304 스테인리스강 용접 열영향부의 입계 부식에 미치는 탄소함량의 영향

오은종^{*,†} · 이재형^{*} · 조성우^{*} · 이원근^{**} · 남기우^{***}

^{*}두산중공업 원자력사업부

^{**}두산중공업 기술연구원

^{***}부경대학교 재료공학과

Effect of Carbon Content on Intergranular Corrosion of Welding Heat Affected Zone in 304 Stainless Steel

Eun-Jong Oh^{*,†}, Jae-Hyung Lee^{*}, Sung-Woo Cho^{*}, Won-Geun Yi^{**} and Ki-Woo Nam^{***}

^{*}Nuclear Business Group, Doosan Heavy Industries & Construction Co. Ltd., Changwon, 51711, Korea

^{**}Corporate R&D Institute, Doosan Heavy Industries & Construction Co. Ltd., Changwon, 51711, Korea

^{***}Depart. of Materials Science & Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

[†]Corresponding author : eunjong.oh@doosan.com

(Received October 29, 2018 ; Revised November 26, 2018 ; Accepted June 17, 2019)

Abstract

304 stainless steels with carbon contents of 0.074wt%C and 0.064wt%C were tested to investigate the effect of carbon content on intergranular corrosion in the heat affected zone. Stainless steels with two types of carbon content were subjected to various tests to identify characteristics such as nondestructive properties, mechanical properties, chemical composition, delta ferrite content, and structural observation. In the ASTM A262 test for detecting the intergranular attack associated with chromium carbide precipitates, 304 stainless steel with a carbon content of 0.064wt%C was found to be resistant to intergranular corrosion, but 304 stainless steel with a high carbon content of 0.074wt%C was found to have intergranular corrosion in the heat affected zone 2 to 3 mm away from the fusion line. Using temperature distribution analysis it was confirmed that the 2 to 3 mm point at the fusion line persists for approximately 3 to 6 seconds at the sensitivity temperature range of 650~870°C. This result confirmed the corrosion test results of the 304 stainless steel with a high carbon content of 0.074wt%C. Therefore, the carbon content of stainless steel to be employed industrial field welding needs to be limited to a maximum 0.065wt%C in order to ensure the corrosion resistance of 304 series stainless steel in a corrosive environment.

Key Words : Stainless steel, Carbon content, Intergranular corrosion, Heat affected zone

1. 서 론

통상 오스테나이트계 스테인리스강(Austenitic stainless steel)은 강도, 인성 및 연성의 높은 재질 특성으로 인해 내식성은 물론 피가공성, 용접성에 있어서 우수하며, 이 계의 합금은 성질 및 용도에서 많은 계량형이 개발되어 수십 종에 달하고 있다. 원자력 산업계에서 사용되는 스테인리스강의 90% 이상이 오스테나이트계

인데, 이는 높은 경제성과 우수한 용접성에 기인한다. 그러나 스테인리스강 용접에 따른 입계 부식(Intergranular corrosion)의 문제가 산업 현장에서 지속적으로 발생하고 있어 다양한 용접 조건에 대응할 수 있는 체계적인 연구의 필요성이 대두되고 있다.

원자력 발전용 기기는 고온 및 고압의 가동 중 부식 환경에 노출되어 장시간 사용되는 측면을 고려할 때, 주요 부품 소재인 304 스테인리스강 용접부의 입계 부식 방지를 위한 목적으로 원자력 규제 요건인 예비안전

성분분석보고서(Preliminary Safety Analysis Report)에서는 최대 모재 탄소함량 0.065wt.%C 및 최대 용접 입열 23.6kJ/cm으로 제한하고 있으나, 산업 현장에서 활용할 수 있는 실질적인 자료는 매우 부족한 실정이다.

304 스테인리스강은 용접입열에 의해 예민화(Sensitization) 온도 구간에 가열된 열영향부(Heat affected zone, HAZ)에서 결정립계에 크롬(Cr) 탄화물이 석출하여 입계 근처에서 내식성에 효과적인 크롬의 함량이 기지보다 낮은 크롬 결핍(Chrome Depletion)이 나타나 예민화 현상(Sensitization phenomena)이 발생하여 이 부위에서 선택적으로 부식되는 문제점을 가지고 있다.

이에 따라, 원자력 규제 요건보다 높은 탄소함량을 가진 304 스테인리스강 및 원자력 규제 요건과 유사한 탄소함량을 가진 304 스테인리스강에 원자력 규제 요건을 초과하는 용접입열량으로 용접을 한 후, 비파괴 특성, 기계적 성질, 화학 조성, 조직 관찰 및 입계 부식 현상을 시험을 통하여 조사하고, 용접 열영향부에서 관찰된 부식 특성을 온도 분포 해석을 통해 예민화 경향을 분석함으로써, 실제 현장에서 이루어지는 용접에 대해 원자력 규제 요건을 실증 실험을 통해 입증하는 계기가 되고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시료 및 용접변수

원자력 산업계의 최대 탄소함량 규제 요건인 0.065 wt.%C보다 높은 탄소함량을 가진 0.074 wt.%C의 ASTM A182 F304H 및 유사한 탄소함량을 가진 0.064wt.%C의 ASTM A240 TP304 시편을 실험에 적용하였으며, 원자력 규제 요건인 최대 23.6kJ/cm보다 높은 용접입열량으로 더 엄격한 조건에서 용접을 하여 입계 부식에 미치는 영향을 실험을 하였다. 시편의 화학 성분 및 기계적 물성치는 Table 1 및 Table 2에 나타내었다.

