상적인 양들을 데이터로 처리하는 수치 기법으로서, 먼저 실측 곡선으로부터 각 자성체 입자들 간의 상호작용과 자기입자들의 보자력의 밀도 분포(density distribution)를 입력 데이터로 하고, 자기이력을 고려해 주기 위해 입력의 변천 과정을 기억시켜 처리하는 방법이다. 이것은 처리해야 할 데이터가 상대적으로 많고, 모델링의 전개 과정이 복잡하며, 벡터량에 대한 처리가 곤란하지만, 실제 자성체의 복잡하게 변하는 히스테리시스 특성을 가장 잘 모사할 수 있는 모델로 간주되고 있다. 1990년 프랑스의 Ossart는 여러 종류의 히스테리시스 모델들을 실험치와 비교하였는데 오직 프라이자흐 모델만이 안정되게 실험 데이터와 잘 일치함을 보였다[2].

그러나 고전적 프라이자흐 모델은 실제 히스테리시스 현상과 비교하면 모든 자성 재료에 일반적으로 적용되기 곤란한 모델 자체의 모순점이 발견되었다. 즉, 고전적 모델에서는 동일한 입력 극값에 대하여 마이너 루프는 자기이력에 무관하게 언제나 동일한 루프를 그리지만, 실제

강자성체에서 보통 이러한 현상은 일어나지 않는다. 또한 실험에서 구한 데이터로 분포 함수를 작성하는 경우, 프라이자흐 다이어그램에서 분포 함수의 비대칭 분포 및 분포 함수가 음의 값을 갖는 현상 등이 나타나게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 제시된 모델이 자화의존 프라이자흐 모델이다[3]. 즉, 고전적 모델에서는 파라미터를 인가자계 H_a 로만 보았는데, 자화의존 모델에서는 자화는 인가자계뿐만 아니라 자성재료 자신의 자화값에도 의존하게 됨을 이용하여 입력파라미터를 인가자계와 자화의존자계의 합인 전체자계로 보았으며, 이 모델에 의한 계산 방법이 계속 연구되고 있다.

자계가 회전하는 경우는 회전 히스테리시스가 고려되어야 한다. 회전 히스테리시스는 2차원 평면에서 자계가 공간적으로 움직일 때, 이에 따른 자화 혹은 자속밀도가 공간적으로 지연을 가지며 자계를 추종하는 현상이고, 필연적으로 벡터 히스테리시스 모델이 필요하다. 앞에서 언급하였듯이 프라이자흐 모델은 복잡하게 변화하는 교번 히스테리시스 현상을 가장 잘 표현할 수 있는 모델로 평가되고 있으며, 그것이 갖고 있는 많은 장점들 때문에 스칼라 모델에서 벡터 모델로 확장하려는 많은 연구가 있어 왔다[4].

회전 히스테리시스에 대하여서는 스칼라 자화의존 모델의 기본 히스테리시스 오퍼레이터에 회전성을 부여하고, 프라이자흐 다이어그램을 인가자계 및 전체자계에 의해 가역 및 비가역 영역으로 구분하고, 두 영역의 위상차는 인가자계 또는 가역 영역의 자화값에 관계되며, 이를 벡터적으로 적분하는 방법으로 자화를 계산하는 회전 히스테리시스 모델이 제안되었다[1]. 이 모델은 자계가 크

기가 일정한 원 회전자계뿐만 아니라 타원회전자계의 경우에도 적용할 수 있는 일반화된 벡터 모델이다.

한편, 유한 요소 해석법은 전자계 해석의 기법 중 가장 정확한 수치 해석 기법 중의 하나로 평가되고 있다. 하지만, 히스테리시스 특성을 가지는 전자계의 해석 시에는 히스테리시스 현상을 무시하거나 초기자화곡선만을 고려하여 해석을 시도하였으며, 스칼라 히스테리시스 모델을 이용한 유한 요소 해석법도 제안되었다. 하지만, 이 방법은 교번 히스테리시스만을 고려하였으며, 자계가 공간적으로 변하는 회전 히스테리시스의 영향은 무시하였다.

