

과도상태 설계민감도를 이용한 유도가열코일의 최적설계

論 文
49B-5-6

Optimal Design of the Induction Heating Coil using Transient Design Sensitivity Analysis

郭仁求* · 邊陳奎** · 崔 旻*** · 韓松嘩§
(In-Gu Kwak · Jin-Kyu Byun · Kyung Choi · Song-Yop Hahn)

Abstract - In this paper, the design sensitivity formula for the control of the transient temperature distribution is developed using the direct differentiation method, and used for the optimal design of induction heating coil position. The temperature distribution is calculated using the heat source of the induced eddy current and heat diffusion equation. The physical property variations of the workpiece depending on the temperature are considered. The eddy current distribution and the temperature distribution are calculated with the 2D finite element procedure. The adjoint variable technique is employed in expressing the design sensitivity. The goal of the design is to have the desired distribution of the temperature on a specific region of the workpiece. The numerical example shows that the proposed design sensitivity analysis for the control of the transient temperature distribution is very useful and practical in the optimal design of induction heating coils.

Key Words : Design Sensitivity Analysis, Optimization, Induction Heating, Finite Element Method

1. 서 론

20세기 초, 중주파수대 유도가열 용광로가 상업적인 용도로 개발된 이후, 2차 세계 대전동안 좀더 정확한 가열 깊이와 영역을 조절 가능하게 됨으로써 비약적인 발전을 하게 된다. 현재는 그 상업적 응용범위가 금속용융, 전체가열, 조리기, 표면경화, 결정성장, 반도체 웨이퍼 가공, 고속밀봉 등에 이르기까지 다양해 졌다[1,2]. 유도가열은 먼저 외부 열원이 없어도 된다는 장점을 지니고 있다. 이는 열손실이 작아 기존의 가열방법에 비해 효율이 높고 깨끗한 작업환경을 제공해 줄 수 있다는 것을 의미한다. 또한 제품 생산시 동일한 조건을 유지하여 제품의 질을 안정되게 할 수 있을 뿐만 아니라 생산공정을 자동화할 수 있게 해준다.

넓은 응용 분야와 여러 장점에도 불구하고 유도가열 기기의 설계는 다루기가 어려운 데, 그 이유는 전자기와 열 현상이 결합되어 있기 때문이다. 따라서 유도가열 기기의 설계는 실험에 의한 시행 착오(trial and error) 과정을 거치게 된다. 이 방법은 경험에 의존하고 많은 설계 비용과 시간을 요구할 뿐만 아니라 체계적이지 못하다. 따라서 컴퓨터 수치해석 기법을 이용한 유도가열 기기의 해석과 설계는 시간과 설계 비용의 절감을 가져다 줄 것이다. 최근에 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있지만, 많은 부분이 해석에

국한된 것이고, 설계와 관련된 연구는 미미한 형편이다[3~6]. 특히 순간가열공정 등에서의 정확한 열분포 해석을 위해서는 시간축 계산의 과도상태 해석에 의한 최적설계법이 개발되어야 한다.

본 논문에서는 전자기-열 결합시스템의 과도상태 설계민감도식을 유도하고 이를 결정론적인 최적화 알고리즘에 적용하여 피가열체 내의 원하는 온도 분포를 위한 유도가열 코일의 위치 최적화를 다룬다. 이를 위해서는 피가열체 내에 정확한 유도 전류 분포를 구하고 물리적 변수의 온도 의존성을 고려한 온도해석이 선행되어야 한다. 다음, 전자기와 열 확산 방정식을 이용하여 과도상태 설계민감도를 계산한다. 유도된 와전류에 의한 열원으로 인해 전자기장과 열이 서로 결합되어 있으므로 이를 고려하기 위하여 이중으로 설계 민감도식을 유도하였다. 이때 보조 변수가 도입되는데 보조 변수식은 이산화된 열 확산 방정식의 설계변수에 대한 미분 식으로부터 얻어진다. 그리고 문헌[1,2]에 제시된 온도 실험자료와 비교하여 본 논문의 온도해석 타당성을 검증한 후, 개발된 최적 설계 알고리즘을 유도가열코일의 위치 최적설계에 적용하여 그 타당성과 실용성을 확인하였다.

2. 유도가열 시스템 해석

2.1 전자기장과 열의 결합 시스템 해석

전자장과 열의 결합 시스템을 해석하는 기법은 다음과 같다. 먼저 형상과 초기의 물질 특성 값들이 주어지면, 맥스웰 방정식과 경계조건을 만족시키는 전자기 상태 변수를 유한요소법을 이용하여 계산하고, 여기서 구해진 값으로부터 피

* 正 會 員 : 三星電子 디지털 프린팅 事業部 · 工博

** 準 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程

*** 正 會 員 : 江原大 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 1月 25日

最終完了 : 2000年 4月 7日

가열체 내에 와전류와 이로 인한 열원을 얻는다. 그리고 다시 열 확산 방정식(heat diffusion equation)과 복사 및 대류 경계 조건을 만족시키는 피가열체 내의 온도 분포를 유한요소법을 이용하여 계산한다. 이때 구해진 온도 값들이 수렴하지 않으면 온도 의존성을 띠는 물질 특성 값들을 온도에 따라 다시 계산한 후, 전자기 시스템부터 반복적으로 계산한다. 이런 계산 과정을 각 시간 단계(time step)마다 거치게 된다. 이상에서 말한 해석기법의 흐름도는 그림 1과 같다.

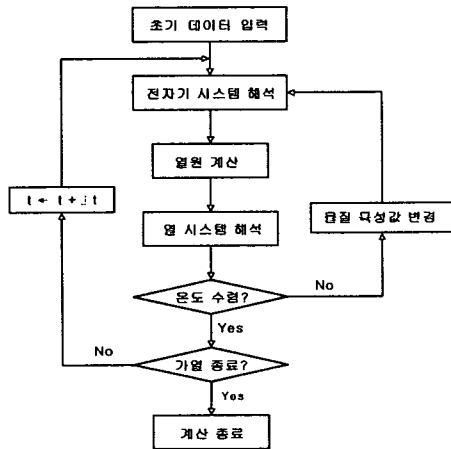


그림 1 유도가열시스템 해석 흐름도

Fig. 1 Flow chart of the simulation of induction heating system

2.2 전자장 해석

먼저 입력전류가 정현파인 와전류 문제의 지배방정식은 Maxwell의 방정식으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} - \sigma(j\omega \mathbf{A} + \nabla\phi) = -\mathbf{J}_s \quad (1)$$

위 식에서 \mathbf{A} 와 ϕ 는 각각 자기벡터포텐셜과 스칼라 포텐셜, μ 와 σ 는 각각 매질의 비투자율과 도전율, \mathbf{J}_s 와 ω 는 각각 정현파 입력전류의 크기와 각주파수이다. 그런데 축대칭 교류 자장 문제에서는 자기벡터포텐셜과 전류 밀도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{A} = \text{Re}\{A_\theta(r, z)e^{j\omega t}\} \hat{\theta}, \quad \mathbf{J}_s = \text{Re}\{J_s(r, z)e^{j\omega t}\} \hat{\theta} \quad (2)$$

유한요소 정식화를 위하여 갤러킨법을 적용하고 벡터등식과 식 (3)-(5)의 경계조건을 대입한 후, 정리하면 식(6)-(13)과 같은 행렬식을 얻게 된다.

i) 경계 Γ_1 에서 $A = A_0$ (고정경계조건-Dirichlet B.C.) (3)

ii) 경계 Γ_2 에서 $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ (Neumann B.C.) (4)

iii) 경계 Γ_3 에서 $\frac{\partial A}{\partial n} + A = 0$ (Robin B.C.) (5)

$$[K_e][A_R] = [f_e] \quad (6)$$

$$A_R = rA_\theta \quad (7)$$

여기서, $K_e = K_{e1} + K_{e2} + K_{e3}$ (8)

$$K_{e1} = \int_{\Omega} \frac{1}{\mu} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) 2\pi r dr dz \quad (9)$$

$$K_{e2} = \int_{\Omega} j\omega\sigma \frac{1}{r} N_i N_j 2\pi r dr dz \quad (10)$$

$$K_{e3} = \int_{\Gamma_3} \frac{1}{\mu} \frac{1}{r^2} N_i N_j 2\pi r d\Gamma \quad (11)$$

$$f_e = \int_{\Omega} J_s N_i 2\pi r dr dz \quad (12)$$

시스템 행렬식 식(6)을 풀면 각 절점에서의 자기벡터포텐셜과 와전류값, 그리고 열원을 계산할 수 있다.

