大韓造船學會論文集
第 37卷 第 3號 2000年 8月

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 37, No. 3, pp.110-121, August 2000

선상 가열을 위한 고주파 유도 가열의 수치 해석

강중규*, 이장현**, 신종계***

Numerical analysis of induction heating for the application of line heating

Jung Gyu Kang*, Jang Hyun Lee** and Jong Gye Shin***

요 약

선상가열의 열원으로는 가스 가열법, 고주파 유도 가열법, 그리고 레이저 가열법 등이 사용될 수 있다. 가스 가열법은 많은 조선소등에서 사용되고 있으나 가열 후 얻어지는 잔류변형을 제어하는데 많은 어려움이 있다. 고주파 유도 가열법은 비교적 정확한 변형량 제어가 가능하다는 장점을 가지고 있어서 새로운 선상가열 열원으로서 활용될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 고주파 유도가열법을 이용한 선상 가열의 변형 특성 및 가열장치의 특성을 파악하기 위한 기본단계로써 고주파 유도가열에 의한 열변형 과정에 대한 해석을 시도하였다. 전자장 해석과 와전류 해석, 와전류에 의하여 판에 발생하는 온도 분포, 그리고 열탄소성 변형 해석을 수행하였다.

Abstract

Gas heating, high frequency induction heating and laser heating can be used as the heat-source of line heating. Most of shipyards have been using the gas heating method for line heating. It is difficult to control the residual deformation of gas heating. High frequency induction heating is more feasible for the automation of line heating rather than the gas heating method since it is easy to control the magnitude of heat input. In this study, a numerical model of high frequency induction heating process is proposed for the application of the line heating. The simulation process of the induction heating is composed of the electromagnetic analysis, the heat transfer analysis, and the thermal deformation analysis.

접수일자: 1999년 12월 7일, 승인일자: 2000년 7월 3일
*정회원, 대우중공업(주) 선박해양기술연구소 과장(E-mail: jgkang3@daewoo.dhi.co.kr)
**정회원, 서울대학교 공학연구소 연구원(E-mail: jhlsk@casper.snu.ac.kr)
***정회원, 서울대학교 조선해양공학과 교수(E-mail: jgshin@snu.ac.kr)

1. 서 언

선박의 선수미를 구성하는 3차원 형상의 외판을 성형 가공하기 위해서 일반적으로 선상가열법이 이용되고 있다. 선상 가열 공정의 열원으로는 가스 가열 방식, 레이저 가열 방식, 그리고 고주파 유도가열(high frequency induction heating) 방식 등이 가능하다. 현재 대부분의 조선소에서는 가스 가열 방식을 이용하여 선상 가열 작업을 행하고 있다. 가스 가열 방식은 저렴한 비용으로 이용이 가능하지만 잔류 변형량과 밀접한 관계를 가지는 입열량의 정확한 제어와 해석이 어려운 단점이 있다. 레이저 가열 방식은 정확한 입열량 및 변형량 제어가 가능한 반면 비용이 매우 많이 드는 특징을 가지고 있다. 그러나, 고주파 유도 가열 방식은 비교적 경제적으로 정확한 입열량의 제어와 추정이 가능한 것으로 알려져 있다[1]. 유도 가열은 전자기유도법칙에 의해 도체에 전류를 유도하여 가열하는 방식이며, 금속 표면의 열처리, 예열(preheating), 용접, 용융 등에 다양하게 사용되고 있다.

최근 들어 선상 가열의 자동화를 위한 연구 및 노력이 많이 시도되고 있다. 가스 열원을 이용한 선상 가열의 3차원 이동 열원에 대한 수치 시뮬레이션 및 열변형 해석이 이루어졌으며[2-5], Ueda 등[1]에 의해서 유도가열에 의한 선상 가열 자동화에 관한 연구가 수행됨으로써 자동화에 적합한 열원으로서 고주파 유도 가열에 관한 관심이 높아지고 있다. 또한 Tomita 등[6], Ishiyama 등[7], Shin 등[8], 그리고 Kitamura & Sakai[9]는 선상 가열 자동화 시스템 구성에 대한 연구를 수행하였으며 선상 가열의 가열 정보 산출에 관한 연구도 수행되었다[10].

유도가열을 이용한 선상 가열 과정을 이해하기 위해서는 먼저 전자기장의 이론에 의하여 도체에 유도되는 와전류를 구한 후에 와전류에 의한 열원을 계산하여 열전달해석을 수행하여야한다. 열전달 해석을 통하여 얻어진 온도 분포에 의한 열변형 과정은 열탄소성해석을 통하여 예측될 수 있다. 유도가열의 수치해석을 위해 주로 유한요소법 또는 경계요소법을 이용한 연구가 많이 이루어졌다[11-15]. 유도 가열에서 가장 중요한 인자가 되는 와전류(eddy current)를 구하는 연구도 매우 다양하게 이루어졌다[12,15,16]. 도체에 유도되는 와전류는 주파수가 높을수록 더 도체의 표면으로부터 얕은 깊이까지만 존재하게되고 내부에는 전류가 존재하지 않는다. 이러한 현상을 표면효과(skin effect)라고 하며 그 깊이가 전체 도체의 크기에 비해 작아지기 때문에, 유한 요소법을 사용하여 전자장 해석을 수행할 경우 도체 표면에 매우 조밀하고 많은 요소(element)를 필요로 하게 되어 계산시간을 증가시키는 요인이 된다. 엄밀한 유도가열시스템의 와전류 및 온도 분포 해석은 3차원 해석을 필요로 하지만, 3차원 해석의 시간적, 경제적인 어려움이 크므로 적당한 가정 하에 시스템을 2차원으로 근사하여 해석한 연구[17]도 이루어졌으며, 현재도 3차원 와전류 해석에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다.

