

전자장 해석 프로그램을 이용한 와전류 문제의 해석 및 이해

임건규, 이향범
 송실대학교 전기공학부

Analysis and Understanding of Eddy Current Problem
 using electromagnetic field Packeg

Keon-gyu Lim, Hyang-Beom Lee
 School of Electrical Engineering, Soongsil University

Abstract - When the coil with alternating current approaches to the conductor the eddy current flows in conductor. Eddy current is concentrated on the conductor surface and decrescent because of skin effect. In this paper investigated eddy current characteristic that is happened in conductor. Analyzed characteristic using electromagnetic field finite element analysis program that is commercialized to analyze value of eddy current and penetration depth. Analyzed creation value of eddy current and penetration depth in conductor that change operation frequency and the material of conductor, coil outside diameter, inside diameter, position, type of conductor from analyzed eddy current characteristic. The results. using distribution of eddy current and penetration depth data is that will help to forecast ECT(Eddy Current Testing), Eddy current application and use field, eddy current loss.

1. 서 론

우리 실생활에서 여러 분야에 와전류가 다양하게 응용하여 사용되고 있고, 현재 그 사용범위가 점차 증가되고 있는 추세이다. 놀이동산에서 급강하 하는 놀이기구의 브레이크 시스템, 전기 수송가에서 사용하고 있는 적산 전력계, 원자력 발전소에서 실시하고 있는 ECT(Eddy Current Testing) 비파괴 검사, 금속을 가열하여 용융시키거나, 열처리를 하는데 사용되는 유도 가열장치, 그리고 최근에는 고속철도의 제동장치에까지 폭 넓게 사용되고 있다. 그러나 장점만 있는 것은 아니다 변압기와 같은 전기기기에서는 와전류로 인하여 손실이 발생한다. 그 사용범위가 점차 확대되는 와전류의 효과적인 사용과 전기기기에서의 손실 감소를 위해서는 와전류의 사전 예측 및 효과적인 분석이 필요하다. 본 논문에서는 와전류의 특성을 파악하기 위해 상용화된 전자장 유한요소 해석 프로그램을 통하여 와전류의 특성을 파악해 보았다. 먼저 해석시간이 짧은 2차원 축대칭 모델링을 통하여 먼저 그 특성을 분석해 보았다. 그러나 2차원 축대칭 모델 해석의 경우 도체 전체에 발생하는 와전류의 크기 및 침투깊이를 효과적으로 분석하는데 한계가 있기 때문에 3차원 입체 모델링을 해석하여 와전류의 특성을 파악해 보았다. 효과적인 비교를 위해 전류밀도는 일정하게 유지시킨 상태에서 코일의 모양, 위치, 도체의 재질 및 주파수를 변화 시켜 와전류의 생성 크기 및 침투깊이를 계산하고, 이를 바탕으로 데이터 베이스를 구축하였다.

와전류 문제에 대한 수치해석을 수행하기 위해 전자기 현상을 기술하는 맥스웰 방정식으로 원리를 설명할 수 있는 지배 방정식을 유도 하였고, 모델을 해석하는데 사용된 미지수 변수로는 와전류 문제를 잘 표현할 수 있는 자기벡터포텐셜(MVP, Magnetic Vector Potential) A 및 전기스칼라포텐셜(ESP, Electric Scalar Potential) Φ 를 사용하여 해석하였다.

2. 본 론

2.1 와전류 문제 해석을 위한 지배방정식

와전류는 코일에 시간에 따라 변화하는 교류 전류를 인가해주면 코일의 주위에 시변 자장이 발생하게 되고 이 시변자장 내에 도체가 존재하게 되면 전자기 유도 현상 즉 패러데이 법칙(Faraday's Law)에 의해서 도체내에 유기기전력이 발생한다. 이 유기기전력은 렌츠의 법칙(Lenz's Law)에 따라 시변자장을 방해하는 전류가 흐르게 되는데 이를 와전류라 한다. 와전류 문제를 해석하기위해 맥스웰 방정식중 관련 수식을 정리하면 아래와 같다.

