

용접부의 균열 및 그 방지(VII)

- 재열균열 -

박 화 순

Cracking in Welds and Its Prevention(VII)

- Reheat Cracking in Welds -

Hwa-Soon Park

1. 재열균열(Reheat cracking)

1.1 재열균열의 분류 및 특징

재열균열은, 용접후열처리(PWHT) 과정 또는 용접 구조물로서 고온에서 사용하는 도중에 발생하는 균열로, T-1 형 HT80 강, Ni-Cr-Mo 강, Cr-Mo 강, Cr-Mo-V 강, STS347 스테인리스강, Ni기 초내열합금 등에서 잘 발생한다. 이 균열은 용접 HAZ에서 발생하는 것과, 오버레이 용접금속 및 부분의 HAZ에서 발생하는 under-clad cracking(UCC)으로 크게 나눌 수 있다. HT80 강의 HAZ에서 발생한 재열균열의 예를 Fig.1에 나타내었다.

재열균열의 일반적인 특징은 다음과 같다.

- 용접후열처리 온도로 가열 중이거나 유지 중 혹은 용접구조물로서 고온에서 사용 중에 발생한다.
- 구속도가 크고 잔류응력이 높은 용접부에서 발생하



Fig. 1 790MPa급 고장력강의 HAZ의 조립역에서 발생한 재열균열의 예

- 저합금강의 경우, 500~750℃의 온도범위에서 발생하기 쉽다.
- 재열균열은, 대부분의 경우 HAZ의 조립역의 입계에서 발생하고, 입계를 따라 진전한다.
- HAZ의 세립역에서는 발생하지 않고, 조립역으로부터 진전해 온 균열도 세립역에 도달하면 정지하는 경우가 많다.
- 재열균열의 파면조직은 대단히 평탄한 입계파면을 나타내는 경우와 입계 덩플형의 파면조직을 나타낸다. 입계 덩플형의 파면조직을 나타내는 경우는 덩플 속에 MnS 등의 미세 입자가 존재하는 경우가 많다.

1.2 재열균열의 발생기구

재열균열은, 잔류응력이 존재하는 용접부를, 크리프 변형이 생길 정도의 고온까지 가열하였을 때, 응력의 완화와 더불어 발생한 소성 스트레인이 응력집중부에 집적함으로써 발생하는 균열이다. 따라서 소성 스트레인의 집중이 균열발생에 대한 필요조건이 된다. 역학적으로 보면, 토우부, 융합불량부, 균열 등이 거시적인 응력집중원이 된다. 그리고 금속학적인 관점으로부터 보면, 조대 결정립계가 미시적인 응력집중원으로 되고, 소성 스트레인이 집적하는 장소를 제공하는 것으로 된다.

이상으로부터 일반적으로 재열균열은, HAZ의 조립역에서 가장 발생하기 쉬운 것이 된다. 그러나, 소성 스트레인이 집중한 경우에도 스트레인 집중부의 국부적인 소성변형능이 충분히 높고, 소성 스트레인의 완화가 가능하다면 재열균열은 발생하지 않는다. 그리고 재열균열은 입계균열이므로 입계 강도가 높은 경우 및 입내의 유동응력이 낮은 경우에는, 입계균열이 발생할 때까지

충분히 소성변형을 할 수 있으므로, 소성 스트레인 완화의 관점에서부터 재열균열은 발생하기 어렵다고 할 수 있다.

강의 재열균열의 기구는 입내강화설과 입계취화설로 크게 나눌 수 있다. 전자는, 강의 석출강화원소로서 첨가되어 있는 V이나 Mo 등이 V₄C₃, Mo₂C 등의 미세 탄화물을 형성하고, 입내에 균일하게 분산하여 매트릭스를 강화한 결과 재열균열이 발생하기 쉽게되는 것이라고 생각하는 설이다. 한편, 입계취약화설은, 입계 혹은 입계석출물(예, MnS)과 매트릭스와의 계면으로, P, S, Sb 등의 불순물원소가 편석하여, 입계강도를 저하시킨 결과 재열균열이 발생하기 쉽게 된다고 생각하는 설이다. 그러나, 이상의 설은 재열균열 현상에서 전혀 독립적인 기능을 가지는 것이 아니고, 강종 또는 강재의 화학 성분에 따라서 양쪽 혹은 어느 쪽인가가 주체적인 것이 되는 것으로 생각할 수 있다.

1.3 재열균열의 방지

역학적으로는, 용접후열처리 과정에서 잔류응력의 완화와 함께 발생하는 소성 스트레인의 양을 가능하면 저감할 것과, 소성 스트레인의 집중도를 완화하기 위하여 응력집중원의 제거 혹은 응력집중도를 완화하는 것이 재열균열을 방지하는데 유효하다.

금속학적으로는, 입내석출강화 원소의 적정 배합, 입계취약 원소의 저감화, HAZ 입경의 미세화, 입계 근방의 무석출대의 제거 등이 재열균열 감수성을 개선하는데 유효하다. 이하, 각종 재료의 재열균열의 방지대책에 대하여 간단히 언급한다.

