

고유변형도 기반 등가하중법에 의한 보강판의 가열 교정 해석

송하철^{†*}, 류현수^{**}, 장창두^{**}

서울대학교 해양시스템공학연구소*
서울대학교 조선해양공학과**

Analysis of Correction of Welding Deformation of Stiffened Plate by Heating Using Equivalent Loading Method based on Inherent Strain

Ha Cheol, Song^{†*}, Hyun Su, Ryu^{**} and Chang Doo, Jang^{**}

Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University*
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul national University**

Abstract

The objective of the present paper is to develop an analysis method for the correction of welding deformation of stiffened plate by line heating. In this paper, the equivalent loading method, based on the inherent strain theory, was used to analyze the heat-straightening of a stiffened plate. Equivalent loads were obtained by integrating the inherent strains which were determined from the highest temperature and the degree of restraint. Finally, the obtained equivalent loads were imposed, as applied loads, on the elastic analysis for the prediction of correction of welding deformation in stiffened plate. The proposed method is expected as a basic study in heat-straightening analysis of welding deformation in large scale block.

※ Keywords: correction by heating(가열 교정), inherent strain(고유변형도), equivalent load(등가하중), stiffened plate(보강판), highest temperature(최고도달온도), degree of restraint(구속도)

1. 서론

선체 블록은 맞대기 용접과 필렛 용접으로 조립 되는데, 각 용접 조립 작업은 필연적으로 용접 변

형을 수반한다. 따라서 블록이 완성된 시점에서는 블록의 형상과 치수가 설계 도면과 차이를 보이게 되므로, 도크에서 블록을 탑재하기 위해서는 토치 가열을 이용한 변형 교정이 수행되어야 하며, 선박 건조 생산성을 향상시키기 위해서는 블록의 최종 생산 단계에서 가열 교정을 통하여 블록의 변형을 최소화해야 한다. 그러나 현재 조선소에서 교정 작업은 정량적인 해석 방법이 아닌 현장 경

접수일: 2004년 6월 23일, 승인일: 2004년 8월 3일

†주저자, E-mail: shcpr@hanmail.net

Tel: 02-880-7336

형을 바탕으로 이루어지고 있기 때문에 용접 구조물의 크기 및 형상 변경 시, 수 차례의 반복 작업에 의한 시행착오를 겪고 있다. 따라서 교정 기술의 획기적인 기술 향상을 위해서는 가열 교정에 대한 해석 기술의 확보가 요구된다.

본 연구에서는 블록의 한 부분인 보강판을 대상으로 용접 변형에 대한 가열 교정의 해석적인 기법을 구축하는 것을 목표로 고유변형도를 이용한 등가하중법을 사용하여 보강판의 가열 교정 변형을 해석하였다. 입열량 추정 실험과 기본 용접 부재에 대한 가열 교정 실험을 바탕으로 열전도 해석, 단위하중법 해석, 등가하중법 해석 등 일련의 해석을 하나의 flow로 통합하여 가열 조건과 보강판의 치수 및 보강재 정보 등 간단한 입력만으로 보강판의 가열 교정 변형을 해석할 수 있는 기법을 구축하였다.

2. 가열 교정 고유변형도

고유응력(Inherent stress)의 원인이 되는 변형도를 ‘고유변형도’ (Watanabe/Satoh 1965)라 하는데, 가열에 의한 열응력이 바로 고유응력의 대표적인 예이다. 이는 물체 내부에 국부적인 가열로 인해 불균일한 온도 분포가 형성되어 가열부의 열팽창과 인접 영역의 구속에 의해 발생하는 응력이다. Murakawa et al.(1997)은 고유변형도를 구하기 위해 Fig. 1 과 같은 간이 열탄소성 모델을 고안하였고, 장창두/이창현(2000)의 연구 결과에 따르면 간이 열탄소성 해석 모델에 대해 다음 식 (1)~(4)의 계산을 수행하면 고유변형도는 최고도달온도(T_{MAX})와 구속도(degree of restraint, β)의 함수로 표현됨을 알 수 있다.

