

평블록 구조의 용접변형 예측 및 제어

김 상 일 · 강 중 규 · 한 종 만

Prediction and Control of Welding Deformation for Panel Block Structure

Sang-Il Kim, Joong-Kyoo Kang and Jong-Man Han

1. 서 론

화물창(cargo hold) 구역의 블록에서 발생하는 변형의 대부분은 Web Frame류, Girder류에서 발생되며, 특히 Bulk Carrier, Container, Ro-Ro 선종에서 많이 발생된다. 이중구조블록의 제작에 있어서 Web Frame류, Girder류의 변형으로 인해 취부 작업 시 치수 편차가 발생하여 외력에 의한 조정 작업은 물론 이로 인한 추가적인 변형이 재발되어 조립 공정의 최종 단계에서 열에 의한 변형 교정 작업이 반드시 이루어지고 있다. 일부 조선소에서는 이러한 변형을 최소화하기 위해 소조립 단계에서부터 반진 공정을 추가하면서까지 열에 의한 변형 교정 작업인 곡직 작업을 수행하고 있는 실정이다.

선박·해양구조물의 제작 및 조립 시 발생하는 용접 변형은 용접속도와 모재 사이에 가열과 냉각 사이클의 전 과정을 통한 불균일한 팽창과 수축으로 인하여 발생된다. 이러한 변형은 구조물의 강도 저하나 외관상의 문제 등으로 엄격히 규제되어, 용접 후 그 크기를 줄이는 비용이 큰 비중을 차지하고 있다. 또한 선체 구조물의 용접변형은 기본적인 변형 양상이 다양하게 조합되어 나타나는 복합적인 형태를 띠고 있으며, 변형에 영향을 미치는 인자들 또한 매우 다양하므로, 이의 정확한 예측은 오랜 숙제였다.

조선산업에 있어서 향후 숙련공들의 감소와 3-D 작업 기피 현상으로 인한 노동력의 부족을 타파하기 위해서는, 자동화와 기계화를 가속화시키는 것이 매우 중요하다. 선박의 블록조립 자동화와 기계화를 실현하기 위해서는, 어떤 임계 한계 내에서 블록의 허용 오차(tolerance)를 유지하는 것이 반드시 필요하다. 따라서 선행 조립 단계에서의 고수준의 정도 제어가 매우 중요하게 된다.

현재 선박의 블록조립 공정은 절단, 굽힘, 용접, 응력

완화 및 곡직 공정으로 구성되어 있어, 공정 대부분이 가열 및 냉각을 수반하는 열공정을 포함하고 있다. 이러한 열공정들 중에서도 용접으로 인한 잔류변형은 조립 단계 별로 반드시 발생되는데, 각 조립 단계에서 발생하는 이러한 기하학적 부정확성은 자동화와 기계화의 도입을 방해하고 있으며, 다음 조립 단계에서의 취부 작업 시 부가적인 교정 작업을 초래하여 전체 취부 작업 공수를 증가시키는 요인이 된다¹⁾.

용접변형해석 방법으로는 유한요소법에 토대를 둔 열탄소성해석이 있으나²⁻¹⁰⁾, 용접이 가지는 재료 및 기하학적 비선형성, 시간과 온도에 대한 의존성 등 복잡한 물리적 성질과 전류, 전압, 용접속도, 용접순서, 구속조건 등 용접변형의 결과에 영향을 주는 많은 인자들로 인해서 해석 시에 과도한 계산 시간을 필요로 한다. 특히, 선체 구조와 같이 복잡한 구조 형상을 갖는 용접 구조물을 해석한다는 것은 슈퍼 컴퓨터를 사용한다 하더라도 현실적으로 많은 어려움이 따른다.

따라서 본 논문에서는 용접 후 잔류변형에 대한 기본적인 물리적 현상에 기초하여 필릿 용접 시에 발생하는 각변형과 횡수축변형에 있어서는 용접선 근방에 이러한 각변형과 횡수축변형을 일으키는 횡굽힘모멘트와 횡수축력이 작용하는 것으로 열탄소성문제를 횡굽힘모멘트와 횡수축력에 의한 변형 문제로 치환하여 모델링함으로써 실제 평블록 구조의 조립시에 발생하는 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였다. 이러한 모델링은 Nomoto 등^{11,12)}, Lee 등^{13,14)}이 선상가열에 의한 곡가공 시뮬레이터 개발에 적용한 바 있으며, 또한 필릿 용접된 판의 용접변형 예측에도 이와 유사한 모델링을 적용하였다¹⁵⁻¹⁸⁾.

