

고주파 유도 가열에 의한 선상가열 시뮬레이션

김호경* · 장창두**

*서울대학교 조선해양공학과 박사후 연구원

**서울대학교 조선해양공학과

Simulation of Line Heating by High Frequency Induction Heating

HO-KYUNG KIM* AND CHANG-DOO JANG**

*Post Doc. Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

KEY WORDS : Line Heating 선상가열, Induction Heating 유도 가열, Magnetic Analysis 전자기장 해석, Heat Transfer 열전달, Inherent Strain 고유변형도

ABSTRACT : In this study, we developed an analysis method of plate forming by induction heating, verifying the effectiveness of the present method through a series of experiments. The phenomena of the induction heating involves a 3D transient problem, coupled with electromagnetic, heat transfer, and elastoplastic large deformation analyses. To solve the problem, we present an appropriate model and an integrated system. Using the present analysis model, we can estimate the plate deformation in heating without experiments and simulate the plate bending process of induction heating.

1. 서 론

조선 산업은 국가의 기간사업으로써 외화 획득과 타 산업에 의 파급 효과 등으로 국가 경제에 크게 기여해 왔으며, 세계 제일의 위치를 점유할 수 있는 유망한 산업 분야이다.

이에 각 조선소에서는 생산성 향상을 위한 자동화 기술을 절실히 요구하고 있다. 특히 선박 제조 공정 중 가장 기반이며 고도의 기술을 요하는 곡가공은 선박의 외판 뿐 아니라 교량, 해양구조물, 플랜트 등의 대형 구조물의 제작에 필수적인 기술이다. 대부분의 조선소에서는 열간 곡가공을 위해 선상 가열을 주로 사용하고 있다. 선상 가열은 강판의 일정 영역을 집중 가열한 후 냉각시키는 과정을 통하여 소성 변형을 발생시킴으로써 영구 변형을 유도하는 방법이다. 현재 선상 가열의 주요 열원으로 사용되고 있는 가스 가열기는 입열량의 정확한 제어와 추정이 어려워 자동화에 적합치 않고, 지나친 소음 등 작업 환경 면에서도 문제점을 지니고 있다. 이에 따른 대안으로 최근 고주파 유도 가열을 이용한 선상 가열에 관한 연구가 진행되고 있다 (Ueda, et al. 1991, 1992, 1993). 고주파 유도 가열 방식은 입열량의 제어와 추정이 가능하므로 작업의 재현성이 뛰어나 자동화에 적합하고, 오염이 적으며 깨끗하고 좋은 작업 환경을 제공함으로써 차세대 가공 기술로 관심을 모으고 있다 (Krawczyk and Turowski, 1987).

유도 가열을 선상 가열에 적용하기 위한 연구는 이제 시작 단계로서 관련 연구가 극히 미미한 실정이다. 일본에서 가장 먼저 연구가 시작되었으며 최근 국내의 대형 조선소에서도 차세대 곡가공 기술로 결정하여 도입을 위하여 기초적인 연구와 실험을 수행중이다.

그러나 이러한 연구들은 정지 열원에 대한 해석과 실험에 국한되어 있고 실제 선상 가열 문제인 이동 열원의 경우는 다루고 있지 않다.

고주파 유도 가열기를 이용한 곡가공의 해석 문제는 전자기장, 열전달, 탄소성 대변형이 연성되어 있는 3차원 비정상 문제이다. 더욱이 해석 대상인 판 부재의 초기 형상 자체가 평판이 아니라 임의의 형상을 가진 경우가 많다. 따라서 본 논문에서는 전자기장, 열전달, 판의 변형을 실제 문제에 가깝게 모델링하고 해석할 수 있는 통합된 시스템을 개발하였다.

즉 3차원 비정상 상태의 해석을 통하여 판의 변형을 예측함으로써, 실제 선상 가열을 이용한 곡가공의 시뮬레이션이 가능하도록 하였다.

