

Roll타입 코어를 갖는 전류센서의 전자계 유한요소해석

이동희, 김정수, 정진찬, 김병택
군산대학교

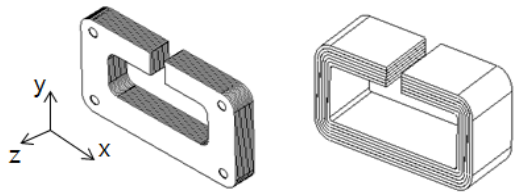
Electromagnetic Finite Element Method of Current Sensor with Roll-Type Core

Dong-Hee Lee, Jung-Su Kim, Jin-Chan Jeong, Byung-Teak Kim
Kunsan National University

Abstract - 본 논문은 이방성 등가 재질정수를 도입하여 roll타입 코어로 적층되어진 전류센서의 전자계 유한요소해석(FEM)을 이용하여 해석하였다. 철심의 roll 구조에 따른 전자계 현상을 고려하기 위해 등가 이방성 투자율모델을 유도하였으며, 유도된 모델에 대해 유한요소해석(FEM)을 수행하였고, 공극에서의 자속밀도 등의 특성을 분석하였다.

1. 서 론

기존의 전기자동차 충전시스템의 경우 특정용량의 전기자동차만 충전이 가능하였다. 새로운 충전기법(Dynamic parallel)을 개발함으로써 승용에서 대용량 상용 전기자동차까지 충전 할 수 있는 유연성 있는 시스템을 개발이 진행 중이다. 이에 따라 충전기 내부에 들어가는 비접촉 대 전류센서가 필요하다. 전류센서는 전류주변에 발생하는 자속의 경로를 결정하는 코어부와 자속밀도 검출과 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 장치인 Hall IC로 구성된다. 정확한 전류량을 측정하기 위해서는 Hall IC가 위치한 장소에서의 자속밀도량이 Hall소자 특성과 부합되어야 하며 또한 전류량과 정확히 비례하는 특성이 필요하므로, 코어의 형상과 재질 및 적층방식의 결정이 매우중요하다[1].



(a) 일반 적층구조 (b) Roll타입 적층구조
〈그림 1〉 센서코어의 종류

그림 1(a)의 적층방식 코어 해석은 자성체의 투자율을 등방성으로 하여 기존 2차원 유한요소해석을 적용할 수 있다. 그러나 그림 1(b)의 roll 타입 모델은 철심간 작은 절연층이 존재하며 이를 고려해야한다. 따라서 매우 작은 공극을 두는 해석을 적용하는 경우, 요소의 개수가 극단적으로 증가하는 문제가 발생하게 된다. 이 같은 구조의 모델을 효율적으로 해석하기 위하여 본 연구에서는 절연층의 간격의 역할을 분가적으로 고려하는 등가 이방성 투자율을 유도하였다. 그리고 해석모델의 형상을 고려하여 유도된 이방성 투자율을 적절히 적용함으로써 전자계 유한요소 해석을 수행하였고 각 영역의 자속을 비교하였다[2].

2. 본 론

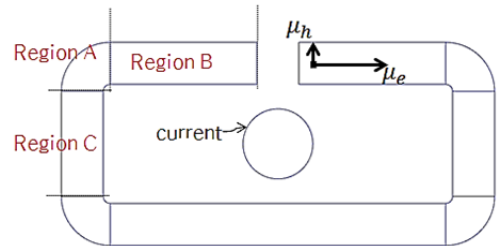
2.1 해석모델

전류센서 코어의 유한요소해석에 있어서 코어재질 비투자율의 비선형과 이방성을 고려하는 것은 복잡한 문제이다. 이는 기존의 해석에 있어서 코어재질 비투자율의 비선형성만 주로 고려되었기 때문이다. 그러나 roll 타입으로 적층되어진 코어의 해석은 비투자율을 이방성 재질처럼 해석하는 것이 매우 효율적이다.

기존의 적층방식 그림 1은 자속이 공극 중심에 집중되기 때문에 공극의 위치에 따라 자속밀도의 편차가 클 가능성이 있다. 그러나 그림 1(b)의 모델과 같이 적층하게 되면 공극y축 방향의 자속밀도가 비교적 균일하게 되는 이점이 있다.

roll타입 모델을 전자계 유한요소해석을 하기위해 그림 2와 같이 모델링 하였다. roll타입 형식의 모델은 철심의 적층 사이에 공극이 존재하기 때문에 이외의 경로에는 자속이 흐르기 어려우므로 비투자율을 이방성 재질처럼 고려해야 된다. 자속이 잘 흐르는 방향의 비투자율을 μ_e , 자속

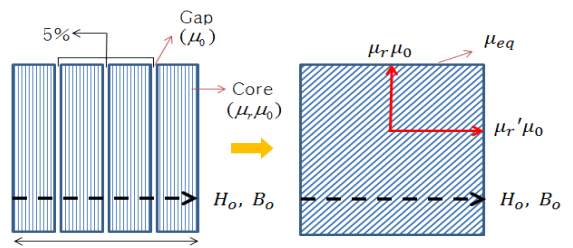
이 흐르기 힘든 방향의 비투자율을 μ_h 고 할 때, 각각의 값을 유도해야한다.



