

# 강판-대기 온도차에 의한 선체블록 주판의 부가 면외변형 추정

하윤석<sup>1,†</sup> · 이명수<sup>1</sup>

삼성중공업(주) 산업기술연구소 용접연구<sup>1</sup>

## A Prediction of Out-of-Plane Deformation on a Deck Plate by Temperature Difference between Steel and Air

Yunsok Ha<sup>1,†</sup> · Myungsu Yi<sup>1</sup>

Samsung Heavy Industries Co., Ltd, Institute of Industrial Technology, Welding Research<sup>1</sup>

### Abstract

When ship blocks are erected or pre-erected, most blocks will be at outdoors where they are not protected from weather and exposed to ray of the sun. A deck plate compared to those in radiation heat transfer from the sun will have higher temperature than it of ambient air, and will expand more than lower laying structures whose temperatures are similar with air. But deck plates and under-structures are connected, so the deck plate will be under out-of-plane deformation rather than expand in length. In this study, we considered the temperature difference between air and plate as a major parameter of out-of-plane deformation, and analyzed how much additional deformation would take place. In addition, when a deformation could take place was also analyzed based on the initial deformed shape of deck plate. Because the accuracy inspections of deck plate will be done during daytime, conventional accuracy check results on sunny day could make us feel unfair. Thus resonable datum about momentary additional out-of-plane deformation due to environmental effects have been determined. The real deformation values can be specified even under enlarged deformations by radiation-expansion.

**Keywords** : Welding(용접), Out-of-plane deformation(면외변형), Temperature difference(온도차), Buckling(좌굴)

## 1. 서 론

선체 블록은 대조립 이후부터 일반적으로 외업공정으로 분류된다. 공장 밖에서 선체 블록이 건조되는 과정은 선행 건조나 탑재 과정은 물론, 최근의 블록 대형화를 피하기 위해 이루어지는 초대형 탑재블록 등의 작업장이 대부분 쉘터의 보호없이 작업이 이루어진다. 이는 날씨에 대해서도 보호받지 못할 뿐만 아니라, 태양에 의한 직사광선에도 그대로 노출되게 된다. 태양의 직사광선은 일몰부터 일출까지 존재하지 않는 것이 보장되는 환경영향의 인자이다. 다만 계절에 기인하여 태양의 고도가 높아지는 철에는 입사각의 사인값에 비례하는 복사 열전달(Frank, et al., 2008)에 의하여 강판의 온도는 대기의 온도보다 수십도 가량 상승하게 된다. 온도 변화는 재료 자체의 열팽창 계수라는 물성치에 의하여 재료의 팽창과 수축을 일으킨다. 그런데 블록의 갑판 구조 아래에 있는 하부 구조물은 직사광선에 노출되어 있지 않으므로, 대기의 온도와 유사한 온도분포 상태(Fig. 1)에 놓이게 된다.

따라서 갑판은 온도 상승으로 인하여 열팽창하려고 하지만, 상

대적으로 팽창을 저해하는 갑판 하부 구조와는 용접 등으로 강하게 연결되어 있으므로, 블록의 길이나 폭 등과 같은 치수가 증가하는 것이 아니라 하부 구조와의 연결된 곳 사이에서의 면외변형으로 정도의 왜곡이 발생한다. 이러한 부분들은 주로 론지 보강재와 프레임 보강재로 둘러싸인 영역들이다.

이러한 정도불량은 복사광선에 의한 낮시간의 일시적인 것이지만, 야드에서의 정도 검사는 대부분 낮에 이루어지므로 정도관리를 담당하는 부서는 복사광선에 의한 변형을 설명하고 설득하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 또한 현재의 변형이 복사광선에 의한 추가변형이 포함되어 있다는 것을 설득한다고 하더라도, 현재 예측된 변형량 중 과연 얼마가 실제 면외변형량인지에 대하여 확신을 준다는 것이 쉽지 않다. 많은 경우 이러한 부분에서 문제가 발생하면, 일몰 후나 일출 전에 한 번 더 갑판의 면외변형 정도를 예측하여 선주나 검사관을 설득시켜야 할 필요가 있으며, 이를 위한 시간이 추가로 소요되는 것이 일반적이다.

