

## 블록 리프팅 후 갑판 교정가열의 잔존 효율 연구

하윤석<sup>†\*</sup>, 원석희\*, 이명수\*

삼성중공업 산업기술연구소 용접연구\*

### A Study for Remained Efficiency of Correction Heating after Block Lifting

Yun-sok Ha<sup>†\*</sup>, Seok-hee Won\* and Myung-su Yi\*

SAMSUNG Heavy Industries., CO. LTD. Welding Research Part\*

#### Abstract

The deck plates of ship block is made of thin plates in their construction. A main reason of using thin plates is that deck plates don't need to support large structural loads. Therefore, out-of-plane deformations between stiffeners are frequent in deck blocks. Because these are got right by correction heating, they continuously causes quality problems in the final dock-building process.

According to preceding research, the lifting process by cranes would offset the effect of correction heating. This study finds out the remained efficiency of correction heating when tensional loads are added by a lifting to corrected parts. We used inherent strains in calculating the efficiency, and established the methodology where the positions for carlings are. For getting more accurate positions, besides the structural lifting analysis, welding deformation analysis with upper block and measured data from a serial ship are also referenced.

※Keywords: Correction heating(교정가열), Lifting(리프팅), Inherent Strain(고유변형도), Welding deformation(용접변형), Strain-Stress Curve(응력-변형도 선도), Carling(카링)

#### 1. 서론

선박 건조시 도크 내에서 수정을 필요로 하는 품질 문제는 발생 장소가 도크라는 점 때문에 생산성에 큰 악영향을 미치게 된다.

건조 단계에서 발생하는 품질 문제는 그 범위도 매우 넓고 대부분은 공정상 예기치 못하게 발생한 것들이 대부분이지만, 갑판에서 발생한 면외변형과 관련한 문제는 매우 오래되고도 흔하게 발생하는 문제이다.

제시한 면외변형의 양상을 두 가지로 분류 (Fig. 1)한다면, 계속적으로 아래로 꺼진 형상만 반복적으로 나타나는 경우(a)와 인접한 영

<sup>†</sup> 교신저자 : yunsok.ha@samsung.com, 055-630-4715

역에서 요철이 번갈아가면서 발생하는 경우 (b)로 구분할 수 있다.

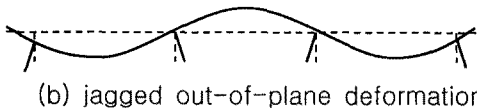
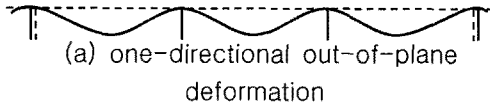
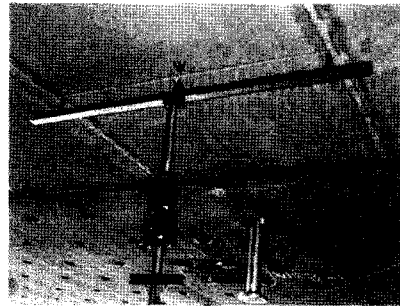


Fig. 1 Two kinds of out-of-plane deformation modes

후자는 블록의 형상/지지조건/갑판-대기 온도차 등에 의한 다분히 구조적이고 개별적인 문제이고, 전자는 갑판 이면의 용접부 수축에 의한 문제이며 이 두 모드는 항상 혼재한다. 이 중 갑판 이면부 용접부 수축에 의한 면외 변형은 결정론적으로 예측이 가능한 부분이라 현업에서는 사전 혹은 사후에 이를 교정한다.

