

FEM을 이용한 유도가열로의 열분포 특성

김지호*, 유효열**, 강호현*, 전희중*
 * 숭실대학교 전기공학과, ** (주) 다원시스

Quality of Thermal Distribution for Induction Heating with FEM

Ji-Ho Kim*, Hyo-Yol Yoo**, Ho-Hyun Kang*, Hee-Jong Jeon*
 * Dept.of Electrical Engineering, Soongsil University, ** Dawonsys R&D Center

ABSTRACT

The computation of design parameters and the electromagnetic analysis of 0.5 Mw- class Induction furnace with 3-dimensional modeling are introduced by using FEM techniques, And model of flux distribution and eddy current distribution induced in induction furnace are analyzed and presented. It is more necessary that for melting industry depending on metal material field, the design technique of induction furnace is quite urgent at exchanging introduction of technology between metal material and electrical energy conversion by power electronics field.

1. 서 론

유도로를 이용한 가열장치의 산업은 전력전자분야와 접목을 통한 기술로 발전할 수 있는 충분한 잠재력이 있는 산업이라 할 수 있다. 이에 반해 국내의 유도로에 관련된 설계 기술은 장치의 사용자 쪽인 금속재료분야에 치우쳐 있어 실제 제작기술인 전력전자산업분야와의 기술 교류가 어려운 실정이다. 또한 국내유도용융산업은 소기업위주로 되어 있어 기술 개발이 어려운 상황이며 우리 시장을 잠식하고 있는 해외기업들의 점유율이 높기 때문에 유도가열장치의 기술 개발이 더더욱 필요한 실정이다.

본 보고서는 5,000kW급 유도 용해로를 기본 모델로 하여 매 용해로 설계마다 적용되어야 할 유한요소법을 적용하여 설계 파라메타에 대한 계산과 전자기적 해석을 시뮬레이션을 통하여 분석하고 향후 시뮬레이션을 통한 해석을 바탕으로 오차 부분을 보완하는 연구를 하였다.

2. 와전류 유한요소 해석의 정식화

2.1 와전류 및 에너지 분포 특성

2.1.1 유도가열의 원리

금속가열에 이용하는 고주파가열은 정확하게는 고주파 유도가열이라 칭하는 것으로 그림 1과 같이 고주파전류가 흐르는 코일 속에 있는 도전체가 전자유도 작용에 유기되는 와전류와 히스테리시스손에 의해 급속히 가열되는 현상을 말한다. 높은 주파수의 고주파수를 사용하여 전류의 표피작용과 근접효과에 따라서 피가열물의 표면층에 자속 및 과전류의 집중으로 재발생되는 열손실이 피가열물의 표면층을 가열하는 결과가 된다.

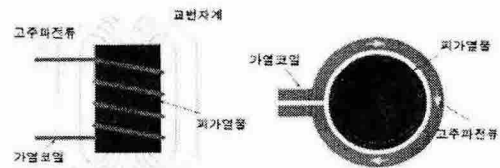


그림 1 유도가열의 원리

2.1.2 와전류 발생의 원리

코일에 시간에 따라 변화하는 교류전류를 흘려보내면 코일의 주위에 시변 자장(Φ_p)이 발생한다. 이 시변자장 내에 도체를 가져가면 전자기 유도현상에 의해 도체 내에 유기기전력이 발생하고 이 유기기전력은 렌츠의 법칙에 따라 시변자장(Φ_p)을 방해하는 전류가 흐르게 되는데 이 전류를 와전류라고 한다. 와전류가 도체 내에 발생하면 정상 전류 분포에 영향을 주며 동시에 와전류에 의한 줄열(Joule Heating)을 이용하여 가열하게 된다.

2.1.3 표피효과와 침투깊이

도체에 고주파 전류를 흐르게 할 때 전류가 도체의 표면으로만 흐르게 되는 현상을 표피효과라 한다. 모든 도체에 교류가 흐르게 되면 표면에서부터 중심으로 깊이 들어갈수록 전류밀도가 작아진다. 표피효과의 정도를 나타내는 기준으로 침투 깊이(Skin Depth)가 정의된다.

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

침투깊이는 표면와전류의 약 37[%]로 감소하는 깊이를 나타낸다. 침투깊이는 식 (1)에서 알 수 있듯이 주파수, 투자율, 도전율이 제곱근에 반비례한다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 침투깊이를 선정함으로써 인가주파수를 결정할 수 있다.

2.2 와전류 유한요소 해석

본 연구에서는 와전류문제에서 해석하고자 하는 영역을 사용되는 변수 및 매질 등의 경계를 이용하여 구분하면 다음의 세 영역으로 구분할 수 있다.