유도가열현상은 전자기적 특성과 열적 특성을 모두 포함하는 복잡한 공정이기 때문에 원하는 목적에 적합한 유도가열 장치를 설계하는 것은 어려우며 실험에 필요한 유도가열의 시스템의 제작에는 많은 비용이 요구된다. 따라서 유도가열을 수치적으로 해석하고 시스템의 특성을 파악하는 과정은 유도가열시스템의 설계에 반드시 필요한 일이다.

본 연구에서는 유도가열 방법의 선상가열 자동화 적용성의 가능성을 검토하기 위하여 그 특성을 파악하고자 한다. 고주파 유도가열법을 이용한 선상 가열의 변형 특성 및 가열장치의 특성을 파악하기 위한 기본단계로써 고주파 유도가열에 의한 열변형 과정에 대한 해석을 시도하였다. 고주파 유도 가열 장치에 의한 전자장 해석을 통하여 외판에 발생하는 와전류, 와전류에 의하여 판에 발생하는 온도 분포, 그리고 열 변형에 의한 잔류변형 생성 과정을 위한 해석 과정을 검토하고자 한다. 해석 과정에서 전자기장 해석은 2차원 모델에 대하여 수행하였으며 결과로서 얻어진 와전류 분포를 이용하여 3차원 정지 열원에 대한 열전달

해석 및 열변형 해석을 수행하였다. 해석을 위하여 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하였다.

2. 고주파 유도 가열의 기본 특성 및 해석 과정

2.1 고주파 유도가열의 원리

고주파 유도 가열의 기본 원리는 시각에 따라 자속이 변화하는 자기장(magnetic field)내에 놓은 도체에 전기장(electric field) 또는 전류가 유도된다는 Faraday의 전자기 유도 법칙에 있다[18-23]. 이 때 생기는 전류를 와전류라 한다. 즉, 가열 대상의 근처에 위치한 코일에 고주파 전류를 흐르게 하면 전류가 가열 대상의 표면 근처의 내부에 자속을 발생시켜 이 자속에 의해 유도 전류가 흘러 유도 전류에 의해 생성된 줄열(Joule heat)이 대상물을 내부에서 직접 가열한다는 것이다. 유도가열을 이용하여 가열하기 위해서는 소재와 가까운 곳에 시간에 따라 변화하는 자기장을 형성시킬 장치가 필요하다. 이것은 코일을 소재의 주위에 배치하고 교류전류(AC)를 흐르게 하여 만들 수 있다.

2.2 고주파 유도 가열의 해석 과정

유도 가열법은 전자기 현상, 열전달 현상, 탄소성 변형 현상이 연성되어 있다. 그러나 본 연구에서는 각각의 현상이 다른 현상에 미치는 영향이 작다고 가정하여 각각의 현상을 분리하여 순차적으로 해석하였으며, 해석을 위하여 유한 요소법에 의한 수치 해석 방법을 이용하였다. Fig. 1에 고주파 유도 가열 에 의한 와전류 해석의 흐름도를 나타내었다. 유도 가열 장치의 코일에 인가된 교류 전류는 판에 시간에 따른 자기장의 변화를 유기하며, 전자기장 해석을 통하여 판에 분포하는 줄열을 계산한다. 계산된 줄열을 판 내부의 열원(heat generation rate)으로 이용하여 열전달 해석을 수행하여 판의 온도 분포를 계산한다. 이 온도 분포에 의한 열탄소성 변형해석을 수행함으로써 잔류 변형을 계산한다.

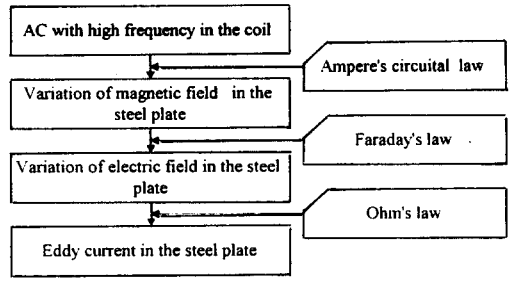

Fig. 1 Schematic diagram of the analysis procedure for the eddy current

2.3 전자기장 이론

전자기이론은 맥스웰(Maxwell)의 방정식과 연속방정식 및 매질간의 경계관계로 이루어진다. 전자기장 해석에 있어서 전기장과 자기장이 시간에 따라 변하는 경우 전기장과 자기장 사이의 관계는 다음과 같은 평형 방정식과 연속 방정식으로 구성되어 있다[18, 20, 21].

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho_v \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서

$\mathbf{E}$= 전기장의 세기 V/m

$\mathbf{B}$= 자속 밀도 Wb/m^2

$\mathbf{H}$= 자기장의 세기 A/m

$\mathbf{J}$ = 전류 밀도 A/m^2

$\mathbf{J}_s$= 전원의 전류 밀도 A/m^2

$\mathbf{J}_e$= 와전류 밀도 A/m^2

$\mathbf{D}$ = 전속 밀도 C/m^2

ρ_v = 전류 밀도 C/m^3

선형 등방성 재료 (linear isotropic

material)로 가정하면 전자기장의 구성 방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{D}=\varepsilon\,\mathbf{E}$$
$$\mathbf{B}=\mu\,\mathbf{H} \qquad (2)$$

여기서 ε = 상대 유전율 F/m

μ = 투자율 H/m

투자율은 등방성재료(isotropic material)의 경우에 아래와 같이 정의된다. 진공에서의 투자율 μ_o의 값은 $4\pi\times10^{-7}$이며, 재료의 상대투자율(relative permeability, μ_r)은 재료 투자율의 진공에서의 투자율에 대한 비로 정의된다.

$$\mu_r=\frac{\mu}{\mu_o} \qquad (3)$$

상대투자율에 따라서 재료는 다음과 같이 크게 세 가지로 분류된다.

