

오스테나이트계 내열 스테인리스강의 용접성 평가에 관한 연구

변경일*, 지병하**, 정호신**

* 부경대학교 대학원 재료공학과, ** 한국중공업, ** 부경대학교 재료공학부

The Study on Evaluation of Weldability of Austenitic Heat Resistant Stainless Steel

K. I. Byun, B. H. Chi, H. S. Jeong

*Graduate School **Hanjung Co., LTD

***Division of Material Science and Engineering, Pukyong National University

KEY WORD : Austenitic heat resistant stainless steel 오스테나이트계 내열 스테인리스강, Weldability 용접성, Solidification crack 응고균열, Vrestraint test, Erichsen test

ABSTRACT: It is important to evaluate austenitic heat resistant stainless steel because of low weldability of austenitic heat resistant stainless steel containing high Si. This study took varestraint test for evaluation of solidification cracking sensitivity and Erichsen test for evaluation of weld metal ductility. As a result of tests, solidification crack sensitivity increased with adding N₂ to shielding gas, and W had detrimental effect on crack resistance, but Ce had beneficial effect on crack resistance. Under same heat input, ductility of weld metal increased with welding speed.

1. 서론

Si를 함유한 오스테나이트계 스테인리스강은 STS 310S 이상의 내산화성과 고온강도를 가질 수 있기 때문에 새로운 내열강으로서 주목받고 있다. 특히 VOD-연속주조-연속압연-젠지머 냉연에 의한 양산화에 성공함으로써 향후에는 각종 환경 설비 및 자동차 배기 가스 정화 장치용의 재료로서 널리 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

이와 같은 측면에서 Si 함유 오스테나이트계 스테인리스강의 현장 적용성을 높이기 위해서는 용접성을 고려해야 하며, 특히 Si이 첨가될 경우에는 용접성이 저하할 가능성이 매우 크기 때문에 용접성 향상을 위한 연구가 절실한 실정이다.

이와 같은 관점에서 선박 및 해양구조물 뿐 아니라 각종 산업 분야에서의 중대형 구조물의 용접에 적용할 경우에는 중후판재가 용접의 대상이 되며, 이 경우에는 용접시의 구속도가 크다는 측면에서 용접부의 고온균열 방지 대책의 정립이 필요하며, 또한 자동차 분야를 비롯하여 박판을 주로 사용하는 분야에 적용을 위해서는 박판 재료의 용접과 아울러 용접부가 2차 가공되는 경우가 많기 때문에 용접부의 냉간 가공성을 향상시킬 수 있는 용접인자의 정립이 시급한 실정이다.

이와 같은 측면에서 신강종의 수요 확대 및 제품에 대한 신뢰성 향상과 아울러 용접부의 2차가공 기술의 향상을 위

해서는 용접성을 체계적으로 조사하는 것이 필수적인 과제로 대두되고 있다.

본 연구에서 사용한 신강종의 경우에는 내열성 및 고온강도 향상을 위하여 각종의 합금원소인 Nb, W, N, Si가 첨가되어 있으므로 이러한 합금원소의 첨가에 기인하는 응고균열 감수성을 평가하기 위하여 개발 대상 강종 총 14종에 대하여 보호 가스 조성을 변화시켜 Vrestraint 시험을 실시하여 응고균열 감수성이 낮은 합금성분계열 도출함과 보호 가스 조성 중 질소 첨가에 따른 응고균열 감수성을 정립하였다.

오스테나이트계 스테인리스 박판 재료의 경우에는 용접한 이후, 확관이나 각종의 냉간 가공이 동반되는 경우가 많으며, 이러한 경우에는 용접부에서 균열이 발생하는 경우가 상당히 많다. 이러한 측면에서 용접부의 냉간 가공성을 향상시키기 위해서는 용접부에 연성을 부여하여야 할 필요가 있다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용한 재료의 화학성분을 Table 1에 나타내었다. 전 강종에서 각각 18.4%Cr, 8.6%Ni, 1.0%Mn, 1.5%Si, 0.067%C를 목표로 진공용해 하였고, 강종마다 N, Nb, W,

Ce 함량을 변화시켰다. 시험편 STD를 시작해서 시험편 7번까지는 고질소 강종이고, 시험편 8번부터 13번까지는 저질소 강종이며, 7번 시험편에만 0.05%Ce이 첨가되었다.

용고균열 감수성 평가를 위한 시험편과 에릭슨 시험편으로 각각 4mm 두께의 열간 압연재와 2mm 두께의 냉간 압연재를 사용하였다. 압연후 1120℃에서 고용화 열처리를 하였다.

