

Mass Heating 고주파 유도가열 코일의 형상 설계에 관한 연구

이성형*, 조윤현*
동아대*

Study on the Design of Suitable Construction of High-Frequency Mass Heating Induction Coil

Sung-Hyung Lee*, Yun-Hyun Cho**
Dong-A University*

Abstract - 본 논문에서는 mass heating에 적용되는 고주파 유도가열 코일의 형상설계에 대한 내용을 기술하였다. 고주파 전류가 흐르는 가운데, workpiece가 가장 고른 열분포 특성을 가질 수 있도록 가열시킬 수 있는 코일의 형태를 결정하는 과정을 나타내고 있다. 이를 설명하기 위해 유한요소법을 이용하여 와전류와 열전도 등의 결과를 데이터화하고 각 결과들의 순환적 계입력으로 수치들의 변화를 시각적으로 나타내어 제안된 코일 형상에 대한 효율성을 입증한다. 연구의 과정은 3차원 유한요소 프로그램인 ANSYS로 이루어진다.

하고자 하는 대상의 균일한 가열이다. 추가적으로 고려할 사항은 최대 발생열, 최소 금속 손실, 가장 최적의 효율을 발휘할 수 있는 전기적 시스템이다.

유도가열에 있어서 최근 요구되는 것 중 하나는, 시료의 표면과 중심부 간 온도를 균일하게 하는 것이다. 물리적(표피효과)으로 시료의 중심부는 표면보다 천천히 가열된다. 표피효과로 인해 표면층에는 86%의 전력이 집중된다. 따라서 mass heating의 가열목적에 따라 주파수나 재료의 변화를 피할 필요가 있다. 그러므로 적절한 코일의 형태와 그에 따른 부수적인 설정이 더욱 중요해진다.

1. 서 론

고주파 유도가열은 전자기 유도현상을 이용하여 코일 내에 위치한 도전성 물체의 표면에 저항 손실을 발생시켜 피가열체를 가열하는 기술이다. 유도가열의 기본적인 요소는 교번전류, 유도코일과 피가열물이며 최근에는 전력전자와의 접목을 통한 기술에도 많은 발전이 있다. 유도가열에 있어 온도의 변화에 따른 물성의 변화는 불가피한 현상이기 때문에 이러한 복합적인 현상을 자체와 열계의 복합적인 문제로 풀어내는 데에는 많은 어려움이 있다. 이러한 과정에 의한 정확한 결론을 이끌어내기 위해 상용 유한요소 프로그램을 이용한다.

2.3 제안된 모델의 형태 및 해석

<그림 1>은 본 논문에서 비교하여 제시하는 모델의 기본 형태를 나타내고 있다. 원래의 코일의 형태와 제안된 코일의 형태를 제시하고 있다. 유도가열의 여러 분야에서는 일반적으로 코일에 고전류가 흐르기 때문에 반드시 냉각에 대한 고려가 필요하다. 따라서 본 연구를 수행한 코일에 대해서도 가열의 과정동안 물로 인한 냉각이 이루어질 수 있도록 설계되었다. 솔레노이드형 가열코일에서 일반적으로 자속은 중심으로 집중되는 현상이 나타난다. 이러한 현상은 솔레노이드의 중심부가 말단 부분보다 열 현상이 더 뚜렷이 나타나게 하는 결과를 가져온다. 이러한 열의 불균형적인 분포에 대한 개선법의 하나로 가열 코일의 적절한 설계변경을 제시하였다.

고주파 유도가열에 있어서 피가열물에 유도된 전류는 일반적으로 균일하게 분포하지 못하고 표면에 집중된다. 일부에 집중된 열은 피가열물 혹은 여러 가지 제품에 원치 않는 불량을 야기할 수 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 유도가열 장치에 있어서 좀 더 정밀도를 더할 필요가 있다. 그러한 점에서, 가열의 정밀도를 위한 유도가열 코일의 적절한 설계는 매우 중요하다고 할 수 있다.

