

평블록의 용접변형제어에 관한 연구

이주성*

*울산대학교 수송시스템공학부

A Study on the Accuracy Control of Panel Blocks

JOO-SUNG LEE*

*School of Transportation System Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

KEY WORDS: Accuracy Control 정도제어, Butt Weld 맞대기용접이음, Fillet Weld 필렛용접이음, Methods for Deformation Control 변형제어방법, Panel Block 평블록, Simulator 시뮬레이터, Weld-Induced Deformation 용접변형

ABSTRACT: This paper is concerned with the simulator's ability to estimate deformation due to welding of panel blocks. An efficient computer program system has been developed which can be applied both to estimation of weld-induced deformation, under the given welding conditions, and to reflection of effect when methods for deformation control are applied. This paper briefly describes the background of the present simulator and shows some results applying the simulator to the estimation of weld-induced deformation. In addition, the results when methods for deformation control are applied are also included.

1. 서 론

선박이나 해양구조물의 건조과정에서 용접변형은 피할 수 없는 것이지만 후공정에서 작업시 취부작업 등에 소요되는 시간과 노력을 감소시키기 위해서는 현공정에서 유발되는 용접변형의 크기를 가능한 감소시키고 부재들 사이의 이음선을 따라서 발생하는 용접변형이 균일한 것이 되도록 하는 변형제어방법의 마련과 적용이 필요하다(Aoyama et al., 1997; Ichiji et al., 1985; Kim et al., 1997; Okumoto, 1994; 이주성, 2000).

이러한 용접변형 제어를 위한 방법을 고안하기 위해서는 용접으로 발생하는 변형을 예측할 수 있는 시뮬레이터의 개발이 선행되어야 할 것이다. 용접변형의 예측과 관련된 연구는 상용패키지를 이용하거나 또는 자체적으로 개발한 컴퓨터 프로그램을 이용하여 열탄소성해석을 수행하는 연구 (김상일 등, 1997; 방한서 등, 1998; 신상범 등, 2002; 김상일, 2003)와 용접변형의 종류에 따른 간이예측모델을 이용하고 각각의 변형형상에 등가되는 하중 또는 변위를 작용시켜서 해석하는 연구 (이주성, 2000)로 구분될 수 있다. 열탄소성해석을 통해 용접변형을 예측하는 것은 정확도 측면에서는 유리할 수 있지만, 실제 블록모델에 적용할 때에는 수치해석을 위한 모델링과 계산시간이 방대하여 실용적인 측면에서 거리가 있다. 한편 간이예측모델을 이용하고 상용패키지를 이용하여 시뮬레이션을 수행할 수 있으나 이 경우에도 블록의 형태에 따라 일일이 유한요소 모델링을 해야 하는 번거로움이 있어서 적용이 제한적일 수 있다.

따라서 해석 대상 블록의 기하학적 데이터, 용접조건 등 필요한 자료만을 입력하여 용접변형 시뮬레이션을 보다 효율적으로 수행할 수 있는 시뮬레이터를 개발해서 이를 적용하는 것이 더 바람직할 것이다. 이에 본 연구에서는 평블록의 용접변형예측을 보다 효율적으로 수행할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였는데, 용접변형예측 시뮬레이션을 위한 기본적인 자료만 입력하면 해석에 필요한 정보들은 시뮬레이터 내에서 생성될 수 있도록 되어 있어서 사용자의 편의성도 제고하였다. 또한 본 연구의 시뮬레이터는 현장에서 적용이 가능한 구속법이나 Carling의 부착 등 변형제어방법을 적용한 효과를 반영할 수 있도록 개발하였다. 이 논문에서는 개발한 시뮬레이터의 이론적인 배경과 구성을 소개하였으며 이를 평블록의 용접변형 예측 그리고 변형제어에 적용한 예를 다루었다. 이러한 적용 예를 통해 본 연구의 시뮬레이터가 용접변형을 효율적이고 정도 높게 예측할 수 있다는 점을 확인할 수 있었다.

2. 용접변형예측 시뮬레이터

2.1 개요

여기에서 개발한 시뮬레이터는 평블록 조립시 용접으로 발생하는 변형을 예측하는 것으로서 다음과 같이 4개의 프로그램 모듈로 구성하였다.

