

유한요소법을 이용한 박판 맞대기 용접부 잔류응력 및 균열 해석

심광보* · 배홍열* · 전준영* · 송태광* · 김운재**

* 고려대학교 기계공학과

Welding Residual Stress Determination and Crack Analysis in Butt-Welded Thin-Walled Plate by Finite-Element Method

Kwang-Bo Shim*, Hong-Yeol Bae*, Jun-Young Jeon*, Tae-Kwang Song* and Yun-Jae Kim**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received December 9, 2009 ; Revised March 8, 2010 ; Accepted March 9, 2010)

Key Words : Welding Residual Stress(용접 잔류응력), Thin-Walled Plate(박판), Finite Element Method (유한요소법)

초록: 본 논문은 박판 맞대기 용접부 잔류응력을 3 차원 유한 요소법을 이용해서 모사하였다. 경계조건이 잔류응력에 미치는 영향을 연구하기 위해 다양한 경계조건이 고려되었으며, 예측된 용접 잔류응력은 기존 문헌의 내용과 비교 검증하였으며, 본 연구의 결과는 박판 용접부 균열에 발생하는 잔류응력의 영향을 해석하는데 사용될 것이다.

Abstract: In this study, we calculate the welding residual stresses for a butt-welded thin-walled plate by carrying out three-dimensional finite-element analyses. To study the effect of mechanical boundary conditions on the welding residual stresses, various boundary conditions are considered. The welding residual stresses obtained in the measurements and finite-element analyses are validated by comparing them with the welding residual stress profiles in the R6 code. The results of this study are used to analyze the influence of residual stress on the crack formation in thin-section weldments.

1. 서론

현대 사회는 다양한 구조물과 다양한 운송 수단에 묻혀서 삶을 살아가고 있다. 이러한 다양성 속에서 금속 구조물은 현대 사회를 이루는 근간이 됨은 의심할 나위가 없으며, 이러한 금속 구조물들은 다양한 방식으로 접합함으로써 그 형태를 이루게 된다. 그 다양한 접합 방법 중 하나가 용접으로 이는 금속과 금속을 서로 맞붙여 금속 사이를 용접재를 이용하여 강한 열로 접합시키는 맞대기(butt weld) 접합이 대표적인 경우이다. 다양한 구조물에서 이러한 용접방식이 사용되어지고 있는데, 이러한 접합 구조물의 안전성을 위해서는 용접부에 대한 안전성이 우선 확보되어야 하며, 이를 위해서 다양한 방법으로 용접부에 대한 신뢰성 검증이 진행되어지고 있다.

이러한 상황에서 최근에 선박과 같은 구조물에서

연료의 효율성 및 속도 증가를 위해서 선박의 전체적인 무게를 감소시키려고 하고 있으며, 이러한 요구는 사용되어지는 철판(panel)의 두께를 점점 얇아지도록 만들고 있는 상황이다.

이러한 현실에서 잘못된 설계로 인해서 얇은 철판(panel)들의 맞대기 용접을 진행하여 접합함에 있어서 용접 진행간 발생하는 열 응력에 의해서 과도한 변형이 일어나며, 이를 보정하기 위해서 막대한 수선비용을 초래하는 경우가 발생하고 있다. 이러한 문제들을 사전에 예방하기 위해서는 다양한 용접재, 용접방법에 대한 실험을 통해서 올바른 설계가 진행되어야만 한다.

그러나, 이러한 실험을 진행하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소모되는 바 이러한 단점을 보완하기 위해서 다양한 방법의 시뮬레이션이 진행되고 있다. 본 연구에서는 실제 실험을 진행하지 않고도 실제 용접에서 발생할 수 있는 잔류응력을 예측할 수 있는 박판용접(thin section weld)을 모사할 수 있는 모델링 기법을 제시하고자 한다. 이를 위해서 2D 와 3D

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr

모델링을 통해서 박판용접(thin section weld)을 모사하였으며, 다양한 경계조건을 적용하여 이에 따른 잔류응력 값들을 비교하였다.

유한요소 해석은 Fig. 1 과 같은 형태의 두께 4mm 의 박판에 대해서 모델링 진행하였으며, 재료 물성치들은 DH36 강(steel)의 값들이 사용되어졌다. 사용 되어진 시뮬레이션 tool 은 ABAQUS 6.7 이며, 앞서 이야기 했듯이 용접 후 잔류응력에 대한 예측이 수행 되어졌고, 이러한 예측 값들은 문헌상의 실험값 및 해석 값들과 비교하여 방법의 유의성 검증을

수행하였다.

2. 재료물성 및 유한요소 모델링

금번 연구에 사용된 재료 물성은 Fig. 2,3 과 같으며, 해석상 편의를 위해서 용접재와 모재를 동일한 재료인 DH36 steel 로 가정하여 해석을 진행하였다. 모델링은 500mm x 250mm 의 서로 다른 모재의 맞대기 용접을 모사하였으며, 용접시 두 모재간의 간격은 4mm 로 지정하여 모델링 진행하였다.