해석의 편의를 위하여 2차원 해석이 많이 이루어졌지만 이 논문에서는 좀 더 정확한 이해를 위해 3차원 해석을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 유도가열의 유한요소 해석

도체에 고주파 교류전류가 흐르게 되면 전류는 도체의 표면으로만 흐르게 되어 표면에서부터 중심으로 갈수록 전류밀도가 낮아지게 되는데 이 때 정의되는 개념이 표피효과의 정도를 나타내는 침투 깊이이다. 침투 깊이는 표면과전류의 약 37%로 감소하는 깊이를 나타내며 식(1)과 같이 투자율, 도전율, 주파수 제곱근에 반비례함을 알 수 있다. 따라서 침투 깊이를 선정하게 되면 해당 인가주파수를 결정할 수가 있다.

$$\delta = \left(\frac{1}{2} \mu \omega \sigma \right)^{-1/2} \tag{1}$$

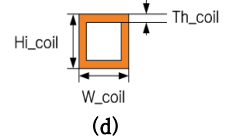
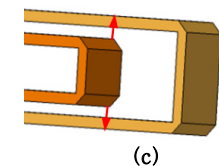
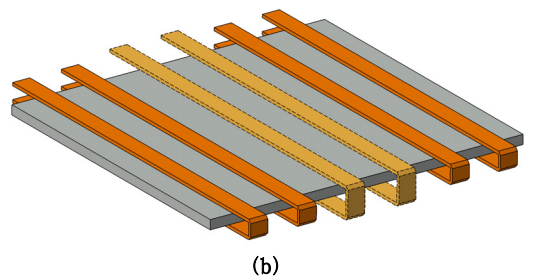
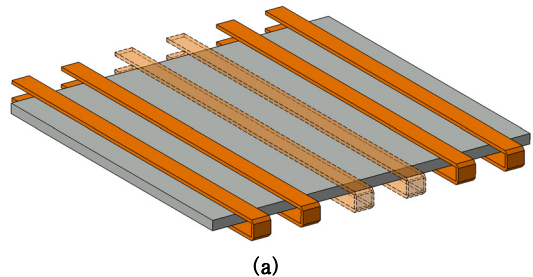
맥스웰 방정식으로부터 주파수 영역에서의 와전류 지배 방정식을 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A + j\omega \sigma A = J_s \tag{2}$$

A는 자기벡터 포텐셜(wb/mm), J_s 는 외부전류원(A/mm), μ 는 투자율(H/mm), ω 는 각속도, σ 는 전기 전도도(1/Ωmm)를 나타낸다. 유한요소 프로그램을 이용하여 식(2)의 계산을 수행하여 와전류와 그에 따른 열의 분포를 확인할 수 있다.

2.2 Mass Heating

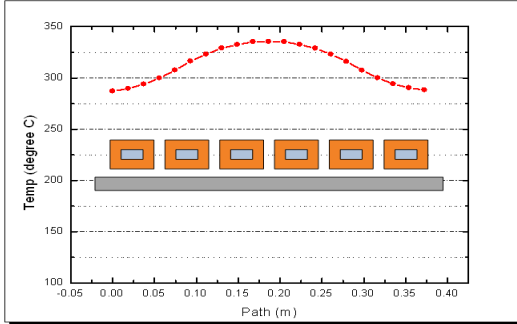
온도는 금속의 형태에 따라 상당한 영향을 받는다. 앞서 언급한 바와 같이 현대의 mass heating 시스템의 설계에서 가장 중요한 목적은 가열



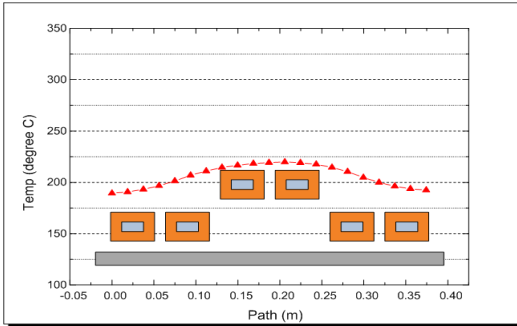
(a) 원래의 형태 (b) 제안된 형태 (c) 코일 치수 변화 (c) 코일 단면 <그림 1> 해석 모델

