



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

304 스테인리스강의 열영향부에 미치는 탄소 함량과 용접 입열량의 영향



2017 년 8 월

부경대학교 산업대학원

금 속 공 학 과

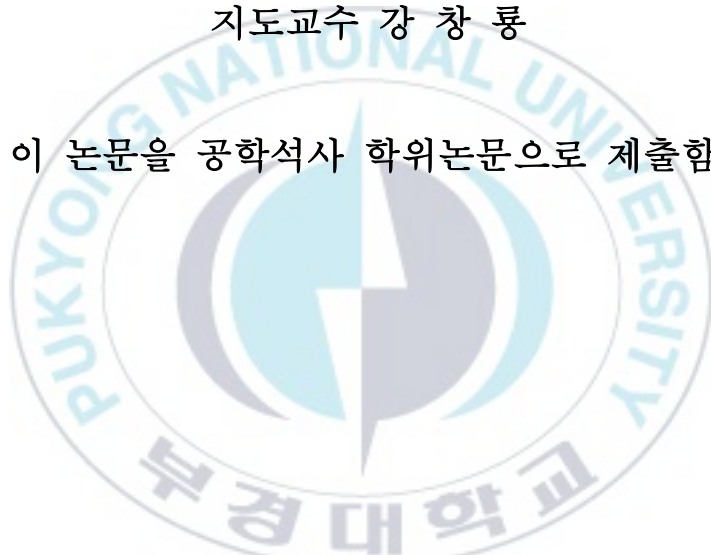
오 은 중

공학석사 학위논문

304 스테인리스강의 열영향부에 미치는 탄소 함량과 용접 입열량의 영향

지도교수 강 창 룡

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2017 년 8 월

부경대학교 산업대학원

금 속 공 학 과

오 은 중

이 논문을 오은종의 공학석사
학위논문을 인준함.

2017 년 8 월



주 심 공학박사 왕 제 필 (인)

위 원 공학박사 김 권 후 (인)

위 원 공학박사 강 창 룡 (인)

Effect of Carbon Content and Welding Heat Input on the Heat Affected Zone of 304 Stainless Steel

Eun Jong Oh

*Department of Metallurgical Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University*

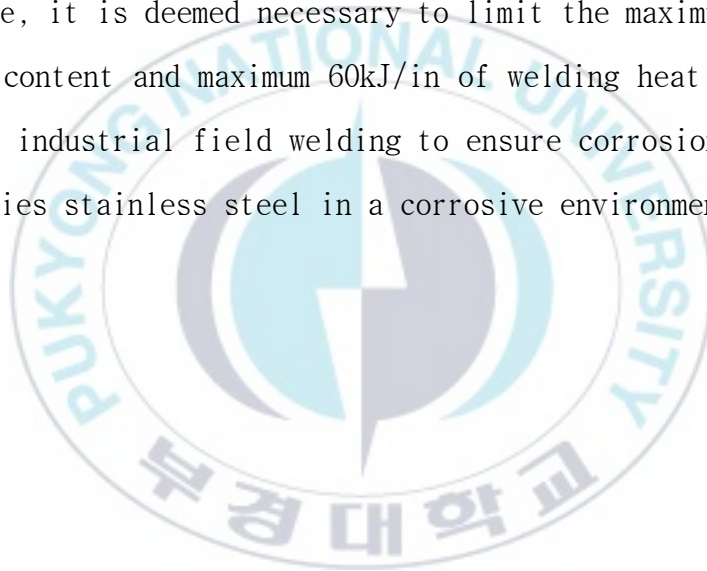
Abstract

As a result of welding 304 stainless steel which has a high carbon content containing 0.074wt.%C with an heat input of minimum 60kJ/in to investigate the effect of carbon content and welding heat input on the heat affected zone of austenitic stainless steels, a variety of tests to identify characteristics such as nondestructive properties, mechanical properties, chemical compositions, delta ferrite contents and structure observation satisfied all the requirements, but the intergranular corrosion by ASTM A262 test was observed at a specific location of the heat affected zone. The sensitization phenomena according to

intergranular corrosion of the heat affected zone was confirmed by the temperature distribution analysis using SYSWELD 2014 program.

However, as a result of welding 304 stainless steel which has a carbon content containing 0.064wt.%C with an heat input of minimum 60 kJ/in, the resistance to intergranular corrosion was confirmed in the heat affected zone.

Therefore, it is deemed necessary to limit the maximum 0.65wt.%C of carbon content and maximum 60kJ/in of welding heat input to be applied to industrial field welding to ensure corrosion resistance of 304 series stainless steel in a corrosive environment.



목 차

Abstract	i
1. 서 론	1
2. 실험 준비 및 방법	3
2.1 시료 및 용접변수	3
2.2 시험편 레이-아웃 및 가공	8
2.3 실험 방법	9
2.3.1 비파괴시험	9
2.3.2 기계적 성질시험	9
2.3.3 화학성분 분석 및 델타 페라이트 측정	12
2.3.4 용접부의 조직관찰	14
2.3.5 입계부식시험	14
3. 실험 결과 및 고찰	17
3.1 비파괴시험에 의한 결함 평가	17
3.2 기계적 성질 평가	18
3.2.1 굽힘 성질 특성	18
3.2.2 인장 강도 특성	18
3.2.3 경도 특성	18
3.2.4 충격 강도 특성	20

3.3 화학성분 및 델타 페라이트 평가	22
3.4 조직 관찰 특성	25
3.5 입계부식 특성 평가	28
3.5.1 ASTM A262 코드의 입계부식 평가 기준	28
3.5.2 스테인리스강(0.74wt.%C)의 입계부식 특성 평가	28
3.5.3 스테인리스강(0.74wt.%C)의 입계부식 특성 고찰	34
3.5.4 스테인리스강(0.64wt.%C)의 입계부식 특성 평가	35
3.5.5 스테인리스강(0.64wt.%C)의 입계부식 특성 고찰	40
4. 열영향부의 온도분포해석 및 예민화 경향분석	42
4.1 열영향부의 온도 분포 해석	42
4.2 열영향부의 예민화 경향 분석	54
5. 결 론	55
참고문헌	57

1. 서 론

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 있다¹⁾. 원자력 산업계에서 사용되는 스테인리스강의 90%이상이 오스테나이트계인데, 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 650°F 고온 및 2500psi 고압의 가동 중 부식 환경에 노출되어 장시간 사용되는 측면을 고려할 때, 주요 부품 소재인 304 스테인리스강 용접부의 입계부식 방지를 위한 목적으로 원자력 규제 요건인 예비안전성분석보고서(Preliminary Safety Analysis Report)에서는 Max. 0.065wt.%C의 모재 탄소(C) 함량 및 Max. 60kJ/in의 용접 입열(Welding heat input)로 제한하고 있으나, 이에 대한 실제 산업 현장에서 활용할 수 있는 실질적인 자료들은 매우 부족한 실정이다.

304 스테인리스강은 통상 용접입열에 의해 예민화(Sensitization) 온도 구간에 가열된 열영향부(Heat affected zone, HAZ)에서 결정립계에 크롬(Cr) 탄화물이 석출하여 입계 근처에서 내식성에 효과적인 크롬 함

량이 낮은 크롬 결핍(Chrome Depletion)이 나타나 소위 예민화 현상(Sensitization phenomena)이 발생하여 이 부위에서 선택적으로 부식되는 문제점을 가지고 있다²⁾.

