

교류 유도가열의 특성해석

장식명, 진상구*, 조성국, 박희창*
충남대학교, 한국기계연구원*

Three-Dimensional Analysis of Induction Heating Roll

S.M.Jang, S.K.Jin*, S.K.Cho, H.C.Park*
Chungnam National University, KIMM*

Abstract - The Induction heating is used in various industry and ever-increasing number of applications. The heating roll, which is a kind of induction heating, widely used in curing of coatings and fiber industry.

In this papaer, we analyzed thermal characteristic of induction heating roll by three dimensional eddy-current analysis. Using this analytic results, We could predict the thermal distribution of induction heating roll

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 전기공학의 응용분야는 빠르게 증가하는 추세에 있다. 시간에 따라 변하는 전류를 1차측에 인가하면 2차측에 와전류가 유도되는 현상을 패러데이가 발견한 이래, 이 전자유도 현상을 응용한 전동기, 발전기, 변압기등을 통해 전력공급 및 전기 및 기계적 에너지 변환장치로 사용하고 있다. 이러한 교류용 전기기기들은 와전류에 의해 발생된 열손실로 인한 효율저하와 운전성능의 악화를 야기한다. 이 와전류는 철심이 두꺼울수록 증가하기 때문에 이러한 손실을 저감하기 위한 목적으로 얇은 규소강판을 성층하여 사용한다. 이와는 달리, 유도가열은 오히려 와전류에 의한 metal의 열손실을 이용하는 것으로써, 특수 포장분야, 칼라 인쇄공업, 섬유공업 분야등에 사용되고 있으며, 일반적으로, 금속은 그 용도에 적합한 가열처리를 하여 사용하므로, 금속의 열처리 분야 및 유도가열을 이용한 유도로(Induction Furnace)등 다양한 방법과 형태로 여러 산업현장에서 사용되고 있다. 전자유도 현상을 응용한 히팅롤을 사용하여 고품질의 제품을 만들기 위해서는 피가열물(work-piece)의 표면에서 ±1 °C 정도의 균일한 온도분포를 유지하는 것이다. 본 논문에서는 유도가열의 등가회로를 적용한 자기회로 및 자속 분포특성, 기자력, 와전류의 분포, 가열특성등에 관한 해석적 방법과 3차원 유한 요소법을 이용한 피가열물 표면에서의 와전류 해석을 하였고, 또한 열해석을 통한 온도분포를 도시하여 유도가열 특성을 효과적으로 분석하였다.

2. 유도가열 모델 및 원리

유도가열의 모델은 그림 1과 같은 구조를 갖는다. 코일에 교번 전류를 인가하면 내부 자기회로에 자속이 발생하여 측면의 공극을 거쳐 바깥부분의 자성체인 히팅롤 부분으로 이동하여 자속 경로를 형성하게되는데, 패러데이의 전자기 유도 현상에 의해 유기 기전력이 발생되고, 이 기전력에 의해 와전류가 히팅롤의 표면에 흐르게 되며 주열을 발생시킨다. 즉 이 손실에 의해 피가열물이 가열되는 것이다. 이때 바깥부분인 히팅롤이 회전을 하면서 피가열물의 가열 및 온도를 일정하게 유지 하도록 한다.

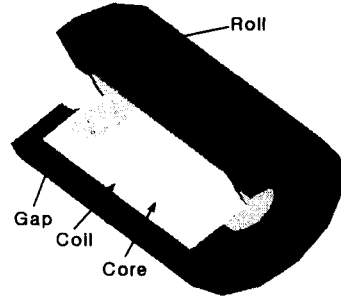


그림 1 유도가열 해석 모델

그림 2(a)는 히팅롤을 변압기 등가회로로 표현한 것으로, 안쪽의 전류 코일도체는 1차측이 되고, 바깥쪽의 히팅롤 부분은 2차측 회로가 된다. 즉 피가열물인 히팅롤 부분은 저항 Z_{load} 를 부하로 하는 변압기의 2차 회로로 볼수가 있다. 즉, Z_{load} 에서 전력이 열로 변환되어 피가열물을 일정 시간내에 일정 온도까지 가열한다. 한편 주파수가 높아지면 와전류의 표피 효과(skin effect)에 의해 침투깊이가 감소하여 표면에만 분포하여, 열도 표면에서 발생하게 된다. 그림 2(b)와 같이 실제로 가열이 되어야 하는 회전을 부분은 원통형 구조이나, 해석을 용이하게 하기 위해 피가열 부분을 잘라 축방향으로 전개하여 4차 단면 slab인 등가부하로 취급하여 특성을 해석하였다.

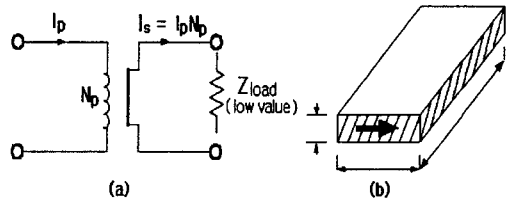


그림 2 히팅 롤의해석모델

(a)변압기 등가회로 (b)등가 부하 슬랩

3. 기본 특성식 및 해석 사항

3.1 기본 특성식

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

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial H_x}{\partial t} \tag{1}$$

공급전원이 상용전원이어서 정현적인 시간변화를 하므로 편미분 방정식인 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 $a^2 = \mu\omega/2\rho$ 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 구하게된다. 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

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

여기서 침투깊이는 식(5)와 같이 정의 된다.

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

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

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

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.

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

따라서 식(4)와 식(8)에 의하여 식(8)은 식(9)와 같이 된다.

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

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

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

로 주어진다.