본 논문에서는 벡터 히스테리시스 모델을 이용하여 회전 히스테리시스 특성을 갖는 전자계의 유한 요소 해석 알고리즘을 제안한다. 즉, 자계가 회전하는 경우 인가자계와 자화와의 지연을 고려하여 자화의 크기와 방향을 벡터 모델로부터 구하여 이 값을 입력으로 하여 유한 요소 해석을 수행한다. 또한 제안된 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과와 실험치를 비교함으로써 그 타당성을 입증한다.

II. 벡터 히스테리시스 모델

자계가 그 크기는 일정하고, 2차원 평면상에서 회전을 하면, 이에 따른 자화는 교번 히스테리시스와는 달리 공간적인 지연을 가지며 자계를 추종하게 된다. 이때 나타나는 특성은 교번 히스테리시스에서의 특성과는 다르며, 이 현상을 회전 히스테리시스라고 한다. 회전 히스테리시스에 대한 모델링을 위하여 스칼라 자화의존 모델인 자화의존 프라이자흐 모델에서, 기본 히스테리시스 오퍼레이터가 단순히 ± 1 의 두 값만을 갖는 것을 확장하여 여기에 회전성을 부여함으로써, 각 오퍼레이터가 자계에 의존하여 임의의 방향을 취할 수 있도록 하였다[1]. 이때의 자화는 다음 식으로 표현된다.

$$M = f(H_t) = f(H_a + \xi M) \quad (1)$$

여기서 M 은 자화, H_t 는 전체 자계, H_a 는 인가 자계, ξ 는 자화 의존 상수[5]를 나타낸다. 즉 전체 자계는 인가 자계와 자성 재료 자신의 자화에 의해 표시되며, 자화는 인가 자계뿐만 아니라 자화에 의한 전체 자계에 의해 결정된다.

Fig. 1(a)는 인가자계가 포화자계 H_s 에서 감소하여 일정 크기의 자계에 이르렀을 때, 이 자계를 회전시킨 경

우의 벡터 프라이자흐 평면을 표시한 것이다. 회전 히스테리시스 모델은 스칼라 히스테리시스 모델에서 히스테리시스 오퍼레이터에 회전성만을 하나 더 부여한 것이므로 본포 함수가 존재하는 정의역은 자화 의존 스칼라 모델과 동일하다. a_t 와 b_t 를 각각 기본 프라이자흐 오퍼레이터 (elementary Preisach operator)의 스위칭 필드라고, θ_t 를 전체자계 H_t 의 위상각이라고 하자.

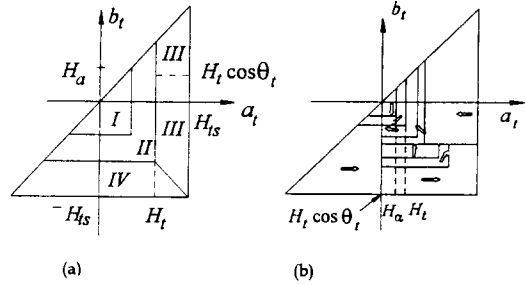


Fig. 1. The Preisach plane configuration for the total field. (a) when the applied field increases from the demagnetization state to H_a (b) after the applied field rotates subsequently

영역 I에서는 $a_t < H_a$ 의 관계가 있으며, 이 영역에서는 각 입자들이 자계와 같은 방향으로 자화되는 가역(reversible) 영역이다. 영역 II는 $H_a < b_t < a_t < H_t$ 를 만족하며, 이 영역의 입자들은 회전 인가자계와 Ψ 의 지연각을 가지며 비가역(irreversible)적으로 회전을 한다. 영역 III과 IV는 $H_t < b_t$ 의 관계를 가지며 인가자계에 대하여 이전 상태를 유지하는 영역이다. 하지만 III과 IV의 경계는 자계 방향이 변함에 따라 이동한다. 이것은 영역 III과 IV의 경계의 이동은 스칼라 자화의존 모델에 따른다는 것을 의미한다. 자성 재료 내에서 인가 자계가 회전을 하면, 프라이자흐 입자들도 또한 회전을 한다. 만일 자계의 크기가 변하면, 새로운 프라이자흐 영역이 형성되며, 전체 자계의 영향을 받지 않는 입자들은 이전의 상태를 유지하게 된다.

