

## 고주파 유도 가열에 의한 판 변형의 간이 수치 해석

### Numerical Analysis of Plate Deformation by Induction Heating

장 창 두\*            김 호 경\*\*            하 윤 석\*\*\*  
Jang, Chang-Doo    Kim, Ho-Kyung       Ha, Yoon-Suk

---

#### ABSTRACT

In this study, we developed an analysis method of plate forming by induction heating and verified the effectiveness of the present method through a series of experiments. The phenomena of the induction heating is a 3D transient problem coupled with electromagnetic, heat transfer, and elastoplastic large deformation analyses. To solve the problem, we suggest a proper 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 산업에의 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 가열법을 주로 사용하고 있다. 선상 가열법은 강판의 일정 영역을 집중 가열한 후 냉각 시키는 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.<sup>(1),(2),(3)</sup> 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.<sup>(4)</sup>

---

\* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 교수

\*\* 서울대학교 조선해양공학과 박사과정

\*\*\* 서울대학교 조선해양공학과 박사과정

고주파 유도 가열기를 이용한 곡가공의 해석 문제는 전자기장, 열전달, 탄소성 대변형이 연성되어 있는 3차원 비정상 문제이다. 따라서 본 논문에서는 유도 가열에 의한 전자기장 해석, 열전달 해석 및 판의 변형 해석을 수행한다. 본 논문에서는 재료의 전자기적 특성값이 온도의존성이 크므로 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.

## 2. 유한요소법에 의한 전자기장의 해석

### 2.1 전자기장 지배 방정식

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.

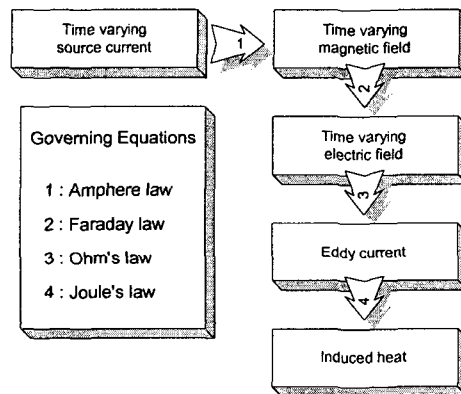


Fig.1 Heat generation process and governing equations

Fig. 1에 나타난 바와 같이 유도 가열의 전자기장 해석은 모든 전자기장 문제의 기본방정식인 맥스웰 방정식으로부터 유도할 수 있다.<sup>(5)</sup> 전자기장의 기본 방정식인 맥스웰 방정식은, 식 (2.1)과 같이 네 개의 식으로 이루어진다.

$$\begin{aligned} \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t}, & \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \cdot D &= \rho, & \nabla \cdot B &= 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

맥스웰 방정식과 더불어 전자기장의 해석에 기본적인 방정식인 옴(Ohm)의 법칙과 연속관계(continuity relation)는 식(2.2)와 같다.

$$J = \sigma E, \quad \nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.2)$$

마지막으로 등방성재료(isotropic material)로 가정하면 전자기장의 구성 방정식(constitutive relation)은 식(2.3)과 같다.

$$D = \epsilon E, \quad B = \mu H \quad (2.3)$$

자기 벡터 포텐셜 A 와 전기 스칼라 포텐셜 V를 도입하면 자속밀도와 전기장의 세기는 식(2.4)와 같이 구할 수 있다.

$$B = \nabla \times A, \quad E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \quad (2.4)$$

## 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 대상의 유한 요소 모델 형상이 Fig. 2에 나타나 있다. 침투깊이를 고려하여 판의 상층부와 코일 부분은 조밀하게 메쉬를 생성하였다.

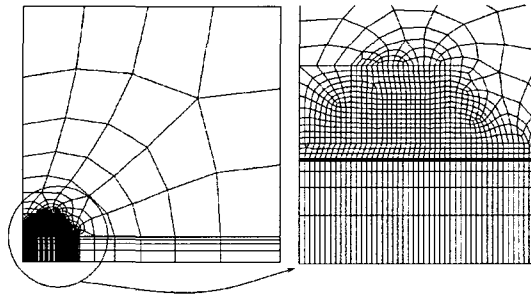


Fig. 2 Finite elements for magnetic analysis

## 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 지배 방정식은 전도 열전달과 주울열에 의한 열 생성을 고려하면 식(3.1)과 같다.

$$\nabla(k\nabla T) + q^v = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

경계조건 및 초기조건은 식 (3.2)와 같이 주어진다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty) \quad \text{on } T_{1,2} \quad (3.2)$$

$$T = T_\infty \quad \text{at } t = 0$$

한편, 식 (3.1)의 단위체적당 에너지발생률은 다음의 식(3.3)에 의해 구해진다.

