용접 공정 디자인에 따른 클래드강의 기계적 성질 변화

이정현^a, 박재원^{b*}

Change of Mechanical Properties of Clad Steel According to the Welding Process Design

Jung-Hyun Lee^a, Jaw-Won Park^{b*}^a Vovocars, Sweden^b School of Nano IT Fusion Program, Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	16	April	2013
Revised	20	May	2013
Accepted	30	May	2013

Keywords:

Hot-rolling
Inter-granular corrosion cracking
SAW/FCAW
Clad steel

ABSTRACT

In this study, we investigated the traits of the clad metals used in hot-rolled clad steel plates. We examined the sensitization and mechanical properties of STS 316 steel plate and carbon steel (A516) under the specific circumstances of post heat treatment and whether a weld was multilayered and thick or repeated because of repairs. The test conditions were as follows. The clad steel plates were butt-welded using FCAW/SAW, and the heat treatment was conducted at 625 °C, for 80, 160, 320, 640, or 1280 min. The change in the corrosion resistance was evaluated in these specimens. In the case of the carbon steel (A516), as the heat treatment time increased, the annealing effect caused the tensile strength to decrease. The micro- hardness gradually increased and then decreased after 640 min. The elongation and contraction of the area increased gradually. An oxalic acid etch test and EPR test on STS316, a clad metal, showed a STEP structure and no sensitization. From the test results for the multi-layered and repair welds, it could be concluded that there is no effect on the corrosion resistance of clad metals. In summary, the purpose of this study was to suggest some considerations when developing on-site techniques and evaluate the sensitization of stainless steels.

1. 서론

최근 클래드강은 석유정제, 석유화학 플랜트를 비롯한, 선박, 토목, 농업 등 각 산업의 폭 넓은 분야에 사용되고 있을 뿐만 아니라 전자부품, 난방용품, 장식용 등의 제품에도 많이 사용되고 있는 매우 전망 있는 재료로 알려져 있다. 클래드는 복합 재료의 일종으로

“어떤 금속을 다른 금속 조직적으로 접하고 있는 것”으로 정의되어 있으며 도금과 라이닝은 제외되고 있다. 피복하고 있는 금속을 클래드재, 피복되는 금속을 모재라고 부르고, 탄소강을 모재로 한 클래드를 클래드강(clad steel)이라고 한다¹⁻²⁾.

본 연구에 사용된 클래드강은 압연 클래드강으로서, 클래드재는 STS 316이며 모재는 탄소강(ASTM A516)을 사용하였다. 스테

* Corresponding author. Tel.: +82-2-714-9703

Fax: +82-2-714-2160

E-mail address: weldingtig@naver.com (Jae-Won Park).

인리스강은 여러 환경에서 내식성을 보이는 재료로 널리 알려져 있다.

이러한 내식성은 생산 공정 중의 열처리나 용접시의 가열에 의하여 급격히 감소될 수 있다. 특히 결정립계에서 나타나는 이러한 내식성 저하를 예민화라 부른다^[3-4]. 용접공정은 서브머지드 아크용접(submerged arc welding, SAW), 플럭스코드아크용접(flux cored arc welding, FCAW)으로 맞대기 용접하여 비교 검토하였다. 현장 용접을 모사하여, 다층 용접, 보수용접, 응력제거처리의 순으로 실험을 진행하였고, 이때 열처리 온도 625℃ 조건에서 80, 160, 320, 640, 1,280 min 으로 유지시간을 달리하여 열처리하였다. 예민화도를 측정하는 방법은 이제까지 여러 가지 방식이 제안되어왔다. 이들 중 옥살산시험법(oxalic acid etch)과 전기화학적 분극법(electrochemical potentiokinetic reactivation, EPR test)을 사용하였으며, 용접 공정을 비교 검토하여 현장에서 용접 후 보수 용접을 했을 때 나타나는 기계적 성질 및 예민화도를 비교, 평가 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 압연클래드강의 제조방법