코일은 가로, 세로 각각 5[mm], 3[mm]로 하였으며 그 두께는 1[mm]로 하였다. 2000[A]의 전류가 흐르며 주파수는 50kHz이다. 첫 번째는 여섯 코일의 강판을 위, 아래로 평범하게 배치한 채로 해석을 수행하였으며, 두 번째는 중심부의 열 집중을 생각하여 가운데 두 코일을 10[mm] 상승시켰다. 세 번째는 높이를 모두 10[mm]씩 모두 높이를 달리하여 좀 더 평탄한 온도 분포를 꾀하였다.

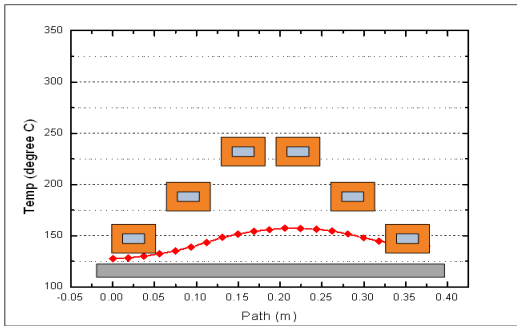
가능한 다른 모든 조건들의 변화는 배제하였으며, 오직 코일의 일정한 offset 영향만을 살펴보았다.



(a)



(b)



(c)

(a) 원래의 형태 (b) 10[mm] offset (c) 10[mm], 20[mm] offset
 <그림 2> offset에 따른 강판의 온도분포

2.4 결과의 고찰

<그림 2>의 그림에서 나타나듯이 코일의 분포에 따라 온도의 분포가 달라짐을 알 수가 있다. 일반적으로 배치된 코일로부터 가열된 강판의 온도분포(a)는 전체적으로 100°C 이상의 차이가 있음을 알 수가 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 전체 코일의 중심부로 열이 집중적으로 발생됨을 쉽게 알 수가 있다. 그림 (b)에서는 약 50°C의 차이로 많은 열분포의 변화가 발생하였다. 그리고 (c)에서는 약 20°C 안팎의 차이로 다시 변화가 발생하였다.

이상과 같이 다른 모든 변수들이 동일한 조건하에서, 코일의 형상 변화는 유도가열의 목적과 그 진행과정에 있어서 많은 비중을 차지함을 알 수가 있다. 유도가열은 가열하고자 하는 재료의 형상에 따라 많은 영향을 받는다고 하였다. 하지만 이러한 코일의 형상변화에 대한 연구가 계속 진행된다면 유도가열의 목적에 좀 더 부합하는 결과들을 도출할 수 있으리라는 추론을 내릴 수가 있다.

3. 결 론

코일의 형태에 따른 강판 중심부의 열분포를 알아보기 위해 전자계-열의 순차적 해석을 상용유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 3D로 수행하였다. 3D로 수행된 해석은 2D에서 수행되던 해석의 한계점을 많은 부분 보완할 수 있을 것이다. 제안된 형태의 코일은 좀 더 균일한 열분포의 양상을 보이고 있으며, 좀 더 최적적인 설계 및 해석이 수행되어진다면 실제의 문제에 있어서도 가열에 대한 적절한 예측이 가능할 것이라 생각된다.

이 연구에서 수행된 결과는 유도 가열의 과정에 있어서 과도 열전달의 문제나 전력 밀도의 문제의 예측을 하는 데 활용할 수 있을 것이다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 연구결과입니다.

This work is the outcome of a Manpower Development Program for Energy & Resources supported by the Ministry of Knowledge and Economy (MKE)

[참 고 문 헌]

- [1] Rudnev, Loveless, Cook, Black, "Handbook of Induction Heating"
- [2] Alexander Boadi, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka and Masato Enokizono, "Designing of Suitable Construction of High-Frequency Induction Heating Coil by Using Finite-Element Method", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 41(10), 4048-4050, 2005.10