

고유변형률 기반 등가하중법을 이용한 판의 용접변형 해석

이 주 성*†

*울산대학교 조선해양공학부

Welding Deformation Analysis of Plates Using the Inherent Strain-based Equivalent Load Method

Joo-Sung Lee*·†

*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, 680-749, Korea

†Corresponding author : jslee2@mail.ulsan.ac.kr

(Received November 2, 2009 ; Revised December 29, 2009 ; Accepted March 31, 2010)

Abstract

In this study, used is the equivalent loading method based on the inherent strain to predict the welding deformation of panel members. Equivalent loads are computed from the inherent strain distribution around weld line, and then applied for the linear finite element analysis. Thermal deformation of panel members can be, of course, carried out through the rigorous thermal elasto-plastic analysis procedure but it is not practical in applying to predicting the welding deformation of large structures such as blocks found in a ship structure from view of computing time. The present equivalent load approach has been applied to flat plate model to verify the present approach, and to several curved plate models having the curvature in the welding direction to investigate the effect of the longitudinal curvature upon the weld-induced deformation. The results are compared with those by thermal elasto-plastic analysis. As far as the present results are concerned, it can be said that the present approach shows good agreement with the results by welding experiment and the rigorous thermal elasto-plastic analysis. The present approach has been also applied to predict the welding deformation of panel block as for application illustration to practical model.

Key Words : Equivalent loads, Inherent strain, Ship's panel block, Temperature dependent physical and material properties, Thermal elasto-plastic analysis, Welding deformation

1. 서 론

구조부재의 접합법의 하나로서 용접이 미세 구조에서 부터 여러 가지 기계 구조물을 비롯하여 선박이나 해양 구조물, 건축구조물과 같은 대형 구조물의 제작에 있어서 가장 중요한 기본적인 공정이라는 것은 주지의 사실이다. 용접은 열원에 의한 입열, 최고 온도 그리고 급격한 냉각이라는 거친 열 사이클로서, 이 과정에서 발생하는 전형적인 문제점이 결함과 변형이다. 균열 등 결함은 금속재료학적으로 접근해야 할 문제점으로서 본 연구에서는 용접으로 인한 변형문제에 관심을 둔다.

여러 문헌들을 통해 잘 인식되고 있는 바와 같이 용

접으로 인한 변형은 이동 열원에 의한 용접부에서의 불균일한 온도 분포에 기인한다. 용접변형은 일반적으로 용접선에 수직방향으로의 횡수축과 횡굽힘 변형, 용접선 방향으로의 종수축과 종굽힘 변형, 맞대기 용접에서 주로 발생하는 면내 회전 변형 그리고 박판 구조에서 많이 발생하는 좌굴변형 등 여섯 가지로 구분한다¹⁾. 이러한 용접변형을 예측하는 문제는 수학적으로 비선형 편미분방정식이고 이에 포함되는 물리적 및 재료적 특성치들도 높은 비선형성을 갖기 때문에 해석적인 방법(analytical methods)으로는 그 물리적 및 역학적 현상을 정확하게 규명하기 어렵다. 이러한 이유에서 최근 용접변형을 예측하는 데에 유한요소법에 의한 열탄소성 해석을 수행하는 연구가 수행되었고 지금도 많은 연구

가 수행되고 있다²⁻⁵⁾. 그러나 해석 대상 모델의 크기가 큰 경우에는 현재처럼 발달된 컴퓨터 하드웨어 환경에서도 엄청나게 많은 계산 시간이 필요하기 때문에 선박이나 해양구조물을 구성하는 블록 등 실제적인 구조물을 대상으로 한 용접변형 예측에는 실용적이지 못하다⁷⁻¹⁰⁾. 한편, 단위 부재에 대한 비드 용접이나 맞대기 용접에 의한 변형 결과는 간단한 실험을 통해 구할 수 있기 때문에 용접부에서의 고유변형률(inherent strain)을 알 수 있으면 용접선에 수직방향과 용접선 방향으로 등가의 수축력과 모멘트를 구하여 이를 구조물에 작용시키는 탄성해석을 수행함으로써 대형 구조물의 용접변형을 보다 신속하게 예측할 수 있다⁷⁻¹⁰⁾.

본 연구에서는 2차원 열탄소성 해석과정에서 구한 고유변형률 분포로부터 등가의 수축력과 모멘트를 구하고 이를 대상 구조물에 외력으로 작용시켜서 탄성해석을 수행하는 등가하중법을 이용하여 판 부재들의 용접변형을 예측하였다. 여기에서의 해석 대상은 평판의 맞대기 용접, 용접선 방향으로 곡률이 있는 곡판의 비드 용접이다. 특히, 곡률의 크기와 부호를 변화시켜서 수행한 곡판의 비드 용접해석 결과를 통해 용접선 방향으로의 곡률이 용접변형에 주는 영향을 분석하였다. 또한 본 연구의 등가하중법을 선박의 평 블록 모델에 적용하는 결과를 예시함으로써 실제 구조물의 조립과정에서 발생하는 변형 예측에의 적용 가능성을 보였다.

