

구조와 주파수의 변화에 따른 와전류 시스템의 자기력 특성

박병수, 이강혁, 박일한
성균관대학교 정보통신공학부

Magnetic Force Characteristics in Eddy Current System with Variation of Geometry and Frequency

Byung-Su Park, Kang-Hyouk Lee, and Il-Han Park
Sungkyungwan University

Abstract - 현재 세계적으로 수많은 전기기기가 설계, 생산되고 있다. 우리는 실생활에서 거의 매일 전기기기를 사용하고 있으며 대부분의 전기기기는 와전류 문제를 내포하고 있다. 따라서 와전류에 대한 기초적인 연구는 언제나 필요하다. 와전류는 주어진 매질과 주파수에 따라 종속적으로 발생하게 되며 자기력을 발생시키게 된다. 본 논문에서는 전자장 유한요소해석을 이용해 주파수의 변화에 따른 와전류 분포와 자기력을 알아본다. 또한 시스템의 구조를 바꿔가면서 계산된 자계 분포와 자기력을 통해 그 영향을 살펴본다.

1. 서론

현재는 세계적으로 전기 에너지의 약 60%가 전기기기의 구동에 사용될 정도로 전기기기는 널리 이용되고 있다. 일상에서 접하는 많은 전기기기는 거의 모두 와전류 문제를 가지고 있다. 이 와전류의 영향은 경우에 따라 전기기기의 성능의 저하를 불러일으키거나 동작에 중요한 역할을 한다. 철심이나 자석에서 유도되는 와전류는 각각 인가된 전원에 의한 자속의 방향과 반대 방향의 자속을 발생시키거나 열을 발생시켜 그 성능을 저하시킨다. 그러나 유도전동기의 회전자 도체에 발생되는 와전류는 유도전동기를 동작시키는 역할을 한다.

본 논문에서는 시변자계에 의해 유도되는 와전류가 있는 시스템을 전자장 유한요소해석하여 구조와 주파수의 변화에 따른 자기력에 대해 살펴본다. 자기력은 맥스웰 응력텐서(MST, Maxwell Stress Tensor)를 이용해 계산된다. 자성체에 의해 생기는 인력과 도체에 유도되는 와전류에 의한 척력의 합력이 구조가 바뀌면서 주파수에 따라 어떻게 변하는지에 대해 관찰한다.

2. 본론

2.1 시간조화 와전류 시스템의 자계 유한요소해석

교류 시스템의 자계 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (1)$$

여기서, \vec{A} 는 자기벡터 포텐셜, μ 는 투자율, 그리고 \vec{J} 는 전류 밀도다. 시간에 따라 자계가 변하면 전계가 유도된다. 공간 내에 도전체가 존재할 때 발생하는 와전류는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{J}_e &= \sigma \vec{E} \\ &= -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, \vec{J}_e 는 와전류 밀도, σ 는 도전율, 그리고 \vec{E} 는 유도된 전계다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 지배 방정식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{A} &= -\mu (\vec{J}_s + \vec{J}_e) \\ -\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} &= \vec{J}_s \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, \vec{J}_s 는 인가된 전류 밀도다. 해석 시스템의 물리량이 정형적으로 변화하면 복소수 근사법을 통해 식 (1)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} + j\omega \sigma \vec{A} = \vec{J}_s \quad (4)$$

여기서, ω 는 교류 시스템이 동작하는 각주파수이다[1].

