

중보강재의 용접공정에 따른 선체외판의 잔류응력 연구

Effect of Welding Sequence on the Residual Stresses of Plate with Longitudinal Stiffeners

이정수*, 김남인*, 최우현*
(주)한진중공업 기술연구소

1. 서론

용접구조물에 발생하는 잔류응력은 구조물의 피로강도, 좌굴강도, 부식저항 등을 저하시켜 용접구조물의 안정성에 심각한 문제를 일으킬 수도 있다. 따라서 용접 잔류응력을 고려한 용접구조물의 설계가 요구된다. 특히, 용접 공정에 따른 구조물의 용접 잔류응력의 평가는 매우 중요하게 다루어지고 있다. 일반적으로 용접구조물의 잔류응력을 평가하기 위해서 유한요소해석 상용 패키지를 사용한 수치해석적인 방법과 여러 가지 실험적인 방법을 많이 이용하고 있다.

본 연구에서는 선체외판에 중보강재를 용접하는 과정에서 중보강재의 용접공정에 따른 외판의 잔류응력을 고찰하였다. 우선 해석적인 방법으로 시편 형상의 모델에 대한 용접 잔류응력을 구하는 과정에서 기본적인 용접공정을 구현하는데 중점을 두었다. 그 타당성을 검증하기 위해 동일 형상의 실제 용접 시편으로 실험을 수행하여 해석결과와 비교하였다. 이러한 방법을 실제에 가까운 구조물에 적용하기 위한 해석기법에 대해 고찰하였으며, 몇몇 용접공정에 따른 용접 잔류응력을 계산하였다. 수치해석은 유한요소해석 상용 패키지인 ANSYS 5.6을 사용하여 3차원 열탄소성 해석을 수행하였고, 실험은 가장 대표적이고 신뢰성 있는 잔류응력 측정법인 HDM(Hole Drilling Method)을 사용하였다.

2. 용접공정에 따른 용접 잔류응력의 계산

2.1 해석 및 실험조건

수치해석과 실험의 타당성을 검증하기 위해 사용한 용접시편은 De Garmo의 실험과 Rendler의 보고를 근거로 결정하였다[1,2]. 따라서 Bead on plate 용접인 경우 300*500*8mm, 맞대기 용접의 경우 300*500*15mm인 시편을 사용하여 수치해석과 실험의 타당성을 검증하였다. 용접공정에 따른 외판의 잔류응력을 계산하기 위하여 크기가 800*400*8mm인 평판에 높이 100mm, angle 부위의 길이가 75mm인 중보강재를 용접하여 사용하였다. 실제 당사에서 사용하는 중보강재의 최소 간격을 고려하여 평판의 길이를 결정하였으며, 해석 및 실험의 효율성을 고려하여 너비를 결정하였다. 시편의 용접은 CO₂ Flux Cored Arc Welding을 적용하였으며 시편의 재질은 선체건조용 용접 구조용강으로 널리 사용되고 있는 Mild Steel A Grade를 사용하였고 용접조건은 Table1과 같이 적용하였다.

Table1. Welding condition

Welding	Size(mm)	Groove angle(°)	Root gap (mm)	Ampere(A)	Voltage(V)	Speed(cpm)	Heat input (cal/mm)
Bead on plate	500*300*8	-	-	280	30	48	250
V Groove	500*300*15	38	6	500	38	23	1181
Fillet	400*800*8	-	-	230	28	40	230

2.2 ANSYS를 이용한 수치해석적인 방법

수치해석과정은 먼저 3차원 열전달 해석을 수행하였으며 온도분포 결과를 하중조건으로 하여 3차원 잔류응력 해석을 수행하였다. 해석에서 사용된 여러 가지 물성치들은 온도에 따라 변하는 비선형 물성치를 사용하였고 비드 부분은 요소생성법을 적용하여 세밀하게 모델링하였다. 용접공정에 따른 외판의 잔류응력을 계산하기 위한 시편은 4회의 용접 공정이 포함되었으며 해석에서도 동일하

게 적용하였다. 각각의 용접 방향을 서로 다르게 적용하였는데, 이는 자동용접을 고려하여 적절한 용접순서 및 방향을 결정하였다. 이러한 용접해석은 시간에 따른 온도변화 및 탄소성 거동의 변화를 고려하여 해석을 수행하기 때문에 실제 구조물이나 형상이 복잡한 구조물인 경우 많은 컴퓨터 계산시간과 용량을 요구하게 된다. 해석에 사용되는 모델의 전체 자유도수를 효율적으로 조절하고 열전달 해석 및 구조해석에서 사용되는 비선형 과도해석 기법과 경계조건 설정을 적절히 이용하면 많은 계산시간과 용량을 절약할 수 있다. Fig.1은 용접구조물의 유한요소해석 모델과 방향이 일정한 용접공정의 모델을 나타낸다. Table2는 용접방향을 고려한 용접공정의 5가지 경우를 나타낸다.