2.3 온도 해석

미소 체적에 대한 에너지 보존 법칙으로부터 과도상태 열 확산 방정식이 다음과 같이 주어진다.

$$\nabla \cdot (k\nabla T) + \bar{q} = \rho_m C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

여기서, T [K]는 온도로서 위치와 시간의 함수이고, k [W/m·K]는 열 전도율, \bar{q} [W/m³]는 단위 시간당 단위 체적에 공급되는 열량, ρ_m [kg/m³]은 질량 밀도, C_p [J/kg·K]는 정압 비열이다.

열원의 시평균 값 \bar{q} 는 전자기 시스템 해석 결과로 얻어진 자기벡터포텐셜로부터 다음과 같은 순서로 계산한다. 먼저 피가열체 내에 유도되는 와전류는 다음과 같다.

$$J_e = \sigma E = -j\omega A \quad (14)$$

이때 와전류에 의한 피가열체 내의 열원은 다음과 같다.

$$q = \frac{1}{\sigma} (\text{Re}(J_e))^2 \quad (15)$$

그리고 열원의 시간 평균값은 아래의 식으로 표현된다.

$$\bar{q} = \frac{1}{2} \sigma \omega^2 A^* A \quad (16)$$

여기서 *는 켈레 복소수를 의미한다.

온도 해석 영역의 경계 조건은 다음과 같이 주어진다.

i) 경계 Γ_1 에서 $T = T_0$ (고정경계조건-Dirichlet B.C.) (17)

ii) 경계 Γ_2 에서 $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ (Neumann B.C.) (18)

iii) 경계 Γ_3 에서

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \epsilon_e \sigma_{sb} (T^4 - T_{amb}^4) + h_c (T - T_{amb}) \quad (19)$$

여기서, T_0 는 경계에서 주어진 온도이고, ϵ_e 는 방사율(emissivity coefficient)로서 0과 1사이의 값을 갖는데 얼마나 이상적인 흑체에 가까운가를 나타내고, σ_{sb} 는 스테판-볼츠만 상수(Stefan-Boltzmann constant)로 그 값은 $5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$ 이고, $h_c [W/m^2 \cdot K]$ 는 대류 열 전달 계수이고 T_{amb} 는 주변 온도이다. 식 (18)의 경계 조건은 기하학적·물리적 대칭성을 만족시킬 경우, 해석모델의 대칭축에 주어진다. 그리고 식(19)의 경계 조건은 해석모델 표면에서 일어나는 복사와 대류에 의한 경계 조건을 나타내며 일반적으로 수 백 도의 고온에서는 복사에 의한 열 교환이 대류에 의한 것보다 커지게 된다. 복사에 의한 열 교환 항은 다음과 같이 표현되어 대류에 의한 열 교환 항과 비슷하게 다루어진다.

$$\epsilon_e \sigma_{sb} (T^4 - T_{amb}^4) = h_r (T - T_{amb}) \quad (20)$$

여기서, $h_r [W/m^2 \cdot K]$ 은 복사 열 전달 계수로 온도 의존도가 강하며 다음과 같이 표현된다.

$$h_r = \epsilon_e \sigma_{sb} (T + T_{amb})(T^2 + T_{amb}^2) \quad (21)$$

대류 열전달 계수 h_c 는 온도 의존성이 약한 반면에 복사 열전달 계수 h_r 은 온도에 크게 의존한다.

전자장 시스템 유한 요소 정식화와 동일하게 갤러킨법을 과도상태 열 확산 지배방정식에 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} N [\nabla \cdot (k \nabla T) + \bar{q}] d\Omega = \int_{\Omega} \rho_m C_p \dot{T} d\Omega \quad (22)$$

여기서, \dot{T} 는 $\partial T / \partial t$ 이다. 피가열체가 등방성 열 전도율을 가질 때, 식 (22)는 부분 적분을 이용하여 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\int_{\Gamma} k N \frac{\partial T}{\partial n} d\Gamma - \int_{\Omega} k \nabla N \nabla T d\Omega + \int_{\Omega} \bar{q} N d\Omega \quad (23)$$

$$= \int_{\Omega} \rho_m C_p N \dot{T} d\Omega$$

위의 식 (17)-(19)의 경계 조건을 식 (23)의 경계 적분에 적용한 후, 복사 경계 조건에 식 (20)을 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_s} [h_r N (T - T_{amb}) + h_c N (T - T_{amb})] d\Gamma \\ & - \int_{\Omega} k \nabla N \nabla T d\Omega + \int_{\Omega} \bar{q} N d\Omega \quad (24) \\ & = \int_{\Omega} \rho_m C_p N \dot{T} d\Omega \end{aligned}$$

아래의 식 (24)를 이용하여 온도 T를 이산화하고, 식 (26)

과 같이 복사·대류 열 전달 계수를 하나로 묶어 표현하면 식 (24)는 식 (27)과 같이 이산화된 열 확산 행렬 방정식의 형태로 쓸 수 있다.

$$T = \sum_{i=1}^{n\theta} N_i T_i \quad (25)$$

$$h = h_c + h_r = h_c + \epsilon_e \sigma_{sb} (T + T_{amb})(T^2 + T_{amb}^2) \quad (26)$$

$$[K_T][T] + [R][\dot{T}] = [Q] \quad (27)$$

여기서, $[T]$ 는 전체의 절점 온도 벡터, $[K_T]$ 는 열 전달 행렬, $[R]$ 은 열 용량 행렬, $[Q]$ 는 열 유속(heat flux) 벡터이며 다음과 같다.

$$[K_T] = \sum_{e=1}^{n\theta} \sum_{i,j} \left[\int_{\Omega} k \nabla N_i \nabla N_j d\Omega + \int_{\Gamma_s} h N_i N_j d\Gamma \right] \quad (28)$$

$$[R] = \sum_{e=1}^{n\theta} \sum_{i,j} \left[\int_{\Omega} \rho_m C_p N_i N_j d\Omega \right] \quad (29)$$

$$[Q] = \sum_{e=1}^{n\theta} \sum_i \left[\int_{\Omega} \bar{q} N_i d\Omega + \int_{\Gamma_s} h T_{amb} N_i d\Gamma \right] \quad (30)$$

식 (27)과 같은 열 확산 방정식에 시간에 대한 열의 미분 형태가 들어 있는데, 이를 수치적으로 처리해야 한다. 본 논문에서 사용하는 방법은 후퇴차분법이다. 식 (27)에 이 방법을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\left[K_T + \frac{1}{\Delta t} R \right] [T^{t+\Delta t}] = [Q^{t+\Delta t}] + \left[\frac{1}{\Delta t} R \right] [T^t] \quad (31)$$