- Data input module
- Butt weld simulation module
- Fillet weld simulation module
- Graphic representation module

제1저자 이주성 연락처: 울산광역시 남구 무거동 산29

052-259-2162 jslee2@mail.ulsan.ac.kr

이 프로그램 모듈들은 Windows 환경에서 GUI의 개념을 이용해서 해당되는 기능을 시연할 수 있도록 개발하였다. 시물레이션을 위해 필요한 데이터는

- 판의 크기와 두께 등 기하학적 형상을 정의하는 데이터
- Butt 용접선의 개수, 위치 및 용접조건
- Fillet 용접선 즉, 보강재의 개수, 위치 및 용접조건 등이다.

시물레이션은 Butt 용접 시물레이션과 Fillet 용접 시물레이션으로 구분되며, 유한요소법을 적용해서 3차원 구조해석을 수행한다. 본 시물레이터에서는 주어진 용접조건에 대해 2.2절에서 기술하는 용접변형형상에 대한 간이에측식으로부터 수축량, 각변형량 등이 구해지면, Fig. 1에 보인바와 같이 이들을 용접선 근방의 용접선에 평행한 절점에 강제변위조건으로 부여하는 방법으로 구조해석을 수행한다. 구조해석에 필요한 데이터 즉, 요소분할 데이터, 하중조건, 경계조건 등은 Butt 및 Fillet 용접선의 위치와 개수 그리고 용접조건과 판의 기하학적 특성을 나타내는 정보 등을 이용하여 프로그램 내에서 자동적으로 생성된다. 블록조립의 순서가 Butt 용접 후 Fillet 용접이면 Fillet 용접 시물레이션에서는 Butt 용접으로 인한 변형이 초기 변형이 되어 이의 영향을 고려할 수 있어야 한다. 본 시물레이터에서는 Fillet 용접 시물레이션을 시행하기 전에 이를 위한 유한요소모델의 각 절점에서 Butt 용접 시물레이션의 결과를 이용해서 Butt 용접으로 인한 초기변형량을 추정하도록 구성하였다. 이때 두 용접 시물레이션을 위한 유한요소의 분할결과가 다르기 때문에, 여기에서는 Fillet 용접 시물레이션을 위한 절점에서의 초기변위를 그 절점 부근에 있는 Butt 용접 시물레이션을 위한 절점들의 변위를 데이터로 해서 2차원 보간법(surface interpolation)으로 추정하였다.

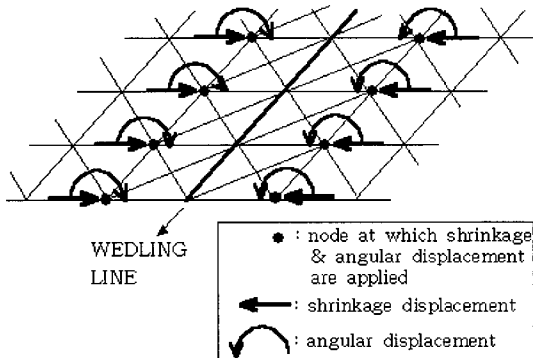


Fig. 1 Mechanical modelling

2.2 용접변형 간이에측모델

용접변형은 면내변형과 면외변형으로서 Fig. 2에 보인 여섯 가지 형태로 구분된다(Masubuchi, 1980). Fig. 2에서

- a) 용접선에 수직방향으로 발생하는 횡수축
- b) 횡방향으로의 각변형
- c) 용접선을 중심으로 평면내의 회전을 포함한 각변형
- b) 용접선에 평행한 방향으로 발생하는 종수축
- e) 용접선을 따라 판에 수직하게 발생하는 종굽힘변형
- f) 수축 시 작용하는 압축응력으로 인한 좌굴변형

이고, 실제의 용접변형은 이러한 변형형태가 서로 복합적으로 작용을 해서 발생한다. 본 논문에서는 위에서 열거한 용접변형의 형태중 용접변형의 결과에 비교적 큰 영향을 주는 a), b), c) 세 경우를 고려하였다. 곧, 용접선에 수직방향으로의 수축과 각변형인 횡수축과 횡각변형을 고려하였으며, Butt 용접의 경우 Fillet 용접보다 단위 길이당 입열량이 많아서 면내 회전변형이 빈번히 발생한다는 점을 감안해서 Butt 용접 시물레이션에서 이 형태의 변형을 고려할 수 있도록 하였다.

