

## 용착금속부 재열균열에 대한 신뢰성 확보대책

김희진·유희수

### Ways to Improve Reliability against Stress-Relief Cracking in Weld Metal

Hee-Jin Kim and Hoi-Soo Ryoo

#### 1. 서 론

재열균열(reheat cracking)은 용접부 잔류응력을 완화하기 위하여 용접후열처리(PWHT)를 수행하는 과정에서 발생하는 용접부 균열이다. PWHT를 수행하는 과정에서 즉, 잔류응력을 완화하는 과정에서 발생하기 때문에 'PWHT균열' 또는 '응력이완균열(stress relief cracking)'이라고 불리기도 한다. 이러한 균열은 모재부에서는 발생하지 않으며, 용접부(용접열영향부 또는 용착금속부)에 국한되어 발생하는데, 지금까지 보고된 문헌을 살펴보면 대부분 용접열영향부에서 발생하는 균열만을 대상으로 하고 있어서 용착금속부 재열균열에 대해서는 균열발생 현상이 명확히 보고된 바 없다. 이에 본 기술보고는 용착금속부 재열균열 발생현상에 대해 보고하고자 한다.

#### 2. 재열균열 감수성 및 발생기구

용접열영향부 재열균열에 대해서는 여러 연구자들이 보고한 바 있는데, 여기서는 가장 특징적인 사항에 대해서만 기술하고자 한다. 먼저 재열균열은 Cr, Mo, V 등이 첨가된 저합금강에서 주로 발생한다는 것이다. 그리고 이들 강종의 재열균열 감수성에 대해서는 다음과 같은 예측식들이 보고되어 있다.<sup>1,2)</sup>

$$\Delta G = 10C + Cr + 3.3Mo + 8.1V - 2 \quad (1)$$

$$P_{SR} = Cr + Cu + 2Mo + 10V + 7Nb + 5Ti - 2 \quad (2)$$

$$R_S = 0.12Cu + 0.19S + 0.10As + P + 1.18Sn \quad (3) \\ + 1.49Sb$$

그리고  $\Delta G$ 값이 2 이상이면,  $P_{SR}$ 값이 0 이상이면, 또는  $R_S$ 값이 0.03 이상이면 재열균열 발생 가능성이 높다는 것이다. 식(1)과 (2)는 주요 합금원소를 대상으로 하

고 있는데, Cr, Mo, V, Nb 등의 함량이 증가 할수록 감수성이 증대함을 알 수 있다. 따라서 Cr-Mo강은 재열균열 감수성이 높은 강종이며, 특히 V이 함유되어 있으면 더욱 취약하게 되는 것이다. 한편 식(3)은 불순물 함량을 대상으로 하고 있는데, 강중에 P, S, Sn 과 같은 유해 원소가 많을수록 감수성은 증가하는 것이다.

재열균열의 또 다른 특징은 용접열영향부의 결정립 조대화영역에 한정되어 발생하며, 구오스테나이트 입계를 따라 발생한다는 것이다. 이러한 미세조직적 특성으로 인하여 다음과 같은 여러 가지 발생기구가 제안되었다. 첫 번째 이론은 재가열 중에 입내에 탄화물이 석출하여 입내가 입계보다 강화되어 입계균열이 발생한다는 것이다. 즉 응력이완에 따른 변형이 입계에 집중되어 입계균열로 나타난다는 것이다. 이에 의한 재열균열 감수성은 상기한 예측식 (1)과 (2)로 평가된다. 두 번째 이론은 불순물 원소(P, S, As, Sn 등)가 입계에 편석되어 있다가 PWHT 과정에서 입계의 강도가 저하하여 입계균열로 나타난다는 것이다. 본 이론에 의거해서 상기한 예측식 (3)이 도출 될 수 있었던 것이다.

#### 3. 용착금속부 재열균열

##### 3.1 재열균열의 외관 특성

용착금속부에서 발생하는 재열균열의 외관적인 특징은 Fig. 1과 같이 용접 진행 방향과 동일한 '종방향 균열'이라는 것이다. Fig. 1은 T23(2.25Cr-1.5W) 재질의 보일러튜브 용접부에서 발생한 재열균열인데, 육안으로도 쉽게 관찰할 수 있는 크기의 균열이다. 실제로 본 균열은 튜브 벽을 관통하여 발생한 관통균열임이 판명되었다. Fig. 2은 동일한 튜브의 비드 표면에서 관찰된 재열균열인데, 크기가 매우 작아서 자분탐상에 의해서만이 검출 가능한 미세균열이다. 그리고 이러한 미세균열은 일직선 상에 있지 않고 비드 표면에 산재하여



Fig. 1 Appearance of weld metal reheat crack developed in the form of through-crack



Fig. 2 Appearance of weld metal reheat cracks developed in the form of hair cracks

나타나는데, 분포 형태를 보면 방사선 형태를 보여 주는 경향이 있다.

