

강판의 유도가열에서 공정변수가 온도 및 자속분포에 미치는 영향에 관한 연구

배강열* · 이태환* · 양영수**

* 진주산업대학교 산업자동화공학과

** 전남대학교 공과대학 기계공학과

A Study of the Effects of Process Variables on Temperature and Magnetic-flux Distribution in Induction Heating of Steel Plate

Kang-Yul Bae*, Tae-Hwan Lee* and Young-Soo Yang**

* Department of Industrial Automation Engineering, Chinju National University, Chinju 660-758, Korea

** Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

Abstract

Induction heating of flat metal products has an increasing importance in many applications, because it generates the heat within workpiece itself and provides high power densities and productivity.

In this study, the induction heating of a steel plate to simulate the line heating is investigated by means of the Finite Element Analysis of the magnetic field and temperature distribution. A numerical model is used to calculate temperature distribution within the steel plate during the induction heating with a specially designed inductor. The effects of material properties depending on the temperature and magnetic field are taken into consideration in an iterative manner. The simulation results show good agreements with experimental data and provide good understanding of the process. Since the numerical model demonstrates to be suitable for analysis of induction heating process, the effects of air gap and frequency on magnetic-flux and power-density distribution are also investigated. It is revealed that these process parameters have an important roles on the electro-magnetic field and power-density distribution governing the temperature distribution of the plate.

(Received June 26, 2001)

Key Words: Induction heating, Eddy current, Frequency, Air gap, Temperature distribution, Magnetic flux, Power density

1. 서론

코일에 고주파 전류를 통하게 하면 주위에는 시간에 따라 변화하는 자기장이 형성되고, 주위 도전체 표면에는 이의 변화를 방해하는 방향으로의 자속을 발생하는 전류가 유도된다. 이때 유도되는 전류를 와전류(eddy current)라고 하며, 이로 인해 도전체의 표면에는 높은 에너지 밀도의 주울열(Joule heat)이 발생하게 된다. 이와 같이 발생하는 열을 이용한 가열방식이 유도가열이며, 금속의 열처리, 단조공정의 예열, 브레이징, 강판의 굽힘, 변형교정 등 산업분야에 광범

위하게 적용되어 생산성을 높이고 있고, 수요의 확대와 적용범위의 확대에 따라 가열형태의 변화와 성능의 개선이 요구되고 있다¹⁾.

유도가열은 전자기 및 열적 현상을 동반하는 공정으로, 가열성능이 우수한 유도가열장치를 최적설계하기 위해서는 비용과 시간 면에서 많은 어려움이 수반되어, 수치적 상사(simulation)해석은 설계의 시행착오를 줄일 수 있는 매우 유용한 성능 예측 방법이 될 수 있다. 도전체의 투자율과 전기전도도가 온도에 따라 변화되기 때문에 유도가열해석은 전자기해석과 열해석이 연성(couple)된 문제로 취급되어야 하며, 이와 같은 문제에는 유한요소해석이 적절하다고 판단된다.

유도가열 공정을 해석하기 위해서는 우선 전자장해석을 수행하여 와전류를 계산하고, 와전류에 의한 발생열을 열원으로 하여 피가열체의 온도분포 해석을 수행하는 과정이 요구된다. 이러한 해석결과를 통해 유도 가열장치의 특성을 파악할 수 있어, 유도가열용 코일의 형태, 크기 등의 설계와 가열조건의 선정이 효율적으로 가능하게 된다.

유도가열방식을 적용한 가열공정에서 수치적해석을 통해 공정을 개선하려는 연구가 지속적으로 행해져 오고 있다. 반응용 단조를 위한 유도가열코일의 설계에서 설정된 온도이력을 얻기 위한 최적의 코일길이와 주파수를 유한요소해석을 통해 선정하여, 실험을 통해 해석모델의 유용성을 보고한 바가 있고²⁾, 유도가열에서 피가열체의 온도분포제어를 위한 민감도해석을 통해 코일의 설계변수의 영향을 규명하고자 한 연구사례도 있다³⁾. 또한 물리적성질이 온도와 자기장에 의존하고, 서로 다른 주파수로 동작하는 전압원들을 동시에 고려하여, 축대칭형상의 유도가열을 위한 수학적모델과 유한요소방정식을 유도하여 온도분포해석을 수행한 바 있고⁴⁾, 강봉의 가장자리 온도분포를 조절하기 위한 유도가열코일을 제안하고 3차원 유한요소해석을 수행하여 수치해석으로써 설계변수를 유용하게 평가할 수 있었음을 보인 결과를 얻었으나, 3차원해석과 물리적 성질변화를 동시에 고려함으로써 계산시간 면에서 크게 비경제적이었음을 보인 연구도 있었다⁵⁾.