(1) 고장력강, 저합금강

고장력강의 경우는, 화학성분이 재열균열 감수성에 미치는 영향이 현저하기 때문에, 화학성분에 의하여 재열균열 감수성을 평가하는 식¹⁾이 제안되어 있다.

$$\Delta G = Cr + 3.3 \cdot Mo + 8.1 \cdot V - 2 \text{ (wt.\%)}$$

위 식에서 $\Delta G > 0$ 일 때에 재열균열이 발생한다고 되어 있는데, 실험결과에 의하면, 이 식을 적용하여, 균열 감수성을 대체로 평가할 수 있다고 되어 있다. 예를 들어, HT80 강의 재열균열감수성의 개선에는 Cu, V, B 및 Mo 함유량을 저감하는 것과, C, Si, Mn 함유량을 증가시키는 것이 효과가 있는 것으로 되어 있다. 또한 입계에 편석하여, 입계를 취화시키는 불순물원소인 P, S, Sb 등의 저감화를 기도하는 것도 균열감수성 개선에 유효하다. 한편 잔류응력을 제거하는 것도 대단히

유효한 방법인데, 잔류응력을 490MPa (50kgf/mm²) 이하로 한 경우에는 재열균열은 발생하지 않는다. 응력 집중원을 제거 혹은 개선하는 것, HAZ의 입경을 미세하게 하는 것 등도 균열방지에 유효하다.

저합금강의 경우에도, 재열균열감수성은 합금원소 및 불순물원소에 영향을 받는다. 먼저, 합금원소의 영향의 대해서는, Cr-Mo강의 재열균열 감수성은 다음 식에 나타내는 파라미터 PSR로 평가할 수 있다는 것이 알려져 있다²⁾.

$$P_{SR} = Cr + Cu + 2 \cdot Mo + 10 \cdot V + 7 \cdot Nb + 5 \cdot Ti - 2 \text{ (wt.\%)}$$

(이 식이 성립하는 조성의 범위: Cr ≤ 1.5, 0.1 ≤ C ≤ 0.25, Cu ≤ 1.0, Mo ≤ 2.0, V, Nb, Ti ≤ 0.15, (wt.%))

위 식에 의하면, PSR ≥ 0일 때 균열이 발생하는 것으로 되어 있다.

UCC가 문제로 된 강에서는 Cr 양을 저감시키고, Mn 양을 증가시킨 합금설계를 하고 있다. 그리고 불순물원소의 영향에 관해서는, P, Sb 등을 적극 저감시키는 것이 바람직하다. 그리고 HAZ의 입경의 미세화, 잔류응력의 저감 등이 유효하다.

(2) 스테인리스강

STS347 계 스테인리스강의 용접부를 고온에서 장시간 사용하면 HAZ의 결정립계에서 균열이 발생하는 경우가 있는데, 이것도 재열균열이라고 보고 있다. 고장력강이나 저합금강에 비하여 균열발생 온도 영역이 높고, 균열발생까지의 시간도 길다. 이 합금의 재열균열은 석출현상에 지배되는 것인데, 용접부를 장시간 사용하면 입내에 극히 미세한 Nb(C, N)이 석출하여 입내강도를 높이기 때문에, 입내강도와 입계강도와와의 강도차가 증대하여 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 균열의 방지에는, 용접구조물로 사용하기 전에, 안정화열처리(예, 900°C × 7.2ks)를 실시하여, 미리 조대한 Nb(C, N)을 석출시키는 것이 중요하다. 물론 잔류응력의 저감화를 고려한 용접시공법의 실시도 중요하다.

(3) 내열합금

실용 내열합금인 Fe기, Co기 및 Ni기 합금 중에서 재열균열이 문제가 되는 것은 주로 Ni기 내열합금이다. Ni기 내열합금의 주된 강화상은 γ' [(Ni₃(Al, Ti))]상인데, 이 석출물은 입내에 균일하게 석출하여 입내강화능이 크고, 또한 석출속도가 극히 빠르기 때문에 재열균열의 주원인이 된다. 일반적으로 Ni기 내열합금은 용체화처리한 상태에서 용접되어, 그 후 (용체화처리+시효

처리)의 열처리가 실시되는데, 재열균열은 용접후의 용체화처리온도로 가열하는 과정에서, γ' 상의 석출온도 범위를 통과하는 과정 중에 발생한다.

균열감수성의 개선에는 다음과 같은 사항이 유효하다. ① S 함유량의 저감 및 S를 유화물로서 고정시키는 효과를 갖는 Mg의 첨가. ② 후열처리를 불활성가스 분위기 중 또는 진공에서 행한다. ③ 용접 전의 모재에 과시효처리를 한다. ④ γ' 상의 석출온도범위를 가능하면 급속 가열한다.

후 기

용접은 각종 구조물의 제작에 없어서는 안될 불가결한 가공기술로써, 특히 복잡, 대형, 안정성, 정밀가공을 요구하는 구조물의 경우에는 용접접합이 필수적이라고 할 수 있다. 따라서 이들 구조물의 신뢰성을 높이기 위해서는 결함이 없는 용접부를 형성시키는 것이 무엇보다 중요하다. 우리는 이러한 한 예로서 1994년 10월에 발생하여 막대한 경제적 손실뿐만 아니라 귀중한 인명을 앗아간 성수대교의 붕괴 낙하를 경험하였다.

지금까지 7회에 걸쳐서, 용융용접부에서 발생하는 균열 현상 및 그 방지에 대한 개요를 용접금속학적인 관점에서 간략하게 설명하였으며, 따라서 본 내용들은 교과서적인 기초적인 내용으로 이루어졌다. 아울러 저자는 본 기술강좌가 용접부의 신뢰성 향상에 있어서 무엇보다도 중요하다고 할 수 있는 균열에 대한 관심을 제고한다는 측면에서, 용접관련 연구자 및 기술자에게 조금이나마 도움이 되었으면 한다.

참 고 문 헌

1. 内木虎藏 등, 溶接學會誌, 39-10(1970), 1059
2. 伊藤慶典 등, 溶接學會誌, 41-1(1972), 59



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