

후판용접시 구속도와 잔류응력 및 저온균열의 상관관계 규명

A Study on the relationship among the constraint and residual stress and cold crack in thick section weldment

김유일, 강중규, 허주호, 이성근
대우중공업 선박해양기술연구소 설계기술연구팀

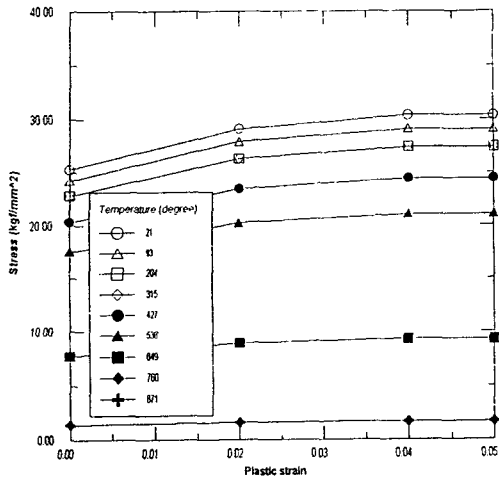
1. 개요

구조물의 손상 및 파괴의 원인은 여러가지가 있을 수 있으나, 그 중에서도 용접에 의해 제작된 구조물의 경우에는 용접작업의 결과로 용접부에서 발생하는 여러가지 종류의 결함이 그 원인이 되는 경우가 대부분이다. 용접부에 발생하는 균열은 발생시기에 따라 분류하면 비교적 높은 온도에서 발생하는 고온균열과 낮은 온도에서 발생하는 저온균열로 나눌 수 있다. 고온균열은 액화균열이나 응고균열과 같이 저용점 개재물의 영향으로 발생하는 균열로 주로 용접부 초층에서 흔히 발생되고, 저온균열은 용접부 내로 유입된 확산성 수소, 잔류응력, 경화조직에 의해 발생된다. 저온균열은 발생위치에 따라 weld metal내부에서 발생하는 횡균열과 HAZ부에서 발생하는 종균열로 나뉜다. 용접 열영향부에서 발생하는 용접 저온균열에 대한 연구는 매우 활발히 이루어져 왔으나[1][2][3], 상대적으로 weld metal에서 발생하는 횡균열에 대한 연구결과는 최근에 활발히 진행되고 있는 실정이다[4]. 저온균열의 원인 규명을 위한 연구는 주로 야금학적인 관점에서 이루어져 왔으며 용접부 주위 금속조직의 관찰과 수소량의 계측을 통한 실험적인 방법에 의존하여 왔다. 실제로 잔류응력이 저온균열에 많은 영향을 끼치는데 이에 대한 체계적인 연구는 많지 않은 실정이다.

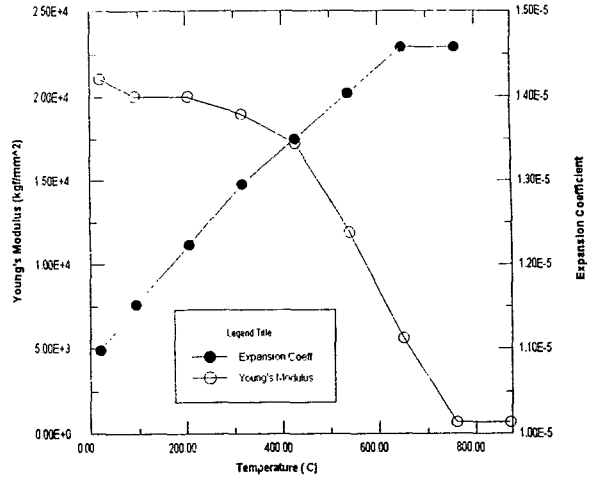
본 연구에서는 용접 저온균열의 방지를 위한 기초 연구로, 저온균열의 원인 중 하나인 잔류응력의 영향을 다양한 조건하에서 구현하여 잔류응력 및 구속도가 저온균열의 발생에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

2. 유한요소 해석

해석은 2차원 축대칭 모델과 generalized plane strain 모델을 선택하였고 유한요소 모델은 축대칭 요소와 generalized plane strain 요소를 이용하였다. 해석에 사용된 요소는 4절점 축대칭요소(CAX4)와 6절점 generalized plane strain 요소(CGPE6)이다. 반경별, 두께별로 각기 다른 모델을 만들어 먼저 열전달 해석을 수행하였고, 그에 따라 열응력해석을 수행하였다. 열전달 해석과 열응력 해석의 비연성 가정은 이미 많은 연구를 통하여 그 유효성이 입증되었으므로 [22], 두가지 현상의 연성효과를 고려하지 않고 순차적으로 독립적인 두가지 해석을 수행하였다. 열전달 해석시에는 모든 열전달 재료 물성치의 온도의존성을 고려하였으며, 또한 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열의 효과를 고려하였다. 열응력 해석시에도 모든 기계적인 재료 특성치들이 온도에 따라 변하도록 모델링하였다. 그림 1의 (a)는 온도에 따라 변하는 연강에 대한 탄성계수(Young's modulus)와 열팽창계수(Expansion coefficient)의 변화를 나타낸다.



