

FCAW 용접의 잔류응력 측정 및 해석에 관한 연구

A Study on the Residual Stress Measurements and Analyses in Flux Cored Arc Welding.

* 이정수 김남인 류영수 최우현

(주)한진중공업 기술연구소

1. 서론

용접된 구조물은 아크열의 국부적 가열에 의해 온도분포가 불균일 해지고 냉각되면서 변형 및 잔류응력을 발생시킨다. 이러한 잔류응력은 구조물의 피로강도, 좌굴강도 및 부식저항력 등을 저하시켜 용접 구조물의 안전성에 심각한 문제를 일으킬 수도 있다. 구조물의 설계시 잔류응력을 고려하기 위해서는 유한요소 해석 등을 통해 응력의 크기를 계산하는 컴퓨터 시뮬레이션이 매우 유용하다. 하지만 수치해석의 신뢰성을 확보하기 위해서는 시편의 용접부위에 발생하는 잔류응력의 측정실험이 필요하다. 본 연구에서는 당사에서 새롭게 적용되고 있는 Cut-Wire 1 PASS 맞대기 용접에 의한 잔류응력을 계산하기 위하여 단순 Bead-on plate 용접시편을 통해 잔류응력 평가의 신뢰성을 먼저 확인한 후 Cut-Wire 1 PASS 용접의 수치해석 결과와 실험 계측 값을 비교 분석하였다. 이를 위해 수치해석은 상용 패키지인 ANSYS 5.6을 사용하였으며, 실험은 가장 대표적이고 신뢰성 있는 잔류응력 측정법인 Hole Drilling 방법을 이용하였고 종합적으로 해석 결과치와 실험 측정치를 상호 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 수치해석 및 실험적 방법

실제 용접구조물은 매우 크고 복잡한 구조로 이루어져 있는데, De Garmo의 실험에 의하면 용접된 중앙부위의 잔류응력은 시편의 길이가 길어질수록 커지다가 18인치 이상이 되면 길이에 따라 변하지 않고 균일해진다고 보고했고 Rendler에 의하면 구멍직경/평판폭의 비를 0.06이하로 정하여 잔류응력을 계측했을 경우 시편의 크기효과를 무시할 수 있다고 보고했다. 따라서 본 연구에서는 시편의 크기를 Bead-on plate 용접의 경우 $300 \times 80 \times 8$ mm 와 $300 \times 500 \times 8$ mm를 사용하였으며, 맞대기 용접의 경우는 크기효과를 고려하여 $300 \times 500 \times 15$ mm 시편을 사용하였다. 시편의 용접은 CO_2 Flux Cored Arc Welding을 적용하였으며 시편의 재질은 선체건조용 용접 구조용강으로 널리 사용되고 있는 Mild steel A grade 와 고장력강 AH를 사용하였고 용접조건은 Table 1 과 같이 적용하였다.

수치해석의 과정은 먼저 3차원 열전달해석을 수행하였으며 그 결과치인 온도분포를 하중조건으로 하여 3차원 잔류응력해석을 수행하였고 순차적으로 독립적인 두 가지 해석을 수행하였다. 열전달 해석에서는 재료의 비열, 열전도도 및 열팽창계수 등을 온도에 따라 변하는 비선형 값으로 적용하였고 상변화를 고려하여 엔탈피가 온도에 따라 변하는 값으로 입력하였다. 또한, 열원은 용접선을 따라서 가우시안 분포로 이동하는 것으로 가정하였고 맞대기 용접해석시 비드부분은 용접이 진행됨에 따라 요소가 생성되도록 세밀하게 모델링하였고 해석시간의 경제성을 위하여 용접부위에서 멀어질수록 요소를 크게 모델링하였다. 용접 시작에서 냉각 완료까지 충분한 열전달을 고려하여 7200초 동안 해석을 수행시켰다. 잔류응력 해석에서는 재료의 탄성계수, 소성계수, 프와송비 및 항복응력값 등을 온도에 따라 변하는 비선형 값으로 적용하였고 경화조건은 Kinematic hardening-Von Mises yield criterion을 적용하여 온도에 따른 바우싱거 효과를 포함하는 소성변형을 고려하였다.