본 논문에서는 재료의 전자기적 특성값의 온도의존성을 고려하기 위하여 전자기장 해석과 열전도 해석의 연성을 고려하였으며 실제 선상가열 과정의 시뮬레이션을 위하여 이동 열원에 대한 해석을 수행하였다.

전자기장 해석과 열전달 해석은 유한요소법을 사용하였고, 변형 해석은 과도한 시간이 소요되는 열탄소성 대변형 해석 대신 효율적인 고유변형도법을 사용하여 탄성해석으로 치환하였다.

제1저자 김호경 연락처: 서울시 관악구 신림9동 산 56-1

02-880-7336 crossho0@snu.ac.kr

2. 유한요소법에 의한 전자기장의 해석

2.1 전자기장 지배방정식

가열 코일에 교류 전류가 흐르면 코일 주위에 자기장이 생성된다. 이 자기장에 의해 판의 내부에 와전류가 발생하게 되고 이 와전류에 의해 발생하는 저항의 손실이 열원이 된다. 이상과 같이 코일에 흐르는 전류로부터 판에 발생하는 열량을 계산하는 과정이 전자기장 해석이 되겠으며 해석의 흐름은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 유도 가열의 전자기장 해석은 모 든 전자기장 문제의 기본방정식인 맥스웰 방정식으로부터 유도할 수 있다(Tegopoulos and Kriezis, 1985). 전자기장의 기본 방정식인 맥스웰 방정식은, 식 (1)과 같이 네 개의 식으로 이루어진다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

where

\mathbf{B} = Magnetic flux density [T]

\mathbf{D} = Electric flux density [C/ m²]

\mathbf{E} = Electric field intensity [V/m]

\mathbf{H} = Magnetic field intensity [A/m]

\mathbf{J} = Current density [A/ m²]

ρ = Source current density [A/ m²]

맥스웰 방정식과 더불어 전자기장의 해석에 기본적인 방정식인 옴(Ohm)의 법칙과 연속관계(continuity relation)는 식 (2)와 같다.

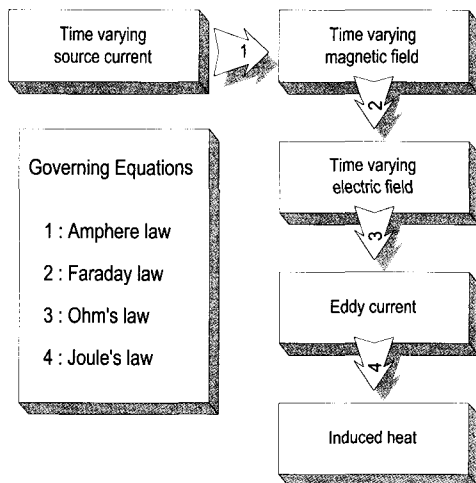


Fig. 1 Heat generation process and governing equations

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2)$$

where

σ = Conductivity [S/m]

마지막으로 등방성재료(isotropic material)로 가정하면 전자기장의 구성 방정식(constitutive relation)은 식 (3)과 같다.

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3)$$

where

ϵ = Permittivity [F/m]

μ = Permeability [H/m]

유도가열 시스템은 Fig. 2와 같이 2개의 영역으로 나누어지며, 영역 1은 와전류가 유도되는 피가열체이고 영역 2는 원전류(source current)가 있는 공기 부분이다. 유도 가열에서 사용되는 전원의 주파수대는 전력주파수대(power frequency, 수 kHz - 수 MHz)이며 이러한 주파수 영역에서는 맥스웰 방정식의 변위전류(displacement current)항을 무시할 수 있다. 그러므로 원전류의 전류밀도를 \mathbf{J}_s 라 하면 식 (1)로부터 각각의 영역에 대한 맥스웰 방정식은 식 (4), 식 (5)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} - \sigma \mathbf{E} &= 0 \quad \text{in } \Omega_1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}_s \quad \text{in } \Omega_2 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

또한 영역 1과 영역 2의 경계에서의 경계조건은 자속밀도와 자계의 세기의 연속 조건으로부터 식 (6)과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{n}_1 + \mathbf{B}_2 \cdot \mathbf{n}_2 &= 0 \quad \text{on } \Gamma_{12} \\ \mathbf{H}_1 \times \mathbf{n}_1 + \mathbf{H}_2 \times \mathbf{n}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

위 식에서 \mathbf{n} 은 경계에 수직인 법선 벡터이고 하첨자 1,2는 영역 1과 영역 2에서의 값들이다.

