

## 초대형 구조모델을 활용한 셸구조물의 용접변형 해석

하 윤 석<sup>\*,†</sup> · 이 명 수<sup>\*</sup><sup>\*</sup>삼성중공업 중앙연구소 시험변형연구파트

## A weld-distortion analysis method of the shell structures using ultra structural FE model

Yunsok Ha<sup>\*,†</sup> and Myungsu Yi<sup>\*</sup><sup>\*</sup>Material testing & Production CAE Research, Samsung Heavy Industries, Co., Ltd. Geoje 656-710, Korea<sup>†</sup>Corresponding author : yunsok.ha@samsung.com

(Received May 18, 2015 ; Accepted June 4, 2015)

## Abstract

A very large shell-structure built in shipyards like ship hulls or offshore structures are joined by welding through full process. As the welding contains a high thermal cycle at a local area, the welded structures should be distorted unavoidably. Because a distorted ship block should be revised to the designed value before the next stage, the ability to predict and to control the weld distortion is an accuracy level of the yard itself. Despite the ship block size, several present thermal distortion methodologies can deal those sizes, but it is a different story to deal full ship size model. Even a fully constructed ship hull not remaining any welding can have an accuracy issue like outfitting installation problems. Any present thermal distortion methodology cannot accept this size for its recommended element size and the number. The ordinary welding breadth at erection stage is about 20~40 mm. It can hardly be a good choice to make finite element model of these sizes considering human effort and computational environment.

The finite element model for structure analysis of a ship hull is prepared at front-end engineering design stage which is the first process of the project. The element size of the model is as fine as the longitudinal space, and it is not proper to obtain a weld distortion at the erection stage. In this study, a methodology is suggested that a weldment can be shrunk at original place instead of using structural finite element model. We cut the original shell elements at erection weld-line and put truss elements between the edges of cut elements for weld shrinkage. Additional truss elements are used to facsimile transverse weld shrinkage which cannot be from the weld-line truss element shrink. They attach to weld-line truss element like twigs from barks. The capacity of developed elements is verified through an accuracy check of erection process of a container vessel at the apt. hull. It can be a useful tool for verifying a centering accuracy after renew and for block-separating planning considering accuracy.

Key Words : Shell structure, Erection, Butt weld, Truss element, Poison ratio, Inherent strain

## 1. 서 론

선체나 대형 해양구조물은 건조 전(全)과정에서 용접으로 접합된다. 용접은 특정한 부위에서 고온의 열이력을 수반하는 작업으로서, 필수불가결하게 영구 소성변형을 일으킬 수 밖에 없다. 따라서 이러한 열변형을 해석하고 제어하는 능력은 용접구조물의 정도 향상과 직결된다. 현재 조선소의 내업에서 이루어지는 작업은 최

종 결과물이 일반적으로 최대 각 방향 20 m 수준 규모의 선체 대조립 블록이다. 이는 셸구조물로서 작은 크기는 아니지만, 현재의 많은 열변형 해석법<sup>1)</sup>들이 이 규모에서의 용접변형 분석을 감당할 수 있다. 다만 구조물이 특정 크기를 넘어가면 용접부를 모사하기 위하여 권고되는 FE 해석의 최소 요소 크기 문제로 인하여, 모델링의 현실적인 어려움이나 상용 솔버의 요소 수 한계를 만날 수 있다. 또한 외업공정부터는 구조물의 크기가 계속 커지는 과정에서 자중 및 태양복사열에 의한

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Journal of Welding and Joining, Vol.33 No.3(2015) pp62-67

<http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.3.62>

변형이 전체 정도에서 차지하는 비중이 더 크다고 생각 되기 때문에, 용접 열변형을 평가하는 해석기술 개발은 내업의 블록 이하 크기를 대상으로 하는 데 집중되고 있다.

