

유도형 히팅롤의 설계 및 특성 해석

장석영, 양현섭, 정상섭, *박희창, *박찬일,
충남대학교, *한국기계연구소

Design and Analysis of Induction Heating Roll

S.M.Jang, H.S.Yang, S.S Jeong, *H.C.Park, *C.I.Park
Chunnam 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.

We designed and manufactured heating roll that in order to distribute uniform temperature on the roll's surface. Then Heating roll's characteristic analysis was studied and performed the test of temperature distribution.

1. 서론

패러데이에 의해 1831년에 발견된 전자기 유도 현상은, 즉 전류가 1차측에 시간에 따라 변하는 전류를 인가하면 2차측에 전류가 유도되는 현상을, 전동기, 발전기, 변압기 등에 이용되었다. 이러한 기기들은 와전류에 의한 열손실의 발생으로 인하여 효율 및 운전성능을 악화시킨다. 국내에서 이런 열손실을 줄이기 위한 많은 노력을 해왔다. 변압기나 전동기의 철심을 얇은 규소강판으로 적층한 것도 이런 열손실을 최소로 줄이기 위한 노력이다. 그러나 변압기나 전동기의 경우와는 달리 와전류에 의한 열손실을 응용한 것이 유도 가열이다. 유도 가열은 산업현장의 여러 분야에서 활용되고 있다. 즉, 금속의 열처리, 용융 등은 물론, 금속 변형을 위한 가열 등에 많이 쓰여 왔고, 현재는 특수 포장분야, 칼라인쇄공업, 섬유공업 등에서 유도 가열이 필수적으로 이용되고 있다. 그 중에서도 히팅롤의 유용성은 다양한 방법으로 확산되어 여러 산업에 쓰이고 있다. 히팅롤을 이용해 고품질의 제품을 만들기 위해서 꼭 고려할 사항은 롤 표면에서 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 정도의 균일도를 유지하는 것이다.

따라서 본 논문에서는 현재에 여러 산업 분야야 활용되고 있는 히팅롤을 해석적인 방법과, 유한요소해석법을 이용하여 설계, 제작하였다. 제작후, 여러 가지 실험을 통하여 히팅롤의 특성을 알아 보고, 또한 히팅롤의 표면에 균등한 온도분포를 위한 방안을 찾고자 한다.

2. 유도 가열의 원리와 특성식

2.1 유도 가열의 원리

그림 1은 유도 가열의 원리를 보여준다. 피열물을 유도 코일이 감고 있는 구조이다. 먼저 유도 코일에 시간적으로 변하는 전류를 공급해주면, 패러데이의 전자기 유도 현상에 의하여 피열물에 $E=N\phi/I$ 의 유기 기전력이 발생되고, 이로 인해 와전류가 피열물에 흐르게 된다. 이 와전류는 표피효과에 따라 피열물에 존재 하게 되고, 피열물의 저항에서 $P=I^2R$ 의 손실을 만들게 된다. 이 손실에 의해 피열물은 가열이 되는 것이다.

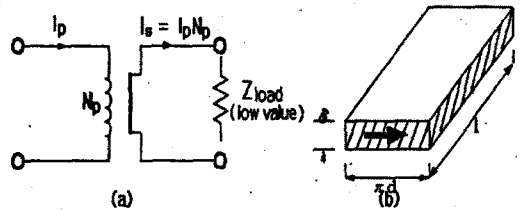


그림 1 유도 가열의 원리

2.2 기본 특성식

그림 2(a)은 히팅롤을 변압기 등가회로로 표현한 것으로 안쪽의 전류코일도체는 1차측이 되고 바깥쪽의 히팅롤 부분은 2차측이 된다. 즉, 피열물은 저항 Z_{load} 를 부하로 하는 변압기의 2차회로로 볼 수가 있다. 즉, Z_{load} 에서 전력이 열로 변환되어 피열물을 일정한도까지 일정 시간내에 가열하여 유지하게 된다. 한편 주파수가 높아지면 와전류의 표피작용으로 표면에만 분포하며, 열도 또한 표면에만 발생하게 된다.

그림 2(b)에서 보는 바와 같이 실제로 가열이 되어야 하는 회전롤 부분은 물론 전체 구조가 원통형이지만 해석을 용이하게 하기 위하여 가열해야할 부분을 축방향으로 잘라 펼쳐서 그림 2(b)같은 4각 단면 slab인 등가부하로 취급하여 특성을 해석한다.



(a) 변압기 등가회로 (b) 등가 부하 슬랩

그림 2 히팅 롤의 해석모델

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

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

$$a^2 = \mu\omega/2\rho \text{라 하면,}$$

지배방정식의 해는 다음과 같다.

$$H_x(y) = H_{0m} \exp(-ay) \cos(\omega t - ay) \tag{2}$$

여기서 침투깊이는 식(3)와 같이 정의된다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (3)$$

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

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

슬랩에서의 손실은 포인팅 벡터 이론을 적용하면 다음과 같다.

$$P = \operatorname{Re} \left(\sqrt{2} \rho H_{0m}^2 a \frac{(1+j)}{\sqrt{2}} \right) \\ = \rho H_{0m}^2 a = \rho H^2 / \delta \quad (5)$$

또한, 무효전력도 포인팅정리에 의하여 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$Q = \operatorname{Im}(E \times H^*) = \operatorname{Im} \left(\sqrt{2} \rho H_{0m}^2 a \frac{1+j}{\sqrt{2}} \right) \\ = \rho H_{0m}^2 a \quad (6)$$

로 주어진다.