### 3.2 재열균열의 미세조직적 특성

재열균열의 미세조직적 특성을 확인하기 위하여 Fig. 1의 재열균열을 절단하여 절단면에서 균열을 관찰한 결과를 Fig. 3에서 보여 주고 있다. 이 사진은 에칭하기 전의 상태를 보여주는 것인데, 이 사진에서 보듯이 주균열(main crack) 주위에는 2차 균열(secondary crack)이 존재하며 비드 표면에도 미세균열들이 다수 존재하고 있음을 알 수 있다. 비드 표면에 나타나는 미세균열들은 자분탐상에서 Fig. 2와 같이 나타나는 것이다. 이와 같이 재열균열은 여러 위치에서 동시 다발적으로 나타나는 특성을 가지고 있다.

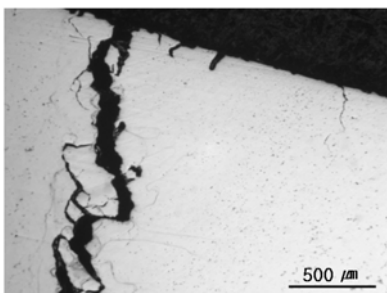
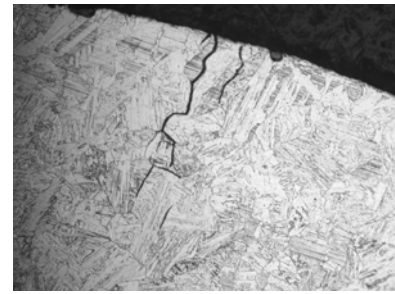


Fig. 3 Cross-sectional image of reheat crack shown in Fig. 1



(a)



(b)

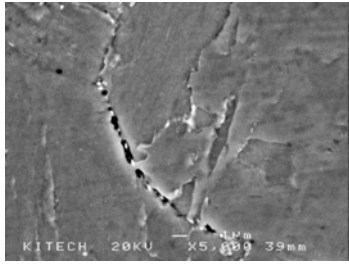
Fig. 4 Intergranular feature of reheat cracking shown in (a) through crack and in (b) the surface hair crack

Fig. 4는 에칭한 후에 주균열 주위를 관찰한 결과이다. 주균열, 2차균열 및 표면 미세균열 모두 구오스테나이트 입계를 따라 진행된 입계균열임을 보여 준다.

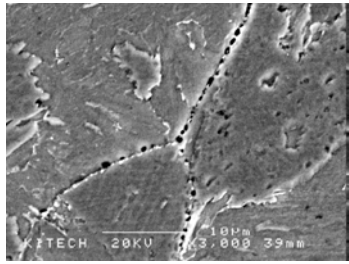
균열 주위의 미세조직을 고배율 SEM으로 관찰한 미세조직을 Fig. 5(a)에서 보여 주고 있는데, 구오스테나이트 입계를 따라 석출물 뿐만 아니라 기공(cavity)이 형성되어 있음을 알 수 있다. 결국 이러한 기공들이 지연균열로 발생하는 것이라 할 수 있으며, 기공은 재열균열의 전 단계 현상이라고 할 수 있다<sup>3)</sup>. 그리고 Fig. 6은 기공들이 연결되어 재열균열로 발전하는 초기단계를 보여 주고 있다. 따라서 재열균열은 미세조직적으로 탄화물의 입계생성→후열처리시 열응력에 의한 기공생성→기공 성장 및 합체 과정을 거쳐 발생하는 것이라고 할 수 있다.