본 연구는 전통적으로 고질적인 문제인 낮시간의 부가적인 면외변형에 대하여 강판온도와 대기온도 그리고 종보강재간 간격이 파악되면 현재 육안으로 관측되는 면외변형 중 일시적인 팽창에 의한 양이 얼마나 되는지를 밝히는 것을 목적으로 한다.

또한, 갑판의 팽창량이 면내 압축력으로 작용하는 과정에서 변형은 면외방향으로 거동한 현상을 연구대상으로 하였으므로, 본 현상이 좌굴의 일종으로 설명될 수 있는 만큼, 갑판의 초기 정도와의 상관관계도 같이 분석하였다. 실제 탑재단계에서 종종 발생하는 최종상태의 갑판부 면외변형에 대하여 각 탑재 Process (곡직, 리프팅, 의장설치, 탑재용접 등)의 영향을 파악(Jang, et al., 2002)하는 연구들은 초기 상태(대조립 직후) 정도의 중요성을 지적하고 있다.

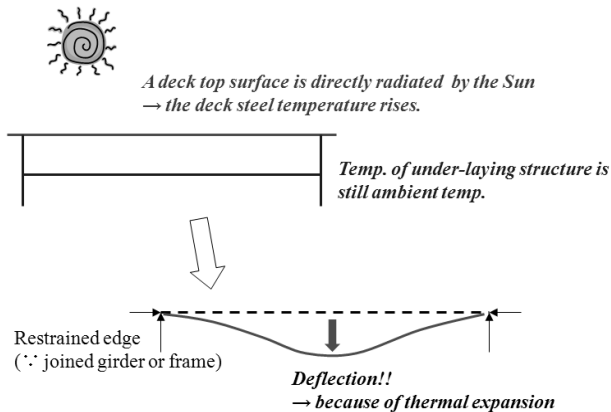


Fig. 1 Principle of additional deformation during daytime

## 2. 면외 변형 실계측 자료

주판의 면외변형을 좌굴 거동이라는 점에서 고찰하면, 열팽창 즉시 바로 면외변형을 만드는 것이 아니라, 어느 정도까지는 하부구조에 의한 저항을 건디다가, 내부 응력이 좌굴 응력을 넘어서는 순간 면외변형을 발생하게 될 것이다. 일반적인 좌굴거동이 초기조건의 영향을 많이 받는 만큼, 우리는 대조립 직후의 선체 블록을 살펴 볼 필요가 있다. 문제가 되는 영역을 이미 지적한 바, 이러한 영역은 내업과정에서 용접변형의 영향으로 말미암아 면외변형이 필렛용접쪽 면으로 변형한다는 것이 잘 알려진 부분이다. 따라서 대부분의 내업공정은 대조립 블록 조립 직후 아직 지그 위에 데크베이스로 위치한 상태에서 현재의 면외변형을 곡직으로 (정도관리 수준까지) 수정한다. 대조립에서의 정도관리 면외변형 수준은 4mm 정도이다.

일반적으로 선체블록에서 주판의 두께가 12mm 이하인 경우의 곡직률은 100%에 달한다. 따라서, 옥외로 노출되기 직전의 초기 변형은 정도관리 수준인 4mm라고 가정되어도 합리적이다. Table 1 및 Fig. 2는 실제 건조 중인 선박의 갑판(두께 8mm)부 면외변형 계측자료이다. 본 자료를 통하여 저녁이나 새벽 시간 등 갑판-대기 온도차가 크지 않은 시간대의 자료를 통하여 대조립의 일반적인 면외변형 정도를 확인할 수 있다. 물론 해당 자료는 갑판과 대기의 온도차가 낮시간의 추가 면외 변형을 만들어내는 주요 인자라는 것을 짐작할 수 있도록 구성되어 있다. 따라서, 특정영역(Table 1에서 Location을 지칭)에 매우 과한 면외변형이 기록되었다고 하더라도, 그 당시의 갑판-대기 온도차가 존재했다면,

그 온도 차이가 좁혀지면서 변형이 원래대로 복귀하고 있음을 Table 1을 통하여 확인할 수 있다. Fig. 2는 Table 1의 계측자료를 이용하여, 시간대별 갑판-대기 온도차와 면외변형량을 표현하는 그래프이다. Table 1 및 Fig. 2의 각 위치에서 05:40 시간대의 변형계측값에 대해서는 복사광선에 의한 추가 면외변형이 포함되어 있지 않다고 가정하였고, 이후 이 계측값들을 갑판과 대기 온도차가 거의 없는 경우에 대한 추가변형을 예측하는 데 있어서의 기준으로 삼았다.

