

피열물의 표면 열처리를 위한 유도가열의 특성해석

장석명, 윤인기*, 이성호, 류동완, 최병익, 이학주
 충남대학교(042-821-5658) 한국기계연구원

Analysis of surface-hardening Induction heating

S.M.Jang, I.K.Yoon, S.H.Lee, D.W.Ryu, P.i.Choi, H.J.Lee

Chungnam National University, KIMM.

Abstract - Induction heating is utilized in a large and ever-increasing number of application. The most prominent of these are billet heating, heat treating, metals joining, and metal melting. In these day, heating roll, a kind of induction heating, is widely used in curing of coatings and fiber industry. In this paper, at first, treated that heating roll's characteristics equation. The second, analysis of magnetic flux and eddy currents distribution using FEM.

이동하면 와전류가 유기되는데 이 와전류에 의하여 가열이 된다. 이때 안쪽에 위치하는 피열물은 양쪽의 바깥부분에서의 자속의 누설로 인하여 전체적으로 일정한 온도를 유지하지 못하고 피열물 양쪽에서의 온도가 중앙에서의 온도보다 낮게 된다. 따라서 이러한 피열물 표면에서의 온도 불평형을 막기 위하여 중앙부분의 직경을 양쪽 바깥 부분보다 작게 하였으며, 입력 전류에 있어서도 피열물의 표면에서의 고온 온도분포를 위하여 중앙에 위치한 권선은 양쪽에 위치한 권선보다 권선수와 입력 전류 작게 하여준다.

1. 서 론

산업이 발달하면서 전기공학의 응용은 광범위한 분야로 확산되고 있다. 그 중에서도 특히 전기를 이용한 가열 분야는 화석연료에 의한 기존의 가열법에 비하여 장점이 매우 커서 최근에 금속 야금을 포함한 각 분야에서 광범위하면서도 급속하게 응용이 확산되고 있다. 페러데이의 의해 1831년에 발견된 전자기 유도 현상은 전류가 1차 측에 시간에 따라 변하는 전류를 인가하면 2차 측에 전류가 유도되는 현상을, 전동기, 발전기, 변압기 등에 이용하였다. 이러한 기기들은 와전류에 의한 열손실의 발생으로 인하여 효율 및 운전성능을 악화시킨다. 변압기나 전동기의 철심을 얇은 규소강판으로 적층한 것도 이런 열손실을 최소로 줄이기 위한 노력이다. 그러나 변압기나 전동기의 경우와는 달리 와전류에 의한 열손실을 응용한 것이 유도가열이다. 유도가열은 산업현장의 여러 분야에서 활용되고 있다. 즉, 금속의 열처리, 용융 등은 물론, 급속 변형을 위한 가열 등에 많이 쓰여왔고, 현재는 특수 포장분야, 칼라인쇄공업, 섬유공업 등에서 유도 가열이 필수적으로 이용되고 있다. 그 중에서도 유도 히팅의 유용성은 다양한 방법으로 확산되어 여러 산업에 쓰이고 있다. 이렇게 국내외적으로 넓은 범위에 걸쳐 유도 가열이 필수적으로 다량 사용되고는 있지만 국내에서는 생산은 물론, 개발 된바가 없는 부가가치가 큰 분야이다.

본 논문에서는 금속의 표면 열처리 및 표면 피로 시험 등 각종 금속의 가열에 필요한 유도 가열기를 설계, 제작하기에 앞서 유도가열의 기본이 되는 자기회로 및 자속분포 특성, 기저력, 와전류의 분포, 가열 특성에 관하여 해석적 방법과 FEM에 의하여 해석을 하여 검토, 분석을 하였다.