스테인리스 강판 등의 클래드재와 강재를 overlap 시켜서 주위

Fig. 1 Manufacturing process of rolling clad steel

Fig. 2 Sensitization of stainless steel

를 용접하고, 이것을 열간 압연하여 클래드재와 모재를 접합하는 방법이다. Fig. 1에 나타난 바와 같이, 일반적으로 2매의 스테인리스강(클래드재)의 사이에 박리재를 놓고, 그 양측에 탄소강 혹은 합금강을 겹쳐 그 주위를 용접하는 방법이다. 스테인리스강과 탄소강의 피접합면은 연마에 의해 녹 등을 제거하지만, 접합성의 향상과 계면을 통한 탄소의 이동을 방지하기 위해 클래드재의 접합표면에는 니켈 도금을 실시한다. 또 접합성의 향상을 위해 용접에 의해 밀봉된 내부는 감압된다. 접합은 고상에서 행해지기 때문에 온도, 압력, 압연비 등이 접합성에 크게 영향을 미치지만, 동시에 모재 및 클래드재의 성질에도 문제가 된다^[5-6]. 최근에는 가공열처리 기술을 적용하여 제조된 것도 있다. 클래드재로서 스테인리스강, 동합금, 니켈합금이 많지만, 최근에는 티탄 클래드강도 제조되고 있다. 이 방법의 특징은 폭이 넓고, 길이가 긴 것의 제조가 가능하다. 본 연구에 사용된 열간 압연 클래드 강판 제조방법을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 입계예민화

Fig. 2는 300계열의 오스테나이트계 스테인리스강을 500~800℃ 정도의 범위에서 가공하거나, 이온도 범위에서 장시간 유지할 경우에 발생한다. 이온도 범위에서 스테인리스강의 내식 특성을 좌우하게 되는 Cr이 탄화물 형태로 입계에 석출하게 된다. 이와 같이 500~800℃의 온도 범위에서 Cr의 확산속도가 커서 입계에 안정화된 탄화물 형태로 석출하는 현상을 오스테나이트계 스테인리스강의 예민화(Sensitization)라고 한다^[7-8].

2.3 입계부식시험법

용접 후 발생하는 예민화는 오스테나이트 스테인리스강의 입계부식(Inter-granular corrosion cracking, IGCC)의 가장 흔한 원인 중 하나이다. 이 예민화는 ASTM A262A에 따라서 연구되었다. 그러나 최근에 예민화를 검사하는 새로운 방법인 EPR test가 향상되어 왔다. 이 방법은 ASTM 방법보다 예민화의 낮은 정도를 감지할 수 있다. 입계부식 실험방법은 다음과 같다. 10% H₂C₂O₄ (ASTM A262A), streicher test(ASTM A262B), huey test(ASTM A262C, strausss test(ASTM A262E), 전기화학적 시험(EPR test) 등이 있다.

본 연구에서는 전기화학적 시험방법을 선정하였으며, 30℃의 0.5 M H₂SO₄ + 0.01 M KSCN용액에서 시편을 부동태영역(passive region)에서 활성영역(active region)으로 역분극시키면 예민화된 재료는 재활성화되지만 예민화되지 않은 재료는 거의 재활성화되지 않는다. KSCN 대신에 CH₃CN₂H₂를 사용하는 것이 시도되고 있다. EPR 방법에는 single loop EPR법, double loop EPR 방법과 reactivation ratio EPR 방법 등이 있다^[9-11]. 본 연구에서는

double loop EPR 방법을 사용하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 용접재료

본 실험에서 사용한 재료는 hot rolled clad steel plate이며, 규격은 ASME SEC. II PART-A SA-516 GR.70 SA-240 TP.316 2010이다. Table 1과 2에 사용한 모재(base metal)와 FCAW, SAW 용접봉 화학조성과 기계적 성질에 대한 결과 값을 각각 나타내었다.

3.2 클래드강 용접순서

Fig. 3은 클래드강의 용접순서를 나타낸 것으로 모재를 용접한 후 클래드재 측을 용접한다. 모재 측의 용접된 부분을 가우징 또는 그라인딩 하여 제거 후 가공하여 클래드재의 용접봉으로 용접을 실시한다. 이때 첫 번째 층은 모재에 의한 희석을 고려하여 클래드재보다 합금성분의 함량이 높은 재료를 이용한다. 두 번째 층부터는 클래드재에 상응하는 용접재료를 사용한다. 스테인리스 클래드강판의 경우, 용접부의 화학 성분이 셰플러 다이어그램(shaeffler diagram)에서 고온 및 저온 균열이 발생하지 않는 영역에 위치할 수 있도록 용접재료를 선정하는 것이 매우 중요하다^[12].

3.3 열처리과정

ASME Code Sec. VIII Div.1(용접후열처리 UCS-56요구사항) 규격에 의거 두께는 모재의 총 두께가 되어야 한다. 모재의 두께가 용접 후 열처리를 요하는 경우 용접 후 열처리를 하였다. 본 실험의 열처리는 다음과 같은 조건으로 하였다.

