

## Local & Global 모델을 이용한 용접구조물 변형 해석에 관한 연구

장 경 복\* · 조 시 훈\* · 장 태 원\*

\*삼성중공업 거제조선소 생산기술 연구소 용접연구

### The Analysis of Welding Deformation in Large Welded Structure by Using Local & Global Model

Kyoung-Bok Jang\*, Si-Hoon Cho\*\* and Tae-Won Jang \*\*\*

\*Welding Research Part, Institute of Industrial Technology, Samsung Heavy Industries Co. Ltd., Geoje-si 656-710 Korea

#### Abstract

Some industrial steel structures are composed by components linked by several welding joints to constitute an assembly. The main interest of assembly simulation is to evaluate the global distortion of welded structure. The general method, thermo-elasto-plastic analysis, leads to excessive model size and computation time. In this study, a simplified method called "Local and Global approach" was developed to break down this limit and to provide a accurate solution for distortion. Local and global approach is composed of 3 steps;

- 1) Local simulation of each welding joint on a dedicated mesh (usually very fine due to high thermal gradients), taking into account for the non linearity of the material properties and the moving heat source.
- 2) Transfer to the global model of the effects of the welding joints by projection of the plastic strain tensors.
- 3) Elastic simulation to determine final distortions in global model.

The welding deformation test for mock-up structure was performed to verify this approach. The predicted welding distortion by this approach had a good agreement with experiment results.

\* Corresponding author : kb1221.jang@samsung.com

(Received July 6, 2004)

Key Words : Global distortion, Thermo-elasto-plastic analysis, Local and global approach, Plastic strain tensor

#### 1. 서 론

조선·해양 구조물 제작에 있어 코스트 절감, 생산 자동화를 통한 생산성 향상을 위해 반드시 확보되어야 하는 것이 블록 정확도의 확보이다. 이러한 블록 정확도 확보를 위해서는 블록변형을 최소화하는 적절한 작업조건의 확보, 용접변형의 제어 등이 필요하다. 특히 선체 및 해양 구조물 제작 공정의 대부분을 차지하는 용접에 의해 발생하는 변형은 정확도, 강도 뿐 아니라 제품의 미관에도 영향을 미치는 인자로 품질 및 생산성 확보를 위해 반드시 제어되어야 하는 부분이다. 그러나, 용접변형은 부재의 형상·치수, 재질뿐 아니라 용접조건이나 구속조건, 용접순서 등의 제품 제작 전 공정에

걸친 복합적인 인자의 영향을 받기 때문에 이를 제어하기란 쉽지 않다<sup>1-3)</sup>.

현업에서 구조물 제작 시 변형이 허용 변형량을 초과하는 경우 변형 교정을 위해 상당한 추가 공수가 투입되기 때문에 변형의 제어를 통한 정확도 확보는 생산성 향상에 필수적인 요소이다. 그러나, 현업의 경우 코스트 또는 공작상의 이유로 각 공정에서 변형을 원하는 수준으로 제어하기란 쉽지 않으며 변형의 제어 방안도 대부분 작업자의 경험에 의한 방법으로 대처하고 있어 때로는 시행착오에 의해 상당한 비용의 손실이 발생하고 있는 실정이다.

이러한 경우 가상제조(Virtual Manufacturing) 기술이 필수적이며 이의 기반이 되는 것이 용접변형 시뮬레이션을 통한 변형 예측 기법의 정립이다. 최근 용접

변형의 제어를 위해서 시뮬레이션 기법의 적용은 필수적이 되었으며, 컴퓨터의 발달로 용접현상을 정밀하게 해석하기 위한 3차원 열탄소성 해석이 대부분 모델에서 가능하게 되었다. 그러나, 아직까지 선박 블록과 같은 대형구조물의 3차원 열탄소성 용접해석은 거의 불가능하다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 실험적 연구<sup>4)</sup> 외에 등가하중법<sup>5-7)</sup>, 간이 열탄성 해석법<sup>8-10)</sup>, 고유변형도법<sup>11-12)</sup> 등과 같은 간이 해석법에 관한 많은 연구가 진행되어 왔으며 각 해석법은 고유의 장·단점을 지니고 있다.