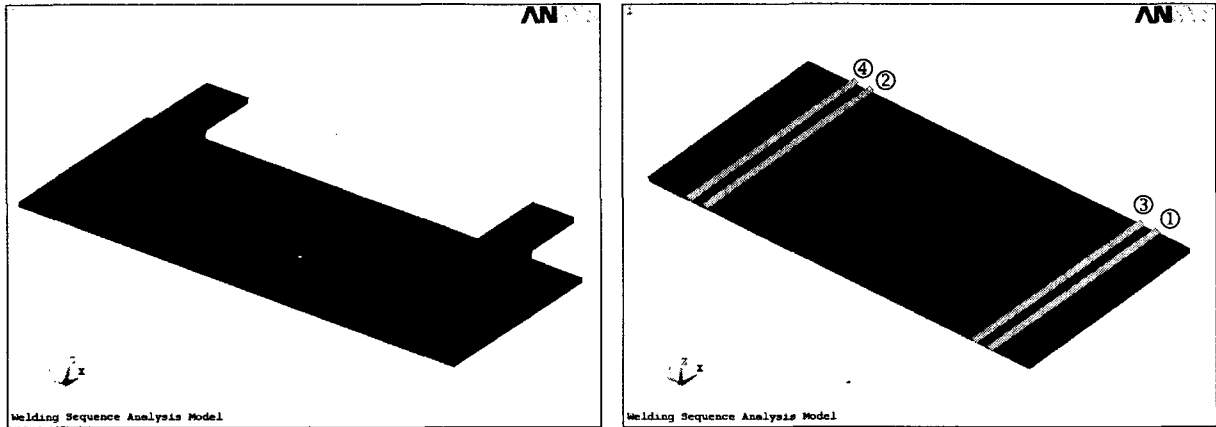


Fig.1 Model for welding sequence analysis

2.3 HDM을 이용한 실험적인 방법

실험적 방법에 있어서 잔류응력 측정에 사용된 스트레인 게이지는 일본 KYOWA사의 잔류응력 계측용 3축 로제트 게이지(KFG-3-120-D28-11 직경 3mm)를 사용하였다. 측정방법은 시편을 용접하고 냉각한 후 측정 위치에 표면처리를 하고 접착제를 사용하여 게이지를 부착하고 게이지 중심을 8단계의 깊이로 구멍을 뚫어 단계별로 스트레인을 측정하여 ASTM E 837 규격에 따라 잔류응력을 계산하였다[3]. 용접공정에 대한 지배적인 용접 잔류응력 분포의 경향을 알아보기 위해 종보강재를 기준으로 안쪽과 바깥쪽의 용접선 부근에서 단계적으로 구멍을 뚫어 잔류응력을 계측하였다. Fig.2는 스트레인 게이지를 부착시킨 시편의 형상을 보여준다.

Table2. Case for welding sequence

	case1	case2	case3	case4	case5
①	→	→	→	→	→
②	→	→	←	←	→
③	→	←	←	→	←
④	→	←	→	←	→



Fig.2 Strain gage attachment

3. 결과 및 고찰

해석을 수행한 결과 원활한 해석을 위해 구속시킨 부분에서도 응력집중이 발생하지만 용접부 길이 방향 잔류응력은 용접부 부근에서 매우 높은 응력상태를 보여준다. Y방향의 길이가 X방향의 길이보다 상대적으로 길면 용접선에서 멀어질수록 압축응력이 작용하다가 점점 그 크기가 줄어드는 응력상태를 나타낸다. 반대로 X방향의 길이가 상대적으로 길면 용접선에서 멀어질수록 압축응력만 작용하는 응력상태를 나타낸다. Fig.4는 용접선으로 멀어지는 방향의 잔류응력을 나타낸다. 전체적

인 응력의 분포를 볼 때 각각의 용접 공정(case1~case5)에 대한 잔류응력의 값이 거의 비슷하게 계산 되는 것을 알 수 있다. Fig.5와 Fig.6에서는 시편의 안쪽과 바깥쪽에서 실험이 가능한 부분에서의 잔류응력 해석결과와 실험치를 비교하였다. 열영향부의 근접한 부위에서의 잔류응력은 해석과 실험의 정량적인 값은 차이가 있으나 용접선에서 멀어질수록 거의 비슷한 경향을 보여준다.