강판의 굽힘, 변형교정 등에 가스화염을 이용한 가열공정이 널리 이용되고 있으나 열원의 제어가 어려운 점을 개선하고자 유도가열을 이용한 공정이 대안으로 제시되고 있다⁶⁾. 선상가열(line heating)의 경우, 소정의 변형을 교정하여야 하나, 경한 조직의 발생이 야기되지는 않아야 한다. 이를 위한 최적의 가열시간은 온도분포해석을 통해 설정할 수 있을 것으로 판단된다. 선상가열 용도의 장치를 설계하기에 앞서, 온도에 따라 자기적 성질이 일정하다고 가정하고 전자기장해석 및 온도분포, 변형해석 등 2차원 수치해석적 방법을 이용하여 가열특성과약을 수행한 사례가 있다⁷⁾. 또한 3차원 평면구조물의 유도가열공정을 해석하기 위해 유한요소해석을 이용한 자기장해석을 수행하고 유한차분해석을 이용한 온도해석을 연구한 바가 있고⁸⁾, 나아가 코일을 이송하면서 강판의 표면을 가열하고자 하는 유도가열시스템을 제안하여, 속도 효과를 고려한 유한요소해석을 통해 자기장해석과 온도분포해석을 수행한 연구가 보고되었다⁹⁾.

본 연구에서는, 강판의 유도가열을 통해 일정형태로의 변형을 얻는 선상가열공정을 모델링하고자, 강판의

한 쪽 표면의 가열에 용이한 U자형 인덕터(코일) 구조를 제안하고, 이를 적용한 유도가열공정에서 강판의 온도분포를 수치적으로 해석하고 동시에 유도가열실험을 통해 공정의 특성과약과 해석의 타당성을 검증하고자 하였다. 해석과 실험은 강판과 인덕터의 상대운동이 없는 정지상태에서 수행하였고, 해석은 제안된 인덕터와 가열방법의 특징을 이용하여 2차원 모델을 대상으로 하였다. 또한 동일한 수치해석 모델을 이용하여 제안된 코일과 피가열체 사이의 공극(air gap), 정전압원의 주파수 등을 공정변수로 두고 이들의 영향에 의한 가열특성의 변화를 파악하고자 하였다. 코일에 가해지는 전원으로 일정주파수를 가진 정전압을 적용하였고, 피가열체의 물리적 성질은 온도에 따라 변화되게 하였다. 유도가열은 전자기현상과 가열현상이 상호 연성되어 있으므로 이를 전자기해석과 온도해석으로 나누어 매 시간 단계에서 각각을 계산하되 해가 수렴되게 반복적으로 수행하였다. 전자기해석에서는 자기포텐셜을 해석하여 와전류를 산출하였고, 온도해석에서는 와전류에 의한 발생열을 열원으로 하여 가열체 내의 온도를 계산하였다.

2. 전자기장 및 온도분포 수치해석

유도가열은 인덕터 주위의 자기장 변화에 의해 피가열체에 전류가 유도되어 주울열(Joule heat)이 발생하는 과정과 발생된 열이 피가열체 내로 전달되는 과정으로 구성된다. 먼저 인덕터 주위 및 피가열체에 발생하는 자기장의 시간에 따른 크기변화는 Maxwell의 방정식으로부터 유도할 수 있고, 주파수 영역에서 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$j\omega \vec{A} + \nabla \times \left[\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right] = \vec{J}_0 \quad (1)$$

여기서, A 는 자기벡터포텐셜, J_0 는 외부전류벡터, μ 는 투자율, α 는 전기전도도, ω 는 전류원의 각주파수이다. 식 (1)에서 자기벡터포텐셜을 구한 후, 이를 이용하여 와전류 J_e 를 구하면($J_e = -j\omega \alpha A$), 옴(Ohm)의 법칙에 의해 주울열 $q(q = J_e^2 / \alpha)$ 를 산출할 수 있다.

유도가열에 의한 피가열체 내의 온도변화는 전류유도에 의해 발생된 주울열을 내부 발생열로 고려하면, 다음과 같은 열전도방정식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + q \quad (2)$$

여기서, T 는 온도, ρ 는 밀도, c 는 비열, κ 는 열전도

도, q 는 발생열이다.

선상가열을 위해 제안된 인덕터를 이용한 유도가열 시스템에서, 피가열체 내외의 전자기장 및 온도분포를 계산하기 위해, 유한요소법(FEM)에 기반을 두고 개발된, 두 장(field)의 해석이 수행 가능한 상용 전자기장 해석 프로그램을 이용하였다¹⁰⁾. 피가열체는 폭 100mm, 길이 40mm, 두께 4.6mm의 연강(mild steel)판을 대상으로 하였고, 인덕터의 길이가 피가열체 길이에 비해 매우 길어 길이방향으로의 장의 분포가 일정하다고 가정하여, 피가열체의 길이방향 단면을 해석평면으로 하는 2차원 해석모델로 두고, 이에 대한 해석을 수행하였다. 수치해석을 위한 유한요소모델을 Fig. 1에서 보여 주고 있다. 해석모델은 좌우대칭의 형태이나, 향후 인덕터의 이동을 고려하기 위하여 좌우 전체를 해석대상으로 설정하였다. 강판의 표면과 코일의 표면에서는 요소를 매우 작은 크기로 분할하고, 주변부를 향해서 점차 크게 분할하였다. 특히, 표면에서의 표피효과(skin effect)로 와전류가 매우 적은 두께 영역에서만 생성될 것으로 예상되어, 열이 집중적으로 발생하고 온도의 변화가 급격하게 나타남을 고려하기 위해, 표면주위에서는 별도의 표피두께를 나누어 요소의 두께를 0.3mm로 두었다¹¹⁾. 전자기장과 온도의 두 해석에는 동일한 형태의 요소분할 및 해석영역을 사용하였다.

