대 한 조 선 학 회 논 문 집
제41권 제1호 2004년 2월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 41, No. 1, pp. 55-63, February 2004

평블록의 용접변형예측 시뮬레이터

이주성†*

울산대학교 수송시스템공학부*

Simulator for Weld-Induced Deformation Prediction of Panel Blocks

Joo-Sung Lee†*

School of Transportation Systems Engineering, Univ. of Ulsan*

Abstract

This paper is concerned with the simulator to estimate deformation due to welding of panel blocks. An efficient computer program system has been developed which can be applied to estimation of weld-induced deformation under the given welding conditions. The theoretical background of the present simulator is described with the prediction model for the various type of weld-induced deformation. The developed simulator has been applied to estimation of weld-induced deformation in panel block assembly. This paper ends with some findings from applying the developed simulator.

※Key words: Accuracy Control (정도제어), Butt Weld (맞대기용접), Fillet Weld (필릿용접), Panel Block (평블록), Simulator (시뮬레이터), Weld-Induced Deformation (용접변형)

1. 서 론

선박건조과정에서 용접으로 발생하는 변형을 피할 수 없는 것이지만 후공정에서 작업시 취부작업 등에 소요되는 시간과 노력을 감소시키기 위해서는 현공정에서 유발되는 용접변형의 크기를 가능한 감소시키고 부재들 사이의 이음선을 따라서 발생되는 용접변형이 균일한 것이 되도록 하는 변형제어방법의 마련과 적용이 필요하다(이주성 1999, Kim et al. 1997, Okumoto/Matsuzaki 1994). 이러한 용접변형을 제어할 수 있는 방법을 고안하기 위해서는 블록 조립시 용접으로 발생되는 변형의 현상을 정량적으로 분석하는 연구가 선행되어야 할 것이다.

용접변형의 예측과 관련된 연구는 상용 패키지를 이용하거나 또는 자체적으로 개발한 컴퓨터 프로그램을 이용하여 열탄소성해석을 수행하는 연구(예: 김상일 2003a)와 용접변형의 종류에 따른 간이예측모델을 이용하고 각각의 변형형상에 등가되는 하중을 작용시켜서 해석하는 연구 (예: 김상

접수일:2003년 10월 14일, 승인일:2003년 12월 6일
† 주저자, E-mail: jslee2@mail.ulsan.ac.kr
Tel: 052-259-2162

일 등 1997, 김상일 2003b, 이주성 2000, 장창두/이창현 2000, Aoyama et al. 1997)로 구분될 수 있다. 열탄소성해석을 수행하면 정확도 측면에서는 유리할 수 있지만, 실제 블록모델에 적용할 때에는 수치해석을 위한 모델링과 해석시간이 방대하여 실용적인 측면과는 거리가 있다 (이주성 1999). 한편 간이예측모델을 이용하고 상용패키지로 시뮬레이션을 수행할 수 있으나 이 경우에도 블록의 형태에 따라 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 개발하고 이를 적용하는 것이 더 바람직할 것이다. 이에 본 연구에서는 평블록의 용접변형예측을 위한 기본적인 자료만 입력하고 수치해석에 필요한 정보들은 프로그램 내에서 자동적으로 생성될 수 있는 효율적이고 또한 사용자의 편의성을 제고를 고려한 시뮬레이터를 개발하였다.

이 논문에서는 평블록 조립시 맞대기용접과 필릿용접으로 발생하는 용접변형을 효율적이고 정도 높게 예측할 수 있는 시뮬레이터의 개발을 다루었다. 우선, 용접변형에 비교적 큰 영향을 주는 용접변형의 형태에 대해 시뮬레이터에서 도입한 간이예측모델을 다루었다. 특히 평블록 조립시에는 맞대기용접보다는 필릿용접이 상대적으로 많은 부분을 차지하고 조립 후 용접변형에 많은 영향을 주기 때문에 이에 대한 변형예측의 정도가 높고 보다 실제적인 현상을 반영할 수 있도록 개발한 간이예측모델을 도입하였다. 본 시뮬레이터에서는 2절에서 기술하는 용접변형형상에 대한 간이예측식에 주어진 용접조건을 대입하여 수축량, 각변형량 등이 구해지면, Fig.1에 보인바와 같이 이들을 용접선 근방의 용접선에 평행한 절점에 강제변위 조건으로 부여하는 방법으로 구조해석을 수행하여 변형의 결과를 구하였다. 본 연구를 통해 평블록의 용접변형을 효과적으로 예측할 수 있는 시뮬레이터가 개발되었으며, 이를 전형적인 형태의 평블록에 적용한 예를 보였다.