2. 등가하중법

2.1 개요

본 연구에서의 해석과정의 흐름도를 Fig. 1에 보였다. 주어진 해석 대상 구조물에 대해 2차원 열탄소성 해석을 수행하여 고유변형률과 그 영역이 정의된다. 열탄소성 해석을 통해 구한 고유변형률을 이용하여 2.3절에서 기술하는 수식들로부터 등가 점접력으로서 용접선 및 이에 수직 방향인 종 및 횡 방향으로의 수축력과 모멘트를 구하고 이를 외력으로 작용시키는 탄성해석을 통해 용접변형량, 즉 횡수축과 횡굽힘변형 그리고 종수축과 종굽힘변형량을 구한다.

2.2 열전달 해석 모델

진술한 바와 같이 고유변형률에 의한 등가하중(equivalent load)을 구하기 위해서는 고유변형률과 그 영역을 결정하기 위해 열탄소성 해석을 먼저 수행한다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 해석의 신속성을 위해 2차원 열탄소성 해석을 하였는데, 이 경우 용접의 시작점부터 끝 점까지 경험하는 열 사이클이 동일하고 따라서

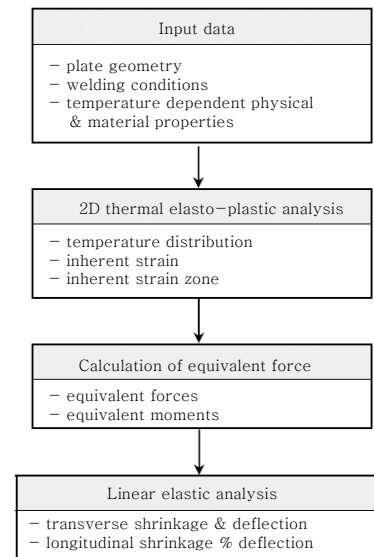


Fig. 1 Procedure of welding deformation analysis

용접선 어느 위치에서나 작용하는 등가 하중이 동일하다. 이때 용접의 시작과 끝 부분에서 발생하는 단부 효과(edge effect)를 고려하지 못함에 따른 오차가 발생할 수 있으나 그 영향은 크지 않을 것으로 보인다.

용접이나 선상가열로 인한 열변형은 이동 열원에 의한 열전달과 탄소성 변형이 연성된 높은 비선형성을 갖는 문제이다. 평판과 곡률 반경이 $R > 3000$ 이상인 곡판에 대한 비선형 열전달 해석 연구에 의하면, 열전달로 인한 온도 분포에 곡률이 주는 영향은 거의 없는 것으로 보고되었다¹¹⁾. 이는 이동 열원에 의한 열변형 해석시 열전달과 탄소성 현상이 연성되지 않아 두 과정을 독립적으로 해석해도 된다는 것을 의미한다.

이동열원에 의한 온도의 분포를 구하기 위해 열전달 해석을 수행할 때, 열원의 모델링이 온도 분포에 영향을 줄 수 있다. 이동 열원의 열속(heat flux)은 Gaussian 분포 열속이나 표면 또는 체적 열속으로 모델링하여 해석한다³⁻⁶⁾. 최근, 대한용접·접합학회의 용접강도연구회에서 수행한 Round Robin 연구결과에 의하면 열속의 모델링 자체 보다는 입열량이 결국 열변형 결과에 영향을 주는 것으로 보고되었다¹³⁾. 그러나 2.3절에서 기술하고 있는 등가하중을 보다 정확히 계산하기 위해서는 열전달 해석 결과의 정확성 확보가 필요할 것이므로, 본 연구에서는 열속의 분포를 더 정확히 표현할 수 있는 것으로 알려진 Goldak 등¹⁴⁾의 이중 타원체 모델(double ellipsoid model)을 이용하였다. Fig. 2에 보인 좌표계의 정의를 이용하면 열원은 식 (1)로 표현된다.

$$q = \frac{6\sqrt{3} Q_w \eta f}{abc\pi\sqrt{\pi}} \left[e^{-3\left\{\left(\frac{y}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{b}\right)^2 + \left(\frac{x+vt}{c}\right)^2\right\}} \right] \quad (1)$$

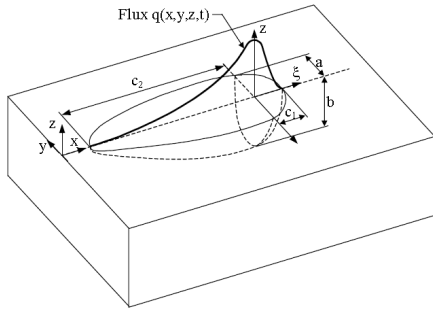


Fig. 2 Geometry definitions for double ellipsoid heat source model

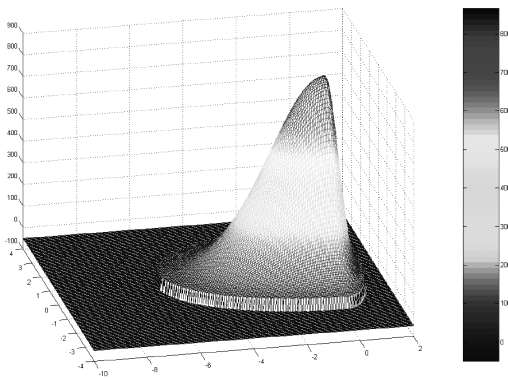


Fig. 3 Heat input distribution at the top surface for double-ellipsoid heat flux model

여기에서 Q_w 는 용접 입열, η 는 용접 효율이고, x, y 와 z 는 열원의 중심이 원점인 이중 타원체모델의 국부좌표계이다. a, b 와 c 는 용입부의 폭과 깊이 그리고 타원체의 길이이고, v 는 용접속도이다. 열원의 앞 부분에서는 $c = a, f = 0.6$ 이고, 뒷 부분에서는 $c = 4a, f = 1.4$ 이다. Fig. 3에 본 연구의 열전달 해석시 사용한 열속도 모델을 도식적으로 표시하였다.