Fig. 1(b)는 인가 자계 H_a 가 $H_t(1 + k \sin \theta)$ 의 크기로 회전을 하는 경우의 프라이자흐 다이어그램이다. 여기서 θ 는 인가 자계의 위상각, H_t 는 임의의 양의 값, k 는 $0 < k < 1$ 의 값이며, θ 가 0° 에서 270° 까지 변화한 경우에 대한 다이어그램을 나타내었다. 여기서도 스칼라 프라이자흐 모델에서와 같이 지움성(wiping out property)이 적용된다. 즉, 가역과 비가역 영역이 증가하면,

이전 상태를 유지하고 있던 영역들 중 가역, 비가역 영역에 포함되는 영역은 그 전 상태를 유지하는 과정은 중단되고, 각각 영역에 해당하는 데로 가역 또는 비가역 영역의 방향에 일치하게 된다. 이로부터 인가 자계가 원 회전 자계이든 타원 자계이든, 자화는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$M = \iint_{a_i \leq b_i} \rho(a_i, b_i) \gamma_{a_i, b_i} H_i da_i db_i \quad (2)$$

$\rho(a_i, b_i)$: 분포함수

γ_{a_i, b_i} : 전체 자계에 대한 벡터 프라이자흐 오퍼레이터

식(2)에서 자화는 전체 자계의 함수이며, 식(1)에서 보듯이 전체 자계는 다시 자화와 인가자계의 함수이다. 따라서 반복 계산법에 의하여 자화를 계산하여야 한다. Fig. 2는 벡터 히스테리시스 모델에 의해 자화를 계산하기 위한 순서도이며, 여기서 p는 시간 스텝, n은 최종 시간 스텝을 나타낸다.

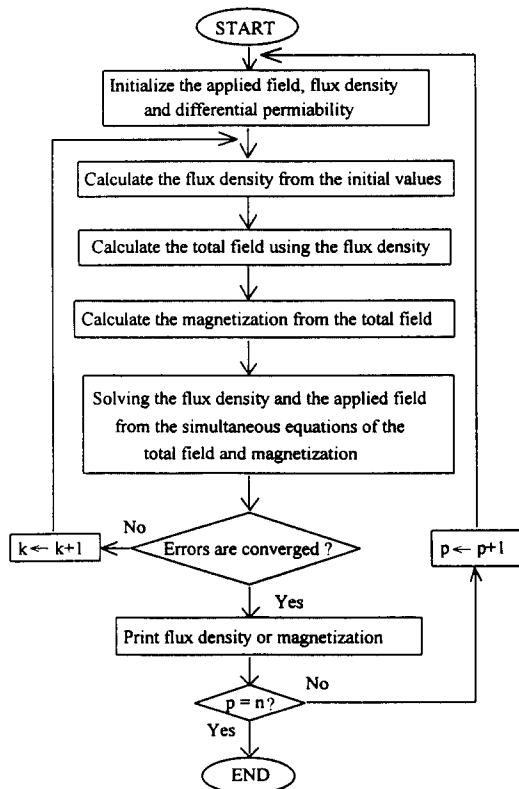


Fig. 2. Vector hysteresis calculation algorithm.

III. 제안된 알고리즘

3.1 자화 특성

자계가 회전하면, 대부분의 자성재료에서는 회전 히스테리시스 때문에 자화 방향은 인가자계의 방향과 지연이 생긴다[6]. 따라서 스칼라 히스테리시스 모델이나 회전 히스테리시스를 무시한 벡터 모델에 의해서는 이것을 고려해 줄 수가 없기 때문에 정확한 시스템의 해석이 곤란하다.

지금까지는 전자계 해석 방법의 하나인 유한요소법에서는 대부분 히스테리시스를 무시하거나, 시편의 초기자화곡선을 이용하여 포화만을 고려할 뿐이었다. 몇몇 논문에서는 스칼라 모델을 이용하여 히스테리시스 현상을 고려하거나[7], 회전 히스테리시스를 무시한 벡터 모델이 제안되었다[8].