간이 해석법의 선택은 해의 정확도와 효율성에 의해 좌우된다고 볼 수 있으므로 산업체마다 각자의 노하우가 담겨진 다양한 해석법을 적용하고 있는 실정이다. 이러한 시점에서 해의 정확도를 유지하면서 보다 효율적인 해석법의 정립이 필요하다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 선박·해양플랜트와 같은 대형구조물의 효율적 용접변형 해석을 로컬&글로벌 모델(Local & Global Model)을 이용한 해석적 접근법의 적용 가능성 및 타당성을 검토하고자 하였다.

### 2. Local & Global Model의 개념

대형 용접 구조물의 변형해석의 목표는 효율적이면서 정확한 해석 결과를 도출하는 것이다. 또한, 적은 계산 시간으로 정확도가 높은 해석 결과를 얻어내야 한다. 적은 계산 시간이라는 측면에서 지금까지 많이 적용되어 온 대표적인 해석법이 등가하중법이며, 그 외에 고유변형도법 및 등가 열팽창계수법 등이 개발되어 왔다. 그런데, 이러한 해석법들은 모두 기본적으로 용접조건에 따른 변형량에 대한 데이터가 필수적이며 그 정확도에 의해 해석의 정확도가 결정되기 때문에 정밀한 변형 해석 결과를 도출하는 것이 쉽지는 않다. 이에 반해 Local & Global 모델의 개념은 기본적으로 용접부 단면(macro section)에 대한 정보만 있으면 정확한 변형 해석을 수행할 수 있게 되며 해석 모델은 크게 해의 정확성을 위한 로컬 모델과 해석의 효율성을 위한 글로벌 모델로 이루어진다.

실질적으로 용접에 의한 열탄소성 효과는 Fig. 1과 같이 용접부 근방에 국한되며, 나머지 부분은 탄성 거동을 한다고 볼 수 있기 때문에 이러한 접근이 가능하다. 즉, 로컬 모델의 열탄소성 해석 결과에서 용접부

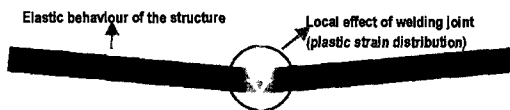


Fig. 1 Local effect in simple butt joint

근방에 존재하는 소성변형률 텐서(plastic strain tensor)를 추출하여 글로벌 모델의 동일 영역에 부여하고 이로 인해 발생하는 하중에 대한 탄성해석을 수행하는 것이다. 이러한 방법에 의하면 용접 모델의 정확성에 대한 검토는 로컬 모델에서 충분히 이루어질 수 있으며, 글로벌 모델의 해석은 이렇게 검증된 로컬 모델의 해석 결과를 효율적으로 부여해줄기만 하면 된다. 대형 용접구조물의 변형 해석을 이처럼 로컬&글로벌 모델로 나눔으로서 해석 결과를 고정도로 유지하면서 해석모델의 크기 제한을 극복할 수 있어 선박 블록과 같은 대형 용접구조물 변형을 최소화하는 용접순서나 구속조건 등을 효율적이면서 다양하게 검토해 볼 수 있다.

### 3. 실험

본 연구의 해석 모델은 Fig. 2와 같이 판재 용접된 주판에 2개의 길이방향 및 1개의 횡방향 보강재가 부착되는 mock-up 시험편이다. 시험편은 편 간격이 800 mm으로 균일하게 설치된 정반 위에 올려놓고 용접하였으며 용접 순서는 주판 맞대기 용접, 길이방향 보강재 용접, 그리고 횡방향 보강재 용접 순이다. Fig. 3은 용접 전의 수평도를 맞추기 위한 Fit-up 작업을 나타내며, Fig. 4는 용접 후 시험편의 최종 형상 및 3차원 계측기를 이용한 변형 계측을 나타내며, Fig. 5는 용접 순서 및 변형 계측 위치를 나타낸다.