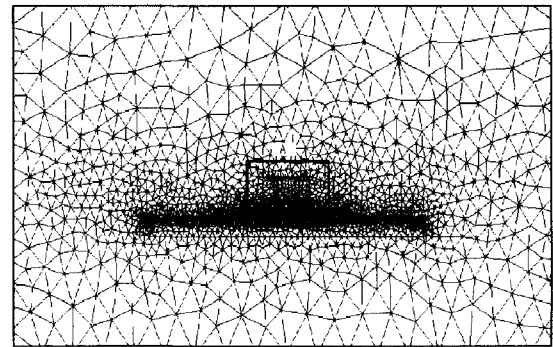
공기, 강판, 코어, 냉각수, 절연재, 인덕터 등을 각각 별도의 영역으로 구분하였고, 특히 공기, 냉각수, 절연재 등은 자기적 성질이 진공의 값을 갖는다고 가정하였다. 인덕터의 전기전도도, 강판의 투자율과 전기전도도, 페라이트 코어의 투자율 등의 값은 온도(T)에 따라 변화됨을 고려하였고, 특히 강판의 전기저항은 $\rho = 0.25 \times 10^{-6} (1 + 0.004T) [\Omega \cdot m]$, 열전도도 $k = 47 (1 - 0.25 \times 10^{-3} T) [W/m \cdot ^\circ C]$ 으로 변화되게 설정하였다¹¹⁾.

전자기장해석에서 전체 해석영역의 가장자리에는 Dirichlet 경계조건으로서 자기벡터포텐셜 값을 0으로 두었다. 온도분포해석에서 강판영역의 가장자리에는 경계층을 두어 다음과 같은 자연대류조건과 복사조건 등을 부과하여, 피가열체의 경계조건으로 두었다.

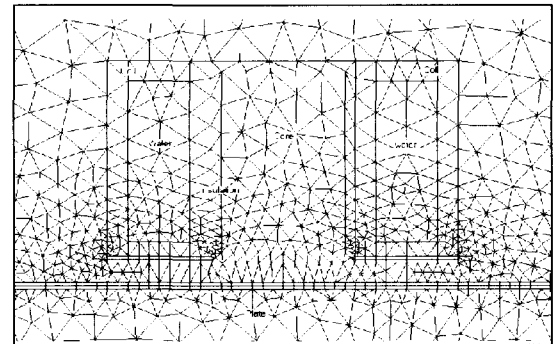
$$\frac{\partial T}{\partial n} = hS(T_i - T_a) + \xi \sigma S(T_i^4 - T_a^4) \quad (3)$$

여기서 S 는 경계층의 전열면적, T_a 는 주위 대기온도, T_i 는 경계층 내의 온도, h 는 대류계수, ξ 는 전복사율, σ 는 스테판볼츠만 상수이다.

해석에서 인덕터는 2개의 저항체가 직렬로 구성된 것으로 220V 교류 전압원에 의해 조화함수형의 전류



(a) Mesh generation



(b) Detail mesh near the coil(A)

Fig. 1 Finite element mesh

가 공급된다고 설정하였다.

전자기장 현상의 열적효과를 고려하기 위해서 전자기해석 모델이 온도해석모델과 연성되게 하였다. 해석모델은 피가열체의 물리적성질이 온도에 따라 변화되 Raphson의 수렴방법을 이용하였고¹⁰⁾, 수렴정도는 0.001로 설정하여 반복계산을 하였다. 특정 시간 단계에서 일정 간격내의 온도변화에 따라 열적성질의 변화가 크지 않다고 가정하면, 그 시간 간격에서의 전자기장해석결과는 동일하게 유지된다고 가정할 수 있다. 초기 온도에서 초기 자기장을 구하고, n 시간단계에서 온도를 계산하고, 이를 이용하여 자기장을 갱신하게 된다. 갱신된 자기장으로 온도를 재차 계산하여 수렴되지 않으면 자기장을 다시 계산하고, 계산된 온도가 수렴되면, $n+1$ 시간단계에서의 온도계산을 수행하게 된다. 이러한 해석을 위해 온도와 발생열에 관한 데이터는 외부데이터파일 형태로 두어 서로 전달될 수 있게 하였다. 해석의 각 시간간격은, 온도변화를 $30^\circ C$ 로 설정하여, 초기에 0.005초를 설정하고 최대 0.05초를 경과하지 못하게 하였다.

유도가열 시간을 각각 3초와 6초로 두고, 전자기장 및 온도해석을 통해, 제안된 인덕터 구조를 가진 유도 가열시스템의 특성을 파악하고 특성해석에서 수치해석의 적용 타당성을 검증하고자 하였고, 또한 공극의 크기를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0mm로, 전원 주파수를 30,

40, 50, 60, 70kHz로 각각 변화하여, 유도가열조건에 따른 자기장분포 및 가열특성을 해석하였다.

