

대형 용접구조물의 탄소성 열변형 해석을 위한 용접부의 변형률 경계조건에 관한 연구

하 운 석*†

*삼성중공업 산업기술연구소 용접연구파트

A Study on Weldment Boundary Condition for Elasto-Plastic Thermal Distortion Analysis of Large Welded Structures

Yunsok Ha*†

*Welding Research Part, Samsung Heavy Industries CO., LTD., Geoje 656-710, Korea

†Corresponding author : yunsok.ha@samsung.com

(Received February 14, 2011 ; Revised May 23, 2011 ; Accepted August 18, 2011)

Abstract

A thermal distortion analysis which takes strains directly as boundary conditions removed barrier of analysis time for the evaluation of welding distortion in a large shell structure like ship block. If the FE analysis time is dramatically reduced, the structure modeling time or the input-value calculating time will become a new issue. On the contrary to this, if the calculation time of analysis input-value is dramatically reduced and its results also are more meaningful, a little longer analysis time could be affirmative. In this study, instead of using inherent strain based on elastic analysis, a thermal strain based on elasto-plastic analysis is used as the boundary condition of weldments in order to evaluate the welding distortion. Here, the thermal strain at the weldment was established by using a stress-strain curve established from the test results. It is possible to automatically recognize the modeling induced-stiffness in the shrinkage direction of welded or heated region. The validity of elasto-plastic thermal distortion analysis was verified through the experiment results with various welding sequence.

Key Words : Thermal distortion analysis, SDB Method, Stress-Strain curve, Elasto-Plastic, FEM

1. 서 론

선체구조물과 같은 대형 셸 구조물은 대부분 용접으로 조립하고, 이 과정에서는 반드시 잔류 열변형이 발생한다. 이러한 용접 열변형을 제어하기 위하여, 사전에 추가적인 공수없이 할 수 있는 것으로는 경험에 기반하여 용접순서나 용접방향을 변경하는 것이 있다. 그런데 이러한 대처는 몇 가지 제약이 존재한다.

우선, 열변형에 기인한 잔류변형은 해당 부위에 내재된 잔류응력과 꼭 비례하는 것은 아니라는 것에서 기인한 제약이 존재한다. 고온의 열이력을 경험한 강재는 탄소성 이력 및 소재 변화를 겪었기 때문에, 최종 상태

의 잔류 변형을 강제로 없앤 경우에도 용접부에는 (인장)응력이 남아 있을 수 있고, 반대로 잔류응력을 해소시킨 경우에는 역으로 변형이 남아있을 수 있다. 선박 생산기술에 입각한 대부분의 소조립 지도서는 일반적으로 잔류응력의 수준을 낮추는 것을 목적으로 용접방향과 순서를 기술한다.

그 다음으로는 선체블록의 특징에 기인한 제약이 있다. 일단 중조립 블록수준의 크기가 되면, 각 블록들은 임의의 형상이라고 볼 수 있고, 정도 관리의 규정을 받는 위치와 항목이 각 블록 별로 매우 다르다. 해당 건조 선박이 시리즈 선이라 하더라도, 이전 블록의 조립 경험에 의거하여, 용접부 개선, 블록 재분할에 따른 용접선 위치 및 용접 시 구속 위치 등은 쉽게 변경된다.

따라서 선체 블록 단위에서 용접 열변형을 저감하는 개별 순서가 경험적으로 자료구조화 되는 것은 매우 어렵고, 그 효율도 극히 낮을 것으로 예상할 수 있다.

본 연구는 선체블록 규모의 대형 용접구조물에 대하여, 조립에 필요한 다수의 용접순간의 순서 변화가 일으키는 변형차이를 해석적으로 확인하고, 또한 그것을 제어할 목적의 탄소성 해석을 빠르게 구현할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 이미 대형구조물에 대한 열변형 해석시간의 절감은 쉘 요소를 사용하는 고유변형률 기반 등가하중법¹⁾으로 해결이 된 바 있다. 최근에는 가상의 등가하중대신 가상의 물성치와 온도를 사용하는 변형률 경계법(SDB Method)²⁾으로 인하여 하중모델링 시간마저 대폭 단축된 바 있다.