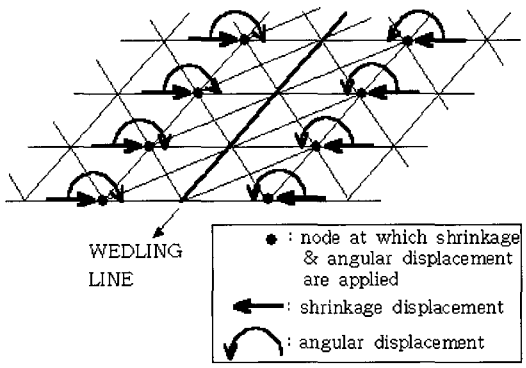

Fig. 1 Mechanical modelling

2. 용접변형 간이예측모델

용접변형은 기본적으로 판재가 놓여있는 면내에서 발생하는 변형인 면내변형과 그 면에서 벗어나는 방향으로의 변형인 면외변형으로 대분 되는데, 일반적으로 아래와 같이 구분한다.

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) 수축시 압축응력으로 인한 좌굴변형

실제로는 이러한 변형형태가 서로 복합적으로 작용을 해서 발생한다. 본 논문에서는 위에서 열거한 보인 용접변형의 형태중 용접변형의 결과에 비교적 큰 영향을 주는 a), b), c) 세 경우를 고려하였다. 곧, 용접선에 수직방향으로의 수축과 각변형인 횡수축과 횡각변형을 우선적으로 고려하였으며, 맞대기용접의 경우 필릿용접보다 단위 길이당 입열량이 많아서 면내 회전변형이 빈번히 발생한다는 점을 감안해서 맞대기용접 시뮬레이션에서 이 형태의 변형을 시연할 수 있도록 하였다.

용접변형에 대한 간이예측모델은 용접의 형태와 변형의 종류에 따라 다르며, 이에 대해서는 많은 연구가 수행되었는데, 본 연구의 시뮬레이터에서

사용한 것들을 다음과 같이 정리하였다.

2.1 맞대기용접의 변형

[1] 횡수축

맞대기용접으로 인한 횡수축, s_b은 실험결과를 토대로 유도한 아래의 식(1)을 이용하였다 (이주성 1999).

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

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

[2] 횡각변형

맞대기용접으로 인한 횡각변형, ϕ_b 에 대해서는 실험곡선으로서(Masubuchi 1980) Fig. 2에 보인 곡선을 자료로 이용하였는데, 이 곡선의 자료를 입력해서 입열량과 판의 두께가 주어지면 이에 해당되는 각변형을 보간법으로 구하였다. Fig. 2에서 ϕ는 개선각이고, Q와 D는 각각 단위 길이당 입열량 (kJ/cm)과 비용착열 (kJ/g)이다. P_b는 입열량계수이고 ϕ_{bo}는 무차원화 된 각변형량으로 아래의 식과 같이 정의된다.

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

$$\phi_{bo} = \frac{4.2}{D}\ \phi_b \qquad (2.b)$$

[3] 면내 회전변형

Fig. 3에 보인 면내 회전변형량, θ_z는 실험결과를 토대로 유도한 아래의 식(3)을 이용한다 (Masubuchi 1980).

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

여기에서 p는

$$p = \frac{Q}{t^{1.5}} \qquad (4)$$

로 정의되는 입열량 계수 (heat input parameter) 이다.

