



## 용접부의 균열 및 그 방지(V)

### - 저온균열(I) -

박 화 순

## Cracking in Welds and Its Prevention(V)

### - Cold Cracking in Welds(I) -

Hwa-Soon Park

저온균열은, 대한용접학회에서 발간한 '용접·접합 용어사전'에 의하면, '용접 후 용접부의 온도가 대체로 200℃ 이하의 저온에서 발생하는 균열을 총칭한다. 경우에 따라서는 실온까지 냉각한 후 일정한 시간이 경과한 후에 발생하기도 하며, 이러한 균열을 지연균열(delayed cracking)이라고 한다'로 되어 있다<sup>1)</sup>. 이들 저온균열의 발생에는 주로 구속응력과 경화조직 및 확산성수소가 영향을 미치고 있으며, 그 종류는 위에서 언급한 지연균열 외에 라멜라 테어링, 변형균열, 퀴칭 균열형 저온균열 등이 있다. 본 기술강좌에서는 용접부의 저온균열에 대하여 지연균열과 그 외의 저온균열로 나누어 2회에 걸쳐 소개하기로 한다.

### 1. 지연균열(Delayed cracking)

#### 1.1 지연균열의 특징

저온 지연균열은, 강의 용접부가 실온부근(일반적으로 약 200℃ 이하)에 냉각한 후에 발생하며, 시간의 경과와 함께 진전하여 가는 균열을 말한다. 이 균열은 용접부의 수소, 구속응력 및 조직의 경화 등이 복합적으로 작용하여 HAZ 및 용접금속에서 발생한다. 일반적으로 용접부에 수소가 많을수록, 그리고 용접부가 고강도일수록, 또한 구속응력이 클수록 저온 지연균열은 단 시간에 나타나며, 균열의 발생위치는 HAZ로부터 용접 금속부로 진전하는 경향을 보인다.

지연균열 파면의 조직적인 특징은, 균열이 HAZ에서 발생한 경우에는 조립의 입계파면과 입내의 수소 의벽개 파면이, 또 용접금속에서 발생한 경우에는 주상정의 입계와 입내의 수소 의벽개파면이 혼재하는 형태를 나타낸다. 그리고 최종파단부는 뎀플(dimple) 파면이 많다.

#### 1.2 지연균열의 발생요인

##### (1) 지연균열 현상

강 용접부의 지연균열의 일반적인 특징은 다음과 같다. ① 용접시 용접금속에 용해한 수소량에 민감하며, 실온부근의 온도에 냉각한 후에 발생, 진전한다. ② 구속된 용접부에 있어서, 루트부 등의 응력집중부에서 발생하기 쉽다. ③ 대부분의 경우, 균열발생부는 용접열 영향에 의한 경화부이며, 용접금속에서도 발생한다.

수소에 의한 지연균열 현상은, 일정한 잠복기간의 경과 후에 응력집중부에서 균열이 발생, 진전하여 최종파단에 이르는 지연 균열 현상을 나타낸다. 잠복기간은 부하 응력이 낮을수록 길어지며, 한계 응력 이하에서는 지연균열은 발생하지 않는다. 강의 용접부에서는, 온도가 시간의 경과와 함께 변화하며, 응력도 이에 대응하여 변화하므로, 용접부의 경우에는 더욱 복잡한 현상을 보인다고 할 수 있다.

고장력강에 대한 RRC 시험결과에 의하면, 구속응력은 구속거리에 역비례 하며, 구속거리가 짧을수록 단시간 범위에서 파단한다. 그리고 어떤 한계치 이하에서는 시간이 경과하여도 균열은 발생하지 않는다. 이 때 균열은 루트부에서 발생하여 HAZ를 전파한 후 최종적으로는 용접금속에서 파단하는 경향을 보인다.

##### (2) 지연균열 발생의 한계치

강 용접부의 지연균열의 발생은, 균열 발생점의 발생 시기에서의 국부응력  $\sigma_{local}$ , 국부 수소농도  $H_{local}$  및 그 부분의 금속조직에 의존한다. 여기서  $\sigma_{local}$ 은 시험편의 노치 단면에 작용하는 평균응력  $\sigma_{imp}$ 를 사용하고,  $H_{local}$ 을 대표하는 양으로서는  $(H_R)_{100}$ (용접금속이 100℃에 냉각하였을 때에 잔존하는 용접금속당의 확산성

수소농도)를 사용하면 균열발생 한계곡선을 구할 수 있다. 이 한계곡선은 횡축에  $\log(H_R)_{100}$ 을 취하여 정리하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sigma_{imp} = A_1 - A_2 \cdot \log(H_R)_{100}$$

여기서  $A_1, A_2$ 는 금속조직에 의존하는 정수로서,  $A_1$ 은  $(H_R)_{100} = 1\text{ppm}$ 의 경우의 한계응력에 상당하며,  $A_2$ 는 한계곡선의 기울기에 관계한다. 여기서,  $A_1, A_2$ 의 값은 HAZ의 조직에 따라 다르며, 조직을 대표하는 양으로서 HAZ의 최고경도  $H_v$ 를 사용하면, 동일 강종에서도  $H_v$ 가 작을수록  $A_1$ 의 값은 커지는데,  $A_2$  값에 대한 조직 의존성은 확실하지 않다. 이러한 균열발생 한계응력은, 수소농도가 낮은 영역에서는 잔류 수소농도의 아주 작은 변화에 대하여도 민감하며, 수소농도가 높은 영역에서는 비교적 둔감하다.