그러나 외업에서 이루어지는 건조작업에서도 용접 열변형을 분석하는 것이 중요한 경우도 상당수 존재한다. 우선 의장품의 탑재가 정밀함을 요구하는 경우이다. 선박에 있어서는 대표적으로 선미 축계의 센터링 작업 (Fig. 1)을 예로 들 수 있는데, 좌우 및 상하의 공차가 mm의 정도를 요구한다. 건조시의 탑재용접에 기인한 열변형량에 대하여 누적된 계측자료가 없는 새로운 선형을 적용하는 경우에는 센터링을 선행화하기가 어렵다. 이는 건조공정의 비효율로 이어진다. 다음으로는 최종 탑재가 플로팅 도크에서 이루어지는 선박의 중방향 굽힘 문제를 들 수 있다. 플로팅 도크는 탑재되는 선체블록의 중량과 탑재 용접간 수축 현상에 대하여 바닥의 연직방향으로의 강성이 충분하지 못하다. 플로팅 도크내의 물탱크를 사용하여 탑재용접을 고려한 중변형 제어에 실패하면 선체의 흘수선이 왜곡될 수 있다. 마지막으로, 신공법을 적용하여 셸구조물의 블록분할(Fig. 2)을 기획할 때 이것이 최종 건조단계에서 얼마나 정도



Fig. 1 Centering at the erection stage

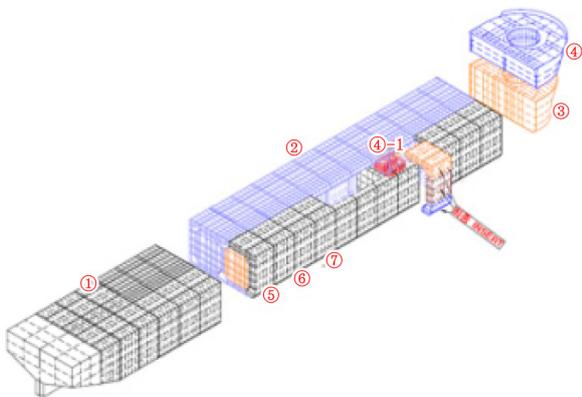


Fig. 2 An example of block division of an ultra offshore structure

문제를 야기할 것인가에 대한 평가가 필요하다. 선체분할은 일반적으로 크레인 용량만을 기준으로 하기 때문에, 실제 선체가 형성된 후에는 발생된 정도문제를 해결하지 못 할 가능성이 있다.

그런데, 분석 대상이 수백m의 구조물인 경우 간이해석 포함 현재의 어떤 용접 열변형 분석방법도 이를 수용하기 어렵다. 탑재 용접의 근간을 이루는 맞대기 용접의 경우, 기존에 종보강재 사이에서 면외변형 관찰을 위하여 사용하는 수준인 200 mm 수준의 요소가 현재로서는 적용 가능한 최대 크기에 해당하고, 해석기술의 개발은 하드웨어의 고성능(GPU활용<sup>2)</sup> 포함)에 힘입어 오히려 간이 해석이라 하더라도 요소 크기를 줄이는 쪽으로 진행되고 있다. 이 수준으로 전체선박을 모사하는 것은 노력 및 전산환경을 고려하였을 때 옳은 선택이라고 보기 어렵다.

다만 선박은 수주단계부터 기본적 구조성능평가를 위한 전선모델이 존재한다. 따라서 용접열변형 해석에의 적합성 여부를 떠나서 구조해석용 모델은 항시 있을 수밖에 없으나, 구조모델은 종보강재 간격(L.S. 약 800 mm)을 갖는 경우가 실질적으로 가장 최소 크기의 요소이다. 본 연구에서는 비록 해석의 대상이 전선(全船)이라 하더라도, 용접을 제 위치에서 수축시켜 전체적인 뒤틀림을 확인할 수 있도록 하는 방법을 고안하되, 이를 위하여 새로운 모델을 만드는 것이 아니라 기존의 구조해석용 모델을 활용하는 경제적인 방안을 고민하였다. 이에 탑재용접선의 위치에서 기존 모델을 절단하여 그 경계에 용접의 수축 역할을 담당하는 1차원 봉(truss)요소를 삽입하되, 뒤틀림을 유발하는 인자는 용접의 횡방향도 존재하므로, 용접선의 횡방향으로도 기존 요소의 경계망을 이용하여 1차원 요소를 삽입하는 방식을 설계하려고 한다. 이 과정에서 고유변형률 기반의 변형률 경계법<sup>3)</sup>을 사용하기 위하여, 선체와 같은 장(長)형 구조물의 특성이 감안된 구속도 계산이 이루어졌다. 본 연구에서 개발된 용접 수축 모사 요소의 성능은 컨테이너선의 선미 탑재과정의 축계 변위계측을 통하여 검증하였다.