2.2 필릿용접의 변형

[1] 횡각변형

필릿용접으로 인한 각변형, ϕ_f 에 대해서는 실험결과나 열변형 해석결과를 토대로 다수의 모델

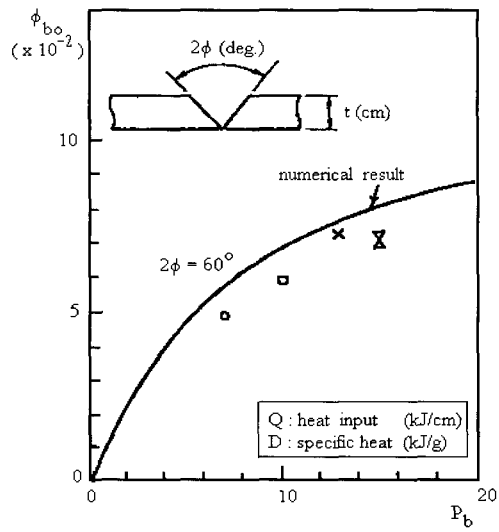

Fig. 2 Relation between heat input parameter and angular distortion due to butt weld

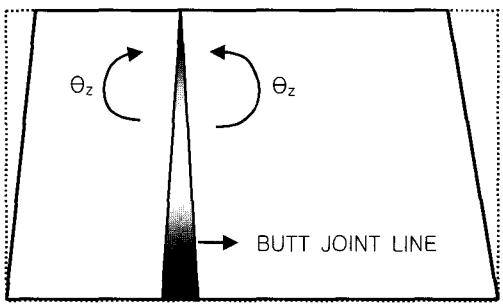

Fig. 3 Inplane rotational deformation due to butt weld

이 제안되어 있는데, 대개의 경우 용접선 길이방향으로의 평균값으로 제안되어 있다. 한편 실제 현장에서 필릿용접으로 인한 각변형은 Fig. 4에 보인 것과 같이 용접선의 길이방향으로 그 값이 변하는데 기존의 간이예측모델은 이러한 점을 반영할 수 없는 단점이 있어서, 이를 보완할 수 있도록 개발한 다음의 모델을 이용하였다 (이주성 2000).

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

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

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

여기에서 p는 식(4)로 정의되는 입열량 계수이고, Q는

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

로 주어지는 단위 길이당 입열량이다. 그리고 I, V, v는 각각 용접전류, 전압, 용접속도이다.

식(5)에서 $F(\cdot)$는 각변형에 대한 수정계수(correction factor)이고, w_f은 용접선의 길이이다. 수정계수 F는 용접선 방향으로 선형함수로

$$F(p, \frac{x}{w_f}) = C_0 + C_1(\frac{x}{w_f}) \quad (8)$$

와 같이 표현되는데, 계수 C_0와 C_1은 열변형 해석결과를 토대로 회귀분석법을 적용해서 유도한 것인데, 이주성 (2000)이 제안한 식의 편중계수(bias factor)가 영이 되도록 수정한 것이다.

$$C_0 = 1.022 - 0.0283p + 0.00102\, p^2$$
$$C_1 = 0.141 + 0.0544p - 0.00185\, p^2 \quad (9)$$

이 간이예측모델은 열변형 해석결과를 토대로 도출한 것으로서, 보는 바와 같이 용접선의 길이 방향으로 각변형의 변화를 고려할 수 있어서 기존의 모델들 보다 실제적이다.

이 간이예측모델과 열변형 해석 결과를 비교한 예로서 판 두께 t=15mm에 대한 것을 Fig.4에 보였다. 채워진 표시는 열변형 해석결과이고 채워져 있지 않은 표시는 식(5)로 추정한 것인데, 보는 바와 같이 좋은 일치를 이루고 있어서, 식(5) 이하로 주어지는 간이예측모델은 신뢰도 있게 시뮬레이터에서 도입할 수 있겠다.

[2] 횡수축

횡수축, s_f 역시 용접선의 길이 방향으로의 변화를 고려하는 모델을 이용해야 하는데, 실험이나 열변형 해석결과에 의하면 용접선의 시작점과 끝점에서 수축량의 차이가 무시할 수 있을 정도로 미소해서 균일한 것으로 간주해도 무방하다(이주성 1999, Kim et al. 1997). 이에 대한 모델은 아래의 식을 적용한다.

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

여기에서 p는 식(4)로 정의되는 입열량 계수이고, t 는 판의 두께이다.