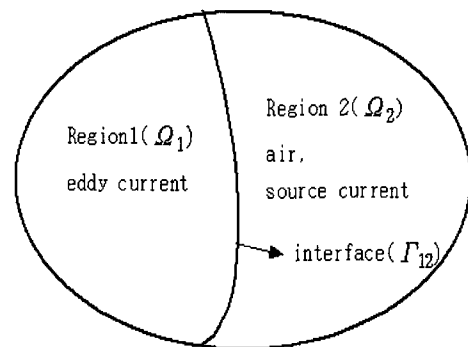


Fig. 2 Typical Eddy current problem

여기에 자기 벡터 포텐셜 A 와 전기 스칼라 포텐셜 V 를 도입하면 자속밀도와 전계의 세기는 식 (7)와 같이 구할 수 있다.

$$B = \nabla \times A, \quad E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \quad (7)$$

유도 가열의 경우 정전하가 존재하지 않고 교류 전원에 대한 해석이므로 정전위 V 를 소거하고 식 (7)을 이용하여 식 (4)와 식(5)를 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad \text{in } \Omega_1 \quad (8)$$

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = J_s \quad \text{in } \Omega_2$$

교류전류는 시간에 대하여 조화(harmonic)로 가정할 수 있으므로 원전류 밀도와 자기 벡터 포텐셜은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$J_s(x, y, t) = \text{Re}[J_s(x, y) \exp(i\omega t)] \quad (9)$$

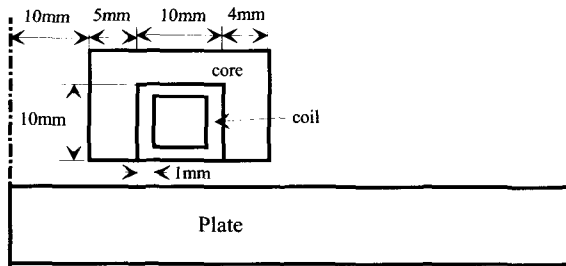
$$A(x, y, t) = \text{Re}[A(x, y) \exp(i\omega t)]$$

식 (8)에 식 (9)와 쿨롬의 게이지 조건(Coulomb gage condition)을 부과하면 식 (10)과 같이 정리된다.

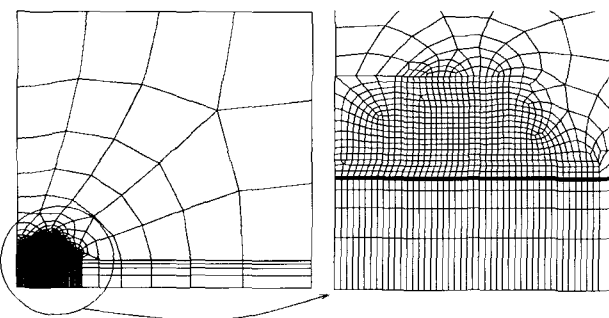
$$\nabla^2 A - i\omega\sigma\mu A = 0 \quad \text{in } \Omega_1 \quad (10)$$

$$\nabla^2 A - i\omega\sigma\mu A = -\mu J_s \quad \text{in } \Omega_2$$

식 (10)으로부터 자기 벡터 포텐셜 A 가 구해지면 이로부터 식 (7)과 식(2)를 이용하여 와전류의 분포와 주울열(Joule heat)을 계산할 수 있다.



