



용접부의 균열 및 그 방지(III)

- 고온균열(II) -

박 화 순

Cracking in Welds and Its Prevention(III)

- Hot Cracking in Welds(II) -

Hwa-Soon Park

고온균열은, 대한용접학회에서 발간한 ‘용접·접합 용어사전’에 의하면, ‘용접시 발생하는 일차결함으로서, 응고온도범위 또는 그 직하의 비교적 고온에서 용접부의 자기수축과 외부구속 등에 의한 인장 스트레인(또는 응력)과 균열에 민감한 조직이 존재하면 발생하는 용접부의 균열을 말한다’라고 되어 있다¹⁾. 본 호에서는 이들 고온균열의 발생기구와 그 방지대책에 대한 기본적인 내용을 소개하기로 한다. 그리고 실용 재료에 대한 것은 다음 호에서 언급하기로 한다.

1. 고온균열의 발생기구

(1) 응고균열의 발생기구

응고균열(solidification cracking, Type I형(편석균열))은, 재료의 응고 중에 발생하는 저연성특성과 용접 중에 발생하는 변형(변위) 거동과의 복합적인 과정에 의해서 발생한다. 균열발생의 유무에 대한 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_N + D_E \geq D$$

(>: 균열발생, <: 균열발생 없음, =: 균열발생 유무의 한계)

여기서, D_N : 자유수축변위, D_E : 외부변위, D : 응고 중의 한계연성치

이것을 도시하면 그림 1²⁾과 같이 된다. 아래 쪽의 그림은 용접비드 표면의 주상정의 성장형태를 나타내고 있다. 윗 그림은 T_L - T_S 간의 용접부의 변위곡선을 직선 ①, ②, ③으로 근사적으로 나타내고 있으며, 또한 T_L - T_S 에서 균열발생까지의 한계연성곡선을 나타내고 있다. ①은 한계연성곡선과 교차하지 않으므로, 균열은 발생하지 않고 응고가 완료한다. 그러나 ③에서는 온도

T 에서 교차하고 있으므로, 이 온도에서 균열이 발생하며, 용융지의 이동과 함께 균열은 진전하게 된다. 또 ②는 균열발생의 한계를 나타내는 변위곡선이다. 여기서 이 점선의 기울기를 θ_C 로 하면, $\tan \theta_C$ 는 이 재료의 응고균열에 대한 한계변위율을 나타내는 것이 되며, 이것은 재료의 응고균열 감수성을 나타내는 값이 된다. 이 $\tan \theta_C$ 를 한계변위율(CST; critical strain rate for temperature drop)이라 부르고, 이 값으로 재료의 균열감수성을 평가할 수 있다. 즉 CST의 값이 큰 재료일수록 응고균열이 발생하기 어려운 양호한 재료라고 할 수 있다.

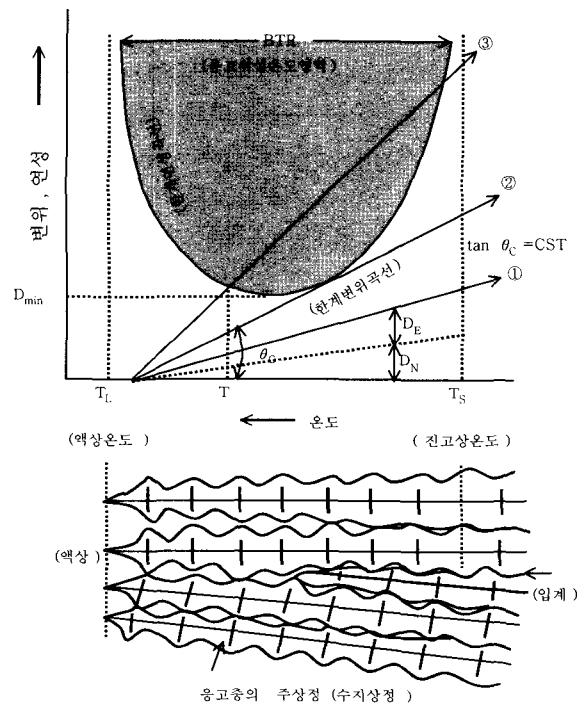


그림 1 응고균열의 발생 기구

(2) 연성저하균열의 발생기구

연성저하균열은 응고 후의 입계 이동이나 재결정에 의하여 새롭게 형성된 결정립계, 또는 모재, 다층 용접 금속의 HAZ에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 전 호 (용접부의 균열 및 그 방지(II))의 그림 1에서 나타낸 바와 같이, 연성저하균열은 용접열사이클의 고온 영역에서 재료 고유의 고온 연성을 넘는 스트레인이 부가되는 경우에 발생하며, 이 균열에서 액상은 관여하지 않는다. 그러므로 일반적으로 DTR(연성저하온도영역)의 범위가 넓고, DTR_{min} 이 작으면 액화균열과 연결된 형태로 연성저하균열이 나타나기도 하며, Ni기 내열합금의 연성저하균열에는 S가 가장 악영향을 미친다는 연구 보고도 있다.