10mm 및 40mm 두께의 시편을 각각 준비하여 23.6kJ/cm보다 높은 용접입열량이 얇은 두께와 두꺼

Table 1 Chemical compositions(wt.%) of test coupons

Type	Comp.	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	N
A182 F304H	Req'd	0.04~0.10	Max. 2.00	Max. 0.045	Max. 0.030	Max. 1.00	8.0~11.0	18.0~20.0	-
	Act'l	0.074	1.405	0.031	0.013	0.455	8.44	18.53	-
A240 TP304	Req'd	Max. 0.07	Max. 2.00	Max. 0.045	Max. 0.030	Max. 0.75	8.0~10.5	17.5~19.5	Max. 0.10
	Act'l	0.064	1.03	0.023	0.003	0.43	8.56	18.71	0.04

Table 2 Tensile properties of test coupons

Type	Property	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
A182 F304H	Req'd	Min. 515	Min. 205	Min. 30
	Act'l	608.1	319.2	61.1
A240 TP304	Req'd	Min. 515	Min. 205	Min. 40
	Act'l	639.6	292.4	58.8

Fig. 1 Dimension and groove feature of test coupons

운 두께에 미치는 영향을 검토하고, 산업 현장에서 널리 적용되고 있는 한 쪽면 개섐 각도 30°의 Single V Groove 형상을 가진 시편을 폭 150mm 및 길이 400mm로 준비하였으며, 시편의 치수 및 개섐 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

용가재는 ASME Section II Part C SFA-5.22 규격의 E308LT1-1(8.3~8.5FN, Ø1.2mm)를 적용하였으며, 화학 성분 및 기계적 물성치는 Table 3 및 Table 4에 나타내었다.

용접변수는 아래보기자세, 최소 예열온도 16℃, 최대 패스간 온도 175℃ 및 차폐가스 CO₂의 조건에서 오스테나이트 스테인리스강의 대표적인 반자동 방법인 플릭스 코어드 아크 용접(FCAW)을 적용하였으며, 상세한 용접기록은 Table 5에 나타내었다.

Table 3 Chemical compositions(wt.%) of E308LT1-1

Comp.	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
Req'd	Max. 0.04	18.0~21.0	9.0~11.0	Max. 0.75	0.5~2.5	Max. 1.0	Max. 0.04	Max. 0.03	Max. 0.5
Act'l	0.018	19.8	9.8	0.02	1.65	0.65	0.016	0.011	0.02

Table 4 Tensile properties of E308LT1-1

Property	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
Req'd	Min. 520	-	Min. 35
Act'l	558.4	386.1	46

Table 5 Welding records for test coupons

Coupon No.	Thickness (mm)	Total passes	Welding heat input (kJ/cm)
1	10mm	5	23.9~24.2
2	40mm	22	24.0~24.6
3	10mm	4	23.7~24.4
4	40mm	21	24.1~24.7

2.2 실험 조건

2.2.1 비파괴시험

ASME Section III 및 V의 비파괴시험 코드 요건에 따라 용접 시편에 액체침투탐상시험(PT), 방사선투과시험(RT) 및 초음파탐상시험(UT)을 수행하여 용접부의 결함 여부 및 건전성을 평가하였다.

2.2.2 기계적 성질 시험

ASME Section IX QW-462.2에 따라 각 4개의 굽힘시험편을 가공한 후, 용접부 단면 전체가 굽힘 변형을 받도록 ASME Section IX QW-160에 따라 측면을 180°각도로 꺾는 횡 측면 굽힘 시험을 수행하였다.

ASME Section IX QW-462.1(a)에 따라 각 2개의 인장시험편을 가공한 후, ASME Section IX QW-150에 따라 횡 인장 시험을 수행하였다.

ASTM E384-16 코드에 따라 연마 가공된 시험편에서 용접금속, 열영향부 및 모재 경계를 확인하기 위해 3 μ Diamond paste으로 폴리싱한 후, Chromic acid로 에칭을 하여 경도 시험편을 준비하였다. 모재 표면 1mm 직하를 용접금속 및 모재는 1mm 간격으로 5군데와 열영향부는 0.5mm 간격으로 3군데를 하중 10kgf의 마이크로 비커스 경도기로 경도 분포를 측정하였다.

ASME Section II Part A SA370 Fig. 11(a)의 Charpy V-notch type A에 따라 시편을 가공하여 용접금속 3개, 열영향부 3개 및 모재 3개의 총 9개 시험편으로 충격시험을 수행하였다.

2.2.3 화학성분 분석 및 델타 페라이트 측정

용접 표면을 면삭 및 연마 가공을 한 후, Spectro emission 방법으로 용접금속의 화학성분을 분석하여, ASME Section II Part C SFA-5.22 E308LT1-1 요건과 비교하였다.

Ferrite Gauge를 용접부에 접촉 측정하는 Magnetic measurement 및 용접부의 채취 시료를 성분 분석을 하는 Chemical analysis를 수행하여 델타 페라이트(δ -Ferrite)를 측정하였다.

Magnetic measurement에 따른 Ferrite Gauge의

측정 위치는 ASME Section III 요건에 따라 Ferrite number(FN)를 6개소의 위치에 매 개소마다 6번을 측정하여 평균값을 확인하였다.

Chemical analysis 방법은 용접금속의 화학성분 분석 결과를 활용하여 WRC-1992 Diagram에 따른 Ni 당량 및 Cr 당량을 구한 후, Ferrite number (FN)를 결정하였다.

2.2.4 용접부의 조직 관찰

ASTM E3-11 코드에 따라 조직시험편을 3 μ Diamond paste를 통해 폴리싱을 한 후, Chromic acid로 에칭을 한 표면에 10배율로 매크로 조직을 관찰하였으며, 조직시험편을 1 μ Diamond paste를 통해 폴리싱을 한 후, Chromic acid로 에칭을 한 표면에 200배율로 마이크로 조직을 관찰하였다.