이에 따라, 원자력 규제 요건보다 높은 탄소 함량을 함유한 304 스테인리스강 모재(0.074 wt.%C)에 60kJ/in 보다 높은 용접입열량을 적용하여 플럭스코어드 아크용접(FCAW)으로 시편 용접을 수행한 후, 비파괴특성, 기계적 성질, 화학 조성, 조직 관찰 및 입계 부식 현상을 시험을 통하여 조사하였다. 특히, 용접 열영향부에서 관찰된 부식 특성을 온도 분포 해석을 통해 예민화 경향을 분석하였다. 또한, 원자력 규제 요건과 유사한 탄소 함량을 가진 304 스테인리스강 모재(0.064 wt.%C)에 60kJ/in 보다 높은 용접입열량을 적용하여 입계 부식 저항성을 확인하여 실제의 현장 용접에 대한 원자력 규제 요건을 실증 실험을 통해 입증하는 계기가 되고자 하였다.

2. 실험 준비 및 방법

2.1 시료 및 용접변수

실험에 사용한 304 스테인리스강 시료는 원자력 산업에서 탄소(C) 함량의 규제 요건인 Max. 0.065wt.%C 보다 높은 탄소함량을 가진 0.074wt.%C의 ASTM A182 F304H를 적용하고, 용접입열량도 원자력 규제 요건인 Max. 60 kJ/in 보다 높은 Min. 60 kJ/in을 적용함으로써, 입계 부식에 미치는 영향을 한층 더 엄격한 조건에서 실험을 하였다. ASTM A182 F304H 시료의 화학 성분 및 기계적 물성치는 Table. 1 및 Table. 2에 나타내었다.

시료의 두께는 10mm (Coupon No.1) 및 40mm (Coupon No.2)로 준비하여 Min. 60 kJ/in 용접입열량이 얇은 두께와 두꺼운 두께에 미치는 영향을 검토하였으며, 실제 산업 현장에서 널리 적용되고 있는 한 쪽면 개선 각도 30° 인 Single V Groove 개선 형상을 가진 시료를 폭 150mm 및 길이 400mm로 준비하였다. Coupon No.1 및 Coupon No.2의 시료에 대한 치수 및 개선 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

플럭스 코어드 아크 용접을 위해 용가재는 ASME Section II Part C SFA-5.22³⁾ 적용 규격에 따른 E308LT1-1를 적용하였으며, 화학 성분 및 기계적 물성치는 Table. 3 및 Table. 4에 나타내었다.

Table. 1 Chemical compositions of ASTM A182 F304H

Comp. (wt.%)	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
Spec. (ASTM)	0.04~ 0.10	Max. 2.00	Max. 0.045	Max. 0.030	Max. 1.00	8.0~ 11.0	18.0~ 20.0
Actual	0.074	1.405	0.0313	0.0130	0.455	8.44	18.53

Table. 2 Tensile properties of ASTM A182 F304H

Property	Tensile Strength (ksi)	Yield Strength (ksi)	Elongation (%)
Spec. (ASTM)	Min. 75	Min. 30	Min. 30
Actual	88.2	46.3	61.1

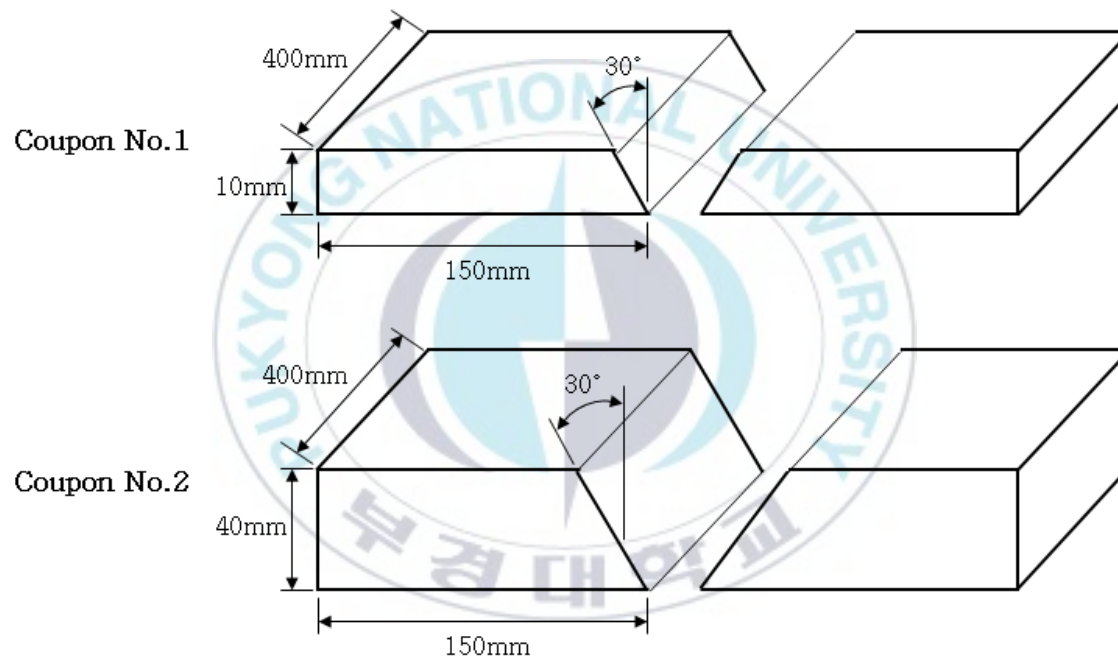


Fig. 1 Dimension and groove feature of test coupons for welding

Table. 3 Chemical compositions of E308LT1-1

Comp. (wt.%)	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	Co	Ti	V	N	Cb+Ta
Spec. (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	-	-	-	-	-
Actual	0.018	19.8	9.8	0.02	1.65	0.65	0.016	0.011	0.02	0.02	0.047	0.070	0.076	0.033

Table. 4 Tensile properties of E308LT1-1

Property	Tensile Strength (ksi)	Yield Strength (ksi)	Elongation (%)
Spec. (ASME)	Min. 75	-	Min. 35
Actual	81	56	46

용접방법은 오스테나이트 스테인리스강의 대표적인 반자동 용접인 플럭스 코어드 아크 용접 (FCAW)⁴⁾을 적용하였으며, 상세한 용접변수는 Table. 5에 나타내었다.

Table. 5 Welding conditions of Coupon No. 1 & 2

Parameters	Welding conditions
Welding process	FCAW
Filler metal	E308LT1-1 (Ø 1.2mm)
Welding heat input	Min. 60kJ/in
Preheat temperature	Min. 16℃
Interpass temperature	Max. 175℃
Shielding gas	CO ₂ 100%
Welding position	Flat

Coupon No.1 (시료 두께 10mm)는 총 5패스를 60.8~61.7kJ/in의 입열량으로 용접을 하였으며, Coupon No.2 (시료 두께 40mm)는 총 22패스를 62.0~62.5kJ/in의 입열량으로 용접을 하였다. 고입열량에 따른 루트 부위의 용락을 방지하기 위해 초층 혹은 둘째층은 Min. 60kJ/in보다 낮은 실제 현장에서 적용하는 용접입열량을 사용하였으며, 실험 영역에서 배제하였다. 단, 시료의 전 두께를 대상으로 시험하는 비파괴시험, 매크로 조직 관찰, 굽힘시험 및 인장시험에는 루트 부위를 포함하였다.

2.2 시험편 레이-아웃 및 가공

Coupon No.1 및 Coupon No.2의 용접 시험편은 ASME Section IX³⁾ 코드 요건에 따라, Fig. 2와 같이 시험편을 레이-아웃 및 가공을 수행하였다.