$$q^v = \sigma \text{Re}(E \cdot E) \quad (3.3)$$

### 3.2 열전달 해석 대상 모델

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

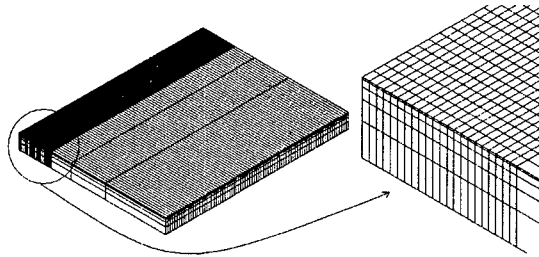


Fig. 3 Finite Elements for heat transfer analysis

## 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 성질 변화 등의 복잡한 과정을 거쳐 생성된다. 본 논문에서는 선상 가열에 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 탄성문제로 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 영구 변형이나 영구 변형도만 고려한다. 이 방법은 복잡한 고유변형도 생성 과정에 대한 해석이 필요 없고 다만 탄성 해석만으로 충분하므로 간편성이 큰 점과 빠른 해석 속도가 장점이라 할 수 있다. 고유변형도법에 의한 판의 변형 해석 절차는 Fig. 4와 같다. 이러한 고유변형도에 기초한 탄성 해석으로 변형을 추정하는 방법은 고유변형도의 가정에 따라 해의 정도가 좌우되므로, 이의 적절한 가정이 가장 중요한 문제가 된다.

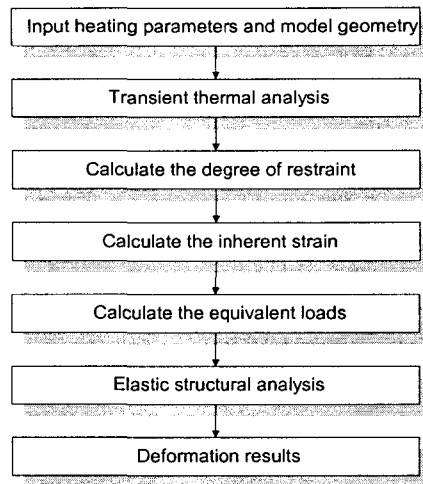


Fig. 4 Procedure for prediction of deformation using inherent strain theory

간이 열탄소성 해석에 의해 구해진 고유변형도가 초기변형도로서 존재하는 탄성 대변형 문제를 다루기 위해 유한요소 해석을 수행하여 판의 최종적인 변형을 계산한다.<sup>(6),(7),(8)</sup>

## 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 가열 조건

유도 가열기의 용량 및 가열 조건은 아래와 같다.

출력 : 80 kW

주파수 : 19.3 kHz

가열속도 : 5mm/sec

### 5.3 전자기장 해석 결과

Fig. 5와 Fig. 6에 전자기장 해석의 결과인 와전류에 의해 판에 유도되는 주울열의 시간에 따른 분포를 나타내었다. Fig. 5에 도시한 바와 같이 주울열은 판의 표면 부분에서 최대값을 갖고, 판의 두께방향으로 급격히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이는 고주파에 의해 와전류가 판의 표면 부분에 집중되는 표면 효과에 의한 현상을 잘 보여 주고 있다. 또한 가열 시간이 흐름에 따라 판의 온도 분포가 달라지게 되고, 이에 따른 물성치 변화로 판에 유도되는 주울열이 변화하고 있음을 확실히 보여 주고 있다. Fig. 6에는 판의 폭 방향 주울열의 분포를 보여 주고 있다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 주울열은 코일의 바로 밑 부분에서 최고치를 보이며 코일의 폭을 벗어나면 급격히 감소하는 양상을 보이고 있다. 여기서도 역시 전자기장해석과 열전달 해석이 서로 연관되어 있음을 명백히 알 수 있다.