Table 1 Measured data of out-of-plane deformation

Location	Time	Amb. Temp.(°C)	Steel Temp.(°C)	Deformation (mm)
1	15:00	25	60	12.9
	19:15	14	25	3.7
	05:40	13	14	3.7
	14:10	22	47	8.5
2	15:00	25	63	17.0
	19:15	14	25	5.3
	05:40	13	13	4.6
	14:10	22	44	12.5
3	15:00	25	66	12.6
	19:15	14	25	4.0
	05:40	13	13	4.0
	14:10	22	49	7.5
4	15:00	25	58	17.0
	19:15	14	25	5.8
	05:40	13	14	5.8
	14:10	22	42	10.7
5	15:00	25	66	13.9
	19:15	14	26	2.7
	05:40	13	13	2.4
	14:10	22	49	9.2
6	15:00	25	58	19.0
	19:15	14	23	6.5
	05:40	13	13	5.5
	14:10	22	45	14.5

특기할만한 점은 갑판-대기 온도차가 어느 정도 있더라도 그 시간대에서 항상 면외변형이 발생하기 시작하는 것은 아니라는 것을 알 수 있다. 이 부분은 대체로 Table 1 및 Fig. 2에서 19:15대의 자료로부터 유추가 된다. 그러나 온도 차가 상당히 발생한 영역-시간대에서는 예외없이 부가적인 변형량이 발생되고 있으며, 그 정도가 허용 공차를 매우 넘어서고 있음을 확인할 수 있다. 결국 이 과정을 논리적으로 밝혀서 대응하지 못하면 이전의 정도관리가 매우 양호하였다고 하더라도 사후 정도 평가에 큰 의미가 없는 것과 같다.

이에 본 연구에서는 일차적으로 변형 형상의 shape function을 가정하여 면외변형을 추정하는 과정을 소개하려고하며, 본 추정과정에서 개발될 갑판-대기 온도차와 추가적 면외변형의 상관관계의 적용가능한 영역을 정하는 부분에 대해서는 좌굴하중의 임계조건을 구하는 부분을 차용하였다.

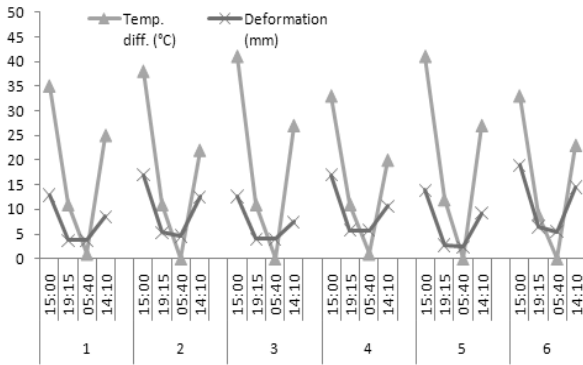


Fig. 2 Out-of-plane deformation about temperature difference between steel and air

### 3. 온도차에 따른 면외변형

온도차에 따른 면외변형을 구하기 위하여 변형된 상태의 주판의 단면을 적절하게 모델링할 필요가 있다. 갑판의 면외변형을 측정할 시에 기록되는 값은 인근 보강재에서의 레벨을 '0'를 기준으로 하여, 중앙부의 인근 보강재 대비 상대적 레벨값을 기록하므로, 단면의 모델링은 이를 반영할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 기본적으로 Sine 함수와 같은 삼각함수를 이용하였으나, 실제적으로 나타나는 최종상태가 이웃하는 영역과 어떤 관계를 갖는가를 기준으로 다시 크게 두 가지로 구분하였다. 이는 Fig. 3을 통해 도시하였다. 두 가지 중 첫 번째는 종보강재가 뒤틀리지 않고 자신의 형상을 유지하고 있어서, 변형의 형상이 용접변형의 경향을 유지하는 경우이다.