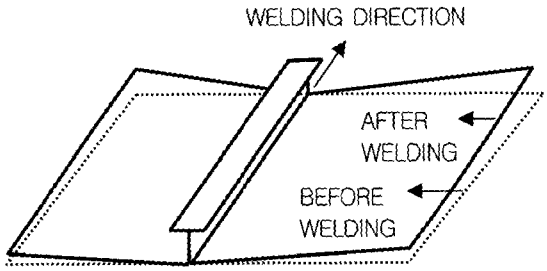

Fig. 4 Angular distortion along weld line

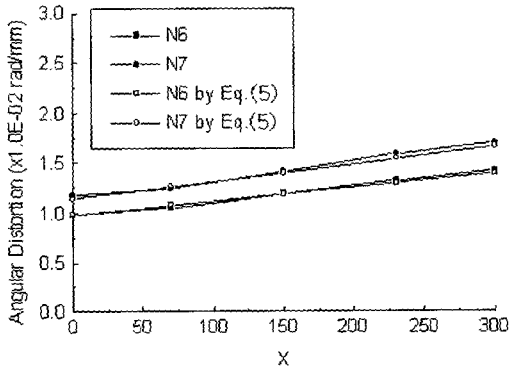

Fig. 5 Example of comparing angular distortion between the present model and the numerical analysis result (t=15mm)

3. 용접변형예측 시뮬레이터

3.1 개요

본 연구에서 개발한 시뮬레이터는 평불록 조립시 맞대기용접과 필릿용접으로 발생하는 변형을 예측하는 것으로서 다음과 같이 4개의 프로그램 모듈로 구성하였다.

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

이 프로그램 모듈들은 프로그램 모듈 관리 시스템에 의해 관리되며, Windows 환경에서 GUI의 개념을 이용해서 해당되는 기능을 시연할 수 있도록 개발하였다. 시뮬레이션을 위해 필요한 Data는

- 판의 크기와 두께 등 기하학적 형상을 정의하는 Data
- 맞대기용접선의 개수, 위치 및 용접조건
- 필릿용접선 즉, 보강재의 개수, 위치 및 용접조건

등이다.

시뮬레이션은 맞대기용접 시뮬레이션과 필릿용접 시뮬레이션으로 구분되며, 변형의 결과를 도출하기 위해 유한요소법을 이용한 구조해석을 수행하였다. 대상 평블록을 3차원 박판 구조물로 보아 6자유도 판 요소 (6-dof plate element)로 모델링하여, Fig. 1에 보인 바와 같이 용접변형형상에 대한 수축량과 각변형량을 간이예측식으로부터 구하여 용접선에 평행한 절점에 강제변위조건으로 부여하는 탄성해석을 수행하였다. 구조해석에 필요한 요소분할 Data, 하중조건, 경계조건 등 유한요소 Data는 맞대기 및 필릿용접선의 위치와 개수 그리고 용접조건과 판의 기하학적 특성을 나타내는 정보를 이용하여 프로그램 내에서 자동적으로 생성된다. 맞대기와 필릿용접선이 각각 2개와 6개인 경우에 대한 유한요소분할의 결과를 Fig. 6과 7에 보였다. 블록조립의 순서가 맞대기용접 후 필릿용접이면 필릿용접 시뮬레이션에서는 맞대기용접으로 인한 변형이 초기변형이 되어 이의 영향을 고려할 수 있어야 한다. 본 시뮬레이터에서는 필릿용접 시뮬레이션을 시행하기 전에 이를 위한 유한요소모델의 각 절점에서 맞대기용접 시뮬레이션의 결과를 이용해서 맞대기용접으로 인한 초기변형량을 추정하도록 구성하였다. 이때 필릿용접 시뮬레이션과 맞대기용접 시뮬레이션을 위한 유한요소의 분할결과가 다르고, 따라서 Fillet 용접 시뮬레이션을 위한 절점 위치가 맞대기용접 시뮬레이션을 위한 절점 위치와 일반적으로 다르다. 따라서 여기에서는 필릿용접 시뮬레이션을 위한 절점에서의 초기변위를 그 절점 부근에 있는 맞대기용

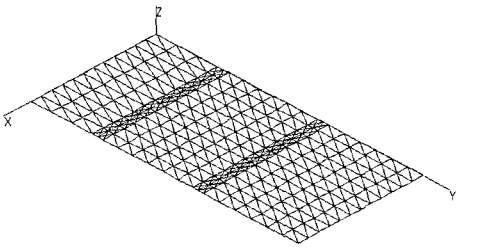

Fig. 6 Example of finite element mesh generation for butt weld simulation (no. of butt joint lines = 2)