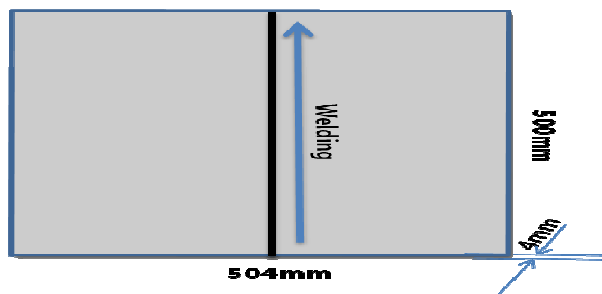


Fig. 1 Schematic illustration of butt welded plate geometry

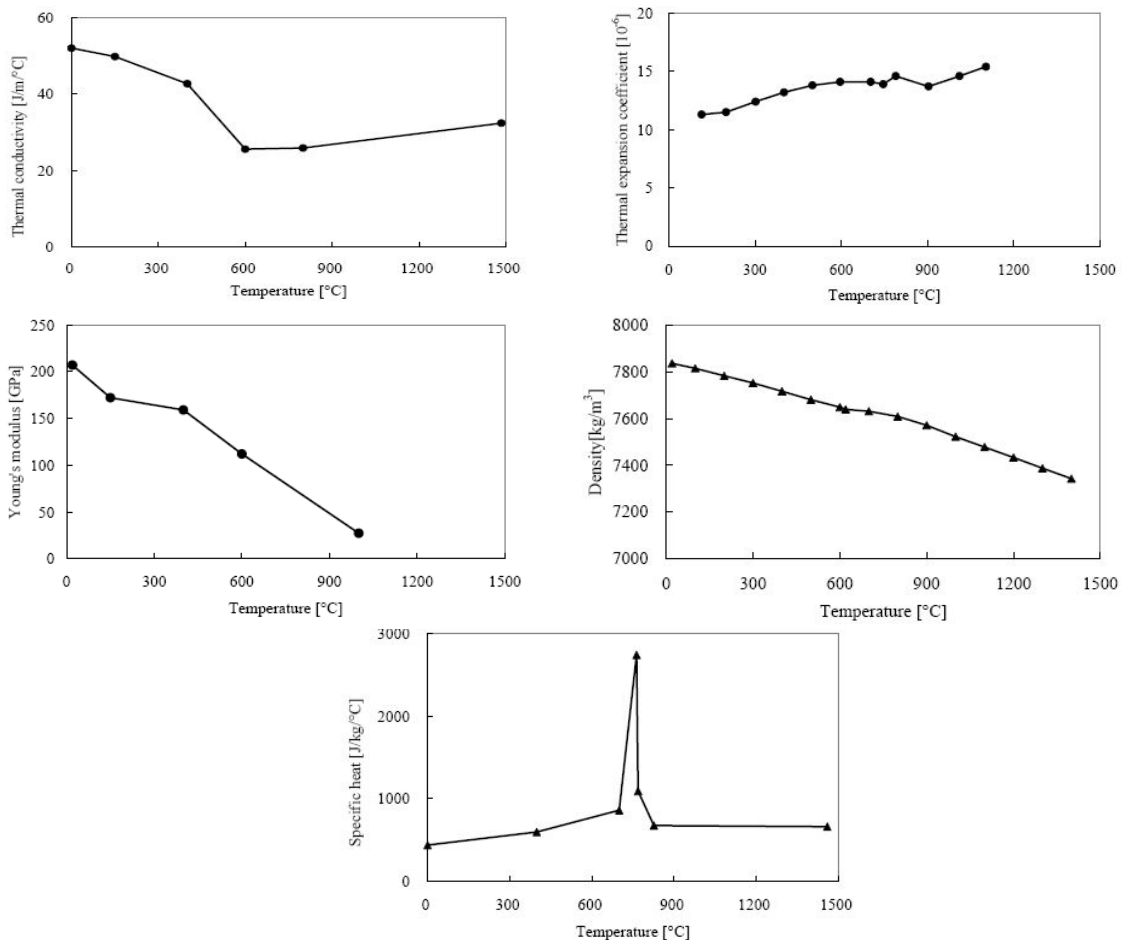


Fig. 2 Material properties of DH36

2.1 유한요소 모델링

용접 과정에 대한 유한요소 해석은 상용 프로그램인 ABAQUS 6.7 을 사용하였으며, 1 차적으로 열 해석을 진행하여 열 분포(thermal profiles)을 획득하고, 2 차적으로 열 분포(thermal profiles)을 이용하여 모재 및 용접재에 발생하는 응력(stress), 변형(strain), 변위(displacement)를 해석하는 기계적인 해석의 순으로 진행하였으며, 본 연구에서는 2D 와 3D 모델을 만들어 기존 문헌 내에 있는 실험값들과 본 연구에서 진행된 응력(stress)값들을 일차적으로 비교하여 본 연구에서 수행한 해석 방식에 대한 검증은 진행하였다.