용접금속, 열영향부 및 모재를 대상으로 매크로조직 검사로 용접 결함을 확인하고, 마이크로 조직검사로 조직학적인 미세 균열이나 불연속부의 존재 여부를 확인하였다.

2.2.5 입계 부식 시험

오스테나이트 스테인리스강의 크롬 탄화물 석출에 따른 입계 부식의 민감도를 확인할 목적으로 원자력 분야에서 일반적으로 적용하고 있는 ASTM A262 Practice A 및 E 요건에 따라, Fig. 2와 같은 형상으로 만든 시험편에 입계부식시험을 수행하여 예민화 현상을 고찰하였다.

Practice A는 Oxalic acid 100g을 900ml 증류수에 완전 용해를 시킨 후, 시험편을 장입하여 1A/cm²의 조건으로 90초 동안 전해 에칭을 하여 Fig. 2(a)와 같이 준비한 부식 시험편을 250~500 배율로 조직을 관찰하였다.

Practice E는 Copper sulfate (CuSO₄·5H₂O) 100g을 700ml 증류수에 완전 용해를 시킨 후, 100ml의 Sulfuric acid(H₂SO₄)를 추가 투입하여, 최종적으로 1,000ml의

Fig. 2 Specimen of ASTM A262 intergranular corrosion test. (a) Practice A (b) Practice B

Table 6 Total status of test conditions

Test type		A182 F304H (0.074wt.%C)		A240 TP304 (0.064wt.%C)	
Coupon No.		1	2	3	4
Nondestructive test (PT, RT, UT)		○	○	○	○
Mechanical test	Bend test	○	○	○	○
	Tension test	○	○	○	○
	Hardness test	○	○	○	○
	Impact test	○	○	○	○
Chemical analysis & FN measuring		○	○	○	○
Structure inspection	Macro structure	○	○	○	○
	Micro structure	○	○	○	○
Intergranular corrosion test	ASTM A262 Practice A	○	○	○	○
	ASTM A262 Practice E	○	○	○	○
Temperature distribution analysis		○	-	-	-

증류수에 희석시킨 용액에 시험편을 장입하여 최소 15 시간 동안 끓인 다음, Fig. 2(b)와 같이 굽힘 시험을 수행하여 5~20 배율로 균열 발생 여부를 확인하였다.

본 시험에 적용된 시험 조건의 전체 현황은 Table 6에 나타내었다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 비파괴시험에 의한 결함 평가

ASME Section III 및 V 코드에 따라 용접 시험편에 대한 비파괴시험의 평가 결과, Table 7과 같이 어떠한 용접결함도 관찰이 되지 않아 건전한 용접부의 형성을 확인하였다.

3.2 기계적 성질 평가

3.2.1 굽힘 성질 특성

ASME Section IX QW-163의 굽힘시험 평가 기준에 따라 3mm를 초과하지 않는 터진 불연속부가 없으면 합격이 되며, 각 4개의 시험편을 측면 횡 굽힘시험

Table 7 The evaluation results of non-destructive test

Coupon No.	PT	RT	UT
1	Accept	Accept	Accept
2	Accept	Accept	Accept
3	Accept	Accept	Accept
4	Accept	Accept	Accept

을 한 결과, 어떠한 터진 불연속부도 관찰이 되지 않았다.

3.2.2 인장 강도 특성

ASME Section IX QW-153의 인장시험 평가 기준에 따라 모재의 최소 인장강도 이상의 값을 가지는 경우 합격이 되며, 각 2개의 시험편을 횡 인장시험을 한 결과, 595~603MPa의 인장강도값을 얻어 A182 F304H 모재 요건인 최소 515MPa를 만족하였으며, 603~609MPa의 인장강도값을 얻어 A240 TP304 모재 요건인 최소 515MPa를 만족하였다.

3.2.3 경도 특성

표면 직하의 1mm 선상에서 용접금속 및 모재는 1mm 간격으로 5군데와 열영향부는 0.5mm 간격으로 3군데를 하중 10kgf의 마이크로 비커스 경도 측정한 결과, Table 8과 같이 열영향부와 모재의 경도치는 경화 조직의 생성이 없는 유사한 값을 보이고 있다. 열영향부의 경도치가 모재보다 다소 낮은 것은 다중 패스 용접에 따른 열이력의 영향으로 국부적으로 생성된 조대화된 결정립에 기인한 것으로 판단된다.

3.2.4 충격 강도 특성

원자력 주기기의 가동중 Lowest service temperature인 1.6℃를 시험 온도로 하여 충격시험을 수행하는 경우 흡수에너지가 최소 67.7J 이상이 되면 합격이 된다. 해당 온도에서 용접금속 3개, 열영향부 3개 및 모재 3개의 총 9개 시험편에 Charpy V-notch 충격시험을 수행한 결과, 모든 충격을 시험편에서 흡수하여 파단 자체가 발생하지 않은 결과가 나타났으며, 일반적인 온도에서 상당히 높은 인성을 갖는 304 스테인리스강의 재질 특성이 확인되었다.

추가적으로 304 스테인리스강 재질의 극저온 인성 특성을 확인하기 위해 -196℃에서 충격시험을 수행하였다. 시험 온도인 -196℃의 극저온에서의 합격 기준은 제시되고 있지 않으나, Table 9와 같이 열영향부 및 모재에서 양호한 충격 인성값을 확인하였다. 단, 극저온 인성 특성을 갖는 용가재는 오스테나이트 조직을 갖는 측면을 고려할 때, 페라이트 조직을 일부 형성하

Table 8 The results of micro vickers hardness test

Coupon No.	Measurement positions (HV, Avg.)		
	Weldment	HAZ	Base metal
1	174.0	185.7	192.0
2	179.0	196.3	192.8
3	172.8	191.3	197.4
4	175.4	195.0	198.4

Table 9 The results of charpy V-notch impact test at extreme low temperature

Coupon No.	Test locations	Test temp. (°C)	Absorbed energy (J, Avg.)	Test results
1	Weldment	-196	38.0	Except evaluation
	HAZ	-196	79.0	Satisfactory
	Base metal	-196	104.3	Satisfactory
2	Weldment	-196	36.3	Except evaluation
	HAZ	-196	77.0	Satisfactory
	Base metal	-196	122.6	Satisfactory
3	Weldment	-196	54.3	Except evaluation
	HAZ	-196	74.3	Satisfactory
	Base metal	-196	94.7	Satisfactory
4	Weldment	-196	46.3	Except evaluation
	HAZ	-196	73.7	Satisfactory
	Base metal	-196	108.0	Satisfactory

도록 고안된 용가재가 사용된 용접금속은 평가 대상에서 제외하였다.