반자성재료(diamagnetic material) - $\mu_r\lesssim1$

상자성재료(paramagnetic material) - $\mu_r\gtrsim1$

강자성재료(ferromagnetic material) - $\mu_r\gg1$

반자성재료와 상자성재료의 투자율은 온도에 상관없이 일정한 반면에 강자성재료의 투자율은 온도의 함수이며 자기이력으로 불리는 B-H (magnetic hysterisis)관계식에 의하여 표현된다. 어느 순간의 투자율을 결정하기 위해서는 자기이력을 통하여 자기장의 궤적을 추적하여야 하지만, 본 연구에서는 투자율은 상수로 가정한다.

식 (1)과 식 (2)에 자기 벡터 포텐셜 A의 개념을 도입하면 2차원 교류 전류원 와전류 문제의 지배 방정식을 단순하게 아래 식과 같은 확산 편미분 방정식으로 표현할 수 있다[11].

$$-\frac{1}{\mu}\nabla^2\mathbf{A}+\sigma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}=\mathbf{J}_S \qquad (4)$$

여기서,

A = 자기 벡터 포텐셜 Wb/m

σ = 전기 전도율 $\mho$/m

식 (4)는 전원이 조화 (time-harmonic)로 주어진 경우($A(x,y,t)=A(x,y)e^{i\omega t}$)에는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{1}{\mu}\nabla^2\mathbf{A}+i\omega\sigma\mathbf{A}=\mathbf{J}_S \qquad (5)$$

여기서 ω = 주파수 rad/s

주어진 Js와 경계 조건 하에서 식 (5)를 계산하면 자기 벡터 포텐셜 A가 얻어지고 가열될 판의 포텐셜 값으로부터 와전류의 분포 및 줄열을 계산할 수 있다. 아래의 식과 같은 Ohm의 관계식으로 표현된다.

$$\mathbf{J}_e=\sigma\mathbf{E}=-i\omega\sigma\mathbf{A} \qquad (6)$$

$$J_{heat}=\mathbf{J}_e^2/\sigma \qquad (7)$$

여기서 J_{heat} = 줄열 (Joule heat J/m^3)

2.4 열전달 해석 이론

에너지보존법칙과 푸리에의 법칙을 적용하면 다음의 열전도 지배 방정식을 얻는다[24].

$$\nabla\cdot(k\,\nabla T)+q^v=\rho c_P\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (8)$$

위 식에서 사용된 변수들은 다음과 같다.

ρ = 밀도 Kg/m^3

c_P = 정압비열 $J/Kg\cdot K$

k = 열전도율 $W/m\cdot K$

q^v = 단위체적당 에너지생성률 W/m^3

대류 열전달에 의한 경계 조건은 아래와 같다.

$$q''=-k\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}}=h(T-T_\infty) \qquad (9)$$

위에서 q''은 열유속이며, h는 대류열전달계수, 그리고 T_∞는 주변 공기의 온도이다.

절점에서 온도 벡터를 T라고 하면 열전도 지배 방정식과 경계조건은 다음과 같은 유한요소 정식화로 바꿀 수 있다[25].

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{T}} + (\mathbf{K}^b + \mathbf{K}^c)\mathbf{T} = \mathbf{Q}^c + \mathbf{Q}^g \qquad (10)$$

이때, C는 정압비열로부터 얻어지는 행렬이고, $\mathbf{K}^b, \mathbf{K}^c$는 각각 열전도 계수 행렬, 대류 계수 행렬과 형상 함수의 적분으로 이루어진 강성행렬이다[25]. $\mathbf{Q}^c, \mathbf{Q}^g$ 는 각각 대류열전달 경계조건, 에너지 생성율에 의한 하중 벡터이다.

2.5 열탄소성 변형 정식화

열 하중만이 작용하는 열변형 해석을 위한 유한요소 정식화는 아래와 같은 형태로 표현된다[4].

$$\mathbf{KU} = \mathbf{F}^{th} + \mathbf{F}^{pr} + \mathbf{F}^{nd} \qquad (11)$$

여기서, K는 강성 행렬, U는 절점 변위, $\mathbf{F}^{th}$, $\mathbf{F}^{pr}$, $\mathbf{F}^{nd}$ 는 각각 열 변형율에 의한 하중, 표면력과 절점력에 의한 하중 벡터이다[4]. 열응력과 관련된 재료 특성값은 온도 의존성 특성을 고려되어야 한다[4]. 재료의 항복 조건은 von Mises의 항복 조건식을 따르는 것으로 가정하였다.