본 연구에서는 2,3D 모델 모두 50 개의 용접 점으로 용접을 진행하였으며, 열해석과 기계해석에서 2D 모델은 DC2D4 와 CPS4 방식을 사용하였으며, 3D 모델은 DC3D8 과 C3D8 방식을 사용하였다. 일차적으로 유한요소 해석 결과와 문헌상의 값을 비교하였으며, 열해석 시 8 절점(node)와 20 절점(node) 방식에 따른 해석 차이를 확인하였다. 마지막으로 경계조건에 따른 유의 차를 확인하기 위해서 4 가지 방식의 경계 조건을 적용하여 해석을 진행하였으며, 용접재에서 온도 측정 부위는 Fig. 3 의 BT1, BT3 지점에서 측정하였다.

경계 조건은 Fig. 5 의 4 가지 형태로 변경하여 각 조건별로 응력 발생에 대한 검증은 진행하였다.

2.2 열해석

열해석을 위한 재료 물성들은 재료의 열전도, 비열, 잠열, 밀도 등이 필요하며, 이들에 대한 값들은 Fig. 2 에 잘 나타나 있다. 앞서 언급하였듯이 모재와 용접재는 동일한 소재로 가정하여 해석이 진행되었으며, 입열량은 문헌상 용접 속도를 고려한 용접 조건을 고려하여 계산된 $10.5 \times 10^3 \text{ J/mm}^2\text{s}$ 를 사용하였으며, ABAQUS 상의 FILM 명령을 사용하여 대류에 의한 열

방출을 모사하였고, MODEL CHANGE 명령을 통한 용접부 초기 경계조건을 설정하였으며, 단방향(single pass) 용접을 진행하였다.

2.3 기계적 해석

기계적 해석을 수행하기 위한 재료 물성 또한 Fig. 2 에 나타나 있으며, 모재와 용접재는 동일한 DH36 강(steel)을 가정하여 해석 진행하였다. 해석에 적용된 철판(plate)의 두께 4mm 로 얇아서 보다 큰 변형이 발생하여 해석 오류발생 가능성이 있어 ABAQUS 상의 비선형 기하학 해석(NLGEOM) 방식을 적용하여 철판(plate)의 큰 변형을 감안하여 해석을 진행하였다.

3. 박판용접에 대한 해석결과

3.1 열해석 결과

열 해석은 2D, 3D 모델링을 통해서 각각 진행하였으며, 2D 는 4 절점(node), 3D 는 8, 20 절점(node)에 대해서 해석을 진행하여 각 방식에 대한 유의차를 문헌상의 실험치와 비교해 하였으며, 그 결과 실험치와 해석치는 거의 유사한 경향의 곡선으로 나타났으며, 열 해석이 제대로 진행 되었음을 알 수 있다.

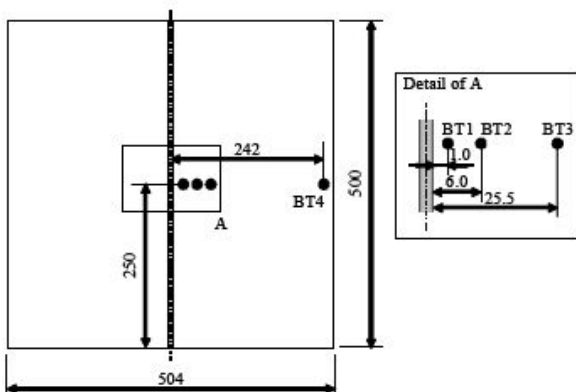
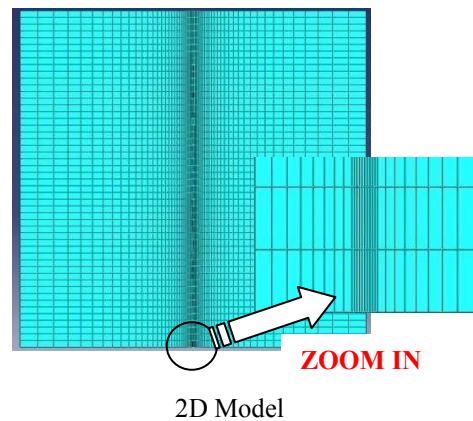