$$\nabla \times H = J_s + J_e \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$J_s = \sigma E \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$B = \mu H \quad \dots \dots \dots (5)$$

자기벡터포텐셜 A 는 $B = \nabla \times A \quad \dots \dots \dots (6)$

식 (2)에 식 (6)를 대입하면 아래와 같다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times A) \quad \dots \dots \dots (7)$$

식 (7)의 우변을 이항하고 전기스칼라포텐셜 Φ 로 정의해 주면

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \Phi \quad \dots \dots \dots (8)$$

로 정의된다. 식 (4)에 식 (8)을 대입하면 와전류 밀도는 아래와 같이 표현된다.

$$J_e = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \Phi \quad \dots \dots \dots (9)$$

그 밖에 H 는 $H = \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) \quad \dots \dots \dots (10)$

식 (1)에 식 (9), (10)를 대입하면 $\nabla \times (\frac{1}{\mu} \nabla \times A) + \sigma (\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \Phi) = J_s \quad \dots \dots \dots (11)$

식 (1)에 발산을 취하고, 전류밀도(J_s)의 발산이 영이라는 조건으로부터 전류 연속조건식을 유도하면 아래와 같다.

$$-\nabla \cdot (\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \Phi) = 0 \quad \dots \dots \dots (12)$$

이렇게 하여 와전류문제 해석을 위한 지배방정식 식 (11), (12)를 구하였다. 도체 표면에서 X[m]인 곳의 와전류 밀도를 J_x 라 하면

$$J_x = J_s \exp(-x \sqrt{\pi f \mu \sigma}) \quad \dots \dots \dots (13)$$

여기서 침투깊이는 $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad \dots \dots \dots (14)$

이며 표면 와전류의 약 37[%]로 감소하는 깊이를 침투깊이라고 한다

2.1.1 각 영역별 유한요소해석

와전류 문제를 해석하기 위해서는 영역별 해석이 필요하게 된다. 도체가 존재하여 와전류(J_s)가 유기되는 영역과 외부에 전류원 즉 전류원류(J_s)가 존재하는 영역 2가지로 구분할 수 있다. 3차원 문제를 푸는 경우 정식화 과정에서 불통계이지 조건을 사용해야 하는데 조건을 사용하여 각 영역별로 지배 방정식을 다시 정리하면 아래와 같다.

2.1.1.1 도체가 존재하여 와전류(J_s)가 유기되는 영역

$$\nabla \times (\frac{1}{\mu} \nabla \times A) + \sigma (\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \Phi) = 0 \quad \dots \dots \dots (15)$$

$$\nabla \cdot A = 0 \quad \dots \dots \dots (16)$$

2.1.1.2 외부에 전류원 즉 전류원류(J_s)가 존재하는 영역

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J_s \quad \dots \dots \dots (17)$$

$$\nabla \cdot A = 0 \quad \dots \dots \dots (18)$$

2.2 와전류 문제 해석

2.2.1 해석을 위한 모델 재현

본 논문에서는 상용 전자기 유한요소 해석 프로그램인 FEMLAB와 OPERA 3D를 이용하여 두 종류의 코일과, 세 가지의 재질을 가진 도체로 코일 위치와 주파수를 변화시켜 모델에 대해서 와전류 문제에 대한 데이터 베이스를 구축하였다. FEMLAB은 2차원 축대칭 문제를, OPERA 3D에서는 3차원 모델을 해석하였다.

<표 1> 해석 모델의 물질상수

Item	Material	Radius	Height
Cylinder	Copper $\sigma : 5.8 \times 10^7, \mu_r : 1$	30[mm]	100[mm]
	Aluminum $\sigma : 3.54 \times 10^7, \mu : 1.000021$		
	Iron $\sigma : 10^7, \mu : 4000$		
Item	Kind of Coil	Current Density	Frequency
Coil	Solenoid	$\sqrt{2} \times 10^6 [A/m^2]$	60, 600, 6000, 60000[Hz]
	Racetrack		