2.1.1 자기력 계산

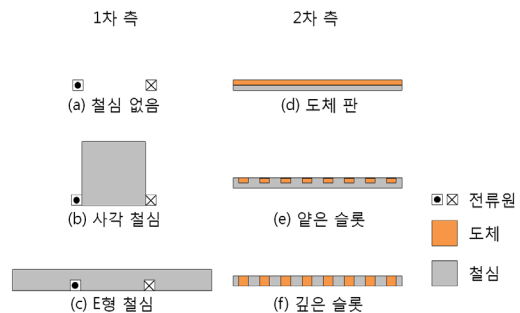
자기력을 계산하기 위해서 맥스웰 응력텐서를 쓴다. 맥스웰 응력텐서는 분포 자기력(자기력 밀도)으로서는 물리적 의미를 갖지 않지만, 어떤 대상을 둘러싸는 임의의 폐면적(closed surface)에 대한 적분값은 그 대상에 작용하는 전체 힘(total force)로서는 타당하다[2]. 따라서 본 연구에서는 전자력이 작용하는 대상의 전체 힘 계산 시 맥스웰 응력텐서를 적용하여 계산한다. 공기로 둘러싸인 2차원구조에 대하여 적용된 맥스웰 응력텐서식은 다음과 같다.

$$\vec{P} = \frac{1}{\mu_0} (\hat{n} \cdot \vec{B}) \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \hat{n} \quad (6)$$

2차원 해석에서 평면에 수직인 방향의 맥스웰 응력텐서 성분이 없고, 그 방향의 시스템 길이를 단위길이로 놓으면 경계를 따라 선적분하여 자기력을 구할 수 있다. 계산 결과의 정확도를 높이기 위해 자기력을 받는 부분의 주위 공극에서 수치오차가 적은 적분로를 따라서 선적분을 계산한다[3].

2.2 수치해석 모델

자기력이 계산되는 수치해석모델은 그림 1과 같다.



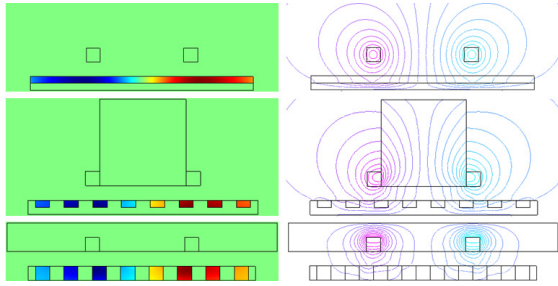
〈그림 1〉 수치해석 모델

그림 1의 좌측은 전류원이 인가되는 1차축의 구조들을 나타내고 우측은 자기력을 받는 2차축의 구조들을 보여준다. (a)는 1차축의 철심이 없는 구조, (b)는 사각형의 철심이, (c)는 E형 철심이 있는 구조이다. (d)는 2차축에 판 형태의 도체, (e)는 얇은 슬롯에 도체가, 그리고 (f)는 깊은 슬롯에 도체가 있는 구조이다. 도체의 도전율은 구리와 같은 $\sigma = 5.998 \times 10^7$ [S/m]이고, 철심의 비투자율은 $\mu_r = 1000$ 이다.

수치해석은 1차축 구조들의 아래에 2차축 구조 각각을 놓고 수행된다. 1차축 전류원에 의해 자속이 발생되면 2차축 자성체가 자화되고 전체 시스템의 인덕턴스가 증가하는 방향으로 인력을 받는다. 해석 시스템에서는 아래의 2차축 구조가 1차축이 있는 위로 힘을 받게 된다. 그리고 1차축 전류원이 교류가 되면 시간에 따라 자속이 변하게 되고 2차축 도체에서는 이 변화의 반대 방향으로 변하는 자속을 발생시키는 와전류가 유도된다. 1차축 전류 방향과 2차축 와전류 방향은 반대이므로 척력이 발생되어 2차축 구조는 아래 방향으로 힘을 받는다. 주파수가 커지면 도체의 표피 효과 때문에 와전류의 분포가 달라지고 척력의 크기도 변하게 된다. 결국 2차축 구조는 인력과 척력의 합력을 받는다.

