

## 용접부의 균열 및 그 방지(IV)

### - 고온균열(III) -

박 화 순

### Cracking in Welds and Its Prevention(IV)

#### - Hot Cracking in Welds(III) -

Hwa-Soon Park

용접부의 균열 및 그 방지(II)와 (III)'에서는 고온 균열의 종류와 특징, 발생기구 및 방지대책에 대한 일반적인 내용을 언급하였다. 여기서는 실용 재료를 중심으로 하여 이들 재료의 고온균열감수성과 방지 대책에 대하여 간략하게 소개하기로 한다.

#### 1. 각종 재료에서의 고온균열과 방지 대책

##### (1) 탄소강, 고장력강 및 저합금강

일반적으로 Fe-X 계의 2 원계 상태도에서 Fe의 응고온도폭( $T_L$ ~ $T_s$ 간)을 넓히는 원소는 그 정도가 큰 순서로 S, B, P, C, As, Mn, Nb, Sn, Zr, Ti 등으로 나열된다. 이 중에서도 소량으로 온도 폭을 크게 넓히며, BTR(응고취성온도범위)에도 악영향을 미치는 원소로는 S, B, P, C 등을 들 수 있다.

서브머지드아크용접(SAW)에 의한 S와 P의 양을 변화시킨 저탄소강의 응고연성곡선을 구한 결과에 의하면,  $T_L$ 은 불순물의 양에 관계없이 약 1520°C로서,  $T_s$ 는 불순물을 포함시키지 않은 용접금속에서는 약 1480°C가 되며, BTR은 약 40°C이다. 또 한계스트레인 양  $\epsilon_{min}$ 도 0.5% 이상으로 높아진다. 그러나 이러한 용접금속에 S가 0.07% 정도 포함되면,  $T_s$ 는 약 900~1000°C까지 저하하며, BTR은 약 500~600°C로 대단히 넓어진다. 이에 비하여, P는 다소 첨가되어도, S와 같은 극도의 악영향을 끼치지 않는다. 이처럼 응고균열에 미치는 S의 유효효과를 방지하기 위해서는 일반적으로 Mn을 첨가하고 있는데, Mn의 양이 충분히 많으면, 공정온도는 1500°C 근처까지 높아지며, BTR은 20~30°C까지 좁아진다. 따라서 응고균열을 발생하기 어렵다. 따라서 응고균열을 방지하기 위한 Mn과 S의 양적 관계에 대하여는,  $C < 0.12\%$  정도의 실용 저탄소

강의 경우에는  $Mn^3/S > 6.7$ ,  $C > 0.12\%$ 의 탄소강 혹은 저 Ni 합금강 등에서는  $Mn^5/S > 370$ 이 좋다고 되어 있다.

1%Cr-Mo강에서는,  $S+P < 0.007/C(\%)$ 로 균열을 방지할 수 있는 것으로 알려져 있다. 또 2%Cr-Mo강의 SMAW의 용접부에서는, 황화물의 형성을 방지하기 위하여  $Mn > 0.75\%$ 로 할 것을 권장하고 있다. 또 Ni 저합금강(4%Ni-0.14%C-0.3%Si-0.9%Mn, 12.5mmt)의 GTA 용접부에서 균열을 방지하기 위하여서는, 용가재 중의 Ni이 4%의 것에서는  $(S+P) < 0.025\%$ , 6%의 것에서는  $(S+P) < 0.020\%$ 가 되어야 하는 것으로 알려져 있다.

탄소강이나 저합금강의 용접부에 산소가 포함되어 있으면, 내(耐)균열성이 양호하다고 알려져 있다. 이것은 주로 MnS 계 개재물의 공정형태가 산소가 들어감으로써 구상화하기 때문이라고 보고 있다.

Cr-Mo계 강의 고온균열시험에 의한 총균열의 길이와 C 양의 관계에 의하면, 일반적으로 Cr 양의 증가와 함께 응고균열 감수성이 커지고, C 양이 증가할수록 균열감수성이 작아지는 경향을 보인다(1.25Cr-0.5Mo 이외). 그리고 0.2%C에서는 어느 것이나 균열감수성이 거의 같아진다. Cr-Mo강의 경우는, 이처럼 C 양의 증대로 균열감수성은 저하하는데, 이것은 Fe-Cr-C 계 상태도의  $T_L$ ~ $T_s$ 간의 온도차로부터 설명된다.

다음은 탄소강 및 저합금강의 용접시의 응고균열 감수성과 합금원소와의 관계를 나타낸 것들 중의 예를 소개한 것이다.

- Morgan-Warren and Jordan(저합금강의 응고균열)<sup>1)</sup>

$$CSF \propto 42 \cdot [C + 20 \cdot S + 6 \cdot P - (1/4) \cdot Mo - 72 \cdot O] + 19$$

- 木原, 松田(저 Ni 합금강, HY type 강)의 응고균열)<sup>2)</sup>

$$LT = 70 \cdot [C - (1/12) \cdot Si - (1/9) \cdot Mn + 3 \cdot P + 4 \cdot S + (1/23) \cdot Ni + (1/35) \cdot Cr + (1/70) \cdot Mo]$$

위 식들은 어느 것도 값이 클수록 균열감수성이 높은 재료라는 것을 나타낸다. 또한 응고균열감수성을 나타내는 식들을 종합하여 볼 때, C, S, P, Ni 등의 원소는 균열감수성에 악영향을 미치는 것으로 거의 일치하고 있다. 그러나 타 원소의 영향에 대하여는 확실치 않다.

