

인장법을 이용한 박판 필렛용접변형 감소 시뮬레이션에 대한 연구

강성구 · 양종수 · 임래수 · 김호경 · 박정용

A Study on Simulation for Weld Distortion Reduction in Fillet Weld of Thin Plate using Tension Method

Serng-Ku Kang, Jong-Su Yang, Rae-Soo Lim, Ho-Gyoung Kim and Jung-Yoong Park

1. 서 론

대형 구조물을 용접하는 것은 설계 유연성, 무게 감소 및 성능 우수성 등의 장점을 갖게 된다. 그러나, 비교적 박판으로 이루어진 대형구조물은 각변형, 좌굴변형 등이 발생하여 치수 정밀도 및 구조적 결합성을 저하시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 용접 입열량을 저감시키거나 구조물 형상을 변화시킴으로 용접변형 발생을 감소시키는 많은 시도가 이루어 지고 있다. 용접실험을 통해서 횡수축, 종수축 등의 용접변형 데이터를 측정하여 이를 현장에 활용하는 연구가 많이 진행되고 있지만, 많은 시간과 비용이 필요하다. 이를 대체하기 위해서 유한 요소 해석법을 도입하여 용접변형 및 잔류응력 등을 분석하는 많은 연구가 진행되어 왔다. 현재까지 이루어진 선행 연구는 다음과 같다. 박판 맞대기 용접에 인장력을 적용하는 실험을 통해, 용접선 방향으로 굽힘과 수축변형 감소, 그리고 용접선에 수직 방향으로 굽힘 변형을 감소시키는 효과가 있음을 확인하는 연구가 수행되었다^{1,2)}. 필렛 용접에 인장력을 가하여 굽힘과 수축변형에 대한 연구가 수행되었다³⁾. 열탄소성해석을 실시하여 임계 좌굴변형 하중을 예측하는 연구를 수행하였다⁴⁾. 또한 유한요소 해석을 실시하여 thermal tensioning 상태에서 용접을 모델링하여, 종방향 잔류응력을 감소시켜 좌굴변형을 감소시킬 수 있음을 보여주었다⁵⁾.

본 연구에서는 인장법을 이용하여 박판 필렛 용접변형 감소시뮬레이션을 수행하고자 한다. 현장에서 사용되는 형태의 박판 필렛용접에 대해 열탄소성 해석을 실시하였다. 인장력을 용접선 방향 및 용접선 직각방향으로 가하는 것에 대해 해석을 실시하였다. 두께, 인장하중, 인장하중 제거시간을 변화시켜, 용접변형과 상관관계를 분석하였다.

2. 용접 시뮬레이션 모델

2.1 해석 모델

해석에 사용한 모델의 크기는 Fig. 1와 같이, 길이 800mm, 폭 400mm이며, 두께는 5mm와 8mm로 변화시켰으며, 수직재는 높이가 55mm, 두께는 6mm이다. 용접조건은 전류 240A, 전압 24V, 속도 380mm/min 이고, 각장은 3mm이며 양면 동시에 용접하였다. 현장에서 실행하는 용접조건에 기초하여 조건을 선정하였다.

Table 1은 필렛 용접의 해석조건을 보여주고 있다. 해석조건은 하중인장방향, 인장응력의 크기, 용접부 하중제거 시간, 플랜지 두께를 변화인자로 하여 해석을 실시하였다.

Fig. 2는 전체해석 격자모델을, Fig. 3은 플랜지 두께 5mm에 대한 격자 단면형상을 보여주고 있다. 해석은 대칭성을 고려하여 1/2모델을 사용하였으며, 열전도