이에 본 연구는 변형률 경계법을 기반으로 하되, 상용코드에서 탄성해석 모드로는 내부 소성 응력 및 변형률에 기인한 이전 step의 결과에 대한 영향을 고려하지 못하는 점을 개선하고자 하였다. 변형률 경계법에서의 고유변형률 입력인자는 상용 FEM 코드의 탄성해석 모드를 기준으로 개발되어 있었던 만큼, 본 연구는 탄소성 해석 모드에서의 합리적 입력인자를 정의하는 데에 초점을 두었다. 탄소성 해석시에 필요한 물성치의 응력-변형률 곡선은 용접재의 Mill Certificate의 정보를 바탕으로 탄성-소성체로 용접부 재료를 가정한 모델을 사용하였다.

본 연구를 통하여, 일단 복수의 동일한 용접구조물에 대하여 변형률 경계법을 사용하여 열변형을 해석할 시에, 각 구조물의 용접 순서를 다르게 하여 최종 열변형이 상이하게 만들어 지는 상황을 해석으로 모사하였다. 또한 그러한 결과들간의 방향이 실제와 유사한 지를 평가하기 위하여, 동일한 형상을 가진 6개의 구조물을 각기 다른 순서로 용접하는 실험을 통하여, 제안된 해석법의 결과들의 변형정도 차이가 실험간의 순서와 매우 유사함을 보였다.

2. 고유변형률 기반의 탄성해석

식 (1)²⁾을 통하여 본 연구에서 기반 해석법으로 선택한 변형률 경계법을 설명하고자 한다.

$$\alpha = \epsilon^*$$

$$T_{top} = \frac{1}{B \times h} \cdot \int_{\frac{h}{2}}^h b(z) \times \left(1 - \frac{4}{h} \times z\right) dz$$

$$T_{bottom} = \frac{1}{B \times h} \cdot \int_{\frac{h}{2}}^h b(z) \times \left(1 + \frac{4}{h} \times z\right) dz \quad (1)$$

Where, ϵ^* : 고유변형률

z : 중립축으로부터의 두께방향 좌표

- a : 용접부 요소의 등가 열팽창계수
- T_{top} : 절점에서의 가상의 상부 온도
- T_{bottom} : 절점에서의 가상의 하부 온도
- h : 판두께
- b : 용접부 단면 열영향부의 폭
- B : 용접부 요소의 크기

용접 열변형을 해석으로 구현하기 위한 등가하중법은 식(1)의 고유변형률을 용접부 단면에 대하여 적분하여 등가의 수축력과 모멘트를 구하여 상용 FEM 코드(본 연구에서는 Msc. Marc2008r1을 사용)의 구조해석에 적용한다. 변형률 경계법은 이 고유변형률을 가상의 응수의 열팽창계수로 치환하고, 용접부 단면이 갖는 형상을 모사하는 가상의 온도를 설정하여, 두 스칼라 입력값의 조합으로 용접부 수축하중이 모사된다.

$$\epsilon^* = \epsilon^{Total} - \epsilon^{elastic}$$

$$= \epsilon^{thermal} + \epsilon^{phase} + \epsilon^{plastic} \quad (2)$$

기술한 방법론들은 FEM내에서는 열에너지의 출입을 다루지 않고, 가상 하중이나 가상 온도의 경계조건만으로 해석을 수행함으로써 열변형 해석 속도의 증가를 꾀하는 것이고, 해석해의 정밀도는 입력인자의 고유변형률이 이미 결정하고 있다. Fig. 1과 식 (2)를 통하여 고유변형률의 정의 및 용접부의 최종 냉각상태에서 응력과 변형률을 도시하였다. Fig. 1에서 실선 응력축의 위치는 용접이 수행되기 전을 기준으로 한다. 고온 액적의 용접재가 식는 과정은 해당 원점에서 응력-변형률 선도가 항복응력과 탄성계수를 회복하면서 음의 방향으로 열변형률만큼 평행 이동하는 것으로 도시할 수 있다. 용접부를 주변부가 구속하지 않는다면 Fig. 1의 점선 선도와 같이 열변형률만큼 용접부가 계속적으로 수축할 것이지만, 주변부의 구속을 받는 용접부는 주변부