원통 좌표계에서 식 (16)과 식 (28)-(30)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [K_T] = \sum_{e=1}^{n\theta} \sum_{i,j} \left[\int_{\Omega} k \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) 2\pi r dr dz \right. \\ \left. + \int_{\Gamma_s} h N_i N_j 2\pi r d\Gamma \right] \quad (32) \end{aligned}$$

$$[R] = \sum_{e=1}^{n\theta} \sum_{i,j} \left[\int_{\Omega} \rho_m C_p N_i N_j 2\pi r dr dz \right] \quad (33)$$

$$[Q] = \sum_{e=1}^{n\theta} \sum_i \left[\int_{\Omega} \bar{q} N_i 2\pi r dr dz + \int_{\Gamma_s} h T_{amb} N_i 2\pi r d\Gamma \right] \quad (34)$$

$$\bar{q} = \frac{1}{2} \sigma \omega^2 A_{\theta}^* A_{\theta} = \frac{1}{2} \sigma \omega^2 \frac{1}{r^2} A_R^* A_R \quad (35)$$

3. 과도상태 설계 민감도 해석

3.1 보조변수를 이용한 과도상태 설계 민감도 해석

과도상태에서 동작하고 있는 시스템의 이산화된 상태 방정식은 확산 방정식의 형태로 일반적으로 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$[K][X] + [R][\dot{X}] = [Q] \quad (36)$$

여기서 $[X]$ 는 시스템의 상태 변수이다.

최적 설계를 위한 척도로서의 목적 함수는 일반적으로 설계변수와 시스템의 상태변수의 함수로 다음과 같이 관심을 두는 시간 영역에 대해 적분식으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F = \int_{t_i}^{t_f} G([X], [\dot{X}], [p]) dt \quad (37)$$

여기서, t_i, t_f 는 각각 과도상태의 초기 시각, 최종 시각이고 $[p]$ 는 설계변수 벡터이다.

설계민감도는 설계변수에 대한 목적 함수의 전미분으로 정의되며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dF}{d[p]} = \int_{t_i}^{t_f} \left(\frac{\partial G}{\partial [X]} \frac{\partial [X]}{\partial [p]} + \frac{\partial G}{\partial [\dot{X}]} \frac{\partial [\dot{X}]}{\partial [p]} + \frac{\partial G}{\partial [p]} \right) dt \quad (38)$$

여기서 우변 첫째 항과 둘째 항은 설계변수의 변화에 따라 상태 변수가 변하고, 다시 상태 변수의 변화에 따라 목적 함수가 변화하는 양을 나타낸다. 그리고 셋째 항은 상태 변수를 고정시켜 놓은 상태에서 설계변수의 변화에 의한 목적 함수의 변화량을 나타낸다.

식 (38)의 우변 둘째 항을 부분 적분하면 \dot{X} 의 설계변수에 대한 미분항이 사라진 형태의 민감도 식을 얻을 수 있는데, 그 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dF}{d[p]} &= \frac{\partial G}{\partial [\dot{X}]} \frac{\partial [X]}{\partial [p]} \Big|_{t_i}^{t_f} \\ &+ \int_{t_i}^{t_f} \left\{ \left(\frac{\partial G}{\partial [X]} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial G}{\partial [\dot{X}]} \right) \right) \frac{\partial [X]}{\partial [p]} + \frac{\partial G}{\partial [p]} \right\} dt \end{aligned} \quad (39)$$

그런데 상태 변수 초기 값이 식 (40)과 같이 주어져 있다면 상태 변수의 설계변수에 대한 미분항 $\partial X / \partial p|_{t=t_i}$ 가 영이다. 따라서 식 (39)는 식 (41)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$X|_{t=t_i} = X_0 \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \frac{dF}{d[p]} &= \frac{\partial G}{\partial [\dot{X}]} \frac{\partial [X]}{\partial [p]} \Big|_{t=t_f} \\ &+ \int_{t_i}^{t_f} \left\{ \left(\frac{\partial G}{\partial [X]} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial G}{\partial [\dot{X}]} \right) \right) \frac{\partial [X]}{\partial [p]} + \frac{\partial G}{\partial [p]} \right\} dt \end{aligned} \quad (41)$$

설계민감도 식을 설계변수 변화의 양함수로 표현하기 위해 보조 변수(adjoint variable)를 도입한다. 과도상태에 있는 시스템의 경우, 식 (36)의 이산화된 상태 방정식에 보조 변수를 곱하여 시간에 대해 적분하면 다음과 같은 항등식이 얻어진다.

$$\int_{t_i}^{t_f} [\lambda]^T ([K][X] + [R][\dot{X}] - [Q]) dt = 0 \quad (42)$$

여기서 T는 전치(transpose)를 의미한다. 보조 변수 λ 는 시간의 함수이고 설계변수에 대해 독립적이다. 식 (42)를 설계변수에 대해 미분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_{t_i}^{t_f} \left([\lambda]^T [K] \frac{\partial [X]}{\partial [p]} + [\lambda]^T [R] \frac{\partial [\dot{X}]}{\partial [p]} - \frac{\partial [S]}{\partial [p]} \right) dt = 0 \quad (43)$$

여기서

$$[S] \equiv [\lambda]^T [Q] - [\lambda]^T [K][\dot{X}] - [\lambda]^T [R][\dot{X}] \quad (44)$$

로 정의되며, \sim 는 설계변수에 대한 편미분에 대해 상수임을 의미한다. 상태 변수의 초기 값이 설계변수에 대해 상수임을 이용하여 식(43)의 둘째 항을 부분 적분하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} &[\lambda]^T [R] \frac{\partial [X]}{\partial [p]} \Big|_{t=t_i} \\ &+ \int_{t_i}^{t_f} \left(([\lambda]^T [K] - [\lambda]^T [R]) \frac{\partial [X]}{\partial [p]} - \frac{\partial [S]}{\partial [p]} \right) dt = 0 \end{aligned} \quad (45)$$

위의 식 (45)는 임의의 함수 $\lambda(t)$ 에 대해서 유효하다. 따라서 식 (41)과 식 (45)를 비교하여 아래의 식 (46)과 식 (47)을 만족시키는 보조 변수 λ 를 계산한다.

$$[R]^T [\lambda(t_f)] = \left(\frac{\partial G}{\partial [\dot{X}]}(t_f) \right)^T \quad (46)$$

$$[R]^T [\lambda] = [K]^T [\lambda] - \left(\frac{\partial G}{\partial [X]} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial G}{\partial [\dot{X}]} \right) \right)^T \quad (47)$$

식(45)를 식(41)에 대입하면 설계변수에 대한 상태 변수의 음함수적인(implicit) 미분항을 포함한 항들이 설계변수에 대한 명시적인(explicit) 항 $\partial S / \partial p$ 로 대체된다. 과도상태 설계민감도의 최종적인 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dF}{d[p]} = \int_{t_i}^{t_f} \left(\frac{\partial [S]}{\partial [p]} + \frac{\partial [G]}{\partial [p]} \right) dt \quad (48)$$

정리하면, 먼저 초기 값 문제(initial value problem)인 식 (36)을 풀어 상태 변수의 해를 구한다. 다음에, 식 (46)과 식 (47)의 형태로 보조 변수의 최종 조건이 주어진 보조 변수 식을 풀면 보조 변수 해를 얻는다. 식(46)과 식(47)에서 볼 수 있듯이 보조 변수는 최종 값 문제(terminal value problem)를 풀어야 한다. 상태 변수 해 $\tilde{X}, \tilde{\dot{X}}$ 와 보조 변수 해 λ 로부터 식 (48)와 같이 설계민감도를 계산할 수 있다.

