열간압연 클래드강의 맞대기용접부 내식성 및 용접성 평가

박 재 원^{*,†} · 이 철 구^{**}

^{*}NID 융합기술대학원 나노·IT 융합프로그램

^{**}서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

Evaluation of Corrosion Resistance and Weldability for the Butt Welding Zone of Hot Rolled Clad Steel Plates

Jae-Won Park^{*,†} and Chul-ku Lee^{**}

^{*}School of Nano IT Fusion Program, Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

^{**}Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

[†]Corresponding author : weldingtig@hanmail.net

(Received August 22, 2013 ; Revised October 14, 2013 ; Accepted October 24, 2013)

Abstract

We have investigated the traits of clad metals in hot-rolled clad steel plates, including the sensitization and mechanical properties of STS 316 steel plate and carbon steel (A516), under various specific circumstances regarding post heat treatment, multilayered welds, and thick or repeated welds for repair. For evaluations, sectioned weldments and external surfaces were investigated to reveal the degree of sensitization by micro vickers hardness, tensile, and etching tests the results were compared with those of EPR tests. The clad steel plates were butt-welded using FCAW and SAW with the time of heat treatment as the variable, a that was conducted at 625 °C, for 80, 160, 320, 640, and 1280 min. Then, the change in corrosion resistance was evaluated in these specimens. With carbon steel (A516), as the heat treatment time increased, the annealing effect caused the tensile strength to decrease. The micro-hardness gradually increased and decreased after 640 min. The elongation and contraction of the area also increased gradually. The oxalic acid etch test and EPR test on STS316 and the clad metal showed STEP structure and no sensitization. From the test results on multi-layered and repair welds, it could be concluded that there is no effect on the corrosion resistance of clad metals. The purpose of this study was to suggest some considerations for developing on-site techniques to evaluate the sensitization of stainless steels.

Key Words : Hot-rolling clad steel, FCAW/SAW, Oxalic acid test, Weldability

1. 서 론

스테인리스강은 산업계 전반에 매우 다양한 용도로 사용되고 있다. 석유정제, 석유화학을 비롯한, 선박, 토목, 농업, 보일러, 열교환기 등의 고온 분위기에서 사용되는 내열강으로 적용하고 있다. 또한, 초저온 환경, 각종 산, 알칼리, 해수를 다루는 기자재 등의 부식성 분

위기에 적합한 기능성 재료로 널리 활용되고 있다¹⁾. 내식성과 우수한 기계적 성질을 가진 클래드강(clad steel)은 원자로 압력용기, 각종 저장 조, 선박, 도장이 불필요한 수문 등의 소재로 사용되고 있다. 또한, 클래드강은 복합재료로써 조선 및 산업 설비 등 다양한 용도로 적용이 가능하며, 이에 따른 연구가 활발히 진행되고 있다²⁾. 압력용기의 경우 내면에 부식 현상을 방지하기 위하여 열간 압연 강재인 클래드강을 많이 사용한

다³⁾. 그런데 오스테나이트 스테인리스강의 가장 큰 문제점은 용접부 열영향부 표면에 크롬 탄화물이 석출되어 입계부식이 발생된다는 것이다. 다층 및 보수 용접 공정 시 용접금속 쇠약 및 잔류응력, 결정립 조대화, 탄화물 석출 등 용접부의 건전성 및 내식성에 현저할 수 있다. 용접 입열에 의한 열영향부의 저하된 인성을 회복하기 위해 필수적으로 용접 후열처리를 한다⁴⁾. 본 연구에서는 모재 부분은 반자동으로 플럭스 코드아크 용접(flux cored arc welding, FCAW) / 서브머지드 아크 용접(submerged arc welding, SAW) 자동용접을 하였으며, 클래드재 부분은 피복아크용접(shield metal arc welding, SMAW)으로 하였다. 압력용기 시공할 때 현장 용접을 모사하여, 다층 용접, 층간온도관리, 보수용접, 등 이에 625 °C 열처리 조건에서 유지시간을 달리하여 80 ~ 1280 min 까지 약 2배 간격으로 상승시켜가며 공정 변수로 설정하였다. 용접 공정을 비교 검토하여 현장 용접에서 다층용접 및 보수 용접을 했을 때 나타나는 용접부의 건전성 및 내식성을 검토하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 압연 클래드강