사후 곡직을 염두에 두고 다시 갑판부 면외 변형을 관리의 측면에서 두 가지로 분류하면, 대조단계에서 블록별 체크시트로 관리(Fig. 2)되어 갑판 베이스로 곡직되는 부분과 선행 건조 시 용접선에 의하여 변형하는 즉, 대조 단계의 체크시트에 누락될 수밖에 없어서 도크 내에서 곡직 하는 부분으로 나눌 수 있다. 전자와 같이 대조에서 곡직이 이뤄지는 경우는 대조단계의 면외변형 정도관리 기준까지 작업된다. 이 값은 보통 도크내의 기준보다 보통 2mm 정도 더 엄격한 값이다. 그렇다면 도크에서는 후자와 같이 추가되는 새로운 용접에 의한 변형만 존재해야 하지만 실제로는 그렇지 않다. 많은 경우, 규정을 지킨 곡직이 이루어진 곳에서 다시 면외변형이 재발하고 있고, 이러한 원인을 분석하기 위하여 대조 이후 단계별 변형량의 추이를 측정할 선행 연구들이 존재(Jang et al. 2002)한다.



(a) Measuring out-of-plane deformation

(b) Check sheet (per block)

Fig. 2 Deformation control by measuring & checking

본 연구에서는 대조단계와 탑재단계 사이에 존재하는 공정인 블록 리프팅에 의한 응력 분포가 대조 단계에서 이루어진 곡직의 효율을 떨어뜨릴 수 있는 가능성을 고유변형도를 기반으로 하여 파악하였다. 블록 리프팅에 필요한 러그의 배치도가 작성이 되면 갑판 내에서 응력 분포 해석이 가능하므로, 이를 바탕으로 곡직의 효율이 매우 저하될 것이라고 판단되는 곳은 사전에 보강재가 시공되어 갑판의 면외변형을 영구히 그리고 경제적으로 방지할 수 있을 것이다.

## 2. 교정가열부의 응력-변화도 선도

일반적으로 갑판은 다른 부분에 비해 설계적인 의미의 구조적 하중을 크게 담당하지 않는다. 따라서 갑판부가 존재하는 선체 블록은 그 블록 내에서 보강재를 제외하면 갑판의 두께가 가장 얇게 설계되기 쉽다. 이러한 경향은 엔진룸 블록처럼 의장하중이 큰 곳에서 잘 나타나고, 서론에서 언급한 바와 같이 두 가지로 분류될 수 있는 면외변형이 쉽게 발생한다. 이와 같은 변형들은 주로 열을 가함으로써 수정되며, 이러한 작업들은 교정가열 혹은 곡직이라고 부른다. 교정가열은 두 경우에 대해 모두 사용(Fig. 3)이 가능한데, 요철과 같은 변형에 대해서는 P.E.이후(도크 작업 포함)에 면내 곡직이 실시되고, 보강재간 연속적인 처짐변형과 같은 경우에는 용접부 이면을 선곡직한다. 후자의 경우는 대조단계에서 이뤄지므로 도크에 들어가기 전 변형을 제어하는 성격이 강하며, 본 연구는 이러한 선곡직을 대상으로 삼는다.



(a) Heating between locations of frames



(b) Heating at the opposite sites of frames

Fig. 3 Types of correction heating  
(straightening)

블록의 갑판부분도 그 이면에는 예외 없이 종방향/횡방향의 보강재가 용접되고, 이러한 필렛 용접부의 각장은 대체로 웹두께의 지배를 받는다. 일반적인 선체블록에서 종방향 보강재(longitudinal member)의 두께는 12mm 안팎에서 크게 변하지 않고 따라서 대부분의 경우 설계 각장은 7mm이며, 용접 작업 후 측정된 실제 각장의 평균값은 약 8~9mm 내에 존재한다. 교정가열중 선곡직은 이와 같은 용접부 이면의 수축에 대응하고자 실시되며, 갑판 중립축을 기준으로 용접부 수축의 반대편에 동일한 효과를 주려고 하는 것이다. 본 연구에서는 용접부의 수축에 의한 변형은 영구적인 것이라고 가정하고 그에 대응하는 가열에 대해서만 생각하였다. 리프팅 하중이 적용되는 러그는 선곡직이 이루어지는 면에 부착되기 때문에 이러한 가정은 문제를 단순화하여 접근이 용이하도록 만들어 줄 것이다.

