

와전류탐상의 3차원 유한요소 정식화에 따른 특성 분석

Characteristic Analysis of Eddy Current Testing According to the Finite Element Formulations

이향범

Hyang-beom Lee

초 록 3차원 유한요소법을 이용하여 와전류탐상의 수치해석을 수행하기 위하여 도체영역에서 자기벡터포텐셜과 전기스칼라포텐셜을 변수로 사용한다. 3차원 모델링을 하기 때문에 미지수가 많이 늘어나기도 하지만, 사용되는 변수 때문에 미지수가 급속히 증가한다. 이 때문에 전기스칼라포텐셜을 제거한 변형자기벡터포텐셜을 사용하여 미지수를 줄이기도 한다. 또한 자기벡터포텐셜의 유일성을 보장하기 위하여 정식화 과정에 인위적으로 게이지조건을 집어넣기도 한다. 본 논문에서는 이러한 정식화 과정들이 와전류탐상에 미치는 영향을 검토하고, 와전류탐상에 적절한 정식화방법을 제시하였다.

주요용어: 게이지조건, 변형자기벡터포텐셜, 와전류탐상, 유한요소법, 유한요소정식화

Abstract In the numerical analysis of ECT (eddy current testing) using 3-dimensional FEM (finite element method), MVP (magnetic vector potential) and electric scalar potential are used as variables in conductor region. Three dimensional modeling makes number of unknowns increase, and the degree of freedom of variables also makes number of unknowns increase. Because of this reason, modified MVP is used to reduce the number of unknowns. Gauge condition is enforced artificially on existing FEM formulations to insure the uniqueness of MVP. So in this paper the effects of these FEM formulation procedures on ECT are investigated and the appropriate FEM formulation is suggested for accurate ECT simulation.

Keywords: ECT, FEM, FE formulation, gauge condition, modified magnetic vector potential

1. 서 론

원전 증기발생기관과 같은 관에서의 결함 검출을 위한 와전류탐상 수치해석을 위하여 2차원 또는 3차원 축대칭 유한요소법이 많이 사용되고 있다. 각종 단순화된 결함에 대한 와전류탐상 신호의 변화를 정성적으로 살펴보기에는 2차원 또는 3차원 축대칭 유한요소법으로도 가능하지만, 실제 결함을 모델링하고 해석하기 위해서는 3차원 해석을 수행

하여야 한다. 하지만, 2차원에서 3차원으로 넘어가는 과정에는 계산량의 증가라는 무시할 수 없을 정도의 장벽이 존재한다.

먼저 2차원에서 3차원이라는 차원의 증가에 따라 공간상의 미지 절점수가 증가하게 된다. 또한 2차원에서는 일반적으로 절점 당 1개의 미지수를 사용하는 즉, 자유도(DOF, Degree of Freedom)가 1이지만, 3차원에서는 도체내의 절점에서 3개 또는 4개의 미지수가 사용되는 즉, 자유도가 3또는 4가

된다. 이러한 상황 때문에 최근 컴퓨터의 성능이 많이 향상되긴 했지만, 3차원 해석은 여전히 쉽지 않은 상태이다. 3차원 해석시 이러한 자유도에 대한 문제를 극복하기 위하여 공기 중에서는 자유도가 1인 스칼라포텐셜을 변수로 사용하기도 한다. 하지만, 여전히 도체 내에서는 자기벡터포텐셜 및 전기스칼라포텐셜을 사용하여야 하기 때문에 자유도를 공기에서와 같이 줄이기는 힘들다[1]. 하지만 몇몇 논문에서는 전기스칼라포텐셜을 제거하여 자유도를 4에서 3으로 줄이기도 하였다. 이러한 형태의 자기벡터포텐셜을 변형자기벡터포텐셜이라 한다[2]. 하지만 뭔가를 줄이는 이점이 있다면 다른 단점도 존재하게 된다.