본 연구에서 대상 모델의 재료는 연강이며, 재료의 열전도계수, 비열과 밀도 등 물리적 특성치 그리고 선 팽창계수, 항복응력과 탄성계수 등 재료적 특성치의 온도 의존 특성은 각각 Fig. 4와 5에 보인 모델을 사용하였다⁸⁾.

2.3 등가하중의 계산

용접변형은 용접부와 그 근처에서의 불균일한 온도 분포로 발생하며, 특히 유한 판의 경우 두께 방향으로 불균일한 온도 분포가 용접변형의 직접적인 원인이다. 입열과 냉각과정을 거치면서 용접부에서 발생하는 전체 변형률 ϵ 은 탄성변형률(elastic strain) ϵ^e , 소성 변형률(plastic strain) ϵ^p , 열 변형률(thermal strain) ϵ^{th} 그리고 상 전환 변형률(phase transformation strain)

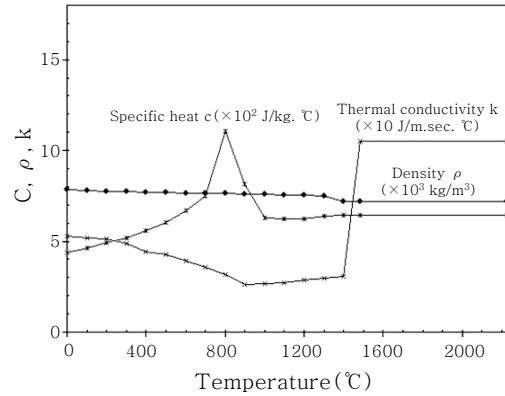


Fig. 4 Temperature dependent physical properties

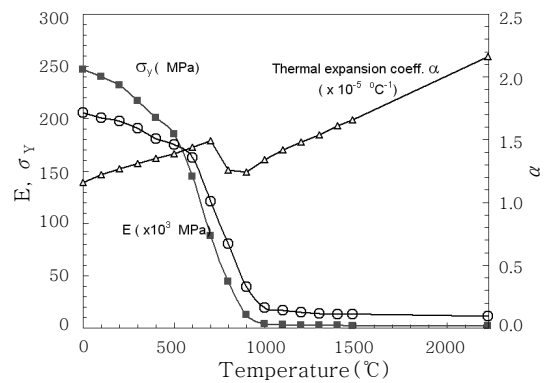


Fig. 5 Temperature-dependent mechanical properties

ϵ^{tr} 의 합으로서

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^{th} + \epsilon^{tr} \tag{2}$$

와 같이 표현되고, 고유 변형률은 소성 변형률, ϵ^p , 열 변형률 ϵ^{th} 그리고 상 전환 변형률 ϵ^{tr} 의 합으로서

$$\epsilon^* = \epsilon^p + \epsilon^{th} + \epsilon^{tr} \tag{3a}$$

와 같이 표현된다. 따라서 고유변형률은 전체 변형률과 탄성 변형률의 차이로 표현된다. 즉,

$$\epsilon^* = \epsilon - \epsilon^e \tag{3b}$$

용접으로 인해 발생하는 고유 변형률은 일반적으로 6개의 성분이 있지만, 판의 가로와 세로 치수가 두께에 비해 큰 경우에는 용접선의 길이와 폭 방향으로의 성분인 $\epsilon_x^*(x, y, z)$ 와 $\epsilon_y^*(x, y, z)$ 가 지배적이다. 상 전환 변형률은 다른 성분에 비해 무시할 수 있을 정도로 작으므로, 고유 변형률은 소성과 열 변형률의 합으로 표현된다. Fig. 6에 보인 x 와 y 방향으로의 등가력(equivalent force)과 등가 모멘트(equivalent moment)는 고유

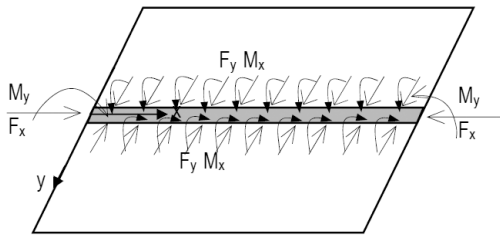


Fig. 6 Equivalent loads along weld line

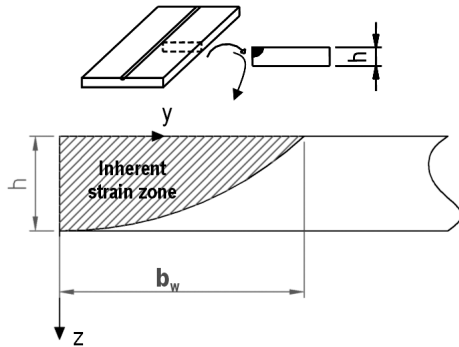


Fig. 7 Inherent strain zone

변형률에 기초하여 다음의 식(4)~(7)에서 계산한다.

