

## 유도가열 인덕터의 특성해석

장석명, 김송집, 차상도, \*박찬일, \*박희창  
충남대학교, \*한국기계연구원

### Characteristic Analysis of Induction Heating Inductor

S.M Jang, S.J.Kim, S.D.Cha, \*C.I.Park, \*H.C.Park  
Chungnam 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, heating treating, metal melting.

In this paper, we are modeling of the inductor and calculating of the circuit parameters is described. Analyzed by finite element method and then Inductor's characteristic analysis was studied and perform the test of temperature distribution.

전류가 크게 발생하게 하여 와류손에 의해 열이 발생하도록 구성하였다. 즉, 식(2)와 같이 Ohm의 법칙에 의해 도전율( $\sigma$ )에 의한 전도전류가 발생됨에 따라 전도전류에 의한 손실은 열손실로 변환된다.

$$J = \sigma E \quad (2)$$

그리고, 1차측과 2차측의 열차계를 위해 공극을 4.5 [mm]로 모델링하였다.

## 1. 서 론

전자기 유도가열은 1831년 패러데이의 전자기 유도현상, 1884년 Oliver Heviside, 1892년 J.J. Thomson의 와전류 현상론에 바탕을 둔다. 즉, 교류 솔레노이드의 철심에서 와전류에 의해 전자기 에너지가 열로 변환되는 현상을 이용한다. 교류 자계중에서 도전성 물체에 유도되는 와전류손, 히스테리시스손을 이용하여 가열하는 방식으로 도전성의 피열물 자체내에 생기는 와전류손 또는 히스테리시스손에 의하여 가열하는 방식이다.

유도가열의 장점은 표피효과에 의하여 피열물 자체가 가열되므로 손실이 적고 효율이 좋으며, 표면만 가열이 가능하며, 열의 발생에 공기가 필요하지 않으므로 가열로 내의 가스를 의도하는 대로 제어할 수 있다. 발열체의 온도제어를 전력제어만으로도 가능하므로 온도의 원격제어 및 감시가 용이하다. 또한, 연소가열방식에 비해서 접촉이 없으므로 전기적으로 안전하고, 급속 가열이 용이하며 특히, 깨끗한 운전과 환경 유지가 가능하다.

본 논문에서는 상용전원 60 [Hz]를 이용하여 20분에 피 가열물을 300 °C까지 가열을 할 수 있는 용량의 유도가열용 인덕터의 자기 회로 및 전기회로를 해석을 통하여 자속분포 특성, 기자력과 가열에 의한 온도변화 특성등에 관하여 해석적인 방법과 유한요소해석(FEA)에 의하여 해석을 하여 검토 분석하였다. 또한, 유도가열에서 전원이 인덕터에 공급될 때 권선의 턴수에 의해서 발생하는 무효분인 인덕턴스는 역률을 저하시키는데 이러한 단점을 전력용 콘덴서의 용량을 산정하여 병렬로 연결함으로써 역률 저하의 단점을 개선하였다.

## 2. 전자기 유도가열 인덕터

### 2.1 유도가열 인덕터의 원리와 모델

인덕터의 모델은 그림1과 같이 1차측은 E형 구조장판을 사용하여 자속에 의한 와전류 발생에 의한 와류손을 감소시키기 위해 적층하고 코일을 감겨진 것으로 구성되며, 식(1)의 Faraday 법칙인 전자기유도에 관한 기본식으로 알 수 있다.