임의의 벡터의 유일성을 보장하기 위해서는 헬름홀츠정리(Helmholtz theorem)에 따라 그 벡터의 발산(divergence) 및 회전(curl)을 정의하여야 한다[3]. 본 논문의 정식화 과정에서 변수로 사용하는 자기벡터포텐셜의 경우 자속밀도를 정의하는 수식에서 회전이 정의된다. 하지만 발산은 수식 상에서 정의되지 않기 때문에 주로 게이지조건을 사용하여 발산을 정의한다. 와전류 문제의 경우 주로 쿨롱게이지조건(Coulomb gauge condition)을 사용한다. 2차원 또는 3차원 축대칭으로 문제를 푸는 경우 정식화 과정에서 스칼라 포아송방정식(scalar Poisson equation)을 얻기 위하여 쿨롱게이지조건을 사용한다. 하지만, 3차원 정식화 과정에서는 쿨롱게이지조건을 사용하는 곳이 없기 때문에, 해의 유일성을 보장하기 위하여 인위적으로 수식을 정리하는 중간과정에 쿨롱게이지조건과 관련된 항을 집어넣게 된다.

본 논문에서는 위에서 언급한 변형자기벡터포텐셜과 게이지조건의 적용여부에 따른 네 가지 지배방정식을 구성하였다. 이 네 가지 지배방정식을 이용하여 와전류탐상문제를 해석하였으며, 그 해석결과를 비교 검토하여, 각 방법의 타당성에 대하여 연구하였다.

2. 와전류탐상문제를 위한 전자기이론

2.1. 지배방정식

와전류탐상은 전자기적으로 와전류문제이다. 유한요소법을 이용하여 와전류문제를 계산하기 위하여, 맥스웰방정식에서 변위전류를 무시한 수식과 관계식(constitutive relations)들을 정리하면 다음과

같다[4,5].

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{3}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{4}$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \tag{5}$$

여기서, \vec{B} , \vec{H} , \vec{E} 는 각각 자속밀도, 자계의 세기, 전계의 세기이며 \vec{J} , \vec{J}_s , \vec{J}_e 는 각각 총 전류밀도, 전원전류밀도, 와전류밀도이다. 또한 μ , σ 는 각각 자기투자율, 전기도전율이다.

식 (2), 식 (3)으로부터 자기벡터포텐셜 \vec{A} 와 전기스칼라포텐셜 V 를 다음 식과 같이 유도하여 정의할 수 있다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{6}$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V \tag{7}$$

위 수식으로부터 와전류문제 해석을 위한 다음의 두 수식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right) = \vec{J}_s \tag{8}$$

$$-\nabla \cdot \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right) = 0 \tag{9}$$

식 (9)는 식 (1)에 발산을 취하고, 전원전류는 전류연속조건에 의하여 발산이 영이라는 조건으로부터 유도되었다.

2.2. 쿨롱게이지조건

임의의 벡터장(vector field)이 유일하게 정의되기 위해서는 벡터의 발산과 회전이 정의되어야 한다. 식 (6)에 의하여 자기벡터포텐셜의 회전이 정의되었으며, 발산을 정의하기 위하여 와전류 문제에서는 일반적으로 식 (10)의 쿨롱게이지조건(Coulomb gauge condition)을 사용한다.

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \tag{10}$$

2차원 또는 3차원 축대칭으로 문제를 푸는 경우 정식화 과정에서 스칼라 포아슨방정식(scalar Poisson equation)을 얻기 위하여 쿨롱게이지조건을 사용한다. 식 (11)의 벡터항등식을 식 (8)에 대입하고, 식 (10)의 쿨롱게이지조건을 적용하여 정리하면, 식 (12)와 같은 포아슨방정식이 얻어진다. 2차원 또는 3차원 축대칭으로 문제를 푸는 경우 단면에 직각인 성분만 남고, 나머지 두 성분은 영이 되므로 식 (12)로부터 스칼라 포아슨방정식 형태의 지배방정식을 얻게 된다. 이 식에 유한요소 정식화 과정을 거쳐서 수식을 정리하면 된다.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla \nabla \cdot \vec{A} - \nabla^2 \vec{A} \quad (11)$$

$$-\nabla^2 \vec{A} + \alpha \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right) = \vec{J}_s \quad (12)$$