열간 압연 클래드강은 스테인리스 클래드재와 강판을 overlap 시켜서 주위를 용접하고, 이것을 열간 압연하여 클래드재와 모재를 접합하는 방법이다. 일반적으로 2매의 스테인리스강판 사이에 박리 재를 삽입, 그 양측에 탄소강 혹은 합금강을 겹쳐 그 주위를 용접하는 방법이다⁵⁻⁶⁾. 스테인리스강판과 탄소강의 접합성 향상을 위해 계면을 통한 탄소의 이동을 방지하기 위해 클래드재의 접합 표면에는 니켈 도금을 실시한다. 열간 압연 클래드재의 강판 제조방법은 Fig. 1과 같다.

2.2 입계 예민화

Fig. 2는 스테인리스강의 결정립계 또는 입계근방을 따라 선택적으로 진행되는 부식 형태를 나타낸다. 스테인리스강을 약 500 ~ 800 °C 가열하거나 이 온도 범

Fig. 1 Manufacturing process of rolling clad steel

Fig. 2 Sensitization of stainless steel

위를 서냉하면 결정립계에 Cr 탄화물이 석출하게 됨에 따라 입계부식(intergranular corrosion, IGC)이 발생한다. 대표적인 입계부식으로는 오스테나이트 스테인리스강 용접 열영향부에서 주로 발생하는 되는 용접부 부식(weld decay, knife line attack)을 들 수 있다⁷⁻⁸⁾.

3. 실험재료 및 실험방법

3.1 실험재료

본 실험에서 사용한 재료는 hot rolled clad steel plate이며, 규격은 ASME SEC. II PART-A SA-516 GR. 70 SA-240 TP. 316 2010 이다. Table 1과 2에 사용한 모재(base metal)와 SAW, FCAW wire, EM-12K, E309L 및 E316L 용접봉의 화학조성과 기

Table 1 Chemical compositions of alloys used in this study (wt. %)

	C	Si	Mn	P	S
CLAD	0.01	0.56	0.81	0.021	0.001
Base	0.20	0.25	1.14	0.013	0.004
EM-12K	0.08	0.19	1.05	0.012	0.007
E309LMo	0.03	0.76	1.78	-	-
E316L	0.03	0.72	1.08	-	-
	Cu	Mo	Al	Ni	Cr
CLAD	0.218	0	0	12.1	17.5
Base	0(1)	1	0.025	-	-
EM-12K	0.08	-	-	-	-
E309L	-	2.4	-	13.1	23.2
E316L	-	2.3	-	12.5	18.4

Table 2 Mechanical properties of specimen

	T.S (MPa)	Y.P (MPa)	El (%)	S.S (MPa)	HB
Base Metal	520	321	32	370	148
EM-12K	569	489	29	-	-
E309L	590	-	41	-	-
E316L	540	-	43	-	-

계적 성질에 대한 결과 값을 각각 나타내었다.

3.2 클래드강 용접순서

Fig. 3은 클래드강의 용접 순서를 나타낸 것으로 모재를 용접한 후 클래드재 측을 용접한다. 첫 번째 층은 모재에 의한 희석을 고려하여 클래드재 보다 합금 성분의 함량이 높은 재료(E309L)를 사용 한다⁹⁻¹⁰⁾. 두 번째 층부터는 클래드재에 상응하는 용접재료(E316L)를 사용하였다. Fig. 4는 맞대기 용접공정 후 SAW/FCAW 맞대기 시험편을 나타낸 것이다.

3.3 열처리공정

열간압연 클래드강 두께 32 mm를 V 홈 가공한 후 150 × 500 × 32 mm 크기로 맞대기 용접을 하였다. 용접 후 100 × 300 × 32 mm로 기계 절단하였다. 열처리는 ASME Code Sec. VIII Div.1 (UCS-56요구 사항) 규격에 의거 클래드강의 맞대기 용접부 총 두께가 되어야 한다. 열처리 온도는 625℃에서 유지시간을 80, 160, 320, 640, 1280 min으로 하여 용접부의 건전성을 평가했다. 본 실험의 열처리는 다음과 같은 조건으로 하였다¹¹⁻¹²⁾.