Table 1은 mock-up 구조물 제작 시 사용된 용접 조건을 나타낸다. 주판 맞대기 용접은 총 패스 수 4층

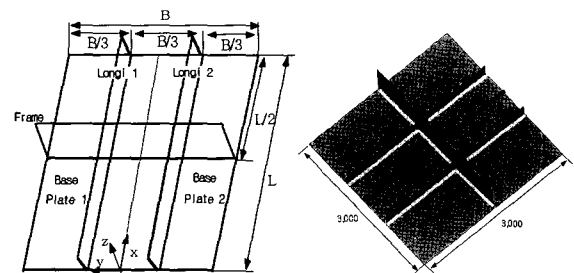


Fig. 2 Shape and dimension of mock-up specimen



Fig. 3 Forced fit-up for alignment before welding

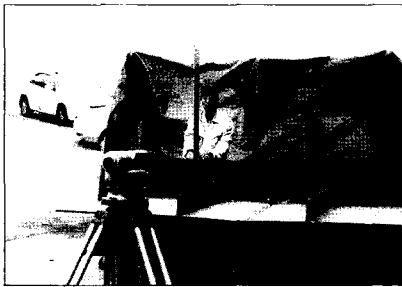


Fig. 4 Final deformed shape after welding and deformation measurement

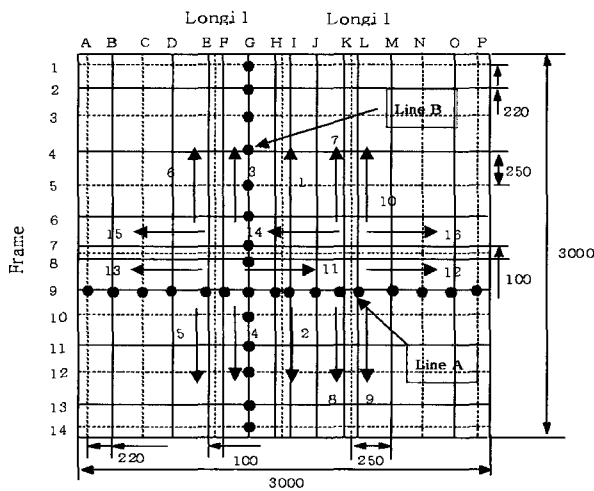


Fig. 5 Measurement point and welding sequence in mock-up specimen

Table 1 Welding conditions

	Pass No.	Ampare (A)	Voltage (V)	Velocity (mm/s)	Leg length (mm)	Method & Material
BUTT WELDING	1	220	28	3.1	-	FCAW DW-100 (1.4φ)
	2 ~ 4	290	32	4.3		
FILLET WELDING	1	240	26	7.8	4.5mm	

의 다층 용접이며 필릿 용접은 4.5mm 각장 기준이다. FCAW 용접이 적용되었으며 DW100 1.4φ 와이어가 사용되었다.

#### 4. 해석법의 적용

##### 4.1 로컬 모델 선정 및 계산

본 해석 모델의 경우 용접부 조인트 형상이 크게 두 가지로 구분되므로 로컬 모델은 두 가지로 선정할 수 있다. 주판의 맞대기 용접부와 보강재의 필릿 용접부가 그것이다. Fig. 6는 전체 모델에서 이러한 로컬 모델의 선정을 나타낸 것이다.

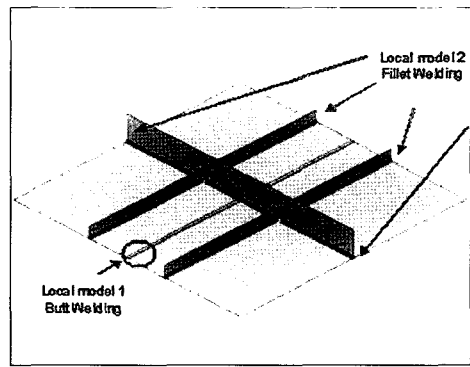


Fig. 6 Choice of local model in global model

여기서 주판 맞대기 용접부의 경우 다층 용접이 이루어지므로 로컬 모델이라 할지라도 3차원 해석을 하게 될 경우 상당한 계산시간이 요구되므로 2차원 모델로 해석하였다. 이러한 로컬 모델에 대해서는 용접부 근방의 소성변형을 텐서(plastic strain tensor)를 구하기 위해 열탄소성 해석이 이루어지는데, 열전달 해석 단계에서 실제 시험편의 매크로 단면과 가장 유사한 조건의 입열 모델이 선정되고 이를 토대로 변형해석이 수행어진다. 즉, 대상 모델의 조인트에 해당하는 매크로 단면을 토대로 로컬 모델의 튜닝 과정이 이루어진다. Fig. 7은 로컬 모델의 계산 및 튜닝 과정을 나타내는 모식도이다.