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

2차측은 I형 통관형 슬랩을 사용하여 자속에 의해 와

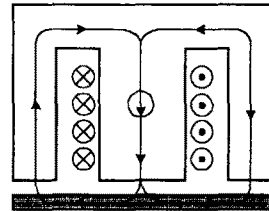


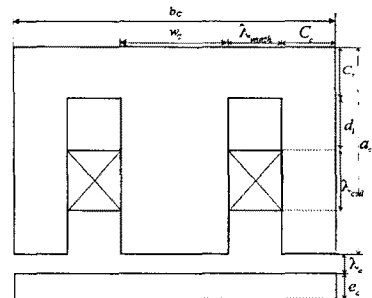
그림1 인덕터의 모델링과 자속 흐름도

### 2.2 해석모델의 사양

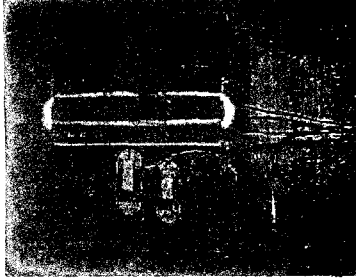
표1은 인덕터의 E코어의 설계 파라미터이고, 그림2인 덕터의 사양 및 완성도이며, 1차측의 코일에 의해 발생되는 인덕턴스 성분에 의한 역률 저하를 개선하기 위하여 역률 보상용 콘덴서를 병렬로 연결하여 역률을 개선하였다. 1차측과 2차측의 길이는 0.5[m]이다.

표1. E 코어의 제작 파라미터의 사양

명칭	크기	명칭	크기
$b_c$	180	$a_c$	120
$w_c$	60	$d_{coil}$	42
$c_c$	30	$e_c$	16



(a) EI코어의 제작 사양



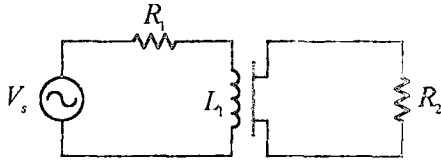
(b) 제작된 인덕터

그림 2 EI코어의 사양과 제작 완성도

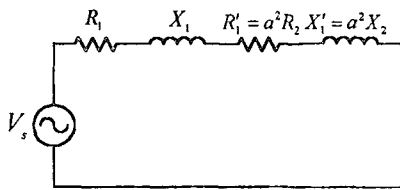
### 3. 등가회로 및 특성식

#### 3.1 전기 등가회로

인덕터의 전기적인 회로는 그림3과 같다. 그림(a)는 1차측은 권선에 의한 저항성분과 코일의 인덕턴스 성분으로 구성되고, 2차측은 피열물의 저항성분으로 구성되어 있다. 그림(b)는 인덕터의 등가회로도이다.

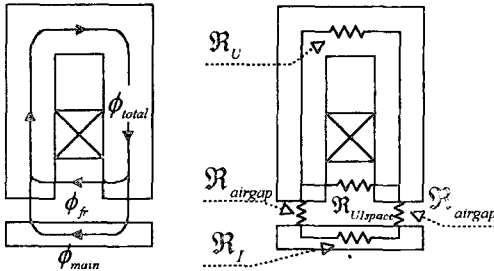


(a) 1차측과 2차측 회로



(b) 인덕터의 등가회로도  
그림3 인덕터의 전기 등가회로

#### 3.2 자기 등가회로



(a) 1/2모델의 자기 등가회로 (b) 1/2모델의 해석변수  
그림4 1/2모델의 자기 등가회로와 변수

그림4는 인덕터의 1/2모델의 2D형태로 U형과 I형의 코어는 공극  $\ell_a$ 에 의해서 분리되었다.

그림 4과 같이 U코어에 전류  $i = I_m \sin(\omega t - \theta)$ 가 공급될 때 발생하는 총자속( $\phi_{total}$ )은

$$\phi_{total} = K_i \cdot V_m \sin(\omega t - \theta) \quad (3)$$

여기서,  $K_i = \frac{L}{N \sqrt{R^2 + X_L^2}}$ ,  $\theta_{RL} = \tan^{-1} \left( \frac{X_L}{R} \right)$ 이다.

2차측의 I자 코어로 흐르는 주자속( $\phi_{main}$ )은

$$\phi_{main} = \frac{\phi_{total}}{2} - \phi_{fr} \quad (4)$$

총자속은 공극을 지나 2차측으로 흐르는 주자속과 슬롯의 공간으로 흐르는 누설자속으로 나누어진다. 누설자속( $\phi_{fr}$ )은 식(6)과 같다.

$$\phi_{fr} = \frac{\mu_0 N i (a_c - (c_c + d_l + d_{coil}) \times \ell_{length})}{\ell_{width}} \quad (5)$$

#### 3.3 와류손(eddy current loss)

2차측의 저항은 자속이 쇄교할 때 발생된 전류에 의한 손실을 일으키는 중요한 변수중의 하나이다. 따라서 2차측 피열물 저항성분을 구하기 위해서는 침투 깊이를 고려해야 한다. 침투 깊이는 식(6)으로 구한다.

