

# 수치해석을 이용한 후판용접부 저온균열의 방지대책 검토

한 종 만

## A Review on the Prevention of Cold Crack in Thick Section Weldment by Numerical Analysis

J. M. Han



한종만/대우중공업  
선박해양기술연구소  
/1956년생/소재개발  
및 용접야금

### 1. 개 요

후판 용접시 발생하는 저온균열의 발생원인 중 하나인 잔류응력의 영향을 다양한 조건하에서 구현하여 잔류응력 및 구속도가 저온균열의 발생에 미치는 영향에 대해 수치해석법을 이용하여 검토하였다.

### 2. 구속도와 잔류응력

용접 시에 구조물에 발생하는 용접 잔류응력은 구조물의 구속에 의해 발생하는 피할 수 없는 현상이다. 구조물의 구속은 외부에서 가해주는 인위적인 구속과 판 두께와 같이 용접되는 구조물의 내부적인 구속이 있다. 용접할 구조물이 결정되면 판 두께에 의한 구속은 피할 수 없는 현상이므로, 용접 후 잔류하는 잔류응력의 양은 외부적인 구속에 의해 지배받게 된다. 일반적으로 실제 구조물에 작용하는 외부 구속은 그 구조물의 특성에 따라 크게 용접선 방향으로의 구속인 종방향 구속(Longitudinal restraint)과 각변형을 막는 각변형 구속(Angular restraint)으로 나눌 수 있다.

평판의 경우에 대해 종방향 구속과 각변형 구속은 Fig. 1에 보인 바와 같다. 아무런 구속이 없는 평판을 용접하는 경우에는 종방향 및 각변형 구속도가 완전히 없는 경우이고, 반대로 압력용기의 Cylinder-Head접합부의 Girth방향 용접이나 사방이 모두 용접된 평판

의 용접은 두 가지 종류의 구속도가 모두 매우 심한 경우라 할 수 있다. 실제로 구조물의 구속도를 파악하는 것은 간단하지 않으며, 많은 실험과 해석을 통한 데이터의 축적으로만 가능하다고 할 수 있다. Fig. 2는 실제 다층용접 현상을 유한요소법을 이용하여 수치시물레이션을 수행하여 구한 용접선 중심선에서의 두께방향 응력분포를 나타낸 것이다.

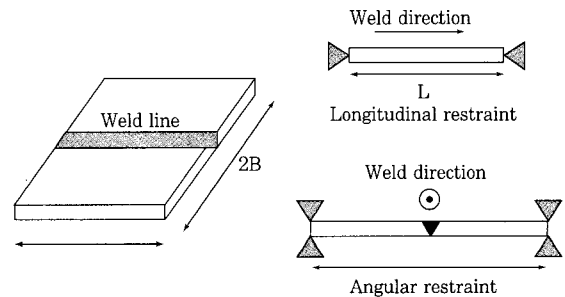


Fig. 1 평판 용접시의 구속도

### 3. 저온균열과 잔류응력

저온균열은 강의 용접부가 200℃ 이하의 비교적 저온으로 냉각되고 난 후에 발생하여 진전되는 균열로, 경우에 따라서는 완전히 실온까지 냉각된 후에 수 시간, 수 일 혹은 수십 일 후에 나타나는 경우도 있다. 이러한 종류의 균열을 지연균열(Delayed crack) 또는 저온균열(Cold crack) 혹은 수소유기균열(Hydrogen Induced Cracking)이라 한다. 용접부의 저온균열은