(a) shape of heating coil



(b) finite elements model

Fig. 3 Model for magnetic analysis

2.2 전자기장 해석 대상 모델

전자기장 해석은 해석 시간을 단축하기 위하여 해석 대상의 대칭성을 고려하여 2차원 축대칭 문제로 구현하였다. 또한 실제 고주파 유도 가열은 전자기장과 열전달이 연성되어 있으므로, 온도 변화에 따른 재료의 전자기적 성질의 변화가 고려될 수 있도록 구현하였다. 해석 대상 코일의 형상 및 유한 요소 모델 형상이 Fig. 3에 나타나 있다. 침투깊이를 고려하여 공기와 판의 하층부보다 판의 상층부와 코일 부분을 조밀하게 메쉬를 생성하였다.

3. 유한요소법에 의한 열전달 해석

3.1 열전달 정식화

전자기장 해석의 결과로 얻어지는 열원의 분포로부터 열전달 해석을 통하여 판의 온도 분포를 계산하여 최종 단계인 변형 해석의 입력 자료를 산출한다. 유도 가열에 의한 선상 가열의 열전달 지배방정식은 전도 열전달과 주울열에 의한 열 생성을 고려하면 식 (11)과 같다.

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + q^v = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

여기서 c 는 비열이고 ρ 는 밀도이며 q^v 는 단위 체적당 에너지 발생률이다.

경계조건 및 초기조건은 식 (12)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} k \frac{\partial T}{\partial n} &= h(T - T_\infty) \quad \text{on } \Gamma_{12} \\ T &= T_\infty \quad \text{at } t=0 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 k 는 열전도도이고, h 는 열대류계수이다.

한편, 식 (11)의 단위체적당 에너지발생률은 다음의 식 (13)에 의해 구해진다.

$$q^v = \sigma \text{Re}(E \cdot E) \quad (13)$$

3.2 열전달 해석 대상 모델

열전달해석을 위한 유한요소 모델은 대칭성을 고려하여 Fig. 4와 같이 판의 반 폭 부분만을 모델링하였다. 또한 가열 코일이 지나가는 중앙부와 집중적인 열이 발생하는 판의 상층부는 조밀하게 요소를 생성하였다. 전자기장 해석으로부터 얻어지는 주울열의 값을 시간에 따른 코일의 위치에 따라 3차원으로 확장하여 열전달 해석의 하중으로 입력되도록 하였다.

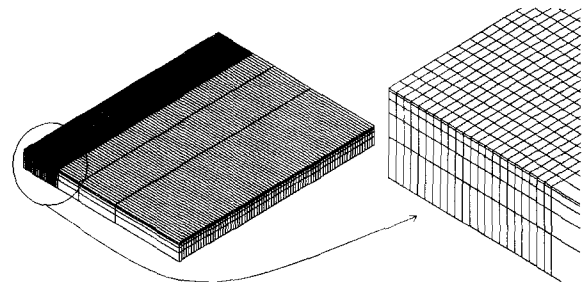


Fig. 4 Finite Elements for heat transfer analysis

4. 고유변형도법에 의한 간이 열탄소성 해석

4.1 고유변형도법

선상가열에 의한 잔류변형은 가열과 냉각에 따른 열전도 과정, 불균일한 열변형과 열응력 생성 과정, 온도 변화에 따른 재료의 기계적 성질변화 등의 복잡한 과정을 거쳐 생성된다. 본 논문에서는 선상가열에 의한 판의 변형을 효율적으로 예측하기 위하여 고유변형도법을 이용하고자 한다.