3차원문제의 경우 식 (8)을 이용하여 유한요소 정식화 과정을 수행하는데, 이 과정에서는 쿨롱게이지조건을 적용하지 않는다. 즉, 식 (10)이 사용되지 않았기 때문에 해의 유일성이 보장되지 않는 것이다. 따라서 식 (8)에 식 (10)의 조건을 인위적으로 넣어서, 식 (13)과 같이 만들어서 해의 유일성을 보장하게 된다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - \nabla \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \vec{A} + \alpha \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right) = \vec{J}_s \quad (13)$$

2.3. 변형자기벡터포텐셜

와전류가 흐르는 도체 영역에서 전기도전을 σ 가 일정하다면, 식 (14)와 같이 변형자기벡터포텐셜(MMVP, modified magnetic vector potential)을 정의하여 전기스칼라포텐셜을 제거할 수 있다.

$$\vec{A}^* = \vec{A} + \int \nabla V dt \quad (14)$$

∇V 의 회전은 영이므로, 식 (14)를 식 (6)에 대입하여 자속밀도를 구하더라도 동일한 결과를 얻을 수 있다. 또한, 식 (14)를 식 (8)에 대입하고, 그 수식에 발산을 취하면, 전원전류의 발산이 영이므로 변형자기벡터포텐셜의 발산이 영인 수식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{A}^* = 0 \quad (15)$$

변형자기벡터포텐셜을 사용하게 되면, 식 (9)가 자연스럽게 만족되므로 다음 수식만 사용하면 된다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}^* + \sigma \frac{\partial \vec{A}^*}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (16)$$

2.4. 와전류문제 해석을 위한 4가지 지배방정식

자기벡터포텐셜을 사용하는 3차원 와전류문제 정식화과정에서 해의 유일성을 보장하기 위하여 쿨롱게이지조건을 강제로 지배방정식에 집어넣었다. 또한, 계산용량을 줄이기 위해 전기스칼라포텐셜을 무시하고 변형자기벡터포텐셜을 사용하여 자유도를 4에서 3으로 감소시켰다. 이러한 과정들은 다소 인위적인 수식변경으로 보이며, 이러한 변경들이 실제 문제에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 각각의 영향을 고려한 수식들을 이용하여 문제를 해석하였다.

쿨롱게이지조건 부여 및 변형자기벡터포텐셜의 사용 여부에 따라 다음과 같이 네 가지 수식으로 분류하였다. 수식을 분류하기 위하여 MEC, MEO, MMC, MM0의 기호를 사용하였다. 'ME'는 자기벡터포텐셜과 전기스칼라포텐셜을 변수로 사용한 경우를 의미하며, 'MM'은 변형자기벡터포텐셜을 변수로 사용한 경우이다. 세 번째 알파벳인 'C'는 쿨롱게이지조건을 강제로 부여한 경우이며, '0'은 쿨롱게이지조건을 부여하지 않은 경우이다.

정리된 수식들은 정상상태해석을 하기 위하여 $\partial / \partial t$ 가 $j\omega$ 로 변환되었다.