Fig. 3 Temp. measuring point on the Plate

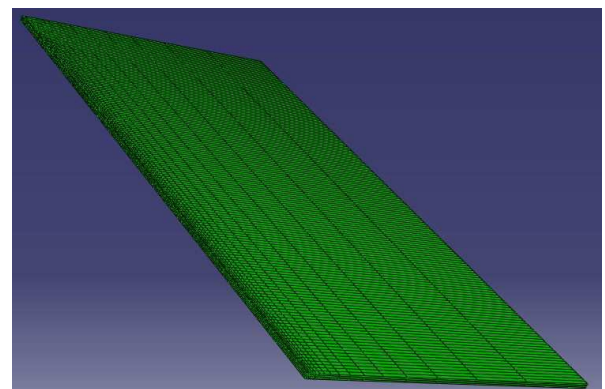


Fig. 4 Finite Element 2D,3D Model

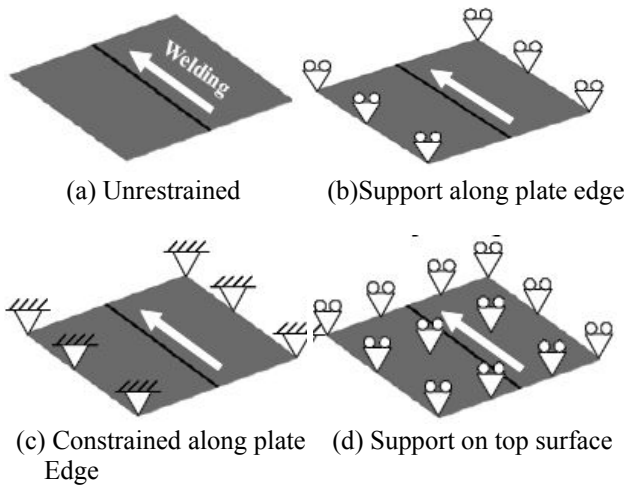


Fig. 5 Boundary conditions of this analysis

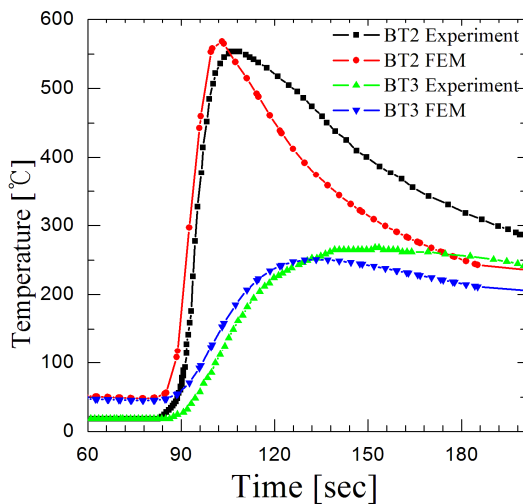


Fig. 6 2D Comparison of predicted and measured temperature profiles at the thermocouple locations

온도 측정 지점은 Fig. 3에 제시되었던 BT1,3 지점에서 측정되었으며, 결과는 Fig. 6~8의 그래프와 같다. 2D와 3D의 경우 입열 과정은 유의차 없으며 냉각시 3D가 다소 서냉되며, 3D상의 절점(node) 수는 열 해석에 영향이 없음을 알 수 있다.

3.2 기계적 해석 결과

해석의 결과는 열 해석의 경우와 마찬가지로 문헌상에 제시된 실험값과 비교하여 결과의 타당성을 검증하였다. 응력(stress)은 철판(plate)의 중심부분인 250mm 지점에서 종(longitudinal)방향과 횡(transverse)방향으로 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 9~12와 같이 비교적 잘 일치하는 경향을 보인다.

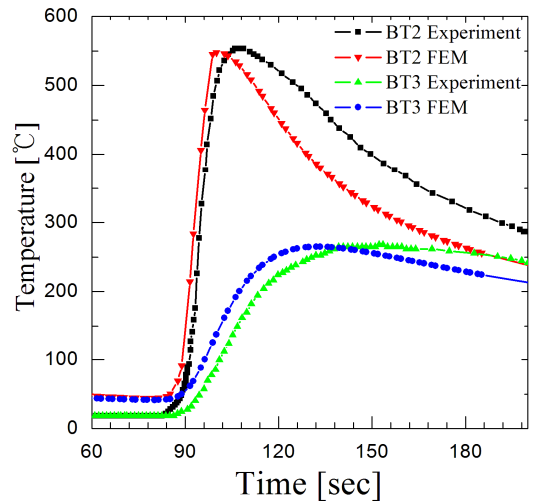


Fig. 7 3D 8 node Comparison of predicted and measured temperature profiles at the thermocouple locations

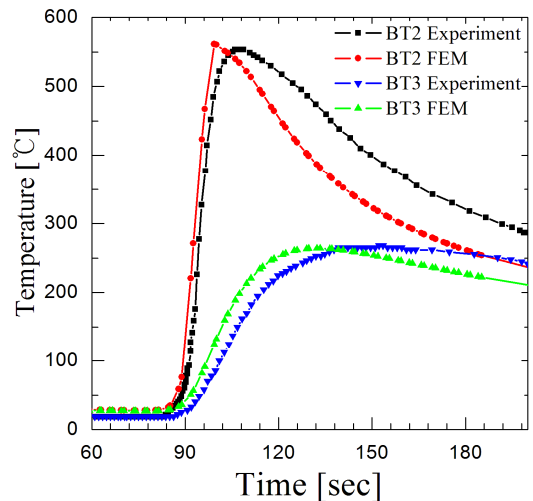


Fig. 8 3D 20 node Comparison of predicted and measured temperature profiles at the thermocouple locations

경계조건에 의한 응력(stress) 영향성을 확인하기 위해서 Fig. 5에 제시된 4가지 경계조건을 적용하여 해석을 수행한 결과는 Fig. 11, 12와 같으며 종(longitudinal) 방향의 경우 경계조건에 따른 유의차는 없는 것으로 판단되나, 횡(transverse) 방향으로의 응력(stress)분포는 경계조건에 따라 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

4. 용접부 균열에 대한 해석결과

박판에 대한 잔류응력 해석 결과를 바탕으로 박판의 용접부에 용접선을 따라서 발생하는 종방향 균열과 용접선에 수직한 관통균열이 발생하였을 경우에 대해서 해석을 진행하였다.