용접변형에 대한 간이에측모델은 용접의 형태와 변형의 종류에 따라 다르며, 이에 대해서는 많은 연구가 수행되었는데, 본 연구의 시물레이터에서 사용한 것들을 다음과 같이 정리하였다.

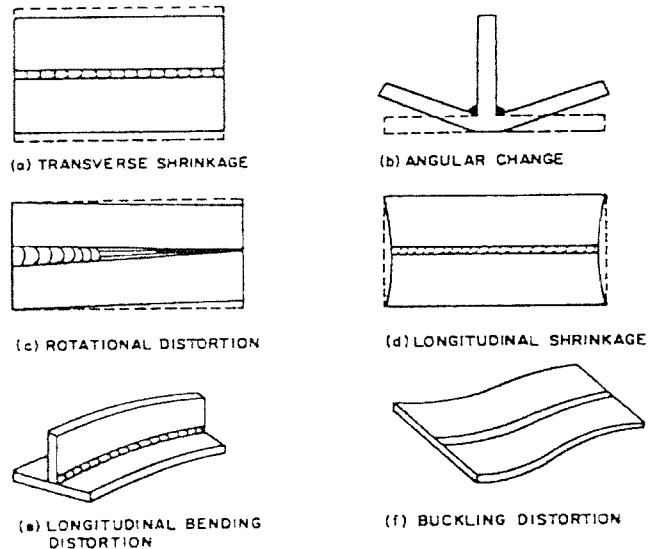


Fig. 2 Various types of welding deformation

(1) Butt 용접시 횡수축

Butt 용접으로 인한 횡수축, s_b (Fig. 2(a))는 V형 홈 Butt 용접에 대한 실험결과를 토대로 유도한 아래의 식(1)을 이용하였다(Masubuchi, 1980).

$$s_b/t = 1.2 Q/t^2 \quad (\times 10^{-5} \text{ mm/mm}) \quad (1)$$

여기에서 Q와 t는 각각 단위 길이당 입열량 (Kcal/cm)과 판의 두께 (cm) 이다.

(2) Butt 용접시 횡각변형

V형 홈 Butt 용접으로 인한 횡각변형, ϕ_b (Fig.2(b))에 대해서는 실험곡선으로서 Fig. 3에 보인 곡선을 이용하였다 (Masubuchi, 1980). 용접조건으로부터 입열량이 계산되고, 주어진 판 두께에 해당하는 각변형을 Fig. 3의 곡선에서 구한다. Fig. 3에서 ϕ 는 홈각(groove angle)이고, Q와 D는 각각 단위 길이당 입열량 (heat input : kJ/cm)과 비용착열 (specific heat : kJ/g)이다. P_b 는 입열량계수이고 ϕ_{bo} 는 무차원화된 각변형량으로

$$P_b = 32.7 t^2 \frac{\tan \phi}{Q} \tag{2.a}$$

$$\phi_{bo} = \frac{4.2}{D} \phi_b \tag{2.b}$$

와 같이 정의된다.

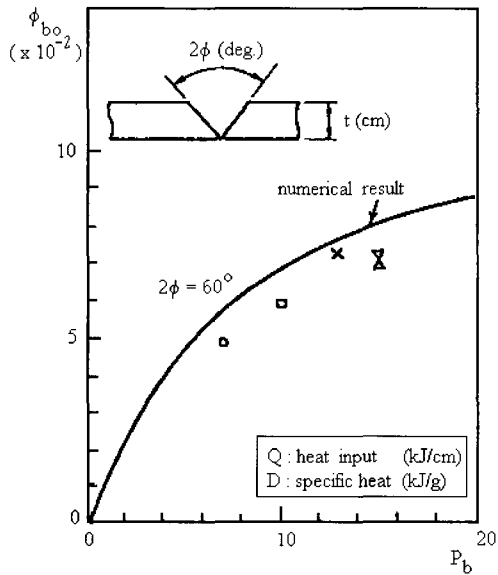


Fig. 3 Relation between heat input parameter and angular distortion due to butt weld

(3) Butt 용접시 면내 회전변형

면내 회전변형량, θ_z (Fig. 2(c))는 실험결과를 토대로 유도한 아래의 식을 이용하였다 (Masubuchi, 1980).

$$\theta_z = 3.54 p^{2.5} \exp(-0.726\sqrt{p}) [\times 10^{-4} rad] \tag{3}$$

여기에서 p 는

$$p = \frac{Q}{t^{1.5}} \tag{4}$$

로 정의되는 입열량 계수 (heat input parameter)이다.