2.4.1. MEC

변수로 자기벡터포텐셜 및 전기스칼라포텐셜을 사용하고, 쿨롱게이지조건을 적용한 경우이다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - \nabla \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \vec{A} + \alpha(j\omega \vec{A} + \nabla V) = \vec{J}_s \quad (17)$$

$$-\nabla \cdot \alpha(j\omega \vec{A} + \nabla V) = 0 \quad (18)$$

2.4.2. MEO

변수로 자기벡터포텐셜 및 전기스칼라포텐셜을 사용하고, 쿨롱게이지조건을 적용하지 않은 경우이다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} + \sigma(j\omega \vec{A} + \nabla V) = \vec{J}_s \quad (19)$$

$$-\nabla \cdot \sigma(j\omega \vec{A} + \nabla V) = 0 \quad (20)$$

2.4.3. MMC

변형자기벡터포텐셜을 변수로 사용하였으며, 쿨롱계이지조건을 적용한 경우이다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}^* - \nabla \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \vec{A}^* + j\omega \sigma \vec{A}^* = \vec{J}_s \quad (21)$$

2.4.4. MM0

변형자기벡터포텐셜을 변수로 사용하였으며, 쿨롱계이지조건을 적용하지 않은 경우이다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}^* + j\omega \sigma \vec{A}^* = \vec{J}_s \quad (22)$$

3. 사례연구

쿨롱계이지조건 추가 및 변형자기벡터포텐셜의 사용에 따른 네 가지 지배방정식에 대한 해석 결과를 비교, 검토하기 위하여 PC환경에서 직접 프로그램을 작성하여 사례연구를 수행하였다. 모델은 Fig. 1에 나타내었다. X-방향으로 15 mm, Y-방향으로 15 mm, Z-방향으로 5 mm인 Inconel600 도체에 X-방향으로 1.5 mm, Y-방향으로 0.5 mm, Z-방향으로 1 mm의 크기를 가지는 결합을 가정하였다. 결합은 도체의 표면에 있는 것으로 가정하였으며, 결합위로 사각형 코일이 있는 것으로 가정하였다. 코일은 결합위로 0.5 mm 떨어져 있으며, 코일의 단면적은 0.5 mm x 0.5 mm로 하였다. 코일의 X-방향 길이는 3 mm, Y-방향 길이도 3 mm, Z-방향 높이는 0.5 mm이며, 코일 내부의 X- 및 Y-방향 길이는 2.0 mm로 동일하다. 전류밀도의 최대치는 1e6 A/m²로 가정하였으며, 주파수는 100 kHz를 사용하였다. Inconel600의 비투자율(relative permeability)로 1을, 도전율로 9.860e5 S/m를 사용하였으며, 주어진 주파수에서 침투깊이(skin depth)는 1.6 mm이다.

유한요소해석을 위하여 정육면체 요소를 이용하여 요소망을 구성하였으며, 각 요소의 한 변의 길이는 모두 0.25 mm로 동일하게 구성하였다. 침투

깊이가 1.6 mm이므로 침투깊이에 6개 이상의 요소가 사용되었다. 경계조건으로 경계에서 자기벡터포텐셜의 모든 성분 및 전기스칼라포텐셜의 값이 0인 조건을 사용하였다.

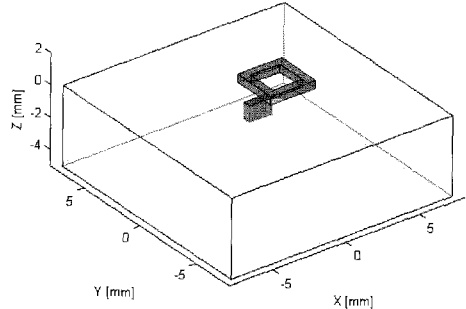


Fig. 1 Analysis model

코일의 Y-축방향은 결합의 중심으로 대칭을 유지하면서 X-방향으로 코일을 움직이면서 임피던스를 계산하였다. 임피던스는 다음 식의 에너지 방법을 사용하였다.

$$R = \frac{P_d}{I^2} = \frac{1}{I^2} \int_V \frac{J_e^2}{\sigma} dV \quad (23)$$

$$X = 2\pi f \times \frac{2W_m}{I^2} = \frac{4\pi f}{I^2} \times \int_V \frac{B^2}{2\mu} dV \quad (24)$$

여기서, P_d는 발생하는 열(dissipated power)이며, W_m은 저장된 에너지(stored energy)이다. R 및 X는 각각 저항 및 리액턴스이고, f는 주파수이다.