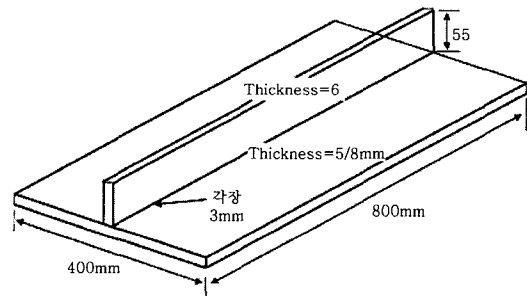


Fig. 1 Model of fillet weld

Table 1 Analysis condition

인장력방향	평균인장응력 (MPa)	두께(mm)
용접선	12	5
용접선 직각	6	5/8
	12	5

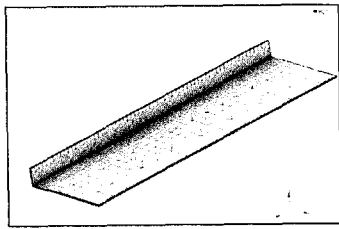


Fig. 2 Analysis model for fillet weld

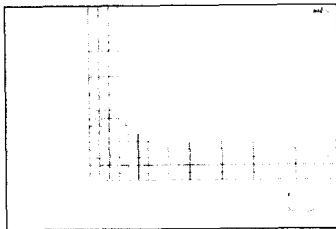


Fig. 3 Fillet section (t=5mm)

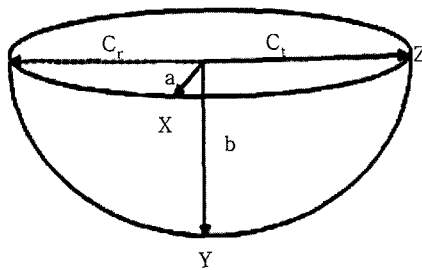


Fig. 4 Volumetric weld flux

해석 및 열탄소성 해석 시 재료의 온도에 의한 변화를 고려하여 실시하였다. 재료는 연강을 기준으로 실시하였으며, 해석은 범용비선형해석 프로그램 MSC.MARC를 이용하였다.

3. 용접 열원 모델링

용접 열원 모델링을 위해 MARC 옵션인 Weld flux, Weld filler 및 Weld path을 사용하였다. 용접열원을 부피를 갖는 열원으로 모델링 하였으며, 열원 식은 다음과 같다.

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right)$$

q_f : 전방 용융풀 단위 체적 입열량

q_r : 후방 용융풀 단위 체적 입열량

$Q = \eta VI$: 전력

a : X 방향 용접 폭

b : Y 방향 용접 깊이

c_f : Z방향 전방 용융풀 길이

c_r : Z방향 후방 용융풀 길이

$f_f f_r$: 무차원 수

$$f_f = \frac{2}{(1+c_r/c_f)} \quad f_r = \frac{2}{(1+c_f/c_r)}$$

Q 는 5760, η (아크 효율)은 0.8, a 4mm, b 4mm, c_f 2mm, c_r 6mm, 용접속도는 6.25mm/sec로 설정하였다. 용접 폭, 깊이 등의 자료는 용접시편 단면을 채취하여 이를 기초로 선정하였다. Weld Path로 용접선을 설정하였으며, Weld Filler로 용접와이어가 모재로 이행되는 것을 모델링 하였다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1 자유 상태

Fig. 5는 인장력을 가하지 않은 경우에 대한 해석결과를 표시하고 있다. 용접선 부근의 수축으로 인해, 3.9mm 용접변형이 플랜지 끝단에 발생하였다. 용접선 부근에는 잔류응력이 275MPa로 항복응력보다 크게 발생하였다. 용접선에서 30mm 이내의 부근에서 잔류응력이 항복응력과 비슷한 값을 가지고 형성되는 것을 보이며 이는 일반적으로 알려져 있는 실험 결과와 동일한 경향을 보이고 있다⁶⁾. 필렛용접부의 용접선 직각 방향 수축으로 인해 각변형이 발생한 모습을 Fig. 5(b)에서 확인할 수 있다. 용접선 직각방향으로 용접선에서 멀어질수록 인장응력 값이 감소하는 것을 알 수 있다.

3.2 용접선 방향 인장

Fig. 6은 용접선 방향으로 인장력을 작용하는 것을 보여주고 있다. 이때 인장력은 용접부 중앙부가 용접선 방향으로 12MPa이 발생하도록 강제변위로 재하하였다.

Fig. 7은 인장응력 12MPa를 재하하였다가 용접 직후 인장력을 제거하는 경우, 그림 8은 용접완료 후 60분이 지난 다음에 인장력을 제거하는 경우에 대한 용접 변형, Von mises 응력을 보여주고 있다.