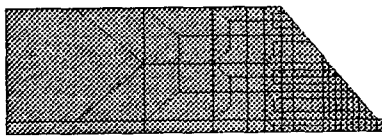
(a) 탄성계수와 열팽창계수의 온도의존성



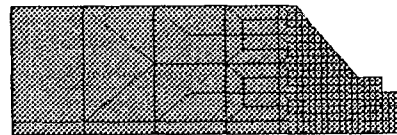
(b) 탄소성 곡선의 온도의존성

그림1 열응력 재료특성치의 온도 의존성

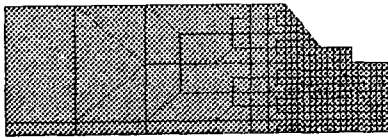
열전달 해석과 열응력 해석 모두 weld metal이 쌓여 나가는 과정을 구현하기위해 해석이 진행되는 동안 해석모델이 변화하도록 하였다. 그림2는 시간이 지남에 따라 각 용접층이 쌓여 나가는 모습을 나타낸다. 초기에는 전체를 모델링 하고, 해석이 시작되기 이전에 bead부분의 요소들을 모두 삭제한 다음, 시간에 따라 요소가 하나씩 생성되도록 하였다.



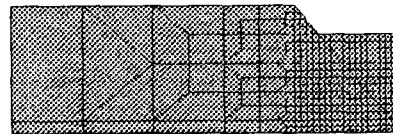
(a) Load step = 1



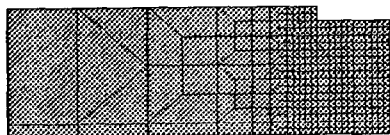
(b) Load step = 10



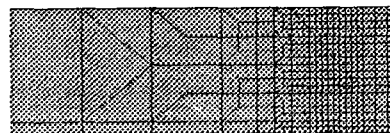
(c) Load step = 20



(d) Load step = 30



(e) Load step = 40



(f) Load step = 47

그림2 시간에 따른 해석모델의 변화

Butt용접현상은 엄격히 말하여 대칭모델이 아니지만, 대칭모델과 전체모델의 결과는 큰 차이를 보이지 않으므로 대칭모델을 선택하여 계산하였다. 열전달 해석의 경우에는 대칭축을 제외한 모든 면에서 대류로 인한 열손실이 있다고 가정하여 대류경계조건을 부가하였다. 열대류 계수는 6×10^{-6} ($W/m^2\text{C}$)으로 균일하다고 가정하였으며, 대기의 온도는 25C 로 가정하였다.

3 해석 결과

그림과 3은 두께 100mm의 판에 대해 반경 300mm, 630mm, 12300mm 및 아무 구속이 없는 평판의 경우(*generalized plane strain : gpe*)에 대한 잔류응력 해석 결과이다. 반경 300mm의 경우가 종방향 및 각변형에 대한 구속도가 가장 큰 경우이고 반경이 커질수록 구속도가 작아지며, 최종적으로 평판의 경우에는 아무런 구속이 없게 된다. 구속이 심한 경우에는 최종층 아래부분 weld metal 내부에서 높은 인장응력을 보이고 bottom부로 갈수록 점차로 줄어드는 경향을 보인다. 구속도가 작아질수록 root부 근방에서의 응력이 높아지고 최종층 아래부분에서의 응력값의 변화는 그리 크게 나타나지 않는다. 폭방향의 응력(S_{22})의 경우에도 표1의 경우와 유사한 결과를 짐을 알 수 있다. 최종층 아래부분에서의 응력값의 변화는 크지 않은 반면, root부에서는 구속도가 감소함에 따라 응력값도 커짐을 알 수 있다. 결론적으로 구속도에 따라 최종층 아랫부분의 *hydrostatic pressure stress* 값의 변화는 거의 없는 반면, root부에서는 구속도가 작아질수록 높은 3축 인장응력(*high hydrostatic tension stress*)상태로 변해 나감을 알 수 있다. 따라서, 구속이 심한 경우에는 weld metal 내부의 평균열의 발생 가능성이 높고, 반대로 낮은 구속도는 잔류응력이외의 다른 요인과 함께 root부의 평균열의 발생가능성을 높인다. 잔류응력의 영향으로만 보면 평균열의 발생 가능성은 구속도와 무관한 것처럼 보이나, 실제로 저온균열에 중요한 영향을 미치는 것은 확산성 수소이므로 이에 대한 고려가 필요하다 하겠다.