- 등가 종수축력(equivalent longitudinal force) :

$$F_x = \int_{A_h} E\epsilon_x^* dA = \int_0^h \int_0^{b_w} E\epsilon_x^* dydz \quad (4)$$

- 등가의 종모멘트(equivalent longitudinal moment) :

$$M_y = \int_{A_h} E\epsilon_x^* \left(z - \frac{h}{2}\right) dA = \int_0^h \int_0^{b_w} E\epsilon_x^* \left(z - \frac{h}{2}\right) dydz \quad (5)$$

- 등가 횡수축력 (transverse equivalent force) :

$$F_y = \int_{A_h} E\epsilon_y^* dA = \int_0^h \int_0^{b_w} E\epsilon_y^* dydz \quad (6)$$

- 등가 횡모멘트(equivalent transverse moment) :

$$M_x = \int_{A_h} E\epsilon_y^* \left(z - \frac{h}{2}\right) dA = \int_0^h \int_0^{b_w} E\epsilon_y^* \left(z - \frac{h}{2}\right) dydz \quad (7)$$

위 식(4)~(7)에서의 적분은 Fig. 7에 표시한 고유 변형률 영역에 대해 수행된다. 여기에서 A_h 와 b_w 는 각각 고유 변형률 영역의 면적과 폭이다. 식(4)~(7)에서 계산되는 등가력과 등가 모멘트는 판의 중립면에 작용시킨다. 고유 변형률의 영역은 2차원 열탄소성 해석을 통

해 정의되는데, 고유변형률 영역의 폭 b_w 는 Fig. 7에 표시한 것과 같이 판 표면의 용접중심선에서 y 방향으로의 소성 변형률이 영(zero)인 위치까지의 거리로 정의된다. 따라서 등가하중들은 용접 중심선에서 b_w 만큼 떨어진 위치에 있는 절점들에 작용시킨다.

3. 용접변형 해석에의 적용

3.1 평판 모델

고유변형률에 기초한 등가하중법인 본 연구 방법의 적용에 있어서 신뢰성을 확보하기 위해서는 고유변형률과 그 영역을 계산하기 위한 2차원 열탄소성 해석법의 타당성이 우선 검증되어야 하며 사용한 열속 모델의 타당성 검증도 포함된다. 이를 위해 평판의 맞대기 용접에 대해 실험을 수행한 결과¹⁵⁾를 2차원 열탄소성 해석결과와 비교하였다. 온도 계측을 위해 지름 0.5 mm인 K형 열전대를 사용하였고, 잔류응력은 Strain gage를 이용하여 계측한 것이다. 용접조건은 Table 1과 같다. 모델의 크기는 $L \times B \times h = 600 \times 300 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 이다. 하중과 경계조건의 대칭성을 이용해서 전체 판의 1/2 만 유한요소 모델링한 것이 Fig. 8과 같다. 열전달 해석과 고유변형률을 구하는 데에 본 연구에서는 상용 패키지인 ANSYS 9.0을 사용하였다. 맞대기 용접의 홈 형상은 X-groove 이고, 따라서 전면 용접 후 뒤집어서 이면을 용접한다.

Table 1 Welding conditions

Item	1 st Pass	2 nd Pass
Current	260 A	260 A
Voltage	32 V	32 V
Weld speed	4.2 mm/s	4.2 mm/s
Arc efficiency	0.7	0.6
wire diameter	1.2mm	1.2 mm
Groove angle	600	
Root gap	0 mm	

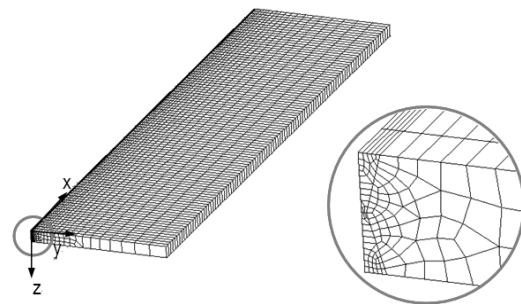


Fig. 8 Half plate model

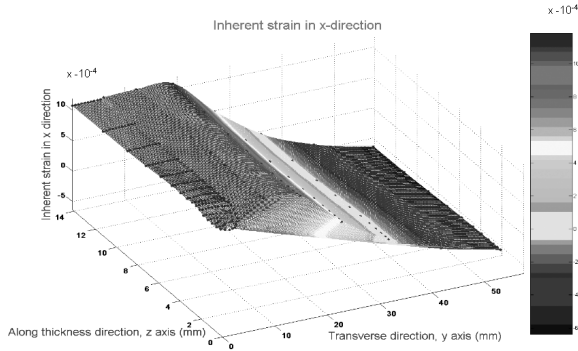


Fig. 9 Distribution of inherent strain ϵ_x^*

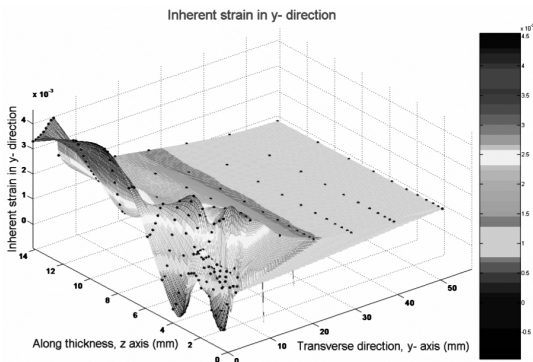


Fig. 10 Distribution of inherent strain ϵ_y^*

2차원 열탄소성 해석 결과로서 고유변형률의 x 와 y 방향 성분인 ϵ_x^* 와 ϵ_y^* 의 분포가 Fig. 9와 10과 같다. Fig. 11와 12는 전면 용접 (1st pass welding)과 이면 용접(2nd pass welding) 시 용접 중심선에서 각각 12.5와 25.0mm 떨어진 위치에서의 온도 이력을 실험 시 측정한 결과와 비교한 것인데, 보는 바와 같이 이중 타원체 열속모델과 온도 의존성 물리적 특성치 모델을 포함한 본 연구의 해석방법에 의한 결과가 실험결과와