3. 실험

제안된 인덕터의 가열특성을 해석하고 수치해석적으로 구한 온도해석의 결과를 검증하기 위해 Fig. 2와 같이 설계 제작된 유도가열장치를 이용하여 유도가열과 동시에 온도계측을 수행하였다. 가열장치는 전원, 유도가열장치, 인덕터, 데이터처리장치, 3축이송장치로 구성되어 있다. 유도가열장치의 인덕터(inductor)인 코일은 U자 형으로 하나의 권선을 가지고 있는 형태로 제안했으며, 크기는 길이 60mm, 폭 5mm, 높이 10mm, 두께 1mm의 사각채널의 형태이고, 구리로 제작되었다. 채널의 중앙에는 과열을 막기 위해 냉각수를 순환시켰고, 코일채널 사이에 0.5mm 두께의 절연재로 둘러 싸여진 폭 6mm, 높이 10mm의 페라이트 코어를 두어 자속이 피가열재에 집중되어 발생하도록 하였다. 선상가열에 적용하기 위해 피가열체 표면의 가열부분을 조절할 수 있도록 3축이송장치에 인덕터를 탑재하였으나, 우선 본 연구를 위해서는 코일을 피가열재 위의 중앙위치에 고정하여 두고 실험을 실시하였다. 유도가열을 위한 전원은 전압 220V, 주파수 50kHz의 일정한 교류전압원을 사용하였고, 폭 100mm, 길이 40mm, 두께 4.6mm의 연강재 시편에 각각 3, 6초 동안 유도가열을 실시하였다. 가열 및 냉각과정에서의 피가열 강재의 온도계측을 위해 열전대를 강판의 이면 중앙에 부착하였고, 시간에 따른 온도 데이터는 아날로그디지털 변환(A/D converter) 보드(board)와 컴퓨터를 활용하여 처리하고 저장하였다.

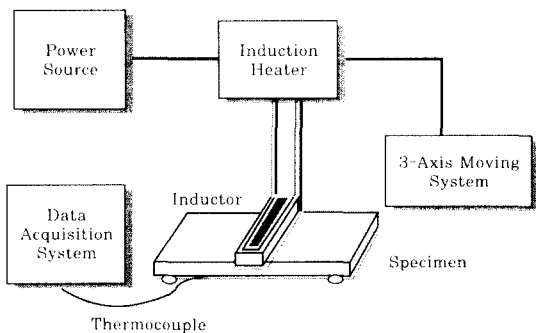


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for induction heating

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 선상가열을 위해 제안된 인덕터를 이용하여 3초 및 6초의 유도가열을 각각 실시하였을 경우,

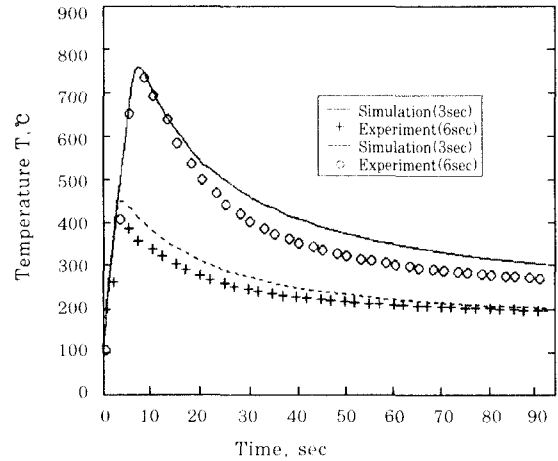


Fig. 3 Comparison of temperatures history at center of bottom surface

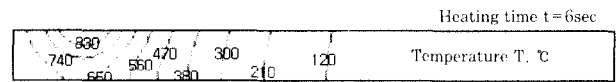


Fig. 4 Isotherms inside workpiece at t=6s

가열된 이면, 즉 강판의 바닥 중앙 위치에서의 시간에 따른 온도변화를, 유한요소해석으로 예측한 결과와 가열실험에서 열전대를 이용하여 계측한 결과를 비교하여 나타내었다. 설정된 가열조건에서 각각 대략 최대 350°C, 700°C까지 온도가 상승함을 보였다. 실험의 경우보다 수치해석결과가 다소 높게 나타난 것은 실질적으로 가열시스템이 일정 전압에 도달하는데 다소의 시간이 소요되기 때문으로 판단된다. 해석결과는, 가열과정의 전자기장 및 열전달문제 해석, 냉각과정의 열전도 및 대류문제의 해석 등 이론적 수치해석의 결과임을 감안하면, 실험결과와 비교하여 전반적으로 유도가열에서의 온도를 잘 예측한 것으로 판단할 수 있다. 이와 같은 해석의 정확도에 미루어 선상가열을 위한 유도가열 공정에서 공정의 최적화를 위한 전자기 및 온도해석이 유한요소해석에 의해 수행 가능함을 알 수 있다.

Fig. 4는 가열시간이 6초일 때 가열 직후 단면의 오른쪽 2분 면에 나타나는 등은 분포를 보이고 있다. 코일의 구조와 가열위치가 강판에 대해 대칭적으로 위치해 있었기에 단면좌우의 온도분포가 대칭적 형태로 나타날 수 있었다. 코일 바로 아래에서 가장 높은 온도 분포구역인 830°C보다 높게 형성됨을 보였다. 이는 코일 바로 아래에서의 입열량이 가장 높았기 때문으로, 자속의 시간 변화에 비례하여 발생하는 유도 전류의 크기가 가장 컸기 때문이다. 온도해석결과는 열변형의 해석에 이용될 수 있을 뿐만 아니라, 표면에서의 가열 시간에 따른 최대온도와 냉각속도를 고려하여 경화조