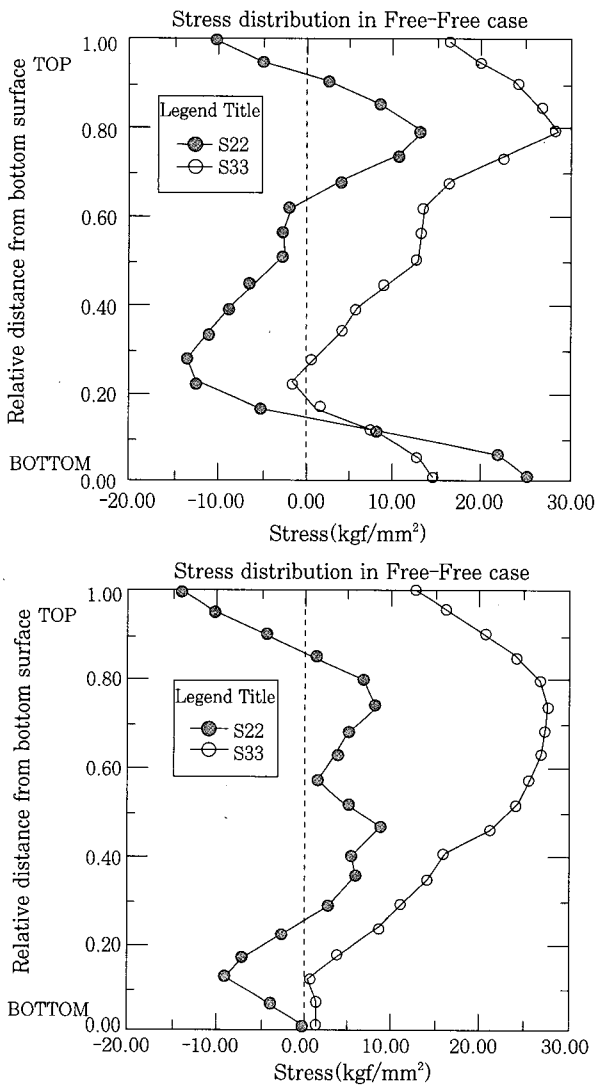


Fig. 2 구속도 별 잔류응력의 분포

그 발생위치에 따라 HAZ부의 종균열과 용착금속 내부의 횡균열로 나눌 수 있다. HAZ부에 발생하는 균열은 다층용접시 초층 비드가 위치한 Root부에서 발생하며, 그 방향은 용접선과 나란한 종방향으로 발생한다. Root부에 종방향으로 발생하는 균열은 Fig. 3에 보인 바와 같이 X방향으로의 응력이 인장인 경우에 발생하게 된다.

각변형 구속도가 없는 경우에는 X방향의 응력성분이 Root부에서 큰 인장값을 보이는데, 이는 확산성 수소, HAZ부의 미세조직과 함께 Root부에서 발생하는 종균열의 원인의 하나가 된다. 용착금속 균열은 종방향 구속도와 각변형 구속도가 모두 큰 경우에 발생하게 되는데, 최종층 아래부분에서 Z방향 및 X방향의 응력성분이 모두 높은 인장값을 보이고, 이러한 높은 인장응력에 의해 확산성 수소가 이 부분으로 집중하게 되

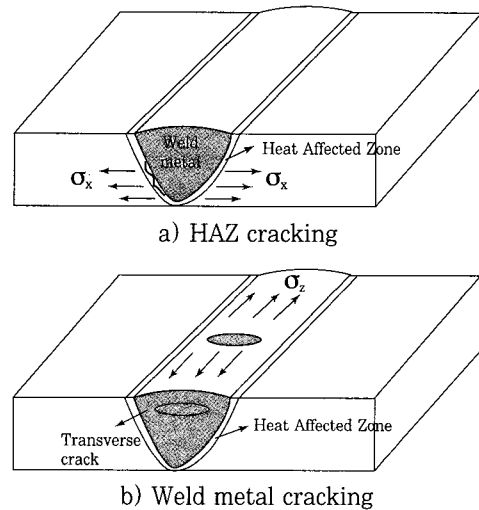


Fig. 3 저온균열과 잔류응력

어 그로 인해 용접선에 수직인 방향으로 횡균열이 유발된다. 용착금속에서의 저온균열이 횡방향으로 발생하는 것은 Z방향의 인장응력값이 X방향의 인장응력값보다 크기 때문이다. 이상의 결과를 보면, 구속도에 따른 잔류응력의 발생 양상이 실제 저온균열의 발생양상을 잘 설명해 줌을 알 수 있다.