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

	C	Si	Mn	P	S
Clad	0.01	0.56	0.81 (0.03)	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-16	0.03	0.76	1.78	-	-
E316L-16	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	-	-	-	-
E309LMo-16	-	2.4	-	13.1	23.2
E316L-16	-	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	29.0	-	-
E309LMo-16	590	-	41	-	-
E316L-16	540	-	43	-	-

Fig. 3 Welding sequence of clad steel

(1) 가열시간(장입온도) : $R = 220 * 25/t (^{\circ}\text{C}/\text{h})$

(2) 냉각시간 : $R = 275 * 25/t (^{\circ}\text{C}/\text{h})$

(3) 유지시간 : $H = 25/t * 60\text{분}$

R : 온도차, H : 시간, t : 용접부 두께(mm)

본 실험에서는 용접방법 및 보수용접을 모사하여 후열처리정도에 따른 예민화 변화 거동을 살펴보고자 하였다. 클래드강판 두께 32 mm를 V 홈 가공한 후, $32 \times 150 \times 500$, 2장을 맞대기 용접 후 100×300 으로 기계 절단하였다. 열처리는 전기로(대성전기, DS-SIF-BO-700)를 사용하였다. 어닐링 온도 625°C 에서 유지시간을 조건으로 열처리하였다. Fig. 4는 열처리 유지시간 및 열처리 공정을 나타낸 것이며, Table 3은 열처리 조건을 나타낸 것이다.

3.4 실험장치

Fig. 5와 같은 형태의 이동형 셀(portable cell)을 사용하였다. 장비는 Princeton Applied Research사의 PARSTAT 4,000을 사용하였다. 시편은 상용 STS 316 클래드재를 절단 가공하여 제조하였다. FCAW, SAW으로 32 mm 두께의 판재를 용접하여 제작하였다. EPR 시험은 $0.5 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0.01 \text{ M KSCN}$ 의 수용액을 전해질로 하여, 백금 전극을 대극으로, 포화감홍전극을 기준전극으로

로 한 3극 셀 내에서 이루어졌다. double loop EPR 시험에서는 용액에 침지된 시료의 분극 전위를 측정한 후 300 mV(vs. SCE) 까지 6 V/hr의 속도로 양분극(anodic scan) 시킨 후 e_{corr} 까지 등

Fig. 4 Heating treatment curves

Table 3 Heat treatment process

Segment	Temp. (°C)	Process
A~B	300	heating input
B~C	300~625	heating rate
C~D, D1, D2, D3, D4	625	holding time
D, D1, D2, D3, D4~E, E1, E2, E3, E4	625~400	cooling rate
E, E1, E2, E3, E4~F, F1, F2, F3, F4	400~0	cooling time

Fig. 5 Schematic diagram of portable cell for on-site application

(a) step structure

(b) dual structure

(c) dual structure

(d) ditch structure

Fig. 6 Micrographs after oxalic acid etching test of weld specimens

일한 속도로 역분극(reverse scan) 하였다. 시험 면적은 표면 처리된 표면에 유기 코팅을 칠하여 원하는 위치에서의 면적만으로 평가될 수 있도록 하였으며 유기 코팅 위에 에폭시 접착제를 사용하여 이동형 셀을 접착시켰다. 옥살산 에칭 시험은 10wt% 옥살산 수용액을 사용하였으며, 1 A/cm²의 전류밀도로 90초간 산화전류를 흘려주었다. double loop EPR 시험에 의한 예민화도는 양분극시의 전류 최대치(Ia)에 대한 역분극 시의 전류 최대치(Ir)로 표시하였다. 재활성화율(DOS)은 $(Ir / Ia) \times 100\%$ 값이 얻어진다^[13-14].

3.5 Ditch test

Fig. 6은 ASTM A262A practice 의거, 옥살산 에칭 후 광학현미경으로 관찰된 입계부식 시험한 스테인리스강의 입계부식 정도의 예를 나타낸 것으로 ditch 시험에서는 에칭 후 광학현미경으로 조사된 입계부식의 정도를 ASTM A262-(93a)에 규정된 분류기준에 따라 step, dual, ditch의 3단계로 분류된다^[15-16].

4. 실험결과 및 고찰

4.1 EPR test

Table 4와 Table 5는 열처리 조건에 따른 DOS 값이며, Fig. 7은 EPR test 결과로 열처리 유지시간이 길어짐에 따라서 DOS 값이 감소하는 경향을 보였다. Fig. 8(SAW, FCAW)은 재활성화율에서 Ir(양 분극 최대 전류 값), Ia(음 분극 최대 전류 값) 값의 시험 결과이다. 실험 결과에서 Ir : Ia가 5.0 이상이거나, 5.0에서 0.2사이일 때, 그리고 0.2 이하의 값이 산출되었을 때 각각 ditch, dual 그리고 step으로 분류된다.