## 2. 용접 수축용 봉요소

용접부를 모사하는 요소는 실제 용접부와 유사한 폭을 가져야 하므로, 전체구조물의 크기가 커질수록 전산기 용량이 허락하는 총 요소 수를 맞추기 위해서는 요소의 세장비가 길어지게 된다(Fig. 3). 이 비율이 1:5 이상이 되면 유한요소해석결과의 정도는 신뢰하기 어렵게 되므로 이는 매우 중요한 제한조건이지만, 선체블록의 모델링에서 이 비율 이내로 요소망 생성이 가능한

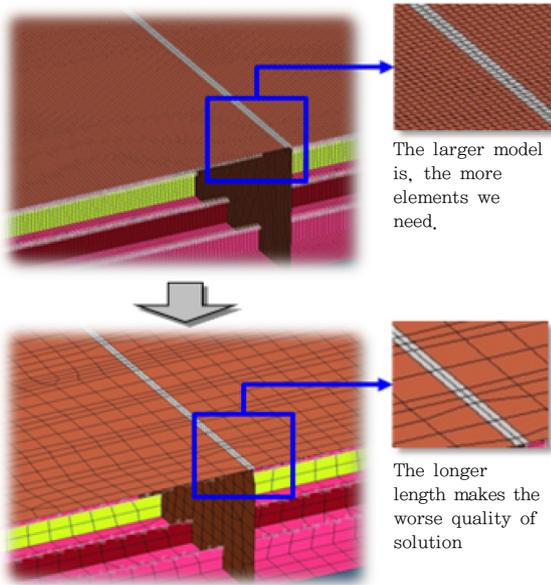


Fig. 3 Mesh Problems relating with weldment at large FE structural modeling

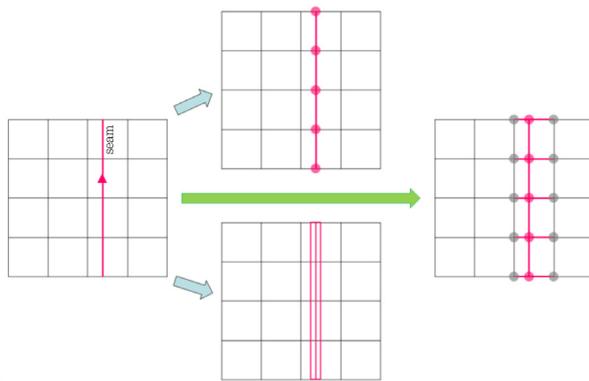


Fig. 4 The basic concept of stitch element

범위는 대조블록이 거의 한계이다. 이에 본 연구는 이미 구조해석을 위해 요소망이 생성된 모델링에 용접수축을 모사하기 위한 1차원 형태의 요소를 삽입하는 아이디어를 구현하였다. 요소수의 증가를 피하여 대형 구조물의 용접열변형을 해석할 때, 기존 구조 FE모델의 요소망 형태를 그대로 유지하고 탑재용접선만 추가하기 위하여, 그 위치에 용접부의 비드 단면적을 갖는 1차원 봉(truss)요소를 셸요소 분할 후 삽입(Fig. 4의 상부)하는 것이다.

이와 같은 요소 분할 및 삽입은 Truss의 종수축 기능으로 용접수축의 구현을 바로 이룬 것처럼 보일 수 있다. 그러나 용접선의 횡방향 굽힘에 의한 국부적 요철변형은 종보강재간 면외변형을 모사할 수 없는 요소망(횡굽힘 측정 구간내 최소 4개 이상의 셸요소 분할)에 의하여 무시될 수 있다고 하더라도, 횡방향 수축이

구조물 전체의 뒤틀림에 공헌하는 것을 무시할 수는 없다. 이에 본 연구에서는 탑재용접 심(seam) 이외의 분할을 더 하지 않으면서도 분할된 각(shell)요소의 경계(edge)를 따라, 횡방향 경계(edge)로 횡수축을 담당하는 봉(truss)요소를 추가하여 용접구조물의 변형을 구현할 것이다. Fig. 4의 우측에서 직관적으로 관찰되는 바와 같이, 요소망 재생성(Remeshing) 작업 및 부가되는 절점이 전혀 없는 등, 성능의 기대 및 전처리에 부담을 주지 않는 방법이 되도록 한 것이 본 연구의 핵심이다. 이후 횡방향의 수축을 반영하기 위하여 삽입된 요소를 스티치(stitch) 요소라고 부르기로 한다.