고유변형도법은 구조물의 최종변형을 구하기 위해 복잡한 변형 발생 과정을 고려하지 않고 최종적으로 잔류하는 소성변형도에 초점을 맞추어 이를 초기변형도가 존재하는 탄성문제라 치환하는 방법이다. 따라서 고유변형도법을 이용한 변형 예측은 먼저 고유변형도가 발생하는 영역을 가정하고 간이 열탄소성 해석을 통해 잔류 소성변형도를 구한다. 따라서 고유변형도의 생성 과정에는 관심을 두지 않고, 최종적으로 판에 잔류한 영구변형이나 영구 변형도만 고려한다. 이 방법은 복잡한 고유변형도 생성 과정에 대한 해석이 필요 없고 다만 탄성 해석만으로 충분하므로 간편성과 빠른 해석 속도가 장점이라 할 수 있다. 고유변형도법에 의한 판의 변형 해석 절차는 Fig. 5와 같다.

이러한 고유변형도에 기초한 탄성 해석으로 변형을 추정하는 방법은 고유변형도의 가정에 따라 해의 정도가 좌우되므로, 이의 적절한 가정이 가장 중요한 문제가 된다. 고유변형도 영역은 비탄성 변형률이 잔류하는 영역으로, 비탄성 변형률의 대부분인 소성 변형률이 재료가 변형에 저항하는 능력을 상실하는 온도 이상에서 대부분 발생하므로 이러한 임계 온도 이상의 영역을 고유변형도 영역으로 정의한다. 선상가열의 경우 공식 온도인 727°C 이상 가열되는 영역이 가열 및 냉각과정을 거치면서 상변태를 하게 되고 이에 따라 기계적 성질이 급변하는 영역이다 (Callister, 1995).

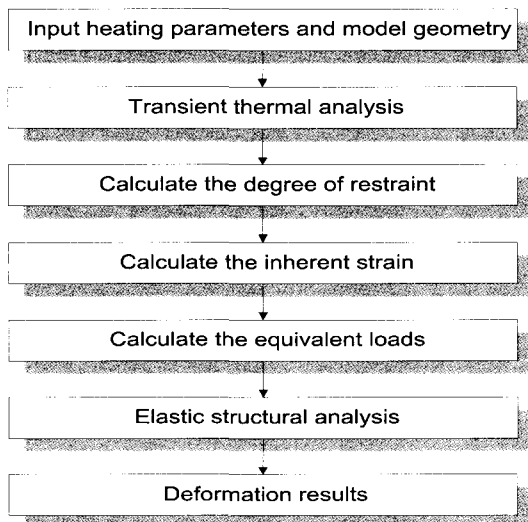


Fig. 5 Procedure for prediction of deformation using inherent strain theory

그러므로 본 논문에서는 열전달 해석을 통해 공식 온도인 727°C 이상 가열된 영역을 구한 후 이를 소성변형이 집중되는 고유변형도 영역으로 가정하여 해석을 수행한다. 고유변형도 영역 및 크기를 구한 후 이로부터 등가의 하중을 구하여 탄성 대변형 문제를 다루기 위해 유한요소 해석을 수행하여 (Jang and Moon, 1998) 판의 최종적인 변형을 계산한다(장창두 외, 1999).

가열선 방향을 x, 가열선에 수직한 방향을 y로 할 때, 가열선 방향의 열평균 온도(T_x)와 가열선에 수직한 방향의 열평균 온도(T_y)는 각각 열전달 해석을 통하여 판의 폭 방향 및 두께 방향으로의 온도 구배가 거의 없어지는 온도를 실제로 구하여 사용한다. 선상가열시 각 방향으로의 내적구속의 크기가 다를 수 고려하여 고유변형도 영역의 탄성계수는 이렇게 구해진 열평균 온도의 함수로 계산한다. 따라서 각 방향의 고유변형도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon_x^* = -(a_c - a_x)T_c - a_x T_x - \sigma_{yx} \left(\frac{2}{bk} + \frac{1-\nu}{E_x} \right) \quad (14)$$

$$\epsilon_y^* = -(a_c - a_y)T_c - a_y T_y - \sigma_{yx} \left(\frac{2}{bk} + \frac{1-\nu}{E_y} \right) \quad (15)$$

여기서 T_c 는 임계온도이고, 하첨자 x, y는 T_x 와 T_y 에서의 물성치이며, b는 고유변형도의 폭이다.