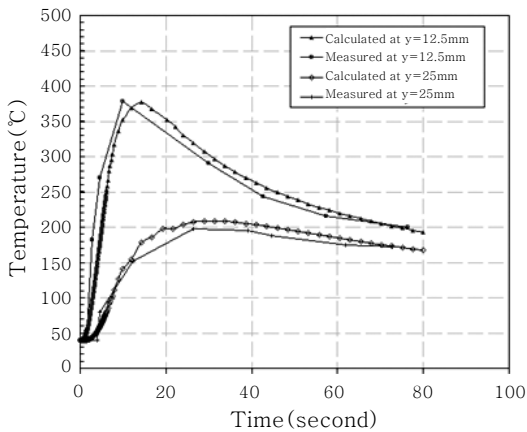


Fig. 11 History of temperature distribution during the 1st pass welding

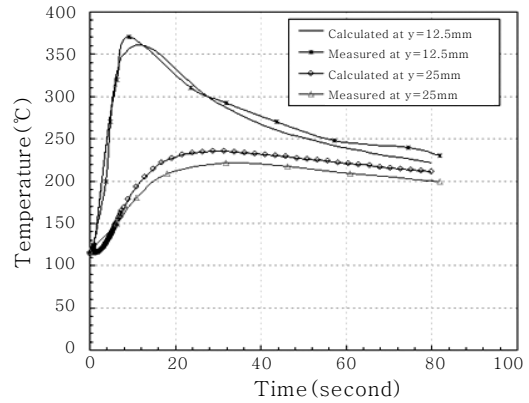


Fig. 12 History of temperature distribution during the 2nd pass welding

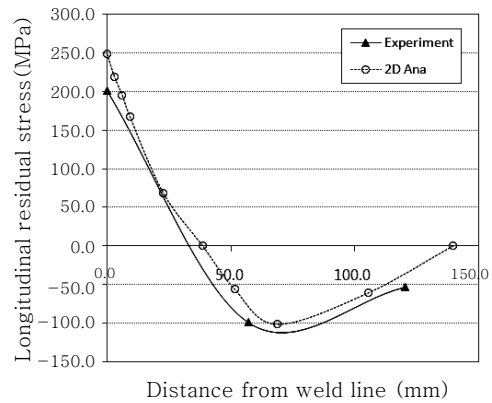


Fig. 13 Comparison of longitudinal residual stress distribution on the top surface

좋은 일치를 보이고 있다. 온도 이력을 열하중으로 입력하여 수행한 탄소성 해석 결과로서 x 방향(용접선 방향)으로의 잔류응력의 판 표면에서의 분포를 비교한 것이 Fig. 13과 같은데, 탄소성 해석 결과 역시 계측 결과와 좋은 일치를 보이고 있다.

3.2 곡판 모델

선박의 선수 및 선미부 등에서 볼 수 있는 곡면의 조립에는 용접하는 방향으로 곡률이 있어서 평판과는 다른 변형 특성을 보이고 있으며, 곡률의 영향으로 그 변형 현상이 더 복잡해진다. 여기에서는 본 연구의 방법을 곡판의 용접변형 예측에 적용해 봄으로서 용접선 방향으로 곡률의 영향을 살펴보았다.

모델의 크기는 길이×폭×두께가 $L \times B \times h = 1000 \times 1000 \times 12\text{mm}$ 이고 곡률이 $1/R = 0, \pm 0.0005, \pm 0.001$ 로서 다섯 모델에 대해 등가하중법에 의한 변형해석을 수행하였고 그 결과를 상세한 3차원 열탄소성 해석 결과와의 비교를 통해 곡판에의 적용성을 검증하였다. 여

Table 2 Welding conditions

Parameter	Value
Speed (mm/sec)	7.0
Thermal efficiency	0.75
Q (J/mm)	1296.0
Q/h2 (cal/mm3)	9.0

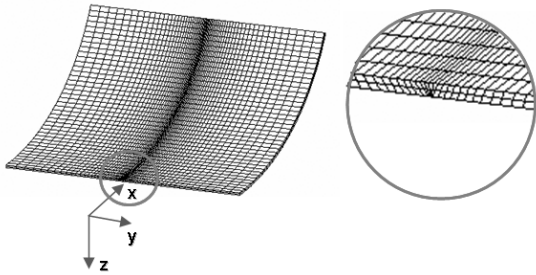


Fig. 14 Finite element modeling of curved plate

기에서 R 은 곡률 반경이다. 양의 곡률은 볼록한 면(convex side)에, 음의 곡률은 오목한 면(concave side)에 비드 용접을 하는 경우이다. 용접속도, 열효율, 단위 길이 당 입열량 등 용접조건은 Table 2와 같다. 오목한 면에 용접하는 경우에 대한 유한요소 모델링을 Fig. 14에 예시하였고, 평판의 경우와 마찬가지로 하중과 경계조건의 대칭성을 이용하여 1/2 모델에 대해 해석을 수행하였다.