이러한 모델들은 자계가 회전하지 않고 한 축상만을 따라 변하거나, 회전 히스테리시스가 매우 작은 경우에는 적절할 수도 있지만, 자계가 회전을 하면 기존의 방법으로는 Fig. 3(c)와 같은 자계에 대한 자화의 지연을 설명하지 못하고, Fig. 3(b)와 같은 결과를 유도함으로써 정확한 자화의 크기나 방향을 얻을 수가 없다.

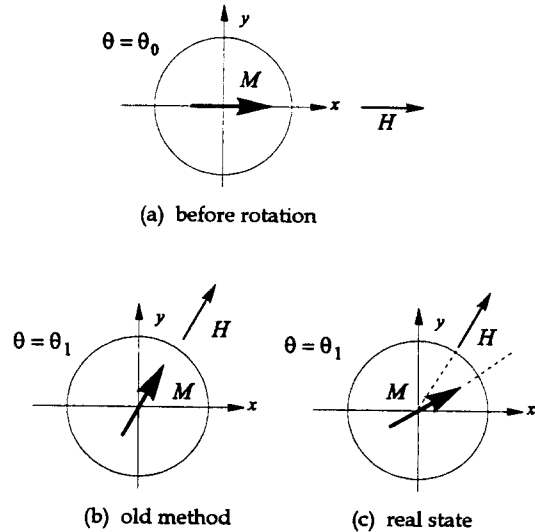


Fig. 3. Magnetization characteristics of rotational hysteresis.

3.2 지연각 Ψ 의 결정

식(2)에서 보듯이 자화는 각 프라이자흐 평면에서 각 영역의 벡터 합으로 계산된다. 계산시 결정하여야 할 파

라미터는 지연각 Ψ 이며, Ψ 는 실험에 의해 구할 수 있다. 인가자계가 주어지고 자화의존 상수 ξ 가 정해지면 영역 I 및 II는 모두 결정된다. 이 때 영역 I의 자화가 영역 II보다 얼마만큼 지연이 생기는가를 나타내는 파라미터 Ψ 는 다음과 같은 방법으로 결정 가능하다.

우선 VSM(vibrating sample magnetometer) 및 토오크 자력계(torquer magnetometer)에서 얻을 수 있는 값은, 인가자계, 인가자계 H_a 방향의 자화 $M_H = |M| \cos \eta$ 및 $\tau = |MH| \sin \eta$ 의 3가지가 된다. Fig. 4는 자계와 자화와의 위상관계를 나타내는 벡터도이다.

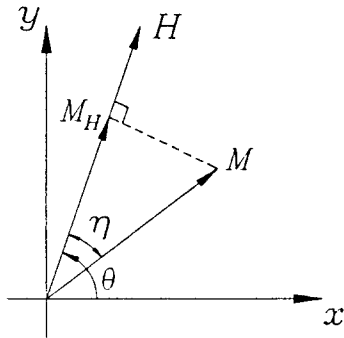


Fig. 4. Vector diagram of the magnetic field and magnetization.

토크와 자계방향의 자화는 다음식으로 나타내어진다.

$$\tau = |MH| \sin \eta \quad (3)$$

$$M_H = |M| \cos \eta \quad (4)$$

여기서 τ , H 및 M_H 는 알고 있는 값이므로, 식 (3), (4)를 연립하여 풀면,

$$M = \sqrt{\left(\frac{\tau}{H}\right)^2 + M_H^2} \quad (5)$$

$$\sin \eta = \frac{\tau}{MH} \text{ , 또는 } \eta = \sin^{-1}\left(\frac{\tau}{MH}\right) \quad (6)$$

이 얻어진다.

영역 I, II의 자화를 각각 M_I , M_{II} 라 하자. 회전 히스테리시스 모델에서는 탈자상태에서 자계를 증가시키려는 자계값에서부터 회전을 시작하므로, 영역 III과 IV의 자화의 벡터 합은 0이므로 이 영역에서의 자화는 고

려하지 않아도 된다. 자계가 θ 만큼 회전하였을 때의 자화 벡터도를 Fig. 5에 나타내었다.