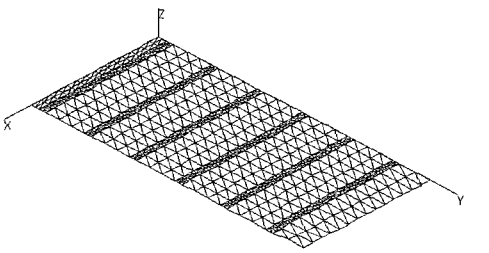

Fig. 7 Example of finite element mesh generation for fillet weld simulation (no. of fillet joint lines = 6)

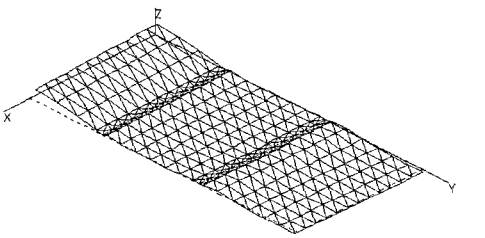

Fig. 8 Example of butt weld simulation result

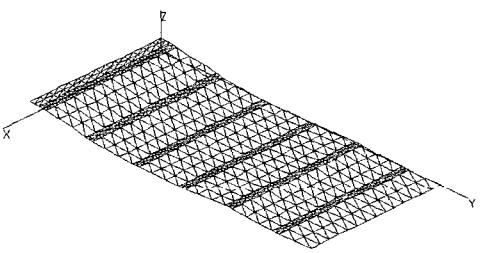

Fig. 9 Initial deformation due to butt weld simulation for fillet weld simulation

접 시뮬레이션을 위한 절점들의 변위를 Data로 해서 2차원 보간법으로 추정하였다. Fig. 8은 맞대기용접 시뮬레이션의 결과이고, 이러한 방법으로 추정한 필릿용접 시뮬레이션을 위한 초기변형 형상을 Fig. 9에 보였는데, 보는 바와 같이 본 연구에서의 방법이 맞대기용접으로 인한 변형형태를 잘 근사하고 있음을 알 수 있다.

3.2 실측 결과와의 비교

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

본 시뮬레이터에서 도입한 간이예측모델과 변형예측을 위한 역학적 모델링 등 시뮬레이터를 구성하는 이론적 배경과 시뮬레이션 방법의 정도를 보이기 위해 실제 현장에서의 계측결과와 시뮬레이션의 결과를 Table 1에서와 같이 비교하였다. Table 1에서 Model A와 Model B는 필릿용접시 각각 28극과 10극 자동용접기를 사용했음을 표시한다. t, s와 Q는 각각 판의 두께, 보강재 간격 그리고 단위길이당 입열량이다. 'measured result'는 계측결과로서 두 보강재 사이에 있는 판의 중간점에서 계측한 변위이고, 'simulated result'는 동일한 위치에서의 시뮬레이션의 결과이다. 'ratio'는 계측결과의 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.

4. 평블록에의 적용

4.1 대상 평 블록

개발한 시뮬레이터의 적용 예를 보여주기 위한 대상 평 블록을 Fig. 10에 보였다. 단위는 mm이고, 기본 데이터는 아래와 같다.

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

Fig. 10에서 'BUTT JOINT-1'과 'BUTT JOINT-2'는 각각 y=2,000과 4,600mm 위치의 맞대기용접선을 표시하며, y=200, 1,000, 1,800, 2,600, 3,400, 4,200, 5,000, 5,800에 표시된 L1~L8은 보강재 즉, 필릿용접선을 나타내는데 변①②와 변③④에서 안쪽으로 150mm 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

4.2 시뮬레이션 결과

평블록의 조립순서는 일반적으로

- 판재의 맞대기용접 후 보강재의 필릿용접
- 보강재의 필릿용접 후 판재의 맞대기용접

의 두 경우로 구분되고 상황에 따라 조립순서를 적용한다. 여기에서는 조립순서는 판재의 맞대기

용접 후 보강재를 필릿용접으로 조립하는 순서를 따라 시뮬레이션을 수행하였다.