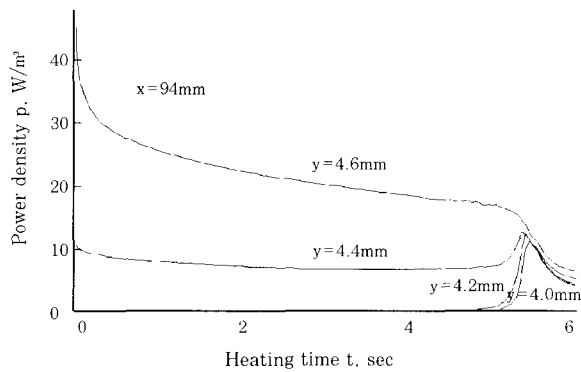
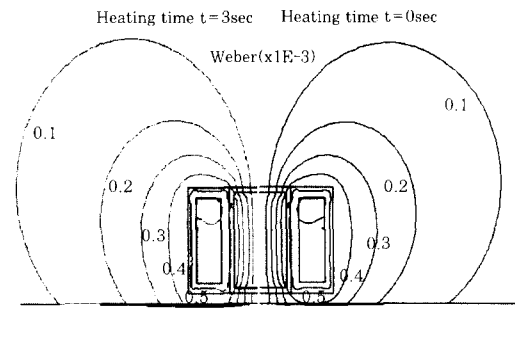


Fig. 5 Time variation of power density with various depths from surface just below coil(x=94mm)

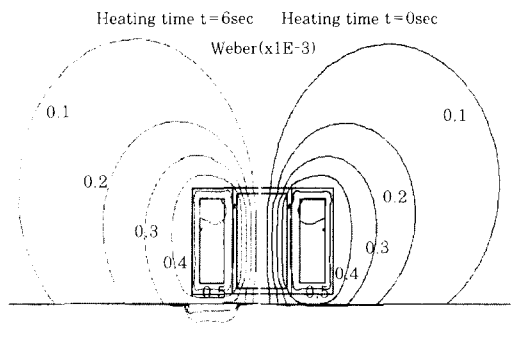
직의 발생 여부를 결정지을 수 있어, 강판의 굽힘, 변형의 교정 등 선상가열에서 경화조직의 발생없이 최대의 변형량을 얻는 최대 가열시간 등의 결정에 이용될 수 있다. 나아가 효율적 가열을 위한 공정변수의 영향을 해석하는데 사용할 수 있다.

가열시간에 따른 발생열의 크기를 산출하면, 가열시간 즉 가열온도에 따른 가열효과를 파악할 수 있다. Fig. 5에서는 가열시간에 따른 발생열의 밀도를 보여주고 있다. 가열시간이 증가함에 따라 표면(y=4.6mm)에서 발생열의 크기가 점진적으로 줄어들고 있고, 5초 이후에는 표면 아래 부분에서도 발생열이 개시되고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 6에서 보여 주듯이 낮은 온도에서 표면에 밀집되었던 자속의 분포가 표면의 온도상승에 의해 자성이 저하되자 표면 및 그 아래 부분으로도 자속이 분산되어 분포하기 시작한 결과이다. 특히 표면의 가열로 인해, 고온 표면부의 투자율이 5.5초 부근에서 급격히 감소하여 자기 경로가 두께 방향으로 분산되고, 표면아래 층에서 발열량(power)이 증가하고 있음을 보이고 있다. 이를 통해 가열시간 5.5초를 전후에 표면부가 강재의 자기적 성질을 상실하는 Curie 점(760℃)에 도달하게 됨을 알 수 있다. 한편, 초기 가열에 비해, Curie 점을 지난 6초 가열에서는 표면부의 발열량이 약 1/7정도로 크게 감소함을 보였다. 이때 표면부에는 여전히 발열량이 존재하여, 표면자체의 온도가 지속적으로 증가할 수 있음을 알 수 있으나, 발생하는 단위 열량의 크기는 점차 크게 줄어들고 있어 온도 상승이 둔화될 것으로 판단된다. 따라서 더 이상의 가열시간에 의해서는 표면 가열 효과가 크게 낮아 질 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 6은 등자속선도를 보여주고 있으며, 가열시간에 따른 자속분포의 변화를 보인 것으로 (a)는 3초 가열 후의 분포, (b)는 6초 가열 후의 분포를 나타낸다. 3초 가열시에는 자기경로의 두께가 다소 증가되어 있

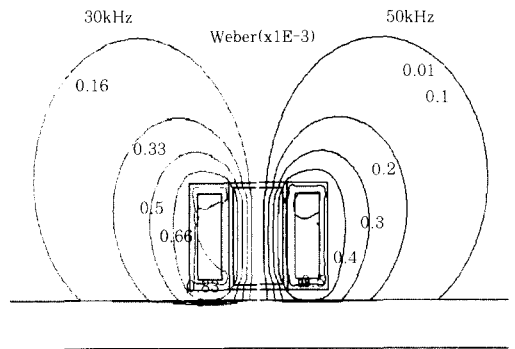


(a) between t=0sec and t=3sec

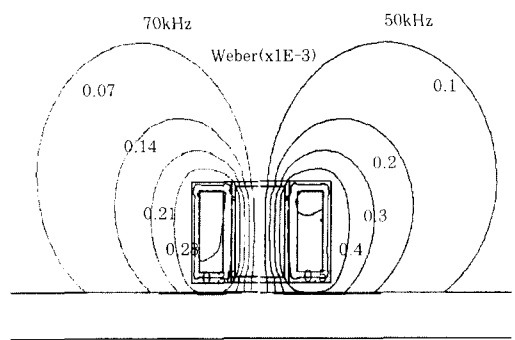


(b) between t=0sec and t=6sec

Fig. 6 Comparison of isolines of magnetic flux with different heating times



(a) between 30kHz and 50kHz



(b) between 50kHz and 70kHz

Fig. 7 Comparison of isolines of magnetic flux with different heating frequencies