첫 번째 영역은 도체로 구성되어 있고 와전류가 흐르는 영역으로 자기벡터포텐셜(magnetic vector potential) \vec{A} 와 전기스칼라포텐셜(electric scalar potential) V 를 사용하여 자기벡터포텐셜 \vec{A} 를 정의하면 식 (2)와 같이 된다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2)$$

위의 식을 전기스칼라포텐셜 V 을 이용하여 정리하면 다음과 같은 전류연속조건을 만족하는 지배방정식이 완성된다.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V = \vec{J}_s \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V \right) = 0 \quad (4)$$

두 번째영역은 외부공기영역으로 전원전류가 있는 영역으로 리두스드자기스칼라포텐셜 ϕ 를 사용하게 된다. 이 영역에서는 전원 전류밀도 \vec{J}_s 만 존재하고 와전류에 의한 전류밀도 \vec{J}_e 는 0이 된다. 전원 전류밀도에 의해 발생하는 자장 \vec{H}_m 값은 Biot-Savart Law에 의하여 계산한다. 또한 \vec{H}_m 은 자화에 의한 자계의 세기로 리두스드자기스칼라포텐셜 ϕ 를 사용하여 정리하면 전원전류가 있는 영역의 지배방정식을 구할 수 있다.

$$\nabla \cdot \mu \nabla \phi = \nabla \cdot \mu \vec{H}_s \quad (5)$$

세 번째 영역은 외부 공기영역으로 전원전류가 없는 영역으로 토털자기스칼라포텐셜 ψ 를 사용하게 된다. 이 영역에서는 와전류 전류밀도 \vec{J}_e 와 전원전류밀도 \vec{J}_s 가 모두 0이므로 자계의 세기 \vec{H} 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{H} = -\nabla \psi \quad (6)$$

위 식 (6)을 이용하여 정리하면 지배방정식을 구할 수 있다.

$$\nabla \cdot \mu \nabla \psi = 0 \quad (17)$$

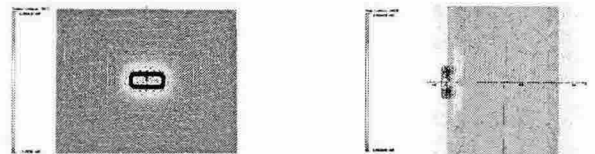
2.3 유한요소법에 의한 시뮬레이션 분석 및 비교

유한요소해석(Finite Element Method)에 사용되는 프로그램은 VECTOR FIELD사의 상용프로그램인 OPERA

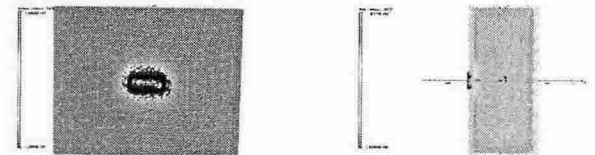
3D를 사용하였다. 각각의 해석은 가열 코일의 모델링을 통한 와전류의 분포 및 침투깊이, 전체 에너지를 나타내었다.

그림 2의 (a)부터 (c)는 전체의 코일 입력부 중 하나의 부분을 형상화하여 전자기적 시뮬레이션을 하였다. 입력되는 주파수의 크기를 400Hz, 700Hz, 1,000Hz로 변화시켰으며, 줄(Joule)에너지를 계산하였다.

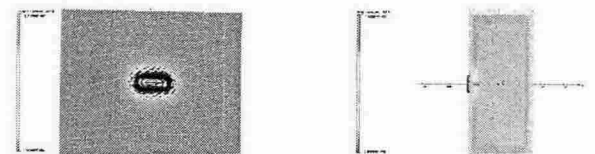
그림 3의 (a)부터 (c)는 하나의 코일에 따른 시뮬레이션 결과를 분석해 볼 때 주파수에 따른 영향을 볼 수 있었는데, 이를 자세히 검토하기 위해 3개의 코일을 직선으로 놓여 있을 때의 와전류 분포 및 침투깊이, 주파수에 따른 줄(Joule)에너지를 표 1에 나타내었다. 와전류는 코일의 인가되는 전류에 의해 들어오는 자속의 변화를 막으려는 방향으로 형성된다. 전원전류는 와전류의 방향과 반대이다. 줄(Joule)에너지 또한 주파수가 커질수록 커지는 것을 볼 수 있으나, 어느 일정 주파수 이상의 경우에는 증가가 미비함을 보이고 있다.



(a) 400Hz에서의 와전류 분포 및 침투깊이



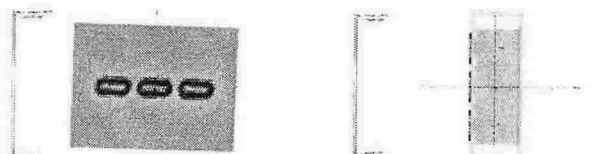
(b) 700Hz에서의 와전류 분포 및 침투깊이



(c) 1,000Hz에서의 와전류 분포 및 침투깊이
그림 2 하나의 가열코일에 따른 FEM 해석



(a) 400Hz에서의 와전류 분포 및 침투깊이



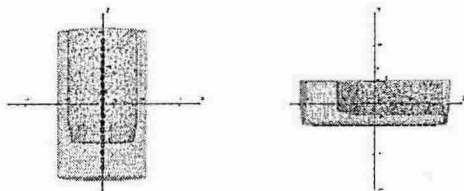
(b) 1,000Hz에서의 와전류 분포 및 침투깊이
그림 3 세개의 가열코일에 따른 FEM 해석