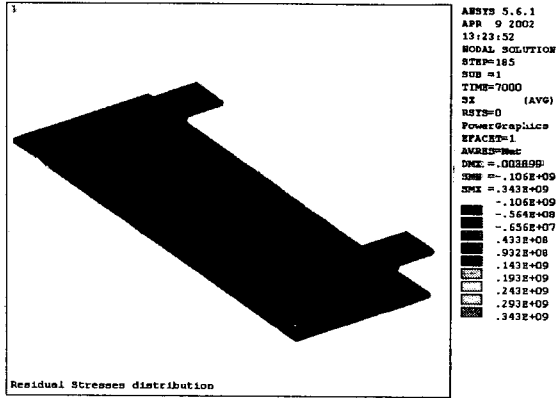


Fig.3 Residual stress (σ_x) distribution

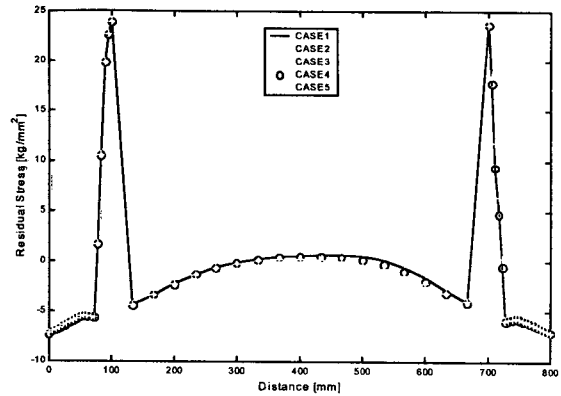


Fig.4 Residual stress (σ_x) along Y-axis

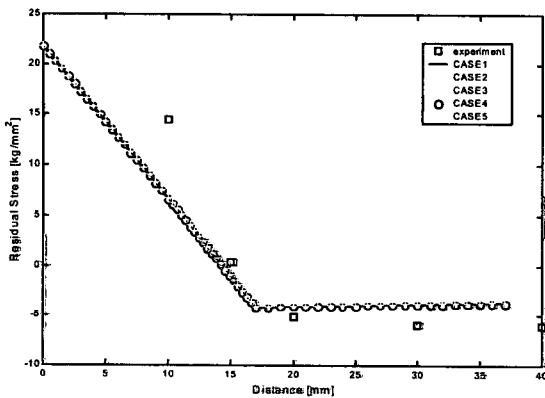


Fig.5 Inner residual stress

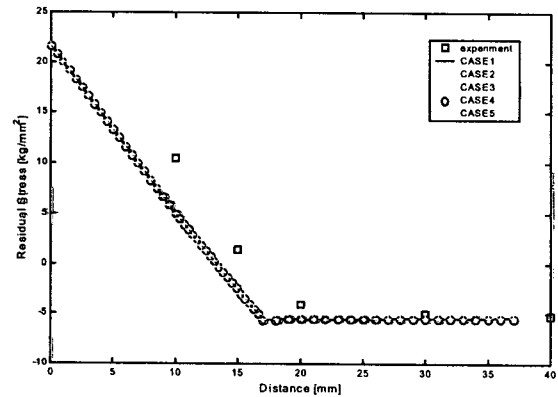


Fig.6 Outer Residual stress

4. 결론

본 논문에서는 선체의외판에 중보강재를 용접하는 과정에서 중보강재의 용접공정에 따른 외판의 잔류응력을 고찰하였다. 우선 해석적인 방법으로 시편 형상의 모델에 대한 용접 잔류응력에서 시편의 가로/세로에 따른 용접잔류응력의 경향을 고찰하였다. 그리고 용접방향만을 고려한 용접 공정의 변화에 있어서는 구조물의 지배적인 잔류응력의 차이가 거의 없다는 것을 알 수 있다. HDM을 이용한 실험 결과도 해석과 비슷한 경향을 보여주고 있으므로 용접 잔류응력 측정에 있어서 HDM의 적용성을 검증하였다. 향후 대형 용접구조물의 해석을 수행하기 위한 유한요소 해석기법에 대한 많은 연구가 필요하며 여러 가지 용접공정을 고려한 용접시퀀스 해석에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

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 "Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain gage method"