(3) 액화균열의 발생기구

HAZ의 액화균열의 발생기구는 다음과 같다. HAZ는 처음에는 용접금속의 열팽창에 의해 압축응력을 받게 되는데, 아크 통과 직후부터 점차 인장응력이 부하된다. 이것은 용융 온도 부근에서, 가열된 HAZ가 냉각에 의해서 수축하려고 할 때, 그것이 그 외측의 모재의 가열 팽창 등에 의하여 저지되기 때문이다. 따라서 인장응력이 작용하고 있을 때, 저융점 원소의 결정입계의 편석 혹은 저융점 석출물 등이 용융하여 액막단계에 있으면 균열이 발생하는 것이다. 즉 액화균열은, 용접부의 응력이 압축으로부터 인장으로 변화하고, 입계 편석 혹은 입계 석출물 등의 용점이 낮아서 액상으로 존재하는 경우에 발생하기 쉽다. 그러나 입계의 편석 또는 석출물의 용점이 높은 경우는, 일단 용융한 액상도 압축응력이 작용하는 동안에 재응고해 버리기 때문에, 인장응력으로 바뀌어도 이미 액상은 존재하지 않으므로 균열은 발생하지 않는다. 이러한 기구에 의해 액화균열은 용접 비드와 평행(종균열) 또는 수직방향(횡균열)의 어느 쪽으로도 발생할 수 있다. 한편 횡균열에서는, 용융금속의 액상의 양이 많은 시기에 발생하면 액상이 이 균열에 유입하여, 이것을 메꾸어 버리는(healing) 경우가 있다.

2. 고온균열의 방지대책

용접 중에 응고균열을 발생시키지 않기 위해서는, 다음과 같은 두가지 관점에서 검토하여야 한다. 즉, ① 시공면에서의 검토: 용접 중의 응고시 혹은 고온영역에 있어서의 변위곡선을 BTR의 연성곡선과 교차시키지 않도록 낮게 한다. ② 재질면에서의 검토: 재료의 응고 연성특성의 개선, 즉 BTR을 좁게 하여, 한계변위차

(D_{min})를 크게 한다.

(1) 시공면으로부터의 검토와 방지대책

그림 1에서 나타낸 자유수축과 외부변위량 등의 합으로 표시되는 변위곡선을 가능하면 낮게 하는 것이 응고균열 등을 방지하는데 중요하다. 현재 사용되고 있는 구조용강의 용접은 용접재료 자체의 BTR이 좁기 때문에 고온균열 감수성은 비교적 낮다. 그렇지만 대입열의 SAW 및 CO₂ 아크용접에서 용접조건을 잘못 선정하면, 용접금속의 주상정이 만나는 부분에서 고온균열을 일으키는 경우가 있다

(2) 재질면으로부터의 검토와 방지대책

응고의 최종단계에서는, 소량의 저융점의 액상이 고상간의 결정입계에 존재하며, 이것에 외력이 작용함으로써 이것이 변위가 되어 균열이 발생한다. 따라서, 최후에 잔류하는 액상의 성질에 의하여 균열감수성이 결정되게 된다. 일반적으로 BTR의 최저온도는 잔류 용액의 응고완료온도 T_s 에 거의 근접한다는 것으로 알려져 있다. 액상선온도 T_L 은 동일하여도, 저융점의 액상을 만드는 불순물 등이 혼입되어 있는 재료에서는, 불순물이 혼입되어 있지 않은 재료에 비하여 BTR이 넓어져 CST 값이 낮고 균열이 발생하기 쉽다.

균열 발생까지의 한계변위량 D_{min} (또는 ϵ_{min})은 응고의 최종단계의 잔류 용액의 분포나 형태에도 상당히 의존한다. 이 잔류 용액이 결정립계에 젖음성이 좋은 상태로 존재하면 D_{min} 은 낮고, 구상화되어 있으면 D_{min} 이 높아져서 균열감수성이 낮아진다. 즉 고상선 부근의 용액의 계면에너지에도 의존하며, 용액이 구상화하기 쉬우면 용접균열이 발생하기 어렵다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 대한용접학회 편: 용접·접합 용어사전, 대한용접학회, 2001, 235
2. H. Senda et al.: Trans. JWRI, 2(1971), 2



- 박화순(朴和淳)
- 1955년생
- 부경대학교 재료공학부
- 용접결합, 용접금속학, 표면개질학
- e-mail: parkhs@pknu.ac.kr