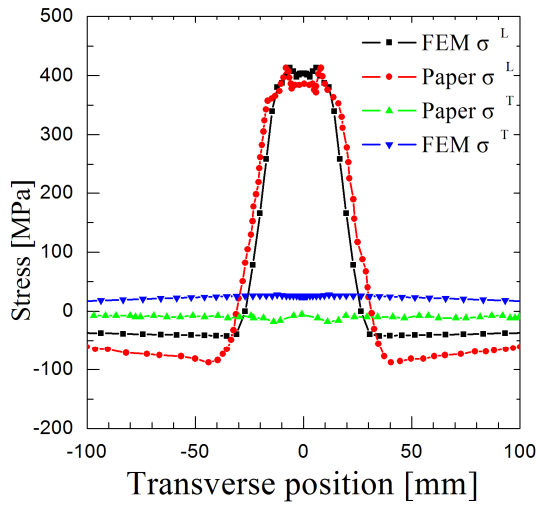


Fig. 9 2D Residual stress predictions in the butt welded plate compared with Paper

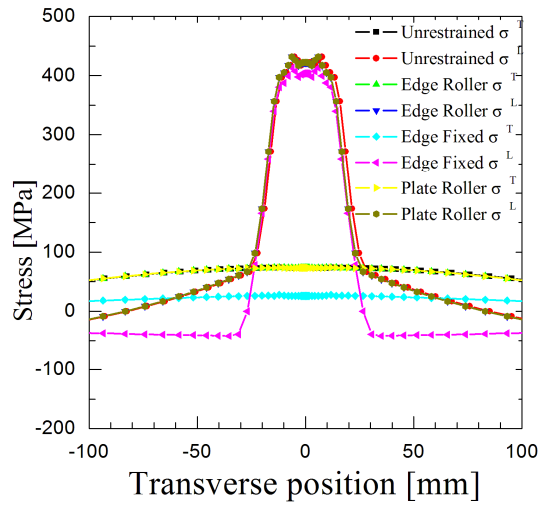


Fig. 11 2D Residual stress predictions in the butt welded plate with different Boundary conditions

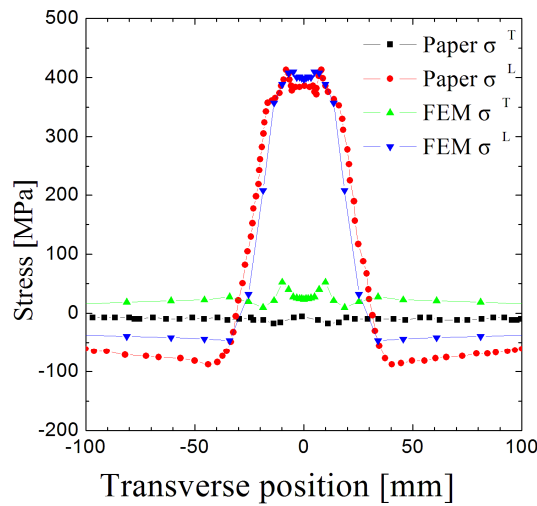


Fig. 10 3D Residual stress predictions in the butt welded plate compared with Paper

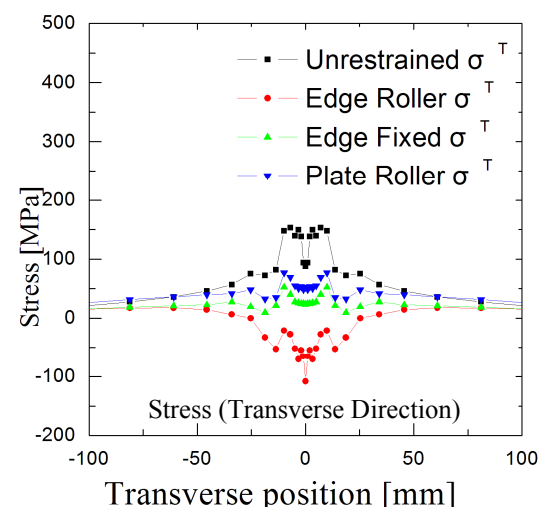
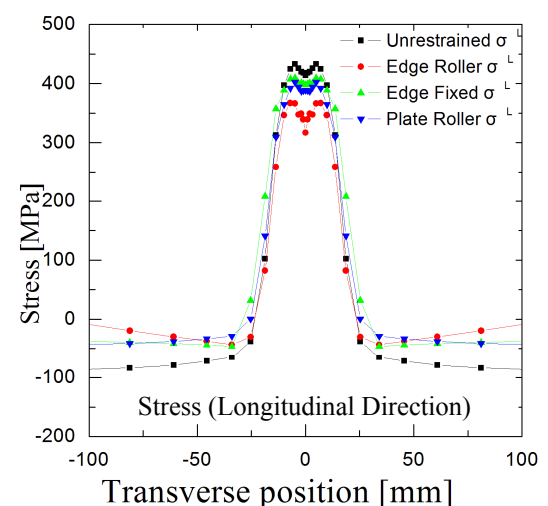
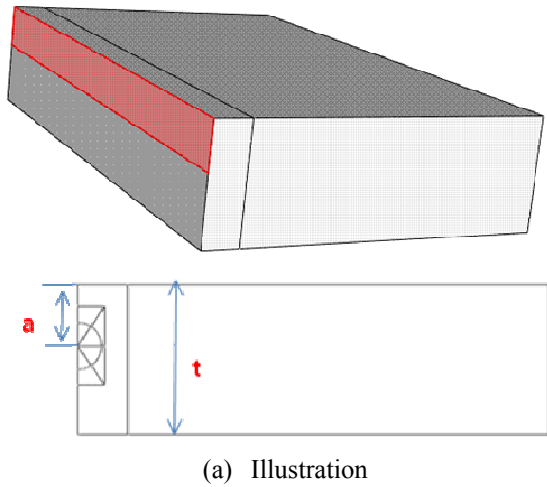