용고균열 감수성 평가를 위한 Varestraint 실험시 실시한 용접조건을 Table 2에 나타내었다. Ar 100%, 95%Ar-5%N₂, 90%Ar-10%N₂로 보호가스 중으로 질소 함량을 단계적으로 증가시켜 용접하였다. 곡률반경이 1.56 inch와 3.12 inch인 bending block을 사용하였고, 그때 시험편에 부가되는 스트레인인 각각 대략 5.04%와 2.52%이었다. 용접후 용접금속에서 발생한 균열의 길이를 측정하고, 그 균열길이의 총합으로 균열 감수성을 평가하였다. Varestraint 실험 후 SEM과 EDX에 의해 용고균열 파면의 특성 파악과 균열 부위에서의 편석거동과 용고 균열 감수성과의 관계를 조사하였고, TEM에 의해 균열부위 및 모재부에서의 석출거동을 조사하였다.

용접부의 연성 평가를 위한 Erichsen 실험시 실시한 용접조건을 Table 3에 나타내었다. Varestraint 실험과 마찬가지로 N₂ 5%, N₂ 10%로 보호가스 중 질소함량을 변화시켰고, 같은 용접 입력량으로 높은 용접전류로 용접속도를 빠른 경우와, 낮은 용접전류로 용접속도를 느리게 한 경우를 상호 비교하였다. 용접 후 용접부를 일부 채취하여 Magne-Gage로 페라이트양을 측정하여 DeLong 당량식으로 부터 계산한 페라이트양과 상호 비교하였다. 에릭슨 시험편치의 속도는 5mm/min로 하였고, 균열이 생길때까지 편치 끝이 이동한 거리를 에릭슨 값으로 정의하였다. 단 모재에

서 먼저 균열이 발생한 경우는 데이터에 포함시키지 않았다.

3. 실험결과

3.1 페라이트양 측정 결과

Table 4에서 14강종의 DeLong 당량식을 사용하여 구한 페라이트 번호와 각 용접조건과 보호가스에 따른 실제 페라이트양을 magne-gage로 측정한 값을 나타내었다. 용접조건에 따라서는 페라이트양의 차이가 거의 없었으나, 보호가스 중으로 질소를 첨가함에 따라 페라이트양은 크게 감소하였다. 강종에 따라서는 10번이 강종이 페라이트가 가장 많다.

3.2 용고균열 감수성 평가(Varestraint test)

Fig.1은 1번, 5번, 10번, 13번 강종에서의 보호가스 중 질소 함량에 따른 총균열길이를 나타낸 그래프이다. Table 4에서 볼수 있듯이 10번 강종의 페라이트양이 월등히 많고 13번, 5번, 1번 강종의 순으로 페라이트양이 감소하였고, 페라이트양이 적은 강종일수록 용고균열 감수성은 증가하였다. Fig.1에서 10번 강종을 제외한 나머지 강종에서는 보호가스중 질소함량이 증가함에 따라 균열감수성도 함께 증가하였다. 일반적으로 조정 용고양식이 용고균열 감수성에 크게 영향을 미치고, 조정 용고상이 델타 페라이트인 경우가 조정 오스테나이트로 용고하는 경우보다 용고균열 감수성 낮다. 그 이유로서 여러 가지 이론들이 있고, 대표적인 것으로는 델

Table 1 Chemical composition of specimens

	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	C	B	Ti	N	Nb	W	Ce	O
STD	18.00	8.38	1.01	1.59	0.016	0.0032	0.067	0.0026	0.014	0.14	0.2	0.94		72
1	18.13	8.45	1.02	1.61	0.016	0.0032	0.067	0.0026	0.013	0.13	0.21	0.5		53
2	18.42	8.47	1.00	1.56	0.021	0.0031	0.067	0.0025	0.012	0.14	0.21	1.86		45
3	18.80	8.37	1.00	1.56	0.017	0.0034	0.062	0.0025	0.013	0.14	0.27	0.48		66
4	18.80	8.60	1.01	1.55	0.017	0.0034	0.065	0.0028	0.014	0.14	0.28	0.95		36
5	18.45	8.51	1.00	1.59	0.020	0.0033	0.065	0.0026	0.012	0.13	0.25	1.84		52
6	18.70	8.58	1.02	1.62	0.019	0.0029	0.067	0.0025	0.015	0.14	0.11	0.95		55
7	18.46	8.53	1.01	1.62	0.015	0.0012	0.068	0.0029	0.013	0.13	0.21	0.94	0.05	25
8	18.13	8.50	1.02	1.60	0.017	0.0041	0.069	0.0030	0.014	0.091	0.21	0.54		48
9	18.40	8.46	1.01	1.60	0.016	0.0032	0.071	0.0026	0.014	0.088	0.2	0.94		47
10	18.78	8.41	1.00	1.60	0.017	0.0030	0.057	0.0026	0.014	0.087	0.2	1.84		100
11	18.35	8.39	1.01	1.59	0.016	0.0034	0.063	0.0025	0.014	0.08	0.3	0.55		93
12	18.0	8.21	1.00	1.57	0.018	0.0033	0.062	0.0023	0.012	0.078	0.33	0.93		89
13	18.12	8.46	1.02	1.58	0.014	0.0032	0.065	0.0027	0.014	0.088	0.32	1.83		81