교정가열에 의해 열수축이 일어나는 단면의 형상(Fig. 4) 및 이러한 경우의 응력-변형도 선도(Fig. 5)(Kim et al. 2006)를 도시하였다. 열영향부가 주변의 구속을 받고 있지 않다면 Fig. 5의 Thermal Strain(Phase Strain 포함)만큼 지속적인 수축을 유발해야 할 것이나, 실제로는 수축부의 항복응력이 주변부의 강성에 저항하지 못할 정도가 되면 추가적인 수축, 즉 육안으로 관찰되는 추가적인 변형(Fig. 5의 Total strain)은 재료의 소성계수에 지배를 받아 매우 제한적으로 성장(Ha et al. 2007)하게 된다.

탄성 및 소성변형도는 응력-변형도 곡선내에서 외부와의 힘의 평형에 의하여 움직이지만, Hook's law의 지배를 받지 않는 열변형도와 상변태 변형도는 곡선 자체를 평행이동시켜서 현재 상태를 기술(Ha and Jang 2007)하면 된다. 재료는 고온에서 항복응력 및 탄성계수가 거의 '0'에 수렴하므로 온도상승시 재료가 어떤 경로를 거치더라도 HAZ가 발생하는 영역에서는 최고도달온도에서 상태점 A(Fig. 5)가 원점으로 회귀한다. 따라서

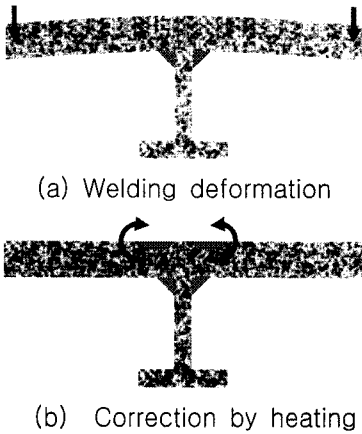


Fig. 4 Principle of correction heating

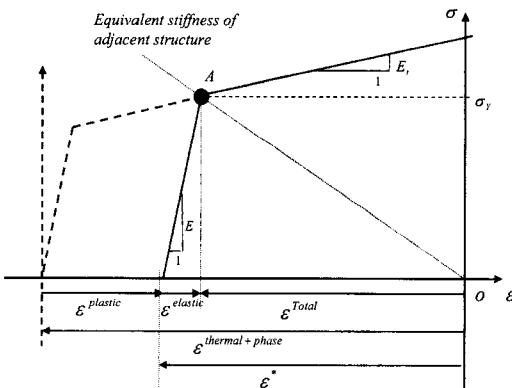


Fig. 5 Stress-Strain curve of heated region within structure

최종 상온까지 다시 냉각되었을 때 열변형도로 기술될 수 있는 양은 '0'이 아니며 여기에 모상으로 회귀하지 않고 변태된 상들의 부피변화까지 고려하면 더욱 그러하다. 열변형도로 표현된 곳에서 점선으로 도시한 새로운 응력축이 탄성변형도와 소성변형도를 기술하는 기준이 되어야 하지만, 구조물의 열변형을 다루는 기존의 대부분 연구는 초기상태를 기준으로 변형을 서술하므로 총변형도를 나타내는 화살표는 초기 강판 상태를 기준으로 응(수축)의 방향을 가리키고 있다. 여기서 고유변형도의 정의와 Fig. 5에서의 물리적 의미를 확인해 보면 바로 응력-변형도 곡선의

원점이 강판의 초기 상태를 기준으로 한 축상에서 변형도 축과 만나는 점임을 알 수 있으며, 이는 고유변형도의 정의(식 (1))(Ueda et al. 1994) 두 가지 중 어느 것과도 일치함을 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

$$\epsilon^* = \begin{cases} \epsilon^{Total} - \epsilon^{elastic} & (\text{yielding}) \\ \epsilon^{thermal+phase} + \epsilon^{plastic} & (\text{no yielding}) \end{cases} \quad (1)$$

고유변형도를 입력으로 하는 등가의 탄성 해석(Seo 2004)(Ha 2008)을 수행하면 Fig. 5에서 등가의 주변부 강성이라고 도시된 부분은 FEM 모델링이 그 자체로 자동 반영되어, 해석 결과로는 총변형도 기반의 변형량이 나오게 된다.