3.2 전자기-열 결합 시스템에서의 온도 제어 문제

3.1절에서 유도했던 과도상태 설계민감도 해석을 전자기와 열이 결합된 유도가열 기기의 최적 설계에 적용하기 위

해서는 2장에서 설명한 전자기 방정식과 온도 방정식을 모두 고려해야 한다.

최종 가열 시각에 원하는 온도 분포를 얻기 위하여 목적 함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F = \int_{t_i}^{t_f} \delta(t-t_f) G([T], [\dot{T}], [p]) dt \quad (49)$$

$$\text{여기서, } G(T, \dot{T}, p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_s} (T_i - T_{io})^2 \quad (50)$$

이고 δ 는 디랙-델타 함수(Dirac delta function), n_s 는 온도 시험 절점의 개수, T_i 는 온도 시험 절점에서 계산된 온도, T_{io} 는 온도 시험 절점에서 원하는 온도를 의미한다. 따라서 목적함수는 설계 목적이 달성될수록 영에 가까운 값을 갖게 되고, 최적 설계 문제는 수학적으로는 함수 F 가 최소값이 되게 하는 변수 p 를 구하는 문제로 귀착된다.

식 (46)과 식 (47)에서 주어진 보조 변수식의 구동항에 식 (49)와 식 (50)을 고려하고, 식 (36)에 해당하는 유도 가열 시스템의 열 확산 방정식-식 (27)-을 고려하면 보조 변수식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[R]^T [\lambda(t_f)] = \left(\frac{\partial G}{\partial [\dot{T}]}(t_f) \right)^T = 0 \quad (51)$$

$$[R]^T [\lambda] = [K_T]^T [\lambda] - \delta(t-t_f) \left(\frac{\partial G}{\partial [\dot{T}]} \right)^T \quad (52)$$

이때 식(52)로 표현되는 보조 변수의 확산 방정식을 풀기 위하여 다음과 같은 시간 차분법을 이용한다.

$$[\lambda] \rightarrow [\lambda'] \quad (53)$$

$$[\lambda] \rightarrow \frac{1}{\Delta t} ([\lambda]^{t+\Delta t} - [\lambda']) \quad (54)$$

$$\frac{\partial G}{\partial [\dot{T}]} \rightarrow \frac{\partial G}{\partial [\dot{T}]} \Big|^{t+\Delta t} \quad (55)$$

위의 식 (53)~(55)를 식 (52)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\left[[K_T] + \frac{1}{\Delta t} [R] \right] [\lambda'] = \quad (56)$$

$$\frac{1}{\Delta t} [R] [\lambda]^{t+\Delta t} + \delta(t-t_f) \frac{\partial G}{\partial [\dot{T}]} \Big|^{t+\Delta t}$$

이때 얻어지는 보조 변수를 이용하여 최종적인 설계민감도 식은 식 (44)와 식 (48)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dF}{d[p]} = \int_{t_i}^{t_f} \left(\frac{\partial}{\partial [p]} ([\lambda]^T [Q] - [\lambda]^T [K_T] [\dot{T}]) \right. \quad (57)$$

$$\left. - [\lambda]^T [R] [\dot{T}] + \frac{\partial G}{\partial [p]} \right) dt$$

식 (57)에서 유도 가열 시스템이 전자기와 열이 결합된 시스템을 나타내는 항은 $[Q]$ 이다. 이는 $[Q]$ 의 구성 요소들 중에 열원의 시평균값 \bar{q} 가 포함되어 있는데 이 항은 식 (16)에서 알 수 있듯이 전자기 시스템과 직접적인 관련이 있음을 의미한다. $\partial Q / \partial p$ 항은 설계변수가 전자기 시스템에 영향을 미치고, 그 영향이 다시 열 시스템에서 열원과 관련된 값을 변화시키는 항에 해당된다.

열 구동항 벡터 $[Q]$ 는 자기벡터포텐셜 $[A]$ 의 함수이다. 전자기 시스템을 식 (6)과 같이 복소수 변수를 이용하여

해석할 경우, 열 구동항 벡터의 자기벡터포텐셜에 대한 변화량을 다음과 같은 방법으로 처리한다. 먼저, 전자기 시스템의 상태 변수 A 는 실수부 A_r 과 허수부 A_i 로 구성되고, 이들은 설계변수 p 의 함수이므로 변화량을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = Q(A_r(p), A_i(p)) \quad (58)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial [Q]}{\partial [p]} &= \frac{\partial [Q]}{\partial [A_r]} \frac{\partial [A_r]}{\partial [p]} + \frac{\partial [Q]}{\partial [A_i]} \frac{\partial [A_i]}{\partial [p]} \\ &= Re \left\{ \left(\frac{\partial [Q]}{\partial [A_r]} - j \frac{\partial [Q]}{\partial [A_i]} \right) \left(\frac{\partial [A_r]}{\partial [p]} + j \frac{\partial [A_i]}{\partial [p]} \right) \right\} \\ &= Re \left\{ \frac{\partial [Q]}{\partial [A]} \frac{\partial [A]}{\partial [p]} \right\} \end{aligned} \quad (59)$$

여기서 $j = \sqrt{-1}$ 이고,

$$\frac{\partial [Q]}{\partial [A]} \equiv \frac{\partial [Q]}{\partial [A_r]} - j \frac{\partial [Q]}{\partial [A_i]} \quad (60)$$

와 같이 정의한다. 따라서 전자기 시스템의 이산화된 방정식을 설계변수에 대해서 미분한 식과 식 (59)을 이용하면 열 구동항 벡터의 설계변수에 대한 변화량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial [Q]}{\partial [p]} = Re \left\{ \frac{\partial [Q]}{\partial [A]} [K_e]^{-1} \frac{\partial}{\partial [p]} (f_e - K_e \bar{A}) \right\} \quad (61)$$

여기서, \bar{A} 는 설계변수 p 에 대한 편미분에 대해 상수임을 의미한다. 식 (61)에서 열 구동항 벡터 $[Q]$ 의 전자기 상태 변수 벡터 $[A]$ 에 대한 변화량은, 식 (34)에서 알 수 있듯이 열원의 시평균 값 \bar{q} 만이 자기벡터포텐셜의 함수이기 때문에 남게 된다. 반면에 주변 온도와 관련된 경계 적분항의 자기벡터포텐셜에 대한 미분 값은 영이 된다. 이때 열원 시평균 값의 자기벡터포텐셜에 대한 미분 값은 식 (35), 식 (59)과 식 (60)을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial A} \equiv \frac{\partial \bar{q}}{\partial A_r} - j \frac{\partial \bar{q}}{\partial A_i} = \sigma \omega^2 A^* \quad (62)$$