(4) Fillet 용접시 횡각변형

Fillet 용접으로 인한 각변형, ϕ_f (Fig. 2(b))에 대해서는 실험결과나 열변형 해석결과를 토대로 다수의 모델이 제안되어 있는데, 대개의 경우 용접선 길이방향으로의 평균값으로 제안되어 있다. 한편 실제 현장에서 Fillet 용접으로 인한 각변형은 용접선의 길이방향으로 그 값이 변하는데 기존의 간이예측모델은 이를 반영할 수 없기 때문에, 이를 보완할 수 있도록 개발한 식(5)의 모델을 이용하였다(이주성, 2000).

$$\phi_f = \phi_{fo} F(p, \frac{x}{w_l}) \tag{5}$$

이 식에서 ϕ_{fo} 는 용접선 길이방향으로의 평균 각변형으로서 실험결과를 토대로 유도한 아래의 식(6)에서 구한다(Kim et al., 1997).

$$\phi_{fo} = 9.75 p^3 \exp(-0.834 p^{2/3}) [\times 10^{-4} rad] \tag{6}$$

여기에서 p 는 식(4)로 정의되는 입열량 계수이고, Q 는 단위 길이당 입열량으로

$$Q = 0.239 \frac{IV}{v} \quad (Kcal/cm) \tag{7}$$

로 주어진다. I, V, v 는 각각 용접전류, 전압, 용접속도이다. 식(5)에서 함수 $F(\cdot)$ 는 수정계수 (correction factor)로서

$$F(p, \frac{x}{w_l}) = C_0 + C_1 (\frac{-x}{w_l}) \tag{8}$$

로 주어진다. 여기에서 w_l 은 용접선의 길이이고, 계수 C_0 와 C_1 은

$$\begin{aligned} C_0 &= 1.022 - 0.0283p + 0.00102 p^2 \\ C_1 &= 0.141 + 0.0544p - 0.00185 p^2 \end{aligned} \tag{9}$$

이다. 이 간이예측모델은 열변형 해석결과를 토대로 도출한 것으로서, 보는 바와 같이 용접선의 길이방향으로 각변형의 변화를 고려할 수 있어서 기존의 모델들 보다 현실적이라고 볼 수 있다.

(5) Fillet 용접시 횡수축

Fillet 용접시 횡수축, s_f (Fig. 2(a)) 역시 용접선의 길이 방향으로 변화가 있으나, 실험이나 열변형 해석결과에 의하면 용접선의 시작점과 끝점에서 수축량의 차이가 무시할 수 있을 정도로 미소해서 균일한 것으로 간주해도 무방하다(이주성, 2000; Kim et al., 1997). 이에 대한 모델은 아래의 식을 적용한다.

$$s_f/t = 0.33p [\times 10^{-2} mm/mm] \tag{10}$$

여기에서 p 는 식(4)로 정의되는 입열량 계수이고, t 는 판 두께이다.

2.3 시뮬레이터의 정도 비교

본 시뮬레이터에서 도입한 간이에측모델과 역학적 모델링 등 시뮬레이터를 구성하는 이론적 배경과 시뮬레이션 방법의 정당성을 보이기 위해 실제 현장에서의 계측결과와 시뮬레이션의 결과를 비교하였다. 비교 결과를 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 Model A와 Model B는 Fillet 용접시 각각 28극과 10극 자동용접기를 사용한 것을 표시한다. t , s 와 Q 는 각각 판의 두께, 보강재 간격 그리고 단위길이당 입열량이다. 'measured result'는 계측결과로서 보강재의 중간점에서 계측한 변위이고, 'simulated result'는 동일한 위치에서의 시뮬레이션의 결과이다. 'ratio'는 계측결과와 시뮬레이션 결과에 대한 비율로서 표에서 보는 바와 같이 시뮬레이션 결과는 계측결과에 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 16개 모델에 대한 계측결과와 시뮬레이션 결과의 비율의 평균은 0.994이고, COV (coefficient of variation)는 7.1%로 본 시뮬레이터는 용접변형을 정도 높게 예측할 수 있다고 볼 수 있다.