### 3. 교정가열부에 작용된 인장력

Fig. 5에 현 상태에서부터 실선으로 처리된 좌우 영역을 관찰하면, 현재(점 A)를 기준으로 압축력이 작용할 경우에는 곡직부는 탄성 영역에 들어가지만, 만일 인장력이 작용하면 소성영역으로의 진행이 계속되어 인장력이 제거된 후 다시 현 상태로 복귀할 수 없음을 확인할 수 있다. 특히 인장력이 작용된 후 다시 제하된 상태를 Fig. 6에 도시하였다. 이 원리는 주판에 론지용접 후 혹은 T-Bar 용접 후 이 변형을 펴기 위하여 Roll Forming(Han et al. 2007)을 하는 것과 동일한 원리이다.

Fig. 6의 A점은 Fig. 5와 동일한 점이다. 이 점은 응력축으로부터의 거리가 바로 변형도 축의 좌표이므로 곡직 효과를 나타낸다고 할 수 있다. 이 점은 어떤 인장력의 부하에 의하여 점 B로 이동하였다가, 제하에 의하여 점 C로 이동된다. 작도시 주의 할 것은 곡직부는 무한 탄성체로 가정된 주변부와 맞닿아 있는 상태이므로 힘의 평형에 의해 점 A보다 낮은 위치에 존재한다. 그런데 Tangential Modulus는 매우 작은 값이므로 곡직효과를 나타내는 점 C와 응력축과의 거리는 점 A에

서의 그것에 비해 많이 짧아져 있다. 우리가 점 B의 응력값이 적절한 선까지는 인장한도를 넘지 않는다고 가정하면, 식 (2)와 같이 곡직효과를 완전히 무위로 돌릴 수 있는 인장응력값을 계산할 수 있다.

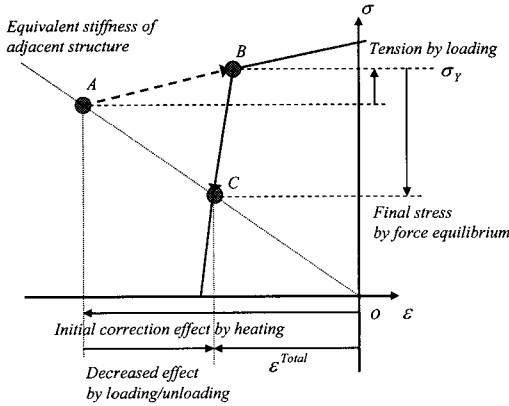


Fig. 6 Correction heating effect after loading/unloading

$$\Delta\sigma|_{\epsilon_C^{Total}=0} = -\epsilon_A^* \times \frac{E \cdot E_t}{E - E_t} = -\epsilon_A^* \times H \quad (2)$$

$H : \text{Hardening Coefficient [N/m}^2]$

이러한 프로세스는 선체 블록에 있어서 바로 리프팅시에 발생하게 된다. 리프팅시 발생하는 갑판부의 응력은 FEM 모델링과 러그배치도 만으로 해석이 가능하다. 교정가열선에 수직인 방향의 응력을 결과로 얻으면 식 (3)에 의하여 역으로 교정효율이 얼마나 감소할지를 미리 알 수 있다. 이를 효율로 표현하면 식 (4)와 같다. 식 (4)를 통해 물성치인 소성계수 H를 상수로 가정하면 곡직 잔존 효율은 리프팅시 곡직부에 부가된 응력에 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

$$\epsilon_C^{Total} = \left(1 - \frac{\Delta\sigma}{H \cdot \epsilon_A^*}\right) \times \left(\frac{\sigma_Y}{E} + \epsilon_A^*\right) \quad (3)$$

$$\eta_{Heating} = \frac{\epsilon_C^{Total}}{\epsilon_A^*} = \left(1 - \frac{\Delta\sigma}{H \cdot \epsilon_A^*}\right) \quad (4)$$