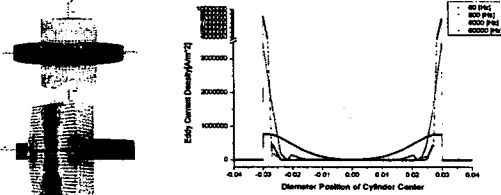
〈표 2〉 해석 모델의 코일 크기

Model No	1	2	3
Coil	ID: 40[mm] OD: 60[mm]	ID: 10[mm] OD: 30[mm]	ID: 10[mm] OD: 30[mm]
Model No	4	5	6
Coil	IE: 80[mm] OE: 120[mm] Daigonal:137[mm]	IE: 20[mm] OE: 60[mm] Daigonal:68[mm]	IE: 40[mm] OE: 60[mm] Daigonal:68[mm]
Model No	7		
Coil	ID: 40[mm], OD: 60[mm], Height: 20[mm]		

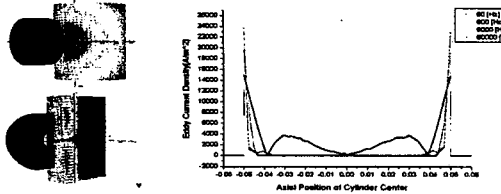
범례: Solenoid: 1~3, 7, 8번 Racetrack: 4~6번
Copper: 1~6번 Aluminum: 7번 Iron: 8번

2.2.1 3차원 모델 해석

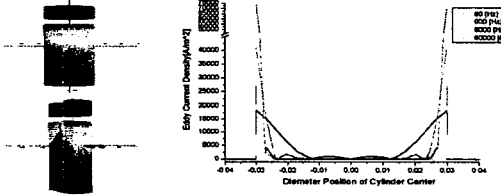
〈그림 1〉부터 〈그림 8〉까지 각 모델의 와전류 분포 및 와전류의 생성크기를 그림 및 표를 통하여 보여주고 있다. 코일은 Solenoid와 Racetrack 두 가지를 이용해 보았다. 코일의 종류별로 둘레, 옆, 상부의 3가지를 해석하였고, 각 모델별로 주파수는 60 ~ 60000[Hz]까지 10배수로 증가시켜 총 4가지를 적용해 해석하였으며, 1번 모델의 경우 구리(반자성체), 알루미늄(상자성체), 철(강자성체) 3가지 매질을 해석하였다. 강자성체를 해석할 경우 결과가 비선형으로 나오기 때문에 원활한 해석을 위하여 선형적이라는 가정을 두고 해석하였다.