본 논문에서는 다음 Fig. 2 와 같은 온도 의존성을 고려한 고유변형도 차트(Jang/Lee 2003)를 이용하였다. 고유변형도 차트는 가로축과 세로축이 각각 구속도와 고유변형도를 나타내고, 최고도달 온도에 따른 여러 개의 그래프로 구성된다.

$$\beta = \frac{K_s}{K_s + K_B} \tag{1}$$

(where, K_S : 스프링의 강성 K_B : 봉의 강성)

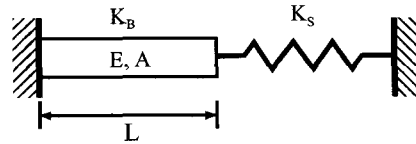


Fig. 1 Simplified elastic-plastic analysis model

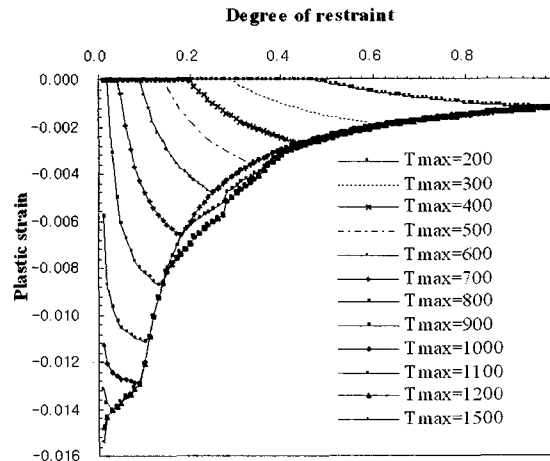


Fig. 2 Inherent strain chart

변형도 관계식 : $\epsilon = \epsilon_{th} + \epsilon_e + \epsilon_p$ (2)

(where, ϵ : 총변형도 ϵ_{th} : 열변형도
 ϵ_e : 탄성변형도 ϵ_p : 소성변형도)

구성 방정식 : $\sigma = E\epsilon_e$ (3)

평형 방정식 : $F_B = F_S$ (4)

(where, F_B : 봉이 스프링에 가하는 힘
 F_S : 스프링이 봉에 가하는 힘)

3. 가열 교정 해석 방법

등가하중법에 의한 가열교정 해석법

보강판에 대한 가열 교정 해석 과정은 Fig. 3 과 같다. 구조물의 형상, 가열 조건 등에 대한 정보와 실험 결과를 토대로 열전도 해석과 구속도 계산을 수행한다. 최고도달온도 분포와 구속도 값이 구해지면 이를 고유 변형도 차트에 대입하여 고유

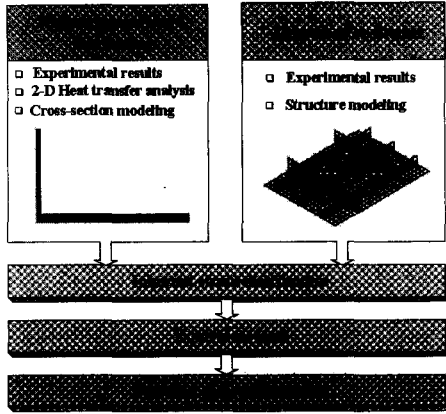


Fig. 3 Flow chart for the analysis of heat-correction

변형도 분포를 구하고, 고유변형도를 등가하중(장창두 등 1997)으로 치환하여 탄성 유한 요소 해석을 통해 보강판의 최종 변형을 구할 수 있다.

최고 도달 온도 계산법

최고도달온도란 가열부 근방의 임의의 위치에서 가열 교정 전과정 동안 경험하는 가장 높은 온도를 의미한다. 따라서 열전도 해석을 통해 입열에 따른 온도 상승과 냉각 과정을 모델링하여 고유변형도 분포 대상 영역의 각 위치에서 경험하는 최고 도달 온도를 계산해야 한다.