고, 특히 6초 가열시에는 뚜렷하게 확대되어 있음을 보여, 강재가 760℃(Curie 점) 이상에서 투자율이 급감하는 효과에 의해, 자기저항이 증가하여 자기 경로가 더 낮은 온도의 부분으로도 이동한 결과를 나타내고 있다. 자기경로의 두께가 증가하는 것은 자속의 밀도가 낮아짐을 의미하고 이는 유도전류에 의한 발열량의 크기가 감소함을 나타낸다.

유도가열의 공정변수인 전원 주파수에 따른 유도가열효과를 판단하기 위해, 먼저 이에 직접적 영향을 미치는 자속의 분포를 해석하여 Fig. 7에 나타내었다. (a)는 30kHz와 50kHz, (b)는 50kHz와 70kHz의 결과를 각각 비교해 보였다. 결과에서 나타난 바와 같이 주파수가 증가할수록 모재 표면에서의 밀도가 높게 자속이 분포됨을 알 수 있다. 그러나 동시에 주파수의 크기가 증가할수록 자속의 크기가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 일정 전압원에서는 주파수가 증가할수록 리액턴스가 증가하여 전류가 줄어들기 때문이다. 유한요소해석으로 인덕터에 흐르는 전류값을 계산한 결과를 Fig. 8에 보여 주고 있다. 주파수가 증가할수록 전류가 대체로 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

발열량(power)의 밀도분포가 온도분포에 직접적 영향을 미치므로 이의 분포로서 온도분포의 형태를 간접적으로 비교해 볼 수 있다. Fig. 9에서는, 가열이 시작되기 전, 주파수에 따라 인덕터 아래 강재의 두께 방향(a)과 코일 중앙에서 폭 방향(b)으로 강재 표면에 나타나는 발열량의 분포를 보여 주고 있다. 주파수가 증가할수록 가열 깊이가 표면에 접근하였으나 최대 발열량의 크기가 크게 증가되지는 않았고, 주파수의 변화에 따라 표면에서의 최대 발열량은 최대 $50 \times 10^9 \text{W/m}^3$ 로 유사한 크기를 나타내고 있다. 주파수의 증가에도 불구하고 밀도의 크기가 크게 증가하지 않는 것은 전류의 감소로 인한 결과로 판단할 수 있다. 주파수가 감소할수록 두께 방향의 입열량의 크기가 크게 나타나고 있고, 가열깊이도 70kHz에서 0.3mm, 30kHz에서 0.7mm로 더 깊게 나타나고 있

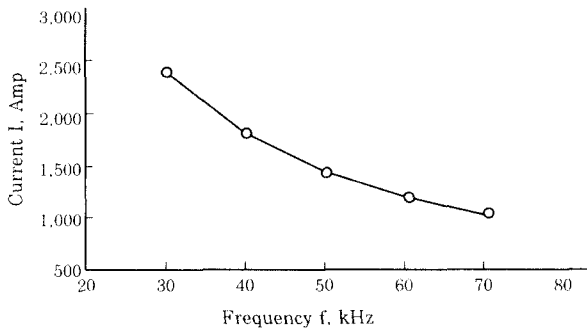


Fig. 8 Change of current with heating frequency

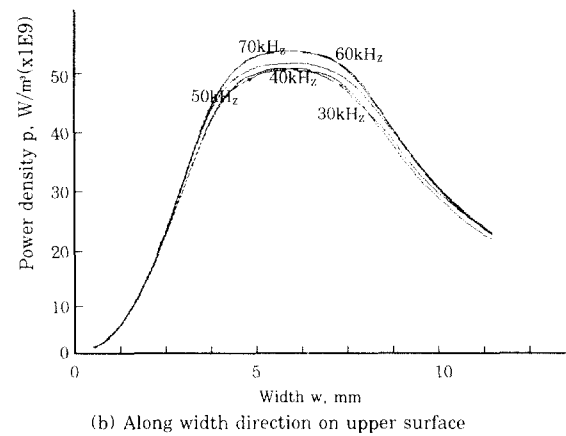
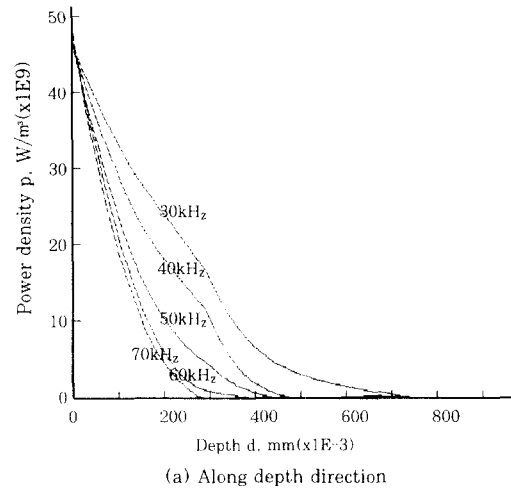


Fig. 9 Power-density distributions with various frequencies

음을 보이는데, 이는 인덕터 전류의 증가에 의한 자속의 크기가 증가된데 기인한 것으로 판단된다. 한편, 표면에서의 가열 폭의 변화는 주파수에 따라 뚜렷하지 않고, 유사한 가열폭을 나타내고 있다.