3. 유도 가열에 의한 열변형 해석

3.1 해석 모델

해석에 사용된 코일은 트랜스버스 가열 방식의 코일로 가정하였다[1]. Fig. 2에는 판 위에 가열 코일이 놓인 형상을 간략하게 나타냈다. 가열 코일의 내부는 자속을 집중시킬 수 있도록 강자성 재료를 선택하였으며, 가열 코일은 평판의 중심선 중앙 위치에서 3초 동안 가열하였다고 가정하였다. 평판의 치수는 폭 250mm, 길이 150mm, 두께 15mm이며 코일의 길이는 60mm, 양쪽 코일 사이는 10mm의 간격을 두었다. 코일은 판 길이 방향의 중앙에 위치하고 있으며, 코일에는 주파수 30kHz, 전류밀도는 3×10^7 A/m^{2}의 교류 전류가 흐르는 이상적인 가열 장치를 가정하였다. 가열 코일의 형상이 좌우 대칭이므로 우측면에 대한 해석만 수행하였다(Fig .3). 유한 요소 해석모델은 판, 코일, 코어, 외부 공기의 4가지의 재료로 구분하였다. 코일에 교류 전원이 프르면 외부 공기에 자기장이 생성되어 전체 자기장의 분포에도 영향을 미치므로 외부 공기를 자기장이 무시할 만큼 충분히 작아지는 영역까지 포함하였다. 대칭면에서는 자속(magnetic flux)이 대칭면을 관통할 수 없는 자속 평형 (flux-parallel) 경계 조건을 적용하고 전류원과 충분히 먼 외부에는 'far-field zero' 경계 조건을 적용하여 자기 벡터 포텐셜의 값을 0으로 가정하였다[11]. 와전류를 포함하는 유도가열 문제의 엄밀한 3차원 유한요소 해석은 매우 많은 계산 시간과 대용량의 전산기를 필요로 하므로 현실적인 어려움이 따른다. 따라서 해석 형상에 따라 2차원으로 가정하거나 간략화된 모델에 대한 유한요소해석을 수행한다. 본 연구에서 대상으로 하는 가열 장치는 길이방향(x)으로 동일한 형상을 가지고 있으므로, 가열 코일의 끝부분을 제외한 부분에서 동일한 와전류 분포를 가진다. 끝부분의 와전류는 중앙부 근처의 값에 비하여 매우 작으므로 가열 코일의 중앙부 단면에 대해서 2차원 전자장 해석을 수행하여 길이 방향으로 확장하는 방법을 이용한다. Fig. 4에 2차원 전자기장 해석을 위한 간략화된 형상과 경계 조건을 보이고 있다.

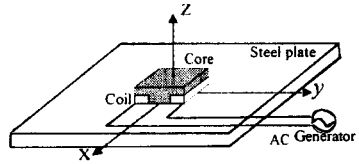

Fig. 2 Schematic configuration of induction heating method

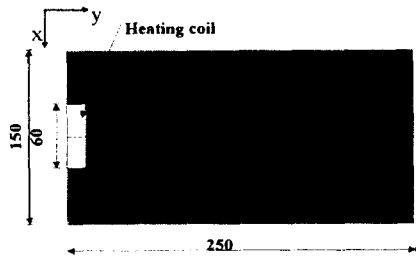

Fig. 3 Location of heating coil(mm)

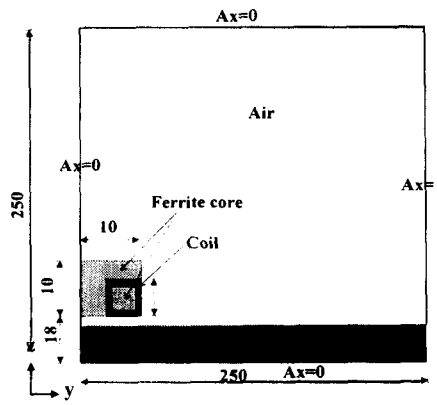

Fig. 4 Simplified model for electro-magnetic analysis (mm unit)

유한 요소는 x 방향의 자기 벡터 포텐셜 (A_x)을 자유도로 갖는 2차원 평면요소를 사용하였다. 해석은 조화 모드에서 수행하였는데 조화 해석 자체가 선형 해석이므로 재료의 특성치는 상수로 가정하였다. 해석에 사용된 재료의 특성치는 Table 1에 보인 바와 같다[22].

Table 1 Electro-magnetic material property

판의 비저항(resistivity)	5×10^{-7} Ωm
판의 상대투자율	2000
공기의 상대투자율	1
페라이트 코어의 상대투자율	2500

3.2 와전류 및 줄열

Fig. 5에 자기장 해석에 의하여 구한 자기 벡터 포텐셜의 분포를 나타내고 있다. 페라이트 코어에 의한 자기장의 응집 효과와 대칭축에서의 Flux-parallel 경계 조건과 Far-field zero 경계 조건이 잘 나타나 있음을 알 수 있다. 또한 이 결과는 Ueda 등[1]의 결과와 정성적으로 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. Ueda 등이 대상으로 삼은 모델과 다른 전류 조건을 주었으며, 그 해석 과정에서 사용한 전자장 재료특성값을 명확하게 밝히고 있지 않기 때문에 경향만을 확인할 수 밖에 없었다. Fig. 6에는 와전류에 의하여 판의 두께 방향에 발생하는 J_{heat}의 분포를 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이 판의 표면 효과에 의하여 내부 발열의 분포가 표면에 집중되어 있음을 알 수 있다. 이 현상은 주파수가 높기 때문에 생기는 표면 효과[23] 때문이다. 가스 가열이 고온의 연소 기체에 의한 대류 열전달[2] 현상인데 비하여 고

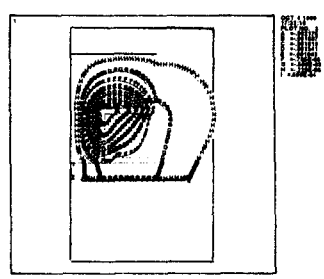

Fig. 5 Contour plot of magnetic vector potential

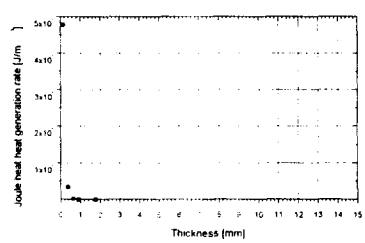

Fig. 6 Distribution of Joule heat along the thickness direction

주파 유도 가열은 재료 내부에 열에너지가 직접 가해지는 가열의 형태임을 알 수 있다. 그러나, 줄열이 발생하는 지역의 두께가 매우 얇기 때문에 실제로 입열 과정은 비슷한 양상으로 생각된다.