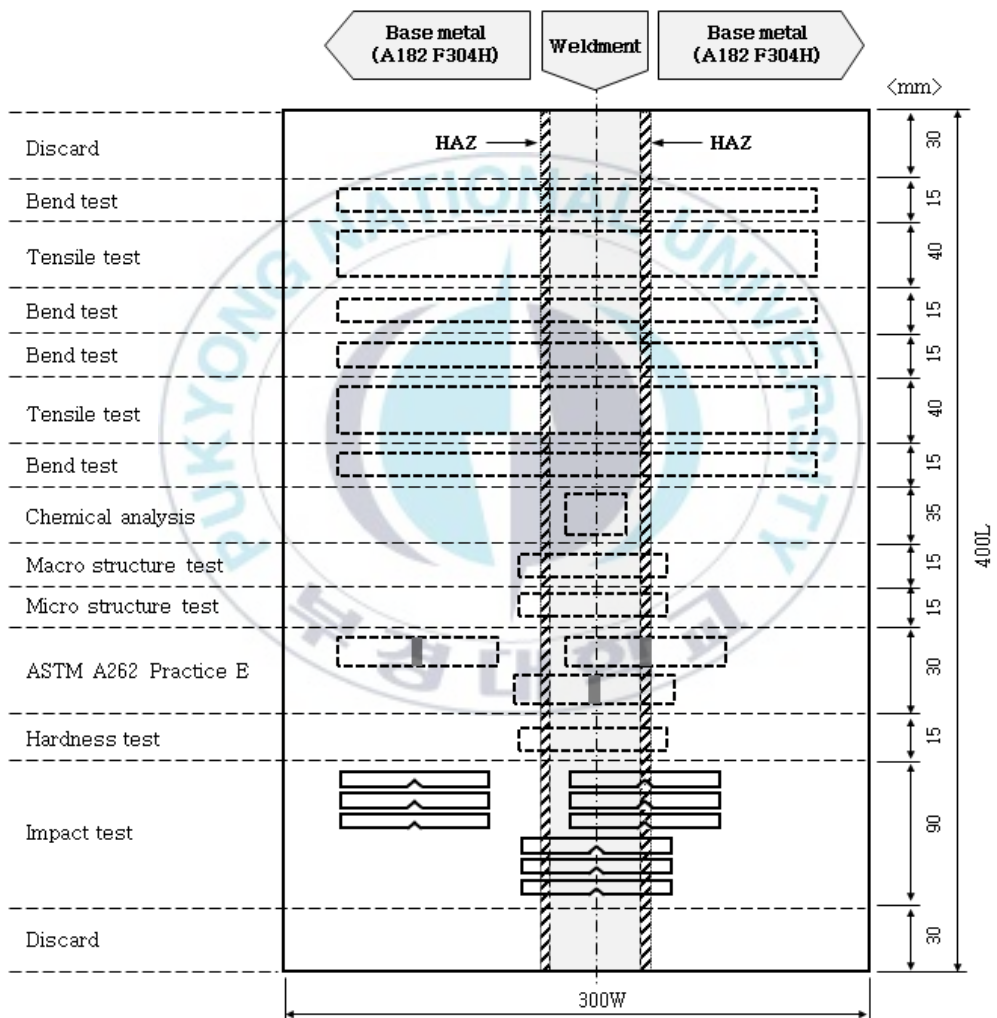


Fig. 2 Schematic lay-out drawing for machining of test specimens

2.3 실험 방법

2.3.1 비파괴시험

Coupon No.1 (시료 두께 10mm) 및 Coupon No.2 (시료 두께 40mm)의 용접 시편에 ASME Section III 및 V³⁾의 비파괴시험 코드 요건에 따라 액체침투탐상시험(PT), 방사선투과시험(RT) 및 초음파탐상시험(UT)을 수행하여 용접부의 결함 여부 및 건전성을 평가하였다.

2.3.2 기계적 성질 시험

1) 굽힘 시험

ASME Section IX QW-462.2³⁾에 따라 각 4개의 굽힘시험편을 가공한 후, 용접부 단면 전체가 굽힘 변형을 받도록 Fig. 3과 같이 ASME Section IX QW-160³⁾에 따라 측면을 180° 각도로 꺾는 횡 측면 굽힘 시험(Transverse Side Guided Bend Test)을 수행하였다.

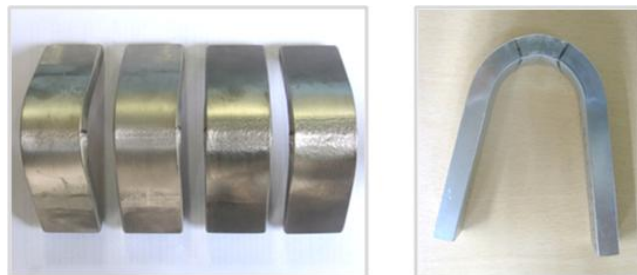


Fig. 3 Feature of specimens of transverse side guided bend test

2) 인장 시험

ASME Section IX QW-462.1(a)³⁾에 따라 각 2개의 인장시험편을 가공한 후, Fig. 4와 같이 ASME Section IX QW-150³⁾에 따라 횡 인장 시험 (Transverse Tension Test)을 수행하였다.

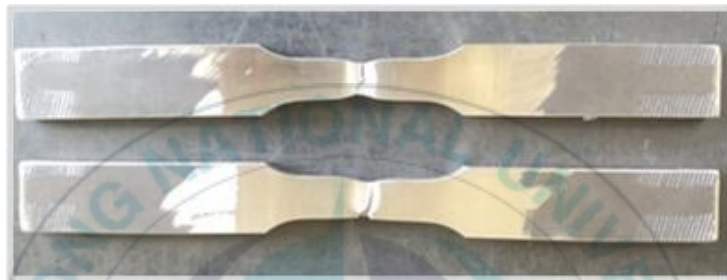


Fig. 4 Feature of specimens after transverse tension test

3) 경도 시험

ASTM E384-16⁵⁾ 코드에 따라 면삭 및 연마 가공된 시험편에서 용접금속, 열영향부 및 모재 경계를 확인하기 위해 3μ Diamond paste를 통해 폴리싱을 한 후, Chromic acid로 에칭을 하여 경도 측정용 시험편을 준비하였다. Fig. 5와 같이 모재 표면 직하의 1mm 선상에서 용접금속 및 모재는 1mm 간격으로 5군데와 열영향부는 0.5mm 간격으로 3군데를 하중 10kgf의 마이크로 비커스 경도기(Micro vickers hardness tester)로 경도 분포를 측정하였다.

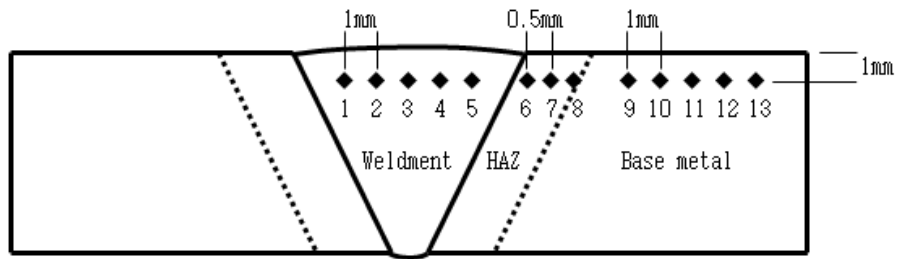


Fig. 5 Measurement positions of hardness test

4) 충격 시험

Fig. 6과 같이 ASME Section II Part A SA370 Fig. 11(a)³⁾에 따라 Charpy V-notch type A 시편을 가공하여 용접금속 3개, 열영향부 3개 및 모재 3개의 총 9개 시험편을 준비하였다.