본 연구에서는 가열선에 수직한 단면에 대한 열전도 해석을 수행하였다. 가열 교정부 단면의 유한 요소 모델은 가열선에 수직한 단면이고, 좌우 대칭을 고려하여 한 쪽만 모델링 하였다. 가스압과 토치 상태에 따라 불균일한 입열이 예상되지만 본 논문에서는 식(5)와 같이 균일한 정규 분포를 갖는 열원으로 모델링하였다. Table 1 에 열전도 해석을 위한 입력값을 정리하였다. Effective heat input rate 는 추후 소개될 입열량 추정 실험의 결과값을 사용하였다. 가열 위치는 Fig. 4 와 같이 center line 에서 6mm 떨어진 지점으로 결정하였으며, 가열속도는 Table 2 와 같이 모재의 각 두께 별로 열전도 해석을 수행하여 최고 도달 온도가 700℃를 넘지 않는 범위에서 산정하였다. 700℃라는 조건은 선각의 품질을 유지하기 위해, 가열 교

정 시 최고 온도가 700℃를 넘지 않아야 한다는 현장 지침이 제한 조건으로 작용하기 때문이다.

$$q(r) = q_{max} e^{-\gamma r^2}$$

$$q_{eff} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} q(r) r d\theta dr, \quad q_{max} = \frac{\gamma}{\pi} q_{eff} \quad (5)$$

where, $q(r)$: heat flux (J/mm² sec.)
 q_{eff} : effective heat input rate (J/sec.)
 q_{max} : maximum heat flux (J/mm² sec.)
 γ : concentration coefficient (mm⁻²)
 r : distance from the center of heat source

Table 1 Input for temperature transfer analysis

q_{eff}	γ	Flame radius
1200 J/sec	0.03 mm ⁻²	10 mm

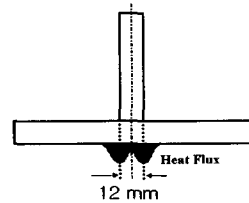


Fig. 4 Two-line heating position

Table 2 Heating velocities

Thickness	7 mm	10 mm	12 mm
Velocity	11mm/s	11mm/s	11mm/s
T _{max}	699℃	693℃	692℃

구속도 계산법

구속도의 분포를 정량적으로 구하기 위해, 기본 필렛 구조물에 대한 가열 교정 변형 실험 결과와 단위하중법을 결합하여 구속도를 계산하였다. 구속도의 크기는 가열부의 각 지점마다 온도 구배 및 외적 구속의 차이에 따른 해당값을 갖게 된다. 하지만 본 논문에서는 가열선에 수직한 단면상에서의 구속도 값은 동일하다고 가정하였으며, 가열선의 길이 방향에 따른 변화만을 고려하였다.

기본 부재(unit structure)라 함은 Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 선체 블록을 이루는 가장 기본적인 형태의 구조물로서 본 연구에서는 필렛 용접의 형태