3.3 온도 분포 해석 결과

2차원 전자기장 해석을 통해 구한 판 내부의 모든 요소에서의 줄열 값을 3차원으로 확장된 판에 길이 방향의 중앙에 작용하도록 하였다. 주변 공기에 의한 대류 효과는 Brown & Song[26]이 제안한 온도 의존성을 가지는 대류 열전달 계수를 가정하였으며, 가열이 끝난 후 공기에 의한 대류 효과가 발생한다고 가정하였다. 열전달과 관련된 재료 특성값은 온도의존성을 고려하였으며, 시간 증분법은 음적(implicit)적분법을 사용하였으며, 사용된 유한 요소는 8절점 3차원 요소이다.

Fig. 7과 Fig. 8은 판의 상면에서 3초와 7초일 때 온도 분포를 보이고 있다. 이때 최고 온도는 약 667 ° C로 나타났다. 7 초일 때 온도 분포는 열확산에 의해 온도 상승 구역이 늘어나 있음을 볼 수 있다.

Fig. 9는 판의 상면에서 y=10mm인 선을 따라 시각에 따른 온도 변화를 보인 그림이다. 가열 지역의 온도가 상대적으로 높았다가 확산에 의하여 전파됨을 보이고 있다. Fig. 10은 판의 x=75 mm, y=10 mm 인 지점에서 판의 두께방향의 시각에 따른 온도 분포를 보이고 있다. 가열 초기에 두께에 따른 온도 구배 값이 매우 큼을 알 수 있다. Fig. 11에는 판의 상면 x=75 mm인 지점에서 폭 방향의 온도 변화를 보이고 있다. y=0에 가까운 곳에서는 오히려 온도가 낮고 y=10mm 지점인 곳에서 온도가 상대적으로 높음을 알 수 있다. 이는 Fig. 4에 보였듯이 유도가열 장치의 코일의 위치가 5≤y≤15mm에 위치하고 있기 때문에 가열 구역의 중앙점인 y=10mm에서 최고 온도가 나타나고 있음을 추론할 수 있다. Fig. 12, 13, 14, 그리고 Fig. 15에는 판의 단면에서 온도 변화를 그림으로 나타낸 것이다. 각각 3, 4, 5초, 그리고 9초에서 온도분포 형상을 보이고 있다.

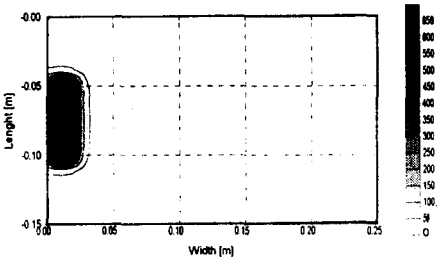

Fig. 7 Temperature distribution on the upper surface at 3 sec.

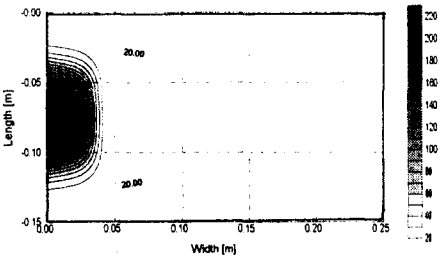

Fig. 8 Temperature distribution on the upper surface at 7 sec.

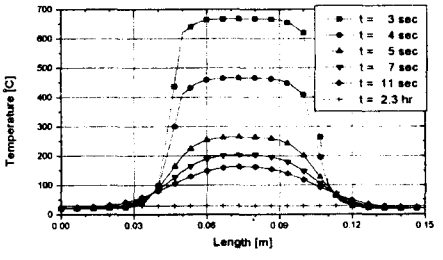

Fig. 9 Change of temperature distribution along the heating line

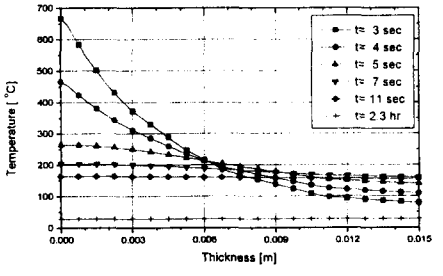

Fig. 10 Change of temperature distribution along the thickness

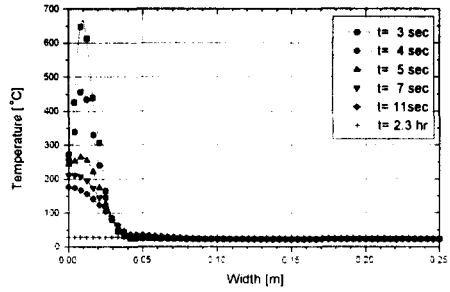

Fig. 11 Change of temperature distribution along the width

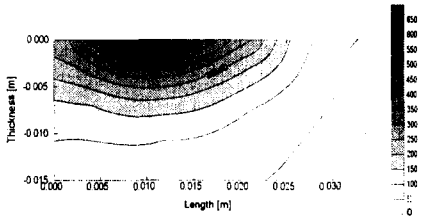

Fig. 12 Temperature distribution at 3 sec.

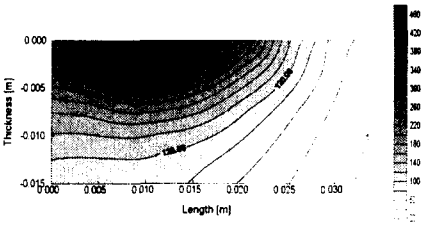

Fig. 13 Temperature distribution at 4 sec.