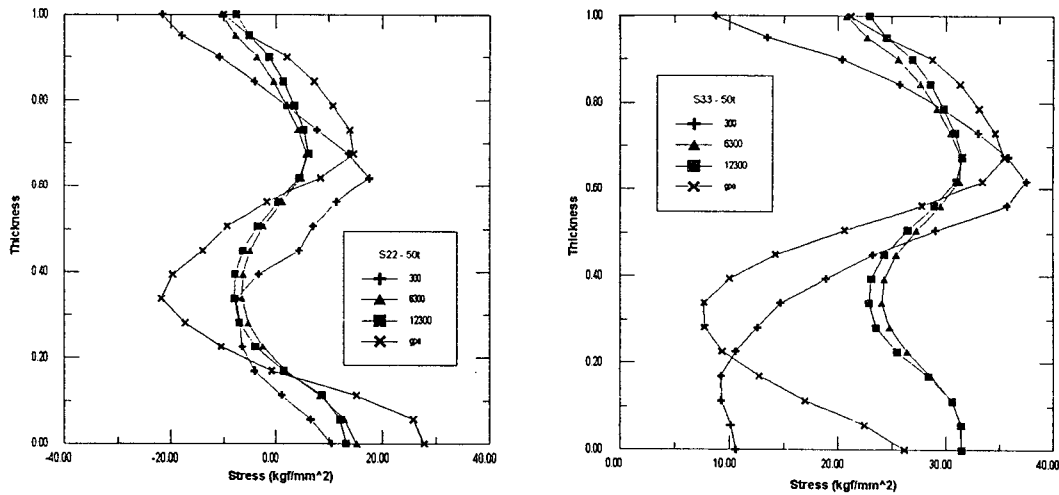


그림3 용기 반경별 잔류응력분포 (두께 50mm)

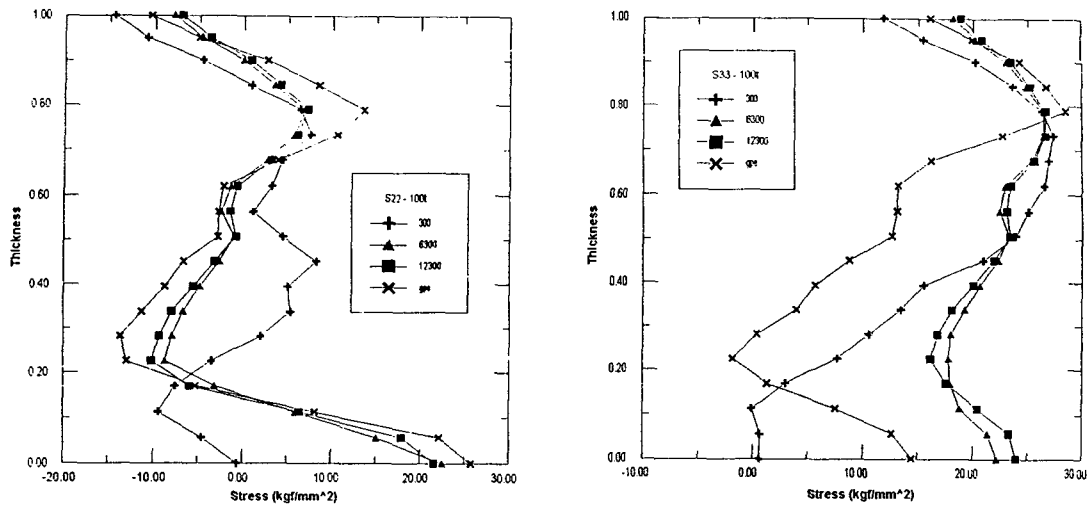


그림4 용기 반경별 잔류응력분포 (두께 100mm)

4. 결론

Weld metal내부에 발생하는 용접 횡균열은 weld metal내부의 용접선 방향응력이 지배인자인데, 이는 구속도에 따라 커다란 차이를 보이지는 않는 것으로 나타났으며, 일반적으로 후판의 경우에는 이러한 응력값이 항복응력 근처의 값을 가진다. 구속도에 따라 용접 저온균열의 발생이 달라지는 경우는 HAZ부에서 발생하는 저온균열과 관련이 있다. 각변형 구속이 큰 경우에는 root부의 폭방향 응력이 높은 압축상태 이고, 반대로 각변형 구속이 없는 경우에는 폭방향 응력이 인장상태로 변하게 된다. 구속이 없는 두꺼운 평판을 용접하는 경우에 HAZ부의 종균열 발생 가능성이 높다고 할 수 있고, 두꺼운 압력용기의 girth방향의 용접인 경우에는 횡균열의 발생 가능성이 높다.

참고문헌

- [1] F.R.Coe, Z.Chano, Hydrogen distribution and removal for a single bead weld during cooling, Welding Research International, Vol. 5, No. 1, 1975
- [2] E.Smith, The fracture of hydrided material during delayed hydride cracking (DHC) crack growth, Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol.61, 1995, p.1
- [3] J.Brozda, A comparison between the levels of preheat temperature necessary to prevent cold cracking during welding of low-alloy high- and higher-strength steels, Welding International, Vol.11, 1997, p.95
- [4] Y. Ueda, K. Nakacho, Distributions of welding residual stresses in various welded joints of thick plates, Transactions of JWRI, Vol. 15, 1986, p.113