### 4. 재열균열 방지 대책

재열균열은 PWHT를 수행함으로 용접부에 발생하는 균열임으로 PWHT를 적용하지 않아도 되는 용접부에 대해서는 PWHT를 적용하지 않는 것이 최선의 대책이라고 할 수 있다. 만약 PWHT를 필히 적용해야 한다면, 상기한 예측식에 의거 재열균열 감수성이 적은 재료를 선택할 필요가 있다. 그런데 대부분의 경우 재료가 선정된 상태에서 재열균열이 발생함을 알게 되기 때문에 PWHT 조건을 변경하는 방안이 보다 현실적이라고 할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5 Carbide and cavity formation along prior austenite grain boundaries

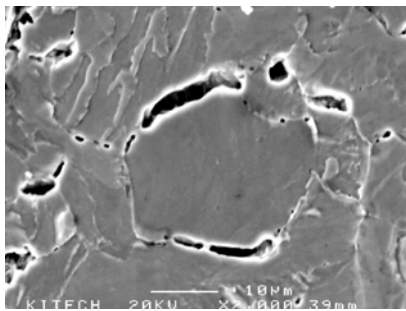


Fig. 6 Transition stage of cavity into reheat crack

재열균열은 탄화물의 입계생성→후열처리시 열응력에 의한 기공생성 →기공 성장 및 합체 과정을 거침으로 재열균열 발생시간은 Fig. 7과 같은 C-곡선을 따르게 된다<sup>3,4</sup>. Fig. 7은 T23강재(2.25Cr-1.5W)의 열영향부에서 응력이완시험(stress-relaxation test)을 수행한 결과인데, 이 경우에 있어서는 675℃에서 재열균열에 가장 민감함을 보여 주고 있다. 따라서 모재 또는 용접재료가 선정되어 있는 경우에는 재열균열에 민감한 온도조건(T23강재의 경우에는 675℃)을 최대한 피하는 것이 최선의 방안이 될 것이다. 그밖에 기열 및 냉각속도의 영향도 고려하여야 하지만 이에 대해 연구한 결과는 찾아 볼 수 없었다.

5. 맺 음 말

재열균열은 용접부 균열의 일종인데, PWHT를 실시한 후에 나타난다는 측면에서 다른 균열들과 쉽게 구분된다. 그런데 이러한 재열균열은 내열강의 열영향부에서 주로 발생하는 것으로 인식되고 있고 있어서, 본 기

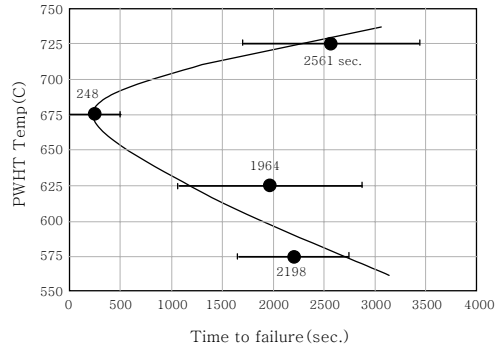


Fig. 7 Time to failure during stress-relaxation testing for various test temperatures<sup>3)</sup>

술보고에서는 용착금속부에서 발생하는 재열균열의 형상적 특성에 대해 보고하고자 하였다. 본 기술보고에서 보고 하였듯이 용착금속부의 재열균열은 비드 표면에 미세균열로 나타난다고 하는 특성을 가지고 있다. 그리고 미세조직적으로는 탄화물의 입계생성→후열처리시 열응력에 의한 기공생성 →기공 성장 및 합체 →재열균열 발생의 단계를 거쳐 발생하는 것이다.

따라서 재열균열을 방지하기 위해서는 PWHT를 실시하지 않는 것이 최선의 방안이지만, 이를 생략할 수 없는 경우에는 재열균열에 민감하지 않는 조건에서 PWHT를 실시하는 것이 차선책이라고 하겠다. 결국 내열강 용접부의 재열균열 저항성은 PWHT 조건에 크게 의존하므로 최적의 PWHT조건을 선정하는 것이 용접부의 재열균열에 대한 신뢰성을 확보하는 방안이다.

참 고 문 헌

1. 용접·접합편람: 대한용접학회, (1998), p.39
2. C. D. Lundin et. al. : An experimental study of causes and repair of cracking of 1.25Cr-0.5Mo steel equipment, WRC Bulletin 411, (1980), 1-43
3. J. G. Nawrocki et. al.: The mechanism of stress-relief cracking in a ferritic alloy steel, Welding J., 82-2 (2003), 25-s
4. C. F. Meitzner: Stress-relief cracking in steel weldment, WRC Bulletin 211, (1975), 1-17



- 김희진(金喜珍)
- 1953년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합용접팀
- 용접전원파형제어, 용접재료개발
- e-mail : kimhj@kitech.re.kr



- 유회수(柳會洙)
- 1965년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합용접팀
- 디지털용접전원개발, 자동제어, 집합조직
- e-mail : hsryoo@kitech.re.kr