### 3. 횡수축 요소 특성 도출

용접부를 담당하는 1차원 요소를 변형률 경계법<sup>4)</sup>으로 수축시키는 과정은 3가지(고유변형률<sup>5)</sup>, 가상온도<sup>6)</sup>, 면적) 인자의 조합으로 이루어진다. 이 중 종수축을 담당하는 요소는 주로 직관적인 결정들이 요구된다. 요소의 단면적으로 실제 비드를 사용하게 되면, 용접부 요소와 실제 비드와의 부피비를 의미하는 가상온도는 자동으로 1도가 할당된다. 탄성해석용 변형률 경계법에서 가상의 열팽창계수로 사용되는 고유변형률(inherent strain)은 주로 용접재료와 용접부-주변부간 강성비의 함수<sup>7)</sup>이다.

본 연구에서 제시한 Stitch 요소에도 해석을 위한 3가지 인자가 설정되어야 한다. 횡수축량은 3가지 인자 중 어느 한 가지만으로도 조절될 수 있으나, 가상온도는 종방향 용접요소와 절점을 공유하고 있으므로 일단 그대로 1도를 부여하는 것이 합리적이다. 고유변형률(식 (1)<sup>8)</sup>) 역시 재료의 함수로 가정하고, 용접재가 정해지면 동일한 입력값을 그대로 사용하는 것이 직관적이다. 이제 남은 것은 요소의 단면적이다. 횡수축을 모사하기 위해 도입한 이 요소는 실제 여기에 대응해야 될 물리적인 실물은 존재하지 않는다. 따라서 요소 단면적에 반드시 혹은 편의적으로 입력해야 할 물리적인 값이 존재하지 않으므로, 본 연구에서는 스티치 요소의 단면적을 횡수축의 특성을 결정짓는 입력변수로 결정하였다. Stitch 요소의 단면적은 본 연구를 통해 제시한 방법론에 의한 수축량과 기존의 shell element에 의한 수축량이 동일한 값이 나오도록 설계하는 과정에서 도출된다. (Fig. 5) 이 때, Shell 요소에서 횡방향에 적용되는 고유변형률은 저항이 없는 상태에서의 수축이므로, 열변형률이 그대로 적용된다. 따라서 단면적이 도출되어도, Stitch 요소의 종/횡수축에 동일하게 적용되는 고유변형률은 아직 결정된 값은 아니다.

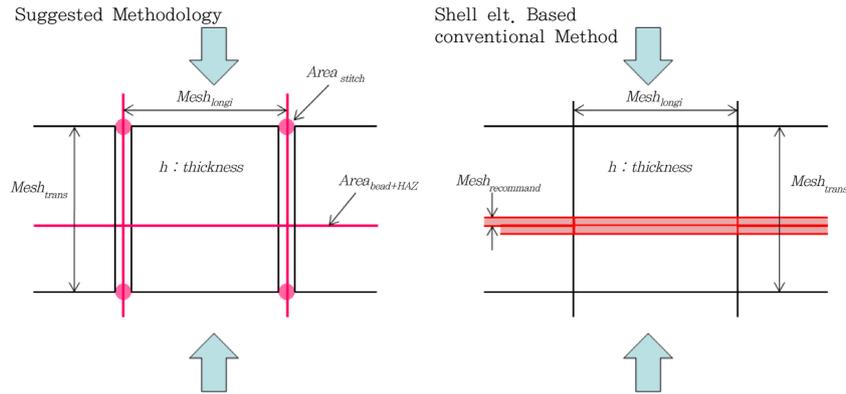


Fig. 5 Calculation of section area for a stitch (truss) element

$$\epsilon_{longi}^* = \frac{(\sigma_{Y\_weld} + H_{weld} \cdot \epsilon^{thermal}) \cdot (K_{ratio} + 1)}{E_{weld} + H_{weld} \cdot (K_{ratio} + 1)} \quad (1)$$

where,

- $\epsilon_{longi}^*$  : longitudinal inherent strain
- $\sigma_{Y\_weld}$  : yield stress at weld (Pa)
- $H_{weld}$  : Hardening coefficient (Pa)
- $\epsilon^{thermal}$  : thermal strain at cooling
- $K_{ratio}$  : stiffness ratio of weld and its adjacent region
- $E_{weld}$  : Elastic modulus (Pa)