실험적 방법에 있어서 잔류응력 측정에 사용된 스트레인 게이지는 일본 KYOWA사의 잔류응력 계측용 3축 로제트 게이지 인 KFG-3-120-D28-11 직경 3mm를 사용하였는데, 이는 Beany의 연구에 의하면 구멍의 직경이 작을수록 소성역에 의한 영향이 크고 2mm 직경의 구멍에서 소성역 발생에 의하여 약 10%의 계측오차가 예상된다고 보고했기 때문이다. 측정장비는 UCAM-5BT Universal digital measuring system과 USB-50A Multi-point scanner를 사용하였다. 측정방법은 시편을 용접

및 냉각 후 측정위치에 깨끗하게 표면처리를 하고 CC-33A 접착제를 사용하여 게이지를 부착하고 영점 조정 후 밀링머신의 드릴 작업으로 게이지 중심을 8단계의 깊이로 구멍을 뚫어 단계별로 스트레인을 측정하여 계측된 값을 ASTM E 837 규격 및 Kirsh's solution을 기본으로 잔류응력을 계산하였다. 계측방법에 있어서는 Blind hole 방법과 Through hole 방법을 동시에 측정하여 결과치를 비교하여 보았다.

3. 결과 및 고찰

단순 Bead-on plate 용접에 있어서 용접선 방향의 잔류응력 결과는 길이가 80 mm인 시편보다 길이가 500 mm인 시편에서 최대 인장응력을 받고 있는 부분이 용접 중심선으로부터 보다 넓게 분포하고 특히, 500 mm 시편에서는 끝단으로 갈수록 압축응력이 다소 높게 나타나지만 80 mm 시편에서는 끝단으로 갈수록 잔류응력이 거의 나타나지 않았다. 이들의 수치해석 및 실험 측정 결과 값을 Fig. 1과 Fig. 2에 비교하여 표시하였으며 Through hole 방법보다 Blind hole 방법이 수치해석 결과치와 유사한 경향을 보여주었고 이를 통해 잔류응력 평가의 신뢰성을 어느 정도 확인할 수 있었다. 잔류응력 계측시 구멍의 깊이가 커질수록 단계별로 스트레인이 증가하다가 구멍의 직경이상이 되면서 변화가 없음을 확인할 수 있었는데, 이는 직경이상의 깊이에서 잔류응력의 거의 대부분이 완화됨을 의미한다. Cut-Wire 1 PASS 맞대기 용접에 있어서 잔류응력의 분포는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 Fig. 2와 유사한 경향을 나타내었으며 전반적으로 해석치와 계측치의 응력분포의 경향은 일치하였으나 정량적인 문제에서 차이를 발생하고 있다. 특히, 용접비드 부위에서의 계측치가 항복응력을 훨씬 넘는 값이 나타났는데 이는 이론적으로 불가능한 값으로 비드 부위에서의 탄성계수와 프와송비의 값을 용접모재의 값을 그대로 사용했고 모재 자체가 포함한 잔류응력 때문에 비정상적인 오차가 생길 수 있는 값이지만 근본적으로 높은 잔류응력 측정에는 Hole drilling 방법이 적용되기가 어렵다고 판단할 수 있다. Fig. 4는 맞대기 용접시편의 용접진행중인 상태의 온도분포를 나타내고 있으며 Fig. 5는 용접시편의 7200초 후의 최종 잔류응력 상태를 나타내고 있는데 길이방향에서 중간부위에 높은 잔류응력이 분포하고 있다. 또한, Fig. 6은 잔류응력 측정 실험시 용접시편에 게이지가 취부된 상태를 보여주고 있다.

4. 결론

이상에서 유한요소법과 실험계측을 이용하여 FCAW 용접의 잔류응력을 평가해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시편의 길이가 증가하면 전체 열영향의 차이로 최대 인장응력을 받는 영역이 용접 중심선으로부터 점점 증가하면서 분포양상도 달라짐을 확인할 수 있었다.
- 2) 잔류응력의 평가를 실제 구조물에 적용하기 위해서는 시편단위 해석 및 계측시 시편 크기효과를 반드시 고려할 필요가 있음을 확인할 수 있었다.
- 3) Cut-wire 1 PASS 맞대기 용접의 잔류응력 평가 결과, 기존의 다층 맞대기 용접의 대체방법으로서의 가능성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Rendler N.J., Vigness I., "Hole Drilling strain gage method of measuring residual stresses" Experimental Mechanics, Vol 6, No. 12, 1966, pp. 577-586.
2. E.M. Beany "Accurate measurement of residual stress on any steel using the center hole method" Strain, July 1976, pp. 99-106.
3. ASTM E 837-99
4. ANSYS User's manual