〈그림 2〉 등가 이방성 투자율을 갖는 전류센서 해석모델

2.2. 등가 이방성 재질정수(μ_h)의 결정

전술한 바와 같이 roll타입을 코어를 갖는 전류센서의 투자율을 방향에 따라 달리 산정할 필요가 있다. 철심경로의 비투자율 μ_e 은 자성재료 본래의 값과 동일하다. 반면 μ_h 는 공극을 포함하고 있으므로 이를 산정하기 위하여 실제모델인 그림 3(a)의 모델과 그림 3(b)의 등가모델을 가정한다. roll형식으로 적층되어진 모델이 실제 적층길이의 95%를 코어가 점유하며, 절연층 즉 공극이 5%를 점유한다고 가정할 때, 코어의 이방성 등가재질정수 μ_h 를 다음과 같이 계산 할 수 있다.



(a) 실제 해석모델 (b) 등가 해석모델
〈그림 3〉 등가 이방성 재질 정수를 얻기위한 모델

그림 3의 두 모델의 기자력이 동일해야하므로 암페어 주회법칙을 이용하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$H_g l_g + H_c l_c = (l_g + l_c) H_{eq} \quad (1)$$

여기에서 H_g , H_c , H_{eq} 는 각각 공극에서 자계의 세기, 코어에서 자계의 세기, 등가 자계의 세기이고, l_g , l_c , l_{eq} 는 공극의 길이, 코어의 길이, 등가 길이이다.

두 모델의 코어를 통과하는 자속의 양이 같아야하므로 식(2)가 성립한다.

$$B_g = B_c \quad (2)$$

$$\mu_0 H_g = \mu_0 \mu_r H_c = \mu_{eq} H_{eq}$$

식 (2)로부터 H_c 는 다음과 같이 유도된다.

$$H_c = \frac{\mu_0 H_g}{\mu_0 \mu_r} = \frac{H_g}{\mu_r} \quad (3)$$

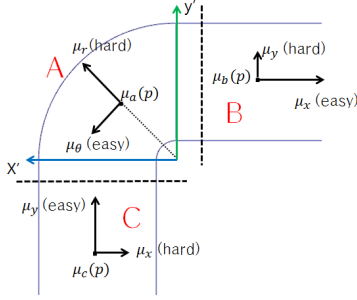
식 (2)에 식 (3)을 대입하여 μ_{eq} 를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\mu_{eq} = \frac{\mu_0(\ell_g + \ell_c)H_g}{\left(\ell_g + \frac{\ell_c}{\mu_r}\right)H_g} = \frac{\mu_r\mu_0(\ell_g + \ell_c)}{(\mu_r\ell_g + \ell_c)} = \frac{\mu_r\mu_0\ell_t}{(0.05\mu_r\ell_t + \ell_c)} \quad (4)$$

따라서, 자속이 흐르기 어려운 방향의 비투자율 μ_h 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\mu_h = \frac{\mu_r}{(0.05\mu_r + 0.95)} \quad (5)$$

2.3 등가이방성 비투자율을 갖는 철심의 모델링



<그림 4> 각 영역에서의 비투자율

그림 4는 각 영역에서의 비투자율을 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 철심의 투자율은 코어의 형상에 따라 달리 적용되어야 하며 A영역의 비투자율은 비투자율 μ_r , μ_θ 로, B, C영역의 비투자율은 μ_x , μ_y 로 구분하였다. 투자율이 이방성을 가지므로 각각의 영역에 대한 자속밀도와 자계의 세기 사이의 관계는 텐서형태의 투자율을 가지며 다음과 같다. A영역의 자속밀도는 철심의 방향이 θ 방향이므로 다음과 같이 표현된다 [3].