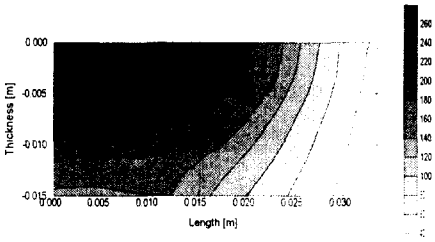

Fig. 14 Temperature distribution at 5 sec.

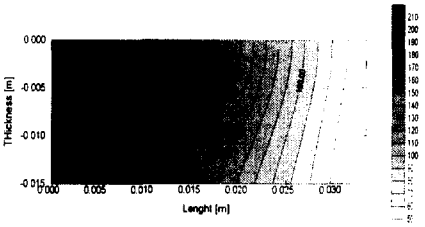

Fig. 15 Temperature distribution at 9 sec.

3.4 열변형 해석 결과

열전달 해석을 통해서 구한 온도 분포를 하중으로 이용하여 열탄소성 해석을 수행하였다. 재료의 특성값은 온도 의존성을 가지는 것으로 가정하였으며 재료의 소성 조건은 von Mises의 항복 조건식을 따르는 등방경화 (Bilinear isotropic hardening) 조건을 사용하였다[4]. 변형율은 Henky strain이 사용되었다. 해석 시간을 줄이기 위하여 대칭된 반폭만을 모델링하였으며, 판의 중앙부에는 대칭 조건을, 판의 끝 부분에는 단순 지지의 경계 조건을 주었다.

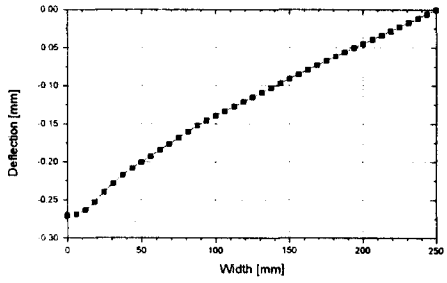

Fig. 16 Residual deflection along the width direction

Fig. 16은 판의 mid-plane에서 처짐량 (u_z)을 보이고 있다. 이러한 경향은 가스 가열에 의한 잔류 처짐량과 비슷한 경향을 보이고 있다. 이는 유도가열에 의해 입열 형태가, 가열선 중앙부에서 10mm 떨어진 곳에서 최대값을 갖는 특성 때문에 정량적인 비교는 어렵지만 유도가열법이 기존의 가스 가열법과 유사한 가공 특성을 가지고 있음을 보여 준다고 할 수 있다. Fig. 17에는 판의 mid-plane에서 길이방향에 따른 잔류 처짐량을 보이고 있다. 길이 방향의 중앙부에 가열원이 위치하고 있기 때문에 중앙부의 처짐량이 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 18은 판 중앙점의 시간에 따른 처짐량의 이력 곡선이다. 가열이 이루어 질 때는 팽창에 의하여 상승됨을 보이고 있으며, 냉각과정에서 압축 변형에 의하여

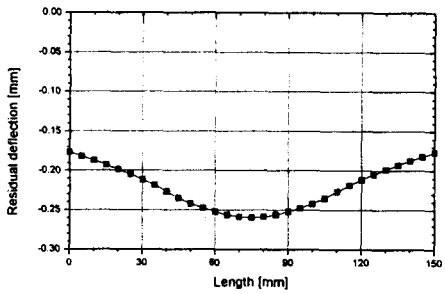

Fig. 17 Residual deflection along the length direction

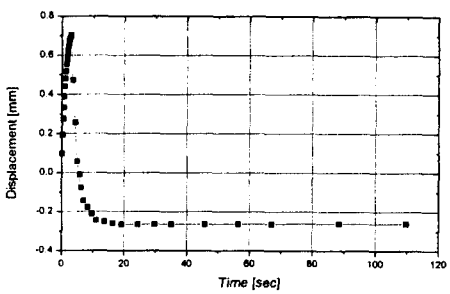

Fig. 18 History of displacement: $u_z(t)$

하강하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 19에는 Fig. 16의 결과로부터 계산된 판의 각 변화량 (angular deformation)을 보이고 있다. Fig. 20에는 가스 열원에 의한 각 변화량의 예를 보이고 있다. 가스 열원은 유효입열량이 1688cal/sec 이고, 가열 속도가 6 mm/sec, 판의 두께가 16 mm, 토오치의 집중 계수가 0.164 인 이동 열원에 대한 결과이다[4]. 각 변화량의 경향이 비슷하게 나타났다. 정지 열원과 이동 열원 사이의 비교이지만, 정성적인 측면에서 유사한 특성을 가진다는 사실을 확인할 수 있다. Fig. 21와 Fig. 22에는 mid-plane에서 유도가열과 가스가열의 수축량을 보이고 있다. 경향이 유사함을 보이고 있다. 이 때 u_y, ε_y은 각각 y 방향의 변위와 전 변형율을 의미한다. Fig. 23에는 두께 방향의 잔류 변형율을 보이고 있다. 판의 상면에 압축 소성 변형율이 집중되어 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 가스 가열의 것[4]과 비교하였을 때 비슷한 경향임을 알 수 있었다.

그림에서 ε_y, ε_y^e, ε_y^p는 폭방향의 전 변형율, 탄성 변형율, 그리고 소성 변형율을 의미한다.

