

유도가열 히팅롤의 와전류 및 열해석

장석명, 조성국, 윤인기, 정상섭, 박희창*, 손영수*
충남대학교, 한국기계연구원*

Eddy Current and Thermal Analysis of Induction Heating Roll

S.M. Jang, S.K. Cho, I.K. Yoon, S.S. Jeong, H.C. Park*, Y.S. Son*
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 threedimensional eddy-current analysis. Using this analytic results, We could predict the thermal distribution of induction heating roll

에 위치하고 있으며 코일의 내부에 코어가 위치하고 있다. 와전류에 의해 피 가열물을 가열시키는 부분은 외부에 위치하고 있는 롤 Slab이다. 표1은 인덕션 히팅롤의 설계 및 제작을 위한 각종 설계파라미터를 나타낸다.

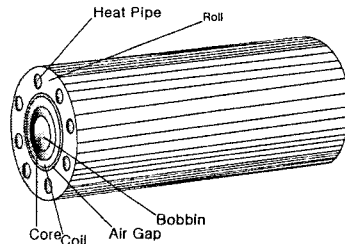


그림 1 인덕션 히팅롤의 구조

1. 서 론

전기기기들은 와전류에 의해 발생하는 열손실로 인하여 효율의 저하, 운전 성능의 악화등의 문제가 발생되기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위하여 전기 및 자기회로의 설계 및 각 기기에 적절한 구조, 재질등에 관한 연구개발이 이루어져 왔다. 또한 일반 자성체 철심을 그대로 사용하는 것보다는 얇은 규소강판을 성층하여 사용하는 것도 또한 중요한 파라미터가 된다.

그런데 유도가열은 와전류에 의하여 발생하는 열을 적극적으로 이용하는 것으로서, 특수 포장분야, 칼라 인쇄공업, 섬유공업 분야등에 널리 응용되고 있다. 또한 급속의 열처리 분야 및 유도가열을 이용한 유도로(Induction Furnace)등등의 산업현장에서 유도가열 방식은 광범하게 을 다양한 방법과 형태로 광범위한 산업현장에서 필수적으로 사용되고 있다.

전자유도 현상을 응용한 히팅롤을 사용하여 고품질의 제품을 만들기 위해서는 피가열물(work-piece)의 표면에서 ±1 °C 정도이상의 균일한 온도분포를 유지하는 것이 필수적이다. 그래서 히팅롤 회사마다 특수한 방법으로 온도분포를 균일하게 하고자 노력을 하고 있다.

본 논문에서는 인덕션 히팅롤의 자속 분포 및 와전류 분포특성에 대하여 검토하였고, 1차측과 2차측에서 각각 발생하는 손실을 비교하였으며, 또한 2차측 피가열물에 Heating pipe를 삽입하였을 때 히팅롤 표면의 온도 분포에 대한 효과를 검토하였다.

2. 본 론

2.1 인덕션 히팅롤 구조

유도 가열의 모델은 그림1과 같은 구조를 갖는다. 코일에 교번 전류를 인가하면 내부 자기 회로에 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 주열 열을 발생시킨다. 즉 이 열발생에 의해 피가열물이 가열이 된다. 이때 외부에 위치한 히팅롤이 회전을 하면서 피 가열물의 가열 및 온도를 일정하게 유지 하도록 한다. 그림1은 인덕션 히팅롤의 개괄적인 구조를 보여주는 그림이다. 교류 전류가 인가되는 코일은 롤의 내부

표 1 해석 모델의 사양

히팅 롤 재질	Steel
히팅롤 비투자율	4.000
코 어 재 질	규소강판
코어의 비투자율	1.000
입 력 전 압	220V
입 력 주 파 수	60Hz
상 승 온 도	상온으로부터 300 °까지 30분 가열
롤의 외반경(mm)	175
롤의 내반경(mm)	113
롤의 두께(mm)	62
전 체 길 이(mm)	806
코일 의 지름(mm)	4
공극의 길이(mm)	4
코어의 두께(mm)	10
코어의안쪽지름(mm)	80
코어의바깥지름(mm)	90
턴 수	147
전 류(A)	150[A · Turn]
코일의 저항(Ω)	2.3 Ω