- (1) 가열시간(가열온도) : $R = 220 \times 25/t (^{\circ}\text{C}/\text{h})$
 - (2) 냉각시간 : $R = 275 \times 25/t (^{\circ}\text{C}/\text{h})$
 - (3) 유지시간 : $H = 25/t \times 60 (\text{min})$
- (R : 온도차, H : 시간, t : 용접부 두께 (mm))

Classification	Outside groove	Inside groove
Grooves without cutback		
Grooves with cutback		

Fig. 3 Welding sequence of clad steel

Fig. 4 (a) SAW weld shape, (b) FCAW weld shape

Fig. 5 Heating treatment curves

3.4 기계적 성질 및 조직관찰

열처리 유지시간에 따른 클래드강 맞대기 용접부의 기계적 성질 및 조직을 관찰 하였다. 클래드재와 모재(A516)부분 구분 절단 가공하였다. 모재 부분은 강도와 경도 값을 측정하였으며, 사용된 시험장비는 만능재료 시험기, 미소 경도기를 사용하였다. 클래드재의 용접부 조직 관찰은 전자 현미경을 사용하였으며, 용접부 응고 형상 및 압연방향, 불순물, 편석 등을 관찰하고자 매크로 조직 시험을 하였다.

3.5 실험장치

Fig. 6은 전기 화학적 재활성화법(electrode chemical potentiokinetic reactivation, EPR) 실험 장치이다. 시험편은 상용 STS 316L 클래드재를 절단 가공하여 제조하였다. EPR 시험은 0.5 M H_2SO_4 + 0.01M KSCN의 수용액을 전해질로 하여, 백금 전극을 대극으로, 포화감홍전극을 기준전극으로 한 3극 셀 내에서 이루어졌다¹³⁻¹⁴⁾. double loop EPR 시험에서는 용액에 침지된 시료의 분극 전위를 측정 후 300 mV(vs. SCE)까지 6V/hr의 속도로 양 분극(anodic scan) 시킨 후 부식 전위(e_{corr})까지 동일한 속도로 역 분극(reverse scan) 하였다. 옥살산 에칭 시험은 10 wt % 옥살산

Fig. 6 EPR test experiment setup

수용액을 사용하였으며, 1A/cm²의 전류밀도로 90초간 산화전류를 흘려주었다. double loop EPR 시험에 의한 예민화도는 양분극시의 전류 최대치(Ia)에 대한 역분극시의 전류 최대치(Ir)로 표시하였다. 재 활성화율 (degree of sensitization, DOS) = (Ir / Ia) × 100% 값이 얻어졌다. 이 값으로 예민화를 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 내식성 검사

4.1.1 전기화학 부식시험

전기화학 부식시험은 클래드재 용접부의 크롬탄화물의 석출유무를 확인하고자하였다. Table 4 와 5는 열처리 조건에 따른(FCAW/SAW) DOS 값이며, 열처리 유지시간이 길어짐에 따라서 DOS 값이 감소하는 경향을 보였다. Fig. 7 (SAW, FCAW)은 재활성화율에서 Ir(양 분극 최대 전류값), Ia(음 분극 최대 전류 값) 값의 시험 결과이다. 실험 결과에서 Ir : Ia가 5.0 이상이거나, 5.0 에서 0.2 사이일 때, 그리고 0.2 이하의 값이 산출되었을 때 각각 ditch, dual 그리고 step 으로 분류된다¹⁵⁻¹⁶⁾.

4.1.2 옥살산 시험

옥살산 시험은 클래드재 용접부 표면의 입계에 크롬탄화물의 석출 유무를 확인하고자 하였다. Fig. 8는 FCAW / SAW STS 316L 각각의 옥살산 에칭 시험

Table 4 Reactivation current ratio (Ir/Ia) at various test positions(FCAW)

Heat treatment(min)	80	160	320	640
Ir / Ia × 100	2.71E-4/ 0.00519	7.38E-5/ 0.00211	1.24E-6/ 1.69E-4	2.99E-6/ 4.98E-4
DOS(%)	4.821	3.497	0.734	0.600