Fig. 2부터 Fig. 4에 저항 및 리액턴스를 나타내었다. 본 연구를 위해 예제로 사용된 모델에서 코일이 중심에서 바깥으로 갈수록 모델링에 의한 오차가 발생하게 된다. 이러한 오차를 감소시키기 위하여 본 예제에서는 같은 요소망에 대하여 결합이 존재하는 경우의 임피던스와 결합이 존재하지 않는 경우의 임피던스를 계산하고, 그 차를 임피던스 계산에 사용함으로써 모델링 및 요소망에 의한 오차를 최소화 하였다. 그림에서 'MEC'는 자기벡터포텐셜 및 전기스칼라포텐셜을 변수로 사용하고, 쿨롱계이지조건을 사용한 경우이며, 'ME0'는 변수는 'MEC'와 같으며 단지 쿨롱계이지조건만을 사용하지 않은 경우이다. 'MMC'는 변형자기벡터포텐셜을 변수로 사용하고 쿨롱계이지조건을 적용한 경우이

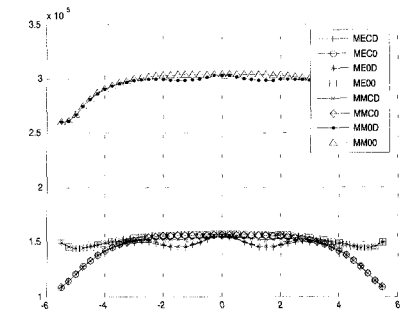
며, 'MM0'는 변형자기벡터포텐셜을 변수로 사용하고 쿨롱게이지조건을 적용하지 않은 경우이다. 이들 문자 뒤에 'D'가 붙은 경우는 결합이 존재하는 경우의 저항 및 리액턴스이며, '0'이 붙은 경우는 결합이 존재하지 않는 경우의 값이다. Fig. 2에서 살펴보면 중심에서 멀어질수록 값이 많이 변하는 것을 알 수 있다. 이 부분은 모델링에 의한 오차이다.

Fig. 2(a) 'MM0'의 경우, 값이 다른 경우들의 값들에 비하여 상당히 크음을 볼 수 있다. 'ME0'의 경우, 중심에서 멀어지는 부분의 경향이 다른 것들과 다름을 볼 수 있다. 'MM0'와 'ME0'는 쿨롱게이지조건을 적용하지 않은 경우로, 와전류분포가 틀리기 때문에 오차가 많이 포함된 경우이다. 와전류분포는 뒤에 나타내었다. Fig. 2(b)에서 위쪽 곡선은 'ME0' 및 'MM0'의 경우이며, 아래쪽 곡선은 'MEC' 및 'MMC'의 경우이다. 곡선의 경향은 비슷하나 쿨롱게이지조건의 적용에 따라 값의 차이가 나타남을 볼 수 있다.

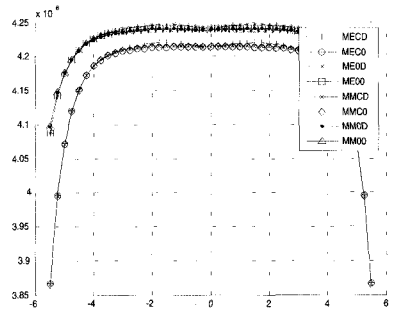
Fig. 3에서는 모델링 및 요소망의 오차를 없애기 위하여 결합이 있는 경우의 임피던스에서 결합이 존재하지 않는 경우의 임피던스 값의 차를 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)의 저항성분 그림에서 보면 MEC와 ME0의 값의 변화가 거의 동일하면서 변화가 가장 크고, 다음으로 MM0의 변화가 크고, MMC의 경우 변화가 가장 작음을 볼 수 있다. ME0의 경우 Fig. 2(a)의 저항곡선에서 중심에서 멀어질수록 변화가 다른 곡선들과 달랐지만, Fig. 3에서는 MEC와 아주 유사한 특성을 나타내는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3(b)의 리액턴스곡선에서도 저항에서와 비슷한 경향을 보이고 있다. MEC 및 ME0가 값의 변화도 크고, 크기도 일치하는 반면, MM0의 경우 값의 변화가 가장 작으면서 곡선의 형태가 다른 것과 많이 다른 것을 볼 수 있다.