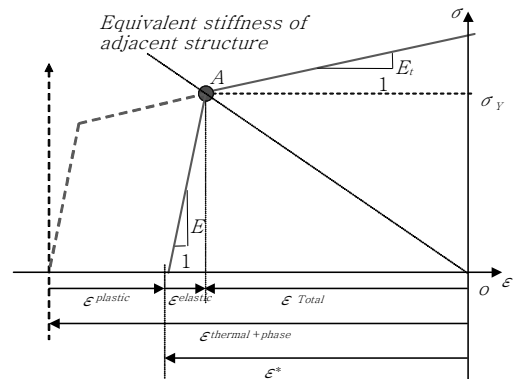


Fig. 1 Inherent strain in stress-strain curve

와 응력평형을 이루는 선에서 평행이동이 멈추게 된다. 실제 열변형률과 선도의 시작점 차이가 소성변형률로 잔류하게 되고, 용접전 응력축의 위치 대비 최종 상태의 선도의 시작점의 위치가 바로 고유변형률이다.

고유변형률 기반의 탄성해석은 바로 이 고유변형률을 입력값으로 사용하고, 해석시 용접구조물의 모델링 자체가 용접부를 구속하는 주변부가 되도록 하여, 용접 후 최종 상태인 A점(Fig. 1)의 전(全)변형률이 해석결과로서 도출되도록 하는 것이다. 고유변형률의 최신 이론은 상변태³⁾, 하드닝⁴⁾ 등을 모두 다루고 있으나, 주변부와의 강성비⁵⁾를 먼저 알고 있어야 한다는 약점은 극복되지 못하고 있다. 고유변형률 계산에 반영되는 상변태는 크게 냉각속도로부터 최종 상분율을 추정하는 과정과 결정립 성장과정⁶⁾으로부터 마르텐사이트의 항복응력을 추정하는 과정의 두 부분을 다룬다.

3. 열변형률 기반의 탄소성해석

대부분의 용접에서 주변부는 용접부를 상당히 강하게 구속하지만 맞대기 용접과 같이 주변부 구속이 거의 없는 경우도 충분히 존재한다. 따라서 강성비는 가능한 정확히 반영되는 것이 적절하겠으나 이를 고유변형률 기반의 탄성해석으로 구현하려고 하면 용접부 요소별로, 그리고 하나의 요소에서도 이방성 요소를 사용하여 방향별로 다른 값을 적용하여야 한다. 이는 원칙적으로 열변형률만큼의 수축을 유도하는 탄소성 모드로 해석하면 재료와 모델링이 이원화되어 자동적으로 해결된다. 지금까지 열변형 해석에서의 많은 진보가 해석 시간을 단축하는 부분에서 이루어진 만큼 탄소성 모드에서의 해석은 수렴이나 시간에서 부정적 이미지를 보일 수 있다. 그러나 변형률 경계법의 도입으로 초 단위의 해석이 가능해진 상태에서는 이러한 시도가 의미 있다고 볼 수 있다.

Fig. 2에서 볼 수 있는 것처럼, 실제 (b)와 같이 탄소성해석에서 구현되어야 할 열변형 해석이 탄성해석에서도 같은 값이 도출되도록 하기 위하여 (a)의 고유변형률이 잘 설계되어야 하는 것으로 이해될 수 있다. Fig. 2의 (a), (b) 모두에서 모사된 점선으로 도시한 주변부의 상대적 강성은 실제 모델링이 그 자체로서 구현하는 것으로서, 위치마다 바뀌는 값이다. 대부분의 용접은 Fig. 2 (b)와 같이 대부분 인장응력이 내재된 소성상태이므로, 주변부 강성에 의하여 잔류변형은 거의 비례한다. (완전 소성모델에서는 정비례한다.) 그런데 하나의 고유변형률 값으로 해석된 탄성해석에서는 주변부 강성의 큰 변화에도 육안으로 관찰되는 전변형률은 별로 변하지 않는다. 이것은 Fig. 2 (a)에서 HAZ