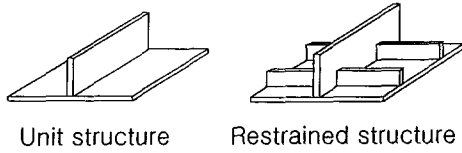


Fig. 5 Unit structure and restrained structure

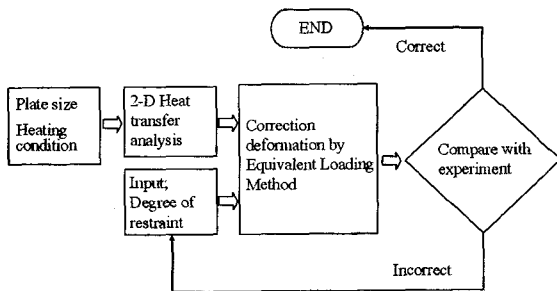


Fig. 6 Calculation process of degree of restraint of unit structure

를 대상으로 한다. 기본 부재의 구속도는 인접 부재 및 지지 조건과 같은 외적 구속 요인을 배제하고 판두께 및 가열 입열량에 의한 영향만을 정량적으로 산출하기 위해 도입하였다. 기본 부재의 구속도를 계산하는 방법은 Fig. 6 과 같다. 보강판의 구속도는 기본 부재의 구속도 계산값과 보강판에 대한 단위하중법 해석 결과를 토대로 기본 부재와 보강판의 가열부 강성은 동일하다는 가정을 통해 계산된다.

4. 입열량 추정 실험

본 실험의 목표는 가스 프레임(gas flame)의 입열량을 추정하는 것이다. 가스압, 가스 혼합률을 일정하게 하고 토치는 동일한 것을 사용한다. 토치 팁 간격은 시편의 표면에서 약 2cm 로 고정하였고, 시편은 Mild Steel 로 가열 교정 실험에 사용될 시편과 동일한 재료로 하였으며 치수는 가로, 세로 400mm 이다. 입열량 추정 실험을 위한 시편 및 장비 배치는 다음 Fig. 7 과 같다.

Mild Steel 평판의 중앙점에 균일하게 입열함과 동시에 방사온도계로 입열점과 대칭되는 판 뒷면의 중앙점 온도를 약 30 초간 측정하여 시간에 따른 온도변화 곡선을 산출하였다. 그리고 입열량을

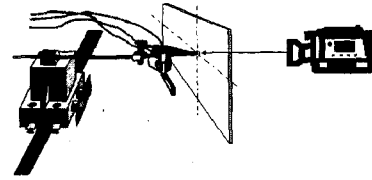


Fig. 7 Experiment for estimating heat flux

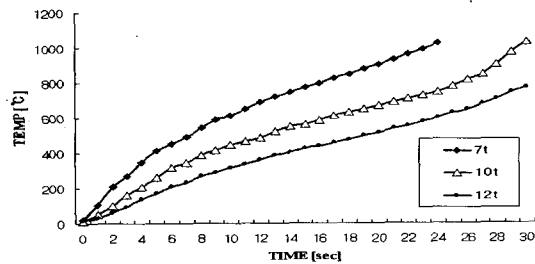


Fig. 8 Temperature variations [Exp.]

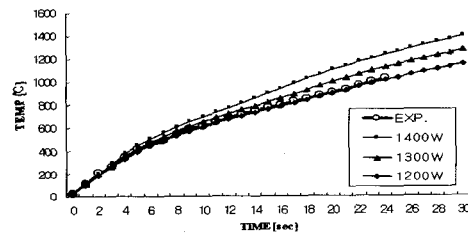


Fig. 9 Temperature variations [7mm, Analysis]

입력값으로 하는 열전도해석을 통하여 온도변화곡선에 상응하는 입열량을 추정한다. Fig. 8은 각 두께 별로 동일 입열에 따른 뒷면 중앙점의 온도 변화를 정리한 것이다. Fig. 9 에서 볼 수 있듯이 판두께 7mm 의 시편의 경우, 1200W 일 때 실험 결과와 일치한다. 10mm, 12mm 의 경우에도 이와 유사한 결과를 얻었다. 따라서 가스 프레임의 입열량은 1200W 로 추정하였다.

5. 기본 필렛구조에 대한 가열교정 실험

본 실험은 기본 필렛 구조의 구속도를 산정하기 위해 2-line 가열 교정에 의한 변형을 계측하는 것을 목표로 한다. Table 3 은 기본 필렛 구조의 시편 정보이다. 먼저 Fig. 10 과 같이 LVDT, Scanner, Data logger 로 구성된 Measuring

system 으로 시편의 초기 용접 변형을 계측하고, Fig. 11 과 같이 2-line heating 을 수행한 후 변형을 계측한다. 끝으로 초기 용접 변형과 가열, 냉각 후의 변형의 차이를 고려하여 교정 가열에 의한 순수 교정량을 산출한다.