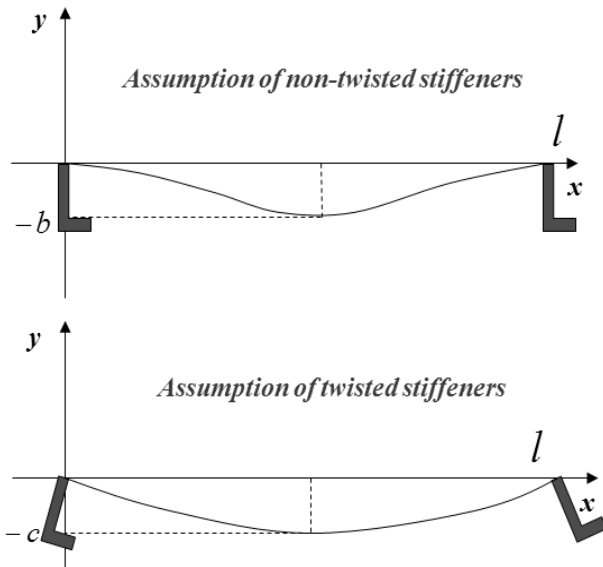


Fig. 3 Aspects of out-of-plane deformation

이 경우는 론지간 간격( $l$ )에서 삼각함수의 한 주기가 모두 나타난다. 두 번째 경우는 갑판 위의 의장이나 구조적 하중에 의하여, 종보강재를 절점으로 요철변형이 일어나는 경우이다. 첫 번

째의 경우에는 면외변형량이 진폭의 2배가 되고 후자의 경우에는 변형량과 진폭이 동일한 경우로, 진폭에 대한 미정계수로 각각  $b/2$ ,  $c$ 를 도입하여 2차보강재간 면외변형량을 표현하면 식(1) 및 (2)와 같이 가정할 수 있다.

$$y = \frac{b}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{l}\right)x - \frac{b}{2} \tag{1}$$

$$y = -c \cdot \sin\left(\frac{\pi}{l}\right)x \tag{2}$$

제시된 두 함수 중 식 (2)로 제시된 개형은 식 (1)의 형태가 진폭과 주기가 모두 2배씩 길어진 형태에 해당하므로, Fig. 3에서 제시된 구간에서는 두 경우의 곡선의 길이는 면외변형량이 같은 경우 모두 같다. 따라서 본 연구에서는 강판-대기 온도차와 추가 면외변형량과의 관계를 분석할 때에 두 가지 경우 중 유도과정이 좀 더 편리한 과정을 따를 것이다. Fig. 3의 곡선의 길이는 열팽창으로 인하여 늘어난 총 길이와 같아야 한다(식 (3)). 식 (3)에 포함된 미분을 계산하면 식 (1)의 경우는 Sine 함수가 도출되고, 식 (2)의 경우는 Cosine 함수가 도출된다. 어느 경우나 음함수의 형태를 갖게 되지만, 전자의 경우는 식 (4)와 같은 Elliptic 적분함수의 기본형태가 도출된다. 이러한 형태는 표준 Taylor series가 알려져 있다. 식 (4)로 표현된 Elliptic 적분함수의 6차항까지의 Taylor 전개를 이용하여 식 (3)을 풀 결과는 식 (5)와 같다.

$$l(1 + \alpha \cdot \Delta T) = \int_0^l \sqrt{1 + (y')^2} dx \tag{3}$$

where,  $\alpha$  : Heat Expansion coefficient ( $1/^\circ\text{C}$ )  
 $\Delta T$  : Temperature Difference ( $^\circ\text{C}$ )  
 $l$  : Length between secondary members (mm)

$$E(\Phi|m) = \int_0^\Phi \sqrt{1 - m \text{Sin}^2 \theta} d\theta \tag{4}$$

$$\Phi = \frac{2\pi x}{l}, \quad m = -\frac{b^2 \pi^2}{l^2}$$

$$\therefore y' = -\frac{b\pi}{l} \cdot \text{Sin}\left(\frac{2\pi}{l}\right)x$$

$$\int_0^l \sqrt{1 + (y')^2} dx = \left[ \frac{l}{2\pi} E\left(\frac{2\pi x}{l} \middle| -\frac{b^2 \pi^2}{l^2}\right) \right]_0^l \tag{5}$$

$$= \left[ \frac{l}{2\pi} \left( \frac{2\pi}{l}x + \frac{4}{3} \frac{b^2 \pi^5}{l^5} x^3 - \frac{4}{15} \frac{4b^2 l^2 \pi^7 + 3b^4 \pi^9}{l^9} x^5 \right) + O(x)^7 \right]_0^l$$