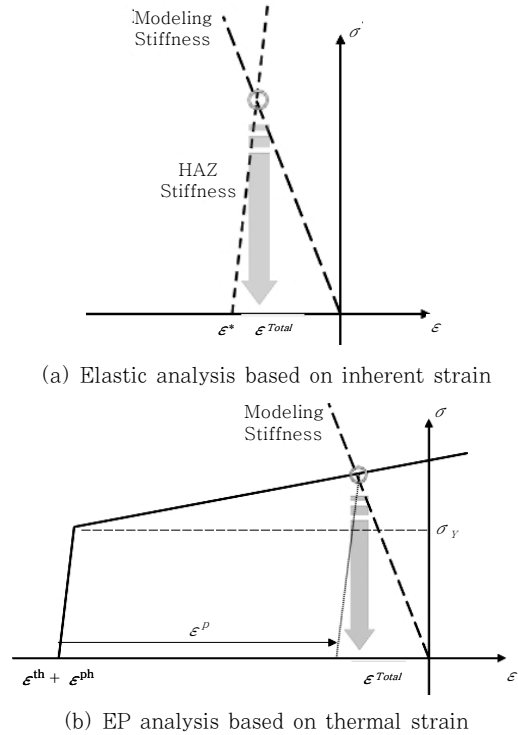


Fig. 2 SDB analysis concepts about input strains

Stiffness(bead 포함)가 GPa단위의 매우 가파른 기울기를 갖고 있는 것으로부터 확인할 수 있다.

탄성해석에 들어가는 물성치 입력정보는 고유변형률과 탄성계수 단 두 가지이다. 그러나 탄소성 해석에서는 더 이상 열영향부를 무한탄성체로 가정하지 않기 때문에 응력-변형률 곡선을 정의하기 위한 몇 가지 정보가 더 필요하다. 이에 대하여 본 연구에서는 입력값으로 지정하여야 할 정보를 네 가지로 지정하여 해석에 사용하였다. 첫번째는 가상의 열팽창계수로 지정되는 열변형률(식 (3))이다. 기존 고유변형률에서 반영하던 상변태는 여기에 반영하였다. 여기에는 최근 그 수요가 늘고 있는 TMCP 강재를 반영하기 위하여 용접재의 열팽창계수에 베이나이트 상에 대한 고려⁶⁾를 포함하고 있다. 상변태를 고려한 필요가 없는 소재의 용접재에 대해서는 Mill Certificate에 제공된 열팽창계수의 값을 참고하거나, 실험을 통하여 열팽창계수를 온도의존성으로 구하여 사용할 수 있다.

$$\epsilon^{thermal} + \epsilon^{phase} = \int_{T_{Max}}^{T_{room}} \alpha^{mod}(T) dT \quad (3)$$

Where, T_{Max} : 용접재의 녹는점
 T_{room} : 용접부 최종 온도
 α^{mod} : 재료의 상변태 부피팽창의 미분값이 추가된 열팽창계수³⁾

두번째는 항복응력이다. 본 연구에서는 용접후의 항복응력을 기술한 용접재의 Mill Certificate에 대해서는 비드부 단면적에 대해서 그 값을 그대로 사용하고, 열영향부에는 최종 상변태 후의 분율을 가중치로 하여 각 상의 항복응력으로부터 합산된 항복응력을 구하여, 다시 비드부와 열영향부의 단면적의 비를 가중치로 하여 이 둘을 합산한 값을 사용하였다. 식(4)에는 상변태에 고려된 상들과 상온부 이하에서의 거동을 파악하기 위한 저온 상태의 추가되는 항복응력을 포함하였다.

$$\sigma_Y(T) = \sigma_{Y\gamma} \cdot x_\gamma + \sigma_{YM} \cdot x_M + \sigma_{YB} \cdot x_B + \sigma_{YF} \cdot x_F + \text{Max}[\frac{100,000}{491+1.8 \cdot T} - 189, 0] \quad (4)$$

Where, $\sigma_{Y\gamma}$: yield stress of γ phase
 x_γ : portion of γ phase
 F : Ferrite
 M : Martensite
 B : Bainite
 γ : Austenite

또한 Mill Certificate가 제공하는 항복응력은 0.2% 신장점에서 정의되므로, 탄성계수는 식 (5)과 같이 지정하였다.