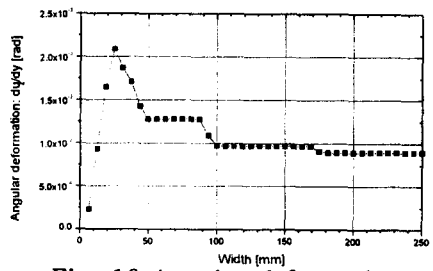

Fig. 19 Angular deformation

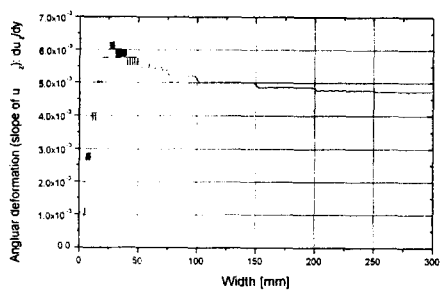

Fig. 20 Angular deformation (gas heating Tmax=718 ° C)

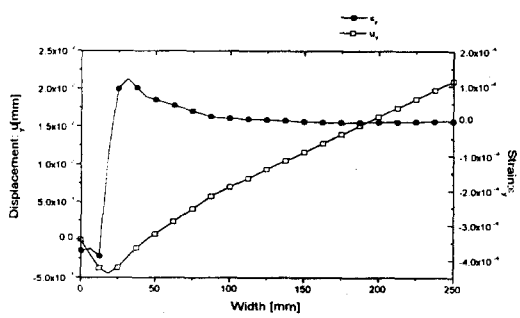

Fig. 21 Strain and displacement on the mid-plane

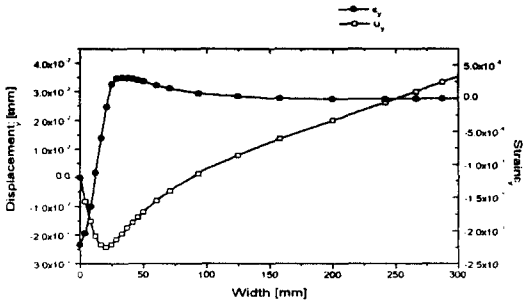

Fig. 22 Strain and displacement on the mid-plane (gas heating)

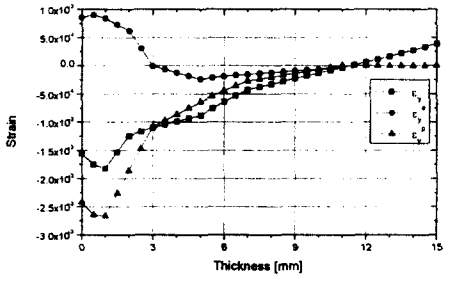

Fig. 23 Distribution of strains along the thickness

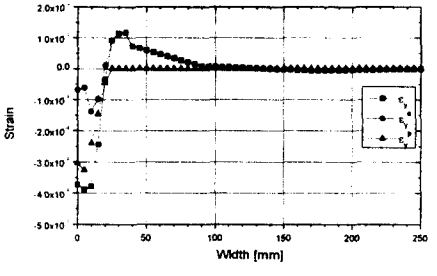

Fig. 24 Distribution of strain along the width

Fig. 24는 폭 방향의 잔류 변형율 분포를 보이고 있다. 역시 가열선 주변에 압축 소성 변형율이 집중되어 있음을 알 수 있다. Fig. 25는 두께 방향으로 잔류 응력 분포를 보이고 있다. 그림에서 σ_{eqv}, σ_i은 각각 등가 응력과 i 방향의 응력 성분을 의미한다. 그림에서 σ_z의 값은 거의 영에 가까운 값을 보이고 있다. Fig. 26과 Fig. 27은 폭 방향으로 분포하는 잔류 응력 분포를 유도가열의 것과 가스 가열의 것을 각각 보이고 있다. 두 가열법에 의한 잔류 응력의 형상이 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 28은 길이 방향으로 분포하는 잔류 응력분포를 보이고 있으며 가열 코일이 위치한 지점에서 응력이 집중되어 있음을 알 수 있다.

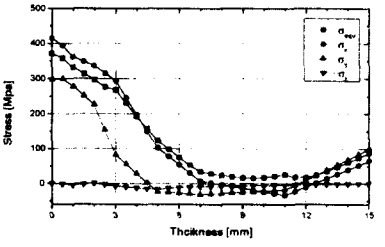

Fig. 25 Distribution of stresses along the thickness

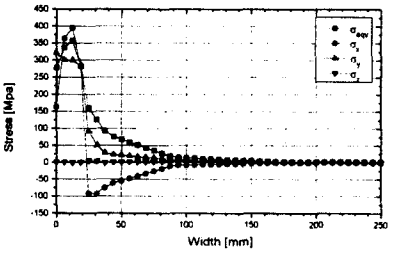

Fig. 26 Distribution of stresses along the width

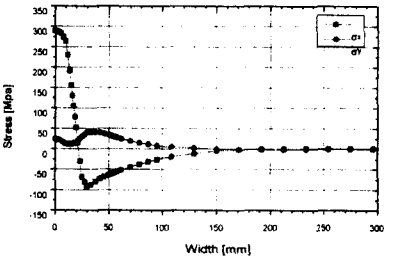

Fig. 27 Distribution of stresses along the width (gas heating)

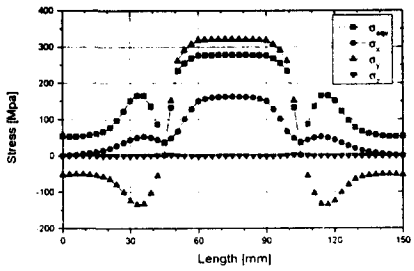

Fig. 28 Distribution of stresses along the length on the upper surface

4. 결론

본 연구는 고주파 유도 가열을 이용한 선상 가열의 열변형 특성을 파악하기 위한 연구로서, 그 열변형 과정에 대한 기본적인 해석을 시도하였다. 유도가열에 의한 전자장 해석, 와전류 해석, 열전달 해석, 그리고 열탄소성 변형 해석을 순차적으로 수행하였다.

