

유도가열 히팅롤의 설계와 해석

장석명, 양현섭, 서진호, 이성호, \*박희창, \*박찬일,  
충남대학교, \*한국기계연구소

Design and Analysis of Induction Heating Roll

S.M.Jang, H.S.Yang, J.H.Seo, S.H.Lee, \*H.C.Park, \*C.I.Park  
Chungnam National University, \*KIMM

**Abstract** - This paper presents a design and Analysis of Induction Heating Roll. Heating roll is one of the induction heating's application, widespread for print, pulp, fiber industry, and so forth. In this paper, at first, treated that heating roll's characteristics equation, design method of heating roll, and then design roll. The second, analysis designed roll using FEM.

1. 서론

산업이 발달하면서 전기공학의 응용은 광범한 분야로 확산된다. 그 중에서도 특히 전기를 이용한 가열분야는 화석연료에 의한 기존의 가열법에 비하여 장점이 매우 커서 최근에 금속야금을 포함한 각 분야에서 광범하면서도 급속하게 응용이 확산되고 있다. 따라서 양질의 제품을 효율적으로 생산하는 데 매우 중요한 역할을 하고 있다. 전기가열 방식 중에서도 유도가열분야는 더욱 유리한 점이 많아 그 응용분야는 산업현장에서 금속의 열처리, 금속 변형을 위한 가열 등의 금속야금 및 가공산업분야, 특수포장분야를 포함한 칼라인쇄공업, 종이, 펄프공업, 섬유공업에서의 부직포를 포함한 각종섬유의 염색 및 시험장치의 가열에 응용되는 칼렌더 롤 등은 산업현장에서 필수적으로 사용되고 있다. 이렇게 국내외적으로 넓은 범위에 걸쳐 필수적으로 다량 사용되고는 있지만 국내에서는 생산은 물론, 전혀 개발된 바가 없는 부가가치가 큰 분야다.

따라서, 본 논문에서는 인쇄공업, 제지 및 펄프 공업, 비닐, 나일론을 포함한 섬유공업분야에 응용되고 있는 히팅롤의 설계, 제작하였다. 즉 일정시간 내에 일정온도로 제어가 가능하도록 히팅롤을 설계하는 과정을 이론적인 방법에 의한 알고리즘을 작성하여 설계법을 확립하였다. 또한 유도가열의 기본이 되는 자기회로 및 자속분포특성, 기자력, 와전류의 분포, 가열특성등에 관하여 해석적 방법과 FEM에 의하여 해석을 하여 검토분석을 하였다.

2. 히팅롤 모델

유도가열은 그림 1과 같은 구조를 한다. 즉 코일에 전류를 흘리면 안쪽 자기회로에 자속이 발생하여 측면의 공극을 건너서 바깥부분의 자성체인 히팅 롤 부분으로 이동하면 와전류가 유기되는데 이 와전류에 의하여 가열이 된다. 이때 바깥에 위치하는 일반철의 자성체가 롤형태로 회전을 하며 피열물의 가열 및 온도를 일정하게 유지하도록 한다. 그림 2(a)는 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 일정온도까지 일정시간내에 가열하여 유지하게 된다. 한

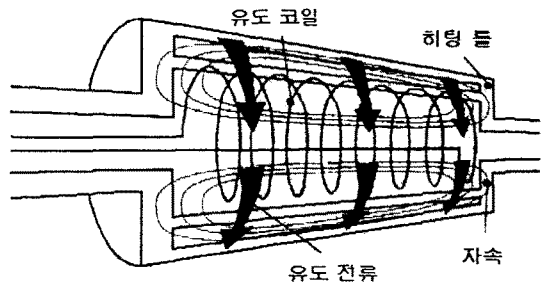
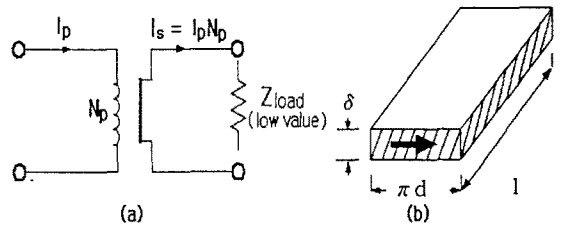


그림 1. 히팅 롤의 구조 및 자속분포



(a) 변압기 등가회로 (b) 등가 부하 슬랩

그림 2. 히팅 롤의 해석모델

편 주파수가 높아지면 와전류의 표피작용으로 표면에만 분포하며, 열도 표면에만 발생하게 된다.

3. 기본특성식

3.1 기본 특성식

그림 1에서 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 해석하기로 한다. 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 y방향으로의 자계의 x성분의 값이다. 따라서 식(1)은 아래와 같은 상미분 방정식으로 표현이 된다.

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

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 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

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

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.

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

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

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

여기서  $\text{Re}$ 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  $\text{Im}$ 은 허수부를 의미한다.

### 3.2 설계 알고리즘

본 논문에서는 설계파라미터의 추출을 그림(2)의 등가회로를 이용하는 등가회로법을 적용하기로 한다. 이때 그림 2(a)의 등가회로를 용이하게 응용하기 위하여 그림(3)과 같이 간이화할 수 있다.

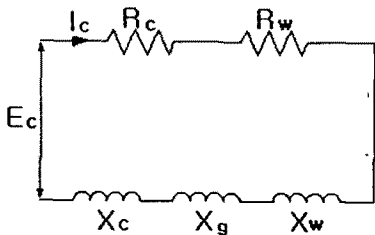


그림 3 히팅롤의 간이등가회로

그림.3에서 각 회로정수는 아래와 같다.