2. 구 조

유도가열은 그림 1과 같은 구조를 한다. 즉 코일에 전류를 흘리면 안쪽 자기회로에 자속이 발생하여 측면의 공극을 건너서 안쪽부분의 자성체인 피가열물 부분으로

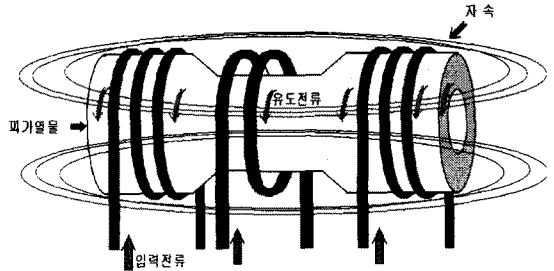


그림 1 유도가열의 구조 및 자속분포

그림 2는 변압기와 유도가열의 등가회로를 나타낸 것이다. 그림 (a)는 일반적인 변압기의 등가회로를 나타낸 것이며, 그림 2(b)는 유도가열을 변압기 등가회로로 표현한 것으로 바깥쪽의 전류코일도체는 1차측이 되고 안쪽의 피열물 부분은 2차측이 된다. 피열물은 저항 Z_{load} 를 부하로 하는 변압기의 2차회로로 볼 수가 있다. 즉, Z_{load} 에서 전력이 열로 변환되어 피열물을 일정온도까지 일정시간 내에 가열하여 유지하게 된다. 한편 주파수가 높아지면 와전류의 표피작용으로 와전류가 표면에만 분포하며, 열도 표면에만 발생하게 된다.

3. 기본 특성식

실제로 가열이 되어야 하는 유도 가열 부분은 그림 1에서 보는 바와 같이 전체 구조가 원통형이지만 해석을 용이하게 하기 위하여 가열해야 할 부분을 축방향으로 잘라 펼쳐서 그림 2(c)같은 4각 단면 slab인 등가부하로 취급하여 특성을 해석하기로 한다.

식(1)은 슬래브의 내부에서의 자계 분포에 관한 지배 방정식으로 전자기이론을 적용하여 유도하게 된다.

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (1)$$

공급전원이 정현적인 시간변화를 하므로 편미분 방정식

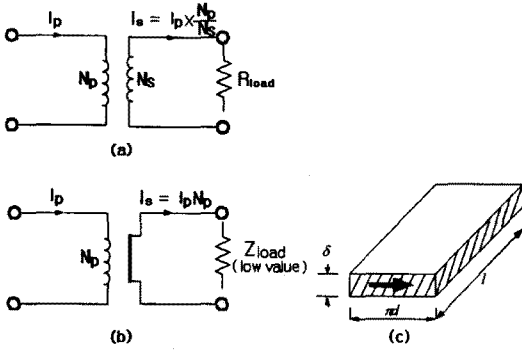


그림 2 유도가열의 해석모델
(a) 변압기의 등가회로 (c) 유도 가열의 등가회로
(c) 등가 부하 슬랩

인 식 (1)의 일반해는 $H_x = H_x(y) \cos \omega t$ 의 형태인데, 여기서, $H_x(y)$ 는 깊이 y 방향으로의 자계의 x 성분의 값이다. 따라서 식 (1)은 아래와 같은 상미분 방정식으로 표현이 된다.

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} - \frac{\mu}{\rho} j \omega H_x = 0 \quad (2)$$

이다. 여기서 $\alpha^2 = \mu \omega / 2\rho$ 라하면, 식 (2)의 일반해는 식 (3)과 같다.

$$H_x = A_1 \exp(ky) + A_2 \exp(-ky) \quad (3)$$

여기서 A_1, A_2 는 적분상수이므로 경계조건에 의하여 구하게 된다. 즉

① $y = \infty$ 에서, H_x 는 유한하므로 $A_1 = 0$ 이다.

② $y = 0$ 에서, $H_x = H_{0m} \exp(j\omega t)$

따라서 일반해 식(3)은 식 (4)로 표현된다.

$$H_x(y) = H_{0m} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (4)$$

여기서 침투깊이는 식(5)와 같이 정의된다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (5)$$

또한 슬랩에서의 와전류밀도는 Maxwell 방정식에 의하여 식(6)과 같이 표현이 된다.

$$J_z(y) = J_{0m} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (6)$$

그러므로 슬랩에서의 전력 손실은 식(7)과 같은 포인팅 벡터를 이용하여 구하게 된다.

$$P = \text{Re}(E \times H^*) \quad (7)$$

여기서 Re 는 실수부, *는 공액복소수를 의미한다. 또한 전계의 세기는 ohm의 법칙의 미분형에 의하여 식(8)과 같이 된다.

$$E_0 = \rho J_0 = \sqrt{2} \rho H_{0m} \alpha \exp[j(\omega t + \pi/4)] \quad (8)$$