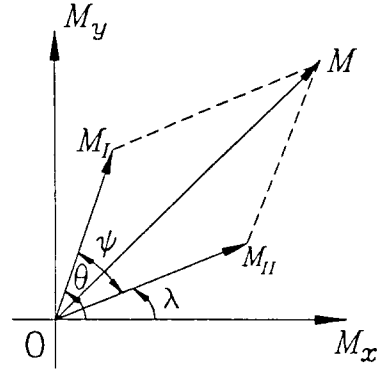


Fig. 5. Vector diagram of magnetizations.

Fig. 5로부터 영역 II에 해당하는 자화는 다음 식으로 계산된다.

$$M_{II} = M - M_I \quad (7)$$

따라서 지연각 Ψ 는

$$\Psi = \theta - \lambda = \theta - \angle M_{II} \quad (8)$$

로 얻어진다.

3.3 유한 요소 해석

유한요소 해석법에서는 자기벡터 포텐셜 A(magnetic vector potential)에 대한 지배 방정식이 세워진다. 그리고 시스템 방정식은 갤러킨법에 의해 수식화 되어진다[7]. 이 방정식의 변수들은 자기 벡터 포텐셜과 자화 M이지만, 자기 벡터 포텐셜은 자화에 대한 종속 변수로 볼 수가 있다. 결과적으로 시스템 방정식은 자화에 대한 비선형 방정식이 된다[9]. 이 비선형 시스템 방정식을 풀기 위해서는 반복 계산법이 사용된다.

Fig. 6은 반복 계산법에 의하여 자화량을 구하기 위한 순서도이며, 자성 재료 내의 한 요소(element)에 대한 계산 과정이다. 순서도에서 입력에 해당하는 것은 인가자계이며, 인가자계는 크기와 방향이 벡터적으로 변하는 양이다. 주어진 인가자계에 대하여 유한요소법에 의해서 자기 벡터포텐셜 A가 구해지며, A로부터 자속밀도 B가 계산된다. 자계와 투자율, 자화량과의 관계 $B = \mu_0 H + M$ 으로

부터 자계가 다시 계산되어진다. 각 요소에 대한 자계가 구해지면 벡터 히스테리시스 모델을 이용하여 벡터 자화가 계산된다. 반복 계산법에서 수렴의 결정은 상대 오차가 수렴 영역에 들어왔는가 아닌가로 정해지게 된다.

출력 값에 해당하는 자화가 수렴하게 되면, 자계의 방향이 변하며, 다음 단계의 계산이 이루어진다. 즉 자계가 다음 단계에서 변하면 변화된 자계에 대한 자화가 계산되어진다.

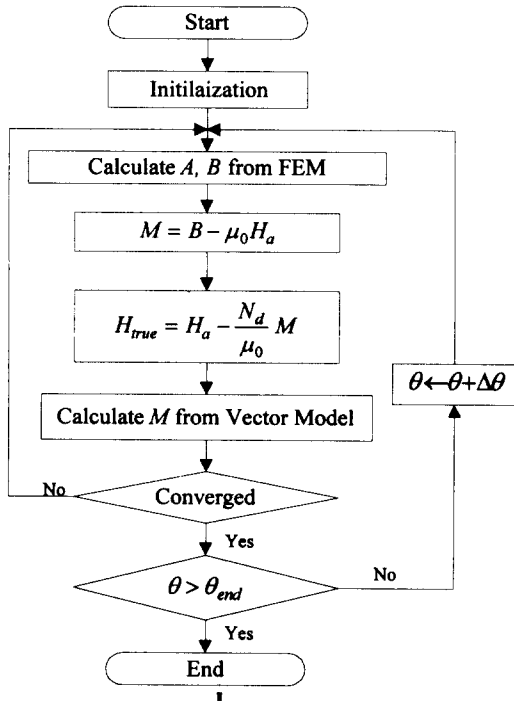


Fig. 6. Flow chart for the direct iterative method.