그런데, 원통 좌표계에서는 유한요소법 정식화를 용이하게 하기 위하여 전자기 상태 변수로 자기벡터포텐셜 A_θ 대신에 식 (7)에서 정의된 A_R 을 사용했기 때문에 열원 구동항의 설계변수에 대한 미분값이 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial [Q]}{\partial [p]} &= Re \left\{ \frac{\partial [Q]}{\partial [A_R]} \frac{\partial [A_R]}{\partial [p]} \right\} \\ &= Re \left\{ \frac{\partial [Q]}{\partial [A_R]} [K_e]^{-1} \frac{\partial}{\partial [p]} (f_e - K_e \bar{A}_R) \right\} \end{aligned} \quad (63)$$

$$\frac{\partial [Q]}{\partial [A_R]} = \sum_{e=1}^{n_s} \sum_r \left[\int_{\Omega} \sigma \omega^2 \frac{1}{r^2} N_i A_R^* d\Omega \right] \quad (64)$$

$$d\Omega = 2\pi r dr dz \text{와 } A_R = \sum_j N_j A_{Rj} \text{를 이용하면}$$

$\partial Q/\partial A_R$ 의 i 행 j 열의 요소는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial [Q]}{\partial [A_R]} \Big|_{ij} = 2\pi\sigma\omega^2 \int_{\Omega} \frac{1}{r} N_i N_j A_{Ri}^* dr dz \quad (65)$$

설계변수가 코일의 위치나 폭과 같은 기하학적 형상에 관련되어 있는 경우, 식 (61)이나 식 (63)에서 전자기 시스템 행렬 K_e 의 설계변수 p 에 대한 미분항은 영이 된다. 이는 전류원 문제에서 K_e 가 식 (9)~(11)에서 보듯이 피가열체의 비투자율과 전기전도율과 관련된 항이기 때문이다. 나머지 항인 f_e 의 형상 설계변수에 대한 미분식은 국부 좌표계를 도입하면 보다 쉽게 계산될 수 있다.

이상의 보조 변수를 이용한 과도상태 민감도 계산 과정을 요약하면 다음과 같다.

- i) 정상상태 전자기 방정식과 과도상태 열 방정식을 풀어서 자기벡터포텐셜 $[\vec{A}]$ 와 온도 $[\vec{T}]$ 를 구한다.
- ii) 보조 변수식 (51)과 (56)을 풀어서 보조 변수 $[\lambda]$ 를 구한다.
- iii) i)과 ii)에서 계산된 $[\vec{A}]$, $[\vec{T}]$ 그리고 $[\lambda]$ 를 가지고 식 (57)의 민감도 식으로부터 민감도를 계산한다.

4. 사례 연구

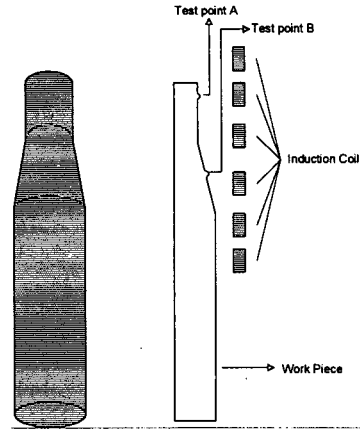
본 장에서는 앞에서 제시된 과도상태 시스템의 민감도 해석을 유도가열 기기의 코일 위치 최적 설계에 적용하였다. 참고 문헌[7]에 나와 있는 테이퍼 실린더(tapered cylinder)를 모델로 사용하였다. 참고 문헌에 제시되어 있는 피가열체 표면 두 곳에서의 실험 값과 본 논문에서 사용하는 전자기-열 결합 시스템 해석 방법을 이용한 수치 해석 결과들 서로 비교 검토하여 본 논문에서 사용하는 온도 해석 방법의 타당성을 살펴보았다.

전자기장 해석과 시간 차분법에 의한 온도 해석 결과와 전자기-열 결합 시스템의 과도상태 민감도 계산 결과를 이용하여, 피가열체의 특정부위에 균일한 온도 분포를 갖도록 유도가열 코일의 위치를 설계한 후, 초기 모델이 나타내는 온도 분포와 비교하였다.

4.1 전자기장 및 온도 해석

설계하고자 하는 모델은 Chaboudez[7]에 나와 있는 스테인레스강 X5CrNi 18/9 (1.4301)재질의 테이퍼 실린더이다. 피가열체의 형상은 그림 2(a)와 같다. 여기에 원통 형태로 유도가열 코일을 설치해 피가열체를 가열하게 되는데, 축대칭 모델을 이용해 해석하였다. 2차원 단면은 그림 2(b)와 같다. 피가열체와 유도가열 코일의 세부 사항은 표 1에 나타내었다. 피가열체 물질 상수의 온도에 따른 변화 값들은 그림 3에 있다. 가열 범위 내에서 전기전도율은 대략 0.5배, 열전도율은 2배, 열 용량은 1.2배, 열전달 계수는 3.6배 정도 변화함을 알 수 있다. 특히, 열 전달 계수가 크게 변하는 이유는 복사 열전달이 스테판-볼츠만 법칙에 의해 온도에 4제곱에 비례하여 이루어지기 때문이다. 대류 열전달 계수는

온도에 따라 약간 변하기는 하지만 복사 열전달계수에 비해 변화량이 매우 작으므로 상수로 잡았다.



(a) 피가열체 형상 (b) 2차원 모델

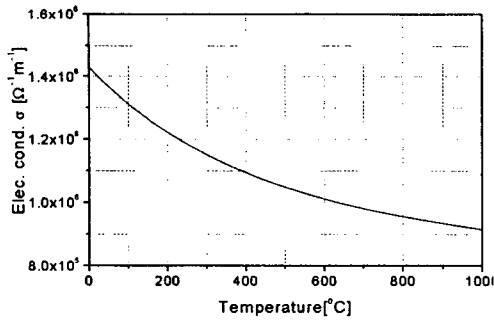
그림 2 피가열체 및 유도코일의 2차원 모델

Fig. 2 Shape of the workpiece and two dimensional cross section

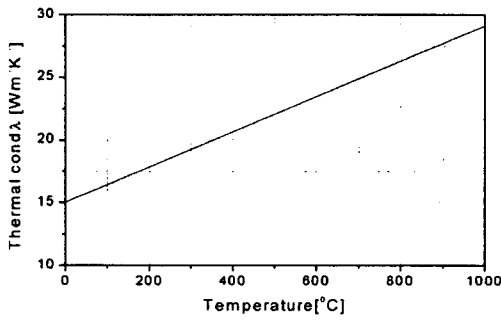
표 1 설계 모델 사양

Table 1 Details of design model

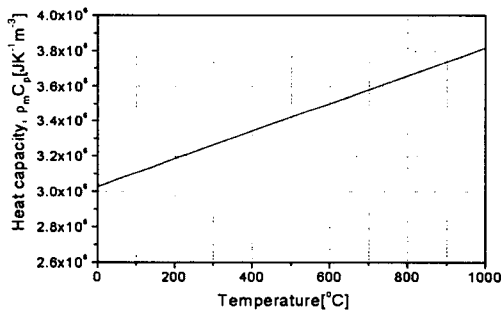
피가열체의 사양	
전체 길이	135 mm
원통부 상단의 길이	20 mm
원통부 상단의 직경	20 mm
원통부 하단의 길이	85 mm
원통부 하단의 직경	30 mm
중간 부분의 길이	30 mm
유도가열 코일의 사양	
권선 단면적	5×10 mm
피가열체 상단에서 위 코일 상단까지의 거리	12.5 mm
첫 두 권선 사이의 거리	3 mm
두 번째 권선과 세 번째 권선 사이의 거리	5.5 mm
두 개의 중간 부분 권선 사이의 거리	8 mm
코일의 내부 직경	50 mm
코일의 외부 직경	60 mm
온도 센서의 위치	
피가열체 상단에서 측정점 A까지의 거리	5 mm
피가열체 상단에서 측정점 B까지의 거리	35 mm
기 타	
전원 주파수	10 kHz
전류 밀도	5.46×10 ⁷ [A/m ²]
가열 시간	25 초
주위 온도	20 ℃