식 (5)를 고찰하면 두 번째 항부터가 신장된 길이를 나타낼 수 있다. 이 부분을 식 (3)의 좌변에서 열팽창계수와 온도차로 이루어진 신장량에 대한 항과 같다고 둘 수 있다. 결과도출을 원

하는 면외변형량 변수  $b$ 는 짝수차 항만 등장하므로, 8차항까지 도출되는 경우는 논리적인 해를 도출할 수 있다. 그러나 Elliptic 적분 함수는 Taylor 급수로의 수렴이 매우 좋은 함수는 아니므로, Elliptic 적분함수값을 도출해주는 상용코드를 활용하는 것도 좋은 방법이다. 본 연구에서는 Wolfram사의 Mathematica를 이용하여 식 (6)의 결과를 도출(Fig. 4)하였다. Fig. 2에 제시된 계측결과를 같이 도출하였는데, 당사 계측 대상 선박의 종보강재 간격인 800mm를 이용하여 식 (6)이 계산되었다.

$$\Delta T = \frac{1}{l \cdot \alpha} E(2\pi l - \frac{b^2 \pi^2}{l^2}) - l \quad (6)$$

$$= f(b)$$

$$\therefore b = f^{-1}(\Delta T)$$

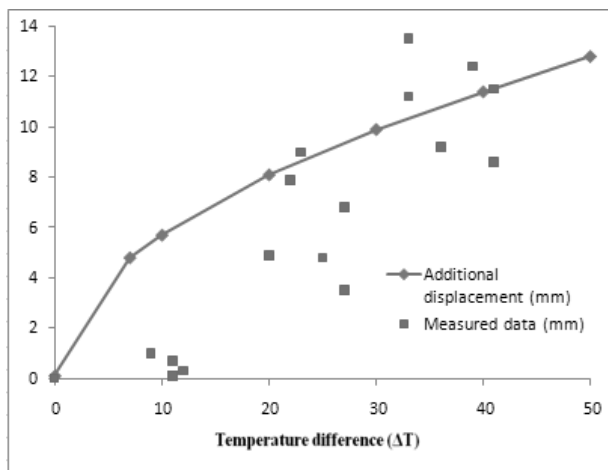


Fig. 4 Additional displacement by Eq. (6) & measured datum

#### 4. 초기변형에 따른 좌굴거동

Fig. 4의 개형이 계측자료와의 좋은 일치율을 보이는 것은 아니다. 특히 10도 안팎의 온도차에 대하여 추가변형량이 미미한 것으로 조사된 계측 자료는 본 현상이 좌굴거동을 따를 수 있다는 것을 보여준다고 판단된다. Fig. 3의 두 가지 경우는 추가면외변형량에 대해서는 같은 값을 갖지만 좌굴거동에 대해서는 매우 다를 수 있다. 본 연구에서는 이미 초기 변형이 존재하는 것에 대하여 편심이 발생하는 과정은 무시하되, 초기 변형의 양상은 최종 거동의 좌굴 모드를 지배한다고 가정하고, 두 가지 경우에 대한 좌굴의 시작점을 온도차로 나타내려고 하였다. 선체의 경우 약 3~4m 간격의 횡보강재간 중앙부가 계측 지점이므로, 판좌굴로 계산하지 않고 횡보강재가 무시된 기둥의 좌굴로 계산하였다. Fig. 3에 보여주는 형상에서의 좌굴 모드는 각기 2, 1 이다. 이 모드에서의 임계하중(James, 2004)값과 열팽창분이 압축변형만큼 종보강재 위치에서 받을 힘을 같다고 두면, 주어진 종보강재 간격과 판두께 하에서 강판-대기간 온도 편차로 표현(식 (7))할 수 있다.