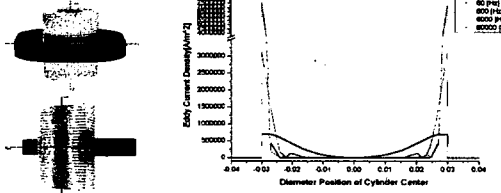
〈그림 1〉 1번 모델의 와전류 분포 및 와전류 패턴



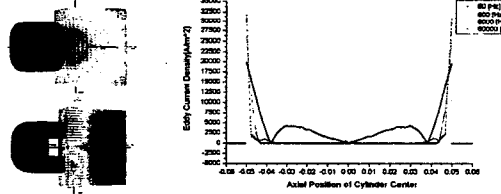
〈그림 2〉 2번 모델의 와전류 분포 및 와전류 패턴



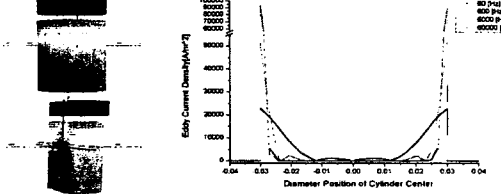
〈그림 3〉 3번 모델의 와전류 분포 및 와전류 패턴



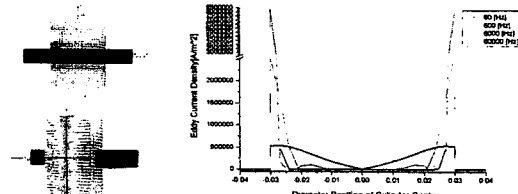
〈그림 4〉 4번 모델의 와전류 분포 및 와전류 패턴



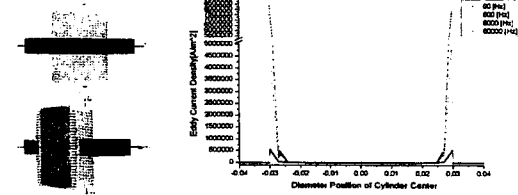
〈그림 5〉 1번 모델의 와전류 분포 및 와전류 패턴



〈그림 6〉 1번 모델의 와전류 분포 및 와전류 패턴



〈그림 7〉 1번 모델의 와전류 분포 및 와전류 패턴



〈그림 8〉 1번 모델의 와전류 분포 및 와전류 패턴

위의 그림에서 와전류 분포는 60[Hz]를 기준으로 하였다. 도체에 발생한 와전류는 도체에 표면에 집중되고 도체의 내부로 갈수록 그 밀도는 낮아진다. 이것을 표피효과라 하며 표피효과의 정도를 나타내는 기준으로 침투깊이(Skin Depth)가 정의된다.

그림의 표에서 알 수 있듯이 주파수가 높을수록, 도전을 및 비투자율이 높을수록 와전류의 침투깊이가 감소되는 것을 볼 수 있다. 재질 및 주파수별 침투깊이는 FEMLAB를 이용해 2차원 축대칭을 모델로 해석하여 계산하였으며 〈표 3〉에 정리하였다.

〈표 3〉 재질 및 주파수별 침투깊이

재질	비투자율	도전을 [S/m]	주파수 [Hz]	이론 [mm]	모델해석결과 [mm]
Copper	1	5.8E+07	60	8.531	9.43
			600	2.698	2.82
			6000	0.853	0.87
			60000	0.269	0.27
Aluminum	1.000021	3.54E+07	60	10.92	12.42
			600	3.453	3.63
			6000	1.092	1.11
			60000	0.345	0.35
Iron	4.00E+03	1.00E+07	60	0.324	0.327
			600	0.102	0.0104
			6000	0.0324	0.0326
			60000	0.0102	0.0103

3. 결 론

본 논문에서는 상용화된 전자기장 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 와전류 특성을 분석하였다. 해석 프로그램은 FEMLAB과 OPERA 3D 두 종류를 사용하였으며, FEMLAB은 2차원 축대칭 해석을 하였고 OPERA 3D는 3차원 해석을 하였다. 각 모델에서 주파수가 증가할수록, 재질의 비투자율이 증가할수록 침투깊이가 낮아져 생성된 와전류는 표면에 집중되었으며, 재질을 강자성체인 철로 했을 경우에는 생성된 와전류가 표면에 집중되었다. 또한 선형적이라는 가정하에 선형해석을 하였음에도 〈그림 8〉에서 나타나는 것과 같이 표면에 생성된 와전류의 분포가 불규칙하게 나타났다. 이론적인 침투깊이와 모델해석 결과에서 모델의 요소망 크기 때문에 오차가 발생하였다. 2차원 축대칭 해석을 이용하여 침투깊이를 계산하였음에도 해석시간 및 요소망을 작게 하는데 한계성이 있어 오차가 발생하였으며, 3차원 와전류 해석의 경우는 모델의 요소망 수에 비하여 미지수가 증가하여 2차원 축대칭 해석보다 요소망 수를 감소시켜 해석하였다. 이 결과 2차원 축대칭 해석보다 3차원 해석에서 오차가 크게 발생하였다.

본 논문에서의 연구결과를 바탕으로 와전류의 분포 및 침투깊이 데이터를 이용하여 와전류 탐상, 와전류를 응용, 사용하는 분야 및 전기기에 발생하는 와전류 손실등을 예측하는데 도움이 될 것이다.

[참고 문헌]

- [1] 이항범, "3차원 와전류 문제의 유한요소해석에서 쿨롱계이지조건과 전류연속조건에의 영향", 대한전기학회논문지, Vol. 54B-10-5, 2005.
- [2] "유한요소법에 의한 전기기의 전자기해석", 기초전력공학공동연구소, 2003.
- [3] 신영길, "와전류 탐상신호 예측을 위한 3차원 수치해석 프로그램 확립", 기초전력공학공동연구소 최종보고서, 1999