### 1.3 지연균열의 방지

#### (1) 기본적 대책

국부수소농도와 국부응력의 관계로 표시한 균열발생 한계곡선의 모식도를 그림 1에 나타내었다. 균열은  $\sigma_{local}$ 과  $H_{local}$ 에 의하여 결정되는 P 점이 A와 B 곡선의 위에 있는 경우에 발생한다. 따라서 균열방지 수단으로서 다음과 같은 3가지 방법을 생각할 수 있다.

- $H_{local}$ 을 작게 한다.
- $\sigma_{local}$ 을 작게 한다. 일반적으로, 응력집중부로의 수소의 집적은, 응력집중부 부근의 평균 수직응력의 기울기가 클수록 크고, 그 부근의 소성 스트레인이 클수록 커진다. 그러므로  $\sigma_{local}$ 을 작게 하면  $H_{local}$ 도 작게되어, 화살표 ①과 ②의 종합효과에 의하여 ②'와 같이 되어 균열방지에 효과가 있다.

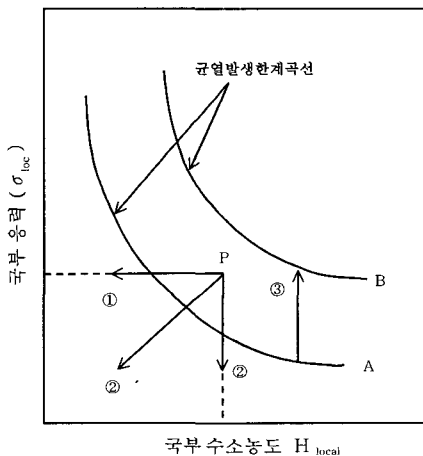


그림 1 용접부의 저온 지연균열의 방지에 대한 모식도

- 그림 중의 ③에 표시한 바와 같이 균열발생 한계곡선을 A로부터 B로 상승시킨다.

#### (2) 국부수소농도 $H_{local}$ 을 작게 하는 방법

그림 1의 화살표 ①의 효과를 줄 수 있는 구체적인 방법은 다음과 같다.

- 각국의 표준규격에 의하여 공업적으로 측정된 용착금속, 혹은 용접금속의 확산성수소량이 적은 저수소계용접봉, 극저수소계용접봉, 난(難)흡습성용접봉을 채용한다.
- 용접법의 변화, 즉 SMAW에 비하여 GMAW, GTAW 등의 용접법에서는 용접금속의 확산성수소량이 훨씬 적다.
- 예열/후열에 의하여 냉각시간을 길게 한다.

#### (3) 국부응력 $\sigma_{local}$ 을 작게 하는 방법

강 용접부의 저온균열은, 비교적 후판의 초층용접시의 루트부와 같은 응력집중부에서 발생하기 쉬우며, 루트부의 국부응력  $\sigma_{local}$ 은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\sigma_{local} = K_t \cdot \sigma_w$$

여기서,  $K_t$ : 루트부의 응력집중계수,  $\sigma_w$ : 용접금속 단면의 국부응력

그리고 구속된 맞대기용접부의 초층의 평균 구속응력  $\sigma_w$ 는 구속도  $R_F$ 에 비례한다.

$$\sigma_w = m \cdot R_F$$

따라서, 그림 1의 화살표 ②의 효과를 얻기 위한 구체적 대책은 다음과 같다.

- 용접부의 구속도를 작게 하기 위한 설계상의 배려를 한다.
- 용접부의 국부적인 응력집중계수를 낮출 수 있는 수단을 취한다. 즉 가능하면 응력집중계수가 작게 될 수 있는 그루브 형상을 취하는 것이 지연균열의 방지에 효과적이다.
- 저강도 용접재료의 채용: 모재보다 낮은 강도의 용접재료를 사용하면, 동일 용접조건하에서도  $\sigma_{local}$ 과  $H_{local}$ 이 작아지는 종합효과에 의하여 균열방지에 효과적이다.

#### (4) 균열발생 한계곡선을 높이는 수단

균열발생 한계곡선의 높이는 균열 발생부의 금속조직에 의존한다. 즉 위의 1.2의 (2)에서 나타낸 식에서  $A_1$ 의 값은 HAZ의 최고경도가 작을수록 커진다. HAZ

의 최고경도는, 강의 탄소당량  $C_{eq}$ 와 냉각조건(용접입열, 판두께 및 용접접합부의 형상 등과 관련)과의 관계에 의하여 결정되므로, 동일 강종에서는  $C_{eq}$ 가 작을수록 균열발생 한계곡선의 높이가 높아지고, 따라서 지연균열의 방지에 유효하다. Q-T 처리한 고장력강에서는, 탄소당량으로서 다음 식에서 나타내는  $PCM$  값을 많이 사용한다.

$$PCM(\%) = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

### 참 고 문 헌

1. 대한용접학회 편: 용접·접합 용어사전, 대한용접학회, 2001년 1월, 235



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