#### 4. 고유변형률 및 구속도

식 (1)은 아직 계산되지 않은 종방향 고유변형률을 소성경화를 포함하여 나타낸 식이다. 식 (1)의 대부분은 재료와 관련된 항이므로, 용접재료의 Mill Certificate로 확인된다. 그러나 여기서도 용접부/주변부와의 강성비( $K_{ratio}$ )가 여전히 미지의 항으로 남는다.

본 대형구조물의 해석과정에서는 탄성 해석의 장점을 포기하는 것이 쉽지 않고, 가상의 Stitch 요소에 소성 응력상태를 유발하는 것이 무의미하므로, 식 (1)에 내재한 강성비를 의미있는 방법으로 유도하는 것이 옳다고 판단하였다. 강성도 용접부의 종방향으로는 구할 수 있는 값(식 (2))이므로 주변부의 종방향 수축을 저항하는 강성을 도출하기 위하여 Fig. 6과 같이 용접선 좌우의 블록 길이의 평균을 본 연구를 진행하기 위한 새로운 변수로 설정하였다. 즉, 용접선 주위의 폭이 크면 클수록 용접부가 수축해 들어가기 어렵다고 본 것이고, 메가블록 이상의 맞대기 용접에는 상당히 합리적인 가정이다.

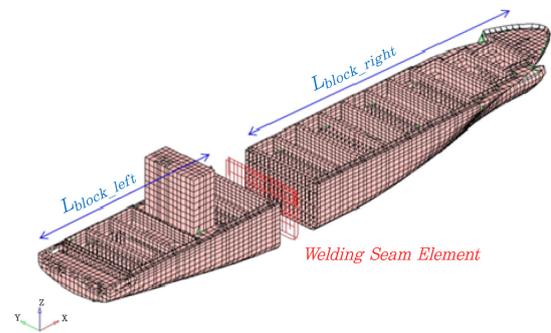


Fig. 6 Parameter assumption for longitudinal stiffness ratio of weld line

$$K_{ratio} = \frac{K_{weld}}{K_{adjacent}} \quad (2)$$

$$K_{weld} = \frac{A_{bead+HAZ} \cdot E_{weld}}{L_{weld\ line}}$$

where,

- $K_{weld}$  : rigidity of weld
- $K_{adjacent}$  : rigidity of adjacent region to weld (N/m)
- $A_{bead+HAZ}$  : section area of bead and HAZ ( $m^2$ )
- $L_{weld\ line}$  : length of weldline (m)

설정된 변수를 강성비로 표현하기 위하여 Fig. 7과 같이 단위 하중법(Unit Force method)<sup>9)</sup>을 사용하였다. 단위 하중법은 도출된 변위의 역수가 그 하중에 저항하는 강성이 되므로 유한요소해석 코드를 활용하는 경우에 임의의 모델링에 대하여 매우 유용하다. 이 결과를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8에 나타난 함수값은 사용된 모델의 기하학적 정보가 반영된 것이므로, 그 절대값은 의미가 없다. 다만 블록의 용접선 좌우로의