그 결과를 가스 가열에 의한 것과 비교하였다. 해석과정에서 전자기적 재료 특성값은 상수로 가정하였으며, 열전달 및 열변형 해석과 관련된 재료의 특성값은 온도 의존성을 고려하였다. 2차원 전자장 해석에 의한 결과를 이용하여 3차원 열전달 해석에 사용함으로써 간략화된 모델을 사용하였으며, 정지열원에 의한 열변형 해석을 수행하였다. 해석을 통하여 와전류 분포, 온도 분포, 잔류응력 및 변형율 분포를 얻었으며, 가스 가열에 의한 잔류 응력과 변형율과 비교하여 정성적으로 유사한 결과를 주고 있음을 확인하였다.

전자기장해석에서 가정된 전자기장 재료 특성값의 온도 의존성 및 자기이력을 고려한다면 좀 더 엄밀한 해석이 가능하며, 선상 가열을 위한 유도가열 열원의 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R. A., Neki, I., Kamachika, R., Ishiyama, M., and Ogawa, J., "Development of Computer Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating(Report3) - Relation between Heating Condition and Deformation," *Journal of Ship Production*, Vol.10, No.4, pp.248-257, 1994.

[2] Moshaiov, A., and Latorre, R., "Temperature Distribution During Plate Bending by Torch Flame Heating," *Journal of Ship Research*, Vol. 29, No. 1, pp. 1-11, March 1985.

[3] Shin, J. G., Lee, J. H., and Park, S. K., "A Numerical Thermoplastic Analysis of Line Heating Processes for Saddle-type Shells with the Application of an Artificial Neural Network," *Journal of Ship Production*, Vol. 12, No.1, pp10-20, February 1999.

[4] Lee, J. H., "Relations between Input Parameters and Residual Deformations in Line Heating Process Using Finite Element Method and Multi-Variate Analysis," *Ph. D. Thesis, Seoul National University*, Seoul, Korea, 1999.

[5] Jang, C. D., Seo, S. I., and Ko, D. E., "A Study on the Prediction of Deformations of Plates due to Line Heating using a Simplified Thermal Elasto-plastic Analysis," *Journal of Ship Production*, Vol. 13, No. 1, pp. 22-27, February 1997.

[6] Tomita, Y., Hasimoto, K., Osawa, N., Fukuda, Y., Kozuki, Y., and Wakita, H., "Studies on the Expert System of Bending Work Using Line Heating," *Journal of Kansai Society of Naval Architects*, Japan, No. 224, pp. 121-130, September 1995.

[7] Ishiyama, M. , Gu, S., Ogawa, J., and Takakura, D., "Numerical Processing for

Precision Plate Bending by Computer Aided Line-Heating System," *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 180, pp. 731-738, 1996. (in Japanese)

[8] Shin, J. G., Kim, W. D., and Lee, J. H., "An Integrated Approach for the Computerized Production Process of Curved Hull Plates, *Journal of Ship Production*," Vol. 14, No. 2, pp. 124-133, May 1998.

[9] Kitamura, N., and Sakai, Y., "3-Dimensional Line Heating System For curved Shell Plate For shipbuilding," *9th International Conference on Computer Application in Shipbuilding ICCAS 97*, Yokohama, Japan, Vol. 2, pp. 351-366, October 1997.

[10] Ryu, C. H., Lee, J. H., and Shin, J. G, "Kinematics of Plates for Automation of Line Heating Processes," *Proceedings of the Annual Meeting, SNAK*, Seoul, Korea, November 1997.

[11] 황 승환, "유도 가열 시스템에서 코일의 위치 및 폭 최적 설계", *서울대학교 공학 석사 학위 논문*, 1994, 12.

[12] Park, Y.G., "An extended application of boundary element analysis for 3-d eddy current problems using $\vec{E}-\vec{B}$ formulation," *Ph. D. Thesis, Seoul National University*, Seoul, Korea, 1994.

[13] Lavers, J. D., "Numerical Solution Method for Electroheat Problems", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. MAG-19, no. 6, pp. 2566-2572, 1983.

[14] Egan, L. R. and Furlanai, E. P., "A Computer Simulation of an Induction Heating System", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 27, no. 5, pp. 4343-4354, 1991.

[15] Ma, Q. S., Shao, K. R., and Li, L. R., "Axisymmetric Eddy Current Field Computations by A Hybrid Finite-Series Method," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 33, no. 2, pp. 1338-1341, 1997.

[16] Tegopules, A., *Eddy Currents in LinearConducting Media*, Amsterdam, Elsevier, 1985.

[17] Chaboudez, C., Clain S., Glardon, R., Rappaz, J., Swierkosz, M., and Touzani, R., "Numerical Modeling of Induction Heating of Long Workpieces," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, no. 6, pp. 5028-5037, 1994.

[18] Cheng, D. K., *Field and Wave Electromagnetics*, Addison Wesley, 2nd Ed., 1989.

[19] Davis, J., and Simpson, P., *Induction Heating Handbook*, McGRAW-Hill Book Co., Ltd., 1979.

[20] Jianming, J., *The Finite Element Method In Electromagnetics*, John Wiley and Sons, 1993.

[21] ANSYS. Inc., *Electromagnetics Revision5.2*, ANSYS, Inc. 1995.

[22] Hayt, W. H., *Engineering Electromagnetics*, McGraw-Hill, 5th Ed., 1990.

[23] Zinn, S. and Semiatin, S. L., *Element of Induction heating*, Electric Power Research Institute, Inc, 1988.

[24] Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley and Sons, 2nd Ed., 1990.

[25] Bathe, K. J., *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, 1996.

[26] Brown, S. and Song, H., "Finite Element Simulation of Welding of Large Structures," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 144, pp. 441-451, November 1992.