Fig. 4에서는 Fig. 3의 곡선에서 각각의 곡선의 최대치를 기준으로 정규화 하여 나타내었다. 곡선들이 거의 일치함을 볼 수 있으며, 단지 MM0의 곡선이 다른 곡선에 비하여 일치하는 정도가 떨어짐을 볼 수 있다. 특히 리액턴스 곡선의 경우 그 차이가 뚜렷함을 볼 수 있다. MMC의 경우 결합의 중심에서의 값의 차이가 약간 있는 것을 제외한다면 곡선이 거의 일치한다고 할 수 있다. 이들 곡선으로 살펴볼 때 MM0만을 제외하면 정규화 하였을 때의 곡선은 거의 동일하다고 할 수 있다.

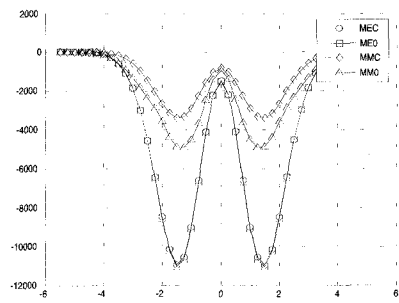


(a) Resistance component

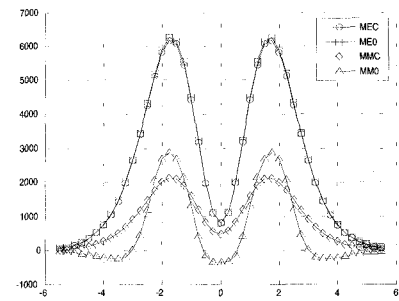


(b) Reactance component

Fig. 2 Absolute impedance

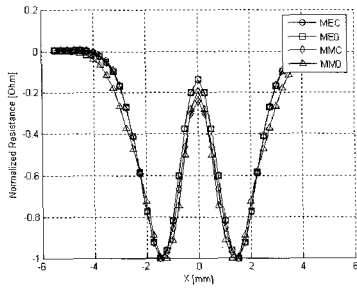


(a) Resistance component

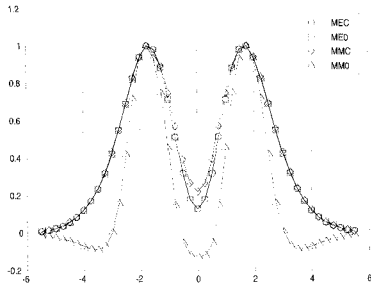


(b) Reactance component

Fig. 3 Difference impedance



(a) Resistance component



(b) Reactance component

Fig. 4 Normalized difference impedance

그렇다면 이러한 차이는 어디에서 발생하게 되는지 각 정식화에 대하여 와전류분포 및 자장분포를 살펴보았다. Fig. 5부터 Fig. 8에 MEC, ME0, MMC, MM0의 경우에 대하여 와전류분포를 나타내었다. 모든 경우는 결함의 중심에서 코일의 중심이 X-방향으로 1.25 mm 움직였을 때의 결과이다. 좌측의 그림은 Z=0인 X-Y 평면에서의 와전류분포이며, 우측의 그림은 X=0인 Y-Z 평면에서의 와전류분포를 나타내었다.