표 1 주파수에 따른 줄에너지[W]

에너지 주파수	줄 에너지(Joule Energy) [W]	
	하나의 가열코일	세 개의 가열코일
400[Hz]	181.5042	1187.7627
700[Hz]	188.0357	1418.3968
1,000[Hz]	188.3188	1465.1212

그림 4는 전체 용해로의 요소망을 나타낸 것이다. (a)는 로체의 1/2 모델의 요소망을 나타내었으며 (b)는 로체의 외벽 부분을 제외하고 주물 부분의 요소망을 나타낸 것이다. 주물의 경우는 주철이 용해되어 있는 상태로 해석하였다.

그림 5은 주물이 채워진 경우의 와전류의 분포를 나타낸 것이다. 코일이 위치한 부분의 전반적인 부분에 와전류가 분포해 있는 것을 볼 때 전체적으로 균일하게 와전류가 분포함을 예측할 수 있다. 그림 6은 코일에 전류를 인가하였을 경우 자속분포를 나타내었고, 그림 7에 각 영역별 자속분포를 그래프로 나타내었다. 코일에 가까운 내화재의 경우에는 자속의 분포가 적었으나 주철이 용해된 부분에 가까울수록 자속의 분포가 급진적으로 늘어났 것을 볼 수 있다.



(a) 로체 1/2 모델의 요소망 (b) 주물 부분의 요소망
그림 4 전체 용해로의 유한요소 해석을 위한 요소망

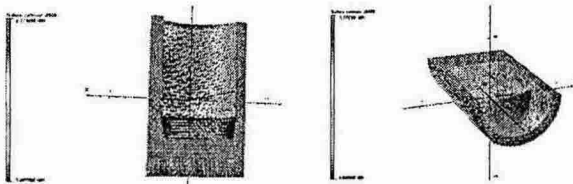


그림 5 전체 용해로의 와전류 분포



그림 6 전체 용해로의 자속 분포



(a) 코일 부분 (b) 내화재 외부영역

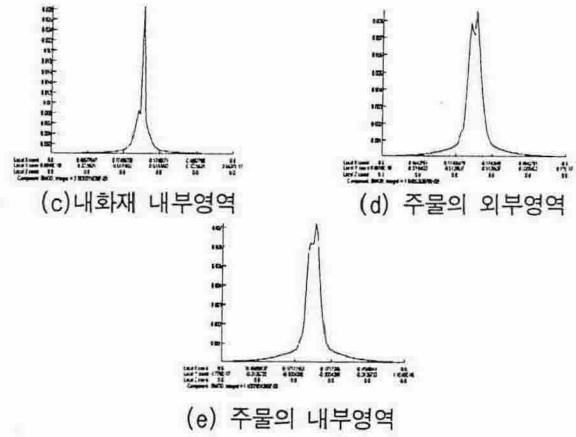


그림 7 각 영역별 자속분포

3. 결론

본 논문은 유도용해로의 와전류분포에 따른 줄에너지의 발생에 대하여 초점을 두고 전자기 시뮬레이션을 시행하였다. 이에 따라 하나의 코일일 경우 보다는 세 개의 코일에서 와전류 분포 및 줄에너지가 증가함을 보였고, 주파수 낮은 400Hz보다는 700Hz, 1,000Hz일 경우에 더욱 증가함을 보였다. 데이터 분석결과 와전류분포 및 줄에너지의 증가에 관한 내용은 증명할 수 있었으나, 코일에 발생하는 열에너지는 각각의 코일에 발생하는 전류의 자속에 비례하는 정도로 증가함을 보였다. 이에 동일한 코일에 입력 전류를 동일하게 한 경우의 와전류 분포 및 열에너지는 인가되는 주파수가 증가함에 따라 커지는 것을 나타낼 수 있었다. 본 연구에서는 3차원 유한요소해석 시뮬레이션 코드를 사용하였다. 계산용량과 시간의 단축을 위한 대용량 행렬 계산을 정식화하고 재질과 주파수, 코일 전수 등의 다양한 변화 요인을 수치해석 모델링을 통해 조사하였고 각종 실험을 통해 실제 유도로 제작에 따른 귀중한 지식을 축적할 수 있었다.

이 논문은 에너지관리공단의 '에너지·자원기술개발 사업'(2004-E-EL02-P-05-0-001)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] U. Lüdtke, D. Schulze, W. Weigel, B. Nacke, Eddy current computation for inductor casing and cooling cylinder of channel induction furnace, COMPUMAG, Berlin, 1995.
- [2] 김용주 안중수, 강자성체에서의 이동 자계에 관한 고찰 (The analysis of Traveling field in Ferromagnetic) 論文集, Vol.4 No.2, 1971
- [3] A New Method to Compute Eddy Current Losses by the Finite Elements Method, CONFERENCE RECORD-IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING, Vol.1 No.-, 1997