등가 하중은 고유변형도를 두께 방향으로 적분하여 구한다. 축대칭으로 수축하는 고유변형도는 적분 단면에 따라 횡수축, 횡압력, 종수축, 종압력 등 다양한 종류의 변형을 유발한다. 단위 길이당 횡압력 모멘트, 단위 길이당 횡수축력, 종압력 모멘트, 종수축력은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_y &= \frac{1}{b} \int_{-h/2}^{h/2} E_y \epsilon_y^* b_z z dz \\ f_y &= \frac{1}{b} \int_{-h/2}^{h/2} E_y \epsilon_y^* b_z dz \\ M_x &= \int_{-h/2}^{h/2} E_x \epsilon_x^* b_z z dz \\ F_x &= \int_{-h/2}^{h/2} E_x \epsilon_x^* b_z dz \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 h는 판의 두께이며 b_z 는 고유변형도 영역의 폭이다. 각각의 수축력과 모멘트는 탄성 해석시 Fig. 6과 같이 가열선에 따라 분포시킨다.

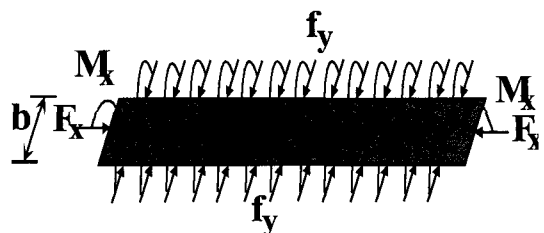


Fig. 6 Equivalent forces and moments along a heat line

5. 고주파 유도 가열 실험 및 해석 결과 비교

5.1 시편

시험 대상 시편의 재질과 형상은 아래와 같다.

재질 : Higher-Strength Hull Structural Steel

형상 : $L \times B \times t = 500 \times 400 \times 20$ (mm)

5.2 가열조건

유도 가열기의 용량 및 가열 조건은 아래와 같다.

출력 : 80 kW

주파수 : 19.3 kHz

가열속도 : 5mm/sec

5.3 전자기장 해석 결과

Fig. 8과 Fig. 9에 전자기장 해석의 결과인 와전류에 의해 판에 유도되는 주울열의 시간에 따른 분포를 나타내었다. Fig. 8에 도시한 바와 같이 주울열은 판의 표면 부분에서 최대값을 갖고, 판의 두께방향으로 급격히 줄어들고 있음을 알 수 있다.

이는 고주파에 의해 와전류가 판의 표면부분에 집중되는 표면 효과에 의한 현상을 잘 보여 주고있다.

또한 가열 시간이 흐름에 따라 판의 온도 분포가 달라지게 되고, 이에 따른 물성치 변화로 판에 유도되는 주울열이 변화하고 있음을 확실히 보여주고 있다.

Fig. 9에는 판의 폭 방향 주울열의 분포를 보여 주고 있다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 주울열은 코일의 바로 밑 부분에 최고치를 보이며 코일의 폭을 벗어나면 급격히 감소하는 양상