2.2 특성 방정식

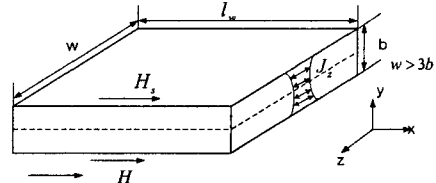


그림2 2차측 Slab(롤)에 대한 등가 해석 모델
2차측 등가부하 Slab에 대해서 $w \gg b$ 이라고 가정하고

w의 선단 부분에서의 end effect를 무시한다고 가정하면, 그림2에서 보는 바와 같이 2차측 직사각 Slab에 대한 전자기 지배 방정식을 다음 식(1)과 같이 얻을 수 있다.

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

여기서 식(1)의 지배방정식으로부터 식(2)와 같은 Slab 내부의 자계 식을 유도할 수 있다.

$$H_x(y) = \frac{\cosh(1+i)\alpha y}{\cosh(1+i)ab/2} H_s \quad (2)$$

식(2)에서 상수 $\alpha = \sqrt{\mu\omega/2\rho}$ 이고, H_s 는 $H_{sm}\exp(j\omega t)$ 의 실수치이고 Slab 표면에서는 자계의 세기를 의미한다. 그리고 2차측에서 단위 면적당 발생하는 자속의 분포는 앞서 구한 $B(y)$ 를 dy 에 대해 적분을 하여 구할 수 있고 식(3)과 같다.

$$\Phi = \frac{2\mu H_{sm}}{\sqrt{2\alpha}} \tanh(1+i) \frac{ab}{2} \cos(\omega t - \pi/4) \quad (3)$$

또한 Slab내에서의 와전류밀도는 $J = \nabla \times H$ 이므로 이 식으로부터 식(3)과 같이 유도된다.

$$J_y(y) = -kH_s \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\cosh(1+i)\alpha y}{\cosh(1+i)ab/2} \right] \quad (4)$$

여기서 $k^2 = 2j\alpha^2$ 이고 침투깊이는

$$\delta = 1/\alpha = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (5)$$

이다. 식(4)로부터 2차측에서 발생하는 와전류는 침투 깊이와 관련이 있음을 알 수 있다. 그리고 등가Slab에 대한 단위 면적당 열발생은 Slab의 두께가 침투깊이보다 훨씬 크다고 가정하면, 식(6)과 같이 유도할 수 있다.

$$p = \frac{1}{2} \int_{b/2}^{-b/2} \rho |J_m|^2 dy (\times 1 \times 1) \\ = \rho \alpha^2 b H_{sm}^2 \frac{1}{ab} \left[\frac{\sinh ab - \sin ab}{\cosh ab + \cos ab} \right] \quad (6)$$

그러므로 2차측 Slab에서 발생하는 열 발생량(열손실)은 식(6)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_w = (l_w w b) \mu f \pi H_{sm}^2 q \quad (7)$$

여기서 $q = \frac{1}{ab} \left[\frac{\sinh ab - \sin ab}{\cosh ab + \cos ab} \right]$ 이다. 여기서 q 는 히팅 비율을 정의하는 양이고 만약 $b/\delta > 8$ 이라면 p 는 δ 와 $\frac{1}{\sqrt{f}}$ 에 비례하므로 단위 체적당 전력값은 \sqrt{f} 에 비례하고 결과적으로 p 의 값은 $H_s^2 \sqrt{\pi f \mu \rho}$ 와 같게 된다.

2.3 열손실과 온도와의 관계

이절에서는 앞 절에서 구한 열손실(열발생량)과 온도와 관계를 유도해 보기로 한다. 만약 Slab의 양측 표면에 일정한 크기의 면전력밀도가 존재하고 외부열손실이 전혀없다고 가정하면, Slab내의 모든 손실은 열로 저장

된다. 이럴 경우에

$$p = \frac{\theta_m V c \gamma}{2tS} = \frac{\theta_m b(c\gamma)}{2t} \quad (8)$$

그림2에서 직사각 Slab에 대한 직각 좌표계에서의 열유속 방정식은

$$(c\gamma) \frac{\partial \theta}{\partial t} - k \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = p_v \quad (9)$$