3.3 화학성분 및 델타 페라이트 특성

용접금속에 대한 화학성분 분석을 수행한 결과, Table 10과 같이 ASME Section II Part C SFA-5.22의 E308LT1-1 용가재 화학 조성 요건을 만족하였다.

실험에 사용된 모재는 일반적인 304 스테인리스강의 탄소함량보다 높은 0.074wt.%C 및 0.064wt.%C의 탄소함량을 가지고 있음에도 불구하고 E308LT1-1 용가재가 용융된 용접금속은 최대 0.03% 탄소함량을 가진 저 탄소 등급을 확보하였다.

또한, 높은 용접입열로 인해 희석률(Dilution ratio)이 증가하여 모재의 높은 탄소함량의 영향으로 용접금속의 탄소함량 결과가 높을 것으로 예상하였으나, 23.6kJ/cm를 소폭 초과하는 용접입열량에서는 모재의 탄소함량이 용접금속의 탄소함량에 미치는 영향이 미미함을 확인하

Table 10 Chemical analysis compositions of weldment (wt.%)

Comp.	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
ASME	Max. 0.04	18.0~21.0	9.0~11.0	Max. 0.75	0.5~2.5	Max. 1.0	Max. 0.04	Max. 0.03	Max. 0.5
Coupon No.1	0.029	19.58	9.60	0.03	1.44	0.61	0.019	0.012	0.05
Coupon No.2	0.024	19.74	9.65	0.02	1.19	0.56	0.019	0.013	0.04
Coupon No.3	0.023	19.65	9.75	0.02	1.07	0.51	0.017	0.010	0.05
Coupon No.4	0.022	19.70	9.79	0.02	1.10	0.55	0.018	0.008	0.06

Table 11 Delta ferrite contents of weldment

Coupon No.	Magnetic measurement (FN, Avg.)	Chemical analysis		
		Ni eq	Cr eq	FN
1	9.2	11.31	19.63	10.0
2	9.9	11.34	19.77	10.7
3	9.0	11.55	19.69	9.5
4	9.2	11.60	19.73	9.9

였다.

Magnetic measuring instrument 및 Chemical analysis의 방법으로 용접금속에 측정된 델타 페라이트 함량은 Table 11과 같으며, 원자력 델타 페라이트 규제 요건인 8~15 FN을 만족하고 있어 고온 균열(Hot cracking)에 대한 저항성이 충분한 것으로 나타났다.

용접에 사용된 E308LT1-1 용가재의 델타 페라이트 함량이 8.3~8.5FN인 점을 고려할 때, Table 11과 같이 자기계측기 및 화학성분분석을 통한 용접금속의 델타 페라이트 함량이 9.0~10.7FN 범위내에서 측정되어 큰 차이가 없이 안정적인 결과가 나타났다.

반면, WRC-1992 Diagram에 따르면 C는 Ni 당량의 증가에 큰 요인으로 작용하여 FN 값을 감소시키는 것으로 알려져 있어 탄소함량이 높은 모재는 용접금속의 FN 값을 감소시키는 경향을 예상하였으나, 실험 결과는 오히려 FN 값이 증가되는 결과를 보여주었다. 따라서 용접금속의 델타 페라이트 함량은 모재보다는 용가재의 화학조성이 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

또한 용접입열량의 차이에 따른 응고모드의 변화 또는 냉각속도에 미치는 영향도 적게 나타나 델타 페라이트의 함량과의 직접적인 연관성은 없는 것으로 판단된다.

3.4 조직 관찰 특성

시험편을 10배율로 용접금속, 열영향부 및 모재의 Macro structure를 관찰한 결과, 균열, 기공, 용융불량, 용입불량 및 슬래그 혼입 등의 특성을 갖는 결함이 확인되지 않았다.

시험편을 200배율로 용접금속, 열영향부 및 모재의 Micro structure를 관찰한 결과, 조직학적인 미세 균열이나 불연속부가 확인되지 않았다.

3.5 입계 부식 특성 평가

3.5.1 스테인리스강(0.074wt.%C)의 입계 부식 특성 평가

원자력 산업계의 최대 탄소함량 규제 요건인 0.065wt.%C

Table 12 The results of ASTM A262 Practice A & E test for coupon No.1 and coupon No.2

No.	Practice A				Practice E		
	Weld ment	HAZ		Base metal	Weld ment	HAZ	Base metal
		Near fusion line	2~3mm from fusion line				
1	Accept	Accept (Step)	Suspect (Ditch)	Accept (Dual)	Accept	Accept	Accept
2	Accept	Accept (Step)	Suspect (Ditch)	Accept (Dual)	Accept	Reject	Accept

Fig. 3 Etch structures of coupon No.1 by ASTM A262 Practice A test (x500). (a) Weldment (b) HAZ near fusion line (c) 2~3mm HAZ from fusion line (d) Base metal

보다 높은 탄소함량 0.074wt.%C 의 오스테나이트 스테인리스강 모재에 원자력 규제 요건인 최대 23.6kJ/cm 보다 높은 용접입열량을 적용한 용접 시편의 ASTM A262 Practice A 및 E 시험의 결과를 Table 12와 같이 나타내고 있다.