Table 5 Reactivation current ratio (Ir/Ia) at various test positions (SAW)

Heat treatment	80min	160min
Ir / Ia × 100	Ir=1.97E-5 Ia=0.002265	Ir=3.80E-6 Ia=5.95E-4
DOS(%)	0.87%	0.639%
Heat treatment	640min	1280min
Ir / Ia × 100	Ir=6.31E-5 Ia=0.01188	Ir=5.32E-5 Ia=0.0119
DOS(%)	0.531%	0.447%

(a) SAW¹⁷⁾

(b) FCAW

Fig. 7 Effect of test position on double loop EPR test of weld specimen

결과, 열처리 유지시간을 변수조건으로 하였으나, 크롬탄화물이 석출되지 않은 step 조직으로 확인할 수 있었다.

4.1.3 성분 분석

클래드재 용접부를 가공하여 용접부 표면의 크롬량을 각각 비교 분석하였다. Fig. 9는 EDAX(energy dispersive x-ray spectroscopy) 분석 값이며, 용접전의 클래드재와의 성분비교를 하였다. 이 결과로 예민화 현상을 유발하는 크롬 함량은 모재부, 열영향부, 용접부에서 거의 비슷한 결과로 분석되었다. 이 결과는 크롬탄화물이 석출되지 않았음을 나타내고 있다.

4.2 기계적 성질

4.2.1 인장시험

Fig. 10은 base metal(A516) 인장시험 결과를 나타낸 것으로 FCAW가 SAW보다 인장강도 값이 우수한 결과로 평가되었으며, 이 결과는 열처리 유지시간 320 min까지 점진적으로 증가하였다가 그 이후에서 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 그 이유는 어닐링 효과로 기인된 것으로 사료된다.

Fig. 8 Micrographs after oxalic acid etching test of weld specimen

Fig. 9 EDAX analysis result value

Fig. 10 Tensile strength on holding times

4.2.2 경도시험

열처리 유지 시간에 따른 탄소강 용접부의 경도 변화 추이를 평가하고자 하였다. 본 연구에 사용된 장비는 미소비커스 경도기인 MVK-HVL Akashi (hardness testing machine)으로 측정하였다. Fig. 11은 미소경도 측정 거리는 용접부 중심에서 0.5 mm 간격으로 측정하였으며, Fig. 12는 경도 값을 나타내었다. 용접금속 속에 근접한 조립역에서 경도는 최고값을 나타내고, 멀어짐에 따라서 모재와 거의 같은 경도 값을 얻을 수가 있었다. FCAW가 SAW보다 다소 높은 경도 값으로 확인되었다.

Fig. 11 Position of the hardness testing

(a) SAW¹⁷⁾

(b) FCAW

Fig. 12 Hardness value of welding zone

4.3 조직관찰

4.3.1 SEM

본 실험에 사용한 SEM(scanning electron microscope)으로 동일한 용접재료로 용접 공정을 달리하였다. 열처리 유지시간에 따른 용접부의 조직 및 입계의 탄화물 석출 이상 유무를 관찰하고자 하였다. Fig. 13에서 확인된 용접부 조직은 덴드라이트(dendrite) 상의 구조를 가지면서 망상으로 성장된 모습으로 확인할 수 있었다. 열영향부는 페라이트조직으로 용접 입열에 의한 영향으로 조대한 조직으로 관찰되었다. 또한 탄화물이 석출되지 않았음을 확인하였다.

4.3.2 매크로시험

Fig. 14는 클래드강 맞대기 용접 공정에 따른 용접부 응고 조직을 관찰하고자 매크로 조직시험을 하였다. 열처리 유지시간 및 용접 입열에 따른 FCAW/SAW 용접부 관찰 결과는, 클래드재와 탄소강, HAZ, 용접금속 부분이 뚜렷하게 구분되었으며, 용접부는 전형적인 주조 조직으로 확인할 수 있었다.

Fig. 13 SEM image **Fig. 14** Macro test of weld specimen (min)

5. 결 론

본 연구에서는 열간 압연한 클래드강을 FCAW/SAW 공정으로, 압력용기 제작 시 다층 및 보수용접을 모사하여 열처리를 행하여 용접성 및 내식성 평가를 수행하였다. 요약된 결론은 다음과 같다.