IV. 실험 및 시뮬레이션 결과

실험에 사용된 시편은 등방성 자성 재료이며, 포화자화 $M_s = 1.27 [T]$, 보자력 $H_c = 9600 [A/m]$ 의 특성을 가진다. 시편은 직경 $5.9 [mm]$, 두께 $0.3 [mm]$ 의 디스크 형태로 가공하였다. 이 시편을 VSM 및 토오크 자력계를 이용하여 실험한 데이터로부터, 앞에서 제시한 방법에 의하여 인가자계에 따른 Ψ 를 구한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서 보듯이 회전 히스테리시스 모델에서 Ψ 는 일정 상수가 아니고 인가자계의 영향을 받으며, 포화자계에 대하여서는 0으로 수렴함을 알 수 있다. 따라서, 포화자계가 가해지면 회전 히스테리시스에 의한 손실은 0

이 된다. Ψ 는 자계가 매우 작은 경우에는 이에 다른 자화 변화가 커져서 결정하기 어려운 점이 있다. 시뮬레이션에 이용하기 위해서는 앞에서 제시한 방법에 의하여 자계의 변화에 따른 몇 점에 대한 값을 구하고, 스플라인 또는 다차함수로 만들어 이용하는 것이 편리하다.

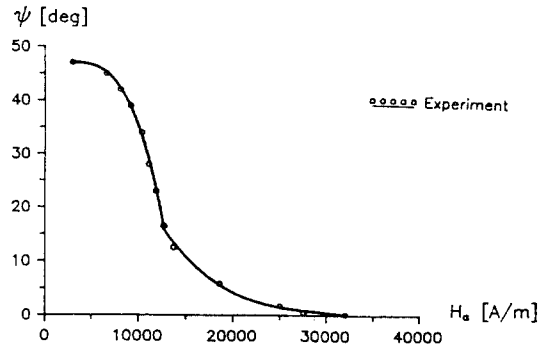


Fig. 7. Delay angle Ψ for the applied field.

자성재료의 초기상태는 초기자화곡선상이 아닌 임의의 상태에 존재할 수 있고, 이런 상태는 자계가 일정한 크기로 회전하여도 초기 상태에 따라 자화 값은 큰 변동을 가질 수 있다. 즉, 같은 크기의 인가자계가 주어지더라도 Fig. 8과 같은 히스테리시스 루프에서 자화상태는 a, b 및 c의 상태를 가질 수 있다. 여기서 알 수 있듯이 같은 인가자계에 대하여도 초기 자화 값은 여러 값을 가질 수 있으며, 이러한 각각의 상태는 프라이자흐 다이어그램에서 볼 때 역시 각각 다른 형태를 가진다. 따라서 자계가 회전할 때의 영역들의 변화도 각각 다르며 과도상태는 동일할 수 없다.

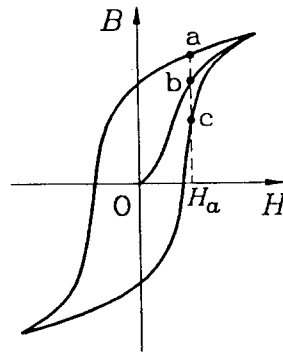


Fig. 8. Magnetization states followed by their hysteresis.

Fig. 9는 유한요소 해석을 위한 해석 영역 및 요소망을 나타낸다. 유한요소 해석 결과와 실험치를 비교하기 위해 VSM 실험 환경을 나타낼 수 있게 Fig. 9와 같은 해석 영역을 취했으며, 이 그림에서 가운데 디스크는 시편이며, 나머지는 자계가 인가되는 공간을 나타낸다.

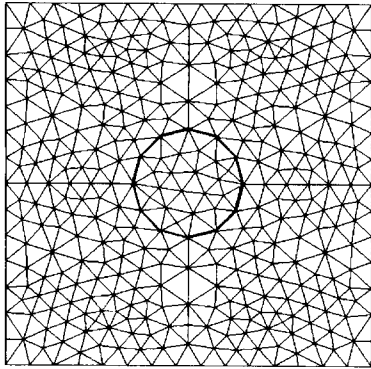
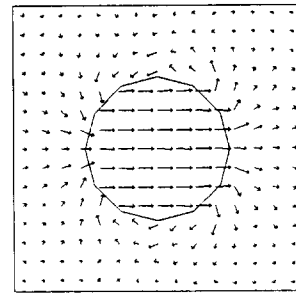


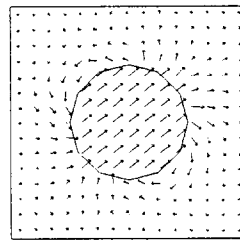
Fig. 9. Analysis region and meshes.