ASTM A262 Practice A 시험 결과는 Fig. 3 및 Fig. 4에서 용접금속 및 모재는 합격 조직을 보여주고 있으며, 열영향부의 일부 영역에서는 입계 부식 의심 조직을 보여주고 있다. 모재는 Dual structure의 합격 조직이 관찰되었고 용융경계선 근처의 열영향부는 Step structure의 합격 조직이 관찰되었으나, 용융경계선으로부터 2~3mm 떨어진 열영향부는 Ditch structure의 입계 부식 의심 조직이 관찰되었다.

ASTM A262 Practice E 시험 결과는 Fig. 5에서 시편 두께 10mm의 용접금속, 열영향부 및 모재에서 균열이나 터짐이 관찰되지 않아 합격 조직을 보여 주고 있다. Fig. 6에서 시편 두께 40mm의 용접금속 및 모재는 균열이나 터짐이 없어 합격이 되었으나, 열영향부에서는 균열이 관찰되어 불합격 조직을 보여 주고 있다.

Fig. 6에서 균열이 관찰된 열영향부의 불합격 조직에

Fig. 4 Etch structures of coupon No.2 by ASTM A262 Practice A test (x500). (a) Weldment (b) HAZ near fusion line (c) 2~3mm HAZ from fusion line (d) Base metal **Fig. 5** View of the bent area of coupon No.1 by ASTM A262 Practice E test (x10). (a) Weldment (b) HAZ (c) Base metal **Fig. 6** View of the bent area of coupon No.2 by ASTM A262 Practice E test (x10). (a) Weldment (b) HAZ (c) Base metal **Fig. 7** Detail view of HAZ on the bent area of coupon No.2 by ASTM A262 Practice E test (x10). (a) 2mm over HAZ from fusion line (b) HAZ of Fig 6 (c) HAZ near fusion line

대해 상세 관찰을 한 결과, Fig. 7과 같이 굽힘 시험의 굴곡부에 위치하는 대략의 용융경계선을 포함하여 용융경계선으로부터 대략 2mm 이내의 열영향부는 균열이나 터짐이 없어 합격이 되었으나, 용융경계선으로부터 대략 2mm 이상 떨어진 열영향부는 균열이 관찰되어 Failing test specimen으로 확인되었다.

3.5.2 스테인리스강(0.074wt.%C)의 입계 부식 특성 고찰

저 탄소함량 Max. 0.03wt.%C의 용가재가 적용된 용접금속은 ASTM A262 Practice A 및 E 시험에서 모두 합격이 되어 입계 부식에 저항성이 있는 조직으로 관찰되었으며, 이는 고 탄소함량의 스테인리스강과 비교하여 상대적으로 적은 크롬 탄화물 석출의 영향으로 판단된다. 또한, 오스테나이트 조직의 모재나 열영향부에 잔존하지 않는 용접금속의 δ -페라이트의 특성에 기인한 것으로 판단이 되며, 이러한 특성은 가열 초기에 δ -페라이트 쪽의 탄화물 근방에서 Cr 결핍층이 발생하지만, δ -페라이트상으로 부터의 Cr 확산이 빠르게 진행되어 Cr 결핍층이 빨리 회복되는 래피드 힐링(Rapid healing) 현상 때문으로 판단되었다.

탄소함량이 높은 0.074wt.%C 시편의 용접 열영향부의 ASTM A262 Practice A 시험에서는 용융경계선 근처의 열영향부는 Step structure의 합격 조직이 관찰된 반면, 용융경계선으로부터 2~3mm 떨어진 열영향부에서 Cr 탄화물이 입계에 석출한 Ditch structure의 입계 부식 의심 조직이 관찰되었다. ASTM A262 Practice E 시험 결과에서는 용융경계선 근처의 열영향부는 균열이나 터짐이 관찰되지 않은 반면, 용융경계선으로부터 2mm 이상 떨어진 열영향부에서 균열이 관찰됨에 따라 열영향부의 특정 위치에서 입계 부식에 취약한 것으로 나타났다. 이는 용융경계선으로부터 2mm 이상 떨어진 열영향부는 예민화가 쉽게 발생할 수 있는 온도와 시간적인 조건이 충족되기 때문이라고 판단되며, 이러한 현상은 304 오스테나이트계 스테인리스강에서 잘 알려진 용접쇠약(Weld decay)의 전형적인 현상이다.

탄소함량이 높은 0.074wt.%C 시편에서 모재의 ASTM A262 Practice A 시험 결과, Dual structure의 합격 조직이 관찰되었다.

ASTM A262 Practice E 시험 결과, 시편 두께 40mm는 시편 두께 10mm보다 용접 패스 수가 상대적으로 많아 예민화 온도 구간에 지속되는 시간의 증가에 기인한 균열이 용융경계선으로부터 2mm 이상 떨어진 열영향부에서 관찰된 것으로 판단된다.

3.5.3 스테인리스강(0.064wt.%C)의 입계 부식 특성 평가

원자력 산업계의 최대 탄소함량 규제 요건인 0.065wt.%C과 유사한 탄소함량 0.064wt.%C의 오스테나이트 스테인리스강 모재에 원자력 규제 요건인 최대 23.6kJ/cm보다 높은 용접입열량을 적용한 용접 시편의 ASTM

Table 13 The results of ASTM A262 Practice A & E test for coupon No.3 and coupon No.4

No.	Practice A				Practice E		
	Weld ment	HAZ		Base metal	Weld ment	HAZ	Base metal
		Near fusion line	2~3mm from fusion line				
3	Accept	Accept (Step)	Accept (Dual)	Accept (Step)	Accept	Accept	Accept
4	Accept	Accept (Step)	Accept (Dual)	Accept (Dual)	Accept	Accept	Accept

Fig. 8 Etch structures of coupon No.3 by ASTM A262 Practice A test (x500). (a) Weldment (b) HAZ near fusion line (c) 2~3mm HAZ from fusion line (d) Base metal

Fig. 9 Etch structures of coupon No.4 by ASTM A262 Practice A test (x500). (a) Weldment (b) HAZ near fusion line (c) 2~3mm HAZ from fusion line (d) Base metal

A262 Practice A 및 E 시험의 결과를 Table 13과 같이 나타내고 있다.