인장력을 바로 제거하는 경우 용접변형은 4.1mm, 최대잔류응력은 270MPa, 소성변형률은 0.15이며, 60분 후 제거하는 경우는 용접변형이 3.8mm, 최대잔류응력 244MPa, 소성변형률은 0.19를 보여주고 있다. 60분 동안 하중을 가함으로 인해, 용접부 부근에서 지

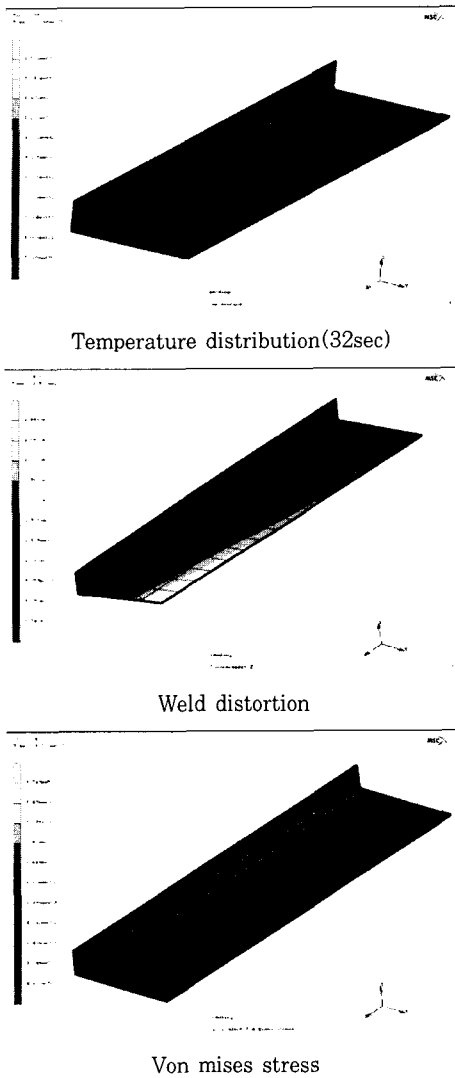


Fig. 5 Temperature, weld distortion and stress at no load(5mm)

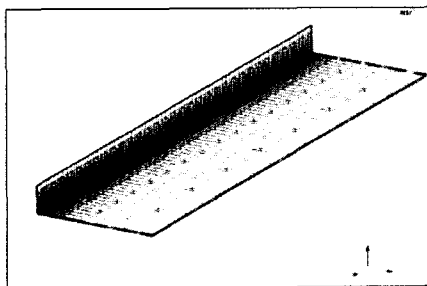


Fig. 6 Tension parallel to weld path

속적으로 소성변형이 발생하고, 이로 인해 잔류응력 완화 및 용접변형이 작게 되는 현상이 발생한다.

Fig. 9는 종굽힘 변형 및 각변형을 보여주고 있다. 자유상태에서는 용접선 시작 부분의 종굽힘 변형이 가장 작고, 중앙 값이 0.4mm정도로 가장 크게 형성되다가, 끝나는 부분의 종굽힘이 다시 작게 형성되는 것을

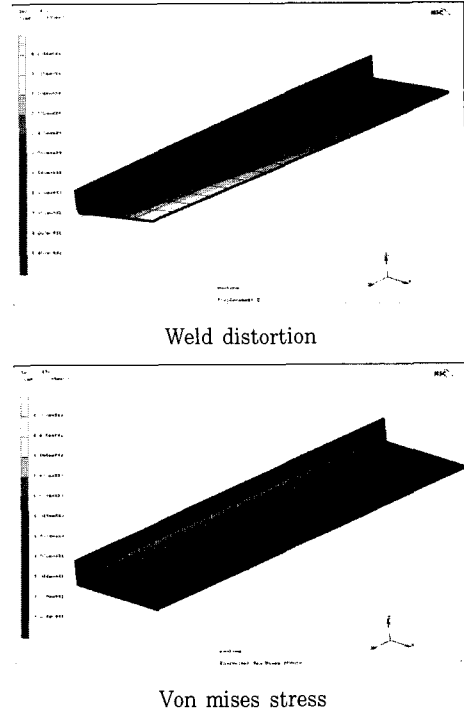


Fig. 7 Weld distortion and stress when tension is parallel to weld path (12MPa, 0min, 5mm)