Table 1 Comparison between measured and simulation results (unit : mm, cal)

model	t (mm)	s (mm)	Q (cal/mm)	measured result①	simulated result②	ratio ①/②
A1	12.5	840	190.9	1.30	1.10	1.184
A2	14.0	840	190.9	3.50	3.87	0.904
A3	15.0	700	190.9	2.00	2.11	0.948
A4	15.0	810	187.5	4.10	4.32	0.950
A5	17.0	830	183.0	2.90	2.89	1.003
A6	17.0	830	192.1	2.70	2.74	0.986
A7	17.0	830	188.2	1.80	1.87	0.963
A8	17.0	885	173.4	2.80	2.77	1.010
A9	17.0	830	224.3	1.45	1.56	0.926
A10	17.5	840	204.4	2.40	2.46	0.977
A11	18.5	840	166.9	1.70	1.62	1.050
A12	19.0	875	187.5	3.60	3.36	1.072
A13	19.0	840	167.8	1.85	1.73	1.070
A14	16.0	830	131.2	2.95	2.92	1.009
B2	18.0	850	319.5	3.10	3.39	0.914
B3	18.5	840	347.0	1.80	1.92	0.936

3. 평블록의 용접변형 예측에의 적용

3.1 대상 평블록

개발한 시뮬레이터의 적용 예를 보여주기 위한 대상 평블록을 Fig. 4에 보였다. 단위는 mm이고, 기본 데이터는 아래와 같다.

- overall dimension : $L \times B \times t = 2300 \times 6400 \times 16$ mm
- no. of butt joint lines = 2
- no. of stiffeners = 8
- stiffener space = 800 mm

Fig. 4에서 'BUTT JOINT-1'과 'BUTT JOINT-2'는 각각 $y=2,000$ 과 $4,600$ mm 위치의 Butt Joint Line을 표시하며, $y=200$ 부터 5800 까지 800 mm 간격으로 표시된 L1~L8는 보강재를 나타내는데 변 ①②와 변③④에서 안쪽으로 150 mm 떨어져 있다. 용접조건은 Table 2에 열거하였다.

Table 2 Welding condition

welding type	current (A)	voltage (V)	speed (cm/min)
butt weld	335	31	12
fillet weld	300	32	15

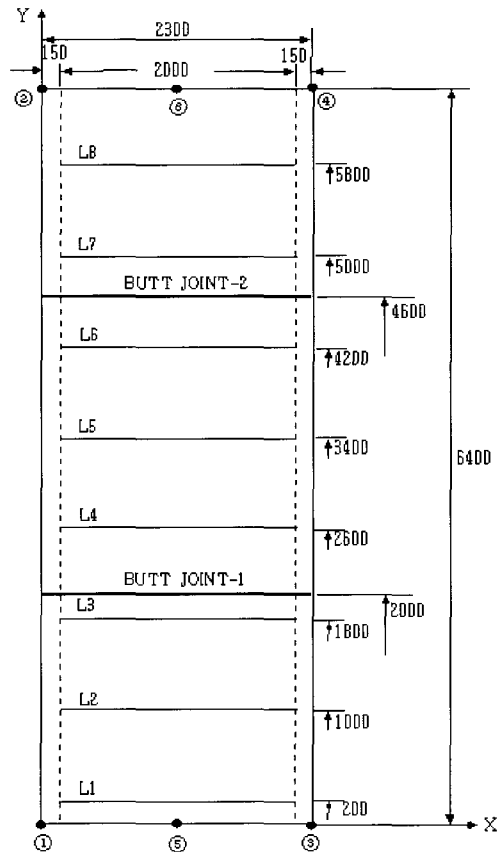


Fig. 4 Panel block model (unit : mm)

3.2 시뮬레이션 결과

평블록의 조립순서는 일반적으로

- 판재의 Butt 용접 후 보강재의 Fillet 용접
- 보강재의 Fillet 용접 후 판재의 Butt 용접

의 두 경우로 구분되고 상황에 따라 조립순서를 적용한다. 여

기에서의 조립순서는 판재의 Butt 용접 후 보강재를 Fillet 용접으로 조립하는 순서를 따랐다.