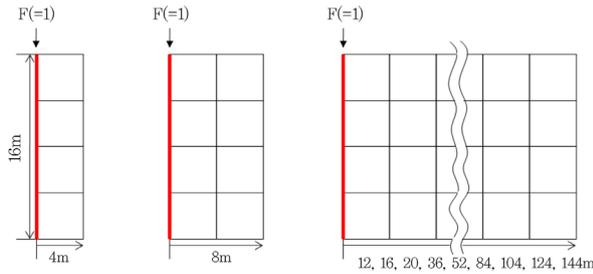


Fig. 7 Unit force method for obtaining stiffness ratio

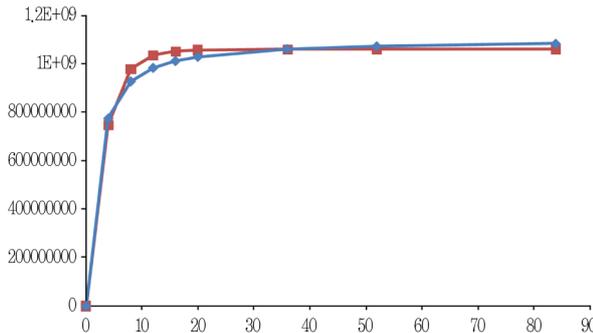


Fig. 8 Regression as arctan form from the result of the unit force method

폭에 대하여 어떤 수렴성이 있는 지를 파악하는 것이 중요하다. Fig. 7의 해석결과는 Fig. 8에서 (■)로 도시되었고, 그 경향은 초반에 급격하게 증가하다가 약 10 m의 폭에서부터는 거의 일정한 값을 갖는 것으로 나타난다. 이를 유사한 패턴을 갖는 Arctan 함수로 회귀(◆)하여, 마찬가지로 그림 8에 도시하였다. 실제 선체블록의 크기는 20 m에 육박하므로, 탑재과정의 용접 변형 해석에 적용하는 경우에는 강성비는 고유변형률의 계산에 큰 역할을 하지 못하는 것으로 간주할 수 있다. 따라서, 2장에서 기술한 바와 같이 고유변형률의 계산에는 강성비 이외의 남은 변수인 용접재의 물리적/화학적 특성이 가장 주요한 인자가 된다.

### 5. 적용 및 검증 사례

본 연구에서 제안된 스티치 요소의 실구조물에서의 평가를 위하여 컨테이너선의 선미를 탑재하는 과정 (Fig. 9)에 적용하여 해석(Fig. 10)하였다. 블록 세팅 및 용접이 진행되는 동안 선미 곳곳에서 기둥(pillar)가 구조물을 받치고 있는 상태이기 때문에, 자중에서 자유롭다고 가정하고 해석하였다. Stitch 요소에 둘러싸인 각(shell)요소도 Stitch 요소와 절점을 공유하고 있으므로 가상의 온도가 적용되어 Fig. 10처럼 적용부위가 넓게 도시되고 있으나, 오직 봉요소만 열팽창계수

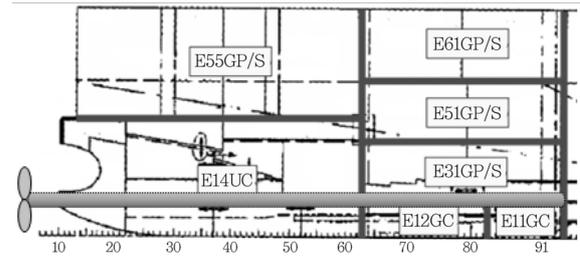


Fig. 9 An example of block division at aft. hull and centering location

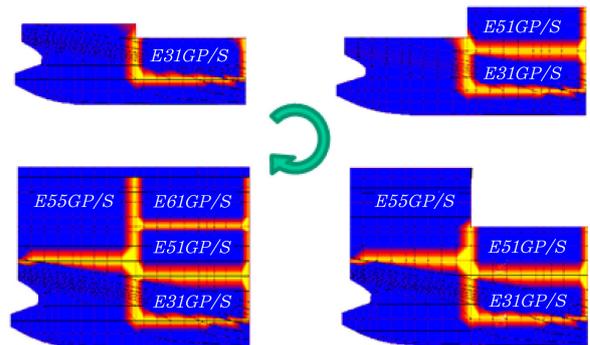


Fig. 10 Thermal distortion analysis of erection stage butt welding using stitch element