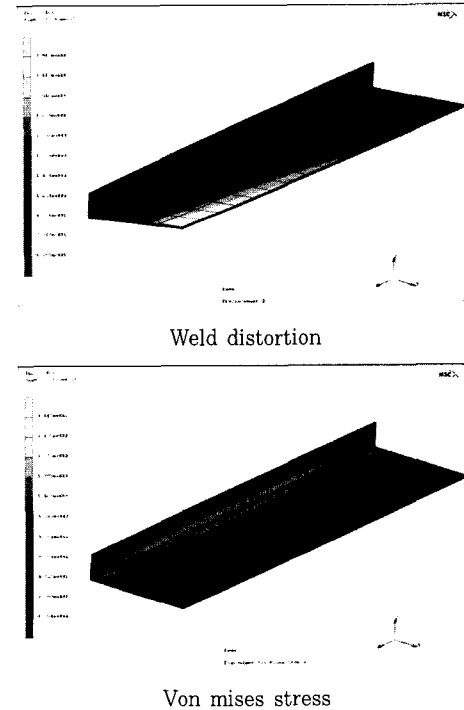
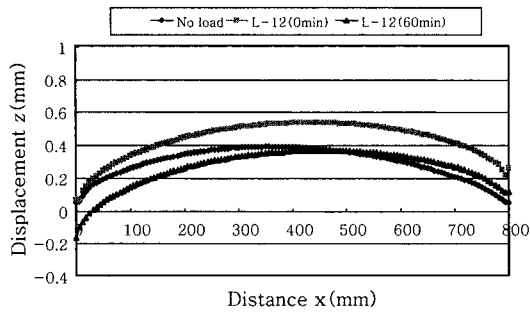
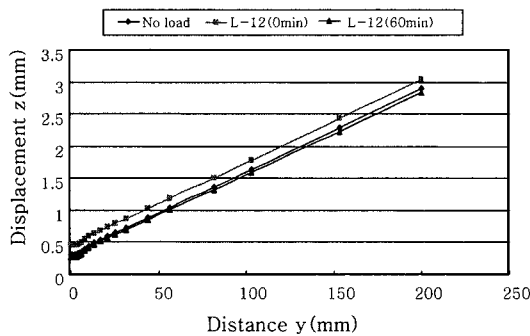


Fig. 8 Weld distortion and stress when tension is parallel to weld path (12MPa, 60min, 5mm)

알 수 있다. 이것은 용접 시작부의 수축 시 용접열에 의해 강성이 저하되어 수축이 용이하게 되지만, 끝부분



(a) Longitudinal bending distortion (x=all, y=6mm, z=5mm)



(b) Angular change (x=400mm, y=all, z=5mm)

Fig. 9 Weld distortion when tension is parallel to weld path (5mm)

이 수축할 때는 용접 시작부가 수축할 때보다 용접부 전체 온도가 상대적으로 낮아져 강성을 회복하여 끝부분 수축을 방해하기 때문이다. 이것은 기존 많은 연구 결과와 비슷한 경향이다.

하중을 바로 제거한 경우에도 양 끝단에서 작은 종굽힘 변형 값을, 중앙에서 0.6mm 정도의 큰 변형 값을 가짐을 알 수 있다. 하중을 60분 후에 제거한 경우에는 용접 시작점에서 0.2mm로 아래방향 종굽힘변형 값을 가지고 0.4mm까지 증가하다가, 0.1mm로 감소하는 경향을 보이고 있다. 자유상태와 비교할 때 하중을 가한 경우에 종굽힘 변형이 작게 형성되는 것을 알 수 있다. 이는 하중을 가함으로써 용접 중 또는 용접이 끝난 후에 보다 많은 소성변형이 용접선 부근에서 발생하기 때문에 이러한 현상이 생긴다.

Fig. 9(b)를 통하여 각변형 경향을 보여주고 있다. 용접선 부근의 수축으로 인해서, 용접선에서 멀어질수록 각변형 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 인장력 및 제거시간이 각변형에 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있다. 이는 각변형은 필렛용접부의 용접선 직각 방향 수축과 관련이 있지만, 인장력이 용접선 방향으로 가해지기 때문에 영향을 주지 못하는 것으로 사료된다.