본 연구에서 제시한 간이 해석법을 이용한 용접변형 예측은 용접 구조물의 특성을 단순화시키고 지배적인 주요 인자들만을 고려함으로써 실현될 수 있는데, 위에서 언급한 열탄소성해석의 한계성을 극복할 수 있는 가

가능있는 길임을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 고유변형이론(inherent deformation theory)을 이용한 간이 해석법을 통하여 실제 평블록 구조의 조립 시에 발생하는 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였고, 또한 Carling의 부착과 구조설계 변경 등의 변형 방지 효과를 파악하였다.

2. 간이 예측 모델

참고문헌¹⁰⁾에 있는 용접변형해석 결과를 토대로, FCAW(flux cored arc welding)를 이용한 1층 필릿 용접 시의 간이 예측 모델인 용접변형(각변형과 횡수축 변형) 추정식을 회귀분석을 통해 유도해 보면 아래의 식과 같다.

$$\phi_{f_0} = 1.243 \cdot p^{1.894} \cdot \exp(-0.165p) \quad (\times 10^{-3} \text{ rad}) \quad (1)$$

$$\frac{s}{t} = 0.330p \quad (\times 10^{-2} \text{ mm/mm}) \quad (2)$$

여기서, ϕ_{f_0} : 평균 각변형(rad)

s : 횡수축변형(mm)

$p = \frac{Q}{t^{1.5}}$: 입열량 계수

$Q = 0.239 \frac{IV}{v}$: 단위길이당 입열량(cal/mm)

I : 아크전류(A)

V : 아크전압(V)

v : 용접속도(mm/sec)

t : 판 두께(mm)

수치해석 결과에 의거하여 유도한 횡수축변형 추정식 (2)로부터는 필릿 용접 시의 횡수축 여유를 정량적으로 결정할 수 있으며, 수축치 관리에도 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

3. 용접변형 예측을 위한 간이 해석법

3.1 개요

본 연구에서는 선체 구조물 중에서 용접변형이 문제가 되는 평블록을 대상으로 하여 조립시에 발생하는 복잡한 변형 발생 양상을 실용적인 방법으로 해석하기 위한 하나의 방법을 제시하고자 한다.

용접으로 인해 구조물에는 각변형, 횡수축변형, 종굽힘변형과 종수축변형이 복합적으로 발생하게 되는데, 본 논문에서는 이러한 용접변형 중에서 형상 오차의 가

장 큰 요인인 각변형과 횡수축변형만을 고려하여 Tank Top 구조의 필릿 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였다. 두 개의 부재가 필릿 용접되는 과정은 Fig. 1에 보인 바와 같이 간략화된 등가하중이 작용하는 모델로 치환할 수 있는데, 본 연구에서는 이러한 용접변형을 유발하는 등가하중인 용접선에 수직인 방향으로 작용하는 횡굽힘모멘트와 횡수축력을 하중조건으로 하여 해석 모델에 작용시키고, 이와 함께 해석 모델의 자중을 고려하여, 선형 탄성 유한요소해석을 수행함으로써 Tank Top 블록의 조립시에 발생하는 용접변형을 예측하였다.

경계조건으로는 실구조물의 최종적인 변형 상태를 면밀히 조사한 결과를 토대로, 판과 보강재의 집합 지점에 단순지지조건을 부여하였다. 하지만 정반과 블록 사이의 마찰력은 고려하지 않았다.

실제 Tank Top 구조의 용접변형 예측을 위한 간이 해석 절차는 Fig. 2에 보여진 바와 같은데, 용접조건과 대상 모델의 형상을 입력한 후에 2장에서 유도한 필릿