Table 4 Reactivation current ratio (I_r/I_a) at various test positions (FCAW)

Heat treatment (min)	80	160	320	640
$I_r / I_a \times 100$	2.71E-4/ 0.00519	7.38E-5/ 0.00211	1.24E-6/ 1.69E-4	2.99E-6/ 4.98E-4
DOS (%)	5.221	3.497	0.734	0.600

Table 5 Reactivation current ratio (I_r/I_a) at various test positions (SAW)

Heat treatment (min)	80	160	320	640
$I_r / I_a \times 100$	1.97E-5/ 0.002265	3.80E-6/ 5.95E-4	6.31E-5/ 0.01188	5.32E-5/ 0.0119
DOS (%)	0.87	0.639	0.531	0.447

(a) SAW

(b) FCAW

Fig. 7 Experiment of heat treatment time DL-EPR

(a) SAW

(b) FCAW

Fig. 8 Effect of test position on double loop EPR test of weld specimen

4.2 STS 316 옥살산 조직

Fig. 9와 Fig. 10은 FCAW, SAW STS 316 각각의 옥살산 에칭 시험 결과로서 조직은, 모재부 ferrite structure, 열영향부(heat affected zone, HAZ) 조직은 용접 입열에 의한 결정립 성장으로 조대화 조직, 용접부는 dendrite structure로 관찰되었다. FCAW가 SAW보다 입열량이 낮은 결과로 기계적 성질이 우수하게 나타났다. HAZ 조직 관찰 결과는 열처리 유지시간 80, 160, 320, 640, 1,280 min 변수로 하였으나, 크롬 탄화물이 석출되지 않은 step 조직으로 관찰되었다.

4.3 인장시험

Fig. 11은 base metal(A516) 인장시험 결과를 나타낸 것으로 FCAW가 SAW보다 인장강도 값이 우수한 결과로 평가되었으며, 이 결과는 열처리 유지시간 320 min까지 점진적으로 증가하였다가 그 이후에서는 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 그 이유는 입열량 증가로 결정립의 조대화와 어닐링 효과로 기인된 것으로 사료된다.

Fig. 9 Micrographs after oxalic acid etching test of weld specimen (FCAW)

Fig. 10 Micrographs after oxalic acid etching test of weld specimen (SAW)

4.4 FCAW / SAW 경도시험

용접부 경도 측정에 사용된 장비는 미소비커스 경도기인 MVK-HVL Akashi(hardness testing machine)으로 측정하였다. Fig. 12는 미소경도 측정 거리는 용접부 중심에서 0.5 mm 간격으로 측정하였다. Fig. 13은 경도 값을 나타낸 것으로 용접금속에 근접한 조립역에서 경도는 최고값을 나타내고, 멀어짐에 따라서 점점 모재의 값에 가까워진다. 용융선 부근에서 최고 경도 값을 얻었다. FCAW가 SAW보다 다소 높은 경도 값으로 측정되었다. 저탄소강에서는 냉각속도가 상당히 빨라도 martensite의 생성량이 감소한다^[17-18]. 용접 후 어닐링 효과로 경도값이 감소됨을 알 수 있다.

(a) SAW

(b) FCAW

Fig. 11 Tensile strength on holding times

Fig. 12 Position of the hardness testing

4.5 SEM image

본 실험에 사용한 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)장비의 사양은 분해능 3.0 nm(high vacuum modeat 25 kV) 14.0 nm(VP modeat 25 kV), 가속전압(0.3~30 kV), 배율 ($\times 5 \sim \times 300,000$), 최대 시료크기(150 mm dia), frame live image upgrade(1,024 × 968 pixel) 사용하였다. Fig. 14에서 클래드강 용접부 예민화를 관찰하였으나 크롬 탄화물 석출되지는 않았다.

(a) SAW

(b) FCAW

Fig. 13 Hardness value of welding zone

(a) FCAW (WM)

(a) FCAW (HAZ)

(b) SAW (WM)

(b) SAW (HAZ)

Fig. 14 SEM image

Fig. 15 Macro test of weld specimen (min)

4.6 FCAW / SAW 매크로 조직시험

Fig. 15는 FCAW와 SAW 용접부 매크로 조직시험 결과로 용접 입열 및 열처리 유지 시간 변수에 따른 다층 용접 부 조직을 관찰하기 위해 macro test를 실시하였다. 용접부 조직은 클래드재와 탄소강 부분, HAZ, 용접금속 부분이 뚜렷하게 관찰되어 구분되었으며, 전형적인 dendrite 조직으로 평되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 클래드강의 용접공정을 FCAW와 SAW 맞대기 용접으로 디자인하여, 용접에 적용하였을 때 용접부 건전성을 평가한 결과는 다음과 같다.