여기서 Im 은 허수부를 의미한다.

3. 설계 파라미터 및 제작

(1) 요구사항

히팅롤의 설계시 요구사항은 아래와 같다. 일반 철로 이루어진 히팅롤을 상용전원에서 30분동안 300 °C까지 올릴 수 있는 용량으로 설계하였다.

표 1. 유도가열기의 요구 설계 사양

재료	Steel
비투자율	4,000
코어의 재료	규소강판
코어의 비투자율	10,000
입력 전압	220V
입력 주파수	60Hz
상승온도	상온으로부터 300 °까지 30분동안에 가열

(2) 설계 파라미터

표 2는 주어진 표1의 요구사항을 만족하도록, 설계된 히팅롤의 설계파라미터를 정리한 것이다.

표 2. 히팅 롤 설계 파라미터

바깥쪽 지름	0.215m
안 쪽 지름	0.170
두께	0.0225m
길이	0.6m
코일의 지름	0.004m
공극의 길이	0.003m
코어의 두께	0.01m
코어의 안쪽 지름	0.110m
코어의 바깥 지름	0.130m
턴수	300turn
전류	38A
등가 레지스탕스	4.1168 Ω
등가 리액탕스	4.1168 Ω
역률	0.707

(3) 제작도

그림. 4는 표. 2와 같은 설계 파라미터를 갖는 전자기 유도형 가열장치인 히팅롤을 실제 제작하기 위한 도면이다. 전류코일, 규소강판, 일반 철강으로 이루어진다.

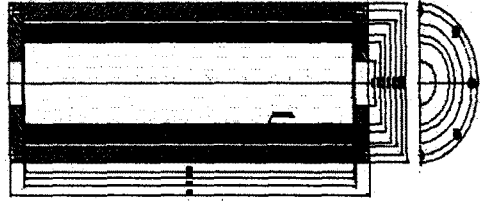


그림 3. 히팅롤의 제작단면도

히팅롤의 안쪽 구조는 전류 코일과 자속패스인 코어, 그리고 롤을 지탱하는 축으로 이루어진다. 다음은 전류 코일과 코어, 그리고 축을 나타내는 그림이다. 물론, 코어에서의 와전류손을 최대한 줄이기 위해 코어 부분은 적층구조로 되어 있다.

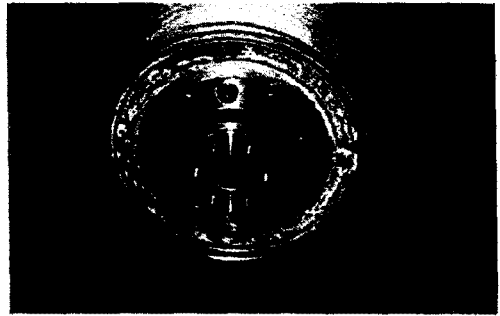


그림 4. 히팅롤의 안쪽 형태

4. 유한 요소 해석

(1) 해석 모델

FEM을 이용해 히팅롤의 자속분포, 와전류분포, 열분포등의 주요특성을 좌우, 상하 대칭인 점을 감안하여 그림.1과 같은 모델의 1/4인 그림.6과 같이 설정하였다.

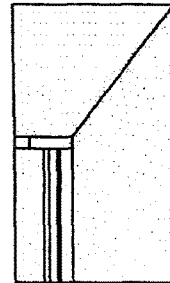


그림 5. FEM 해석모델

(2) 해석결과

그림.7은 FEM에 의하여 계산한 표피효과특성을 나타내고 있다. 바깥쪽 steel부분에 skin effect에 의한 자속 분포가 나타나고 있고, steel끝쪽에 누설 자속이 존재함을 알 수 있다. 그림 8.은 와전류 밀도의 분포로써, 롤부분의 방사방향으로 측정한 결과이다. 이는 또한 손실 분포도 이와 같은 형태를 나타낼 것이라 사료된다.

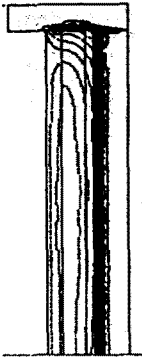


그림 6. 자속 분포도

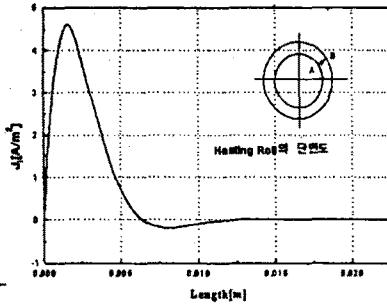


그림 7. 와전류 분포

그림 9.에서 보는 것과 같이 롤의 침투깊이에서, 와전류 밀도 또한 자속분포와 유사하게 나타나고 있다. steel에서 나타나는 손실은 와전류 제곱에 비례하기 때문에 와전류 밀도는 매우 중요하다. 이 결과를 요구사항에서 언급된 일정온도까지 정해진 시간에 균등가열을 하고, 온도를 계속 유지하게 하는 등의 조건을 만족하도록 최적설계를 위해 검토를 하게 된다.