[1] 맞대기용접 시뮬레이션

Fig. 10에 보인 대상 평 블록에 대해 Table 2에 주어진 용접조건에 따라 맞대기용접에 대한 시뮬레이션을 수행하면 그 결과를 Fig. 11과 같이 표현된다. 변형형상은 실제 형상을 50배 확대한 것이다. Fig. 11에서 보듯이 맞대기용접선 근처에서 변형이 크고 (예 : Fig. 11에서 타원으로 표시된 부분) 여기에서 멀어질수록 자중의 영향으로 변형이 작아진다. Fig. 12는 맞대기용접선 근처인 Fig. 11의 직사각형 부분을 확대하여 표시한 것인데, 맞대기용접선 근처에서 요철형태의 변형형상

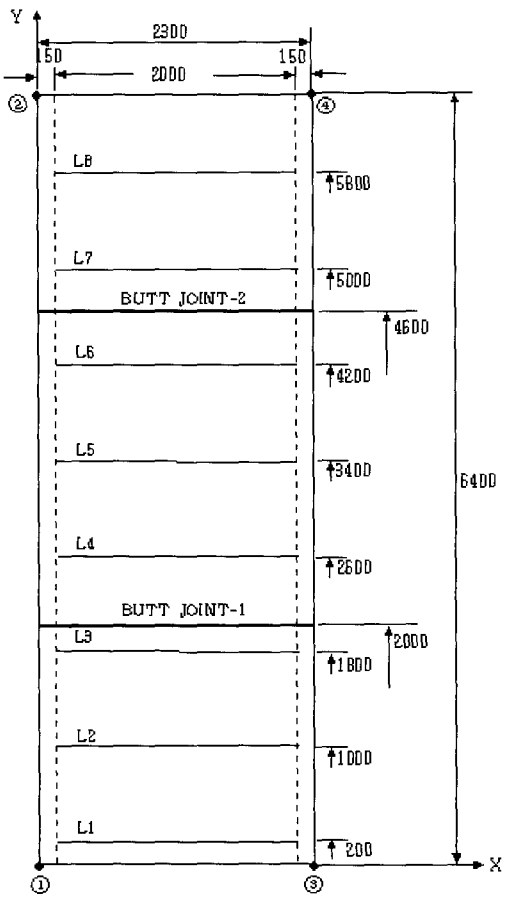

Fig. 10 Panel block model (unit : mm)

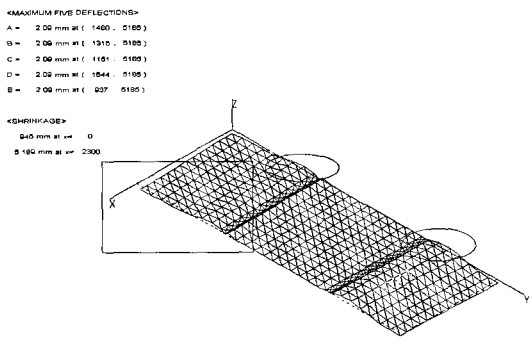

Fig. 11 Deformed shape after butt weld simulation

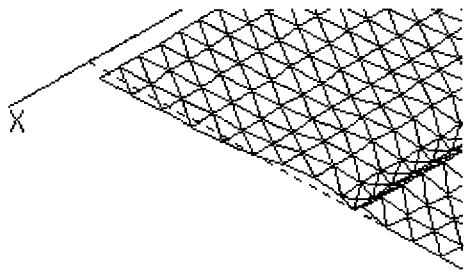

Fig. 12 Close up view around butt weld line

을 보이는데 이는 면내 회전변형 때문이다. 물론 면내회전변형은 맞대기용접시 어느 용접방법을 적용하느냐에 따라 달라지는데, 여기에서는 Fig. 3에 보인 것처럼 용접선의 끝점에서 압축이 되는 형태로 간주했기 때문에 이러한 요철형태의 변형이 발생한다. 본 시뮬레이터에서는 각변형이 최대인 위치와 그 크기 그리고 x축에 평행한 두 변에서의 수축량의 크기를 표시할 수 있도록 되어 있다. 이 대상 평블록의 경우 최대 변위는 약 2mm이고 용접선에 수직방향으로의 수축량은 약 6mm로 예측되었다.