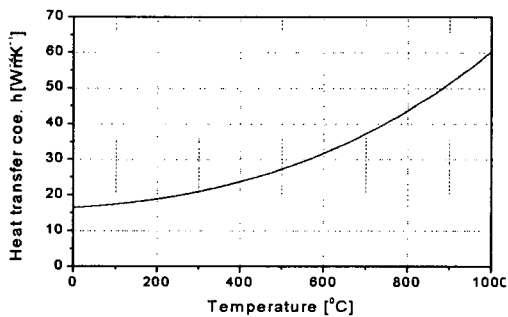
(a) 전기전도율



(b) 열 전도율



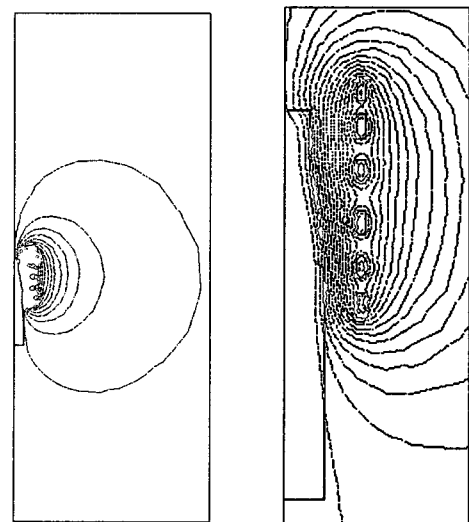
(c) 열 용량



(d) 열 전달 계수

온도 해석시 시간 차분법에 필요한 시간 간격은 1초이다. 그림 4에 가열 시각 1초일 때의 등전위 (A_θ) 분포를 나타내었다. 그림 4(b)를 보면 피가열체 상단부는 자장이 잘 침투하고, 피가열체 내부에서는 표피 효과(skin effect) 때문에 자장이 피가열체 깊은 곳까지는 침투하지 못함을 볼 수 있다. 참고로 피가열체의 자장 침투 깊이(skin depth)는 상온에서 3.6[mm]이고 1,000°C에서는 5.3[mm]이다. 이를 고려하기 위하여 요소망을 발생할 때, 피가열체의 표피 부근을 1[mm]간격으로 5층으로 세분하였다.

피가열체 상단 부분과 중간 부분에 있는 점 A와 B의 시간에 따른 온도변화결과를 참고 문헌에 나와 있는 AMYSA Yverdon S.A.회사의 실험 자료와 비교하여 그림 5에 나타내었다. 그림 6을 보면, 온도 해석 결과가 온도 오차로는 -11°C~33°C 이내로, 백분율 오차로는 -3%~8% 이내로 실험 자료와 일치함을 알 수 있다. 참고로 문헌에서 제시하고 있는 실험시 측정 오차는 대략 ±10°C이다. 가열 초기에 오차가 많이 생기는 이유는 참고 문헌[7]에도 제시되어 있는데, 실험장치의 전원이 정상 상태로 도달하기까지 대략 2.5초가 소요됐기 때문이다. 그래서 실험 온도에 비해 수치해석에 의한 온도 값이 크다. 그림 4.7에서는 피가열체 내부의 온도 분포를 도시하였다. 그림 7(a)는 유도가열이 끝나는 순간의 온도 분포인데, 상단부 표면의 온도가 중심부에 비해서 높음을 볼 수 있다. 그림 7(b)는 유도가열 종료 7초 후의 온도 분포인데, 표면의 열이 외부 중으로는 대류와 발산에 의해서 전해지고 내부로는 전도에 의해 전해서 상단부 내·외부의 온도가 균일해지는 것을 볼 수 있다. 유도가열이 종료된 직후, 피가열체 상단부 표면의 온도 분포를 그림 8에 나타내었다. 그래프에서 x축은 피가열체 최상단에서 온도 시험 절점사이의 아랫방향 직선거리를 의미한다. 문헌에서는 피가열체의 유도가열 목적이 상단부의 균일한 가열이라고 하지만 온도 최고점(1082°C)과 최저점(973°C)의 차이가 109°C가 나는 것을 볼 수 있다.



(a) 전체 영역

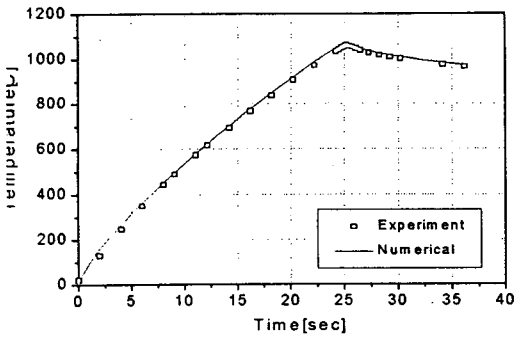
(b) 확대된 영역

그림 4 등전위 (A_θ) 분포도 ($t=1$ 초)

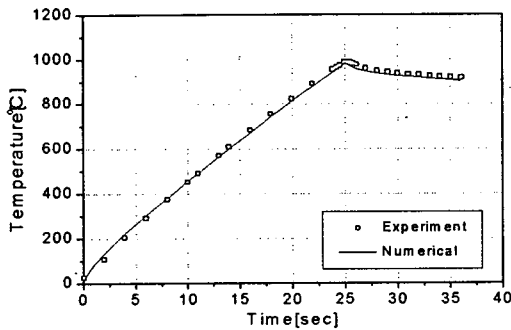
Fig. 4 Equi-potential (A_θ) distribution

그림 3 온도 변화에 따른 물성값 변화

Fig. 3 Dependence of physical parameters on temperature

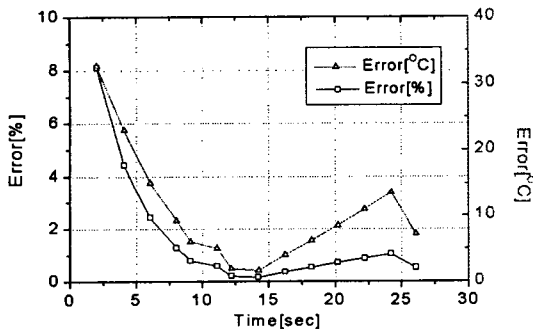


(a) 측정점 A

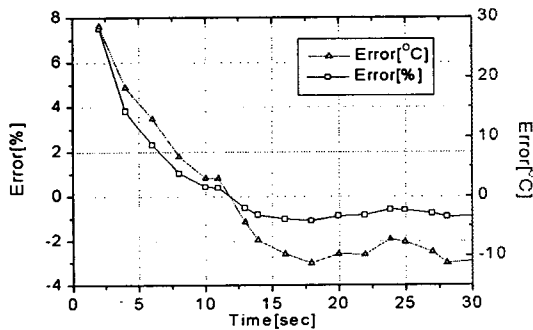


(b) 측정점 B

그림 5 측정점의 온도 변화 비교
Fig. 5 Comparison of the temperatures

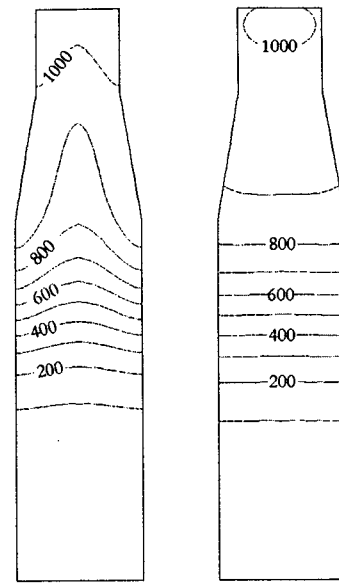


(a) 측정점 A



(b) 측정점 B

그림 6 실험값과 계산값 사이의 오차
Fig. 6 Error between experimental temperature and simulated temperature