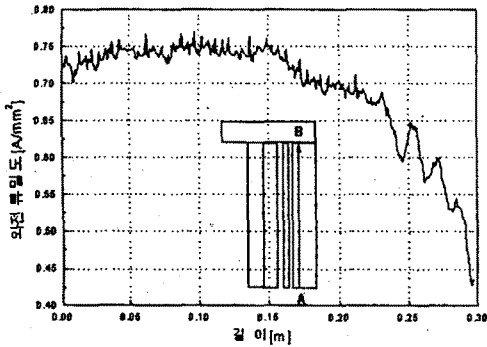


그림 8. 침투깊이에서의 와전류 밀도 분포도

5. 특성 시험 및 결과

(1) 히팅롤 운전 알고리즘

그림 9.는 제작된 히팅롤과 전원 장치이다. 히팅롤의 운전 시스템은 전원 공급에 운전 온도를 설정을 하면, 전원 공급 장치는 히팅롤에 전류를 공급하게 된다. 이때 롤의 양쪽에 연결되어 있는 센서는 히팅롤의 온도를 전원 장치로 피드백 하여, 공급 전류의 크기를 조절하여 롤이 설정 온도에서 운전 되도록 한다.

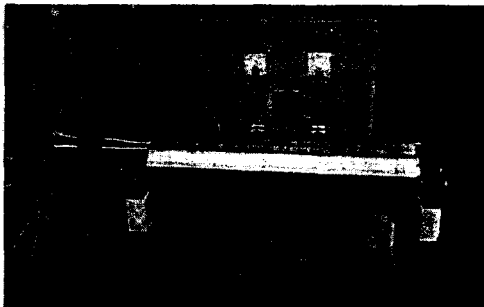


그림 9 히팅롤과 전원 장치

(2) 실험 결과 및 고찰

히팅롤에서 가장 중요한 것은 롤 표면에서의 균등한 온도 분포이다. 설계된 롤의 온도 분포를 알아보기 위해 다음과 같은 실험을 하였다.

전원 장치의 설정 온도를 160 °로 설정을 하고, 롤의 표면 온도를 위치별, 시간별로 측정하였다. 이때, 전원 장치에서 히팅롤로 공급되는 최대 전류는 21A이다. 그림 10.은 2시간을 기준으로 하여, 7단계로 측정된 결과를 나타낸 것이다.

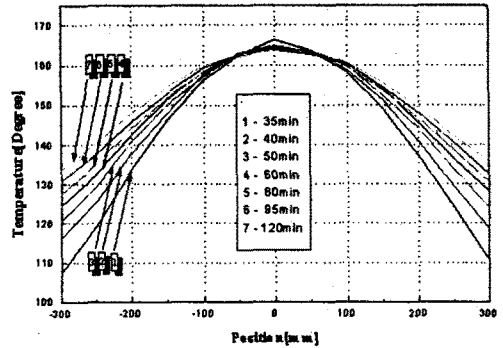


그림 10 위치별 온도 분포

위 그림으로부터, 롤의 양쪽 끝 부분이 롤의 중앙 부분에 비해 온도가 상대적으로 많이 낮았다. 이는 양쪽 끝 부분에서의 열손실량이 상대적으로 크기 때문에 나타나는 현상이다. 또한 FEM해석 결과에서 보는 것처럼, 누설 자속의 영향 또한 있었을 것이라 사료된다.

6. 결론

금속의 열처리, 용접등에 쓰이는 유도가열 장치는 누설 자속이 많은 관계로 상대적으로 역률이 현저히 떨어진 다. 그러나 히팅롤은 누설 자속을 최대한 줄이는 구조로 되어 있어 역률이 다른 유도 가열 장치보다 상대적으로 높고, 또한 활용 범위도 대단히 넓다.

본 논문에서는 균일한 온도 분포하에서 운전 가능한 히팅롤을 설계하고 제작하였다. 제작된 롤의 온도를 일정하게 유지시키기 위한 전원장치 시스템을 구성하여, 롤의 위치별 표면온도를 측정하였다. 측정결과 롤의 위치별에 따른 온도 분포가 균일하지 않았는데, 이는 구조상 롤의 양끝단에서 열손실이 많아 온도가 떨어지기 때문으로 사료된다. 제작된 히팅롤의 활용성을 높이려면 롤 표면의 위치별 온도분포가 균일해야하는데, 향후 설계와 제작시, 이에 관한 충분한 고려를 하고자 한다.

[참고 문헌]

- [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 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.