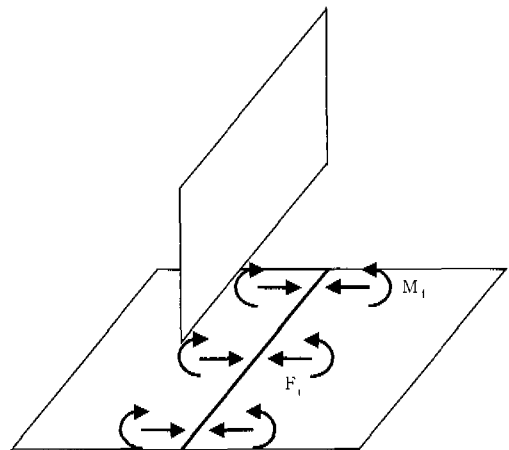


Fig. 1 Simplified model of fillet welding process

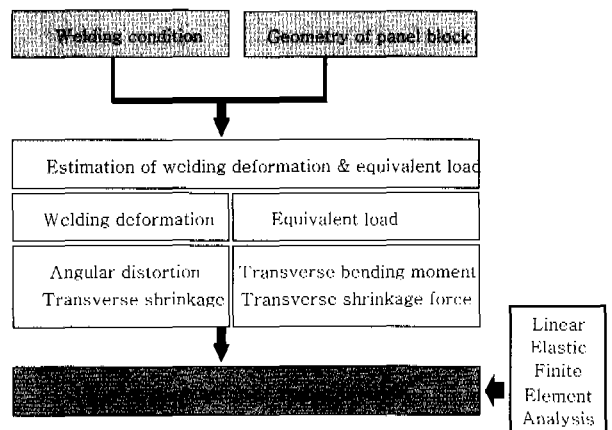


Fig. 2 Simplified analysis procedure for the prediction of welding deformation

용접변형에 대한 간이 예측 모델을 이용하여 용접변형의 값이 근사적으로 얻어지면 역학적 모델링의 식들로부터 본 간이 해석법의 하중조건을 산정할 수 있다^{10,18)}. 실구조물의 조립시에 발생하는 최종적인 용접변형은 증가하중인 횡굽힘모멘트와 횡수축력을 하중조건으로 하여 해석 모델에 작용시키고, 각각의 증가하중에 대한 용접변형해석 결과를 중첩의 원리를 이용하여 선형 조합함으로써 정량적으로 구해질 수 있다.

3.2 실구조물의 적용 예

본 절에서는 간이 해석법을 이용하여 Cargo Hold 구역의 블록 중에서 용접변형이 문제가 되는 대표적인 블록인 Tank Top 블록의 조립 시에 발생하는 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였고, 또한 Carling의 부착과 구조설계 변경 등의 변형 방지 효과를 파악하였다.

3.2.1 Web Frame류의 용접변형해석

용접 전에 Carling을 대는 것이 변형 감소에 효과가 있는지를 알아보기 위해 대상 모델의 $z=300, 2300\text{mm}$ 지점에 Snip Type의 Carling을 댔을 때의 3차원 변형 형상을 Fig. 3에 보였으며, 이 때의 $z=L(\text{mm})$ 위치에서의 단면의 모양을 Fig. 4에 보여 주었다. Fig. 3과 4에서 알 수 있듯이, 용접 전의 Carling 부착 시 보강재 사이에서의 변형량은 감소하지만, 주판의 자유단에서의 변형량은 오히려 증가하는 경향을 보이고 있다. 하지만, 소조립 공정 이후의 공정 단계에서 용접 전에 수행하는 취부 작업 시 흔히 발생하는 보강재 사이에서의 변형량 증가 현상은 이전의 공정 단계에서 Carling을 부착함으로써 현저히 방지될 수 있다.

3.2.2 Girder류의 용접변형해석

기하학적 형상의 대칭성을 이용하여, 해석 모델은 대

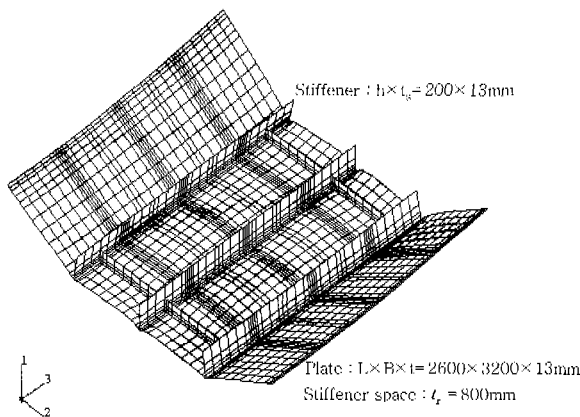


Fig. 3 Simulation result for web frame model with carlings at $z = 300, 2300\text{mm}$