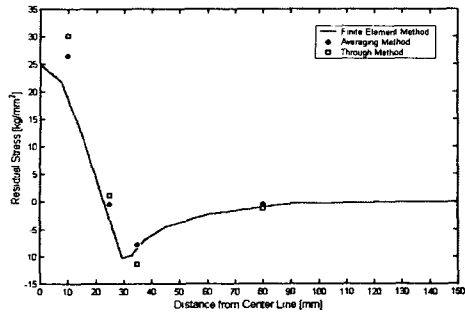


Fig. 1 Results of residual stresses on specimen $80 \times 300 \times 8$

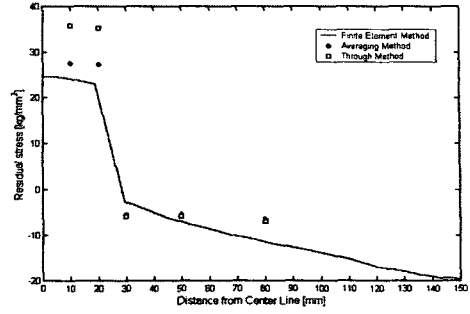


Fig. 2 Results of residual stresses on specimen $500 \times 300 \times 8$

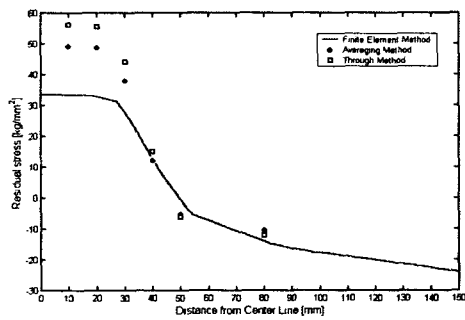


Fig. 3 Results of residual stresses on specimen $500 \times 300 \times 15$

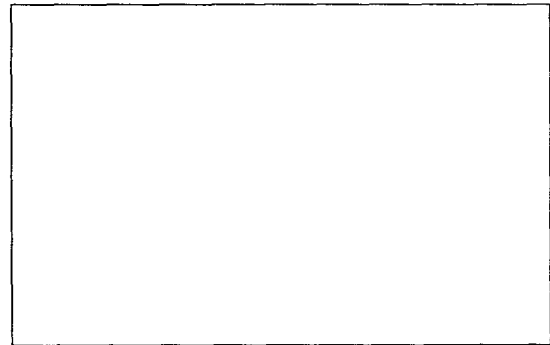


Fig. 4 Temp. distribution while welding specimen $500 \times 300 \times 15$

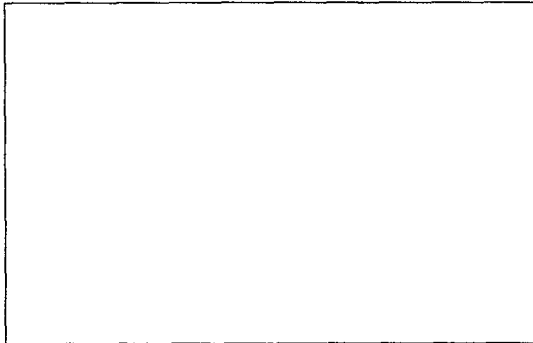


Fig. 5 Residual stress distribution after 7200sec. on specimen $80 \times 300 \times 8$

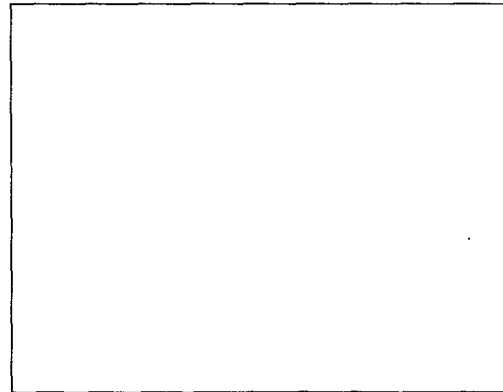


Fig. 6 Strain gage attachment

Table 1 Welding condition

Welding method	Specimen size (mm)	Groove angle (°)	Root gap (mm)	Ampere (A)	Voltage (V)	Speed (cpm)	Heat input (cal/mm)
Bead-on plate	$80 \times 300 \times 8$	-	-	280	30	48	250
	$500 \times 300 \times 8$	-	-	280	30	48	250
V Groove	$500 \times 300 \times 15$	38	6	500	38	23	1181