따라서 식(4)와 식(8)에 의하여 식(8)은 식(9)와 같이

된다.

$$P = \text{Re} \left(\sqrt{2} \rho H_{0m}^2 \alpha \frac{(1+j)}{\sqrt{2}} \right) = \rho H_{0m}^2 \alpha = \rho H^2 / \delta \quad (9)$$

또한, 무효전력도 포인팅정리에 의하여 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$Q = \text{Im}(E \times H^*) = \text{Im} \left(\sqrt{2} \rho H_{0m}^2 \alpha \frac{1+j}{\sqrt{2}} \right) = \rho H_{0m}^2 \alpha \quad (10)$$

로 주어진다. 여기서 Im 은 허수부를 의미한다.

4. 해석 모델

4.1 해석 모델

FEM을 이용해 유도가열의 자속분포, 와전류분포, 열분포등의 주요특성을 좌우, 상하 대칭인 점을 감안하여 그림.1과 같은 모델의 1/4인 그림. 3과 같이 설정하였다. 표 1은 1차측 권선의 사양을 나타낸 것이다. 피가열 물의 양 단부는 누설자속으로 인하여 중앙부보다 온도가 낮아진다. 따라서 이를 보완하기 위하여 양단부의 1차측 권선수를 중앙부 보다 증가시켰다.

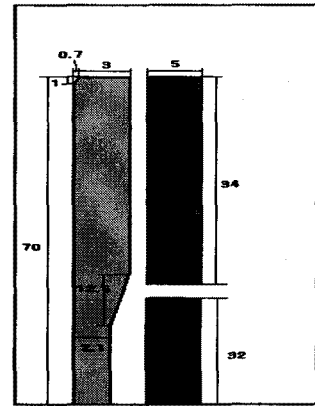


그림3. 유도히팅의 FEM 해석모델

표. 1 1차측 권선사양

	중앙권선	양끝권선
권선 직경	2 [mm ²]	2 [mm ²]
권선 수	200	230
입력전류	7[A]	7.5[A]

4.2 지배방정식

그림.3의 모델의 전자기특성을 해석하기 위하여 아래와 같은 전자기 이론을 적용하기로 한다.

$$\nabla \times \hat{H} = \hat{J}_0 \quad (11)$$

$$\hat{B} = \mu \hat{H} \quad (12)$$

$$\hat{B} = \nabla \times \hat{A} \quad (13)$$

또한 식(11)과 식(12),식(13)에 의하여 아래와 같은 벡터포텐셜에 관한 지배방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} \right) - j\omega \sigma (\vec{A} - \overline{\vec{A}}) = -\vec{j}_0 \quad (14)$$

여기서 $-j\omega \sigma (\vec{A} - \overline{\vec{A}})$ 는 와전류 밀도이다.

4.3 해석 결과

그림 4는 FEM에 의하여 계산한 표피효과 특성을 나타내고 있다. 그림 4에서 보듯이 입력 주파수가 증가할수록 피열물에서 유도되는 와전류는 표면에 집중하게 된다. 따라서 금속의 표면 열처리를 위하여서는 피열물의 가열하고자 하는 표면 두께에 따라서 적절한 입력주파수를 계산하여 선택하여야한다. 그림 5는 입력 주파수가 1kHz일 때 피열물 표면에서 유도되는 와전류 밀도 분포를 나타낸 것이다. 그림 5에서 보듯이 피열물의 단부 쪽으로 갈수록 누설자속이 증가하여 유도되는 와전류 밀도의 분포가 중앙에 비하여 급속히 감소하게 된다. 따라서 피열물을 일정한 온도로 가열하기 위해서는 양단부에서의 1차측 코일의 길이를 피열물 보다 길게하여 누설자속으로 인한 와전류밀도의 감소를 막을 수 있다.