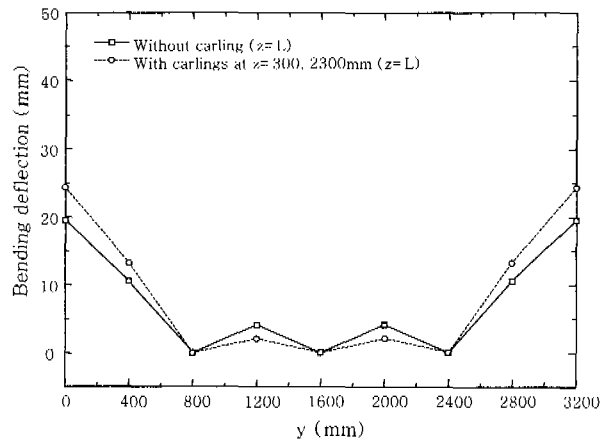


Fig. 4 Simulation result to see the effect of carling for web frame model

상 모델의 1/2 부분에 대해서만 모델링하였다.

Fig. 5는 대상 모델의 $x=300\text{mm}$ 지점 전체에 걸쳐서 Weld Type의 Carling을 댔을 때의 3차원 변형 형상을 보여 주고 있으며, 용접 전에 Carling을 대는 것이 변형 감소에 효과가 있는지를 알아보기 위해 $z=L(\text{mm})$ 위치와 $x=0(\text{mm})$ 위치에서의 단면의 모양을 Fig. 6에 보여 주었다. Fig. 5와 6에서 알 수 있듯이, 용접 전에 전체적으로 Weld Type의 Carling을 대주는 것이 L-type Girder Plate의 자유단에서의 변형 방지에 매우 효과적이라는 사실을 확인할 수 있다. 결론적으로 Girder Plate의 자유단에서의 각변형 방지는 기존의 설계 구조를 변경하지 않고는 불가능하기 때문에 현재의 설계 구조를 자유단으로부터 300mm 떨어진 지점에 Vertical Stiffener를 신설하는 구조로 변경시키는 것이 현재 설계 단계에서 용이하게 적용할 수 있는 최선의 변형 방지책으로 여겨지며, 이의 효과는 다음 공정 단계에서 Block Joint 작업 시에 상하 방향

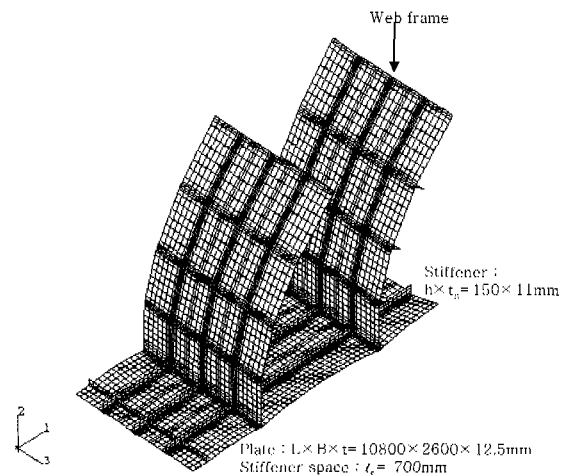
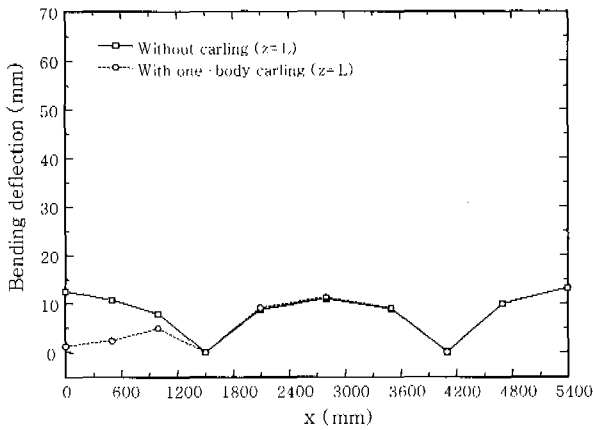
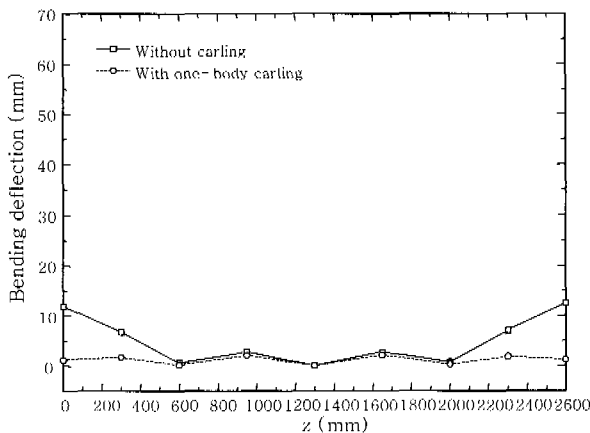