ASTM A262 Practice A 시험 결과, Fig. 8 및 Fig. 9와 같이 용접금속, 열영향부 및 모재에서 Ditch Structure가 존재하지 않는 합격 조직이 관찰되었다. 용융

Fig. 10 View of the bent area of coupon No.3 by ASTM A262 Practice E test (x10). (a) Weldment (b) HAZ (c) Base metal

Fig. 11 View of the bent area of coupon No.4 by ASTM A262 Practice E test (x10). (a) Weldment (b) HAZ (c) Base metal

선 근처 열영향부, 용융경계선으로부터 2~3mm 떨어진 열영향부 및 모재는 Step structure 또는 Dual structure의 조직이 관찰되었다.

ASTM A262 Practice E 시험 결과는 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 용접금속, 열영향부 및 모재의 합격 조직을 보여주고 있으며, 균열이나 터짐이 관찰되지 않았다.

3.5.4 스테인리스강(0.064wt.%C)의 입계 부식 특성 고찰

저 탄소함량 Max. 0.03wt.%C의 용가재가 적용된 용접금속에 대한 ASTM A262 Practice A 및 E 시험에서 모두 합격이 되어 입계 부식에 저항성이 있는 조직으로 확인되었다.

고 탄소함량 0.074wt.%C 시편의 ASTM A262 Practice A 시험 결과, 용융경계선으로부터 2~3mm 떨어진 열영향부에서 입계 부식 의심 조직인 Ditch structure가 관찰된 반면, 탄소함량이 0.064wt.%C 시편에서 동일한 위치의 열영향부에서는 합격 조직인 Dual structure가 관찰됨에 따라, 입계 부식에 미치는 직접적인 인자는 탄소함량임을 확인하였다.

고 탄소함량 0.074wt.%C 시편의 ASTM A262 Practice E 시험 결과, 열영향부에서 균열이 관찰이 되었으나, 탄소함량이 0.064wt.%C 시편의 열영향부에서는 균열이나 터짐이 관찰되지 않아, 입계 부식에 미치는 탄소함량의 영향을 재 확인하였다.

이러한 시험 결과를 볼 때, 원자력 산업계의 최대 탄소함량 규제 요건인 0.065wt.%C 정도의 304계열 스테인리스강은 입계 부식의 저항성이 있음을 실증시험을 통해 확인할 수 있었다.

3.6 열영향부의 온도분포해석 및 예민화경향 분석

전술한 바와 같이, 고 탄소 0.074wt.%C 함량의 스테인리스강에 용접을 수행한 시편에 다양한 기계적 시험, 화학 분석, 조직 관찰 및 비파괴시험을 실시한 결과, 모든 합격기준을 만족하였으나, 열영향부의 ASTM A262 Practice A 및 E 시험에 따른 입계부식시험 결과, 열영향부는 용접금속 및 모재와 비교하여 입계 부식에 취약하다는 결과를 보여 주었다. 즉, 용접 입열에 의해 가열되는 열영향부에서 C의 용해도가 낮고 Cr 원자가 쉽게 확산 이동함으로써 결정립계에 Cr 탄화물이 석출함에 따라 입계 주변에서 Cr 결핍층이 발생하여 이 부분이 선택적으로 부식이 되는 현상이 나타났다. 특히 용접금속과 열영향부의 경계인 용융경계선으로부터 2mm 이상 떨어진 열영향부는 온도와 시간이 입계 부식에 의한 예민화가 쉽게 발생할 수 있는 조건이 될 수 있다고 판단되었다.

Coupon No.1의 ASTM A262 Practice A 시험 결과, Fig. 12와 같이 용융경계선 근처의 열영향부는 Step structure의 합격 조직이 관찰되었으나, 용융경계선으로부터 2~3mm 떨어진 열영향부는 Ditch Structure가 관찰되어 입계 부식에 따른 예민화가 관찰되었다.

또한, Coupon No.2의 ASTM A262 Practice E 시험 결과, Fig. 13과 같이 용융경계선 근처의 열영향부는 균열이나 터짐이 없는 합격 조직이 관찰되었으나, 용융경계선으로부터 2mm 이상 떨어진 열영향부는 균열이 관찰되어 입계 부식에 따른 예민화가 관찰되었다.

이에 따라, 304계열 스테인리스강의 용접 입열에 따른 열영향부의 온도 분포와 예민화의 관계를 확인하기 위한 목적으로 Coupon No.1의 실제 용접한 조건을 모사한 값을 적용한 SYSWELD 프로그램을 통해 시편의 표면을 기준으로 용융경계선으로부터 떨어진 각 위치에 서의 온도 분포 해석을 실시하였다.

Fig. 12 The results of ASTM A262 Practice A test for coupon No.1

Fig. 13 The results of ASTM A262 Practice E test for coupon No.2

3.6.1 열영향부의 온도 분포 해석

SYSWELD 프로그램을 통해 입계 부식이 시작되는 표면을 기준하여, 용융경계선 및 용융경계선으로부터 1mm 간격으로 4mm 지점까지 총 5군데에 대한 온도 분포 해석을 Fig. 14와 같이 수행하였다. 표면의 용융경계선 (Fig. 15), 표면의 용융경계선으로부터 1mm 떨어진 지점 (Fig. 16), 표면의 용융경계선으로부터 2mm 떨어진 지점 (Fig. 17), 표면의 용융경계선으로부터 3mm 떨어진 지점 (Fig. 18) 및 표면의 용융경계선으로부터 4mm 떨어진 지점 (Fig. 19)에 대한 온도 분포 해석 결과를 나타내고 있다.

