

적층형 코어를 갖는 유도가열기의 해석

박희창, 윤동원

한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부

Analysis of induction heater with stacked cores

Intelligent and precision machinery research division, Korea institute of machinery and materials (KIMM)

Abstract - 본 논문에서는 액체의 가열을 위한 유도가열기에서 와전류가 발생하는 중심코어의 형태에 따른 유도가열기의 성능을 비교하였다. 특히 코어가 여러 층의 도체로 이루어졌을 경우의 시스템 성능의 변화에 대한 해석과 실험을 수행하였다. 유도가열의 수치적인 해석은 상용 프로그램인 Maxwell을 사용하였으며, 실험을 통하여 유한요소해석 모델을 검증하였다. 본 연구를 통하여 가열되는 코어가 여러 층으로 이루어져 있을 경우 유도가열기의 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

1. 서 론

유전기식 가공기계에서 생산하는 과자나 식음료의 포장재, 약품 포장재, 섬유류, 문구 등을 제작할 때, 원단의 코팅(coating), 자기 테이프나 부직포의 라미네이팅(laminating)이나 열용착가공 등의 열처리 공정, 섬유류의 열처리로서 캘린더(calender), 시즈닝(seasoning) 등의 표면처리 공정등 원단 가공시 실린더를 표면에 일정한 열을 가하는 에너지 과다소비 공정이 가동되고 있다. 이와같은 열처리 공정에서 원단에 열을 가하는 실린더 롤을 히팅롤이라 하고, 히팅롤에 열을 가하는 방법으로는 실린더 내부를 순환하는 오일을 외부의 보일러로 가열하는 방법, 실린더 내부의 전기 히터를 이용하는 방법이 있다. 그러나, 오일을 순환시키는 방법은 설비가 복잡하고, 보일러에 의한 가열과 배관에 따라 열매를 전송하기 때문에 열손실이 크고, 누유 때문에 설비 주위가 지저분해지는 단점이 있다. 내부 히터 삽입 방법은 높은 온도를 얻기 위해서 히터를 여러개 삽입해야 하고, 열효율이 낮으며, 고온 온도분포를 위해 히터배치에 주의해야 하고, 온도분포를 고르게 하는 데에도 한계가 있었다. 실린더 표면의 온도분포가 고르지 못하면, 원단에 가해지는 열량이 위치에 따라 달라 원단의 품질이 균일해지지 못하는 결정적 결점이 있다. 유도가열방식 히팅롤은 롤의 실린더 내부의 유도코일에 의한 와전류(eddy current)발생으로 실린더에 닿는 실린더 자체가 발열하는 방식이므로, 열발생 효율이 높고, 롤 표면의 온도분포가 균일하여 원단의 품질을 향상시킬 수 있으며, 생산현장의 설비가 간단하고 청결해지는 장점이 있다[1],[2].

본 논문에서는 이러한 유도전류를 이용한 유도가열기를 유한요소법(FEM)을 이용하여 해석을 수행하였다. 특히, 유도전류가 침투깊이(penetration depth)영역에서 발생하여, 가열체의 표면에 집중한다는 점과 전류가 흐르는 도체의 단면적이 좁을수록 저항이 증가한다는 점을 고려하여, 가열되는 코어가 하나의 부피로 이루어지지 않고, 여러층으로 이루어져 있으면 발생하는 열량이 많으리라 생각하고, 가열되는 코어를 여러층으로 만들었을 때, 시스템의 성능을 유한요소법을 이용하여 해석하였고, 실험을 통하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

직경이 무한대인 실린더의 바깥으로 코일이 감겨져 있으면, 이 코일의 직경도 무한대이므로, 이것을 한쪽 면에서만 보면 <그림 1>과 같은 직각좌표를 가진 편평한 slab에 코일이 접근되어 있는 것으로 볼 수 있다[2]-[4]. 코일에 전류가 흐르면 slab 표면에 x 방향으로 자계의 세기 H_0 (ampere/meter)가 발생한다. 공급된 교류전류에 의해 H_0 가 변화하면, z 방향으로 와전류(eddy current)를 발생하게 된다. 여기서 경계조건은

$$\begin{aligned} H_x(y=0) &= H_0 \cos \omega t, \\ H_y = H_z &= 0 \text{ everywhere.} \end{aligned} \quad (1)$$

이 되며, 여기서 H_0 은 slab 표면($y=0$)에서의 H_x 의 최대치이다.

