

고강도 용착금속의 저온균열 저항성 향상을 위한 연구개발 방향

이원식, *김희진, 강봉용

한국생산기술연구원

1. 서론

최근 구조용강재의 개발 동향은 고강도·고인성을 확보하면서도 합금원소의 첨가를 최소화 하여 탄소당량을 낮게 유지함으로써 용접시 예열이 요구되지 않도록 설계하고 있다. 그러나 용접재료 측면에서는 기존의 용접재료를 그대로 사용하는 경우가 많아서, 열영향부가 아닌 용착금속(weld metal)에서 저온균열(cold cracking)이 발생할 가능성이 높아 지게 되었다. 최근 연강 수준의 합금원소를 기본으로 초 미세립화에 의한 고강도·고인성 및 우수한 용접성을 갖는 차세대 구조용 강재에 대한 개발 연구¹⁾가 진행되고 있는 바, 모재의 저온균열 저항성은 더욱 향상되어 모재에 관한 한 무예열 용접이 가능할 것으로 예상된다. 그러나 이와 같은 구조용강재의 경제성이 극대화 되기 위해서는 강재의 개발과 함께 용착금속에서 저온균열을 억제할 수 있는 용접재료의 개발에 대한 연구가 병행되어야 할 필요가 있다.

2. 용접부 저온 균열

2-1 저온균열 발생 원인

강재의 용접성이라는 개념은 여러 가지 의미로 해석되고 있지만, 고장력 C-Mn steel, microalloy steel, 고강도(HY)강재, Cr-Mo 강재 등에 있어서의 용접성은 저온균열에 대한 저항성과 거의 같은 의미로 사용하고 있을 정도로 이들 강재는 저온균열에 민감하다.

용접부에서 나타나는 저온균열이라는 것은 일반 강재에서 hydrogen이 유입되었을 때 강재가 취화되는 현상, 즉 hydrogen embrittlement 현상과 동일한 것으로 해석되고 있다.

결국 저온균열의 본질은 용접부 내로 수소가 유입되어 국부적으로 재료의 연성이 극히 낮아져서 발생하는 지연균열(delayed cracking)인 것이다. 따라서 이의 기본적인 원인으로는

- a. 용접부에 나타나는 경화조직
- b. 용접시에 용접부에 유입되는 수소
- c. 용접 이음부에서 발생하는 인장 잔류응력

등의 요인들을 들 수 있다.

2-2 용착금속부의 저온균열 방지를 위한 예열온도

용착금속부에서의 균열발생을 억제하기 위해서는 확산성 수소량을 최소화하던지 예열온도를 높여서 수소의 방출을 조장하던지, 또는 후열처리를 행하여 수소 방출시간을 연장하는 방법 등이 제안될 수 있다. 여기서 예열온도로 저온균열을 억제하고자 하면 그 예열온도는 확산성 수소량과 잔류응력의 크기를 함수로 나타낼 수 있는데, 잔류응력의 크기는 용착금속의 인장강도와 관계를 맺을 수 있기 때문에 지금까지 제안된 식들을 보면 최저예열온도가 확산성 수소량과 용착금속의 인장강도의 함수로 표시되고 있다.

(a) Yatake 등은 다음과 같이 제안하고 있다.

$$T_p(^\circ\text{C}) = 120 + 120 \log(H_{JIS} / 3.5) + 5(hw-20) + 8(\sigma_B - 83)$$

where $H_{JIS}(\text{ml}/100\text{gr})$: diffusible hydrogen content measured by glycelin method

$hw(\text{mm})$: height of weld metal

$hw = h$ for V-groove and ν -groove

$hw = h/2$ for X-, K- and double groove

$\sigma_B(\text{kg}/\text{mm}^2)$: tensile strength of weld metal in all-weld-metal test

(b) Okuda 등은 다음 식을 제안하였는데, 이 식에서 두께의 영향이 빠진 것은 두께의 영향을 고려치 않고, 모든 실험을 40mm 두께의 weld metal에 대해서만 실시하였기 때문이다.

$$T_p(^\circ\text{C}) = 5.24 \sigma_B + 277 \log[H]_{D-GC} - 482$$

where $[H]_{D-GC}$: diffusible hydrogen content measured by gas chromatograph method