3.3 용접선 직각방향 인장

Fig. 10은 용접선 직각방향으로 인장력을 작용하는 것을 보여주고 있다. 이때 인장력은 용접선 직각방향으로 6MPa이 발생하도록 강제변위를 재하하였다.

Fig. 11은 플랜지 두께 5mm에 6MPa의 인장응력을 용접직후 하중을 제거한 경우, Fig. 12는 동일조건에서 용접 후 60분 지난 후에 하중을 제거한 경우에 대한 용접변형과 Von mises 응력을 보여주고 있다.

바로 하중을 제거한 경우는 용접변형이 2.1mm, 최대잔류응력이 262MPa이며, 60분 후 하중을 제거한 경우는 변형이 1.6mm, 최대잔류응력이 262MPa로 형성되었다. 일정시간 후 인장력을 제거하는 경우가, 용접변형을 작게 만드는 효과가 있음을 알 수 있다. 이는 일정기간 하중을 유지하면 용접부에 소성변형이 일어나는 부분이 지속적으로 증가하기 때문에 용접변형이 작게 된다. 최대잔류응력의 크기는 비슷하게 형성되어 있지만 필렛용접부 전체에 형성되어 있는 잔류응력의 전체적인 크기는 작게 형성되어 있는 결과를 보이고 있다.

인장력의 크기에 따른 용접변형의 영향을 검토하기 위해 Fig. 15는 플랜지 두께 5mm에 12MPa의 인장응력을 재하시키고 용접 후 60분 지난 후에 하중을 해제한 경우에 대한 용접변형과 Von mises 응력을 보여주고 있다.

6MPa를 60분 후에 제거한 경우와 비교할 때, 용접변형이 1.63mm, 최대잔류응력이 263MPa로서 크게 값의 변화가 없다. 이는 인장력이 일정값 이상이 되면 용접변형 및 잔류응력에 미치는 효과가 증가하지 않음을 의미한다.

구체적인 용접변형을 검토하기 위해 종굽힘 변형과 각변형을 분류하여 Fig. 13에 표시하였다. Fig. 13(a)를 통해 종굽힘 변형 경향이 Fig. 9(a)와 비슷함을 알 수 있다. 하중을 가하지 않은 경우의 변형 값이 가장 크게 형성되고, 하중을 가했을 때는 변형이 작게 형성되는 결과를 보이고 있다. 하중을 가함으로써 용접 중 또는 용접이 끝난 후에 보다 많은 소성변형이 용접선 부

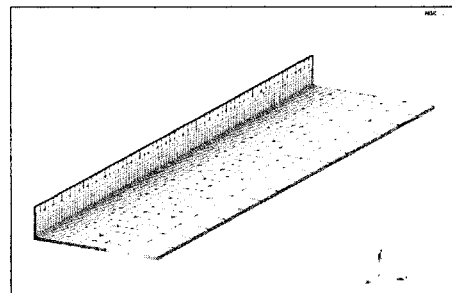


Fig. 10 Tension perpendicular to weld path

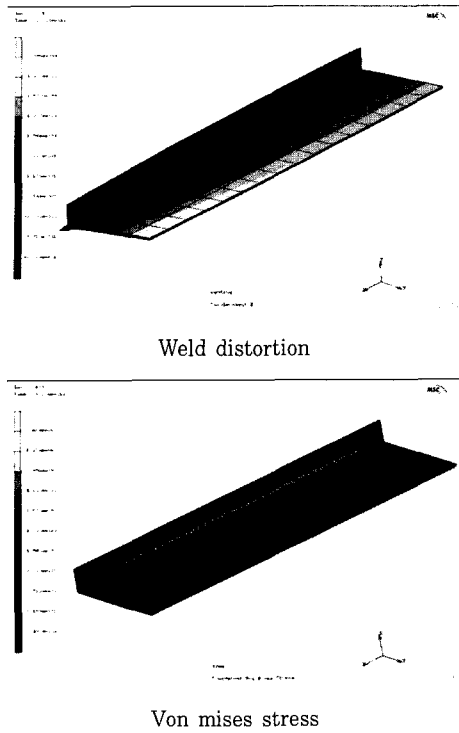


Fig. 11 Weld distortion and stress when tension is perpendicular to weld path (6MPa, 0min, 5mm)