Welding Metallurgy에서는 304 스테인리스강의 용접에서 용융경계선으로 멀어지는 열영향부의 위치에 따라 최고 도달 온도 및 냉각속도의 열적 사이클 차이가 발생하며, 이때 결정립계의 크롬 탄화물 석출에 기인한 용접쇠약(Weld decay)이 발생하는 650~870℃ 온도 구간을 예민화 온도 구간으로 설정하고 있으며, 석출된 크롬 탄화물이 분해하는 용체화처리 하한선 온도를 1000℃로 하고 있다. 이러한 Welding Metallurgy의 예민화 온도 구간 및 용체화 하한선 온도를 온도 분포 해석에

Fig. 14 Schematic sequence diagram of temperature distribution analysis by SYSWELD program

참조하였다.

Fig. 15에서 Fig. 19의 매 패스 용접시 용융경계선 및 용융경계선으로부터 1mm 간격으로 4mm 지점까지 총 5군데에 대한 온도 분포 해석 결과, Table 14와 같이 2~3mm 지점이 예민화 온도 구간인 650~870℃에서 12.0~14.6초 동안 가장 긴 지속 시간을 유지하였으며, 0~1mm 지점과 비교할 때, 약 3~6sec의 지속 시간 증가 현상이 확인되었다. 0~1mm 지점은 용

Fig. 15 Temperature distribution analysis at fusion line of the surface

Fig. 16 Temperature distribution analysis at a point 1mm away from fusion line of the surface

Fig. 17 Temperature distribution analysis at a point 2mm away from fusion line of the surface

Fig. 18 Temperature distribution analysis at a point 3mm away from fusion line of the surface

Fig. 19 Temperature distribution analysis at a point 4mm away from fusion line of the surface

채화처리 온도 구간인 1,000℃에 진입하는 가열 중 예민화 온도 구간의 지속 시간을 배제하였다.

Table 14에 따르면, 세 번째 패스 용접시 예민화 온도 구간인 650~870℃에 가장 긴 시간인 14.6초를 지속하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 Fig. 20과 같이 세 번째 패스 용접시 표면의 온도 분포에 대한 상세 해석을 수행하였다.

Fig. 20의 세 번째 패스 용접시의 용융경계선 및 용융경계선으로부터 1mm 간격으로 4mm 지점까지 총 5

Table 14 Duration of sensitizing temperature during each pass of welds (sec)

Distance from fusion line	1st pass	2nd pass	3rd pass		4th pass	5th pass	Total duration	Solution temp. of 1,000℃	Duration minus solution temp. effects
			During heating	During cooling					
0mm	0	0	0.8	8.0	0	0	8.8	Over	8.0
1mm	0	0	1.0	9.0	0	0	10.0	Over	9.0
2mm	0	0	1.5	10.5	0	0	12.0	Below	12.0
3mm	0	0	14.6		0	0	14.6	Below	14.6
4mm	0	0	10.2		0	0	10.2	Below	10.2

Fig. 20 Temperature distribution analysis of 3rd pass

Table 15 Duration of sensitizing temperature during 3rd pass of welds (sec)

Distance from fusion line	During heating			During cooling			Total duration (c+f)	Solution temp. of 1,000℃	Duration minus solution temp. effect
	650℃ Start (a)	870℃ Finish (b)	Duration (c=a-b)	650℃ Start (d)	870℃ Finish (e)	Duration (f=d-e)			
0mm	2002.6	2003.4	0.8	2015.3	2023.3	8.0	8.8	Over	8.0
1mm	2003.7	2004.7	1.0	2013.9	2022.9	9.0	10.0	Over	9.0
2mm	2004.7	2006.2	1.5	2011.4	2021.9	10.5	12.0	Below	12.0
3mm	2005.9	-	-	-	2020.5	-	14.6	Below	14.6
4mm	2007.9	-	-	-	2018.1	-	10.2	Below	10.2

군데에 대한 최고 온도에 도달하기 전 가열시간 및 도달 후 냉각시간의 온도 분포 해석 결과, Table 15와 같이 2~3mm 지점이 예민화 온도 구간인 650~870℃에서 12.0~14.6 초동안 가장 긴 지속 시간을 유지하였으며, 0~1mm 지점과 비교할 때, 약 3~6초의 지속 시간 증가 현상이 확인되었다. 0~1mm 지점은 용체화처리 온도 구간인 1,000℃에 진입하는 가열 중 예민화 온도 구간의 지속 시간을 배제하였다.

3.6.2 열영향부의 예민화 경향 분석

앞서 수행한 고 탄소 0.074wt.%C 함량의 오스테나이트 스테인리스강 모재에 23.6kJ/cm보다 높은 용접입열량을 적용한 시편에 수행된 ASTM A262 Practice A 및 E 시험 결과, 열영향부의 입계 부식은 용융경계선 근처에서는 관찰되지 않았던 반면, 용융경계선으로부터 2mm 이상 떨어진 지점에서만 관찰이 되었다.

예민화 온도 구간인 650~870℃에서 용융경계선으로부터 0~1mm 지점과 비교하여 2~3mm 떨어진 지점에서 약 3~6초의 지속 시간 증가를 확인한 온도 분포 해석 결과는 ASTM A262 Practice A 및 E 시험 결과를 수치적으로 보여 주었다. 또한, 용융경계선 근처의 탈 예민화(Desensitization) 현상은 용체화처리 온도의 진입에 따른 가열 중 생성된 크롬 탄화물의 분해 작용

과 냉각 중 2~3mm 떨어진 지점보다 상대적으로 급냉이 되는 효과에 의한 결과라 판단된다.