$(0 \leq \Delta\sigma \leq H \cdot \epsilon_A^*)$

#### 4. 강종별 한계 인장응력 계산 예

식 (2)를 이용하여 특정한 가열 조건을 가정한 후 냉각 형태에 따라 곡직효율이 '0'으로 떨어지는 임계 응력을 계산할 수 있다. Table 1을 통해 선급 고장력강들에 대해서 이러한 계산의 한 예를 보였다. 동일한 강종에서도 Mill Certificate내의 화학성분 및 역학적 물성치가 어느 정도 차이를 보이므로 해석 대상의 Mill Certificate를 대상으로 해당 계산을 수행하는 것이 가장 좋을 것이다. 단, 제강법에 따라서는 같은 강종이라도 열변형 부위가 확연히 다른 성질을 보이므로 Normalize강재(N)와 TMCP강재(TM)는 구분하였다. 항복 이후 접선계수(Et)는 식 (5)를 따라 Mill Certificate로부터 계산하였으며, 전

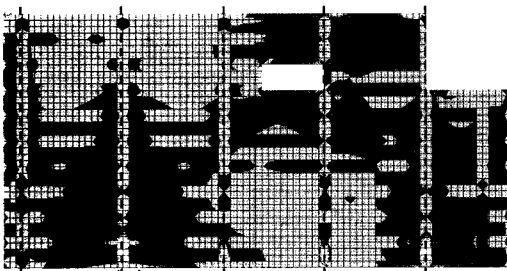
Table 1 Critical stress (Heating rate = 75 °C/s; Max. Temp. = 1,061 °C; Heated depth = 8.7 mm; CR → Cooling rate (°C/s))

			CR = 20	CR = 100
AH	32	N	3.55	3.60
		TM	2.54	2.56
	36	N	5.10	5.20
		TM	2.12	2.14
DH	32	N	3.55	3.61
		TM	2.46	2.49
	36	N	5.10	5.20
		TM	2.12	2.14
EH	32	N	3.55	3.61
		TM	2.46	2.49
	36	N	4.90	5.00
		TM	2.12	2.14
FH	32	N	4.08	4.13
		TM	3.00	3.03
	36	N	5.15	5.21
		TM	2.29	2.31

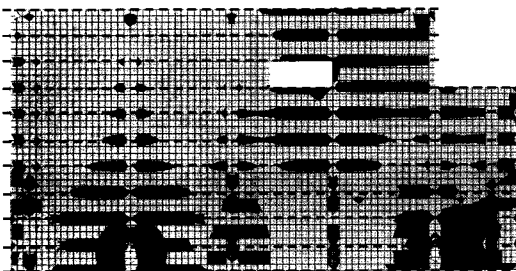
체적인 고유변형도의 계산은 Ha et al.(2008)을 따랐다.

### 5. 갑판의 곡직 잔존 효율해석 예

Fig. 7에 E/R의 한 갑판블록의 리프팅시의 응력 해석결과를 도시하였다. 그림의 좌우방향 이 1번 이고, 이 때 (a)는 이면부 Transversal frame의 용접변형을 제어하는 곡직 효과를 나타내기 위해  $\sigma_{11}$ 을 나타내었고, (b)는 Longitudinal 방향의 효과를 위하여  $\sigma_{22}$ 를 나타낸 것이다. 각기 점선으로 선곡직 위치(이면부 용접이 되어 있는 곳)를 도시하였다. 일반적인 상용 FEM 코드는 해석 결과 화면을 출력할 때 결과의 최대/최소값을 사용자가 지정할 수 있는 기능을 갖추고 있다. 이 때 최소값을 '0'으로 최대값을 식 (2)(Table. 1)로 지정하면, 효율은 식(4)와 같이 이 구간에서 선형적으로 변하는 것을 구하였으므로 리프팅 해석의 갑판 그래픽 출력결과를 바로