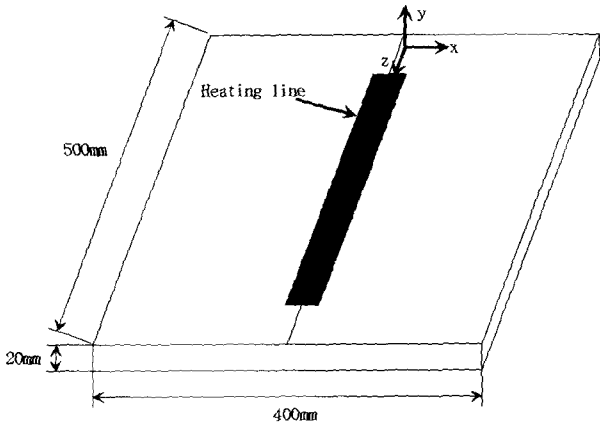


Fig. 7 Shape of test specimen

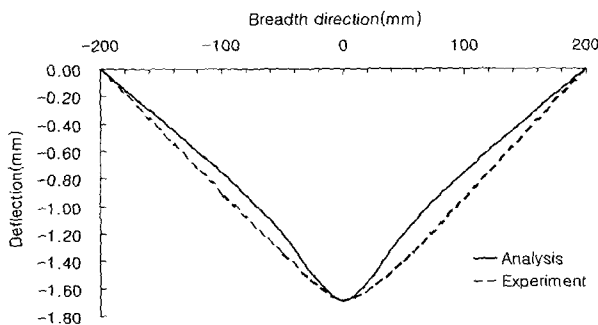


Fig. 11 Deflection of plate

을 보이고 있다.

여기서도 역시 전자기장 해석과 열전달 해석이 서로 연관되어 있음을 명백히 알 수 있다.

Fig. 10에는 판의 중앙에서의 시간에 따른 폭 방향 온도 분포를 보여주고 있다. 가열이 진행됨에 따라 코일의 바로 아래 부분에서 1292°C의 최고 온도를 나타냄을 알 수 있다.

온도분포 해석의 결과 고유 변형도 영역의 폭은 52 mm이고, 깊이는 5.5 mm로 계산되었다.

Fig. 11에는 코일 진행 방향으로 265 mm 지점에서의 판의 변형을 보여 주고 있다.

본 연구에서 제시한 방법에 의해 계산된 변형의 결과가 실험에 의한 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

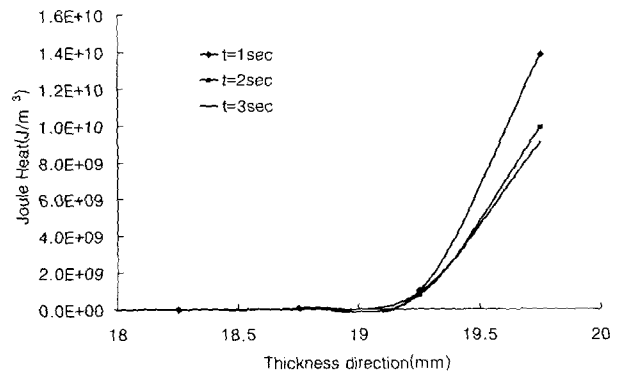


Fig. 8 Joule heat distribution in thickness direction

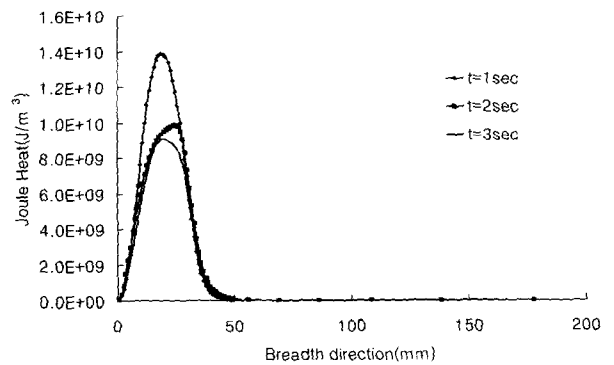


Fig. 9 Joule heat distribution in breadth direction

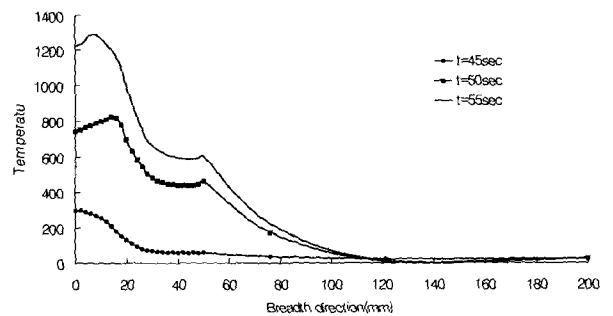


Fig. 10 Temperature distribution in breadth direction

6. 결 론

본 논문에서는 고주파 유도 가열기를 선상 가열에 도입하기 위해 고주파 유도 가열에 의한 판의 변형을 시뮬레이션하기 위한 일련의 연구를 수행하였다.