Fig. 12 는 모재 두께 10mm 시편의 초기 용접 변형과 가열 교정 후 변형을 비교한 것이다. 이 경우, 양 끝 단에서 초기 용접 변형과 가열 교정 후 변형의 차이는 약 0.397 mm 이다.

Table 3 Dimension of specimen

Base Plate [mm]	400 x 400
Stiffener [mm]	400 x 150
Thickness [mm]	7, 10, 12

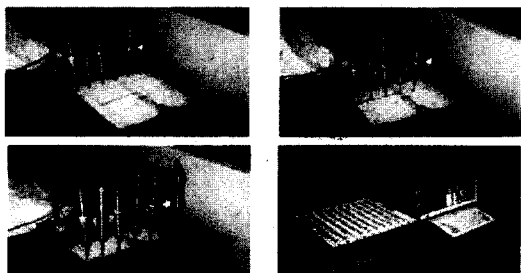


Fig. 10 Deformation measuring system



Fig. 11 Two-line heating of unit fillet structure

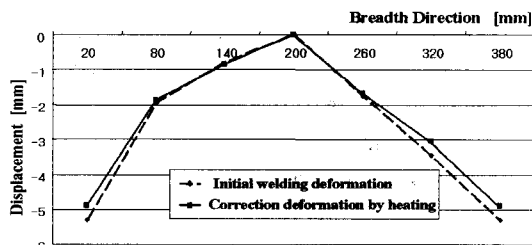


Fig. 12 Comparison of Initial welding deformation and correction deformation by heating (10mm)

6. 가열 교정 해석 결과

기본 필렛 구조의 자유상태 구속도 산정

앞서 소개한 Fig. 6 의 방법에 따라 기본 필렛 구조의 자유 상태 구속도를 산정하였다. Fig. 13 은 기본 필렛 구조의 가열 교정 해석 결과이다.

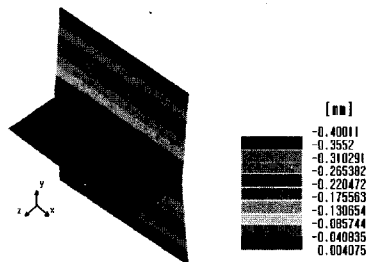


Fig. 13 Deformation of unit structure by heating

보강판의 가열 교정 해석 결과

Fig. 14 는 보강판 모델을 나타낸 것이고, 각 부재의 Dimension 은 Table 4 에 정리하였다.

Fig. 15 는 girder 용접선을 따라 분포하는 구속도 계산 결과를 나타낸 것이다. 약 0.79~0.99 의 범위에서 분포하며, frame 이 위치한 점에서 최대 값을 갖고, 양단에서 최소값을 갖는다. Fig. 16 은 Base plate 에 보강된 5 개의 모든 부재 위치에 가열 교정을 수행한 후의 변형된 보강판의 형상이다.

해석 결과의 정량화를 위하여, 기존의 보강판에 대한 용접 변형 해석 결과를 참고로(장창두/이창현 2000), 가열 교정 전과 가열 교정 후의 y 축 방향의 변형을 Fig. 17 과 같이 비교하였는데, Y 축 방향(x=0)의 girder 와 longitudinal 사이 부분에서 초기 용접 변형의 최대 약 27% 교정 효과를 확인할 수 있었다. 또한, y 축 방향(x=0)의 끝 단에서는 초기 용접 변형의 약 15% 교정 효과를 보이고 있다.