Fig. 8(a)는 맞대기 용접부 로컬 모델의 요소 형상 및 해석 결과를 Fig. 8(b)는 필릿 용접부 결과를 나타내는 것으로 상당 소성변형을 분포를 보여주고 있다.

##### 4.2 글로벌 모델의 계산 및 결과

Fig. 9은 글로벌 모델의 요소 형상을 나타낸 것으로 로컬 모델의 결과가 부여되는 영역은 로컬 모델의 요소 밀도와 동일한 솔리드(solid) 요소이며 나머지 부분은 셸(shell) 요소로서 구성되어 있다. 솔리드 부분은 로

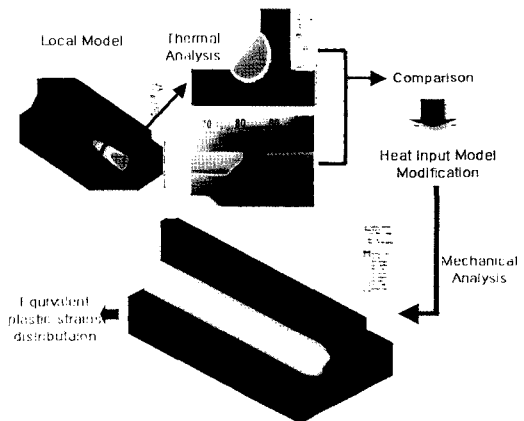


Fig. 7 Flow scheme for local model computation

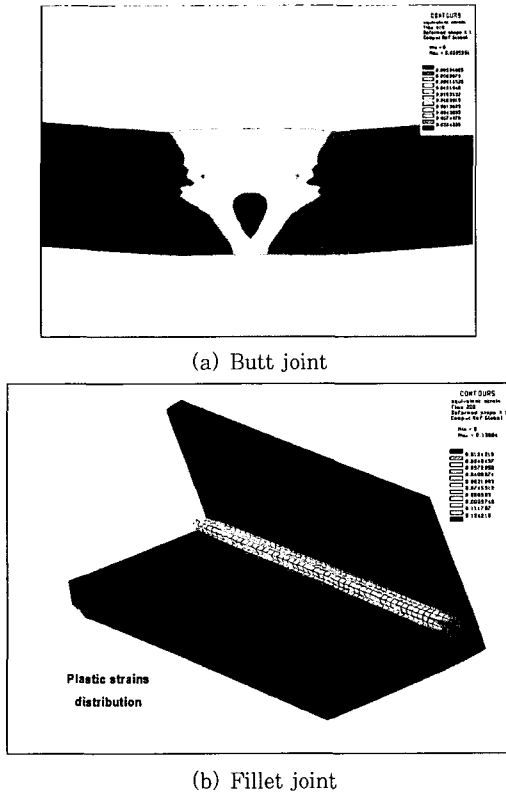


Fig. 8 Analysis result of local model(Equivalent plastic strain distribution)

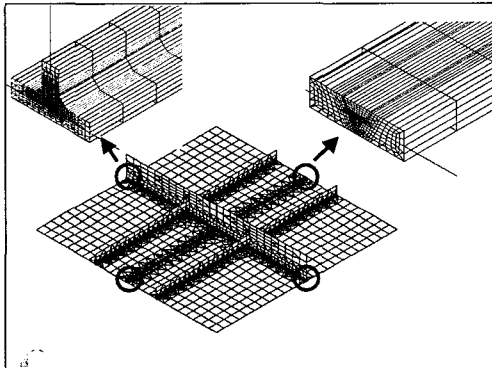


Fig. 9 Mesh generation of global model

컬 모델에서 소성 변형을 텐서가 추출되는 영역과 동일한 요소 형상을 지니며 해의 정확성을 위한 영역으로 볼 수 있고 나머지 셀로 이루어진 부분은 실질적으로 소성변형률이 발생하지 않는 영역으로 해석 시간을 줄이기 위해 셀 요소로 모델링 되었다.

