

페라이트계 스테인리스강의 FCA 육성용접부 연성 평가

Evaluation of ferritic stainless steel FCA overlay weld metal ductility

김 영일*, 최 준태*, 김 대순*

* 현대중공업

ABSTRACT The bend ductility of Type 410S ferritic stainless steel overlay weld on carbon steel was investigated. Overlay weld that was stabilized with Nb had large columnar ferrite grain and Nb precipitate on grain boundary. And that caused fracture when bend test without concern of PWHT condition. Proper bend ductility at as-welded condition was achieved by refining ferrite grain with addition of 0.04~0.09% Al and 0.2~0.5% Ti that make oxide, carbide and nitride at high temperature.

1. 서 론

Type 410S 페라이트계 스테인리스 클래드강의 용접구조물 제작에서 페라이트계 스테인리스 육성용접은 결정립 조대화 및 Cr 탄화물의 석출에 의한 용접부 연성저하 및 입계에민화의 문제가 있다. 특히 탄소강에 초층 육성용접 할 경우 모재와의 회석에 의한 탄소량의 증가와 크롬량의 감소로 인해 용접부에 마르텐사이트 조직이 생성될 가능성이 있어 Nb 및 Ti를 첨가한 고 Cr계 Type 430(17%Cr) 용접재료를 사용하여 초층 용접을 함으로써 페라이트 기지를 안정화 시키고, Cr 탄화물 석출에 의한 예민화를 방지한다. 또한 육성 용접부의 연성회복 및 탄소강 모재의 잔류응력을 제거하기 위해 용접 후열처리가 요구되나 용접부 연성회복을 위해 700℃ 이상의 고온에서 후열처리를 하게 되면 탄소강의 강도가 저하되므로 용접그대로(as-welded)상태 또는 탄소강의 후열처리 온도인 610℃ 정도에서 충분한 용접부 연성을 확보해야 한다. 따라서 본 연구에서는 Type 410S 클래드강 육성용접부의 후열처리 조건 및 화학조성에 따른 굽힘연성을 평가해 보았다.

2. 실험재료 및 용접조건

2.1 모재

실험에 사용된 모재는 ASTM A516 Gr.70 탄소강으로 두께는 12mm 이었다. 표. 1에 화학성분을 나타내었다.

표. 1 ASTM A516 Gr.70의 화학성분 (wt.%)

	C	Mn	P	S	Si
A516-70	0.20	1.10	0.013	0.002	0.25

2.2 육성 용접재료

첫째 층 용접재료는 회석을 고려하여 17% Cr을 함유한 Type 430을 사용하였고, 둘째 층은 Type 410 을 사용하였다. 용접재료 별로 Nb, Ti 그리고 Al 등의 원소를 달리하였다. 각 용접재료의 육성 용접부 화학성분을 표. 2에 나타내었다.

표. 2 육성 용접부의 화학성분

WIRE	LAYER	CHEMICAL COMPOSITION OF OVERLAY WELD METAL (WT%)					
		C	Cr	Al	Ti	Nb	Nb/C
A	1ST	0.037	13.550	0.0003	0.018	1.350	36.5
	2ND	0.042	12.700	0.0001	0.013	0.540	12.9
B	1ST	0.049	13.700	0.0004	0.023	0.437	8.9
	2ND	0.048	12.620	0.0003	0.018	0.484	10.1
C	1ST	0.055	13.600	0.0016	0.041	0.639	11.6
	2ND	0.062	12.210	0.0155	0.193	0.962	15.5
D	1ST	0.076	11.040	0.0453	0.193	0.660	8.7
	2ND	0.067	11.810	0.0854	0.250	0.889	13.3

2.3 용접조건 및 예열

용접은 FCAW를 사용하여 아래보기 자세에서 입열 10kJ/cm로 실시하였다. 이때 예열은 최소 150℃를 유지하였고, 층간온도는 최대 170℃였다.

3. 실험내용 및 결과

용접된 시편은 표면에서 액상침투 비파괴 시험을 실시하여 건전성을 평가하였고, 굽힘시험 및 경도측정을 통하여 물성평가를 하였다.

3.1 굽힘시험

ASME 규격에 따라 180° 측면 굽힘시험을 실시하여 연성을 평가하였다. 표. 3에서와 같이 용접재료 A, B 그리고 C는 후열처리 온도 700℃에서도 크랙이 발생하였으나, D 용접재료의 경우 AS-WELD 상태 및 모든 후열처리 조건에서 합격하였다. 그림. 1에서 대표적인 굽힘시험편을 나타내었다.