실제로 여러가지 구속도하에서의 저온균열의 발생가능성을 검토하기 위해서는 각 구속도 별 잔류응력의 계산이 필요하다. 용접 잔류응력을 계산하는 방법으로는 Inherent strain법을 이용한 Analytical method와 유한요소법을 이용한 방법이 있다. 유한요소법을 이용하여 종방향 구속도와 각변형 구속도에 따른 잔류응력을 계산하기 위해서는 실제로 3차원 시뮬레이션이 필요하지만, 후판의 다층 용접을 3차원 시뮬레이션하기에는 여러 가지 어려움이 많으므로 각 구속도의 효과를 고려할 수 있는 2차원 모델을 이용하여 계산을 수행하는 것이 효과적이다.

#### 4. 저온균열과 확산성수소

저온균열을 방지하기 위한 용접후열처리의 온도에 대한 기준을 해석적으로 설정하기 위해서는 정확한 수소 확산 시뮬레이션이 필요하다. 수소의 확산이 균일한 매체 안에서 일어난다면 수소확산을 일으키는 원동력은 수소농도의 구배이며, 이는 Fick의 제2법칙에 의해 수치적으로 구현이 가능하다. Fick의 제2법칙을 이용하여 수소확산 해석을 하는 여러 가지 방법들이 있으나, 이러한 수소확산 시뮬레이션은 용접부내의 수소의 확산을 정확하게 설명해 주는 데에는 한계가 있다고 여겨진다. 즉, 용접부는 모재, 열영향부, 소성변

Table 1. 구속도에 따른 잔류응력의 분포

Residual Stress		Angular Distorsion	
		Restricted	Free
deformation	Restricted	<p>Butt joint of plane plate restraint condition B Cylinder head butt joint of pressure vessel</p>	<p>Butt joint in pensocket, Circumferential joint</p>
	Free conditional	<p>Butt joint of plane restraint condition A</p>	<p>Butt joint in pensocket, Longitudinal joint</p>

$\alpha_x$ : Transverse Welding Residual Stress

$\alpha_z$ : Longitudinal Welding Residual Stress

형, 잔류응력 및 다양한 미세조직 등이 혼재하는 복잡한 매체이므로 확산매체가 균일하다는 가정 하에서 구성된 Fick의 법칙으로는 이러한 용접부의 확산을 구현하는데는 어려움이 있다고 판단된다. 실제로 수치해석 프로그램들은 기본적으로 Fick의 법칙을 따르고 있고, 수소 확산의 인자로 수소농도의 구배, 온도 구배, 불균일한 Solubility, Hydrostatic pressure stress의 구배가 고려될 수 있는데, 이를 이용한 수소 확산 해석으로는 용접부 저온균열 현상을 규명하기에는 한계가 있다고 판단된다.

### 5. 결 론

용착금속 내부에 발생하는 용접 횡균열은 용착금속 내부의 용접선 방향응력이 지배인자 인데, 이는 구속도에 따라 커다란 차이를 보이지는 않는 것으로 나타났다. 일반적으로 후판의 경우에는 이러한 응력값이 항복응력 근처의 값을 가진다. 구속도에 따라 용접 저

온균열의 발생이 달라지는 경우는 HAZ부에서 발생하는 저온균열과 관련이 있다. 표1에 보인 바와 같이 구속도에 따라 용접 Root부에 생성되는 용접선 폭방향의 응력값은 상당히 다른 양상을 나타낸다. 즉, 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. 결론적으로, 용착금속 내부에 발생하는 용접 횡균열의 경우에는 잔류응력 보다는 확산성 수소의 영향이 더욱 지배적이라 할 수 있다. 즉, 구속도에 따라 용착금속 내에서 발생하는 용접 횡균열의 발생 가능성은 크게 달라지지 않고, 판의 두께 등의 영향으로 인한 확산성 수소의 방출과 더욱 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다.