$$P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{l^2} \quad (n = 2, 1) \quad (7)$$

$$P = \sigma A = \epsilon^{thermal} EA = \alpha \cdot \Delta T \cdot EA$$

$$\equiv P = P_{cr}$$

$$\therefore \Delta T = \frac{n^2 \pi^2}{\alpha \cdot l^2} \times \frac{h^2}{12}$$

where,  $h$  : Plate thickness (mm)

$P_{cr}$  : Critical force of buckling (N)

Fig. 4에 Fig. 3의 두 가지 경우의 좌굴 거동을 반영하여 새로 도출하면 Fig. 5와 같다. 갑판에서의 변형은 대부분 초기 용접변형으로 인하여 특별한 외부 하중이 없는 한 대부분 식 (1)로 표현된 Fig. 3의 상부 그림과 같다고 가정하면, Fig. 5를 통해 제시된 추가 면외 변형량 값(Fig. 5의 untwisted channel)은 계측 자료와의 비교에 있어서 Fig.4 보다는 좋은 일치를 보여준다.

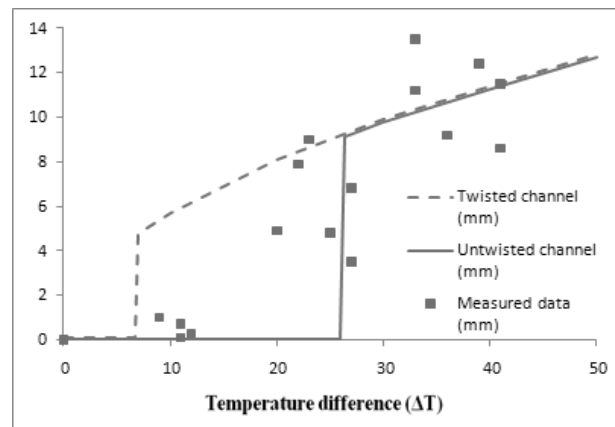


Fig. 5 Additional displacement governed by buckling

#### 5. 종보강재의 응력평가

본 연구는 주간 선주 검사에 대한 대응을 목표로 수행된 바, 다시 복귀될 면외변형량이 얼마인지를 밝히는 것도 중요하지만, 부가적 면외변형량이 발생하여 하부의 종보강재를 비틀었을 때는 비록 주간이라 하더라도 응력관점에서는 어느 정도의 수준인지를 확인할 필요가 있다. 종보강재는 횡보강재간 정중앙에서는 앞선 거동으로 설명될 수 있고, 횡보강재와 맞물리는 곳에서는 고정단인 상태이다. 보강재간 중앙부 면외변형이 유발하는 종보강재 위치에서의 기하학적 조건은 마치 강제변위처럼 종보강재를 비틀게 할 것이다. 따라서 응력평가에서 최악의 경우는 빈번하게 등장하는 Fig. 3의 상부 형태가 아닌 보강재가 비틀리는 경우인 하부 형태(식 (2))가 된다.

최악의 조건을 가정하기 위하여 강판-대기 온도차 45도(예를 들면, 대기 25도/강판70도) 및 초기변형 4mm를 가정(대조블록까지 온도관리 허용공차)하면, 주간 최고변위는 16mm를 생각할 수 있다. 또한 본 연구가 다루는 주제는 Drill Ship의 Mud Module

Deck과 같이 8mm 두께 안팎의 얇은 주판에서 많이 발생하는데, 이 정도 두께의 주판에서는 Fig. 6과 같은 채널 형태의 종보강재가 많이 사용된다. Fig. 6에 주어진 상황에서의 양단 종보강재의 뒤틀림은 식 (8)로 계산된다. 라디안으로 표현된 식 (8)의 최대 뒤틀림 결과는 약 3.6도에 해당한다.