표. 3 굽힘시험 결과

WIRE	PWHT CONDITION		
	AS-WELD	2hrs@610℃	2hrs@700℃
A	FAIL	FAIL	GOOD
B	FAIL	FAIL	2FAIL 2GOOD
C	FAIL	FAIL	2FAIL 2GOOD
D	GOOD	GOOD	GOOD

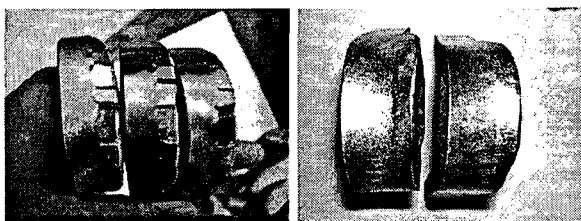


그림. 1 굽힘시험편 (a) FAIL, (b) GOOD

3.2 경도 측정

경도 측정 결과 용접재료 및 후열처리 조건에 따라 큰 경도의 차이는 없었으며 모두 Hv 170~220 정도의 낮은 값을 나타내어 페라이트 조직임을 알 수 있었다. 또한 그림. 2에서 대표적으로 B용접부의 조직을 비교해 보면 후열처리 조건에 따라 미세조직의 변화는 관찰되지 않아 700℃까지의 후열처리에 의한 용접부 조직 변화

나 정도 변화는 미미할 것으로 판단되었다.

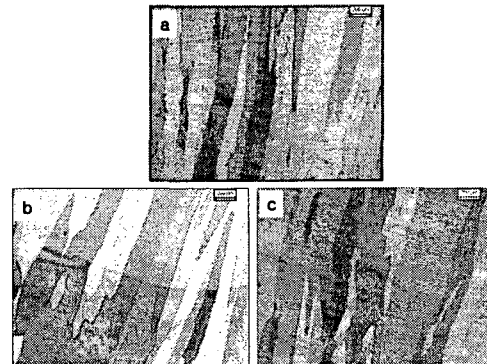


그림. 2 B용접부의 후열처리에 따른 미세조직 (a) as-welded, (b) 2hrs@610℃, (c) 2hrs@700℃

3.3 미세조직 관찰

그림. 3은 각 용접부의 조직을 비교한 것으로 모두 페라이트 조직이 형성되어 있었으며 A, B 그리고 C 용접부는 매우 조대한 페라이트 결정립이 형성된 반면 D 용접부는 미세하였다. 그림 4는 A용접재료의 용접부 조직으로 둘째층 직하의 초층 용접부에서 균열이 관찰되었다. 이를 SEM으로 확인한 결과 입계에 필름형상의 Nb 화합물이 석출되었고, 부분적으로 공정조직이 형성되어 있었다. 표. 2에서 A용접부의 첫째 층 화학성분을 보면 Nb 함량이 1.35%로 다른 용접부에 비해 많고 Nb/C도 36.5로 높아 과도한 Nb이 입계에 집적되면서 선형으로 화합물을 형성하고, 후속 패스의 재가열에 의해 용해되어 응고균열이 일어난 것으로 판단되었다. 그림. 5는 미세한 페라이트 조직을 보인 용접부 D의 미세조직으로 입계 및 입내에 주로 Al 산화물과 Ti계 탄질화물이 미세석출 되어있고, 입계를 따라 Nb 탄화물이 석출되었다. 그림. 6은 B 용접부로서 D 용접부와 Nb/C 수치가 9~10 정도로 유사하지만 Al 및 Ti가 거의 첨가되지 않은 조직이다. B 용접부 역시 A와 마찬가지로 입계를 따라 Nb 석출물이 선형으로 형성되어 있으며, 기지 내에 미량의 Al 산화물과 Cr, Nb 석출물이 분포하고 있다. 이상의 결과를 정리해 보면 용접부 내의 Nb은 탄소와 결합하여 페라이트 조직을 안정화 시키지만 주로 입계에 선형으로 석출하여 연성을 저하시키는 원인이 되었다. 그러나 용접부 D에서와 같이 Al이 0.04~0.09%, Ti이 0.2~0.5%정도 첨가되면 고온에서 Al 산화물 및 Ti 탄질화물이 석출하여 페라이트 핵생성 사이트가 되고, 결정립 이동을 방해

하여 조직 미세화의 효과가 있으며, 결과적으로 굽힘연성 확보에 기여 하는 것으로 판단되었다. 또한 A, B 그리고 C 용접부는 주상정 형태로 조대한 결정립이 형성되고, 입계에 선형의 Nb 석출물이 존재하여 굽힘시험 시 입계에 응력이 집중되고 이를 따라 파단되기 쉬운 미세구조를 가진 것으로 관찰되었다.