(a) The result of  $\sigma_{11}$



(b) The result of  $\sigma_{22}$

Fig. 7 Stress results from a lifting analysis

곡직의 잔존효율을 나타내게 된다. Fig. 7의 명암은 가장 밝은 곳에서 잔존 효율 0%, 가장 어두운 곳에서 잔존 효율 100%를 나타낸다. 경험적으로 도크 내 갑판의 요철 면외 변형이 다시금 자주 발생하는 곳이 러그 주변, 탑재 seam 주변, Hole 주변 및 과대 Frame 구간으로 알려져 있는데, 이 해석결과는 이러한 경험적 사실과 매우 유사함을 알 수 있다.

### 6. 제어대책

곡직 효과가 풀림으로써 변형이 재발될 수 있다면, 이제는 효과적인 제어 방법을 고려해야만 한다. 이 부분은 관리와 설계 두 부분으로 요약된다. 그런데 이러한 계산이 수행되었다고 해서 관리적인 측면에서 현재의 곡직을 계산 결과에 근거하여 더 증가하라고 할 수는 없다. 이는 실제 현업의 공정에서 공기(工期)의 문제가 있으므로, 정상적인 곡직과정도 종종 누락됨을 생각할 때 매우 비현실적이다. 또한 본 연구에서 다루지 않은 추가적인 열 투입에 의한 가열 종방향으로의 열적 수축 좌굴등을 고려하면 더욱이 그러하다.

설계적인 측면에서 제어를 다룬다면, 국부적으로 바꿀 수 없는 판두께보다는 Carling 등의 소형 보강재를 예상되는 면외변형부 이면에 설계하여 원천적으로 변형이 발생하지 않게 할 수 있다. 그런데 잔존효율이 작게 해석된 곳마다 보강재를 새로 설계하기에는 갑판이 존재하는 선체 블록이 매우 많아서, 보강재의 숫자는 쉽게 수백개 이상을 넘어서게 된다. 따라서 교집합과 차집합의 원리로 이 숫자를 줄일 수 있다.

우선 시리즈선일 경우 설계가 동일하고 블록의 제작 진행과정이 대부분 유사하리라고 가정하면, Fig. 8과 같이 1호선의 면외변형 check sheet(도크내 측정자료가 포함된)로부터 변형기준이 넘은 곳과 곡직잔존효율 저하 위치의 교집합을 추릴 수 있다. 이는 결국 변형이 생기지 않아 선곡직도 발생하지 않을

곳에 설계단계에서 보강재를 설치할 필요가 없다는 것을 뜻한다. 다음으로 블록위에 블록이 계속 얹혀가는 E/R의 경우 그 갑판 상부에 새로운 용접이 추가된다. 이 용접은 아래로 처진 면외변형을 위로 들어올리는 역할(Jang et al., 2002)을 하므로 현재 변형이 발생된 부위는 자동 사후 제어가 되는 효과가 있다. 이 과정은 블록 단위의 용접변형 해석을 통해, 변형이 제어되는 위치를 Fig. 9(Ha 2008)와 같이 찾을 수 있고, 이 위치를 기 언급한 교집합 영역에 다시 차집합으로 제하면 최종 보강재 설계 위치를 결정할 수 있다.