(1) Butt 용접 시뮬레이션

Fig. 4의 대상 평블록에 대해 Table 2에 주어진 용접조건에 따라 Butt 용접에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과를 Fig. 5에 표시하였다. 변형형상은 실제 형상을 50배 확대한 것이다. Fig. 5에서 보듯이 Butt joint line 근처에서 변형이 크고 (타원으로 표시된 부분), 여기에서 멀어질수록 자중의 영향으로 변형이 작아진다. Butt joint line 근처에서 요철형태의 변형형상을 보이고 있는 것은 면내 회전변형의 작용 때문이다. Fig. 5에는 표시하지 않았지만 본 시뮬레이터에서는 각변형이 최대인 위치와 그 크기 그리고 x축에 평행한 두 면에서의 수축량의 크기를 표시할 수 있도록 되어 있다. 이 대상 평블록의 경우 최대 변위는 약 2mm이고 용접선에 수직방향으로의 수축량은 약 6mm로 예측되었다.

(2) Fillet 용접 시뮬레이션

Butt 용접 시뮬레이션 후 Fillet 용접 시뮬레이션을 수행한 결과를 Fig. 6에 표시하였다. 본 모델의 경우 Fig. 4에서 변②④에 연하여 비교적 큰 각변형이 발생됨을 볼 수 있다. 타원으로 표시된 부분에서도 비교적 큰 변형을 볼 수 있는데 이는 Fillet 용접에 의한 것이라기 보다는 Fig. 5의 타원으로 표시된 Butt 용접으로 인한 초기변형이 남아 있기 때문이다. Butt 용접 시뮬레이션의 결과를 표시할 때와 마찬가지로 최대 각변형의 위치와 크기 그리고 용접선에 수직방향으로의 수축량을 표시하도록 구성되어 있다. 본 모델의 경우 Butt 용접부터 누적된 최대 각변형량은 약 3.1mm이고 수축량은 11.3mm로 예측되었다.

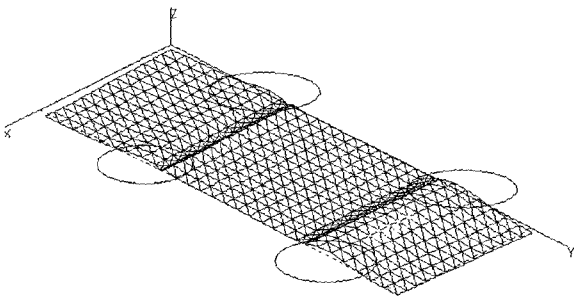


Fig. 5 Deformed shape after butt weld simulation

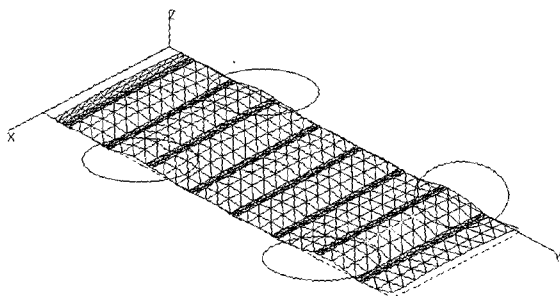


Fig. 6 Deformed shape after fillet weld simulation

4. 변형제어방법의 적용

여기에서는 대상 평블록에 대한 용접변형 시뮬레이션의 결과인 Fig. 6을 참고해서 변형을 감소시키기 위한 변형제어방법을 적용했을 때 그 효과가 어떻게 나타나는가를 구현하는 내용을 다루었다. 변형제어방법으로는 구속을 하거나 Carling의 부착 그리고 역변형을 주는 등 여러 방법이 현장에서 사용되고 있다(김상일, 1999). 여기에서는 변형제어방법으로서 구속을 하는 경우와 Carling을 부착하는 경우 그리고 구속과 Carling의 부착을 동시에 적용한 경우에 대해 그 효과를 살펴보았다.