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

피열물의 저항성분  $R_2$ 는

$$R_2 = \rho_m \frac{\ell}{A_\delta} \quad (7)$$

여기서  $A_\delta$ 는 자속이 흐르는 침투깊이 면적이다.

따라서, 2차측에 자속이 쇄교됨에 따라서 유기전압과 와전류가 발생하게 된다.

$$i_e = K_{ia} V_m \sin \left( \omega t - \theta_{RL} - \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{\omega L_2}{R_2} \right) \right) \quad (8)$$

단, 상수  $K_{ia} = \frac{K_v}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}}$ 이다.

2차측 I코어에 와전류가 흐름으로써 손실이 발생하게 된다. 이러한 와류손실은 식(9)로 표현된다.

$$P_{loss} = i_e^2 \cdot R_2 \quad (9)$$

#### 3.4 인덕턴스

그림4(a)의 자기 등가회로에서 자속이 반모델의 고투자율의 U코어와 I코어 스택 중심을 지난다고 가정하면, 공극에서의 릴럭턴스는 식(10)에서 구한다.

$$R = \frac{2 \ell}{\mu_0 A_{stack}} \quad (10)$$

고투자율인 U자 코어내의 릴럭턴스는 상용주파수를 사용하고, 구조강판으로 적용이 되었으므로 침투깊이를 고려하지 않아도 된다. 따라서, U코어의 릴럭턴스는 식(14)와 같다.

$$R_U = \frac{\ell_U}{\mu A_U} \quad (11)$$

슬롯 공간의 릴럭턴스는 공극의 릴럭턴스와 U코어의 슬롯과 I코어가 이루는 공간에서의 릴럭턴스는

$$R_{Ulspace} = \frac{\ell_{width}}{\mu_0 h \ell_{length}} \quad (12)$$

단,  $h = a_c - (d_l + \ell_{coil}) + \ell_a$ 이고,  $\ell_{width}$ 는 U코어의 슬롯 폭이고,  $\ell_{length}$ 는 인덕터의 적층길이이다.

I코어에서 침투깊이를 고려한 릴럭턴스( $R_I$ )는

$$R_I = \frac{\ell_I}{\mu A_I} \quad (13)$$

U코어와 I코어의 전체 인덕턴스는

$$R_{UI} = R_{Um} + [R_{wi}] || [R_{Ula,center} + R_{Im} + R_{Ula,side}] \quad (14)$$

따라서, 그림 4 모델의 인덕턴스는

$$R_{UI} = \frac{N^2}{R_{Um} + [R_{wi}] || [R_{Ula,center} + R_{Im} + R_{Ula,side}]} \quad (15)$$

### 3.5 소요전력량 및 온도특성

1 [t]의 철을 300 °C 상승시키는데 필요한 전력량은 50 [kwh/t]이다. 따라서, 손실 전력은

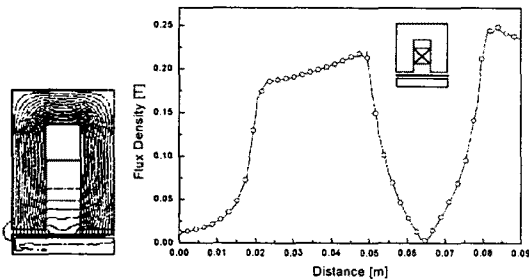
$$W[kw] = m c \Delta t [kwh] \times \frac{60}{T_{time}} [h] \quad (16)$$

소요전력량은

$$P_s = (P_{loss,coil} + P_{plate,loss}) \cdot K_{power} \quad (17)$$

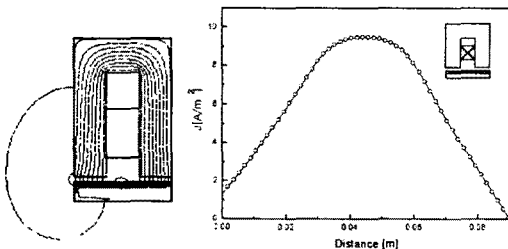
## 4. 유한요소해석(FEA)

그림5는 1/2모델의 자속분포 및 공극 자속밀도를 나타내고 있다. 자속은 표피효과에 의해서 피열물의 침투값이 호르고, 슬롯에서 누설이 가장 많고 왼쪽의 스택에서도 누설이 일어남을 알 수 있다.