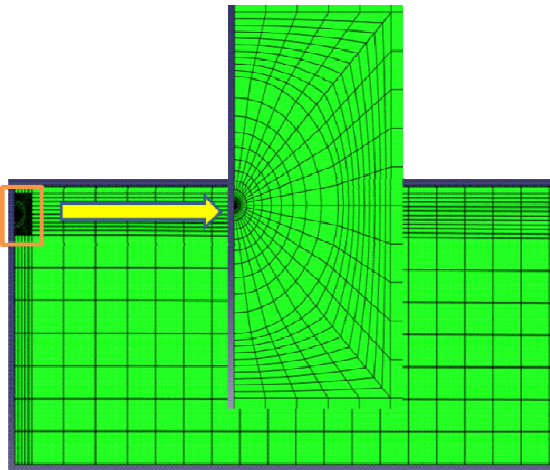
Fig. 12 3D Residual stress predictions in the butt welded plate with different Boundary conditions

종방향 균열의 경우는 Fig. 13 과 같이 용접선을 따라서 깊이 a 이 균열이 모재 전체에 발생한 경우로 모재의 두께를 t 라 하였을 때 a/t 가 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 로 균열의 깊이가 증가함에 따라 해석을 진행하였다. 모델링은 2D 모델을 사용하였으며, CPE8R 옵션을 사용하여 기계적인 해석(mechanical analysis)를 진행하였으며, 먼저 용접 잔류응력이 없는 단순히 균열 발생시 응력확대계수(stress intensity factor)를 구해 보았고, 3.2 절에서 산출한 용접시 발생한 잔류응력 값을 종방향 균열 모델에 적용하여 용접 잔류응력에 의한 균열의 거동에 대한 해석을 진행하였다.

관통 균열의 경우는 Fig. 14 와 같은 형상에서 용접부의 일부분이 전체적으로 균열이 발생한 경우로 균열



(a) Illustration



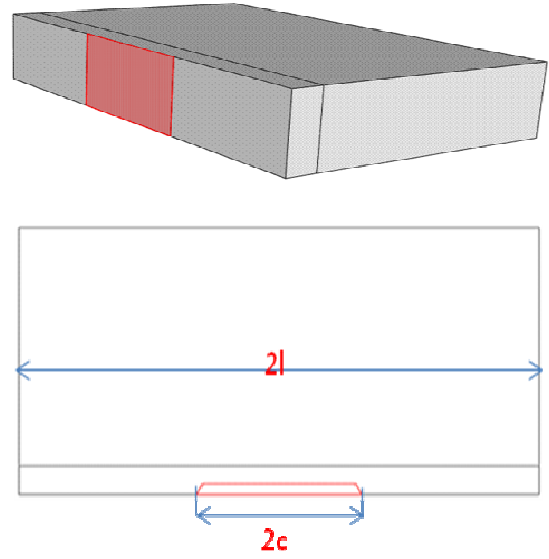
(b) 2D FEM Model

Fig. 13 Figure of FEM models for longitudinal crack.

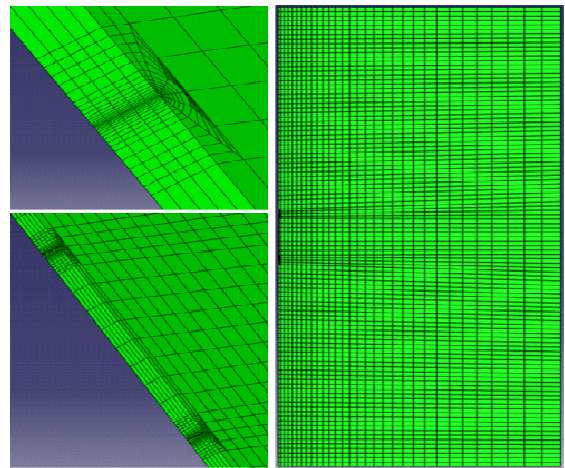
길이를 $2c$ 모재의 길이를 $2l$ 이라 할 때 c/l 이 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 로 균열의 길이가 증가함에 따라 해석을 진행하였다. 모델링은 3D 모델을 구현하였으며, C3D20R 옵션을 사용하여 기계적인 해석(mechanical analysis)을 진행하였으며, 종방향 균열 해석과 마찬가지로, 단순히 균열 발생시 응력확대계수를 해석하였으며, 3.2 절에서 산출한 잔류응력 값을 관통균열 모델에 적용하여 용접 잔류응력이 관통균열에 미치는 영향에 대한 해석을 진행하였다.