Fig. 5 Simulation result for L-type girder plate model with one-body carling at $x = 300\text{mm}$



(a) Longitudinal deformation



(b) Transverse deformation

Fig. 6 Simulation result to see the effect of carling for L-type girder plate model

으로 발생되는 단차 수정 작업에 드는 많은 재작업량 (amount of adjusting work)을 상당히 줄여줄 수 있을 것으로 기대된다.

3.2.3 Tank Top 블록의 용접변형해석

기하학적 형상의 대칭성을 이용하여, 해석 모델은 대상 모델의 1/4 부분에 대해서만 모델링하였다.

소조립 단계에서 Carling을 미리 대주는 것이 대조립 단계에서의 변형 감소에 효과가 있는지를 알아보기 위해 대조립 단계에 있는 Tank Top 블록을 대상으로 Carling 부착 유무에 따른 3차원 변형 형상을 Fig. 7 과 8에 보였으며, 이 때의 Web Frame Model의 $z=L(\text{mm})$ 위치에서의 단면의 모양과 L-type Girder Plate Model의 $z=L(\text{mm})$ 위치와 $x=0(\text{mm})$ 위치에서의 단면의 모양을 Fig. 9와 10에 보여 주었다. 이로 부터 소조립 단계에 있는 블록에 Carling을 미리 대줌으로써 대조립 단계에서 얻는 효과를 살펴 보면, Web Frame류에 있어서는 용접 전에 수행하는 취부 작업 시 흔히 발생하는 보강재 사이에서의 변형량 증가 현상

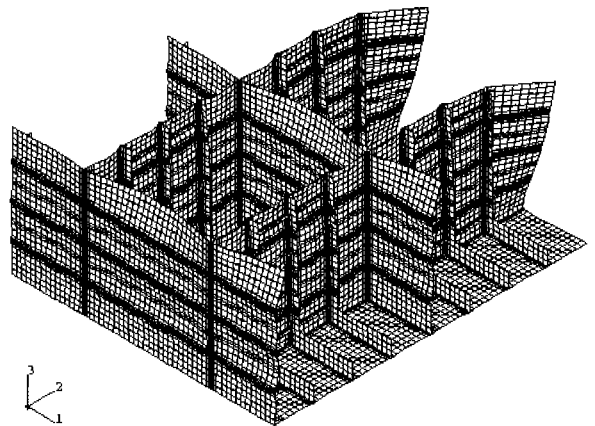


Fig. 7 Simulation result for tank top block model without carling at sub-assembly stage

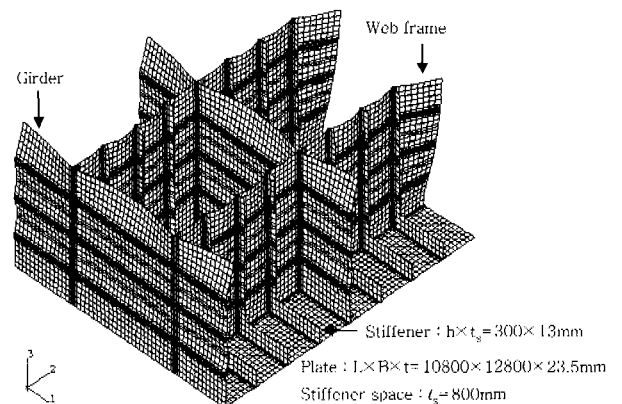


Fig. 8 Simulation result for tank top block model with carlings at sub-assembly stage