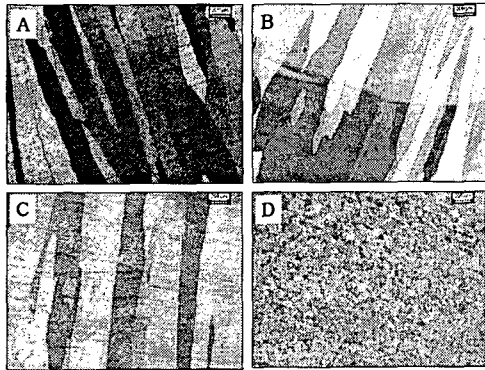


그림. 3 용접재료에 따른 용접부 조직 (A:용접재료A, B:용접재료B, C:용접재료C, D:용접재료D)

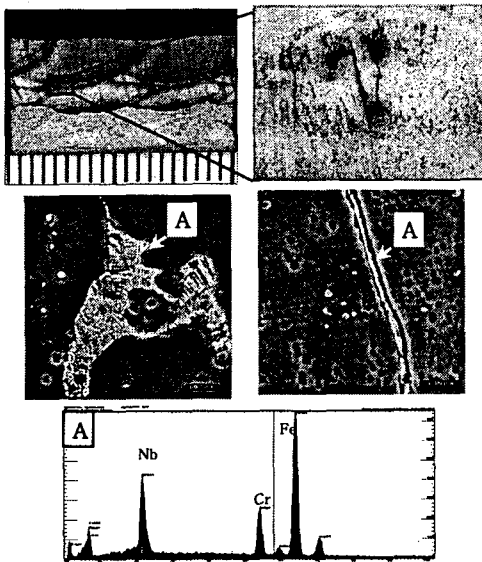


그림. 4 용접재료 A의 용접부 미세조직

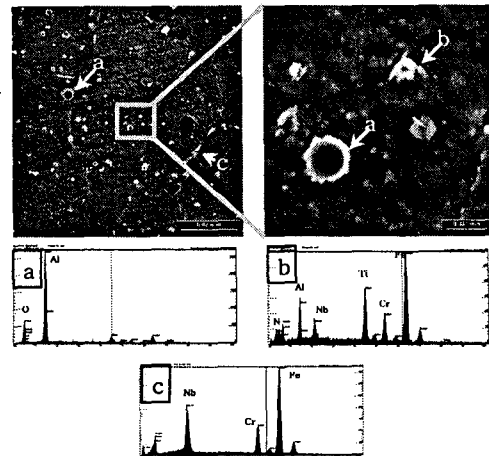


그림. 5 용접재료 D의 용접부 미세조직

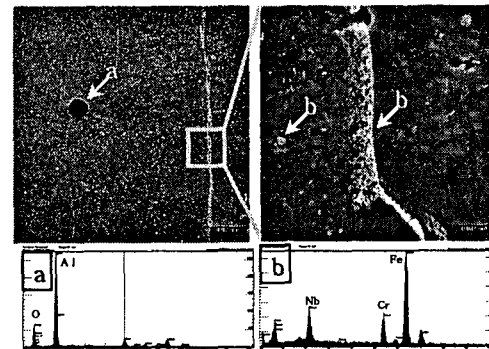


그림. 6 용접재료 B의 용접부 미세조직

4. 결 론

1) Nb/C 수치가 36.5일 때, 과도한 Nb 석출물이 입계에 집적되어 후속용접 열에 의한 재 용해로 응고균열을 유발하였다.

2) Nb/C 8~13 정도의 Nb를 함유한 페라이트계 스테인리스 용접재료는 용착금속이 응고 하면서 조대한 페라이트 결정립이 생성되고, 입계에 석출된 Nb 화합물로 인해 굽힘연성이 저하되었다.

3) 용접부에 Al이 0.04~0.09%, Ti이 0.2~0.5%정도 첨가되면 조직 미세화의 효과가 있으며, 결과적으로 굽힘연성 확보에 기여 하였다.

참 고 문 헌

1. G.B.Hunter, T.W.Eagar : Ductility of stabilized ferritic stainless steel welds, Metallurgical transactions A, Vol.11A, Feb. 1980, pp213~218