Table 4 Dimension of the stiffened plate (mm)

Base Plate	5000 x 4000 x 12
Girder	5000 x 400 x 12
Longitudinal	5000 x 200 x 10
Trans. Frame	4000 x 400 x 12

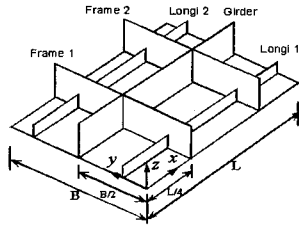


Fig. 14 Shape of a stiffened plate

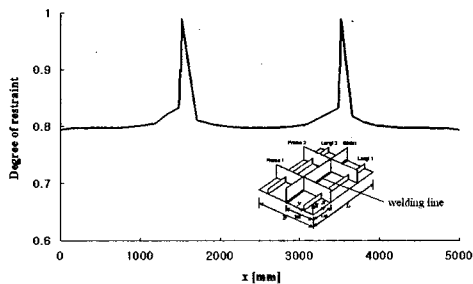


Fig. 15 Distribution of degree of restraint along welding line ($y=B/2$)

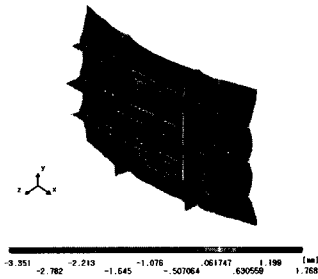


Fig. 16 Deformed shape of stiffened plate

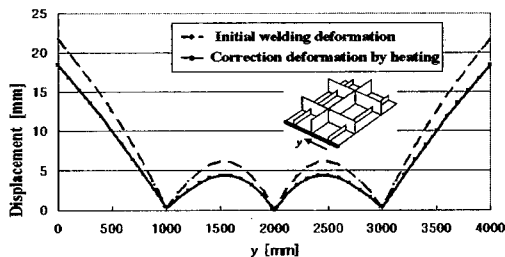


Fig. 17 Comparison of vertical displacements along y-axis ($x=0$)

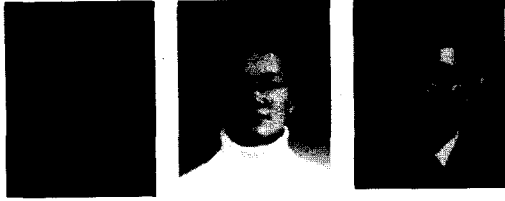
7. 결론

본 연구에서는 가열 교정에 대하여 고유변형도를 이용한 등가하중법을 적용함으로써 기존의 경험적인 반복 시행 착오를 통해 수행되어 온 가열 교정 작업에 대한 해석 기법을 제시하였다.

가열 교정에 사용되는 가스 프레임에 대한 입열량 추정 실험과 기본 용접 구조에 대한 가열 교정 실험을 수행하였고, 이 실험 결과를 토대로 보강판의 구속도와 최고 도달 온도를 계산하였다. 보강판의 구속도와 최고 도달 온도를 인자로 하는 고유변형도를 등가 하중으로 치환하여 보강판의 변형을 해석하였으며, 그 결과와 보강판에 대한 기존의 용접 변형 해석 결과를 비교하였다. 본 해석 방법은 기본 구조에 대한 가열 교정 실험과 입열량 추정 실험과 같은 비교적 간단한 실험을 통해, 복잡한 격자 구조물에 대한 가열 교정 해석법으로의 확장이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 장창두, 서승일, 고대은, 1997, “간이 열탄소성 해석을 이용한 선상가열에 의한 판의 변형 예측에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 34 권, 제 3 호, pp. 104-112.
- 장창두, 이창현, 2000, “선체 블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 2 호, pp. 127-136.
- Jang, C.D. and Lee, C.H., 2003, “Prediction of Welding Deformation of Ship Hull Blocks,” Journal of Ship & Ocean Technology, Vol. 7, No. 4, pp. 41-49.
- Murakawa, H., Luo, Y. and Ueda, Y., 1997, “Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain,” Journal of Society of naval Architects of Japan, Vol. 180, pp. 739-751.
- Watanabe, M. and Satoh, K., 1965, Welding Mechanics and Its Applications, Asakura Publications, Japan.



< 송 하 철 >

< 류 현 수 >

< 장 창 두 >