Table 2 Welding condition of Varestraint test

Method	GTAW
Welding Current	140A
Travel Speed	25cm/min
Shielding Gas(15 l /min)	Ar 100%
	Ar 95% N ₂ 5%
	Ar 90% N ₂ 10%
Tip Clearance	2mm

Table 3 Welding condition of Erchsen test

Method	GTAW
Welding Current	80A, 160A
Travel Speed	30cm/min, 60cm/min
Shielding Gas(15 l /min)	Ar 100%
	Ar 95% N ₂ 5%
	Ar 90% N ₂ 10%
Tip Clearance	2mm

Table.4 Ferrite number of specimen

Spec. No	FN ^(a)	Measured FN			
		80A	160A	80A	80A
		30cm/min Ar100%	60cm/min Ar100%	30cm/min N ₂ 5%	30cm/min N ₂ 10%
STD	3	1.85	1.7	0	0
1	4	1.5	1.4	0	0
2	4	3.2	4.3	0.5	0.7
3	6	2.2	2.8	0.2	1
4	5	2.5	2.8	0.2	0.8
5	5	3.7	4.3	0.95	1.8
6	5	1.7	2.2	0	0.2
7	5	1.6	2.5	0.2	0.7
8	7	2.5	2.5	0.2	0.5
9	8	4.05	4.7	0.7	1.2
10	12	12.3	12.2	5.3	4.2
11	10	5.25	5.2	1.05	1
12	9	6.2	6.2	2	1.05
13	8	7.3	7	2.25	1.9

^(a) Cr equivalent = %Cr + %Mo + 1.5×%Si + 0.5×%Nb
 Ni equivalent = %Ni + 30×%C + 30×%N + 0.5×%Mn

타 페라이트의 S, P 고용도가 오스테나이트보다 크고, 고온에서 델타 페라이트의 고온 열팽창 계수가 오스테나이트보다 작으며, 이상조직(오스테나이트+페라이트)인 경우 입계나 상간 계면의 면적이 오스테나이트 또는 페라이트 단상으로 응고하는 경우보다 큰 것 등이 있다. 따라서 일반적으로 페라이트양이 증가할수록 응고관열 감수성이 감소한다. 한편 질소는 강력한 오스테나이트 형성 원소로서 용접중 보호가스 중에 존재할 경우 용접아크열에 의해 해리되어 용융금속 증으로 침입하여 페라이트양을 감소시킨다. 따라서 본 실험에서 실험한 전 강종의 경우 보호 가스중 질소 첨가에 따라 응고관열 감수성은 증가하였다. 그러나 질소를 5%에서 10%로 증가함에 따라 페라이트양이나 응고관열 감수성은 크게 변하지 않았다.

Fig.1에서 Ar 100%인 경우 가장 많은 페라이트양을 가진 10번 강종의 응고관열 감수성이 가장 높았다. 따라서 페라이트양이 어느 정도 이상 많을 시에는 오히려 응고관열 감수성이 증가함을 알 수 있었고, 10번 강종과 같이 많은 페라이트를 가진 강종에서는 용접시 보호가스중으로 질소를 첨가함으로써 응고관열 감수성을 다소 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다.

Fig.2는 W함량에 따른 응고관열 감수성을 나타낸 그래프이고, W함량은 3번, 4번, 5번 강종 순서로 증가하고, 페라이트양은 3번과 4번은 비슷하고, 5번의 강종은 3번과 4번 강종보다 많은 페라이트가 존재한다. 비교적 응고관열 감수성이 작은 경우, 즉 보호가스가 Ar 100%인 경우와 질소 5%를 첨가한 경우에는 큰 차이를 나타내지 않지만, 질소를 10% 첨가한 경우에는 5번 강종이 많은 페라이트를 함유하고 있음에도 불구하고, 나머지 두 강종보다 더 높은 관열 감수성을 나타내었다. 따라서 W는 응고관열 감수성을 높이는 원소임을 추정할 수 있다.