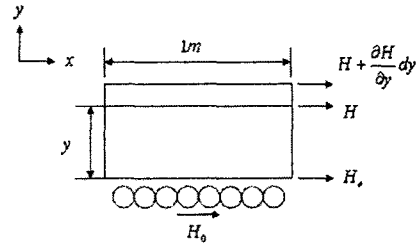
이때, 시스템의 지배방정식은

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

와 같이 된다.

공급전원이 상용전원이라면, 시간변화는 정현적이므로,

$$\frac{d^2 H_x}{d y^2} = \frac{\mu}{\rho} j \omega H_x = 0 \quad (3)$$



<그림 1> Slab의 정의

식(3)과 같이 상미분 방정식으로 표현이 가능하고, 일반해는

$$H_x = A_1 \exp(ky) + A_2 \exp(-ky) \quad (4)$$

와 같이 표현이 가능하다.

$y=0$ 무한대에서 H_x 는 유한하므로 $A_1=0$ 이고, $y=0$ 에서 $H_x = H_0 \exp(j\omega t)$ 이므로, 식(4)는

$$H_x(y) = H_0 \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (5)$$

와 같이 되고(여기서 $\alpha^2 = j\omega \mu / 2\rho$), 침투깊이는

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu \omega}} \quad (6)$$

과 같이 정의된다.

Maxwell 방정식에 의해서 slab에 발생하는 와전류 밀도 J_z , 전력손실 P 는

$$J_z(y) = J_0 \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (7)$$

$$P = Re(\sqrt{2\rho} H_0^2 \alpha \frac{(1+j)}{\sqrt{2}}) \quad (8)$$

2.2 적층형 코어를 갖는 유도가열기

유도가열이론에서 알 수 있듯이, 정현파에 의해서 유도된 전류는 식(6)과 같이 침투깊이만큼의 영역에서 발생하여 전도되어 흐른다. 또한 발생하는 열량은 전류가 흐르는 도체의 저항이 클수록 증가하므로, 유도가열되는 코어를 얇은 여러층을 갖는 적층형으로 만들면 발생하는 열이 더 많으리라 생각하고, 적층형 코어를 갖는 유도가열기를 고안하게 되었다.

2.3 유한요소 해석

위의 이론적 해석은 가열되는 부재의 두께가 침투깊이보다 훨씬 큰 단일 부피를 가지는 slab에 대한 이론적 해석이다. 이러한 방법을 이용하면, 중심축에 대한 유도가열 현상은 쉽게 구할 수 있으나, 부재의 두께가 침투깊이보다 얇거나, 형상이 복잡한 경우에는 그 해를 구하기가 어렵다. 본 연구에서는 유도전류가 흐르는 중심 코어의 형상에 따른 성능의 변화를 보는 것이 목적이므로, 코어의 형상이 복잡하고, 부재의 두께도 얇을 뿐만 아니라, 적층이 되어있으므로, 서로의 간섭으로 인해 해석적으로 그 해를 구하기가 쉽지 않다. 따라서, 상용코드인 Maxwell을 이용한 유한요소법을 이용하여 유도전류에 대한 해석을 수행하였다.

2.3.1 해석대상

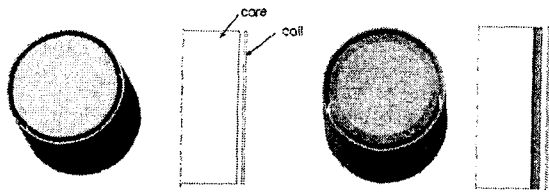
<그림 2>와 같이 1mm 두께의 5겹의 적층형 코어와 적층형 코어가 없는 일반적인 부재에 대해 유도전류 해석을 수행하였다.