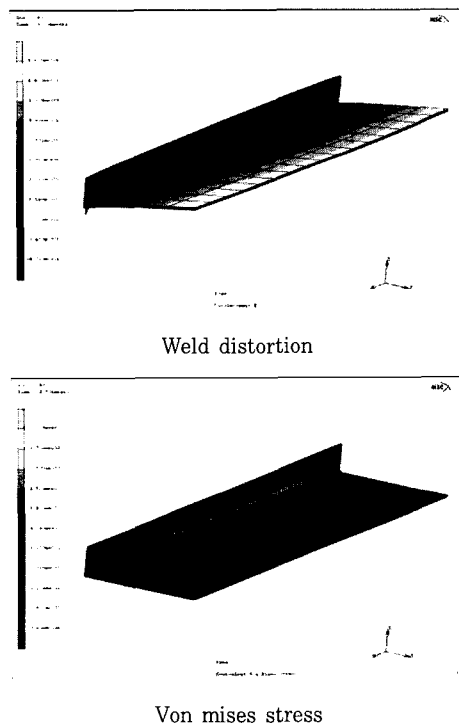


Fig. 12 Weld distortion and stress when tension is perpendicular to weld path (6MPa, 60min 5mm)

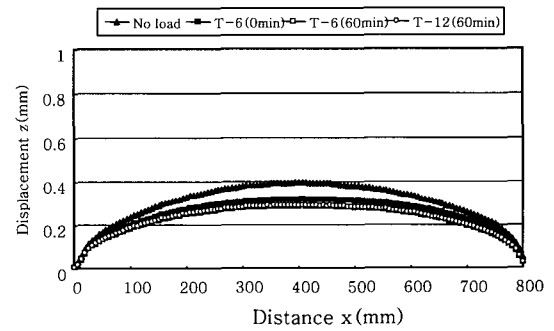
근에서 발생하기 때문에 이러한 현상이 생긴다.

Fig. 13(b)는 인장력을 용접선 수직으로 가하였을 때 각변형 감소에 효과가 있음을 보여주고 있다. 인장력을 용접선 방향으로 가했을 때는 Fig. 9(b)에서 보여주듯 각변형 감소에 효과가 없지만, 수직으로 가했을 때는 각변형이 자유상태 각변형량 대비 약 60% 정도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 각변형이 필렛용접부의 용접선 직각 방향 수축에 영향을 받고, 인장력이 용접선 수직방향으로 가해지기 때문에 각변형을 감소시키는 영향을 주는 것으로 사료된다.

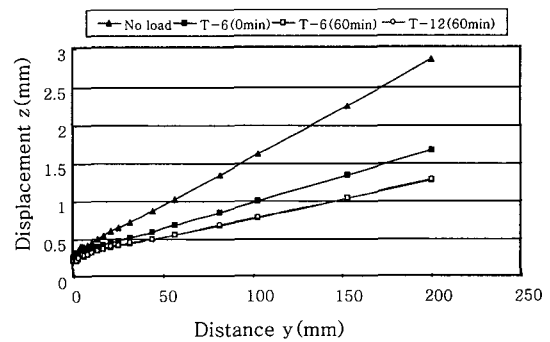
하중구속시간에 따른 영향은 60분 구속을 제거하는 경우가 용접직후 구속을 제거하는 경우보다 20%정도 각변형이 감소한 것으로 나타났다. 이는 오랜 시간 하중을 가하면 보다 많은 소성변형이 용접선 부근에서 발생하기 때문이다.

용접선 직각방향의 인장력에 의한 용접변형 감소효과가 플랜지의 두께에 미치는 영향을 검토하기 위해 플랜지 두께를 8mm로 하여 인장응력이 6MPa가 작용하도록 하였다. 하중제거시간은 0, 60분으로 설정하였다.