(a) t=25초

(b) t=32초

그림 7 피가열체 내의 온도 분포 (설계전)
Fig. 7 Temperature distribution inside the workpiece

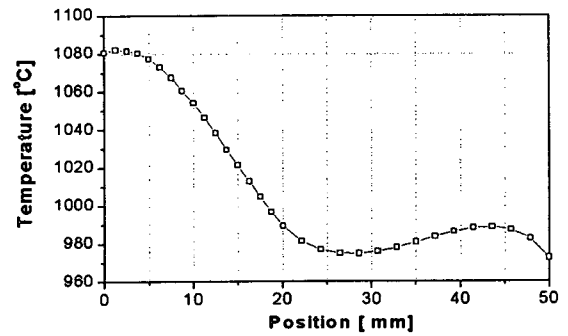


그림 8 피가열체의 표면 온도 분포 (설계전)
Fig. 8 Surface temperature distribution of the workpiece

4.2 과도상태 설계민감도를 이용한 최적 설계

설계변수는 유도가열 코일의 위치로 그림 9에 나타낸 것과 같이 지름방향으로 움직일 수 있도록 하였다. 목적함수가 정의되는 시험 절점은 피가열체 상단부에 \bullet 로 표시하였다. 시험 절점에서 온도의 목표 값은 1027°C (=1300K)로 균일한 온도 분포를 갖도록 하는 것이 설계의 목적이다. 과도상태 민감도를 계산하여 최대 경사법의 미분 정보로 이용하였다.

최적 설계 후, 유도가열 코일의 위치를 초기 위치와 비교하여 그림 10과 표 2에 나타내었다. 위 쪽 두개의 코일은 피가열체 상단부의 가열에 미치는 영향을 줄이기 위해 원래의 위치에서 멀어졌고, 셋째와 다섯째 코일은 온도 상승을 위해 피가열체에 가까워졌다. 반복 계산에 따른 유도가열 코일의 위치 변화를, 초기 위치를 기준으로 하여 그림 11에 도시하였다. 15회 반복이 지나면서 코일의 위치 변화도 기

의 없음을 알 수 있다. 흥미로운 것은 다른 코일들은 한 방향으로 지속적으로 움직여 가는 반면에, 넷째와 여섯째 코일은 움직임의 방향이 반복 계산 중간에 바뀐다는 것이다. 이는 목적함수가 정의되는 온도 시험 영역의 온도에 미치는 코일들의 영향이 서로 독립적인 것이 아니라 상호 결합되어 있기 때문인 것으로 생각된다.

반복 계산에 따른 표면온도 분포의 변화는 그림 12에 나타나 있다. 그래프에서 x축의 값은 피가열체 상단에서 아래 방향 거리를 의미한다. 설계 초기에 109°C의 차이를 보이던 표면 온도가 설계 후에는 14°C로 줄어들었다. 최적 설계 후 피가열체 내부의 온도는 그림 13과 같다. 등온선간의 온도 차이는 100°C이다. 그림 7(a)과 그림 13(a)을 비교해 보면 피가열체 상단부의 온도가 설계 후에 균일하게 나타나는 것을 알 수 있다.

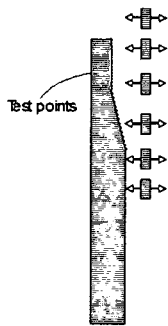


그림 9 설계변수와 온도 시험 절점
Fig. 9 Design variables and test points

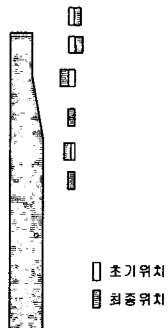


그림 10 설계 전·후의 코일 위치 비교
Fig. 10 Comparison of modified and initial positions of coils

표 2 유도가열 코일의 위치 변화
Table 2 Position of induction heating coils

	대칭축으로부터 코일 중심까지의 거리	
	초기값	최종값
Coil 1	27.5 [mm]	29.8 [mm]
Coil 2	27.5 [mm]	30.7 [mm]
Coil 3	27.5 [mm]	23.7 [mm]
Coil 4	27.5 [mm]	27.0 [mm]
Coil 5	27.5 [mm]	25.5 [mm]
Coil 6	27.5 [mm]	27.2 [mm]

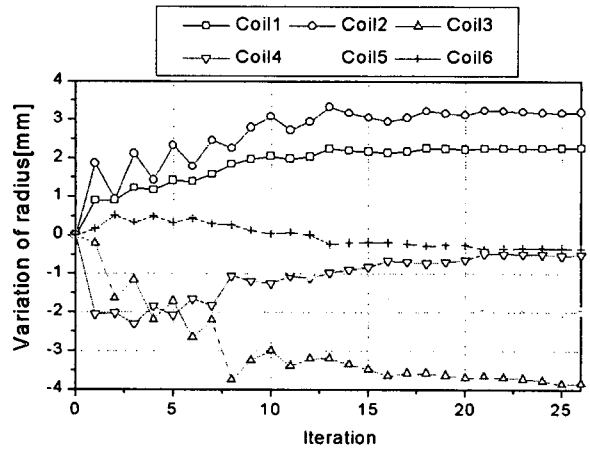


그림 11 반복 횟수에 따른 코일 위치의 변화
Fig. 11 Coil positions variation according to the iteration number

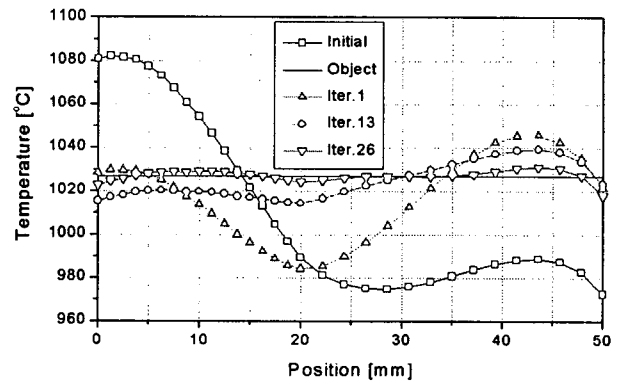


그림 12 반복 횟수에 따른 표면 온도의 변화
Fig. 12 Variation of the surface temperature

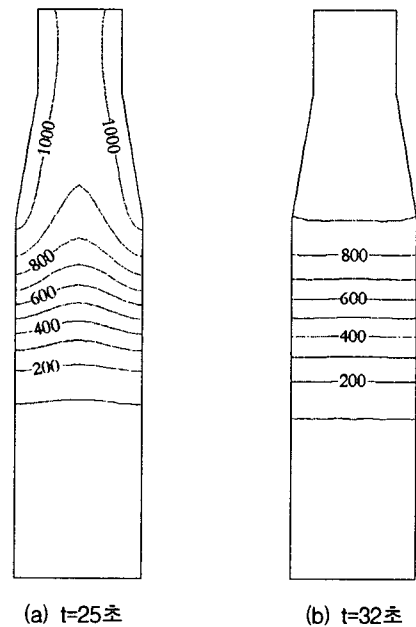
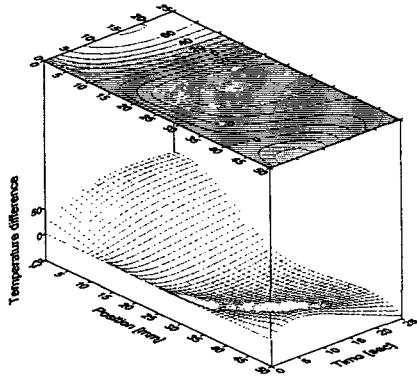