이렇게 로컬 모델의 소성변형을 분포가 글로벌 모델에 부여되고 난 뒤에는 탄성 해석이 이루어지므로 해석 시간의 제한은 없다고 볼 수 있다. 그러나, 보다 효율적인 방법이 되기 위해서는 글로벌 모델이 완전히 셀 요소로 이루어질 필요가 있으며 이를 위한 추가적인 연구가 필요하다.

Fig. 10는 용접 순서의 영향을 고려하지 않고 모든 용접부가 동시 용접된다고 가정했을 경우의 해석 결과로서 처짐량을 나타낸다. 최대 처짐량은 20.3mm로 길이방향 보강재 위치에서 발생한다.

Fig. 11은 실제와 같은 용접순서(Fig. 5 참조)와 동일한 조건으로 해석한 결과로서 처짐량 분포를 나타내는데 최대 처짐량은 22.7mm로 나타났다. Fig. 12는 실제 측정 위치인 A, B 라인(Fig. 5 참조)에서의 실험 및 해석 결과의 처짐량을 비교하여 나타낸 것이다. 변형 형상은 일반적인 관찰되는 양상이며 해석 결과와 실험치는 정량적으로도 상당히 유사한 결과를 보여주고 있어 본 연구에서 제시하는 로컬&글로벌 모델의 타당성을 확인할 수 있었다. 그러므로, 본 모델을 선체 블록과 같은 대형 구조물의 용접변형을 예측하기 위한 해석법으로 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 선박 및 해양 플랜트와 같은 대형 용접구조물의 효율적 용접변형 해석을 위해 로컬&글로벌 모델을 이용한 해석적 접근법을 제안하고 이에 대한 적

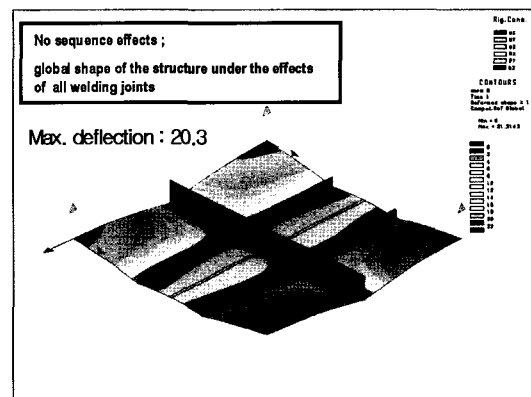


Fig. 10 Deflection distribution for no sequence effect

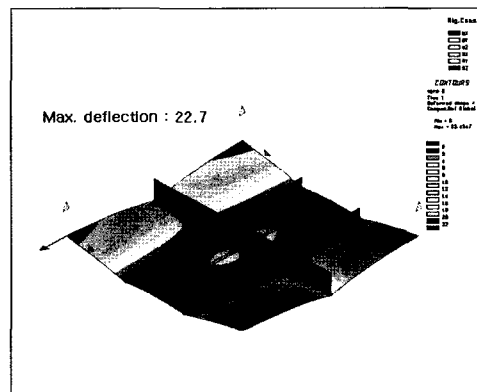
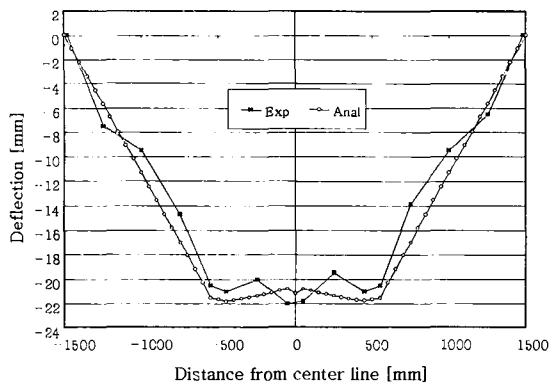
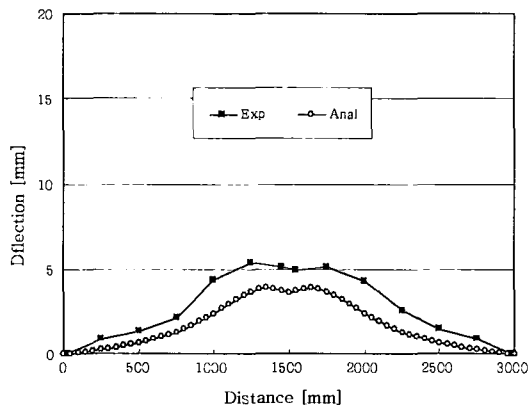