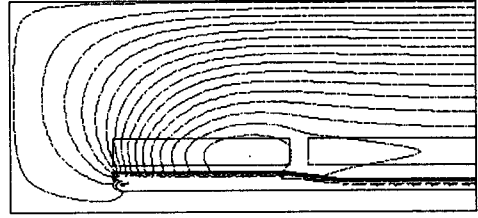


그림 6 피열물의 자속분포

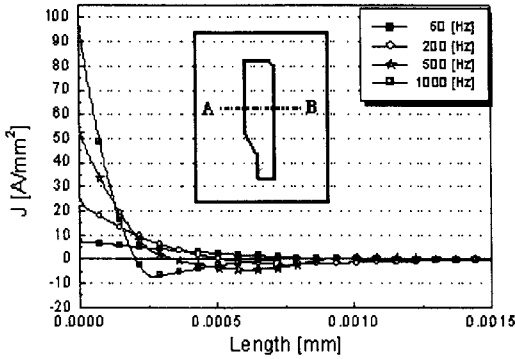


그림 4 주파수에 따른 와전류 분포

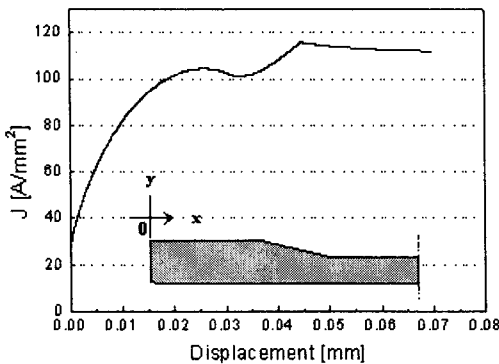


그림 5 피가열물 표면에서의 와전류 분포

그림 6은 입력주파수 1kHz에서 발생하는 자속분포를 나타낸 그림이다. 그림 6에서 보듯이 유도되는 자속이 피가열물의 표면에 집중되어있음을 알 수 있다. 또한 단부쪽에서의 자속이 누설되어 끝단으로 갈수록 표면에서의 자속 분포가 감소함을 알 수 있다.

그림 7은 입력 주파수에 따른 평균손실을 나타낸 것이다. 그림 7에서 알 수 있듯이 입력 주파수가 증가함에 따라 피열물에서의 온도와 직접적인 관계가 있는 평균 손실이 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

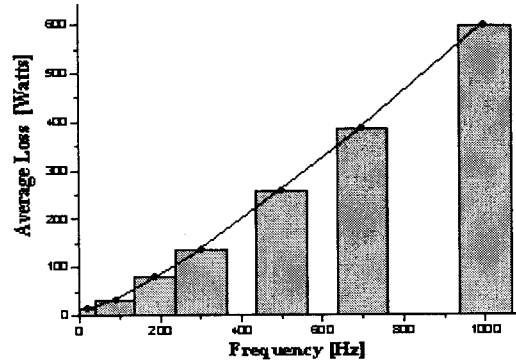


그림 7 입력 주파수에 따른 평균손실

5. 결론

본 논문에서는 금속의 열처리, 피로시험, 금속 변형을 위한 가열 등에 많이 쓰이고 있는 유도가열기를 설계, 제작하기에 앞서 요구되어지는 각종 전자기적 특성을 연구, 검토하였다. 우선 FEM을 이용하여 인가 주파수에 따른 피열물에서의 와전류 분포 및 표면에서의 와전류 분포를 해석하였으며, 1차측 입력전류에 의하여 발생하는 자체특성을 해석하였다. 또한 입력주파수에 따른 평균 손실을 해석하여 피가열물에서 발생하는 온도를 예측할 수 있는 기반을 확립하였다.

앞으로 유도가열기의 설계, 제작에 있어서 요구되어지는 각종 전자기적 특성에 대하여 보다 정밀한 연구가 필요하며, 피열물의 균일한 온도분포를 위하여 1차측 권선의 형상과 주파수 및 입력전류에 대하여 많은 연구를 해야할 것이다.

(참 고 문 헌)

- (1) S.Zinn and S.L. Semiatin, I.L. Harry and R.D. Jeffress. "Elements of Induction Heating", EPRI, ASM, 1988
- (2) C. James Erickson, "Handbook of Electrical Heating for Industry", IEEE Press, 1995
- (3) Karol Anisericz et al "A New Concept for Finite Element Simulation of Induction Heating of Steel Cylinders" IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.33, No.4, pp.893-897, July/August, 1997.
- (4) N.R. STANSEL "INDUCTION HEATING" McGRAW-HILL BOOK COMPANY, Inc, 1949