- (1) 클래드 재인 STS 316 L은 Oxalic acid etch test와 EPR test 상호 비교한 결과, 크롬 탄화물이 석출되지 않은 Step 조직으로 평가되었다
- (2) 기계적 성질은 SAW 보다 FCAW가 우수한 결과로 평가 되었다.
- (3) 용접부 조직은 FCAW 보다 SAW 열 영향부 높은 입열량으로 인해 조대화 되었다. 이 결과는 기계적 성질에 영향을 준 것으로 평가된다.

References

- [1] Pearce, B. P., Kerr, H. W., 1981, Grain refinement in magnetically stirred GTA welds of aluminum alloys, Metallurgical Transactions B, 12:3 479-486.
- [2] Mousavi, M. G., Hermans, M. J. M, Richardson, I. M., Ouden, G., 2003, Grain refinement due to grain detachment in electro-magnetically stirred AA7020 welds, Sci. Technol. weld. Joining

- 8:4 309-321.
- [3] Streicher, M. A., 1978, Theory and Application of Evaluation tests for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Stainless Steels and Related Alloys Problems and Opportunities Intergranular Corrosion of Stainless Alloys, ASTM STP 656, R. F. Steigerwald ed., ASTM, 3-84.
- [4] Streicher, M. A., 1958, Intergranular Corrosion Resistance of Austenitic Stainless Steels: A Ferric Sulfate-Sulfuric Acid Test, ASTM Bulletin, 229 77-86.
- [5] Lee, H. I., Kim, B. J., Han, B. K., 2002, Energy Absorption Characteristics and Optimal Welding Space of Square Hat Type Thin-walled Tube, Transaction of KSME, 26 2703-2714.
- [6] L.R., Eisenbrown, C.M., 1963, An Evaluation of Accelerated Strauss Testing, ASTM STP 369, ASTM, 235-239.
- [7] Liljas, M., 1994, Proceedings of the Fourths International Conference on Duplex Stainless Steels, Glasgow, Scotland, Keynote Paper V, 2 13-16.
- [8] Park, C. E., Li, C. S., Kim, I. S., 2003, Mathematical Models for Optimal Bead Geometry for GMA Welding Process, International Journal of Korea Welding Society 3:1 8-16.
- [9] Matsuda, F., et al., 1980, Effect of electromagnetic stirring on weld solidification structure of aluminum alloys, Proceedings of the Arc Physics and Weld Pool Behavior, 337-347.
- [10] Pearce, B. P., Kerr, H. W., 1981, Grain refinement in magnetically stirred GTA welds of aluminum alloys, Metall. Trans. B, 12:3 479-486.
- [11] Majidi, A. P., Streicher, M. A., 1984, The double loop reactivation method for detecting sensitization in AISI 304 stainless steels Corrosion, J. Corros. Sci. of Korea, 40:11 584.
- [12] Aydoggdu, G. H., Aydinol, M.K., 2006, Determination of susceptibility to intergranular corrosion and electrochemical reactivation behaviour of AISI 316L type stainless steel, Corrosion Science, 48:11 3565-3583.
- [13] Interante, C. G., 1982, Basic Aspects of the Problems of Hydrogen in steel, ASM, 3-16.
- [14] Clarke, W. L., Carlson, D. C., 1980, Nondestructive Measurement of sensitization of Stainless steel: Relation to high Temperature Stress Corrosion Behavior, Materials Performance, March, 16-23.
- [15] Yoo, Y. T., Shin, H. J., Jang, W. T., 2004, Surface heat treatment of Die material by means of CW Nd:YAG Laser, Transaction of KSMTE, 13:5 67-74.
- [16] Cha, C. S., Kang, J. Y., Kim, Y. N., Kim, J. H., Kim, S. G., Yang, I. Y., KIM, J. H., 2001, Collapse Characteristics on Width Ratio and Flange Spot-Weld Pitch for Hat-Shaped Members, Transaction of KSME, 5 98-105.
- [17] Park, J. W., Lee, J. H., 2012, A Study on the Mechanical Properties of Butt Welding Zone of Clad Steel According to the Process Design, KSMTE, 21:4 523-690.
- [18] Park, J. W., Lee, C. K., 2012, Comparison on Mechanical Properties and Sensitization of Clad Steel Weld Zone with FCAW, IJPEM, 13:12 2209-2214.