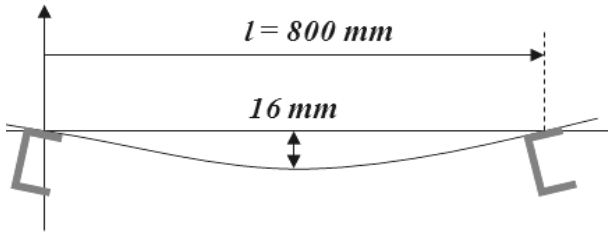


Fig. 6 Twisted channel due to plate thermal expansion

$$y = -16 \sin \frac{\pi}{l} x \tag{8}$$

$$y' = -16 \times \frac{\pi}{l} \cos \frac{\pi}{l} x$$

$$\therefore y'(0) = y'(l) = \pm 0.06285 \text{ rad}$$

응력을 검토하는 해석에서는 식 (8)에서 구한 강제(회전)변위값 외에도 종보강재가 설계적으로 부담해야 하는 최대하중도 같이 부여하여 재료 자체의 허용강도를 넘는지 여부를 같이 관찰해야 할 것이다. 본 연구의 대상은 종보강재에 12kN/m를 담당하는 설계를 기준으로 수행되었다. 뒤틀림이 전혀 없는 경우에 대하여 주어진 설계하중은 최대 126MPa를 유발하는 데 비하여, Fig. 6의 좌측과 같이 시계방향(CW)으로 회전한 보강재는 191MPa가 도출되었다. 반면 반시계방향(CCW)으로 회전한 보강재는 오히려 최대 응력이 115MPa로 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 선급 강재로 사용되는 최저사양인 일반 A grade (Ha & Jang, 2007)의 최소 항복강도는 235MPa이므로, 가정할 수 있는 주간 최대 변형 상태 하에서 본 설계는 안전계수 1.25수준이라고 할 수 있다. 다만, 박판일수록 제강시 냉각속도의 자연적인 상승으로 인하여 대부분의 8mm 두께 강재의 항복강도는 300MPa를 상회(Ha & Rajesh, 2009)한다는 점과, 강판-대기 온도차 40도 이상은 태양이 최고도에 이르는 6월 등 연중 매우 일순간이라는 점 (그 중에서도 정오에 잠시), 그리고 설계 최대 하중이 동시에 작용하고 있다는 점 등을 복합적으로 고려하면, 본 연구의 FEM 해석 결과에 의한 현재의 설계가 주간 열팽창에 견디는 부분은 충분히 안전하다고 판단된다.

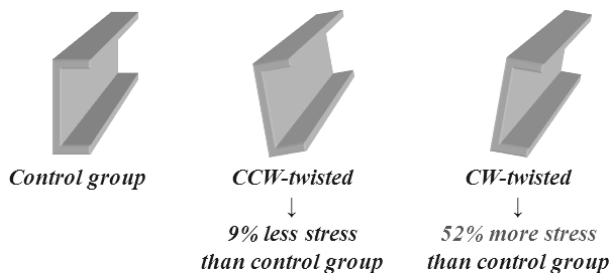


Fig. 7 Stress results of twisted channel

## 6. 결론

많은 날 주간에 복사현상으로 발생하는 선체블록 주판의 일시적 추가 면외변형에 대하여

(1) 같은 곳의 면외변형을 강판/대기 온도차 별로 계측한 자료를 분석하고, 해당 변형은 온도차가 없어지는 대로 사라지는 것을 확인하였다.

(2) 강판-대기 온도차를 변수로 하는 추가 면외변형량에 대한 정식화를 수행하였다.

(3) 주판의 초기 변형 모드에 따라 면외변형의 발생이 시작되는 온도차에 대한 해를 좌굴거동의 임계하중으로부터 도출하였다.

(4) 면외변형이 유발하는 종보강재의 비틀림에 대하여 응력적인 면에서도 강건함을 해석하였다.

## 참고 문헌

Frank, P.I. David, P.D. Theodore, L.B. & Adrienne, S.L., 2008. *Foundation of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons Inc.

Ha, Y.S. & Jang, C.D., 2007. 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), pp.139-144.

Ha, Y.S. & Rajesh, S.R., 2009. Thermal distortion analysis method for TMCP steel structures using shell element. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 1(2), pp.95-100.

James, M.G., 2004. *Mechanics of Materials*. Thomson Learning.

Jang, C.D. et al., 2002. An Approach to the Analysis of the Large Deformation of Deck Structures of Engine Room Block at Erection Stage. *Proceedings of the Annual Spring Meeting, Society of Naval Architecture of Korea*, Pusan, Republic of Korea, 18-19 April 2002.