3차원 열탄소성 해석과 본 연구의 등가하중법에 의한 결과를 비교한 예로서 용접중심선 ($y = 0$)에 따른 굽힘변형량의 분포를 Fig. 15에 보였다. '3D Ana'와 'Present'는 각각 3차원 열탄소성 해석과 본 연구방법의 결과이다. 등가하중법에 의한 결과(○로 표시된 것)가 열탄소성 해석 결과(●로 표시된 것) 보다 크게 나타났고, 이는 용접의 시작과 끝 부근에서 두드러짐을 볼 수 있는데 이는 본 연구에서 용접선의 시작과 끝 부분에서 발생하는 단부효과(edge effect)를 고려하

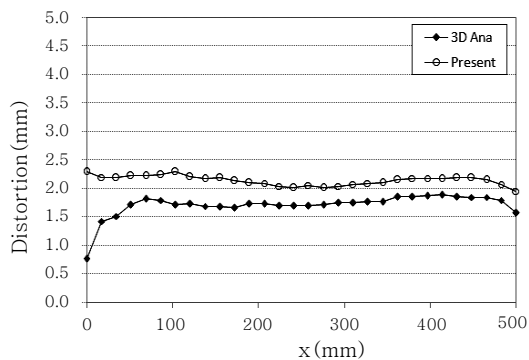


Fig. 15 Vertical distortion along x-direction at $y=0$ ($1/R=0.0005$)

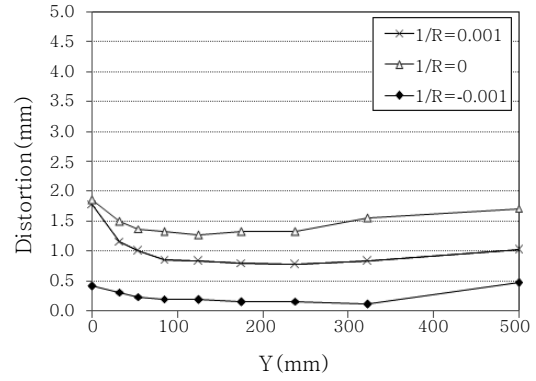


Fig. 16 Vertical distortion along y-direction at $x=500mm$

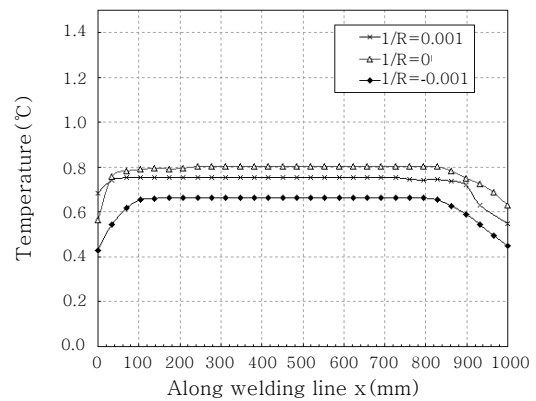


Fig. 17 Transverse shrinkage along x-direction at $y=0$

지 않았기 때문에 분석된다.

곡률이 굽힘변형과 횡수축에 주는 영향을 보이기 위해, 곡률이 $1/R = 0, \pm 0.001$ 인 세 경우에 대한 결과를 Fig. 16과 Fig. 17에 각각 보였다. Fig. 16은 용접선 중간 위치인 $x = 500mm$ 에서 y 방향으로의 굽힘변형량을 표시한 것이고, Fig. 17은 횡수축량의 용접선에 따른 분포를 표시한 것이다. 용접선 방향으로의 곡률은 굽힘작용시 굽힘강성(bending rigidity)를 증가시키는 효과를 주기 때문에 같은 입열량에 대해 평판보다 굽힘변형이 작은 것은 당연한 결과이다. 한편 곡률의 절대 값이 같은 경우라도 용접한 면이 볼록한 면이나 오목한 면이나에 따라 변형량에 차이가 있음을 뚜렷하게 볼 수 있다. Fig. 16에서 보듯이 오목한 면에 용접을 하는 경우 (곡률 $1/R < 0$)가 볼록한 면에 용접을 하는 경우 ($1/R > 0$) 보다 횡굽힘변형이 작은 것을 볼 수 있는데, 이러한 경향은 곡률이 있는 판의 선상가열에 의한 열변형 연구에서도 확인된바 있다¹²⁾. Fig. 17에서 보듯이 횡수축량의 분포 역시 곡률의 영향을 받으며 그 경향은 굽힘변형에의 영향과 마찬가지로 곡률이 있는 경우 횡수축이 작고 또한 곡률이 음인 오목한 면에 용접을