인덕터와 피가열체 사이의 공극(air gap)이 변화할 때 제안된 인덕터에 의한 강재의 가열특성의 영향을 해석하기 위해, 자속의 분포를 해석한 결과를 Fig. 10에서 보여주고 있다. 공극이 2.0mm에서 1.0mm로 변화함에 따라 자속의 분포가 변화됨을 나타내고 있고, 공극이 더 작은 1.0mm의 경우, 강재 표면에서의 자속밀도가 더 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 공극이 줄어 자기저항이 감소한 것이 주된 이유로 판단된다. 또한 공극이 감소할수록 표면을 관통하는 자속의 크기가 더 증가하였기 때문으로, 이는 강재 표면의 와전류가 인덕터에 미치는 상호인덕턴스를 증가시켜, 결과적으로 인덕터의 상당(equivalent) 인덕턴스를 줄여, 유도가열장치의 임피던스가 감소한 결과로 해석할 수 있다. 이와 같은 이유로 해서 인덕터를 흐르는 전류가 증가되고 있음은 Fig. 11에서 나타난 바와 같이

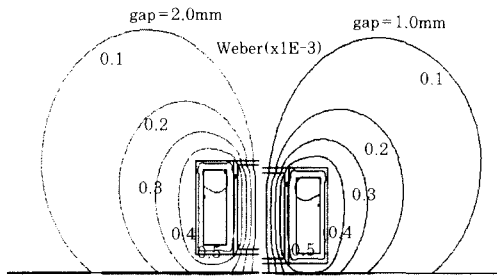


Fig. 10 Comparison of isolines of magnetic flux between with air gap of 1.0mm and with 2.0mm

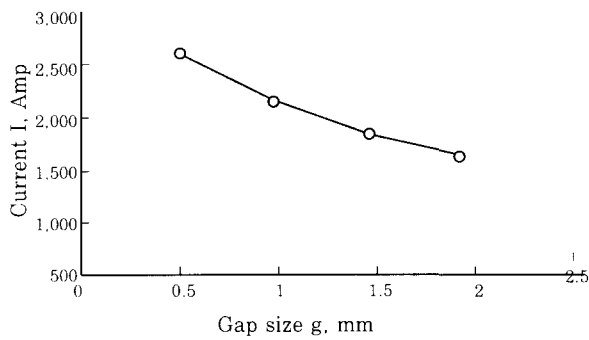
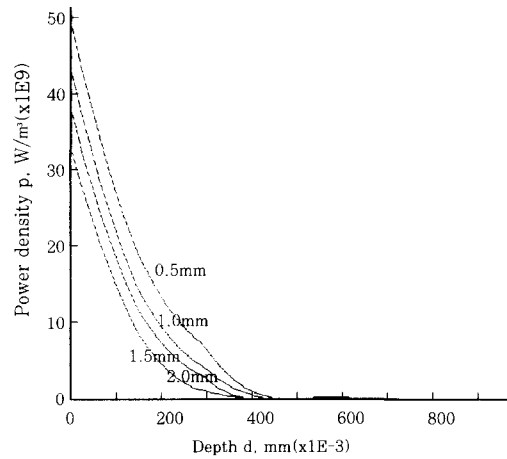


Fig. 11 Change of current with air gap

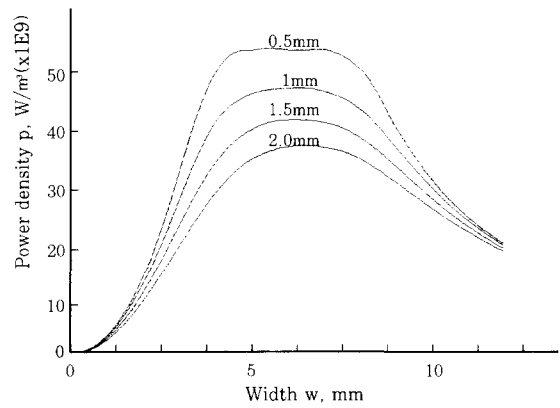
해석에서 정량적으로 산출할 수 있다.

Fig. 12에서는 공극의 변화에 따른 발열량의 변화를 강제 단면의 깊이방향과 강제 표면의 폭방향에 따라 나타내었다. 공극의 변화에 따라서는 폭방향 발열량과 깊이방향 발열량이 동시에 크게 변화됨을 나타내고 있다. 특히 2mm에서는 최대 발열량이 $37 \times 10^9 \text{W/m}^3$, 0.5mm에서는 $55 \times 10^9 \text{W/m}^3$ 의 크기를 나타내었고, 공극이 2mm에서 0.5mm로 줄어드는 경우, 발열깊이는 0.4mm에서 0.5mm로 다소 증가함을 보였다.