원자력 주기의 가동중 Lowest service temperature인 1.6℃ 및 극저온 인성 확인을 위한 -196℃를 시험 온도로 설정하여 ASME Section II Part A SA370³⁾에 따라 Charpy V-notch 충격시험을 수행하였다.

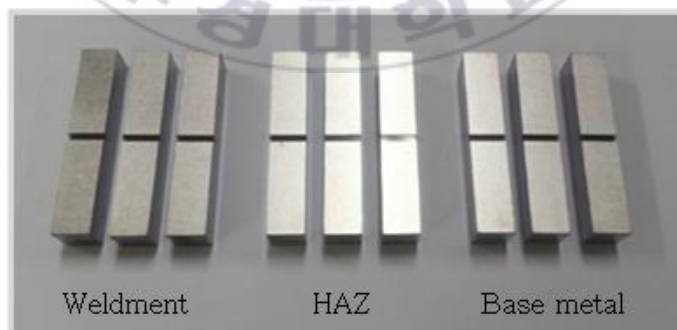


Fig. 6 Specimen shape for charpy V-notch impact test (Notch 2mm)

2.3.3 화학성분 분석 및 델타 페라이트 측정

용접부 표면부를 면삭 및 연마 기계가공을 한 후, Spectro emission 방법으로 화학성분을 분석하였으며, 용접금속에서 분석하는 화학원소의 종류는 ASME Section II Part C SFA-5.22 E308LT1-1³⁾ 용가재 요건인 C, Cr, Ni, Mo, Mn, Si, P, S, Cu, Co, Ti, V, N, Cb+Ta, Al, Cb의 총 16종을 대상으로 하였다.

용접부에 Ferrite Gauge를 접촉하여 측정하는 Magnetic measurement 및 용접부의 시료를 채취하여 화학성분 분석을 하는 Chemical analysis 을 수행하여 용접금속의 델타 페라이트(δ -Ferrite)를 측정하였다.

Magnetic measurement에 따른 Ferrite Gauge의 측정 위치는 ASME Section III³⁾ 코드 요건에 따라 Fig. 7과 같이 Ferrite number (FN)를 6 개소의 위치에 매 개소마다 6번을 측정하여 평균값으로 확인하였다.

Chemical analysis 방법은 2.3.3 (1)항에서 수행한 용접금속의 화학 성분 분석 결과를 활용하여 Fig. 8의 WRC-1992 Diagram⁶⁾에 따른 Ni 당량 및 Cr 당량을 구한 후, Ferrite number (FN)를 결정하였다.

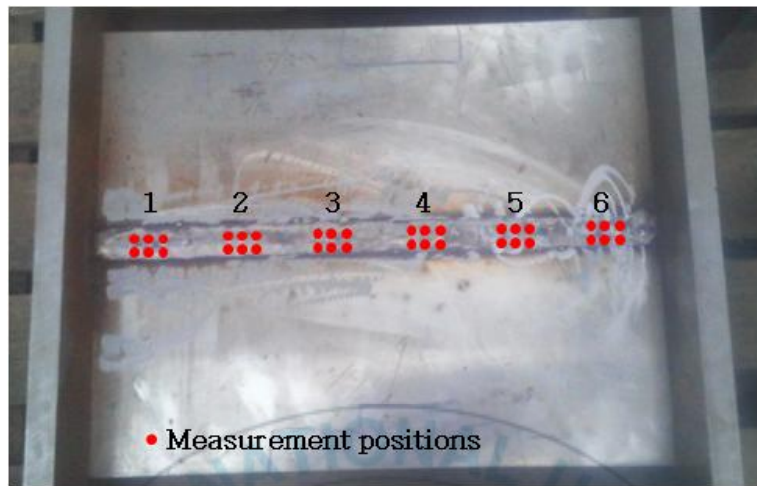


Fig. 7 Ferrite measurement positions by magnetic measurement

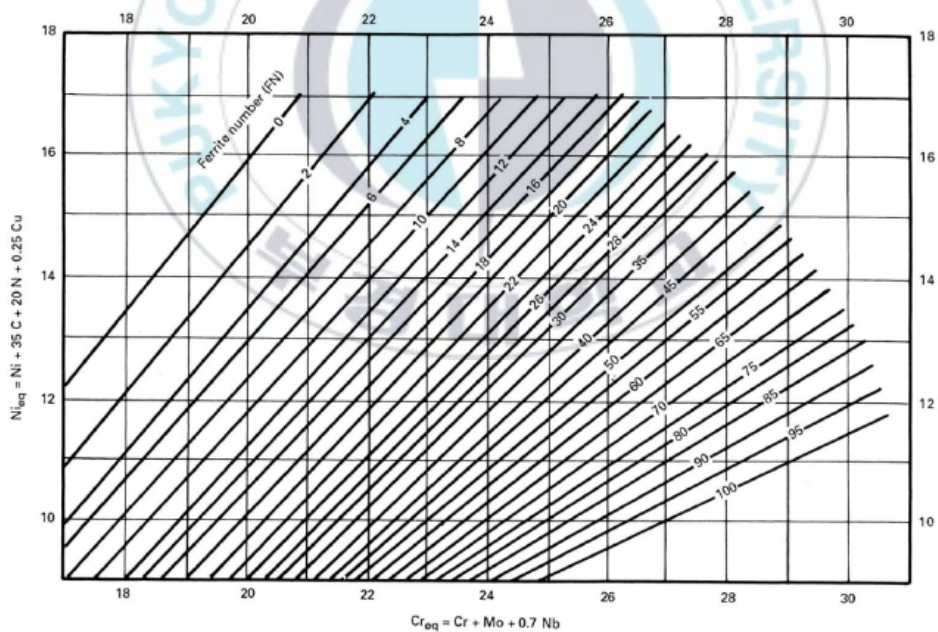


Fig. 8 WRC-1992 Diagram of ASME Section III NB Code

2.3.4 용접부의 조직 관찰

ASTM E3-11⁷⁾ 코드에 따라 조직 시험편을 3 μ Diamond paste를 통해 폴리싱을 한 후, Chromic acid로 에칭을 한 표면에 10 배율로 Macro structure를 관찰하였으며, 조직 시험편을 1 μ Diamond paste를 통해 폴리싱을 한 후, Chromic acid로 에칭을 한 표면에 200 배율로 Micro structure를 관찰하였다.

용접금속, 열영향부 및 모재를 대상으로 Macro structure 검사를 통한 용접 결함을 확인하고, Micro structure 검사를 통한 조직학적인 미세 균열이나 불연속부의 존재 여부를 확인하였다.

2.3.5 입계부식 시험

오스테나이트 스테인리스강의 크롬(Cr) 탄화물 석출에 따른 입계 부식(Intergranular corrosion)의 민감도를 조사하고 확인할 목적으로 원자력 분야에서 일반적으로 적용하고 있는 ASTM A262 입계부식 시험⁸⁾ 요건에 따라, Coupon No.1 (시료 두께 10mm) 및 Coupon No.2 (시료 두께 40mm)에 Min. 60kJ/in의 용접입열량을 적용한 시편을 Fig. 9와 같은 시험편 형상으로 만든 후, 입계부식시험을 수행하여 예민화 현상(Sensitization phenomena)을 고찰하였다⁹⁾.