<표 1> 재료의 물성치

	Stainless steel	Copper
relative permeability (μ_r)	1	0.99
conductivity (S/m)	1.1e6	5.8e7

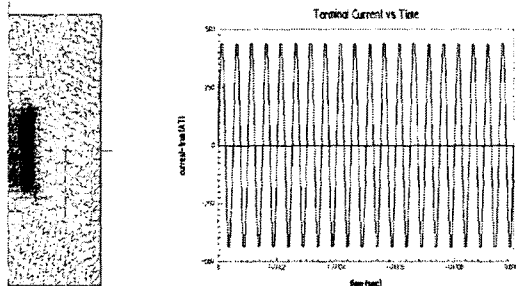
2.3.2 해석 조건

시스템은 크게 일정 주파수의 정현파를 출력주기 위한 코일부분과 유도전류가 흐르는 코어로 이루어져 있다. 코어는 직경 150mm, 높이 190mm의 크기이고, 재질은 코어는 스테인리스 스틸, 코일은 구리선을 사용하였다. <표 1>은 각 부품의 물성치를 보여준다.



(a) 적층형이 아닌 경우 (b)적층형인 경우
<그림 2> 유도가열기의 형상

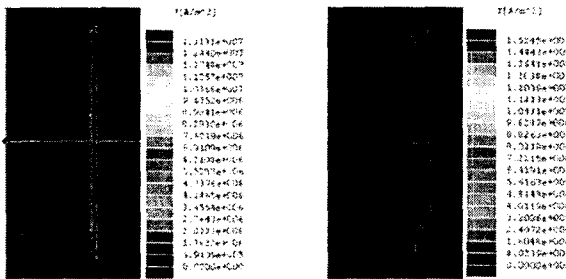
2.3.3 해석결과



<그림 3> 유한요소모델

<그림 3>은 해석을 위해 생성된 유한요소 모델을 보여주고 있다. 코일은 총 턴수 23turn이고, 인가전류는 20A, 주파수 20kHz로 하였으므로, 총 A-turn 수는 460A-turn으로써, <그림 4>는 인가전류의 파형을 보여주고 있으며, 수직축은 A-turn 수이다.

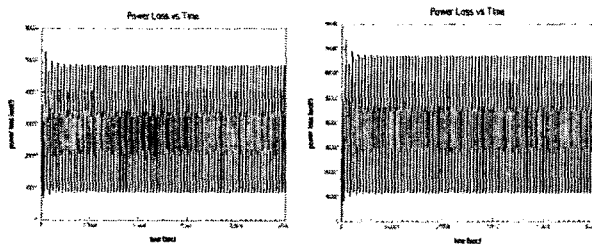
<그림 4> 인가전류



(a) 적층형이 아닌 경우 (b)적층형인 경우
<그림 5> 유도전류밀도 분포

<그림 5>는 각 코어에 대해서 유도전류에 의한 전류밀도분포를 보여주고 있다. 두 시스템 모두 대부분의 유도전류가 표피주위에 분포한다는 것을 알 수 있다. 유도전류밀도의 크기를 비교해보면, 최대전류밀도의 크기가 적층형인 경우 더 크다는 것을 알 수 있다.

두 시스템의 성능 차이를 알기 위해서 전력손실(Power loss)을 비교해보기로 하였다. 왜냐하면, 유도전류에 의한 전력손실이 많은쪽에서 그 만큼 발생열량이 클 것이기 때문이다. <그림 6>은 각 코어에서의 전력손실에 대한 해석결과를 보여주고 있다. <그림 6>에서 알 수 있듯이 코어가 적층형이 아닌 경우는 전력손실이 시간에 따라 10kW~49kW 정도의 크기로 나타남을 알 수 있고, 코어가 적층형인 경우는 10kW~68kW 정도의 크기로 전력손실이 나타남을 알 수 있다. 따라서, 코어를 다층의 적층형으로 만든 경우 더 많은 열이 발생하리라는 것을 알 수 있다.