2.2.1 구조와 주파수의 변화에 따른 자기력의 변화

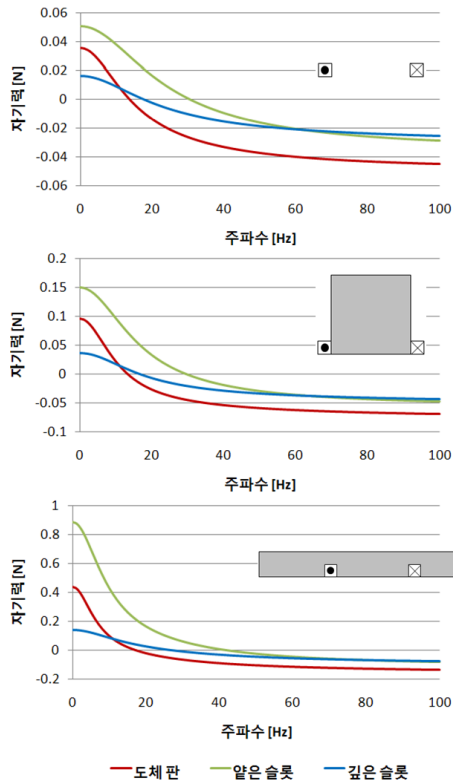
그림 2는 1차축 구조에 2차축 구조를 적용하고, 인력과 척력이 균형을 이룰 때의 와전류 분포와 자계 분포를 나타낸다.



〈그림 2〉 인력과 척력이 같을 때의 와전류 및 자계 분포

1차측에 E형 철심이 있는 경우, 다른 경우보다 전류원 사이에서와 양 바깥에서 2차측에 자속의 영향을 더욱 잘 전달함을 알 수 있다. 사각 철심이 있는 경우는 E형 철심의 경우보다 전류원의 양편 바깥쪽에서 누설되는 자속들이 있지만 안쪽에서는 철심이 없는 경우보다 자속의 영향을 잘 전달한다. 2차측의 도체가 판인 경우, 1차측에서 발생한 자속은 도체를 통과하여 아래의 철심을 지나가게 된다. 그리고 2차측의 얇은 슬롯에 도체가 있는 경우는 1차측에서 발생한 자속이 슬롯 사이의 철심을 통해 도체 아래 부분을 지나가게 된다. 반면에 2차측의 깊은 슬롯에 도체가 있는 경우는 1차측에서 발생한 자속이 지나갈 경로가 충분치 않음을 알 수 있다.

그림 3은 1차측 구조 각각에 2차측 구조들을 적용하였을 때 주파수의 변화(0~100 [Hz])에 따라 계산된 자기력의 그래프이다.