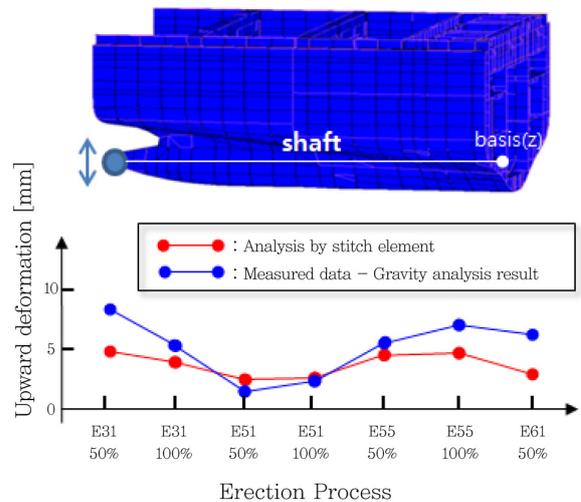


Fig. 11 Upward (downward) deformation of centering during erection process

가 적용되고 있다. Fig. 11의 수치는 축계의 상하단 값에 대하여 본 연구에서 제시한 방법에 의한 용접 열 변형 해석결과와 실제 계측결과를 정리한 것이고, 계측 결과를 나타내는 점들은 더 정확히는 계측결과에서 자중에 의한 처짐변형량의 해석결과만큼을 감한 것이다. 이는 제시한 열변형 해석결과의 정도를 정확히 파악하기 위함이다.

해석결과의 경향은 실제와 일치하지만 값의 크기의

변화폭은 계측값 대비 작은 것을 확인할 수 있고, 이는 해석이 설계상태의 표준 값에서 수행되었으나, 실제로는 얼마든지 과다값이 발생할 수 있음에 의한 것으로 보인다.

Fig. 11에서 보이는 추이에 해당하는 결과를 신뢰하게 되면, 정성적으로 E51 블록 탑재직후에 최소의 축계 정렬이 가능하므로, 현재보다 선행화된 작업을 할 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

## 6. 결 론

전선과 같은 대형 셸구조물의 탑재 용접 뒤틀림을 모사하기 위한 방법론을 개발하였다. 이 과정에서

1) 종/횡 모든 방향으로 수축이 가능하도록 Truss 요소를 운용하였고, 이 중 횡수축을 담당하는 Truss 요소를 Stitch element로 명명하였다.

2) 수축량 도출을 유도하는 인자로 Stitch element의 단면적을 계산하였고, 재료의 고유변형률을 계산하는 구속도는 선체블록의 크기가 결정하도록 하였다.

3) 전선 규모에서 실험이 어려운 만큼, 실제 선박구조물의 건조 선행화 현안에 부합하는 컨테이너선 선미 구조에 대하여, 본 해석법을 통한 생산성 향상의 예를 소개하였다.

## References

1. Sungku Kang and Jongsoo Yang, Overview of Research Works Regarding Welding Distortion, *Journal of KWJS*, 30 (2) (2012), 37-42 (in Korean)
2. Kazuki Ikushima, Masakazu Shibahara, Shinsuke Itoh and Ninshu Ma, Ultra Large Scale FE Computation Using Idealized Explicit FEM Accelerated by GPU, *Transaction of JWRI, Special Issue on WES2011*
3. Yunsok Ha, Sihoon Cho and Taewon Jang, Development of Welding Distortion Analysis Method Using Residual Strain as Boundary Condition, *MSF*, 580-582 (2008), 649-654
4. Yunsok Ha, A Study on Weldment Boundary Condition for Elasto-Plastic Thermal Distortion Analysis of Large Welded Structures, *Journal of KWJS*, 29 (4) (2011), 48-53 (in Korean)
5. Yunsok Ha and Changdoo Jang, An Improved Inherent Strain Analysis for Plate Bending by Line Heating Considering Phase Transformation of Steel, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 17 (2) (2007), 139-144
6. Yunsok Ha, Development of Thermal Distortion Analysis Method on Large Shell Structure Using Inherent Strain as Boundary Condition, *Journal of the society of Naval Architecture of Korea*, 45 (1) (2008), 93-100 (in Korean)
7. Taejun Kim, Beomseon Jang and Sungwook Kang, Welding Deformation Analysis based on Improved Equivalent Strain Method Considering the effect of Temperature Gradients, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7 (1) (2015), 151-173
8. Yunsok Ha, Changdoo Jang, Jongtae Kim and Hyungsuk Mun, Analysis of Post-Weld Deformation at the Heat-Affected Zone Using External Forces Based on the Inherent Strain, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 8 (4) (2007), 56-62
9. Changdoo Jang, Changhyun Lee and Daeun Ko, Prediction of Welding Deformations of Stiffened Panels, *Journal of Engineering for Maritime Environment*, 216-M (2002), 133-143