1) 기계적 성질(인장강도, 경도)은 SAW 보다 FCAW가 우수함을 알 수 있었다.

2) EPR, 옥살산, SEM, EDAX 비교 분석한 결과, 크롬 탄화물 석출되지 않았음을 확인하였다.

3) 용접부 조직은 덴드라이트(dendrite) 상의 조직, 열영향부는 조대한 다각형 페라이트 조직임을 확인할 수 있었다.

4) 최종적으로 본 연구에서의 비교 분석 결과, 다층 용접, 보수, 후열처리는 용접부 건전성 및 내식성에 큰 영향이 없는 것으로 추정된다.

후 기

이 연구 논문은 서울과학기술대학교 교내 학술연구비(일부)지원으로 수행되었습니다.

Reference

1. G. H. Aydogdu and M. K. Aydinol : Determination of Susceptibility to Intergranular Corrosion and Electrochemical Reactivation Behaviour of AISI 316L Type Stainless Steel Original Research Article, Corrosion Science, **48-11** (2006), 3565-3583
2. Practice for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenite Stainless Steels. ASTM A 262-(93a), American Society for Materials, Philadelphia, USA, (1994)
3. C. E. Park, C. S. Li and I. S. Kim : Mathematical Models for Optimal Bead Geometry for GMA Welding Process, International Journal of Korea Welding Society, **3-1** (2003), 8
4. J. S. Lee and W. H. : Hot Cracking in Austenitic Stainless steel Welds, Journal of KWS, **17-5** (1999) 10 (in Korean)
5. F. Matsuda, S. Katayama and Y. Arata : Solidification Crack Susceptibility in Weld Metals of Fully Austenitic

- Stainless Steels(Report IX), Trans. of JWRI, **12-2** (1983), 87-92
6. B. P. Pearce and H. W. Kerr : Grain Refinement in Magnetically Stirred GTA Welds of Aluminum alloys, Metall. Trans. B 12B (1981), 479
7. C. J. Long and W. T. Delong : The Ferrite Content of Austenitic Stainless Steel Weld Metal, Welding Journal, **52-7** (1973), 281s-297s
8. V. P. Kuyanpaa, S. A. David and C. L. White : Formation of Hot Cracks in Austenitic Stainless Steel Welds-Solidification Cracking, Welding Journal, **65-8**(1986), 203s-212s
9. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications, ASTM, 01. 03, (2002)
10. M. G. Mousavi et al : Grain Refinement Due to Grain Detachment in Electromagnetically Stirred AA7020 Welds, Sci. Technol. Weld. Joining. Corrosion, **40-8** (2003), 309
11. S. T. Kim and S. I. Kwun : Fabrication of Stainless Clad Steel by Hot Rolling, Journal of KWS, **8-2** (1990) 70. (in Korean)
12. J. W. Park and J. H. Lee : A Study on the Mechanical Properties of Butt Welding Zone of Clad Steel According to the Process Design, KSME, **21-4** (2012), 523-690 (in Korean)
13. V. Cihal, T. Shoji, V. Kain, Y. Watanabe and R. Stefec : EPR - A Comprehensive Review, FRRI Publication, Graduate School of Engineering, Tohoku University Sendai, Japan. (2004) (in Japanese)
14. Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels, ASTM, 01. 03 (2002)
15. H. S. Jeong, Y. Y. Lee and D. S. Bae : The Effect of Alloying Elements on Weld ability and Corrosion Resistance of Austenitic Stainless Steels(I), Journal of KWJS, **30-3** (2012), 255-263 (in Korean)
16. J. S. Lee and S. H. Kim : A Study of Weld Fusion Zone Phenomena in Austenitic Stainless Steel(2), Journal of KWS, **8-2** (1990) 59. (in Korean)
17. C. H. Lee : Effect of Minor Element on Hot Cracking Susceptibility of Austenitic Stainless Steel Welds, Metals and Materials, **2-2** (1996), 81-91 (in Korean)
18. J. W. Park and C. K. Lee : The Sensitization and Intergranular Corrosion Behavior of AISI 316L Clad Steel with Butt Welding, Journal of KWJS, **31-2** (2013), 133-140 (in Korean)