Fig. 10(a)는 포화 자계가 왼쪽에서 오른쪽으로 시편에 인가된 후, 자계의 크기가 23,900 [A/m]로 낮아진 경우의 자속밀도 분포를 나타낸다. 이 경우 자계는 아직 회전을 하지 않았으며, 따라서 자화의 방향은 자계의 방향과 평행이다. Fig. 10(b)에서 10(e)까지는 자계가 회전하는 경우 자속밀도의 분포를 보여준다. 이들 그림에서 10(b), (d)는 제안된 방법에 의한 해석 결과이며, 10(c), (e)는 자계와 자화의 방향이 같다는 가정하의 기존의 해석 방법에 의한 결과이다. 이 그림에서 보듯이 기존의 방법으로는 자계에 대한 자화의 지연각을 계산할 수 없지만, 제안된 방법은 자계가 벡터적으로 변하는 경우에도 자화의 크기와 방향을 계산할 수 있음을 알 수 있다.

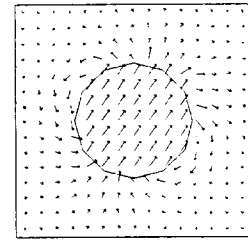
제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 VSM을 이용하여 자계를 Fig. 8의 a 상태에서 회전시켰을 때의 자화값을 측정하였다. 먼저 시편을 포화시킨 다음, 자계를 23,900 [A/m]까지 감소시킨 후 크기를 일정하게 유지하면서 시편을 회전을 시킨다. 시편은 15°씩 회전을 시켰으며, 회전할 때마다 자화가 측정된다. 자화는 자계에 대하여 지연이 생기며, 측정되는 자화값은 자계 방향의 성분이다. 실험에서 측정된 자화값 및 시뮬레이션 결과를 Fig. 11에 비교하였으며, 시뮬레이션 결과는 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.



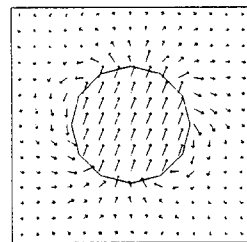
(a) $H_a = 23,900[A/m], \theta = 0^\circ$



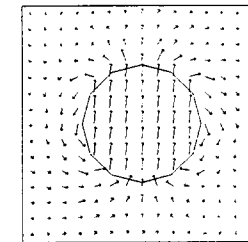
(b) $\theta = 45^\circ$, by proposed method



(c) $\theta = 45^\circ$, conventional method



(d) $\theta = 90^\circ$, by proposed method



(e) $\theta = 90^\circ$, conventional method

Fig. 10. Direction of the flux density ($H_a = 23,900$ [A/m]).

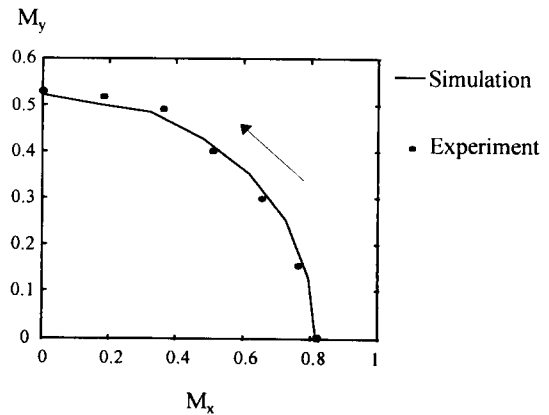


Fig. 11. Variations of the magnetization parallel to the field. ($H_a = 23,900$ [A/m])

Fig. 12는 제안된 방법에 의해 계산된 자화와 인가자계와의 지연각을 보여주며, 정확한 자화 특성 계산을 위해서는 자화와 자계와의 지연각을 고려하여야 함을 알 수 있다.