(a) 자속의 흐름 (b) 인덕터의 공극 자속밀도  
그림 5 자속 분포 및 공극 자속밀도

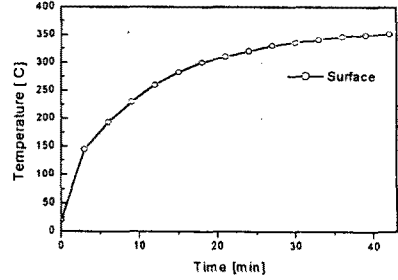
그림 6은 와전류의 분포 및 크기를 나타내고 있다. 와전류는 자속이 흐르는 2차측의 중심에서 가장 크게 흐른다. 따라서 이곳에서 가장 큰 손실이 발생하는데 이것은 공급전력을 결정하고, 균등한 온도분포를 얻기 위한 최적설계에 중요한 부분이다.



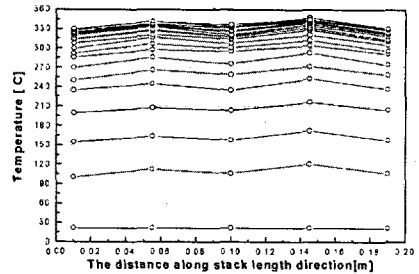
(a) 와전류 분포 (b) 와전류 분포 곡선  
그림 6 인덕터의 와전류 분포

## 4. 운전 특성시험

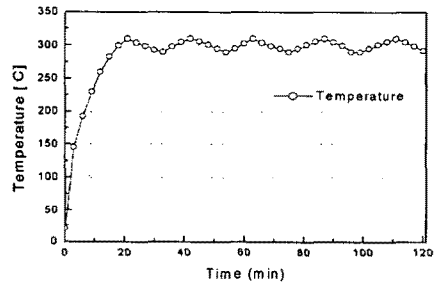
유도가열방식은 자속의 누설에 의해서 역률이 매우 낮은 단점이 있다. 따라서, 역률 보상용 콘덴서를 병렬로 연결하여 역률을 개선하였다. 전원에서 공급되는 전류는 15[A]이며 부하측의 최대 전류는 46[A]이다. 인덕터의 피열물의 운전특성은 그림 7과 같다.



(a) 시간에 따른 온도상승 곡선



(b) 온도 분포 곡선



(c) 운전 제어 특성  
그림 7 피열물의 운전특성

## 5. 결 론

유도가열은 금속가열, 국부가열 그리고 환경 친화적이며 안전성과 온도제어특성이 우수한 가열방식으로 섬유, 인쇄, 금속가공분야에 널리 응용되고 있다.

본 연구에서는 20분 동안에 300°C까지 이르는 인덕터의 모델링을 통하여 전자기 회로를 이용하여 회로정수의 저항과 유도가열의 중요한 변수인 인덕턴스를 해석적으로 산출하고 유한요소해석(FEA)과 비교하였다. 또한, 운전시험으로 피열물의 온도 특성 및 제어특성을 측정하였다.

앞으로는 여러 조건하에서의 피열물의 와전류 분포 및 손실 그리고 균일한 온도분포 특성을 좀더 연구해야 할 것이다.

## (참 고 문 헌)

- [1] Arun Balakrishnan, William T. Joines, Thomas G. Wilson. "Air-Gap Reluctance and Inductance Calculation for Magnetic Circuits Using a Schwarz-Christoffel Transformation". IEEE trans. VOL.12, NO.4 JULY 1997
- [2] John Davies and Peter Simpson "Induction Heating Handbook" McGRAW-HILL Book Company 1926