Fig. 14은 자유상태, Fig. 15는 인장응력 6MPa에 하중제거 시간 0분, Fig. 16은 인장력 6MPa에 하중제거시간 60분에 대한 용접변형과 Von mises 응력을



(a) (Longitudinal bending distortion (x=all, y=6mm, z=5mm))



(b) Angular change (x=400mm, y=all, z=5mm)

Fig. 13 Weld distortion when tension is perpendicular to weld path (5mm)

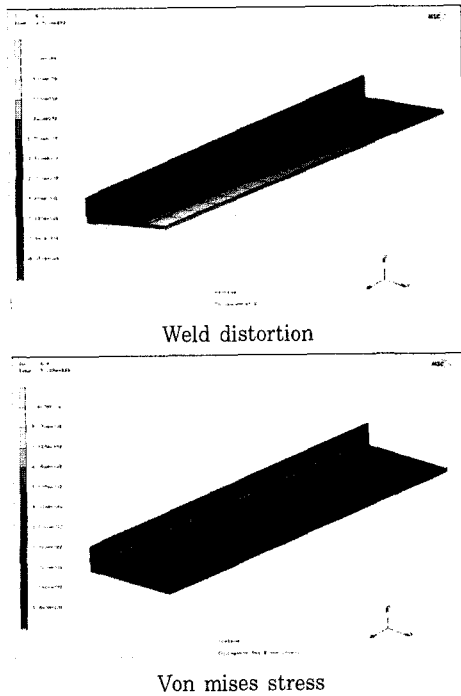


Fig. 14 Weld distortion and stress at no load (8mm)

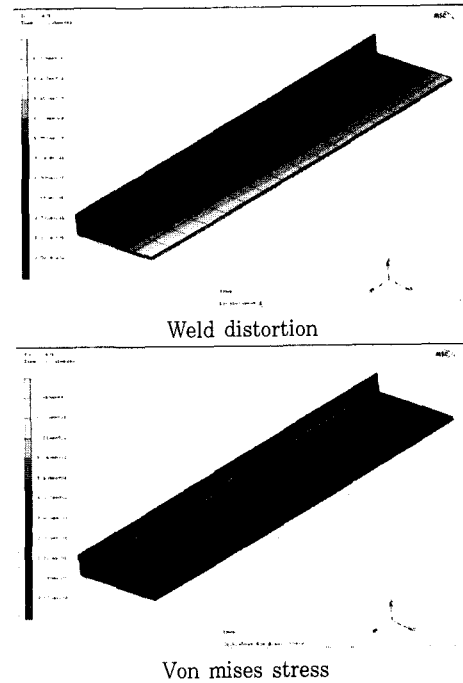


Fig. 16 Weld distortion and stress when tension is perpendicular to weld path (6MPa, 60min 8mm)

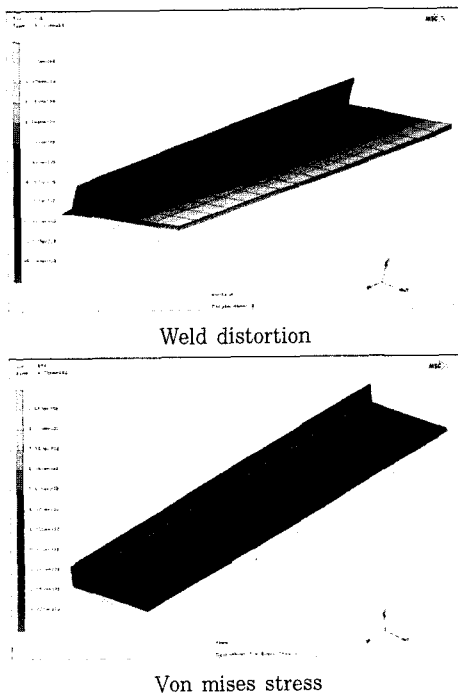


Fig. 15 Weld distortion and stress when tension is perpendicular to weld path (6MPa, 0min 8mm)

보여주고 있다.