$$E = \frac{\sigma_{YP}}{0.002} \quad (5)$$

마지막으로 소성계수를 정의하기 위하여 연신율과 인장-항복비를 사용(식 (6))하였다.

$$H = \frac{1 - \frac{\sigma_{TS}}{\sigma_{YP}}}{\text{Elongation} - \frac{\sigma_{TS}}{E}} \quad (6)$$

4. 동일 구조물 용접을 통한 검증

본 연구의 목적은 변형을 경계법을 순차적으로 적용하는 경우 실제 이전의 잔류응력장이 반영된 용접순서 별로 다른 결과를 낼 수 있도록 하는 것이다. 본 연구에서는 이를 고려하여, 동일한 형상의 용접구조물 시편을 도출 가능한 모든 용접순서의 가지 수만큼 제작한 후, 마찬가지로 해석과정을 거쳐서 변형의 결과가 좋은 순서대로 나열한 것이 실험과 해석간에 같은 순서를 보이는 지를 확인하려고 하였다.

시편은 Fig. 3과 같이 주판에 4개의 보강구조가 필릿용접으로 구성하되, 보강구조간의 용접도 필릿으로

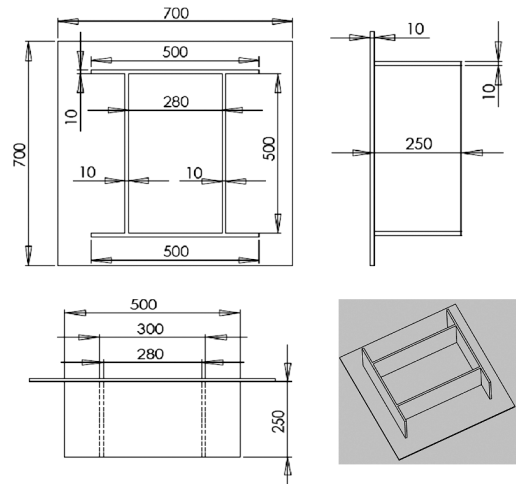


Fig. 3 Specimen design for verification of developed EP analysis

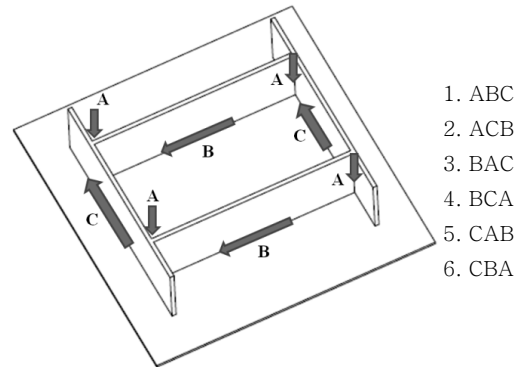


Fig. 4 Workable welding sequence diagram

설계하였다. 맞대기 용접을 배제하여 초기 세팅 오차에 대한 불확정 요소를 최대한 없애려고 하였고, 8곳의 용접처는 세 그룹으로 묶어서 총 6가지(=3!)의 모든 용접순서를 고려하여 가접 상태가 동일한 구조물 6개를 마련하였다. 구조물의 소재로는 SUS304L을 사용하였고, 전 용접선의 각장은 2F (수평자세 Fillet) 부분에는 5.5 ~ 6.0 (mm), 3F (수직자세 Fillet) 부분은 7.5 ~ 8.0 (mm)에 들도록 관리 및 사후 측정으로 확인하였다.

Fig. 4를 통하여 6가지의 가능한 용접순서를 도식화하였고, Fig. 5를 통하여 본 실험에서의 저변형의 기준으로 삼은 지표를 표현하였다. 변형 지표로는 초기 변형에 비해 그 order가 매우 큰 면외변형 위주로만 선정하여, 계측의 오차를 최소화하려고 하였다. 즉, 변형지표를 구성하는 각 향으로 선정된 측정점들의 쌓은 자신들의 놓여있는 평면과 이름이 서로 직교하도록 구성되었다.