$E_c$  : 인가 전압       $I_c$  : 코일 전류  
 $R_c$  : 코일 저항       $R_w$  : 히팅 롤의 저항

$X_g$  : 공기 리액턴스.       $X_c$  : 코일 리액턴스

$X_w$  : 히팅 롤의 리액턴스

그런데 가정에 의하면 등가회로 파라미터중에서  $R_c, X_g, X_c$ 를 무시하게 된다. 따라서 그림.3에서의 전압 방정식은 식(11)과 같다.

$$E_c = j\sqrt{\frac{2\pi}{\mu}} f N_c \Phi_{0m} \quad (11)$$

여기서

$$\Phi_{0m} = \Phi_{wm} = \mu H_{Rm} A_w (q - jp) \quad (12)$$

이때  $p, q$ 는 자속의 포피효과에 의한 침투깊이를 고려하기 계수로 위한 것으로  $\frac{b}{\delta} > 8$ 인 경우에

$$p = q = \frac{1}{\delta}$$

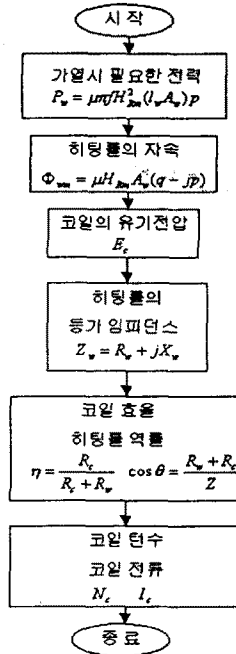


그림 4 설계과정의 흐름선도

### 3.3 파라미터 및 제작도

#### 3.3.1 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

### 3.3.2 설계 파라미터

표 2는 주어진 표1의 요구사항을 만족하도록, 그림 4의 흐름선도에 의한 알고리즘의 프로그램으로 계산된 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 레지스턴스	4.1168 Ω
등가 리액턴스	4.1168 Ω
역률	0.707

### 3.3.3 제작도

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

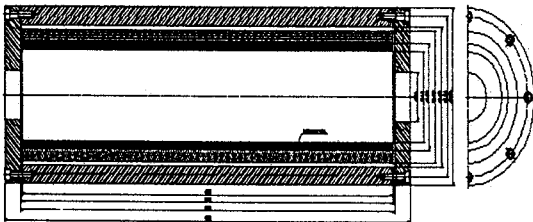


그림 4. 히팅롤의 제작단면도

## 4. FEM 해석

### 4.1 해석모델

FEM을 이용해 히팅롤의 자속분포, 와전류분포, 열분포 등의 주요특성을 좌우, 상하 대칭인 점을 감안하여 그림.1과 같은 모델의 1/4인 그림.5와 같이 설정하였다.

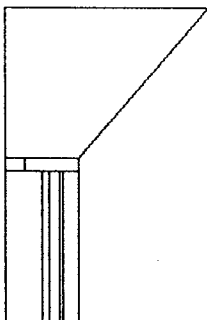


그림5 FEM 해석모델

### 4.2 지배방정식

그림.5의 모델의 전자기특성을 해석하기 위하여 아래와 같은 전자기 이론을 적용하기로 한다. 즉

$$\nabla \times \hat{H} = \hat{J}_0 \quad (13)$$

$$\hat{B} = \mu \hat{H} \quad (14)$$

$$\hat{B} = \nabla \times \hat{A} \quad (15)$$

또한 식(13)과 식(14),식(15)에 의하여 아래와 같은 벡터포텐셜에 관한 지배방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \hat{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \hat{A}}{\partial y} \right) - j\omega\epsilon(\hat{A} - \overline{\hat{A}}) = -\hat{J}_0 \quad (16)$$

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

### 4.3 해석결과

그림.6은 FEM에 의하여 계산한 자속분포특성을 나타내고 있다. 코일 안쪽의 자성체에는 매우 밀도가 높게 분포하고 있고 측면부분과 바깥부분의 일반철로 된 와전류유도 부분인 히팅롤의 자속분포는 밀도가 낮게 분포하고 있다. 이로부터 와전류분포, 열분포등을 구하게 된다. 또한 요구사항에서 언급된 일정온도까지 정해진 시간에 균등가열을 하고, 온도를 계속 유지하게 하는등의 조건을 만족하도록 최적설계를 위한 검토를 하게 된다.

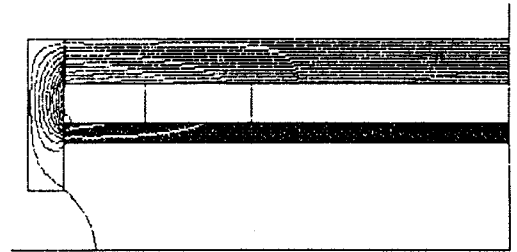


그림 6 FEM 해석 결과

## 5. 결 론

본 연구에서는 인쇄공업, 제지 및 펄프 공업, 비닐, 나일론을 포함한 섬유공업분야에서 활발하게 응용되고 있는 히팅롤을 설계, 제작하고, 유도가열특성의 기본이 되는 자계, 자속, 전류등을 해석적인 방법과 FEM에 의하여 해석하여 검토하였다.

앞으로 여러 조건하에서의 정밀한 설계와 실험을 바탕으로 하는 특성해석, 손실, 온도 분포해석으로 더욱 효율적인 설계가 되도록 해야 할 것이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 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.