ASTM A262 입계 부식 시험은 Practice A 또는 Practice E 시험을 요구하고 있으며, Practice A 시험에서 불합격 조직의 모호한 평가 기준으로 인해 실제 산업 현장에서는 일반적으로 굽힘 시험을 통해서 균열이나 터짐 여부로 평가가 용이한 Practice E 시험을 수행한다. 이러한 측면을 고려하여 본 실험에서는 ASTM A262 Practice E 시험을 수행하여 용접 열영향부의 입계 부식 특성을 평가하였다.

Practice E는 Copper sulfate ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 100g을 700ml 증류수에 완전 용해를 시킨 후, 100ml의 Sulfuric acid(H_2SO_4)를 추가 투입하여, 최종적으로 1,000ml의 증류수에 희석시킨 용액에 시험편을 장입하여 최소 15시간 동안 끓인 다음, Fig. 9와 같이 굽힘 시험을 수행하여 5~20 배율로 균열 발생 여부를 확인하였다.



Fig. 9 Specimen features of ASTM A262 Practice E intergranular corrosion test

Coupon No.1 및 Coupon No.2의 탄소 함량 0.074wt.%C의 열영향부 시험편의 ASTM A262 Practice E 요건에 대한 예비 시험 결과, 불합격으로 판정이 되어 원자력 탄소 함량 규제 요건인 Max. 0.065wt.%C의 입계 부식 저항성에 대한 입증이 필요하게 되었다.

이에 따라, Coupon No.3 (시료 두께 10mm) 및 Coupon No.4 (시료 두께 40mm)의 탄소 함량 0.064wt.%C인 ASTM A240 Type 304 모재에 Coupon No.1 및 Coupon No.2의 시편 두께, 용접방법, 용가재, 용접입열량(Min. 60kJ/in) 등 시편 형상 및 용접 조건을 동일하게 하여 용접 시편을 제작한 후, 조직 관찰 및 입계부식시험을 추가로 수행하였다.

이러한 추가 시험을 위해, Coupon No.3은 총 3패스를 60.1~62.2kJ/in의 입열량으로 용접을 하였으며, Coupon No.4는 총 21패스를 61.0~62.4kJ/in의 입열량으로 용접을 하였다.

조직 관찰을 위해 Coupon No.3 및 Coupon No.4에서 채취한 시험편을 3 μ Diamond paste를 통해 폴리싱을 한 후, Chromic acid로 에칭을 한 표면에 10 배율로 Macro structure를 관찰하였으며, 용접금속, 열영향부 및 모재를 대상으로 용접 결함의 존재 여부를 확인하였다.

입계부식시험을 위해 Coupon No.3 및 Coupon No.4에서 채취한 시험편을 ASTM A262 Practice E⁸⁾ 요건에 따라 준비 및 시험을 한 후, 그 결과를 Coupon No.1 및 Coupon No.2와 비교 분석을 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 비파괴시험에 의한 결함 평가

Coupon No.1 (시료 두께 10mm) 및 Coupon No.2 (시료 두께 40mm)의 용접 시편에 ASME Section III 및 V³⁾ 코드에 따라 비파괴시험 결과를 평가한 결과, Table. 6과 같이 고 탄소 함량의 모재에 높은 용접입열량을 적용하여도 건전한 용접부를 형성함을 확인하였다.

액체침투탐상시험(PT) 결과 어떠한 균열이나 선형지시가 검출되지 않았으며, 방사선투과시험(RT) 결과 모든 종류의 균열, 용융불량 및 용입불량의 특성을 갖는 지시가 검출되지 않았다. 또한, 수직빔(0°) 및 사각빔(45° , 60° 및 70°)의 빔 각도를 갖는 초음파탐상시험(UT) 결과 길이에 관계없이 균열, 용융부족 및 용입불량의 특성을 갖는 지시가 검출되지 않았으며, 총 4종류의 빔 각도를 갖는 초음파탐상시험을 통해 모재 표면에 평행하게 위치한 결함, 경사를 갖는 결함 및 수직으로 위치한 결함이 존재하지 않음을 확인하였다.

Table. 6 The evaluation results of non-destructive test

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

3.2 기계적 성질 평가

3.2.1 굽힘 성질 특성

ASME Section IX QW-163³⁾의 굽힘 시험 평가 기준에 따라 3mm를 초과하지 않는 터진 불연속부가 없는 경우 합격이 되며, 각 4개의 시험편을 측면 횡 굽힘 시험을 한 결과, Table. 7과 같이 어떠한 터진 불연속부도 관찰이 되지 않았다.

3.2.2 인장 강도 특성

ASME Section IX QW-153³⁾의 인장 시험 평가 기준에 따라 모재의 최소 인장 강도 이상의 값을 가지는 경우 합격이 되며, 각 2개의 시험편을 횡 인장 시험을 한 결과, Table. 8과 같이 595~603 MPa의 인장강도 값을 얻어 A182 F304H의 최소 인장 강도값인 515 MPa을 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 경도기로 경도 분포를 측정한 결과, Table. 9와 같이 모재의 187~199HV 경도치와 용접금속 및 열영향부의 172~197HV 경도치가 유사한 값을 보이고 있어, 고 탄소 함량 모재 및 높은 용접입열량의 적용에 의해 경화 조직의 생성이 없는 것을 확인하였다.

Table. 7 The results of transverse side guided bend test

Coupon No.	Specimen #1	Specimen #2	Specimen #3	Specimen #4	Test Results
1	No open discontinuity	No open discontinuity	No open discontinuity	No open discontinuity	Accept
2	No open discontinuity	No open discontinuity	No open discontinuity	No open discontinuity	Accept

Table. 8 The results of transverse tension test

Coupon No.	Specimen No.	Test Temp. (°C)	Tensile strength (MPa)		Test Results
			Spec.(ASTM)	Actual	
1	#1	20	515	603	Accept
	#2	20	515	601	Accept
2	#1	20	515	595	Accept
	#2	20	515	595	Accept

3.2.4 충격 강도 특성

원자력 주기기의 가동중 Lowest service temperature인 1.6°C 를 시험 온도로 설정하여 충격시험을 수행하는 경우 흡수에너지가 Min. 67.7J 이상이 되면 합격이 된다. 해당 온도에서 Coupon No.1 및 Coupon No.2에 대해 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 나타났다. 이러한 결과는 일반적인 온도에서 상당히 높은 인성을 갖는 304 스테인리스강의 재질 특성을 나타내는 것을 의미한다.

추가적으로 304 스테인리스강 재질의 극저온 인성 특성을 확인하기 위해 -196°C 에서 충격시험을 수행하였다. 시험 온도인 -196°C 의 극저온에서의 합격 기준은 제시되고 있지 않으나, Table. 10과 같이 열영향부 및 모재에서 양호한 충격 인성값을 확인하였다. 단, 용접금속은 실험에 사용한 페라이트 조직을 포함한 용가재의 특성과 극저온 인성을 갖는 용가재는 오스테나이트 조직을 갖는 측면을 고려할 때, 용접금속은 평가 대상에서 제외하였다.

Table. 9 The results of micro vickers hardness test

Coupon No.	Measurement positions (HV, Avg.)		
	Weldment	HAZ	Base metal
1	174	185.7	192
2	179	196.3	192.8

Table. 10 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

3.3 화학성분 및 델타 페라이트 평가

용접금속에 대한 화학성분 분석을 수행한 결과, Table. 11과 같이 ASME Section II Part C SFA-5.22³⁾의 E308LT1-1 용가재 화학 조성 요건을 만족하였다.