(2) 오스테나이트계 스테인리스강

완전 오스테나이트계 스테인리스강의 용접부에서는 고온균열이 자주 발생한다. 그림 1<sup>3)</sup>은 이들 강종의 GTA 용접부의 응고시의 연성특성을 고온균열시험법으로서 비교한 것이다. BTR은 사선 영역에 해당하며, STS310S(완전 오스테나이트계)는 STS304(δ상을 포함하는 오스테나이트계)에 비하여, BTR이 넓고 또한 최고 연성치도 낮기 때문에, 응고균열 감수성이 대단히 높다. 또 310S와 316에서는 연성저하온도영역(DTR)이 약 1100℃ 전후를 나타낸다. STS304가 310S에 비하여 균열이 발생하기 어려운 주된 이유는, 불순물원소인 S와 P가 δ상에 용해하기 쉽기 때문에, δ와 γ상의 2상으로 되면 입계 면적이 증가하여 불순물이 분산하는 효과가 있기 때문이다.

STS310S와 같은 재료를 완전 오스테나이트의 형태에서 응고균열을 방지하는 대책으로서는, S와 P를 저감하는 것이 가장 좋은 방법이라고 보고 있으며, (P+S) < 0.01%로 하면 균열감수성은 크게 개선된다. 응고균열 감수성에 미치는 (P+S)와 Schaeffler 조직도의 Cr<sub>eq</sub>/Ni<sub>eq</sub>의 관계에 대한 결과에 의하면, Cr<sub>eq</sub>/Ni<sub>eq</sub> > 1.48에서는 균열감수성에 미치는 (P+S)의 영향은 거의 없어진다. 이에 대하여 1.48 이하에서는 그 영향이 대단히 크고, (P+S)는 Cr<sub>eq</sub>/Ni<sub>eq</sub>의 감소와 함께 저하시키지 않으면 안된다. 그리고 1.0 부근에서는 (P+S) < 0.01%로 하지 않으면 안된다.

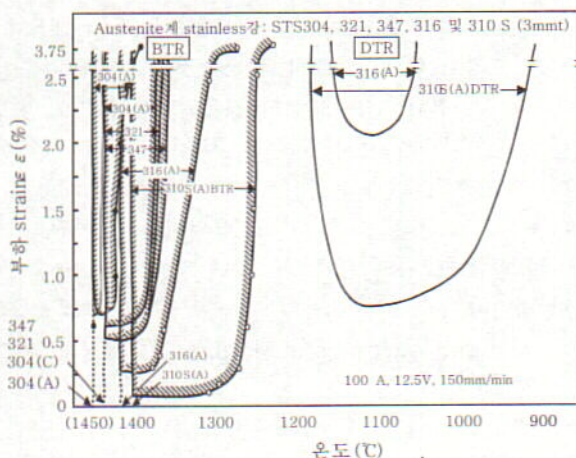


그림 1 오스테나이트계 스테인리스강의 응고연성 및 연성저하 특성

응고균열에 미치는 타 원소 및 미세조직의 영향에 대하여 간단히 서술하면, 다음과 같다.

- ① Mn: S > 0.015%의 재료에서는 효과가 있으나, S < 0.010%에서는 그다지 효과가 없다.
- ② Si: BTR을 넓히기 때문에(규산염막의 입계 형성, 고농도의 Si 저용점 잔류 액체의 형성에 기인), 0.3% 이하로 감소시킨다.
- ③ Nb: 일반적으로 고온균열 감수성을 증가시키는데, 다량첨가는 균열방지에 효과가 있다.
- ④ C: 0.43% 이상에서는 연성저하(DTR)가 없어지며, 0.53%에서는 BTR도 좁아져서 균열이 발생하기 어렵게 된다. 이것은 응고시에 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>와 γ상의 공정이 다량으로 형성되기 때문이다.
- ⑤ La 혹은 mish metal: 고온균열 감수성을 현저하게 개선한다. 이것은 La에 의한 탈황과 동시에 고융점의 인화물을 형성하기 때문이다. 그러나 파입의 첨가는 역으로 균열이 증가한다. 그러므로 다음 관계에 의한 적정량이 권장되고 있다.  
 $La = 4.5 \cdot P + 8.7 \cdot S \quad (\text{wt.}\%)$
- ⑥ 약 5% 이상의 δ 페라이트를 실온에서 잔류하는 용접금속조직을 형성시키는 것이 응고균열 방지에 효과적이다.

(3) 내열합금

Fe기 내열합금에서는, HK-40, Incoloy 800, IN-519 등은 비교적 고온균열감수성이 높다. P 및 S, 특히 P의 함유량을 저감시키는 것이 균열감수성의 개선에 유효하다. 그 외에 저입열 용접, Si 함유량의 저감 등이 효과적이다.

Ni기 내열합금에서 약(弱)석출형합금의 경우에는 S 함유량을 저감시키며, Mn 함유량을 증가(약 0.9%)시키는 것이 고온균열 감수성의 개선에 유효하다. 강(強)석출형합금의 경우에는, 비교적 낮은 용체화처리온도의 채택, 결정립 미세화 등이 효과적인 것으로 알려져 있다.

참 고 문 헌

1. E.J. Morgan-Warren et al.: Metal Tech., 1-6(1974), 271-288
2. H. Kihara and F. Matsuda: Trans. JWRI, 2-2(1973), 83-95
3. F. Matsuda et al.: Trans JWRI, 13-2(1982), 41-58



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