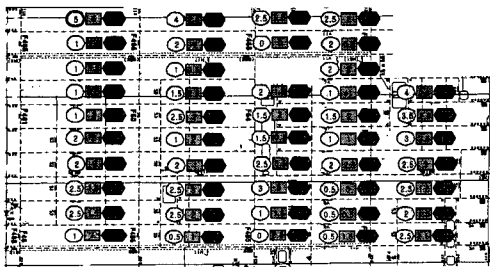


Fig. 8 An example of check sheet (Fig. 7)

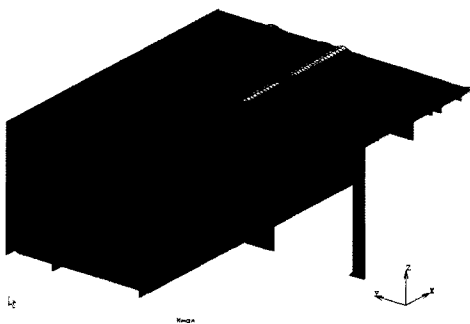


Fig. 9 A deformation result of welding simulation at a ship block

Fig. 10에는 이 과정을 거쳐 실제 보강재 추가 설계가 실시된 E/R 갑판의 한 예를 보았다.

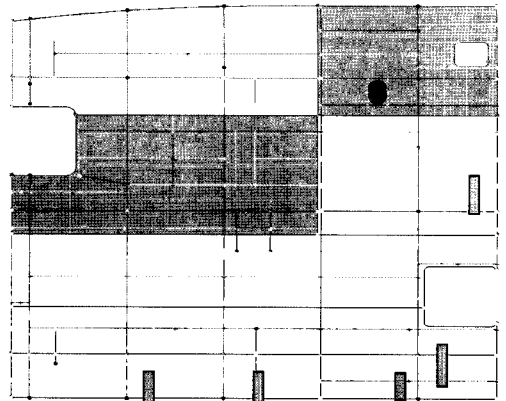


Fig. 10 Final recommended points of carling

### 7. 결론

본 연구에서는 선체 블록 갑판부의 선형 곡직부가 도크 내에서 변형이 재발생하는 것에 주목하고, 리프팅으로 인한 인장응력의 발생과 소실의 과정을 그러한 현상의 주요 근거로 지목하여 원인 분석 및 곡직의 잔존 효율 계산법을 개발하였다. 이러한 결과는 기존의 계측자료 및 블록간 용접변형 해석 자료와 융합하여, 설계 단계에서부터 칼링 등 보강재의 적절한 위치를 설계자가 결정하는데 대하여 도움을 줄 수 있다.

### 참 고 문 헌

- C. D. Jang, G. J. Yoon, O. H. Kim, M. C. Yoon, J. M. Kang and K. H. Yoo, 2002, "An Approach to the Analysis of the Large Deformation of Deck Structures of Engine Room Block at Erection Stage," Proc. of Annual Spring Meeting, SNAK, Pusan, Korea, pp. 301-304 (in Korean)
- J. T. Kim, Y. S. Ha, and C. D. Jang, 2006, "Analysis of Post Weld Deformation at HAZ by External Forces Based on Inherent Strain," Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 2, pp. 220-227 (in Korean)

- Y. S. Ha, C. D. Jang, J. T. Kim, and H. S. Mun, 2007, "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, Vol. 8, No. 4, pp. 56-62
- Y. S. Ha, and C. D. Jang, 2007, "An Improved Inherent Strain Analysis for Plate Bending by Line Heating Considering Phase Transformation of Steel," International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 139-144
- Y. Ueda, H. Murakawa, A. M. Rashwan, Y. Okumoto, and R. Kamichika, 1994, "Development of Computer-Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heatnig (Report 1)-Relation Between Final Form of Plate and Inherent Strain," Journal of Ship Production, Vol. 10, No. 1, pp. 59-67
- S. I. Seo, 2004, "Calculation of Welding Distortions by Simplified Thermal Elasto-plastic Analysis," Journal of Ship and Ocean Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 40 - 49
- M. S. Han, I. S. Han, and Y. S. Han, 2007, "Prediction of Longitudinal Welding distortion and Mechanical Straightening Parameter of Welded T-section Built-up Beams," International Welding and Joining Conference-Korea 2007, Seoul, Korea, pp. 490-491 (in Korean)
- Y. S. Ha, 2008, "Development of Thermal Distortion Analysis Method on Large Shell Structure Using Inherent Strain as Boundary Condition," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 1, pp. 93-100 (in Korean)