여기에서 $(c\gamma)$ 는 물체의 비열 ($Jm^{-3}K^{-1}$)이고 k 는 열전도계수이고 p_v 는 단위 체적당 입력 전력값이다. 식(9)로부터

$$(\theta - \theta_m) = \frac{p}{2k} \left[\frac{2y^2}{b} - \frac{\cosh 2\alpha y + \cos 2\alpha y}{Y(ab)} \right] + Constant \quad (10)$$

여기서

$$Y(ab) = \sinh ab - \sin ab \quad (11)$$

식(10)으로부터 피 가열물인 Slab의 밀변으로 부터 표면까지의 온도차를 유도할 수 있다.

1차측 코일과 코어 및 기타 구조물에서 발생하는 손실에는 코일의 저항손실, 적층 규소강판의 와류손 및 히스테리시스손이 있다. 2차측에서 발생하는 손실은 피 가열 Slab의 와류손과 히스테리시스손이 있다. (단, 해석시에서는 히스테리시스손 생략하기로 한다.)

2.5 해석 결과 및 검토

인덕션 히팅롤의 1/4단면에 대한 축방향 FEM 자계해석은 그림3과 같다. 자속선은 피 가열 Slab의 공극과 맞닿아 있는 안쪽 표면에서 발생하는 자속의 양이 롤의 외부표면에서 발생한 자속의 양보다 매우 크게 나타났다. 그리고 코일과 코어와 보빈에서는 매우 적은 양의 자속이 분포하였다. 적층 규소강판과 보빈은 투자율이 매우 적어 채교 자속의 양이 매우 작아 와전류에 의한 열손실이 투자율이 매우 큰 롤보다 매우 적게 나타난다.

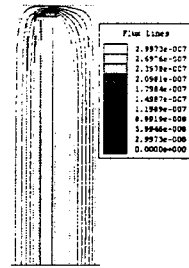


그림 3 히팅롤의 자속 분포 특성

롤의 표면에서 발생하는 와전류 분포 FEM해석하여 그림5와 같은 와전류 분포특성을 구하였다. 그림5의 곡선 A는 그림4의 직선A에서의 코일과 가까운 롤의 밀면으로부터 롤의 외부표면까지 깊이에 따른 와전류 분포를 나타낸다. 그리고 그래프의 곡선 B는 직선B에 대한 깊이 방향의 와전류 분포특성을 나타낸다. 롤의 양 측면에서 구조적으로 누설되는 자속의 양이 많기 때문에 와전류 역시 적게 나타난다. 그리고 침투 깊이의 영향을 받

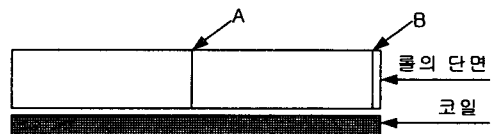


그림 4 와전류 및 손실해석의 해석 모델
 아 코일위의 공극과 맞닿아있는 표면근처에 와전류가 많
 이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

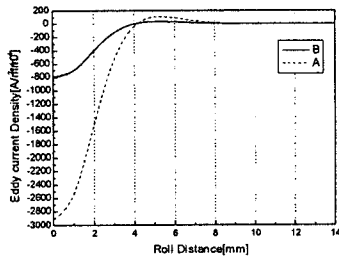


그림5 롤의 깊이 에 따른 와전류 분포

와전류에 의한 손실을 FEM해석을 통하여 검토하였다.
 그림6는 그림4의 해석 모델에서 B단면에 대한 깊이 방
 향에서 와전류에 의한 손실을 나타낸 그림이다. 그림4에
 서 롤의 하단 표면에서 거의 모든 열이 발생하여 롤의
 외부 표면으로 전도되는 것을 확인 할 수 있다. 열의 발
 생 역시 롤의 외부 중앙 표면이 양 측면에서 발생한다는
 것을 그림6과 그림7로부터 확인 할 수 있다.