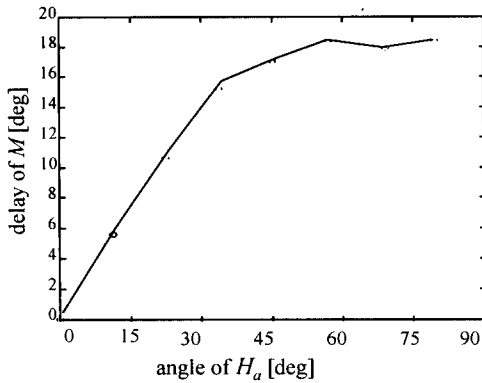


Fig. 12. The lagging angle between the applied field and the magnetization.

V. 결 론

본 논문에서는 벡터 히스테리시스 모델과 유한요소법을 이용하여 회전 히스테리시스 특성을 고려한 전자계 해석 알고리즘을 제안하였으며, 제안된 알고리즘을 이용하여 자계가 회전할 경우 자화의 크기와 방향을 계산하였다. 실험 결과와 제안된 방법에 의한 결과를 비교함으로써, 이 알고리즘이 회전 히스테리시스 특성을 가지는 전자계의 해석에 유용함을 확인하였다. 또한 이 알고리즘은 회전기와 같은 복잡한 형상에도 적용될 수 있을 것으로 생각된다. 앞으로는 등방성 뿐만 아니라 이방성 자성재료에도 적용될 수 있는 벡터 히스테리시스 모델의 확립과, 이를 이용한 전자계 해석 기법이 연구 과제로 남아 있다.

감사의 글

본 연구는 한국 과학 재단의 지원하에 이루어진 연구

임. (과제번호 : 961-0913-067-1)

참 고 문 헌

- [1] S. Hong, Lee and J. Won, "Properties of the Vector hysteresis model for unoriented magnetic materials", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 31, No. 3, pp. 1833-1836, May 1995.
- [2] F. Ossart and G. Meunier, "Comparison between Various Hysteresis Models and Experimental Data", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 26, No. 5, pp 2837-2839, September 1990.
- [3] Goergy Kadar and Edward Della Torre, "Determination of the Bilinear Product Preisach Function", *J. Appl. Phys.*, Vol. 68(3), No. 15, pp3001-3003, April 1988.
- [4] John Oti and Edward Della Torre, "A Vector Moving Model of both Reversible and Irreversible Magnetizing Process", *J. Appl. Phys.*, Vol. 67, No. 1, pp 5364-5366, May 1990.
- [5] 홍선기, 원중수, "히스테리시스 현상의 일반화된 정량적 해석", 대한전기학회 논문지, 제41 권 12 호, pp 1369-1378, 1992.
- [6] Richard M. Bozorth, *Ferromagnetism*, IEEE Press, 1993.
- [7] P. J. Leonard, D. Rodger and P. C. Coles, "Finite Element Modelling of Magnetic Hysteresis", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 31, No. 3, pp 1801-1804, May 1995.
- [8] 정훈, "히스테리시스 특성을 갖는 전자계의 유한요소법", 공학박사학위 논문, 서울대학교, 1990.
- [9] Becker E. B., Carey G. F. and Oden J. T, *Finite elements on introduction*, Prentice-Hall, 1981.

Finite Element Analysis of the Electromagnetic System Considering the Rotational Hysteresis Characteristics

Sun-ki Hong*, Hong-Kyu Kim** and Hyun-Kyo Jung**

* *School of Electrical Engineering, HoSeo University*

** *School of Electrical Engineering, Seoul National University*

(Received 3 March 1997, in final form 20 March 1997)

This paper describes an implementation of the rotational hysteresis analysis using the finite element method and a vector hysteresis model. The vector hysteresis model is extended from the magnetization-dependent Preisach model. The magnetization of each element is calculated for a given history of the rotating field. The lagging angle and the magnitude of the magnetization for an applied field are evaluated. The experimental results show that the magnetization characteristics of the magnetic materials under the rotating field can be analyzed accurately by the proposed method.