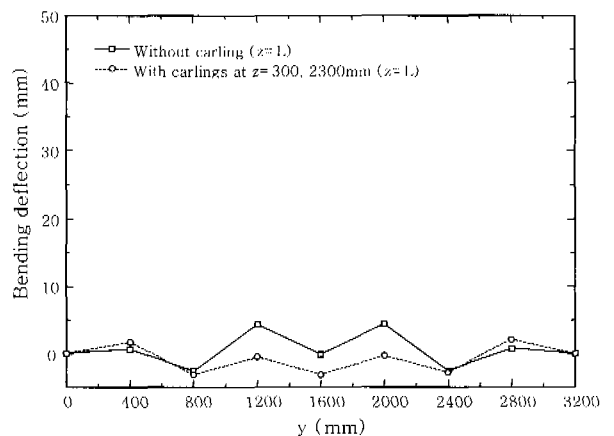
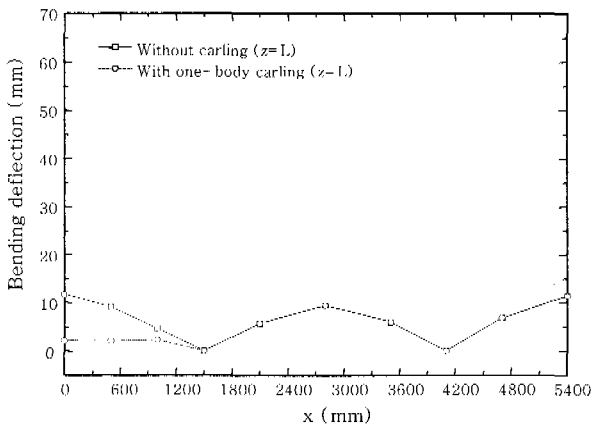
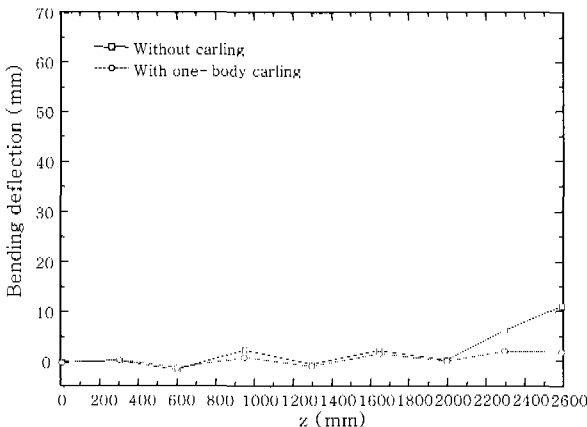


Fig. 9 Simulation result to see the effect of carling for web frame model at grand-assembly stage

이 현저히 방지될 수 있으며, Girder류에 있어서는 Block Joint 작업 시에 상하 방향으로 발생되는 단차 수정 작업에 드는 많은 재작업량이 상당히 줄어들 수 있을 것으로 기대된다.



(a) Longitudinal deformation



(b) Transverse deformation

Fig. 10 Simulation result to see the effect of carling for L-type girder plate model at grand-assembly stage

4. 결 론

본 연구의 목적은 Tank Top 구조의 필릿 용접 시에 유발되는 변형 발생 양상을 정량적으로 규명하는 일인데, 이를 위하여 실험구조물을 대상으로 다양한 수치해석을 수행한 결과, 다음과 같은 몇 가지 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

1) 본 논문에서는 Tank Top 블록을 대상으로 Carling의 부착과 구조설계 변경 등의 변형 방지 효과를 분석하였는데, 그 효과를 살펴보면 다음과 같다. Web Frame류에 있어서는 용접 전의 Carling 부착 시 보강재 사이에서의 변형량은 감소하지만, 주판의 자유단에서의 변형량은 오히려 증가하는 경향을 보이고 있다. 하지만, 소조립 공정 이후의 공정 단계에서 용접 전에 수행하는 취부 작업 시 흔히 발생하는 보강재 사이에서의 변형량 증가 현상은 이전의 공정 단계에서 Carling을 부착함으로써 현저히 방지될 수 있다. Girder Plate의 자유단에서의 각변형 방지는 기존의 설계 구조를 변경하지 않고는 불가능하기 때문에 현재의 설계 구

조를 자유단으로부터 300mm 떨어진 지점에 Vertical Stiffener를 신설하는 구조로 변경시키는 것이 현재 설계 단계에서 용이하게 적용할 수 있는 최선의 변형 방지책으로 여겨지며, 이의 효과는 다음 공정 단계에서 Block Joint 작업시에 상하 방향으로 발생되는 단차 수정 작업에 드는 많은 제작업량을 상당히 줄여줄 수 있을 것으로 기대된다.