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_\theta \end{bmatrix} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_h & 0 \\ 0 & \mu_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_r \\ H_\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

B영역과 C영역도 철심의 방향을 고려하여 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_b = \begin{bmatrix} \mu_e & 0 \\ 0 & \mu_h \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mu_c = \begin{bmatrix} \mu_h & 0 \\ 0 & \mu_e \end{bmatrix} \quad (8)$$

특히, A영역에서의 식(6)은 원통좌표계를 기준으로 표현되었으므로 이를 글로벌 좌표계(직각좌표계)로 변환이 요구된다. 즉, 식 (6)로부터 위치에 대한 변환행렬 [T]을 곱함으로써 직교좌표계로 변환할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} = [T(x', y')] \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_h & 0 \\ 0 & \mu_e \end{bmatrix} [T(x', y')]^{-1} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 변환행렬 [T]는 μ_r , μ_θ 각 각의 x, y축의 성분이다.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (9)로부터 A영역의 비투자율은 다음과 같이 나타내었다.

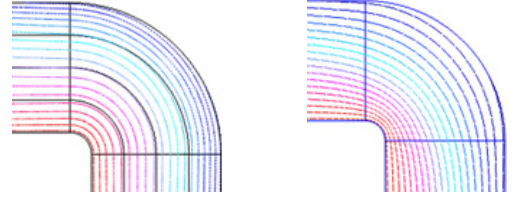
$$\mu_a = \begin{bmatrix} \mu_h \cos^2\theta + \mu_e \sin^2\theta & -\mu_h \cos\theta \sin\theta + \mu_e \cos\theta \sin\theta \\ -\mu_h \cos\theta \sin\theta + \mu_e \cos\theta \sin\theta & \mu_e \cos^2\theta + \mu_h \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

위의 식으로부터 주어진 비투자율 μ_a , μ_b , μ_c 를 roll타입 코어의 유한요소해석에 적용하였다.

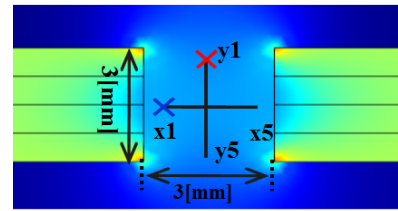
3. 해석 결과

정의되어진 이방성 등가 재질정수와 2.3절의 식으로부터 얻은 비투자율을 적용하였다. 등가 이방성 투자율을 적용한 모델과 등방성 투자율을 적용한 모델을 A영역과 같은 철심의 곡선부에 대하여 자속을 비교하였다.

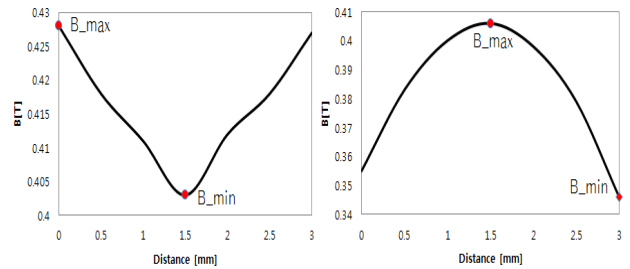
그림 5의 등가 이방성 투자율을 적용한 경우 자속선이 철심의 구부러진 영역에서 균일하게 분포되어지는 것을 확인 하였으며 이방성이 적절히 고려되었음을 알 수 있다. 그림 6은 전류센서에 1000A의 전류를 흘려 코어공극의 x축방향의 자속밀도와 y축 방향의 자속밀도를 해석하였다.



(a) 등가이방성투자율 적용모델 (b) 등방성투자율 적용모델
<그림 5> 등포텐셜도



(a) 공극의형상



(b) X축 방향의 자속밀도 (c) y축 방향의 자속밀도
<그림 6> 공극에서의 자속밀도

4. 결 론

본 논문은 roll타입 코어를 갖는 전류센서의 전자계 유한요소해석을 제시하였다. 먼저 이방성 등가 재질정수를 산정하였고 등가이방성 모델링을 통하여 등방성 투자율을 적용한 모델과 비교하였다. 차후 이방성 등가 재질정수를 고려한 3D해석을 통하여 전류센서의 특성을 분석할 것이다. 제시한 방법을 이용하여 roll타입 코어를 갖는 전류센서 특성해석과 전류센서뿐만 아니라 roll타입 적층을 갖는 변압기의 코어해석에도 응용될 수 있을 것이다.

[감사의 글]

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 광역경제권 연계협력사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. Sonoda, R. Ueda, K. Koga, "An ac and dc Current Sensor of High Accuracy", IEEE Transactions. on Industry Applications, Vol. 28, No. 5, pp.1087 - 1094. Sep/Oct. 1992
- [2] J. R. Brauer, H. Franz, "Anisotropic Materials in Electromagnetic Finite Element Analysis", International Conference. on Computation in Electromagnetics, pp.144, Nov. 1991
- [3] 임태호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1987