여기서 Im 은 허수부를 의미한다.

3.2 등가 회로

히팅롤 특성 해석을 용이하게 하기위해, 그림 3과 같은

간이 등가회로를 이용하였다.

그림 3에서의 각 회로정수는 다음과 같다.

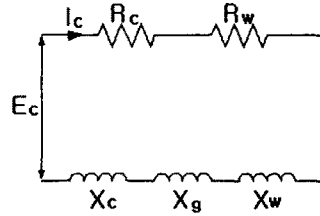


그림 3 히팅롤의 간이등가회로

E_c : 인가 전압
 I_c : 코일 전류
 R_c : 코일 저항
 R_w : 히팅 롤의 저항
 X_g : 공극 리액턴스,
 X_c : 코일 리액턴스
 X_w : 히팅 롤의 리액턴스

3.3 해석 모델의 사양

히팅롤 및 코어의 사양은 표 1과 같으며, 해석에 사용된 히팅롤의 사양은 표 2와 같다.

표 1 해석 모델의 사양

히팅롤 재질	Steel
히팅롤 비투자율	4,000
코어 재질	규소강판
코어의 비투자율	1,000
입력 전압	220V
입력 주파수	60Hz
상승온도	상온으로부터 300 °까지 30분 가열

표 2 히팅롤 해석 파라미터 (mm)

바깥쪽 지름	215
안쪽 지름	170
두께	22.5
길이	600
코일의 지름	4
공극의 길이	3
코어의 두께	10
코어의 안쪽 지름	110
코어의 바깥쪽 지름	130
턴수	300Turn
전류	38A
등가 저항	4.1168 Ω
등가 리액턴스	4.1168 Ω
역률	0.707

그림. 4는 유도가열 히팅롤의 해석 모델로 표 2에 제시된 기계적 사양을 갖고, 전류코일, 규소강판, 일반 철강으로 구성된다.

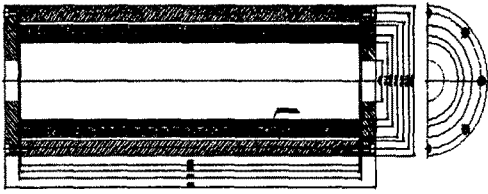


그림 4. 특성 해석용 히팅롤의 단면도

4. 유한 요소 해석

유한요소 해석 결과 자속은 그림 5와 같이 분포하며, 히팅롤의 3차원 와전류 분포 및 피가열부에서의 온도분포는 각각 그림 6, 그림 7과 같이 분포한다. 이러한 분포로부터 히팅롤의 양쪽 끝부분에서의 온도는 히팅롤의 중앙 부분에 비해 상대적으로 온도가 많이 낮음을 알 수 있다. 이것은 양쪽 끝부분에서의 열손실량이 상대적으로 크기 때문이며, 누설자속에 의한 영향인 것으로 사료된다.

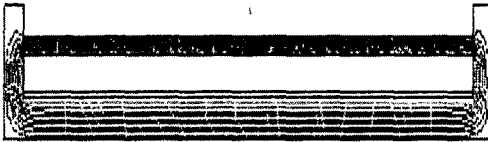


그림 5. 히팅롤의 자속 분포도



그림 6. 히팅롤의 와전류 분포도

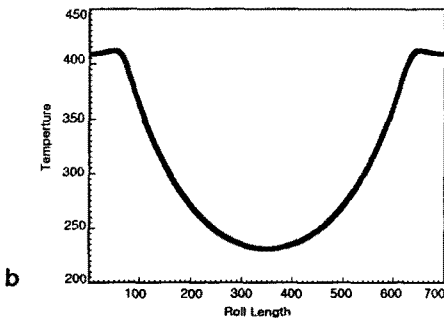


그림 7 피 가열부의 선형 온도 분포곡선

5. 결 론

금속의 표면에 열처리를 하게되면 기계적인 특성을 변화시킬수 있기 때문에 일반적으로 금속은 열처리 가공을 하게된다. 그러나, 이러한 가공 장치는 상대적으로 누설 자속이 많이 발생하기 때문에 역률이 현저히 감소한다. 반면에 유도 가열 히팅롤은 누설 자속을 최대한 줄이는 구조이므로 역률이 다른 가열장치에 비해 높고, 인쇄, 제지 및 펄프공업등의 응용분야에서 폭넓게 사용되고있다. 본 논문에서는 유도 가열의 기본적 특성인 자계, 자속

등을 해석적인 방법과 함께 3차원 유한요소법을 이용한 와전류 해석과 히팅롤 표면에서의 열분포를 해석, 결과를 제시하였다. 유도가열은 히팅롤의 도전율과 투자율에 따라 그특성이 변화하므로 용도에 적합한 특성을 갖는 가열물(billet)선택이 중요하며, 전체 길이가 증가함에 따라 히팅롤의 중앙 부분과 양끝단 부분에서의 온도차가 증가하여 표면에서의 온도가 분포가 불균일하게 됨으로, 향후 설계시 이러한 점에 대한 충분한 검토가 요구된다.

(참 고 문 헌)

- [1]N.R. STANSEL "INDUCTION HEATING" McGRAW-HILL BOOK COMPANY,Inc, 1949
- [2]C. James Erickson, "Handbook of Electrical Heating for Industry", IEEE Press, 1995
- [3]Karol Aniserowicz 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]TANROKU MIYOSHI,MUNEHICO SUMIYA, and IDEKI OMORI. "Analysis of an Induction Heating System by the Finite Element Method combined with a Boundary Integral Equation". IEEE Trans.on Magnetics, Vol. MAG -23, No.2. pp1.827-1987, March, 1987.