고주파 유도 가열에 의하여 피가열체에 발생하는 열량을 계산하기 위하여 전자기장 해석과 열전달 해석의 연성을 고려하여 해석하였으며 구해진 온도 분포를 실험과 비교하여 그 정도를 입증하였다. 또 이 과정에서 정확한 해석을 위하여 피가열체의 물성치의 온도 의존성을 무시할 수 없음을 보였다. 고유변형도법을 사용하기 위하여 열전달 해석을 통하여 이를 산출하는 방법을 제안하였고 실험을 통하여 정도를 검증하였다.

고주파 유도 가열에 의한 선상가열의 과정을 효율적으로 해석할 수 있는 열탄소성 해석법을 정립하였다. 본 논문에서 정립된 해석법은 유한요소법에 의한 정밀 탄소성 해석법에 비해 계산시간을 대폭 단축시켰으며 유한요소법에 의한 정밀 탄소성 해석시 발생할 수 있는 수렴성의 문제가 전혀 없으므로 변형의 실시간 제어가 가능하다.

일련의 해석 과정을 통합하여 초기에 코일의 형상 및 가열 조건 등을 입력하면 판의 변형량을 구할 수 있도록 시스템을 구축하였다. 따라서 다양한 가열 조건 및 코일 형상에 대한 변형 형상을 실험이 없이도 시뮬레이션할 수 있도록 하였다. 제안된 해석법의 유용성 및 정도를 검증하기 위하여 1 pass 선상가열 실험을 수행한 결과, 해석 결과와 잘 일치함을 입증하였다.

본 연구의 결과는 향후 선상 가열에 적합한 유도 가열기의 설계에 대한 연구와 극가공 자동화 시스템의 구축에 대한 연구의 기본 연구로 활용될 수 있다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 2000년 산학협력연구 지원사업의 일환으로 추진되었음을 밝히며 지원해 주신 한국과학재단에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 장창두, 정진우, 문성춘 (1999). "Advancing Front Method를 이용한 대변형 셸 구조물의 적응적 유한요소 자동생성법", 한국전산구조공학회 논문집, 제12권, 제3호, pp 47-59
- Callister, Jr. W. D. (1995). *Materials Science and Engineering*, John Wiley & Sons, Inc
- Jang, C.D. and Moon, S.C. (1998). "An Algorithm to Determine Heating Lines for Plate Forming by Line Heating Method", *Journal of Ship Production*, Vol 14, No 4, 1998, pp 238-245
- Krawczyk, A. and Turowski, J. (1987). "Recent Development in Eddy Current Analysis", *IEEE Transactions on Magnetics*, 23(5), pp 3032-3037
- Tegopoulos, J.A. and Kriezis, E.E. (1985). *Eddy Currents in Linear Conducting Media*, Amsterdam, Elsevier
- Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R.A., Neki, I., Kamachika, R., Ishiyama, M. and Ogawa, J. (1991). "Development of Computer Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating(1st Report), Relation Between Final Form of the Plate and Inherent Strain", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol 170, pp 577-586
- Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R.A., Okumoto, Y. and Kamachika, R. (1992). "Development of Computer Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating(2nd Report), Practice for Plate Bending in Shipyard Viewed from Aspect of Inherent Strain", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol 171, pp 683-695
- Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R.A., Neki, I., Kamachika, R., Ishiyama, M. and Ogawa, J. (1993). "Development of Computer Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating(3rd Report)", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol 173, pp 83-93

2002년 10월 28일 원고 접수

2003년 1월 13일 최종 수정본 채택