Fig. 11 Deflection distribution for welding sequence in mock-up specimen



(a) Line A



(b) Line B

Fig. 12 Comparison between experiment and analysis result for deflection

용 가능성 및 타당성을 mock-up 구조물의 제작을 통해 검증하였으며 얻어진 주된 결과는 다음과 같다.

1) 실질적으로 용접에 의한 열탄소성 효과는 용접부 근방에 국한되며, 나머지 부분은 실질적으로 탄성 거동을 하기 때문에 해석 대상 모델을 해의 정확성을 위한 열탄소성 해석이 수행되는 로컬 모델과 해석의 효율성을 위해 탄성해석이 수행되는 글로벌 모델로 나누어 접근하는 방법이 가능하다.

2) Mock-up 구조물 모델에 대해 로컬&글로벌 모델을 적용한 결과 변형 형상 뿐 아니라 변형량에 대해서도 실험 결과와 상당히 유사한 결과를 나타내었다.

3) 본 모델이 보다 실용적이 되기 위해서는 글로벌 모델을 완전히 셀로 구성할 필요가 있으며 이를 위해 솔리드 요소로 구성된 로컬 모델의 결과를 셀 요소로 이루어진 글로벌 모델의 특정 영역에 부여하는 방법에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 참고 문헌

1. Koichi Masubuchi : Analysis of Welded Structures, pregamon Press, 1980
2. Koichi Masubuchi : Research Activities Examine Residual Stresses and Distortion in Welded Structures. Welding Journal, Dec. (1991), 41-47
3. Satoh, K and Terasaki : Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Welded Structural Materials, Journal of the Japanese Welding Society, 45-4 (1976)
4. K. W. Mahin, W. Winters, and R. R. Hosbons : Prediction and Measurement of Residual Elastic Strain Distribution in Gas Tungsten Arc Welds, Welding Journal, Sep. (1991), 245~258
5. Fujita, Y. and Nomoto, T. : Studies on the Thermal Elastic Plastic problem(1st Report), Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 130, 1972, 183-191
6. Nomoto, T., Takechi, S. and Aoyama, K. : Basic Studies on Accuracy Management System Based on Estimating of Weld Deformations, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 181, 1997
7. J.H.Hur and S.I.Kim : Development of Welding Distortion Control Method for Thin Panel Block Structure(I), Journal of KWS, 21-4 (2003), 75-79
8. Y.K.Park, S.B.Shin and D.J.Lee : A Study on the Welding Deformation of Ship Structures using Simplified Thermo-elastic Analysis, Proceedings pf the 2001 Annual Autumn Meeting of KWS, 2001, 274-276 (in Korean)
8. Y.K.Park, S.B.Shin and D.J.Lee : A Study on the Welding Deformation of Ship Structures using Simplified Thermo-elastic Analysis, Proceedings pf the 2001 Annual Autumn Meeting of KWS, 2001, 274-276 (in Korean)
9. S.I.Seo : A study on the prediction of deformation of welded structures, Journal of KWS, 15-5 (1997), 64-73 (in Korean)
10. Ueda, Y. and Yamakawa, T., : Analysis of Thermal Elastic-plastic Behavior of Metals during Welding by Finite Element Analysis Method, Journal of the Japanese Welding Society, 42-6, 1973
11. Murakawa, H. and Luo, Y. and Ueda, Y, Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Str(FIRST REPORT) Mechanism of Inherent Strain Production, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 180, 1996.
12. C.D.Jang and C.H. Lee : A Study on the Prediction and Control of Welding Deformations of Ship Hull Blocks, Society of Naval Architects of Korea, 37-2 (2000), 127-136 (in Korean)