Fig. 5의 좌측그림에서 보면 코일의 한쪽이 결함의 중심을 지나가고 있다. 코일에 의한 자장의 변화를 막기 위하여 도체에 와전류가 유기되는데, 코일 바로 밑에 결함이 존재하므로 와전류분포가 다른 부분과 다르게 결함을 피하여 흐르는 것을 볼 수 있다. Fig. 5의 우측그림에서도 결함 때문에 와전류가 아래로 갔다가 다시 위로 올라가는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5의 결과는 지배방정식의 도출과정에서 발생하는 모든 변수를 가정 없이 사용하였고 쿨롱계이지조건을 적용한 경우로, 해석결과를 검토하면 가장 정확한 결과를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 6은 ME0의 경우로 Fig. 5에 비하여 쿨롱계이지조건을 적용하지 않은 경우이다. 하지만 전류연속 조건식이 부가적으로 사용되었기 때문에, 와전류 및 자장결과는 Fig. 5의 MEC 경우와 동일하게 나타났다.

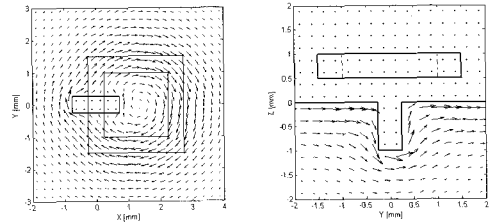


Fig. 5 Eddy current distribution in case of MEC

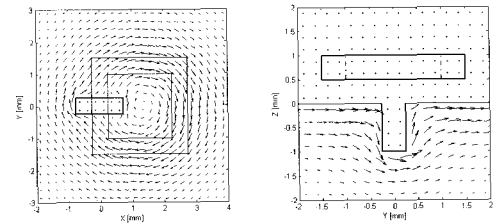


Fig. 6 Eddy current distribution in case of ME0

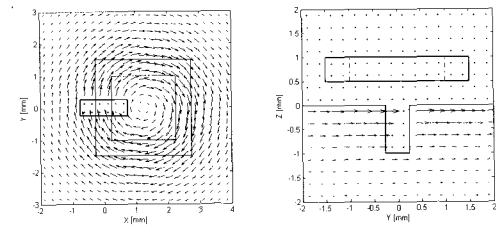


Fig. 7 Eddy current distribution in case of MMC

Fig. 7은 MMC의 경우로 와전류가 공기와 도체 경계면에서 공기부분으로 흐를려고 하는 것을 볼 수 있다. 공기 중에서는 전류가 흐르지 않기 때문에 전류의 연속이라는 측면에서 물리적으로 틀린 결과이다. 하지만 수식을 살펴보면 이러한 결과가 나올 수 있다. 식 (21)은 MMC 경우의 지배방정식으로 식 (11) 및 식 (12)에서의 경우를 식 (21)에 적용하면, 식 (21)은 A^*_x , A^*_y , A^*_z 가 성분별로 수식이 분리될 수 있는 스칼라포아손방정식이 된다. 주어진 전위 전류가 X, Y방향성분만 존재하므로 A^*_z 에 관련된 수식은 식 (25)로 표현될 수 있다.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A^*_z + j\omega\sigma A^*_z = 0 \quad (25)$$

경계에서 A^*_z 값이 모두 영이므로, 모든 영역에서 A^*_z 는 영이 된다. 따라서 A^*_z 만으로 표현되는 와전류는 Z방향 성분이 존재할 수 없게 되며, Fig. 7과 같은 결과가 나오게 된다.

Fig. 8은 MM0의 경우로 와전류분포가 다른 경우들과 많이 다를 수 있다.

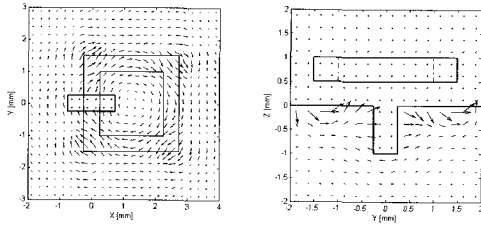


Fig. 8 Eddy current distribution in case of MM0

이러한 결과가 수치해석적으로 타당한 결과인지를 확인하기 위하여 Fig. 9에 자속밀도분포를 나타내었다. 4개의 자속밀도 분포가 동일한 것을 볼 수 있다.