4.1 구속하는 경우

Fig. 6의 시뮬레이션 결과를 참고해서 Fig. 4의 대상 평블록에서 변②④와 변①③에 연하여 발생하는 각변형과 y 방향으로의 수축을 감소시키기 위해 Fig. 4의 점①-⑥을 구속해 보았고, 그 결과를 Fig. 7에 표시하였다. 점⑤와 ⑥은 각각 변①③과 변②④의 중간위치이다. 본 평블록 모델에 대해 Fig. 6의 결과와 비교해서 수축량은 약 19~30% 감소되었지만, 각변형량의 감소에는 큰 효과가 없었다. 구속점이 있는 면에서 변형이 균일하지 않은데, 이는 구속점을 더 추가하면 변형의 수준이 낮으면서 이음선에 연하여 균일한 변형상태를 얻을 수 있을 것이다.

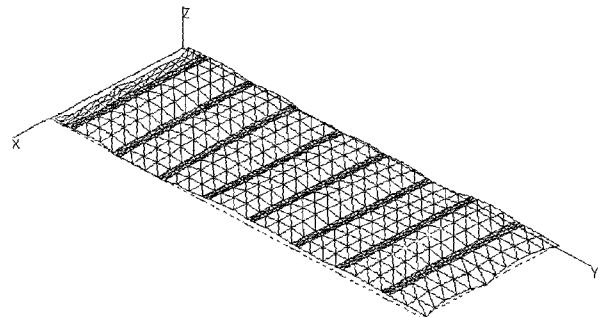


Fig. 7 Deformed shape when points ① to ⑥ in Fig.1 are restrained

4.2 Carling을 부착하는 경우

현재 현장에서 변형감소방법으로 많이 적용하는 것으로 Carling을 부착한 후 용접을 하게 된다. Carling을 부착한 효과를 보기 위해 변①③과 변②④에서 안쪽으로 300mm 떨어진 위치에 100×10mm FB Carling을 y 방향으로 부착한 경우를 시뮬레이션 하였다. Fig. 8은 시뮬레이션 결과인데, Fig. 6과 비교해 보면 각변형량 감소에 상당한 효과가 있음을 시각적으로도 알 수 있다. 본 시뮬레이터를 적용한 결과에 의하면 수축량 감소에는 큰 효과가 없으나, 각변형은 40% 이상의 감소효과를 주어 각변형량 감소에 상당한 효과가 있고 또한 Fig. 8에서 보듯이 변①③과 변②④에 연하여 적으면서 균일한 변형을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 Carling이 보강재의 역할을 하기 때문으로 보인다.

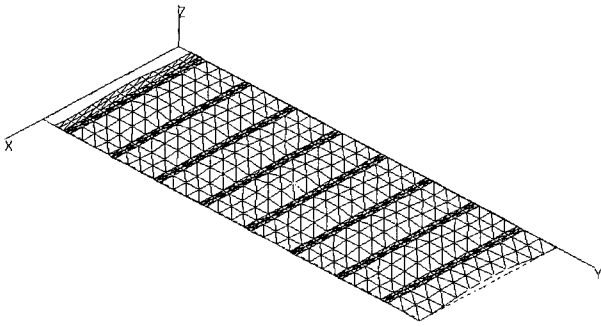


Fig. 8 Deformed shape when carlings are attached at $x=300$ and $1,900\text{mm}$

4.3 Carling 부착과 구속을 혼합한 경우

앞의 두 결과로부터 구속법은 수축량의 감소에, Carling의 부착은 각변형량의 감소에 효과가 있다는 점을 참고해서, 여기에서는 이 두 가지를 동시에 적용한 경우를 시도해 보았다. Fig. 4의 대상 평블록에서 점①~④인 네 모서리 점을 구속하였고 $x=1150\text{mm}$ 위치 즉, 판의 폭의 중간위치에 길이방향 (y 방향)으로 Carling을 부착하였다. 시뮬레이션 결과를 Fig. 9에 표시하였는데, 예상대로 수축량과 각변형량을 모두 감소하는 효과를 주었다. 수치적으로는 수축량이 18~30% 감소하였으며, 각변형량은 35% 정도의 감소 효과를 주었다. 그리고 변형제어법을 적용하지 않는 경우인 Fig. 6과 비교해 보면 변①③과 변②④에서의 변형이 비교적 더 균일함을 볼 수 있다.