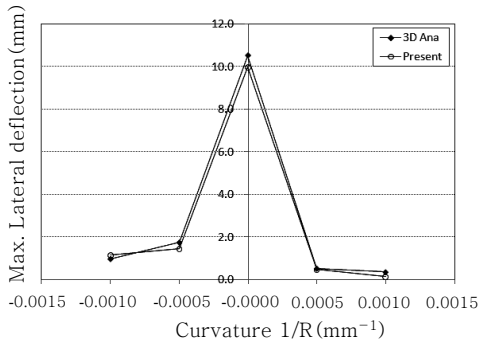


Fig. 18 Effect of curvature on transverse bending

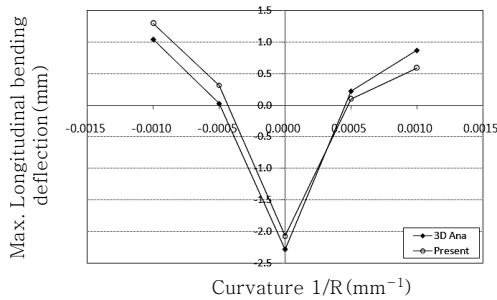


Fig. 19 Effect of curvature on longitudinal bending

하는 경우가 볼록한 면에 용접을 하는 경우 보다 적은 횡수축량을 보이고 있다. 곡률의 크기나 방향과는 상관 없이 용접의 시작과 끝 부분에서의 수축량이 중앙부 보다 적은데, 이는 단부 효과 때문으로 보인다.

곡률이 횡굽힘과 종굽힘에 주는 영향을 보이기 위해 용접선 중간 위치 ($x = 500mm$)에서의 처짐을 각각 Figs. 18과 19에 보였다. 횡굽힘에의 영향을 보여주고 있는 Fig. 18에서 보듯이 본 연구의 증가하중법(○)에 의한 결과가 열탄소성 해석결과(●)와 잘 일치된 결과를 보이고 있다. 전술한 바와 같이 용접선 방향으로의 곡률은 횡굽힘 모멘트에 저항하는 굽힘강성을 증가하는 효과가 있기 때문에 평판보다 훨씬 적은 변형량을 보이고 있다. 한편 곡률에 따른 종굽힘 변형량인 Fig. 19를 보면 곡률이 증가함에 따라 오목한 면이나 볼록한 면에 용접하는 경우 모두 종굽힘 변형량이 증가하는 경향을 보이는 것은 열탄소성 해석이나 증가하중법 모두 공통적인 결과인데, Fig. 18에 보인 횡굽힘의 경우보다 오차가 크다. 이는 증가하중법에서는 2차원 열탄소성 해석 결과로부터 계산된 고유변형률을 사용해서 증가하중을 산출했기 때문에 3차원 효과가 반영되지 않았기 때문으로 보인다.

3.3 평블록 모델

여기에서는 본 연구의 증가하중법을 평 블록(panel block)의 조립과정에 따른 변형 예측에 적용한 예를 보

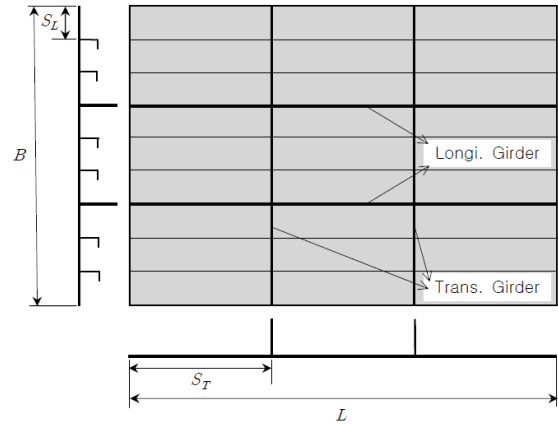


Fig. 20 Panel block model

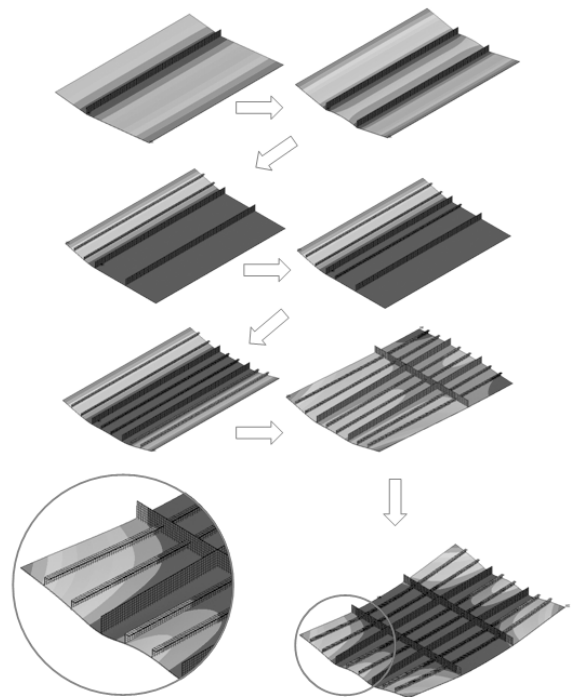


Fig. 21 Deformed shape to assembly

이고자 한다. Fig. 20에 보인 평 블록의 전체 크기는 길이×폭×두께가 $L \times B \times h = 9000 \times 6300 \times 12mm$ 이다. 종 보강재와 횡 거더의 간격은 각각 $S_L = 700mm$, $S_T = 3000mm$ 이다. 예시를 목적으로 모든 보강재의 두께는 편의상 판의 두께와 같게 하였고, 종보강재, 종 거더 및 횡 거더의 높이는 각각 400, 800 및 800mm이다. 보강재가 판에 좌우 필릿 용접으로 접합되는 것을 1회 용접으로 간주할 때, 용접선의 총 길이는 84,600mm이다. 보강재들의 조립단계에 따른 변형 형상이 Fig. 21와 같다. 이와 같은 블록 조립에의 실용적 적용 가능성에 대해서는 현장에서의 실측 자료와의 비교를 통해 검증되어야 할 것이다. 본 평 블록의 예는 그 정확성 여부를 떠나 용접 길이가 84,600mm

인 경우에 대해서는 현대와 같은 컴퓨터 하드웨어 환경에서도 3차원 열탄소성 해석이 현실적으로 거의 불가능하지만, 본 연구의 등가하중법을 적용하면 시현이 가능하다는 것을 예시하는 것이다.