[2] 필릿용접 시뮬레이션

대상 평블록에 대해 필릿용접 시뮬레이션을 수행한 결과를 Fig. 13에 표시하였다. 본 모델의 경우 Fig. 10의 변②④에 연하여 비교적 큰 각변형이 발생됨을 볼 수 있다. 타원으로 표시된 부분에서 비교적 큰 변형을 볼 수 있는데 이는 필릿용접

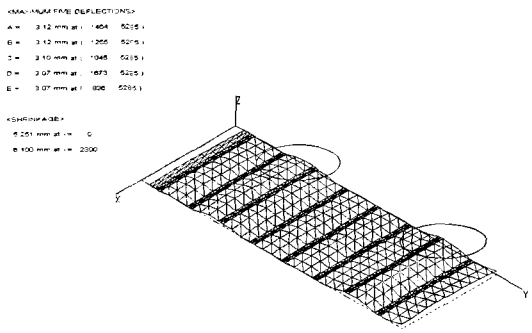

Fig. 13 Deformed shape after fillet weld simulation

에 의한 것이라기 보다는 맞대기용접으로 인한 초기변형 (Fig. 11에서 타원으로 표시된 부분)이 남아 있기 때문이다. 맞대기용접 시뮬레이션의 결과를 표시할 때와 마찬가지로 최대 각변형의 위치와 크기 그리고 용접선에 수직방향으로의 수축량을 표시하도록 구성되어 있다. 본 모델의 경우 맞대기용접부터 누적된 최대 각변형량은 약 3.1mm이고 수축량은 11.3mm로 예측되었다.

5. 결론

본 논문에서는 평 블록의 용접변형 예측을 위해 개발한 시뮬레이터의 전반적인 내용을 기술하였으며, 이를 평블록의 용접변형예측 적용하였다. 본 연구의 용접변형예측 시뮬레이터는 Data의 입력이나 결과의 확인을 그래픽 툴을 이용해서 이루어지도록 사용의 편의성을 제고하여 개발하였다. 현장에서 계측한 자료와의 비교를 통해 개발한 시뮬레이터의 정당성을 확인할 수 있었다. 평블록에 적용한 예에서 볼 수 있듯이 시뮬레이션의 결과를 시각적으로 용이하게 확인 할 수 있으며 용접변형의 결과로서 관심을 가질 수 있는 최대 각변형의 위치와 크기 그리고 수축량을 정량적으로도 표시할 수 있어서 실제 현장에서 유용하게 활용할 수 있을 것으로 보인다. 현재의 시뮬레이터에서 도입한 간이예측모델 보다 더 합리적이고 정도 높은 간이예측모델을 사용한다면 본 시뮬레이터의 신뢰도는 더 향상 될 것이다.

본 연구에서 개발한 시뮬레이터를 실제 평 블록 모델에 적용하고 보완한다면 보다 실용적인 시스템으로 개발될 것이고, 이어서 곡 블록의 변형예측을 위한 시스템으로도 확대하여 개발될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 김상일, 조용관, 이주성, 1997, "간이해석법을 이용한 평 블록의 용접변형 예측," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 271-276.
- 김상일, 2003a, "필릿용접변형에 대한 간이 예측 모델 개발," 대한조선학회 논문집, 제40권, 제2호, pp. 49-56.
- 김상일, 2003b, "필릿 용접된 거더와 종통재 구조의 용접변형 예측," 대한조선학회 논문집, 제40권 제2호, pp. 57-62.
- 이주성, 1999, "용접변형 및 수축 예측 전산 시스템 개발," 현대중공업-울산대학교 산학협동 연구과제 최종보고서.
- 이주성, 2000, "평블록의 용접변형 제어," 한국해양공학회 춘계논문발표회 논문집,pp.205-209.
- 장창두, 이창현, 2000, "선체블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구," 대한조선학회 논문집, 제37권, 제2호, pp. 127-136.
- Aoyama, K., Nomoto, T. and Takechi, S., 1997, "Basic studies on accuracy management ystem for shipbuilding," Proc. ICCAS '97, pp.323-338.
- 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. and Matsuzaki, S., 1994, "Study on accuracy control of hull structure," J. Ship Production, SNAME, Vol.10, No.1, pp. 51-58.

< 이 주 성 >