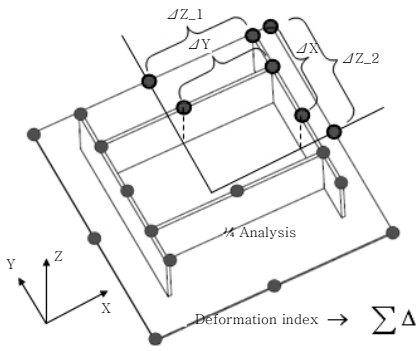


Fig. 5 Deformation index for comparison

Table 1 Recommended welding sequence according to deformation index (mm)

	Experiment		Analysis	
1(best)	BAC	4.61	BAC	7.15
2	ABC	6.81	ABC	7.44
3	CBA	7.60	BCA	7.48
4	CAB	7.62	CBA	7.81
5	BCA	8.69	CAB	7.97
6(Worst)	ACB	9.98	ACB	8.00

6개 시편의 계측은 Indoor GPS시스템 (3 Industrial-Grade Transmitter, 적외선 주파수 780nm class I, 적외선 LED Strobe 주파수 890nm)을 이용하여 3차원 절대좌표를 정밀하게 얻은 뒤, 해당 관심 좌표별로 가공하여 면외편차를 구하였다.

Table 1에 실험에서 드러난 저변형 순서와 해석에서 도출된 저변형 순서를 비교하였다. 각 순서의 이름은 Fig. 4에서 지칭된 용접부를 순서대로 그대로 서술하는 방식으로 지칭하여 직관적으로 각 경우의 용접순서를 인지할 수 있도록 하였다. 결과는 대략 두 가지 방향에서 고찰할 수 있다.

첫번째, 변형지표의 결과값의 정도에 대해서는, 실험 결과는 순서별 변형량의 차이가 큰 편이나 해석 결과는 그 차이가 크지 않다. 그러나 6개 경우의 평균적인 결과는 어느 정도 유사한 것을 확인할 수 있다. 두번째 결과는 매우 고무적이다. 용접순서가 고려됨에 따라 구조물은 단계적으로 내부 잔류 응력 및 소성변형을 그리고 전체 구조물 강성이 조금씩 바뀌는 데 그 민감한 차이에 기인한 시편의 순서들 간의 변형 해석 결과는 실험의 순서와 거의 일치한다. Table 1에서 음영처리된 BCA-경우를 제외한 나머지 5개간의 용접 저변형 순서는 해석결과와 실험결과간의 순서가 동일하다. 특히 가

장 좋은 결과와 나쁜 결과에 대해서는 정확히 예측하였다.

실험결과로서 의미있는 부분은 가접이 완료된 구조물의 경우라도 단지 용접순서 변경에 의해서 변형량의 최소와 최대의 차이는 2배 이상까지 발생하였다는 것이다. 즉, 해석법이 그 결과에 있어서 변형에 대한 정량적인 예측을 정확하게 하지 못했다고 하더라도, 작업의 순서를 결정하는 결과에 대해서는 매우 공신력있는 결과를 주고 있기 때문에, 본 연구결과는 실제적인 변형 제어에 있어서 큰 공헌을 할 수 있는 가능성이 확인된다.

5. 선체 블록 적용 사례

본 연구의 결과는 mm단위의 정도규정을 받는 특수선의 기능성 블록의 세팅 등에 좋은 활용이 예상되었다. Fig. 6에서 파이프 준설선의 크레인 블록(J300)에 적용된 예를 소개하려고 한다. 선체중앙(C.L.)을 중심으로 크레인 블록간 간격의 정도는 10mm 이내(중앙부에서 각 크레인 블록까지 5mm)로 매우 높게 요구된다. Fig. 6에 등장하는 A~D 4곳의 용접부는 용접성을 위하여 모두 같은 방향으로 Groove가 형성되었고, 따라서 블록의 용접이 진행되면 모두 바깥쪽으로 뒤돌아서서 좌우 한 쌍의 크레인 블록간 거리가 벌어지기 쉬울 것으로 예상할 수 있다.

4곳의 용접부는 24(=4!)가지의 용접순서를 만들어 낼 수 있으므로, 이들을 모두 제안한 방법론으로 해석해 본 결과, Fig. 7과 같이 5mm이내의 변형결과를 갖는 용접순서가 도출되었다. 해석은 4절점 쉘요소 약 20,000개의 수준으로 작업된 모델링이 사용되었다. 해석결과의 유용성을 확인하기 위하여, Fig. 8과 같이 용접전 Tack(가접) 상태에서 크레인 중앙부가 선체 중앙으로부터의 거리를 설계값 대비 미리 계측해 두었다.