4.1 종 방향 균열 해석결과

종 방향 균열에 대한 해석결과는 Fig. 15에 나타나 있으며, a/t 가 증가함에 따라 응력확대계수(stress intensity factor)가 더욱 증가함을 확인할 수 있었고, 안정화가 진행됨에 따라서 응력확대계수는 증가함을 확인하였다. 잔류응력 결과를 맵핑 하여 균열부의 거동을 해석한 결과는 a/t 가 증가함에 따라 응력



(a) Illustration



(a) 2D FEM Model

Fig. 14 Figure of FEM models for through wall crack

확대계수(stress intensity factor)가 점차적으로 증가 하였으나, 안정화됨에 따른 전반적인 경향은 응력 확대계수가 감소함을 확인하였다.

4.2 관통균열 해석결과

관통균열에 대한 해석결과도 Fig. 16에 나타나 있으며, c/l 이 증가함에 따라 응력확대계수(stress intensity factor)가 더욱 증가함을 확인할 수 있었고, 안정화가 진행됨에 따라서 응력확대계수는 증가함을 확인하였다. 잔류응력 결과를 맵핑 하여 균열부의 거동을 해석한 결과는 c/l 이 증가함에 따라 응력확대계수(stress intensity factor) 증가하였으며, 안정화됨에 따른 전반적인 경향 또한 응력확대계수가 증가함을 확인하였다.

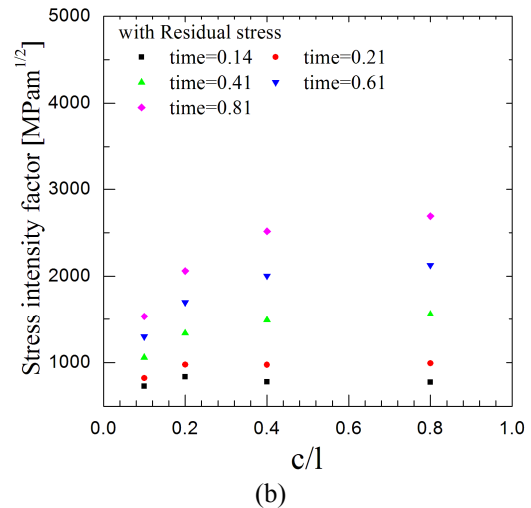
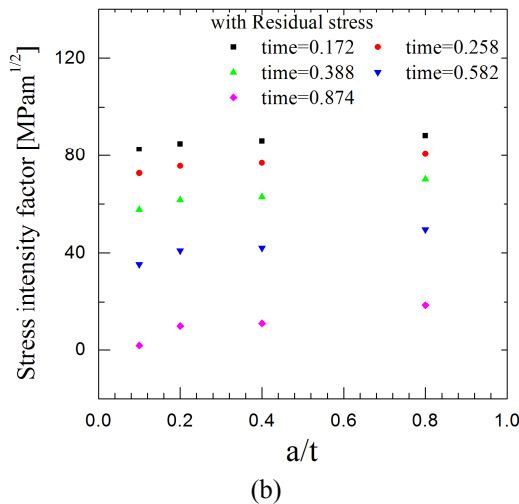
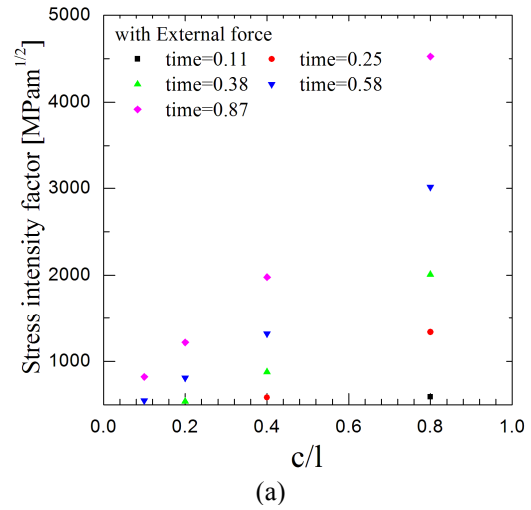
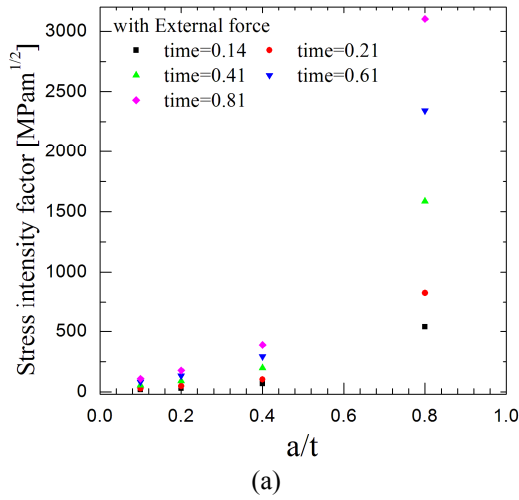


Fig. 15 Stress intensity factor according to a/t . (a) with external force (b)with residual stress

Fig. 16 Stress intensity factor according to c/l . (a) with external force (b)with residual stress

5. 결론

본 연구에서는 박판(thin section)의 한방향 용접(single pass welding)에 대한 예측 모델링을 제시 함으로서 잘못된 디자인(design)이나 설계에 의한 작업 오류로 발생하는 실제적인 손실 비용을 최소화 할 수 있도록 하기 위해서 ABAQUS 를 이용하여 두께 4mm 인 박판의 한 방향 용접을 모사하였고, 그 결과 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 열 해석 및 기계적인 해석 결과를 실험치와 비교하여 본 연구에서 사용한 모델링의 검증은 실시하였다.