실험에 사용된 모재는 0.074wt.%C 탄소 함량을 가진 고 탄소 등급(High carbon grade)임에도 불구하고 E308LT1-1 용가재를 적용한 용접금속은 Max. 0.03% 탄소함량을 가진 저 탄소 등급(Low carbon grade)를 확보할 수 있었다. 또한, 높은 용접입열량에 따라 희석률(Dilution ratio)이 증가하여 모재의 고 탄소 영향으로 용접금속의 탄소 함량 결과가 높을 것으로 예상하였으나, Min. 60kJ/in의 용접입열량에서는 모재의 탄소 함량이 용접금속의 탄소 함량에 미치는 영향이 미미함을 확인하였다.

용접금속에 대한 Magnetic measurement 및 Chemical analysis 방법에 따라 측정된 델타 페라이트 함량은 Table. 12와 같으며, 원자력 델타 페라이트 규제 요건인 8~15 FN을 만족하고 있어 고온 균열(Hot cracking)에 대한 저항성이 충분한 것으로 나타났다.

용접에 사용된 E308LT1-1용가재의 델타 페라이트 함량이 8.3~8.5 FN 인 점을 고려할 때, Table. 12와 같이 용접금속의 델타 페라이트 함량이 9.2~10.7 FN으로 측정되어 큰 차이가 없이 안정적인 결과가 나타났다.

반면, 2.3.3 (2)항의 Fig. 8 WRC-1992 Diagram에 따르면 C는 Ni 당량의 증가에 큰 요인으로 작용하여 FN 값을 감소시키는 화학성분으로 알려져 있어 탄소 함량이 높은 모재의 경우, 용착금속의 FN 값을 감소시키는 영향을 미칠 것으로 예상이 되었다. 그러나 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.

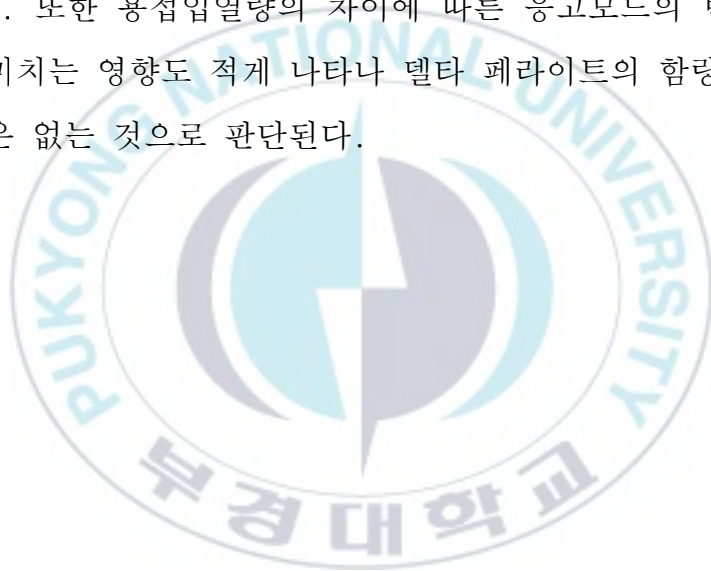


Table. 11 The chemical analysis compositions of weldment

Comp. (wt.%)	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	Co	Ti	V	N	Cb+Ta
Spec. (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	0.026	0.040	0.052	0.034	0.028
Coupon No.2	0.024	19.74	9.65	0.02	1.19	0.56	0.019	0.013	0.04	0.03	0.040	0.06	0.042	0.015

Table. 12 The 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

3.4 조직 관찰 특성

시험편을 10 배율로 용접금속, 열영향부 및 모재의 Macro structure를 관찰한 결과, Photo 1 및 Photo 2와 같이 균열, 기공, 용융불량, 용입불량 및 슬래그 혼입등의 특성을 갖는 결함이 확인되지 않았다.

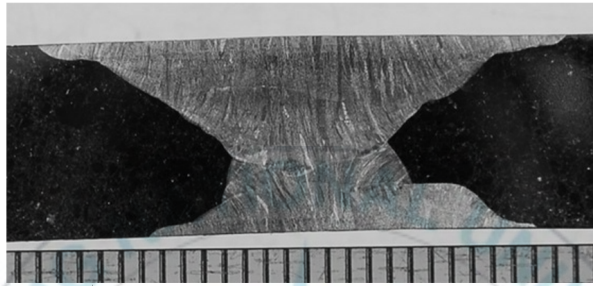


Photo 1 Macro structure of coupon No.1 (x10)

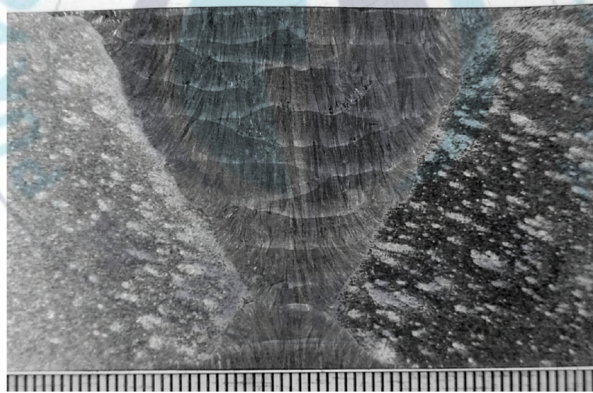


Photo 2 Macro structure of coupon No.2 (x10)

시험편을 200 배율로 용접금속, 열영향부 및 모재의 Micro structure를 관찰한 결과, Photo 3 및 Photo 4와 같이 조직학적인 미세 균열이나 불연속부는 확인되지 않았다.

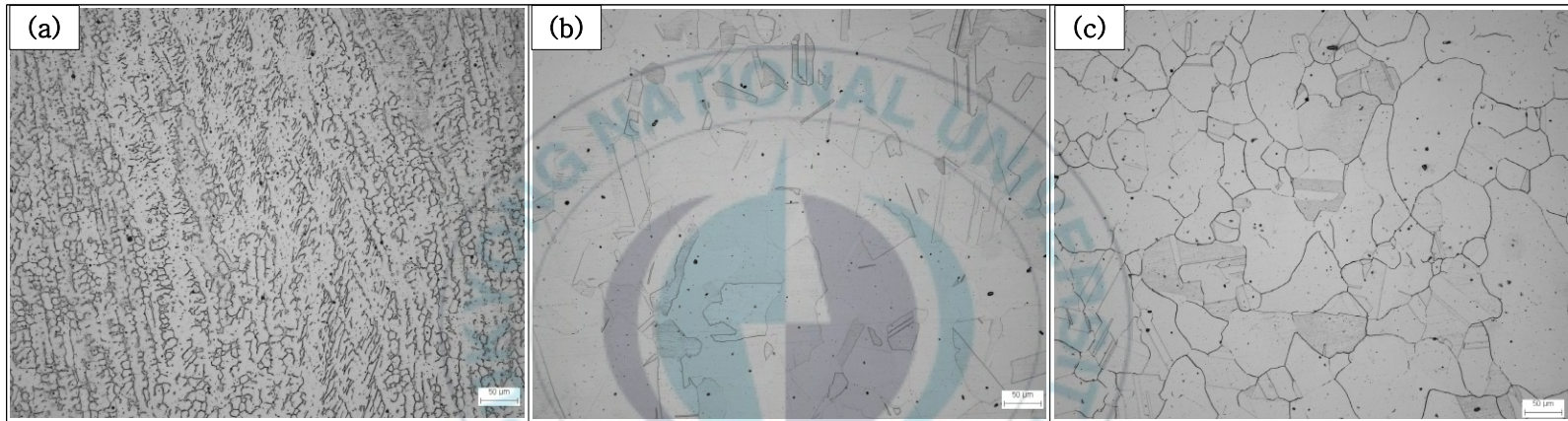


Photo 3 Micro structure of coupon No.1 (x200)