2) 본 연구에서는 소조립 단계에서 용접변형이 문제가 되는 평블록의 Carling 부착 위치와 크기를 구체적으로 제시함으로써 지금까지 정성적으로만 밝혀진 Carling의 변형 제어 효과를 정량화하였으며, 향후에는 현업과의 긴밀한 협조를 통해 이상과 같은 실물 계측 실험과 수치해석을 다수 수행하여, 멀지 않은 장래에 정도있는 용접변형 예측법을 구축하고, Carling의 부착과 구조설계 변경 등의 변형 방지 방안을 정량적으로 제시할 것이다.

참 고 문 헌

- Okumoto, Y. and Matsuzaki, S. : Study of Accuracy Control of Hull Structure, *Journal of Ship Production*, **10-1**(1994), 51-58
- Fujita, Y. and Nomoto, T. : Studies on Thermal Elasto-Plastic Problems(1st Report) *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, **Vol. 130** (1972), 183-1911
- Ueda, Y. and Yamakawa, T. : Analysis of Thermal Elastic-Plastic Behavior of Metals during Welding by Finite Element Method, *Journal of the Japanese Welding Society*, **42-6**(1973), 567-577
- Ueda, Y., Kim, Y.C., Yamakita, T. and Bang, H.S. : Applicability of Substituting Plane-deformation Problems for Three-dimensional Thermal Elasto-Plastic Problems, *Transactions of the Japanese Welding Society*, **6-1**(1988), 47-59
- Ueda, Y. et al. : Simulation of Welding Deformation for Accurate Ship Assembling(1st Report), *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, **Vol. 171**(1992), 395-404
- Ueda, Y. et al. : Simulation of Welding Deformation for Accurate Ship Assembling(2nd Report), *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, **Vol. 172**(1992), 559-566
- Kim, S.I. and Lee, J.S. et al. : A Study on the Accuracy Control of Block Assembly in Shipbuilding -- simulation of residual deformation due to fillet welding --, *Proceedings of ICCAS'97*, (1997), 367-381
- 김상일, 조용관, 한종만 : 선체 구조물의 Fillet 용접변형 최소화를 위한 변형 제어법 개발, 한국 MSC 사용자 논문 발표 대회 논문집, (1998), 611-650
- 김상일, 조용관, 박상우 : 간이 해석법을 이용한 평블록 구조의 용접변형 예측 및 제어, 한국 MSC 사용자 논문 발표

대회 논문집(1999), 153-183

10. 김상일: 선체 구조의 용접변형 제어법 개발, 울산대학교 공학박사 학위논문, 1999.
11. Nomoto, T., Ohmori, T., Sutoh, T., Enosawa, M., Aoyama, K. and Saitoh, M.: Development of Simulator for Plate Bending by Line Heating, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 168(1990), 527-535
12. Nomoto, T., Tachechi, S., Shouki, K., Aoyama, K., Enosawa, M. and Saitoh, M.: Development of Simulator for Plate Bending by Line Heating considering Inplane Shrinkage, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 170 (1991), 599-607
13. 이주성, 김상일, 오석진 : 선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템(I), 대한조선학회논문집, 31-4 (1994) 139-146
14. 이주성 : 선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템 (II), 대한조선학회논문집, 33-3(1996), 81-93
15. Nomoto, T., Aoyama, K. and Tachechi, S.: Basic Studies on Accuracy Management System for Shipbuilding, Proceedings of ICCAS'97,(1997) 323-338.
16. 김상일, 이주성 : 펠릿 이음의 용접변형에 대한 간이 예측법 개발, 대한조선학회 춘계학술대회논문집,(1996) 265-270.
17. 김상일, 조용관, 이주성 : 간이 해석법을 이용한 평블록의 용접변형 예측, 대한조선학회 춘계학술대회논문집, (1996) 271-276
18. Lee, J.S., : A Study on the Production-oriented Structural Design Information System of Panel Blocks, Proceedings of PRADS '98, (1998) 359-364



- 김상일(金常一)
- 1970년생
- 대우조선해양(주) 기술연구소
- 용접변형/응력, 강도해석
- e-mail: sikim2@dwship.com



- 강중규(姜重圭)
- 1966년생
- 대우조선해양(주) 기술연구소
- 피로파괴, 강도해석
- e-mail: jgkang3@dwship.com



- 한종만(韓鐘晩)
- 1956년생
- 대우조선해양(주) 기술연구소
- 용접야금, 피로파괴
- e-mail: jmhan@dwship.com