(2) 유한요소 해석을 통해 용접부 잔류응력 예측시 기계적인 구속 조건은 결과 값에 큰 차이를 나타낸다. 따라서 해석 대상과 가장 유사한 경계조건 설정이 필요하다고 할 수 있다.

(3) 균열의 깊이 a , 모재의 두께 t 일때 a/t 가 0.1, 0.2, 0.4, 0.8로 증가함에 따라 용접부에 발생한 종 방향 균열은 용접시 발생하는 잔류응력에 의해서 더 이상 진전되지 못하고, 단히게 됨을 알 수 있다. 따라서 종 방향 균열의 경우는 잔류응력을 무시하고 해석시 가해지는 작업 조건에 따라 실제의 결과와 상이한 결과가 발생하기 때문에 해석시 잔류응력을 무시해서는 안된다.

(4) 균열의 길이 c , 모재의 길이 l 일때 c/l 이 0.1, 0.2, 0.4, 0.8로 증가함에 따라 용접부에 발생한 관통균열은 용접시 발생하는 잔류응력에 의해서 더 크게 진전될 것을 응력확대계수(stress intensity factor)가 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 이경우 해석간 잔류응력은 무시될 수 있다.

후기

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력 연구원 주관으로 수행된 과제임.

참고문헌

- (1) British Energy Generation Ltd., 2007 “R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects,” Revision 4.
- (2) ABAQUS, 2007, “ABAQUS Standard/User’s Manual, Version 6.7,” ABAQUS, Inc.
- (3) Tsunori, M., Dye, D., Davies, C. M. and Nikbin, K. M., 2008, “Numerical Modelling of Residual Stress and Distortion in Welded Thin Steel Plates,” *ASME PVP Conference*, PVP2008-61170.
- (4) Song, T. K., Bae, H. Y., Chun, Y. B., Oh, C. Y., Kim, Y. J., Lee, K. S. and Park, C. Y., 2008, “Estimation of Residual Stress Distribution for Pressurizer Nozzle of Kori Nuclear Power Plant Considering Safe End,” *Trans. of the KSME(A)*, Vol.32, No. 8, pp. 668-677.
- (5) Song, T.K., Bae, H.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S. and Park, C.Y., 2008, “Sensitivity Analyses of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Multi-Pass Welding,” *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 32, No. 9, pp.770-781.
- (6) Kim, Y.J., Shim, D.J., Nikbin, K., Kim, Y.J., Hwang, S.S. and Kim, J.S., 2003, “Finite Element Based Plastic Limit Loads for Pipes with Part-Through Surface Cracks Under Combined Loading,” *Int J. of Pres. Ves. and Pip.*, Vol. 80, pp.527-540.
- (7) Rui Wang, Jianxun Zhang, Hisashi Serizawa and Hidekazu Murakawa, 2009, “Study of Welding Inherent Deformations in Thin Plates Based on Finite Element Analysis Using Interactive Substructure Method,” Elsevier Ltd.
- (8) Davies, C. M., Béréš, M., Hughes, D., Dye, D. and Nikbin, K. M. 2009, “The Influence of Geometric and Welding Parameters on Residual Stress in Thin Welded Steel Structures,” *ASME PVP conference*, PVP2009-77181.
- (9) Davies, C. M., Wimpory, R. C., Dye, D. and Nikbin, K. M., 2008, “The Effects of Plate Dimensions on Residual Stresses in Welded Thin Steel Plates,” *ASME PVP conference*, PVP2008-61200.
- (10) Dean Denga, Wei Liang and Hidekazu Murakawa, 2006, “Determination of Welding Deformation in Fillet-Welded Joint by Means of Numerical Simulation and Comparison with Experimental Measurements,” Elsevier B.V.
- (11) Yu LUO, Hidekazu MURAKAWA and Yukio UEDA, “Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain(Report 1).JWRI
- (12) Davies, C. M., Béréš, M., Hughes, D., Dye, D., Nikbin, Wimpory, K. M., R. C., Lightfoot, M. P., Oliver, E., O’Dowd, N. P. and Bruce., G. J., 2007, “The Effect of Residual Stress and Microstructure on Distortion in Thin Welded Steel Plates,” *ASME PVP Conference*, PVP2007-26193.
- (13) TSAI, C. L., PARK, S. C. and CHENG, W. T., 1999, “Welding Distortion of a Thin-Plate Panel Structure,” *Welding Research Supplement*, pp. 156-165.
- (14) Choong-Gi Kim, Jae-Woong Kim and Ki-Chul Kim, 2007, “A Study on the Distortion of a Thin Plate Panel by Laser Welding,” *Journal of KWJS*. Vol.25. No. 1, Feb.2007.