(a) Weldment (b) HAZ (c) Base metal

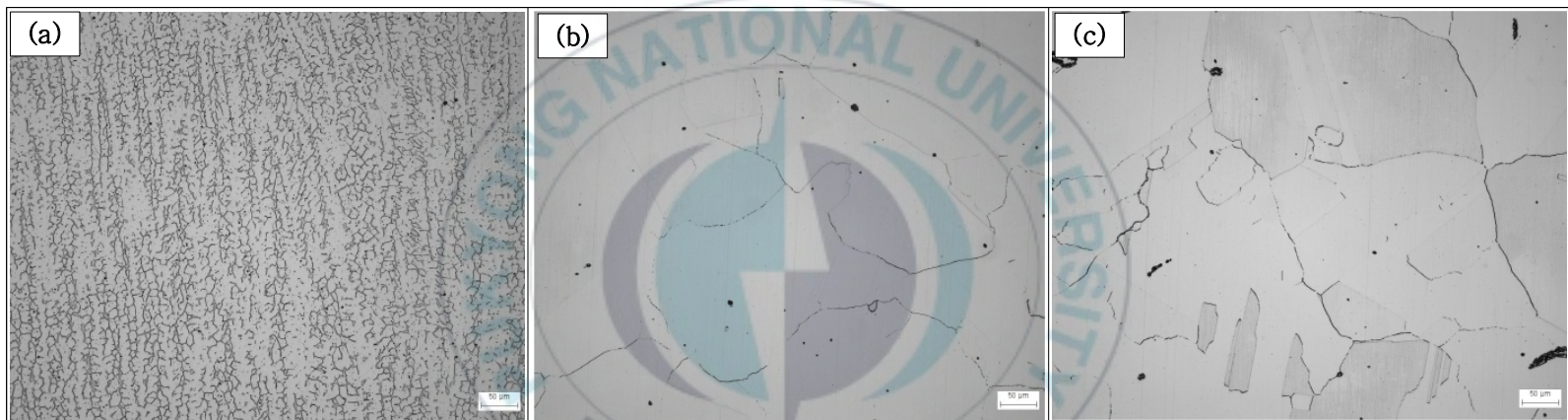


Photo 4 Micro structure of coupon No.2 (x200)

(a) Weldment (b) HAZ (c) Base metal

3.5 입계 부식 특성 평가

3.5.1 ASTM A262 코드의 입계 부식 평가 기준

ASTM A262 Practice E 시험⁸⁾에서는 굽힘 시험 결과, Photo 5와 같이 균열이나 터짐의 존재 여부에 따라 합격 평가 기준을 제시하고 있으며, Passing test specimen 및 Failing test specimen으로 구분하고 있다.

3.5.2 스테인리스강(0.074wt.%C)의 입계 부식 특성 평가

원자력 탄소 함량의 규제 요건인 Max. 0.065wt.%C 보다 높은 탄소 0.074wt.%C 함량의 오스테나이트 스테인리스강 모재에 Min. 60kJ/in 용접입열량을 적용한 용접 시편의 ASTM A262 Practice E 시험의 결과를 Table. 13과 같이 나타내고 있다.

Table. 13 ASTM A262 Practice E test results for coupon No.1 & No.2

Coupon No.	Coupon Thick.	Test Locations		
		Weldment	HAZ	Base metal
1	10mm	Accept	Accept	Accept
2	40mm	Accept	Reject	Accept

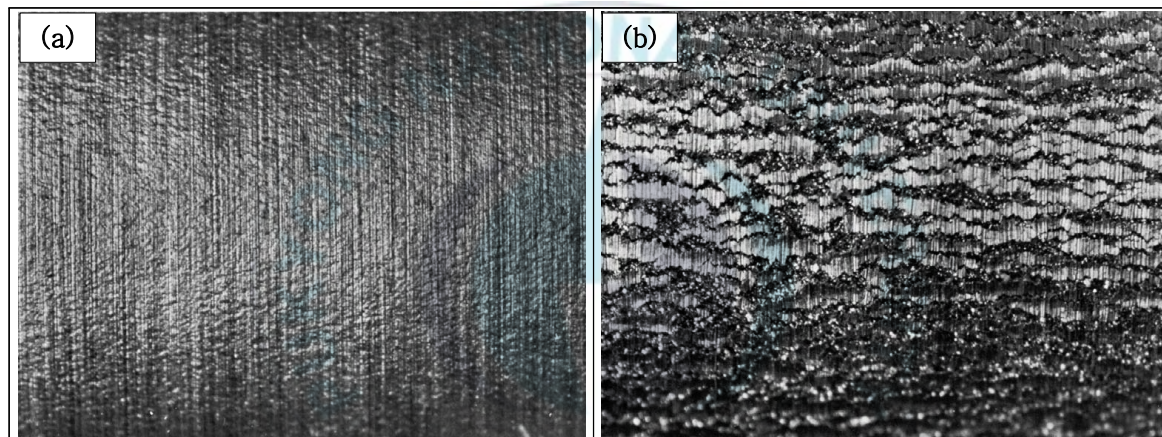


Photo 5 View of the Bent Area by ASTM A262 Practice E test

(a) Passing test specimen (x20) (b) Failing test specimen (x20)

Table. 13의 ASTM A262 Practice E 시험 결과는 Photo 6에서 시편 두께 10mm의 용접금속, 열영향부 및 모재에서 균열이나 터짐이 관찰되지 않아 합격 조직을 보여 주고 있다. Photo 7에서 시편 두께 40mm의 용접 금속 및 모재는 균열이나 터짐이 없어 합격이 되었으나, 열영향부에서는 균열이 관찰되어 불합격 조직을 보여 주고 있다.

Photo 7에서 균열이 관찰된 열영향부의 불합격 조직에 대해 상세 관찰을 한 결과, Photo 8과 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.

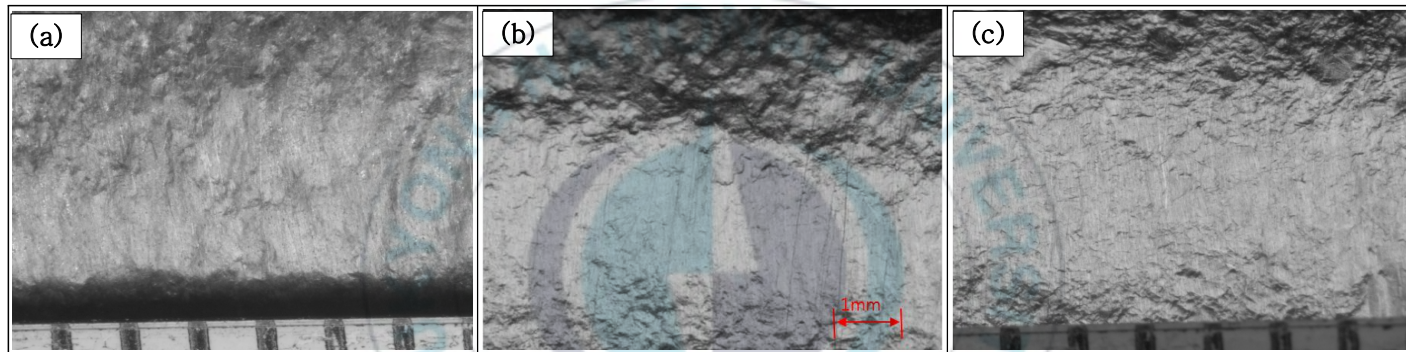


Photo 6 View of the bent area of coupon No.1 by ASTM A262 Practice E test (x10)