σ_B : tensile strength of weld metal

이상의 두 식에서 알수 있듯이 용착금속의 저온균열 감수성은 용착금속의 인장강도와 직접적인 관계가 있기 때문에 고강도 용착금속에서의 저온균열 발생 가능성은 매우 높다고 하겠다. 따라서 용접부에 적용되는 예열의 목적은 열영향부에서의 균열방지 뿐만 아니라 용착금속부에서의 균열방지를 위해서도 필요한 것이라 하겠다. 그리고 만약 용착금속에 있어서 필요로 하는 예열 온도가 열영향부에 대해 필요로 하는 예열온도보다 높다면 필요예열온도는 모재보다는 용접재료가 우선적으로 고려되어 설정되어야 한다는 사실에 이르게 된다. 따라서 고강도 재료의 용접 재료를 평가함에 있어서는 기계적 성질이외에도 용접재료의 저온균열 감수성이(모재의 평가와 병행하여) 필히 평가되어야 할 것이다.

3. 연구개발동향

3-1 잔류응력의 완화

용접부에서 발생하는 잔류응력은 용접부가 국부적으로 가열되었다가 냉각하는 과정에서 발생되며, 이 과정에서 발생하는 인장잔류응력이 저온균열을 야기시켰다. 용접부의 잔류응력크기는 강판의 두께 및 구속도 등에 의해 결정되는데, 이들은 모두 설계도면에 의해 결정되는 사항들이다. 따라서 도면이 결정되면 제작과정에서 잔류응력을 완화시킬수 있는 방법은 없다고 하겠다. 이러한 한계를 재료측면에서 해결해 보고자 한 것이 최근 일본에서 차세대 구조용강용으로 소개한 10% Cr-10%Ni 계 용접재료이다. 이는 150~200℃의 저온영역에서 마르텐사이트 변화가 일어나도록 하여, 변태시 발생하는 부피 팽창으로 용접부에 압축 잔류응력이 발생토록 한 것이다. 표 1은 일본에서 발표한 시험 결과이다. M_S 온도가 220℃이상에서 100% 균열을 보여주고 있으며, M_S 온도가 가장 낮은 11%Cr-9%Ni 조성에서는 균열 발생정도가 작아졌음을 보여주고 있다. 이는 변태과정에서 나타나는 부피팽창의 결과라고 하겠다.

Table 2 Result of y-groove weld cracking test

	Calculated Ms-temp. of all deposited metal (°C)	Crack Ratio (%)		
		Surface Section Root		
A(11%Cr - 9%Ni)	156	0	49	18
B(11%Cr - 6.5%Ni)	220	100	100	100
Y(13%Cr - 5%Ni)	251	100	100	100
X(Conventional)	556	100	100	100

3-2 확산성 수소 저감 방안

확산성 수소는 용접방법 및 용접재료에 의해 결정되는 변수이다. 재료측면에서 이를 저감하는 방안은 플럭스 원자재를 선별하여 사용하는 것이다. 즉 결정수를 포함하지 않고 흡습이 잘되지 않는 재료를 선정하는 것이다. 최근 희토류금속을 첨가함으로써 확산성 수소량이 저감할 수 있다는 연구결과가 보고되었다. 표 2는 Y-SiFe 및 Te 첨가에 따른 확산성 수소량이 크게 저감되고 있지만, 이러한 용접재료는 아직 상품화되지 못하고 있다.

그 원인은 이들 원소를 용접재료에 첨가하더라도, 용접아크기등을 통과하면서 모두 소실되기 때문이다. 향후 이에 대한 대책이 요구된다.

Table 2 Effect of Y-SiFe and Te addition on diffusible hydrogen content in weld

Y-SiFe addition(mg/cm)	0	2.5	5.0	12.5	25.0		
Diffusible hydrogen[H](ml/100g)	7.26	4.33	4.54	4.17	4.17		
Te addition(mg/cm)	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Diffusible hydrogen[H](ml/100g)	8.05	4.21	3.71	3.75	3.29	3.24	3.24

3-3 미세조직 개선방향

저온균열에 미치는 미세조직의 영향을 정량화하는 방안으로 탄소당량, 경도 또는 강도 등이 사용되어 왔다. 그런데 탄소강의 용접부는 여러 가지 미세조직이 혼합되어 나타나기 때문에 각각의 미세조직이 저온균열에 미치는 영향을 살펴볼 필요가 있다.

지금까지 알려진 바로는 용착금속에 있어서 저온균열을 입계페라이트를 따라 전파한다고 보고되고 있다. 따라서 저온균열 발생에 미세조직의 영향이 있다는 것은 유추할 수 있으나 이를 체계적으로 연구된 바는 없는 것 같다. 이에 대해서는 최근에 보고되고 있는 자료를 중심으로 보고하고 자한다.