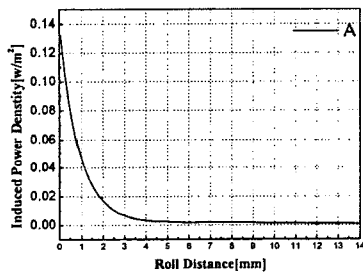


그림6 히팅롤의 B단면에서 유도된 전력 손실 밀도

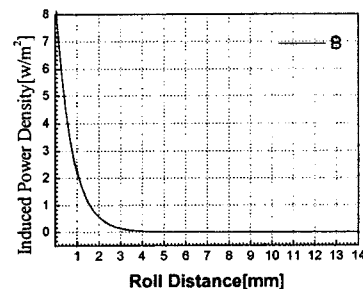


그림 7 히팅롤의 A단면에서 유도된 전력손실 밀도

FEM해석을 통하여 1차측의 코일과 2차측의 히팅롤에
 서 발생한 열손실을 계산하여 표2에서와 같은 결과를 얻
 었다. 주어진 전류와 주파수에 대하여 1차측 코어의 와
 전류 손실과 저항 손실은 2차측의 히팅롤의 손실에 비하
 여 무시할 수 있을 만큼 작다는 것을 확인하였다.

표2 1차측과 2차측에서 발생한 손실비교

	1차측 발생손실	2차측 발생손실
손실값[w]	4.7	2310

해석모델에 대한 2차원 FEM해석을 통하여 Heat Pipe
 를 넣었을 때 어떠한 온도 분포 특성이 나타나는지에 대

해서 검토하였다. 그림6에서 온도분포를 위한 측정라인
 을 나타내었다. 측정라인에서 Heat Pipe가 없을 때 중앙
 부분과 외부에서 약 0.4℃의 온도차가 낮으며 Heat Pipe
 를 삽입하였을 때 0.5℃의 온도차가 나타남을 확인하였
 다.

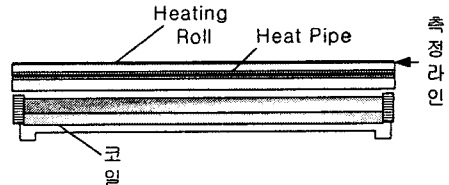


그림 8 히팅롤 열해석 단면 모델

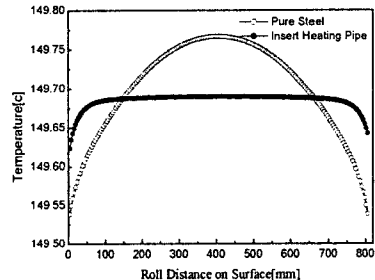


그림9 히팅 롤 길이 방향의 온도 분포 특성 곡선
 (롤의 외부 표면 위쪽 1mm 부분)

6. 결 론

본 논문에서는 인덕션 히팅롤에서의 기본적인 특성인
 자계분포를 해석적인 방법과 함께 2차원 유한요소법을
 이용하여 검토하였다. 그리고 교류 자계에 의하여 2차
 측 히팅롤의 Slab에서 발생한 와전류 분포를 조사하여
 침투깊이에 따른 와전류가 어떻게 나타나는가를 확인하
 였다. 그리고 와전류에 의한 열손실을 FEM해석하여 1
 차측에서 발생한 손실과 2차측에서 발생한 손실을 비교
 검토하였다. 또한 히팅롤 표면에서의 길이 방향의 열
 분포특성을 FEM으로 2차원 해석을 하여 Heat Pipe가
 존재할때와 없을때의 온도분포를 비교하여 Heat Pipe에
 의해 롤 표면의 온도가 얼마나 균일하게 분포하게 되는
 가에 대해서 정량적으로 조사를 하였다.

이로써 온도분포가 균일한 인덕션 히팅롤의 설계 및 제
 작에 참고가 될 기본자료를 도출하는 방법을 제시하였
 다. 앞으로 성능이 더욱 우수한 히팅롤의 개발을 위해
 서는 각 부분의 재질에 따른 열발생, 효과적인 Heat
 Pipe의 구조 및 위치, 개수를 적절히 하는등의 이론적·
 실험적인 연구를 해야 만 한다.

(참 고 문 헌)

- [1]J.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 Anisierowicz 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]Taakoru, and Ideki Omori "Analysis of an Induction Heating System by he Finite Element Method combined with a Boundary Integral Equation". IEEE Trans.on Magnetics, Vol. MAG-23, No.2. pp1.827-1987, March, 1987.