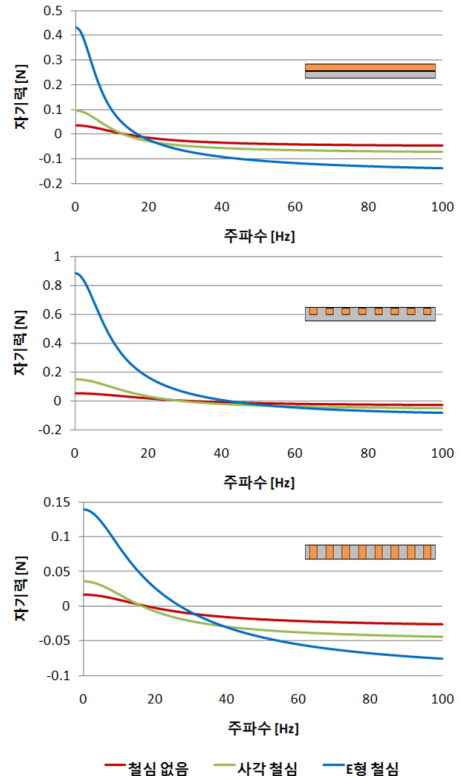


〈그림 3〉 1차측 구조 변화에 따른 자기력 특성

모든 그래프에서, 2차측의 도체가 얇은 슬롯 형태일 때 인력이 가장 강하고, 도체 판 형태일 때 척력이 가장 크다. 2차측의 도체가 얇은 슬롯 형태일 때 철심의 면적이 가장 크고, 자속이 철심을 쉽게 자화시킬 수 있는 구조이기 때문에 인력의 크다고 생각할 수 있다. 또한, 주파수가 높아지고 도체의 표피 효과가 커질 때는 자속이 도체에 깊이 침투할 수 없지만, 도체의 넓은 경계에 자속 변화의 영향을 주기 때문에 와전류가 많이 유도되고 전류원과 반대방향의 와전류에 의한 척력도 상대적으로 높음을 알 수 있다. 2차측에 도체판이 있는 경우, 주파수가 높을 때는 전류원 가까이 넓은 면적의 도체가 있어 많은 와전류가 발생되고, 얇은 슬롯 구조보다 척력이 크게 발생한다. 이 구조는 얇은 슬롯 구조보다 철심의 면적이 작고, 구조적으로 철심이 있는 곳의 자기장의 세기가 얇은 슬롯형태의 도체일 때보다 작아 철심의 자화가 덜 되므로 인력은 작다. 위의 두 경우에 비해 2차측이 깊은 슬롯 구조이면 주파수가 낮을 때

철심의 면적은 깊은 슬롯 형태의 도체와 같지만, 자속의 경로가 확보되지 않고 1차측으로부터의 거리도 멀어 자화를 덜 시키므로 인력이 가장 작다. 전체 자속의 세기가 약해 척력 또한 가장 약하다.

그림 4는 2차측 구조 각각에 1차측 구조들을 적용하여 주파수의 변화에 따라 계산된 자기력의 그래프를 보여준다.



〈그림 4〉 2차측 구조 변화에 따른 자기력 특성

모든 결과에서 1차측이 E형 철심을 가질 때 인력과 척력이 가장 크고, 사각 철심 구조와 철심이 없는 구조 순으로 인력과 척력이 작아진다. 그림 2의 자계 분포를 통해서도 알 수 있지만 1차측이 E형 철심을 가진 구조가 2차측에 자속을 가장 잘 전달한다. 반면에 사각 철심을 가진 1차측 구조는 전류원 사이에서는 자속을 잘 전달하지만 전류원 양 바깥쪽에서는 그렇지 못해서 E형 철심 구조보다는 인력과 척력의 발생이 작다. 그리고 철심이 없는 1차측 구조는 철심이 있는 구조들보다 자속 전달이 어려워져서 가장 낮은 인력과 척력을 보인다.

수치해석 결과는 같은 전류원이 인가되었을 때, 도체가 자속의 전달이 잘되는 철심 안에 있는 구조를 가지면 2차 측에서 발생하는 힘이 커진다는 것을 보여주었다.

3. 결 론

본 논문에서는 시변자계에 의해 유도되는 와전류가 있는 시스템을 전자기 유한요소해석하여 구조와 주파수의 변화에 따른 자기력에 대해 살펴해보았다. 먼저 전류원이 있는 1차측 구조들과 전류원에 의해 발생된 자속이 전달되어 힘을 받게 되는 2차측 구조들을 모델링했다. 그리고 이 구조들을 조합하여 각각의 경우에서 맥스웰 응력 텐서를 이용해 2차측이 받는 힘을 계산했다. 결과적으로 와전류가 발생하는 도체의 모양과 자화가 되는 철심의 모양이 자속을 잘 전달하도록 설계하면 힘이 많이 발생한다는 것을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] Il-han Park, Myung-jun Choi and Se-hee Lee, "High-order Frequency Sensitivity for Nonsinusoidal Steady State Analysis in Linear Magnetodynamics," IEEE trans. Magn., vol. 34, no.5, pp. 2555-2558, 1998
 [2] 최홍순, 박일한, 문원규, "맥스웰 응력텐서의 물리적 의미의 고찰," 전기학회논문지 58권 4호 2009년 4월
 [3] David J. Griffiths, "Introduction to Electrodynamics", 3rd ed, p351-355, 2008