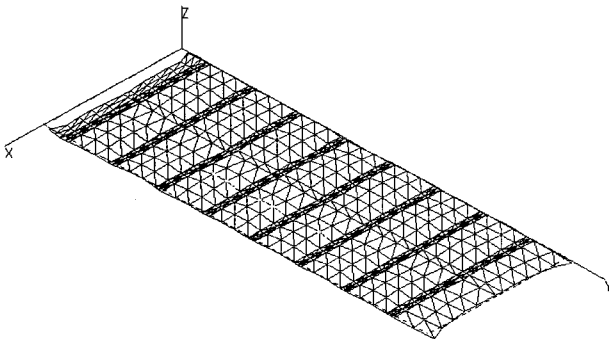


Fig. 9 Deformed shape when carling is attached at $x=1,150\text{mm}$ and when corner point ① to ④ in Fig.3 are restrained

5. 결 론

본 논문에서는 평블록의 용접변형 예측을 위해 개발한 시뮬레이터의 전반적인 내용을 기술하였으며, 이를 평블록의 용접변형예측과 변형제어방법을 적용한 효과의 추정에 적용하였다. 본 연구에서 개발한 용접변형예측 시뮬레이터는 시뮬레이션을 위한 기본적인 데이터 즉, 블록의 기하학적 형상, 용접선의 개수와 위치 그리고 용접조건 등만을 이용해서 수치해석에 필요한 데이터는 프로그램에서 자체적으로 생성하도록 구성하였고, 또한 시뮬레이션 결과를 시각적으로 확인할 수 있도록 되어 있어서 사용자의 편의성을 제고하였다.

현장에서 계속한 자료와의 비교를 통해 본 연구에서 개발한 시뮬레이터의 정도를 확인할 수 있었고, 구속법이나 Carling의 부착 등 변형제어방법의 효과를 반영할 수 있음을 보였다. 변형제어방법을 적용한 결과에 따르면 구속법은 수축량의 감소에, Carling의 부착은 각변형량의 감소에 효과가 있음을 발견하였다. 그러나 평블록의 형태가 달라지면 그 변형제어의 효과도 달라질 것으로 보인다.

여기에서 개발한 시뮬레이터를 다른 변형제어방법들의 효과도 반영할 수 있도록 보완한다면 블록 조립 전에 변형을 최소화 할 수 있는 방안을 마련하는 데에 충분히 실용적으로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 울산대학교 교비연구비 지원에 의해 수행된 과제로서 울산대학교의 연구비 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 김상일, 강중규, 조용관, 한종만 (1997). "Fillet 용접된 판의 열탄소성해석에 관한 연구", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 338-348.
- 김상일 (1999). 선체구조의 용접변형 제어법 개발, 공학박사학위논문, 울산대학교.
- 김상일 (2003). "FPSO선 Moon Pool 구조의 용접변형 해석에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제17권, 제3호, pp 27-32.
- 방한서, 임래수, 김종명 (1998). "고장력강 용접부의 열·역학적 거동에 관한 수치해석적 연구", 한국해양공학회지, 제12권, 제4호, pp 33-42.
- 신상범, 박윤기, 이동주 (2002). "선체 Upper Deck 제작시 변형 거동에 대한 연구", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp 409-412.
- 이주성 (2000). "평블록의 용접변형 제어", 한국해양공학회 춘계논문발표회 논문집, pp 205-209.
- Aoyama, K., Nomoto, T. and Takechi, S. (1997). "Basic Studies on Accuracy Management System for Shipbuilding", Proc. ICCAS'97, pp 323-338.
- Ichiji, M, Kohtake, S. and Kashima, H. (1985). "Computer Applications to Accuracy Control in Hull Construction", Proc. ICCAS'85, Trieste, pp 475-484.
- Kim, S.I., Han, J.M, Cho, Y.K. and Lee, J.S. (1997). "A Study of the Accuracy Control of Block Assembly in Shipbuilding - simulation of residual deformation due to fillet welding", Proc. ICCAS'97, Yokohama, Japan, pp 367-381.
- Masubuchi, K. (1980). Analysis of Welded Structures, Chap.7 Distortion in Weldments, Pergamon Press.
- Okumoto, T. (1994). "Study on Accuracy Control of Hull Structure", J. Ship Production, Vol 10, No 1, pp 51-58.

2003년 10월 7일 원고 접수

2003년 12월 2일 최종 수정본 채택