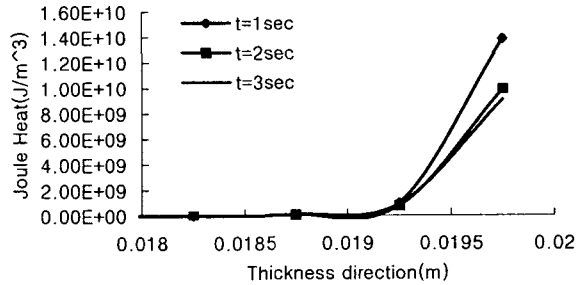


Fig. 5 Joule heat distribution in thickness direction

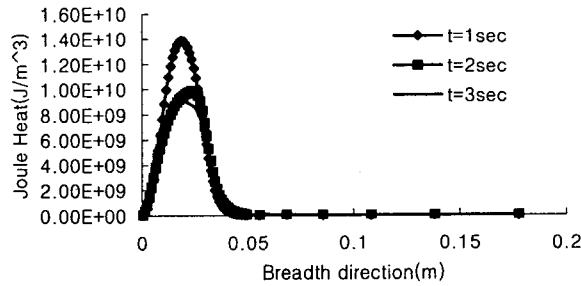


Fig. 6 Joule heat distribution in breadth direction

Fig. 7에는 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.

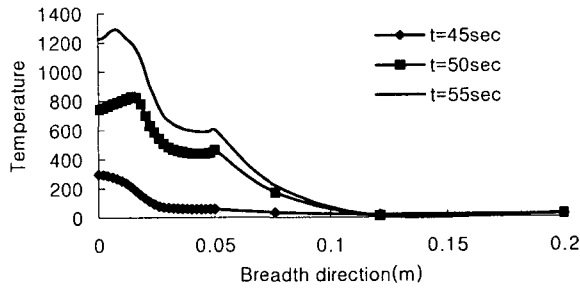


Fig. 7 Temperature distribution in breadth direction

Fig. 8에는 코일 진행 방향으로 265 mm 지점에서 판의 변형을 보여 주고 있다. 본 연구에서 제시한 방법에 의해 계산된 변형의 결과가 실험에 의한 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

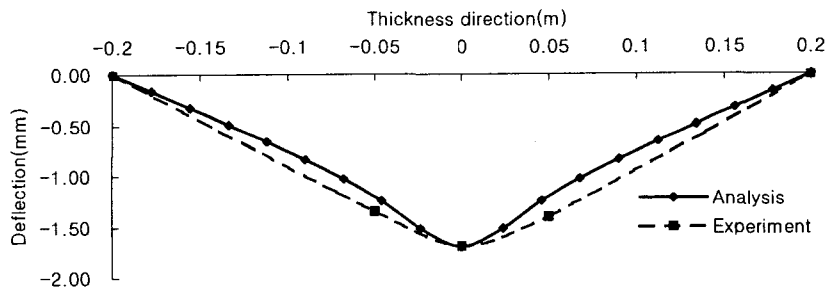


Fig. 8 Deflection of plate

## 6. 결 론

본 논문에서는 고주파 유도 가열에 의한 판의 변형 해석을 위하여 전자기장 해석, 열전달 해석, 판의 변형 해석을 수행하였다. 전자기장과 열전달이 서로 연성되어 있는 특징을 반영할 수 있도록 모델링을 하였으며 이의 결과로 얻어진 온도 분포 해석을 판의 변형 해석을 위한 하중으로 사용하였다. 판의 변형 해석을 위하여 효율적인 고유변형도법을 개발하였고 실험을 통하여 본 연구에서 제시한 해석방법의 정도를 검증하였다. 본 연구에서 개발된 해석 방법은 고주파 유도 가열을 이용한 판의 곡가공 시, 실제 실험을 하지 않고도 판의 변형을 사전에 예측 가능하도록 하여, 곡

가공의 시뮬레이션이 가능하도록 하였다.

#### 감사의 글

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

#### 참고 문헌

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(1st Report), Relation Between Final Form of the Plate and Inherent Strain", Jour. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 170,1991
2. Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R.A., Okumoto, Y. and Kamichika, R., "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", Jour. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 171,1992
3. 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(3rd Report)", Jour. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 173, 1993
4. Krawczyk, A. and J. Turowski, "Recent Development in Eddy Current Analysis", IEEE Transactions on Magnetics, 23(5), 1987, pp 3032-3037
5. Tegopoulos, J. A. and E. E. Kriezis, Eddy Currents in Linear Conducting Media, Amsterdam, Elsevier, 1985
6. 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, 1997
7. Jang, C.D. and Moon, S.C., "An Algorithm to Determine Heating Lines for Plate Forming by Line Heating Method", Journal of Ship Production, Vol. 14, No. 4, 1988, pp. 238-245
8. 장창두, 정진우, 문성춘, "Advancing Front Method를 이용한 대변형 셸 구조물의 적응적 유한요소 자동생성법", 한국전산구조공학회 논문집, 제12권 제3호, 1999, pp. 447-455