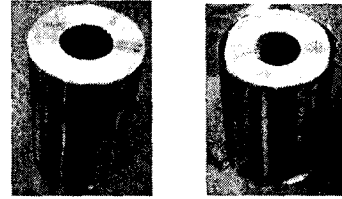


(a) 적층형이 아닌 경우 (b) 적층형인 경우
<그림 6> 전력손실

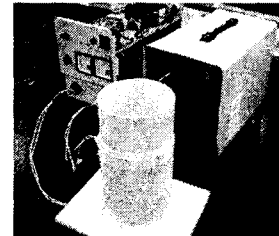
2.4 유도가열 실험

적층형 코어를 가진 유도가열기의 성능을 검증하기 위하여, 하나의 부피로 이루어진 코어와 성능을 비교해 보기로 하였다. <그림 7>은 실제로 제작된 코어의 형상을 보여주고 있다. <그림 7> (a)는 하나의 부피로 이루어진 직경 145mm 코어이고, <그림 7>(b)는 적층형 코어를 구현하기 위한 모델이다. 실제로 1mm두께, 1mm 간극의 적층을 만들기가 쉽지 않아 실험장치는 직경 130mm 두께의 스테인레스 원기둥에 0.15mm 두께의 스테인레스판을 여러층 감아서 외경이 145mm가 되도록 하여 사용하였다.

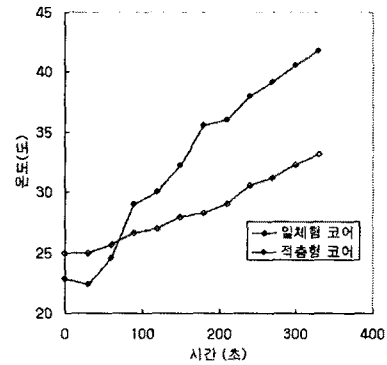
<그림 8>은 코어에 교번자계를 가하기 위한 유도가열기의 모습을 보여주고 있다. 절연재질의 원통의부에 코일을 28turn 감고, 20kHz 5A의 전류를 가하였다. 그리고, 두가지 코어에 대해서 물 2500ml를 가열할때의 시간에 따른 온도변화를 측정하였다.



(a) 일체형 코어 (b) 적층형 코어
<그림 7> 실험에 사용된 코어의 종류



<그림 8> 유도가열을 위한 실험장치



<그림 9> 시간에 따른 온도의 변화

<그림 9>는 실험결과를 보여주고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 같은 외경을 갖는 경우 동일한 조건에서 외부가 얇은 박막의 적층형으로 되어 있는 경우의 코어가 더 좋은 유도가열 성능을 보여줌을 알 수 있다. 이는 유한요소해석을 이용한 결과와 같음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 히팅롤 등에 사용되는 유도가열기에 대해 연구를 수행하였다. 특히, 가열되는 코어의 형상이 시스템 성능에 미치는 영향에 대해 연구하였고, 성능을 향상시키기 위해서 여러층의 얇은 판으로 구성된 유도 가열기 코어를 고안하고 이에 대한 유한요소해석과 실험을 수행하였다. 유한요소 해석은 상용프로그램인 Maxwell을 사용하여 과도해석(transient analysis)을 수행하였으며, 고안된 시스템의 성능향상을 검증하기 위해 일체형으로 된 코어와 얇은 판이 여러층으로 적층된 형태의 코어를 제작, 실험하여 실험결과를 서로 비교하였다.

유한요소 해석과 실제 실험을 통해 하나의 부피로 된 코어보다 여러 층의 적층형으로 제작된 유도가열 코어가 더 좋은 성능을 보여줌을 확인하였다.

[참고 문헌]

[1] 박희창, "유도가열시 히팅롤 개발", 산업자원부 최종보고서, 2002
 [2] J. Davis, P. Simpson, "Induction Heating Handbook", McGraw-Hill Book company, Ltd
 [3] S. Zinn, S.L. Semiatin, "Elements of Induction Heating", Electric Power Research Institute, Inc, ASM International
 [4]C.J. Erickson, "Handbook of Electrical Heating for Industry", IEEE Press