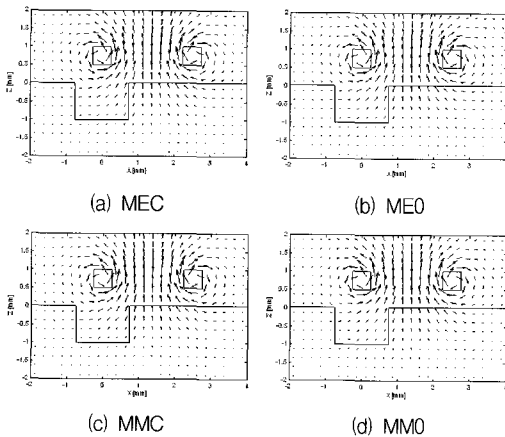


Fig. 9 Magnetic flux density distribution

4개의 정식화 과정에서 사용된 수식은 다르지만, 물리적인 의미가 있는 자속밀도는 동일하게 보인다는 것을 알 수 있다. 쿨롱계이지조건을 사용한 경우 해의 유일성이 보장되는 반면, 쿨롱계이지조건을 적용하지 않은 경우 식 (14)에서 보이는 것처럼 스칼라함수의 경사(gradient)가 추가가 되어도 자속밀도의 분포에는 큰 영향이 없게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 3차원 와전류탐상의 수치해석이 있어서 여러 방식의 정식화가 탐상신호에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구결과를 나타내었다. 자유도를 감소시키기 위한 변형자기벡터포텐셜의

사용여부와 해의 유일성을 보장하기 위한 쿨롱계이지조건 적용여부에 따른 4가지 정식화방법의 결과를 비교 검토하였다. 미지수가 감소되지 않은 자기벡터포텐셜 및 전기스칼라포텐셜을 모두 변수로 사용된 경우에서 물리적인 값의 분포 및 임피던스 계산의 결과가 가장 타당하게 나타났다. 미지수를 감소시키기 위하여 전기스칼라포텐셜을 제거하고 변형자기벡터포텐셜만으로 정식화가 수행된 경우에는 와전류 분포에서 물리적으로 타당하지 않은 결과를 나타내었다. 하지만 자장분포는 타당한 결과를 얻을 수 있었다. 변형자기벡터포텐셜과 쿨롱계이지조건을 사용한 경우, 임피던스 계산에서 어느 정도의 오차는 있었지만 비교적 수용할 만한 결과를 나타내었다. 하지만 변형자기벡터포텐셜만을 사용하고, 쿨롱계이지조건을 적용하지 않은 경우에는 상당한 오차를 가진 임피던스결과가 나타났다. 따라서 가장 좋은 결과를 얻기 위해서는 미지수가 감소되지 않은 경우에 대하여 문제를 계산하여야 하며, 계산용량을 줄이기 위해 변형자기벡터포텐셜을 사용하는 경우 쿨롱계이지조건을 적용하여야 비교적 유사한 결과를 얻을 수 있게 된다.

후 기

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

참고문헌

- [1] O. Biro and K. Preis, "On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents," *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 25, No. 4, (1989)
- [2] C. R. I. Emson and J. Simkin, "An optimal Method for 3-D eddy currents," *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 19, No. 6, (1983)
- [3] David K. Cheng, *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, Prentice Hall, (1992)
- [4] 이항범, 원성연, 신영길, "3차원 관결함에 대한 와전류탐상의 유한요소해석," *한국비파괴검사학회논문지*, 20권 3호, pp. 191-199, (2000)
- [5] N. N. Rao, *Elements of Engineering Electromagnetics*, 5th Ed., Prentice Hall, (1999)