그림 13 피가열체 내의 온도 분포 (설계후)
Fig. 13 Temperature distribution inside the workpiece

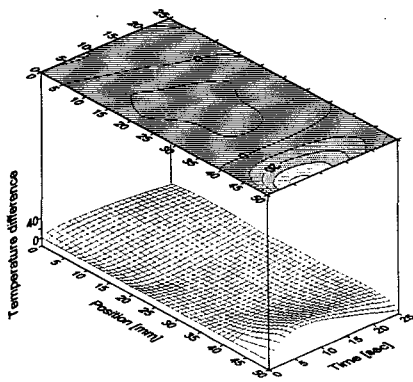
설계 전·후에 대해서, 목적 함수가 정의되는 시험 절점들에서 시간에 따른 온도 차이의 변화를 그림 14에 나타내었다. 그래프에서 z방향의 값은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$Z(x, t) = T_d(x, t) = T(x, t) - T_{av}(t) \quad (66)$$

여기서, $T_{av}(t)$ 는 시간 t일때 시험절점들의 평균 온도를 의미한다. 그림 14에서 보듯이 설계 전에는 각 시간별로 -50℃에서 +70℃의 온도 차이가 존재한다. 그러나 최적 설계 후에는 -10℃에서 +40℃의 온도 차이를 보여 가열 시간 내내 균일한 온도 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 한가지 흥미로운 사실은 온도의 비균일성은 유도가열이 끝나는 시점이 아닌 가열 도중에 일어난다는 사실이다. 설계 전에는 15~20초 사이에, 설계 후에는 5~10초 사이에 나타난다. 이러한 현상은 최적 설계 전·후에 동일하게 일어나는데, 이는 여러 물성값들의 비선형성 때문인 것으로 사료된다.



(a) 최적 설계 전



(b) 최적 설계 후

그림 14 표면 온도 차이의 변화
Fig. 14 Variation of the surface temperature difference

5. 결 론

본 논문에서는 전자기와 열이 결합된 시스템인 유도가열 기기의 열 과도상태에 대한 설계민감도 계산법을 도출하고, 이를 최적화 알고리즘에 결합시켰다. 이를 이용하여 구체적

인 적용 사례를 보임으로써 제시된 설계 방법의 타당성을 입증하였다.

유도가열 기기와 피가열체 내의 제반 특성을 구하기 위한 수치 해석법으로 유한요소법을 사용하였다. 전자장 해석으로 유도된 와전류를 구하고 이로부터 과도상태 열 해석에 필요한 열원을 계산함으로써 전자장과 열을 결합하였다. 과도상태 열 해석시 시간차분법을 이용하였다.

열적으로 과도 상태에 있는 시스템을 고려한 설계 민감도식을 도출하였다. 상태 변수의 전미분 항을 소거하여 설계 민감도식을 설계 변수만의 함수로 표현하기 위하여 보조 변수식을 도입하였다. 유한 요소법에 기초한 이산화된 상태 방정식에 보조 변수를 곱한 후, 설계 변수에 대해 미분한 결과와 민감도식을 비교하여 보조 변수식이 얻어진다. 특히 유도된 와전류에 의한 열원으로 인해 전자기장과 열이 서로 결합되어 있어 이를 고려하기 위하여 이중으로 설계 민감도식을 유도하였다. 유도된 설계 민감도식을 다양한 사례에 적용하였다.

우선 온도 실험 자료가 제시된 테이퍼 실린더의 온도 해석을 통해 본 논문에서 사용하고 있는 과도상태 온도 해석이 정확함을 확인하였다. 그리고 설계민감도를 이용하여 유도 가열이 끝나는 순간에 균일한 온도 분포를 얻기 위하여 유도 가열 코일의 위치를 최적 설계하였다. 109℃차이를 보이던 온도 분포가 14℃ 이내로 줄어들었다. 이로써 제시된 설계 방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

현재 유도 가열 기기의 설계에는 주로 실험을 기초로 한 시행착오적인 방법이 사용되는데, 이 방법은 경험에 많이 의존하고 비용과 시간을 많이 요구할 뿐 만 아니라 체계적이지 못하다. 따라서 보다 정밀한 유도 가열을 위해 본 논문에서 제시한 방법은 유용하게 이용될 수 있으리라 사료된다. 또한 본 논문에서 제안된 결합시스템의 과도상태 민감도 해석을 이용한 최적 설계 기법은 전자기, 열, 기계 등이 결합되어 있고 과도상태에서 작동하거나 과도상태가 중요한 의미를 갖는 다른 시스템의 최적 설계에도 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- [1] E. J. Davies and P. G. Simpson, Induction Heating Handbook, London: McGraw-Hill, 1979
- [2] E. J. Davies, Conduction and Induction Heating, IEE Power Engineering Series 11, 1990
- [3] Y. M. Li, J. Fouladgar and G. Develey, "Inverse Problem Methodology in an Induction-Heating System," IEEE Trans. on Magn., vol.30, no.5, pp.3076-3079, 1994.
- [4] N. Bianchi and F. Dughiero, "Optimal-Design Techniques Applied to Transverse - Flux Induction-Heating Systems," IEEE Trans. on Magn.,

vol.31, no.3, pp.1992-1995, 1995.
 [5] O. Longeot, L. Nicolas and Ph. Wendling. "3D Design of an inductor for induction heating using 2D FEM and 3D BIEM modelling," IEEE Trans. on Magn., vol.27, no.5, pp.4004-4007, 1991.
 [6] H. Hedia, F. Henrotte, P. Dular, J.-F. Remacle and

W. Legros, "Optimization of the Width of a Thin Plate in a Transverse Flux Induction Furnace," IEEE Trans. on Magn., vol.35, no.5, pp.3118-321, 1998.
 [7] C. Chaboudez, S. Clain, R. Glardon, D. Mari, J. Rappaz and M. Swierkosz, "Numerical Modeling in Induction-Heating for Axisymmetrical Geometries," IEEE Trans. on Magn., vol.33, no.1, pp.739-745, 1997.

저 자 소개



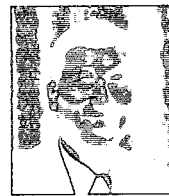
곽 인 구 (郭 仁 求)
 1968년 7월 25일 생. 1992년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 현재 삼성전자 근무
 Tel : 0331-200-4613
 E-mail : ingu@eesri-10.snu.ac.kr



최 경 (崔 炘)
 1958년 4월 30일 생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 강원대학교 전기전자정보통신공학부 교수
 Tel : 0361-250-7270
 E-mail : kyunchoi@cc.kangwon.ac.kr



변 진 규 (邊 陳 奎)
 1972년 7월 13일. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정
 Tel : 02-880-7261
 E-mail : aiolia@plaza1.snu.ac.kr



한 송 엽 (韓 松 晔)
 1939년 3월 14일 생. 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1968년 동 대학교 전임 강사. 1979년 프랑스 로렌공과대학 대학원 졸업(공학). 1995년 당 학회 회장. 1995년-1996년 서울대 공대 학장. 현재 서울대 전기공학부 교수
 Tel : 02-880-7246
 E-mail : syhahn@plaza.snu.ac.kr