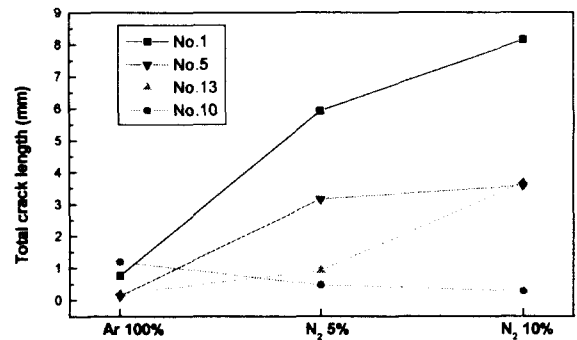


Fig. 1 Total crack length of spec. no. 1, 5, 10, 13

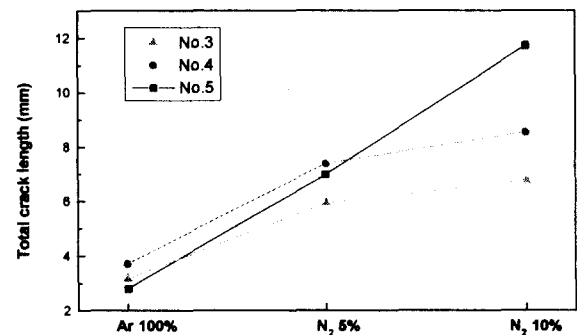


Fig. 2 Total crack length of spec. no. 3, 4, 5

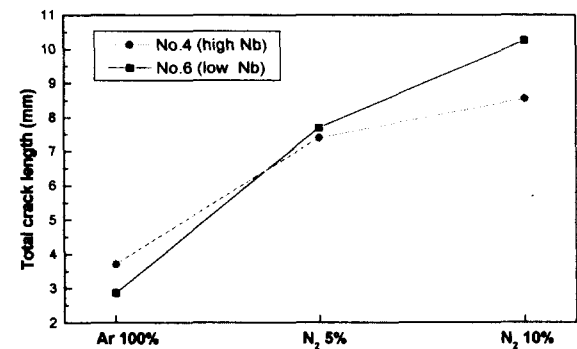


Fig. 3 Total crack length of spec. no. 4, 6

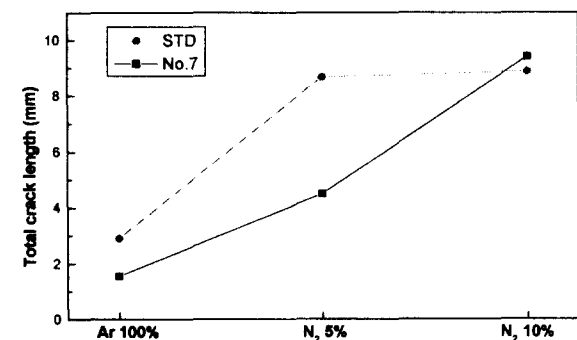


Fig. 4 Total crack length of spec. no. STD, 7

Table 5 Erichsen values of specimens

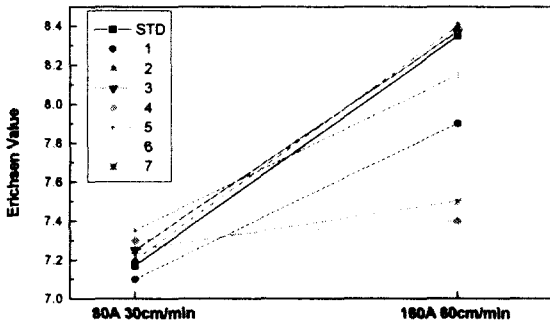


Fig.5 Erichsen value of spec. no. STD, 1,2,3,4,5,6,7

Fig.3은 Nb 함량에 따른 용고관열 감수성을 나타낸 그래프이고, 4번 강종이 6번 강종보다 많은 Nb를 함유하고 있다. 보호가스가 Ar 100%인 경우에는 비록 적은 차이이지만 Nb 함량이 높을수록 용고관열 감수성은 증가하였으나 보호가스 중으로 질소를 10% 첨가하였을 시, Nb 증가에 따라 용고관열 감수성이 감소하였다. 연구결과³⁾에 의하면 Nb가 첨가되면 Fe-Cr-Nb 공정화합물 액상이 형성되며 이러한 액상이 용고관열감수성을 증가시킨다는 보고가 있다. 본 실험에서는 페라이트양이 어느 정도 존재하는 경우 Nb의 첨가에 따라 상술의 기구에 의해 용고관열감수성이 증가하였으나, 보호가스중으로 질소를 첨가함에 따라 초정용고상이 오스테나이트로 되면서 페라이트 형성원소 Nb의 역할이 증가하여, Nb 함량이 증가함에 따라 용고관열 감수성이 낮아진다고 사료된다.