자유상태의 용접변형 3.2mm, 최대잔류응력은 264 MPa로 형성되어, 두께 5mm의 경우보다 값이 작게

형성되는 것을 알 수 있다. 이는 두께가 크기 때문에 강성이 증가하여 용접변형 및 잔류응력이 작게 형성된 것으로 사료된다. 하중을 바로 제거한 경우는 용접변형 2.0mm, 최대잔류응력 264MPa, 60분 후에 제거한 경우는 용접변형이 1.8mm, 최대잔류응력이 264MPa로 형성되었다. 두께 5mm인 경우와 비교하여 용접변형 및 잔류응력 값의 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 이는 두께가 어느 값 이상이 되면 하중제거시간의 변화가 용접변형 등에 큰 영향을 미치지 못함을 의미한다. 두께 증가로 인한 강성 증가가 인장력의 효과를 상쇄시키기 때문에 이러한 결과가 나오는 것으로 사료된다.

자유상태와 비교하면 인장력을 작용하는 경우 45%의 용접변형 감소효과가 나타났으나, 두께 5mm에서의 60% 용접변형에 비해 크기가 작다.

4. 결 론

인장법을 이용한 박판 필렛 용접부 변형 감소 시뮬레이션에 대한 연구를 진행하였다.

두께 5mm 및 8mm 필렛용접부에 대한 열탄소성 해석을 실시하였다. 자유상태, 용접선 방향으로 인장하는 경우, 용접선 직각방향으로 인장하는 경우, 인장하중을 용접 직후 바로 제거하는 경우, 하중을 60분 후에 제거하는 경우, 인장력이 6MPa, 12MPa인 경우에 대한 해석을 실시하였다.

시뮬레이션 결과 분석을 통해 아래의 결과를 얻었다.

1) 용접선 방향을 인장하는 경우는 종굽힘 변형 및 각변형에 큰 영향을 주지 않았다. 단, 용접선 방향의 잔류응력 및 소성변형을 분포에는 영향을 주었다. 특히 잔류 응력의 경우 크기는 35%정도 감소하였다.

2) 용접선 직각방향으로 인장하는 경우는 자유상태와 비교하여 용접 종굽힘 변형 및 각변형을 상당히 감소시키는 결과를 확인하였다.

3) 하중을 바로 제거하는 경우보다 60분 후에 제거하는 경우에 종굽힘 변형이 감소하는 것을 확인하였다.

4) 하중이 일정 값을 넘게 되면 종굽힘 변형 및 잔류응력의 변화가 크지 않음을 확인하였다.

5) 두께가 변화하는 경우에 동일한 하중을 가하면 종굽힘 변형 및 잔류응력의 변화가 크지 않음을 확인하였다.

위의 결과를 통해 인장법이 박판 필렛 용접부의 종굽힘 변형 및 각변형 감소에 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Joo-Sung Lee and Jae-Woo Park : A Study on the Reduction of Fillet Weld Deformation by Applying the Tensioning Method, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **44-6** (2007), 590-597
2. Dae-Hee Shin, Sang-Beom Shin and Joo-Sung Lee : A Study on the Prediction of Welding Deformation and Residual Stress for Channel I Butt SA Weldment Using FE Analysis, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **44-6** (2007), 598-604
3. D. A. Michaleris and A. Debiccari : Prediction of welding deformation, Welding Journal, **76-4** (1997), 172-s - 180-s
4. P. Michaleris and X. Sun : Finite Element Analysis of Thermal Tensioning Techniques Mitigating Weld Buckling Deformation, Welding Journal, **76-November** (1997), 451-s - 457-s
5. Chul-Ho Kim : Study on the Control of Welding Deformation for Thin Hull Structure Using Mechanical Tensioning Method, M.S Thesis, 2006
6. K. Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980



- 강성구
- 1973년생
- STX조선 생산기술연구팀
- 용접변형
- e-mail : skkang@stxship.co.kr



- 김호경
- 1971년생
- STX조선 생산기술연구팀
- 용접공정 및 용접자동화
- e-mail : crossho@stxship.co.kr



- 양중수
- 1961년생
- STX조선 생산기술연구팀
- 용접공정 및 용접자동화
- e-mail : yjs9451@stxship.co.kr



- 박정웅
- 1966년생
- 조선대학교 토목공학과
- 용접공정 및 용접자동화
- e-mail : jupark@mail.chosun.ac.kr



- 임래수
- 1971년생
- STX조선 생산기술연구팀
- 용접공정 및 용접자동화
- e-mail : sogrs@stxship.co.kr