4. 결 론

이 논문에서는 고유변형률법에 기초한 등가하중법을 개발하여 판 부재들의 용접변형 예측에 적용하였다. 평판의 맞대기 용접과 용접선 방향으로의 곡률이 있는 곡판에 적용하여 그 결과를 실험 및 상세한 열탄소성 해석 결과와 비교함으로써 그 타당성을 검증하였다. 특히, 곡판에 대한 적용 결과를 토대로 용접선 방향으로의 곡률이 용접변형에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구 결과에 의하면 제안하는 등가하중법이 실험 및 상세한 열탄소성 해석과 비교해서 좋은 일치율을 보여 주고 있어서 그 타당성이 검증되었다고 말할 수 있다. 곡판에의 적용 결과를 보면 곡률이 굽힘변형 뿐만 아니라 수축변형에도 영향을 주는 것을 뚜렷이 볼 수 있었다. 따라서 보다 많은 모델에 대한 적용을 통해 곡률의 영향을 보다 상세히 분석할 필요가 있다.

또 하나의 적용 예로서 선박이나 해양구조물에서 볼 수 있는 평 블록 모델에 본 연구 방법을 적용한 예를 통해 실제 구조물에 충분히 적용성이 있음을 보였다. 향후 실제 블록에의 적용 예와 그 결과를 현장에서의 실측 자료와의 비교 및 분석결과를 토대로 본 연구 방법을 실용적으로 적용이 가능하도록 보완하고 것이 필요할 것이다.

후 기

이 논문은 2006년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-311-D00970).

참 고 문 헌

1. K. Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Oxford, 1980
2. P. Michaleris and A. DeBicari : Prediction of Welding Distortion, Welding Journal, **76-44**(1997), 172s-180s
3. S.I Kim : Develop of Welding Deformation Control Method for Hull Structure, PhD thesis, Univ. of Ulsan(1999) (in Korean)
4. S.I. Kim : Development of Simple Prediction Model for V-groove Butt Welding deformation, J. of the Society of Naval Architects of Korea, **41-2**(2004), 106-113(in Korean)
5. D.H. Shin, S.B. Shin and J.S. Lee : A Study on the Prediction of Welding Distortion and Residual Stress for Channel I Butt SA Weldment using FE Analysis, Proceedings of the Korean Society of Ocean Engineers Autumn Meeting (2006), 189-192 (in Korean)
6. C.D. Chang and S.I. Seo : Calculation of Residual Stresses by Thermal Elasto-Plastic Analysis, Journal of the Korean Welding & Joining Society, **6-4** (1988), 35-43 (in Korean)
7. Y. Luo, M. Ishayama and H. Murakawa : Study on Welding Deformation of Plate with Longitudinal Curvature, Yosetsu Kozo Shinpojiumu Koen Ronbunshu, **Vol. 1999**(1999), 311-317 (in Japanese)
8. C.H. Lee : Prediction of Welding Deformation of Ship Hull Panel Blocks using Equivalent Loading Method Based on Inherent Strain, PhD thesis, Seoul National Univ.(2002) (in Korean)
9. C.D. Jang, Y.S. Ha, D.E. Ko and S.C. Moon : Determination of Inherent Strain Regions to Estimate Plate Deformation by Line Heating, J. of the Society of Naval Architects of Korea, **39-1**(2002), 82-89(in Korean)
10. Y. Takeda : Prediction of Butt Welding Deformation of Curved Shell Plates by Inherent Strain Method, J. of Ship Production, **18-2**(2002), 99-104
11. J.S. Lee and D.Y. Lim : Thermal Deformation of Curved Plates by Line Heating, J. of Ocean Engineering and Technology, **19-1**(2005), 33-38 (in Korean)
12. S.H. Lee, Y.N. Ahn and J.S. Lee : A Study on the Deformation Characteristics of Plates Having Curvature due to Line Heating, Proceedings of the Korean Society of Ocean Engineers Autumn Meeting(2009), 188-191
13. Commission of Design, Analysis and Structural Strength of Welded Structures : Standardization of Temperature Distribution Prediction of the Arc Weld using FEA, Journal of the Korean Welding & Joining Society, **23-6**(2005), 497-503 (in Korean)
14. J. Goldak, A. Chakravarti and M. Bibby : A New Finite Element Model for Welding Heat Sources, Metallurgical Transactions B, **15B**(1984), 299 - 305
15. Y. V. L. N. Murphy, G. Venkata Rao and P. Krishna Iyer : Numerical simulation of welding and quenching process using transient thermal and thermo-elasto-plastic, Computer&Structures, **60-1** (1996), 131-154