Fig.4는 회토류 원소 Ce 첨가에 따른 용고관열 감수성을 나타낸 그래프이다. Ce는 강력한 탈산, 탈황제이며 가공성을 크게 향상시키는 것으로 알려져 있다. Fe-Ce의 상태도에 의하면 Ce은 용고온도범위를 증가시킴에도 불구하고 용고관열감수성을 크게 감소시키는데 이는 강력한 탈황효과 때문이다. Ce 황화물은 용융온도가 2000℃ 이상으로 높고, 미세하고 둥근 형태의 입자로 형성되기 때문에 S에 의한 (Fe, Mn)S의 액상 형성을 방지한다. 본 실험에서도 Ce 첨가에 의해 용고관열 감수성을 감소시켰으나, 보호 가스 중으로 질소를 10% 첨가한 시에는 그 효과가 소멸되었다.

3.3 용접부 연성 평가(Erichsen test)

Table 5에 용접조건에 따른 에릭슨 실험결과를 나타내었다. 실험결과 STD 강종부터 7번 강종까지의 질소함량이 높은 강종에서는 용접시 보호가스중으로 질소를 5% 첨가하였을 때 대체로 높은 에릭슨값을 얻었고, 8번부터 13번 강종까지의 질소함량이 낮은 강종에서는 보호가스중으로 질소를 10% 첨가하였을 때 높은 에릭슨값을 얻을 수 있었다. 오스테나이트계 스테인리스강의 용접시에 질소 혼합 가스를 사용하여 용접하면 질소의 오스테나이트 안정화 작용에 의해 델타 페라이트의 함유량이 줄어들고, 오스테나이트 조직의 분율이 높아지므로 냉간가공성이 향상된다고 사료되나, 질소가 과잉으로 첨가되면, 결정립계를 따라 질화물의 형성

Spec. No	Erichsen Value			
	80A 30cm/min Ar100%	160A 60cm/min Ar100%	80A 30cm/min N ₂ 5%	80A 30cm/min N ₂ 10%
STD	7.17	8.35	6.95	7.1
1	7.1	7.9	7	6.65
2	7.2	8.4	7.45	6.8
3	7.25	8.37	7.67	7.07
4	7.3	7.4	6.75	7.33
5	7.35	8.15	7.37	7.65
6	7.45	8.37	6.7	7.53
7	7.25	7.5	7.4	7.1
8	7.55	8.07	7.5	7.6
9	7.95	8.3	7.8	8.07
10	7.75	7.55	7.75	8.7
11	7.55	7.2	6.93	7.33
12	8.2	8.1	7.15	7
13	7.85	7.9	7.55	6.7

또는 기공의 발생으로 냉간가공성이 저하된다고 사료된다. 한편 에릭슨 실험시 많은 시험편에서 관열이 모재에서 발생하여 강종의 변화에 따른 에릭슨값의 정확한 값을 얻기가 힘들었다.

Fig.5에서는 동일한 입열량으로 용접하였을시 용접속도와 용접전류에 따른 에릭슨값을 나타내었고, 용접속도가 빠를수록 에릭슨값이 증가하는 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결론

14강종의 오스테나이트계 내열 스테인리스강의 용접조건과 보호가스의 변화에 따른 용고관열감수성과 용접부 연성을 평가한 결과, 용접시 보호가스중으로 질소를 첨가함에 따라 용고관열감수성은 증가하였으나, 적정량 이상의 페라이트를 함유한 강종에서는 질소를 첨가함에 따라 용고관열감수성은 감소하였다. W은 용고관열 감수성을 증가시켰고, Ce은 용고관열 감수성을 감소시켰으나, Nb은 페라이트양에 따라 용고관열 감수성에 미치는 영향이 변화였다. 동일한 입열량으로 용접하였을시 용접속도가 빠를수록 용접부 연성은 증가하였다.

참고문헌

J. C. Lippold, W. F. Savage(1982) "Solidification of Austenitic Stainless Steel Weldments : PartIII" Welding Journal Dec. 388-s
 정홍철 "탄소강에서의 용접부 고온관열" 대한용접학회지 제 17권 제5호 1999.10 pp.1
 Erich Folkhard "Welding Metallurgy of Stainless Steels" 1988
 P. Kujanpaa "Weld Discontinuities in Austenitic Stainless Steel Sheets" Welding Journal Dec. 369-s