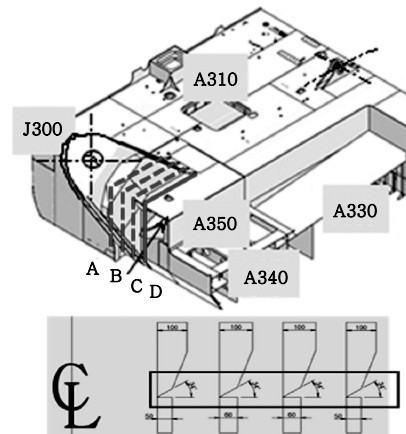


Fig. 6 A Crane Block and its weldments

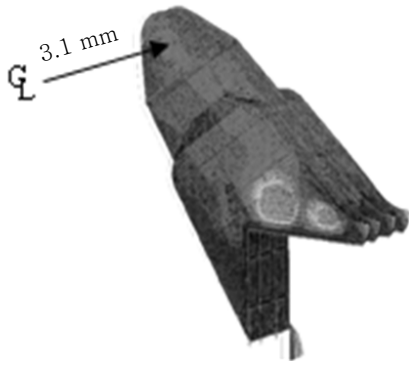


Fig. 7 The minimum distortion result among weldable sequences

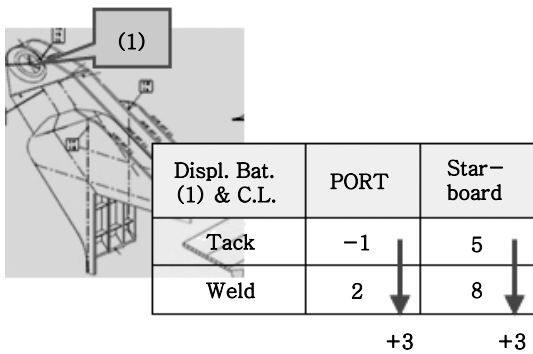


Fig. 8 Check data of measuring point at block (mm)

값이 (+)가 될수록 설계값 대비 선체 중앙에서 멀어지는 것을 의미한다. 해석된 순서대로 건조가 이루어진 후 좌/우 두 블록의 중앙선으로부터의 거리변화는 중앙에서 떨어진 것으로 도출된 해석결과와 좋은 일치를 보이고 있다.

6. 결 론

1) 본 연구를 통하여 빠른 해석 속도를 보장하는 변형률 경계법(SDB법)의 탄소성 모드에서의 해석에 필요한 입력인자를 결정하였다. 입력인자로는, 종래의 탄

성해석용 고유변형률을 대체할 인자로서 상변태를 포함한 열변형률을 사용하였고, 탄소성 물성 특성을 탄소성 체로 가정한 응력-변형률 곡선을 사용하였다.

2) 탄소성 특성의 옳은 반영여부를 확인하기 위하여, 동일 구조물 시편에 대하여 용접순서가 바뀐 실험과 측정이 진행되었고, 열변형 정도에 대한 용접순서는 해석결과와 좋은 일치를 보였다.

3) 마지막으로, 실제 선체블록 해석사례를 소개하여 현업에서 유용한 기술이 될 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

1. Changdoo Jang, Seungil Seo and Daeun Ko : A Study on the Prediction of Deformations of Plates Due to Line Heating Using a Simplified Thermal Elasto-Plastic Analysis, Journal of Ship research, **13-1** (1997), 22-27
2. Yunsok Ha, Sihoon Cho and Taewon Jang : Development of Welding Distortion Analysis Method Using Residual Strain as Boundary Condition, Materials Science Forum, **580~582** (2008), 649-654
3. 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
4. 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
5. 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
6. Yunsok Ha, Jinhyuk Yang, Seokhee Won and Myungsu Yi : Development of Thermal Distortion Analysis Method Based on Inherent Strain for TMCP Steels, Journal of KWJS, **26-3** (2008), 61-66 (in Korean)