한편, 공극이 작아질수록 발열량이 폭과 깊이 방향 모두 비례적으로 증가되고 있어, 공극의 변화에 따라 온도분포 양상이 비교적 선형적으로 변화되어 나타날 수 있음을 알 수 있고, 공극의 조절에 따라 표면의 온도분포 제어가 용이할 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 공극 변화에 따라 자기경로의 자기저항이 선형적으로 변화하기 때문이고, 또한 인덕터에는 일정 교류 전압이 공급되어, 가열도중 코일을 흐르는 전류는 시스템의 임피던스에 의해 변화되며 Fig. 11과 같이 거리에 따라 비교적 선형적으로 변화되고 있기 때문에 나타난 결과로 해석된다. 한편 이와 같이 공극에 따른 전류의 변화가 선형적인 특징을 이용하면 인덕터를 흐르는 전류계측을 통해 인덕터의 높낮이를 간접적으로 산출할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Along depth direction



(b) Along width direction on upper surface

Fig. 12 Power-density distribution with various air gaps

5. 결 론

선상가열을 상사하기 위한 유도가열공정에서, 자기장 및 온도분포의 유한요소해석과 유도가열실험을 통해, 제안된 인덕터에 의한 가열특성을 파악하고, 이를 이용하여 주파수 및 공극 등 공정변수의 변화에 따른 영향을 파악하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 온도분포의 이론해석과 실험의 비교를 통해 유도 가열공정의 특성을 수치해석적방법에 의해 정량적으로 산출할 수 있었고, 따라서 유도가열장치의 공정해석 및 최적설계를 위한 사전 해석이 용이하게 가능함을 알 수 있었다. 요구되는 온도분포 형태가 주어지면, 이를 효율적으로 얻기 위한 공정변수의 선정이나, 인덕터 코일의 크기 및 간격 등의 최적설계가 가능할 것으로 판단된다.

2) 온도분포 및 자속분포를 고찰할 때, 표면 열원의 크기가 가열시간 즉 가열온도에 따라 점차 감소함을 보였고, 특히 Curie 점 이상으로 가열되면 발열이 크

게 감소하게 됨을 보였다. 초기 가열에 비해, 6초 후에는 발열량이 약 1/7정도 감소함을 보였다. 고온상태인 표면에서의 자기저항으로 인해, 표면 아래 부분에서도 자기경로가 형성되어 발열이 개시되는 발열기구를 보였다.

3) 일정 전압원을 사용하여 유도가열을 행할 경우, 30~70kHz인 주파수의 변화에 따라 표면 폭 방향의 발열량의 분포는 최대 $50 \times 10^9 \text{W/m}^3$ 의 크기로 유사하게 나타났으나, 주파수가 낮을수록 두께 방향의 발열량이 크게 분포되어 나타났고, 발열깊이도 70kHz에서 0.3mm, 30kHz에서 0.7mm로 증가되어 나타났다.

4) 인덕터와 피가열체의 간극인 공극의 변화에 따라서 발열량 분포가 두께와 폭 방향 공히 선형적으로 변화되어, 2mm에서는 $37 \times 10^9 \text{W/m}^3$, 0.5mm에서는 $55 \times 10^9 \text{W/m}^3$ 의 최대 크기를 나타내었다. 또한, 공극이 2mm에서 0.5mm로 줄어드는 경우, 발열깊이는 0.4mm에서 0.5mm로 다소 증가함을 보였다. 이로써, 표면의 온도제어를 위해서는 공극의 적절한 설정이 효과적인 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 논문은 2001년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참고 문헌

1. J. Davies and P. Simpson: Induction Heating Handbook, McGraw Hill(1979)
2. 김남석, 정홍규, 강충길: 반응용 단조를 위한 유도가열용 코일 설계의 최적화 및 실험적 연구, 주조, 19-5(1999), 393~402
3. 황승환: 유도가열시스템에서 코일의 위치 및 폭 최적설계, 서울대학교 석사학위논문(1995)
4. C. Chaboudez, S. Clain, R. Glardon and D. Mari, J. Rappaz, and M. Swierkosz: Numerical modelling in induction heating for axisymmetric geometries, IEEE Tran. on Magnetics, 33-1(1997), 739~745
5. U. Ludke and D. Schulze: Numerical simulation of continuous induction steel bar end heating with material properties depending on temperature and magnetic field, IEEE Tran. on Magnetics, 34-5(1998), 3110~3113
6. Y. Ueda, H. Murakawa, R.A. Mohamed, I. Neki, R. Kamachika, M. Ishiyama and J. Ogawa: Development of computer aided process planning system for plate bending by line heating(Report 3) - Relation between heating condition and deformation, Journal of ship Production, 10-4(1994), 248~257
7. 강중규, 이장현, 신종계: 선상가열을 위한 유도가열의 수치해석, 대한조선학회지, 37-3 (2000), 110~122
8. J. Barglik, K. Komez, B. Ulrych and S. Waik: Numerical modeling of transient heating of solid plate 3D structure, Int. Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 17-1(1998), 337~341
9. K. Tani and T. Yamada: New approach to coupled magnetic and thermal problem in induction heating system with traveling conduction plate using cubic interpolated pseudo-particle method, IEEE Tran. on Magnetics, 33-2(1997), 1706~1709
10. Flux2D User's guide, version 7.40, CEDRAT, France(2000)
11. Flux2D Induction heating tutorial, version 7.40, CEDRAT, France(2000)