4. 결 론

304 계열 오스테나이트 스테인리스강의 용접에서 열영향부에 미치는 탄소함량의 영향을 조사한 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었으며, 이러한 스테인리스강을 부식 환경에서 내식성을 확보하기 위해서는 최대 탄소함량을 0.65wt.%C으로 제한하여 산업 현장 용접에서 적용할 필요가 있다고 판단된다.

1) 0.074wt.%C 고 탄소함량 및 0.064wt.%C 탄소함량을 가진 304 스테인리스강 모재에 23.6kJ/cm를보다 높은 용접입열로 용접을 수행한 시편을 굽힘 시험, 인장 시험, 경도 시험, 충격 시험의 기계적 물성시험과 비파괴시험, 화학 성분 분석, 델타 페라이트 함량, 조직 관찰을 실시한 결과, 모든 요건을 만족하였다.

2) 0.074wt.%C 고 탄소함량을 가진 304 스테인리스강의 경우, 용융경계선으로부터 2~3mm 떨어진 지점에 위치한 열영향부는 ASTM A262 Practice A 시험에서 Ditch structure의 입계 부식 의심 조직이 관찰되었으며, 열영향부에 대한 ASTM A262 Practice E 시험에서 균열이 관찰되어, 열영향부의 취약한 입계 부식 특성을 확인하였다.

3) 0.064wt.%C 탄소함량을 가진 304 스테인리스강의 경우, 용융경계선으로부터 2~3mm 떨어진 지점에 위치한 열영향부는 ASTM A262 Practice A 시험에서 Dual structure의 합격 조직이 관찰되었으며, 열영향부의 ASTM A262 Practice E 시험에서 균열이나 터짐이 관찰되지 않아, 입계 부식의 저항성이 있음을 확인하였다.

4) 실험에 사용된 304 스테인리스강 모재는 탄소함량과 상관없이 용융경계선 근처의 열영향부는 ASTM A262 Practice A 시험에서 크롬 탄화물이 도랑 형태로 석출된 Ditch가 관찰되지 않고 Step structure의 합격 조직이 관찰되었다.

5) 23.6kJ/cm를 초과하는 높은 용접입열은 열영향부가 예민화 온도 구간인 650~870℃에서의 지속 시간을 증가시키는 변수로 작용함에 따라, 304 스테인리스강의 용접에는 적절한 용접입열의 적용 필요성이 확인되었다.

6) 304 스테인리스강 열영향부의 입계 부식 특성에 대한 ASTM A262 Practice A 및 E 시험 결과를 토대로 SYSWELD 프로그램을 통한 온도 분포 해석을 수행한 결과, 용융경계선에서 2~3mm 지점은 0~1mm 지점과 비교하여, 예민화 온도 구간인 650~870℃에서 지

속 시간이 약 3~6초 증가하는 현상이 분석되었다. 이러한 온도 분포 해석 결과는 용융경계선으로부터 2~3mm 떨어진 열영향부에서 입계 부식이 관찰되었던 고 탄소함량의 304 스테인리스강의 ASTM A262 Practice A 및 E 시험 결과를 수치적으로 뒷받침하는 계기를 제공하였다.

향후 탄소함량 0.065wt.%C와 0.074wt.%C 사이의 탄소함량을 갖는 304 오스테나이트 스테인리스강에 대한 입계 부식 특성을 확인하는 추가 실험을 수행함으로써, 입계 부식이 발생하지 않는 최대 탄소함량 기준을 찾는 노력이 필요하다고 판단된다.

ORCID: Eun-Jong Oh: <https://orcid.org/0000-0002-4907-7936>

ORCID: Jae-Hyung Lee: <https://orcid.org/0000-0003-4967-5247>

ORCID: Sung-Woo Cho: <https://orcid.org/0000-0002-1393-9880>

ORCID: Won-Geun Yi: <https://orcid.org/0000-0003-4301-3218>

ORCID: Ki-Woo Nam: <http://orcid.org/0000-0001-7019-358X>

References

1. D. Gandy, Austenitic Stainless Steel Handbook, *Electric Power Research Institute (EPRI)* (2008) 4-23~4-27.
2. Sehwa editorial department, Stainless Steel Handbook, *Sehwa*, Seoul, Korea (1992) 17.
3. Section II Part A & C, Section III, Section V, Section IX of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, *The American Society of Mechanical Engineers (ASME)* (2015)
4. Korean Welding and Joining Society, Welding and Joining Handbook, I: Steel and Non-ferrous Materials, *Korean Welding and Joining Society*, Daejeon, Korea (2008) 143-144.
5. Korean Welding and Joining Society, Welding and Joining Handbook, III: Welding and Related Processes, *Korean Welding and Joining Society*, Daejeon, Korea (2007) 59-64.
6. ASTM E384-16, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, *American Society for testing and materials (ASTM International)* (2016).
7. D. J. Kotecki and T.A. Siewert, WRC-1992 Constitution diagram for stainless steel weld metals, A modification of the WRC-1988 diagram, *Welding Research Supplement* (1992) 171-178.
8. ASTM E3-11, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, *American Society for testing and materials (ASTM International)* (2017)
9. ASTM A262, Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels, *American Society for testing and materials (ASTM International)* (2015).
10. Sindo Kou, Welding Metallurgy, Second edition, *Wiley Interscience*, New Jersey, USA (2003) 433-440.
<https://doi.org/10.1002/0471434027>
11. Mars G. Fontana, Corrosion Engineering, Third edition, *McGraw-Hill*, Singapore (1986) 74-86.