(a) Weldment (b) HAZ (c) Base metal

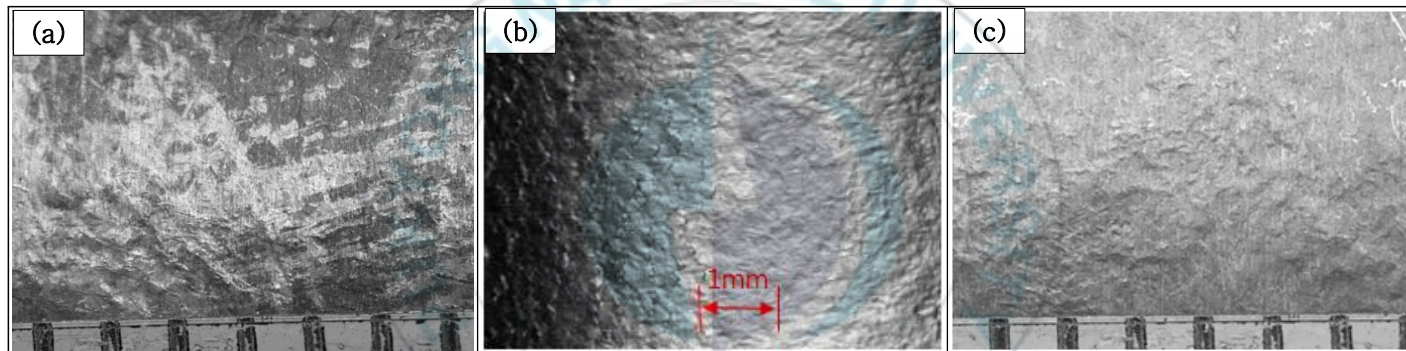


Photo 7 View of the bent area of coupon No.2 by ASTM A262 Practice E test (x10)

(a) Weldment (b) HAZ (c) Base metal

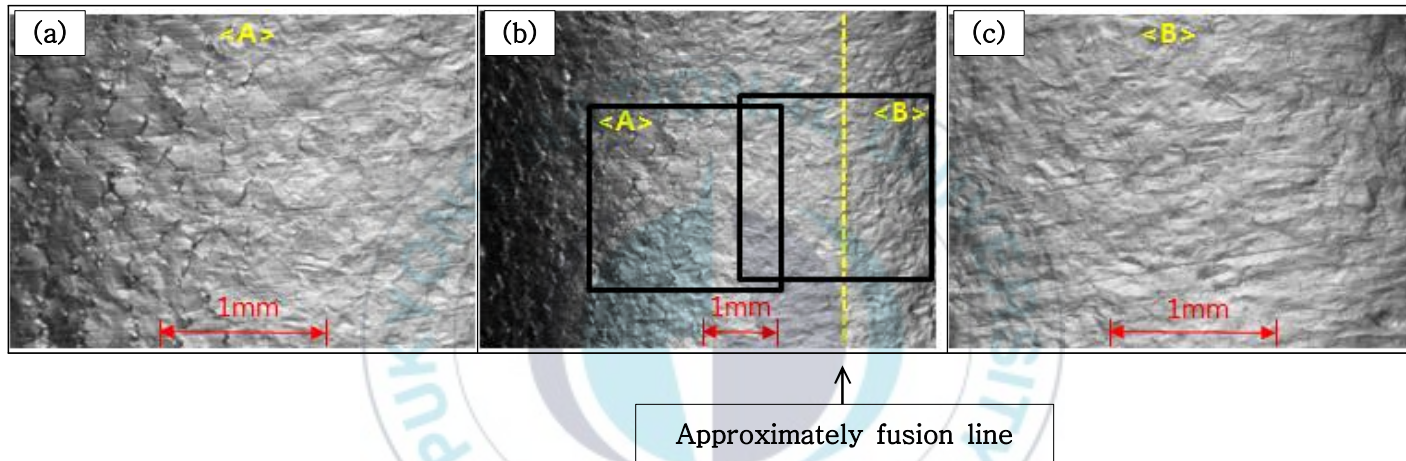


Photo 8 Detail view of HAZ on the bent area of coupon No.2 by ASTM A262 Practice E test (x10)

(a) 2mm over HAZ from fusion line (b) HAZ of Photo 7 (c) HAZ near fusion line

3.5.3 스테인리스강(0.074wt.%C)의 입계 부식 특성 고찰

탄소 함량 0.074wt.%C인 고탄소 등급의 오스테나이트 스테인리스강 모재에 Min. 60kJ/in의 용접입열량을 적용한 시료에 수행된 ASTM A262 Practice E 시험을 통하여 입계부식을 고찰한 결과를 요약하였다.

1) 저 탄소 함량 Max. 0.03wt.%C의 용가재가 적용된 용접금속은 Practice E 시험에서 합격이 되어 입계 부식에 저항성이 있는 조직으로 관찰되었으며, 이는 고 탄소 함량의 스테인리스강과 비교하여 상대적으로 적은 Cr 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 판단되었다¹⁰⁾.

2) 탄소 함량이 높은 0.074wt.%C의 시편에서 용접에 따른 열영향부의 Practice E 시험 결과, 용융경계선 근처의 열영향부는 균열이나 터짐이 관찰되지 않은 반면, 용융경계선으로부터 2mm 이상 떨어진 열영향부에서 균열이 관찰되어 특정 위치에서 입계 부식에 취약한 것

으로 나타났다. 이는 용융경계선으로부터 2mm 이상 떨어진 열영향부는 예민화가 쉽게 발생할 수 있는 온도와 시간적인 조건이 충족되었기 때문이라고 판단되며, 이러한 현상은 304 오스테나이트계 스테인리스강에서 잘 알려진 용접쇠약(Weld decay)의 전형적인 현상이다¹⁰⁾.

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

3.5.4 스테인리스강(0.064wt.%C)의 입계 부식 특성 평가

탄소 함량 0.074wt.%C 시편에서 열영향부의 ASTM A262 Practice E 시험이 불합격 판정이 됨에 따라, 원자력 탄소 함량 규제 요건인 Max. 0.065wt.%C의 입계 부식 저항성에 대한 입증이 요구되었다.

이를 위해 탄소 함량 0.064wt.%C를 가진 ASTM A240 304의 Coupon No.3 (시료 두께 10mm) 및 Coupon No.4 (시료 두께 40mm)에 Min. 60kJ/in의 용접입열량을 적용한 시편에 조직 검사 및 입계부식시험을 수행하였다.

조직 시험편을 10 배율로 용접금속, 열영향부 및 모재의 Macro structure를 관찰한 결과, Photo 9 및 Photo 10과 같이 균열, 기공, 용융불량, 용입불량 및 슬래그 혼입 등의 특성을 갖는 결함이 확인되지 않았다.

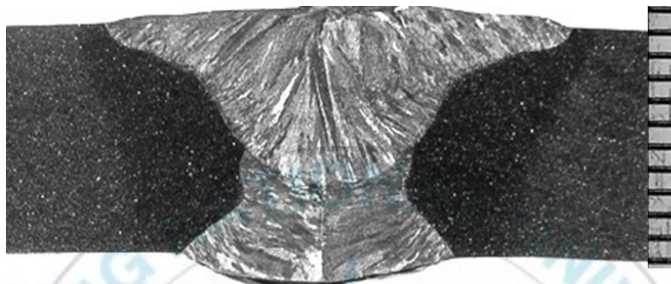


Photo 9 Macro structure of coupon No.3 (x10)

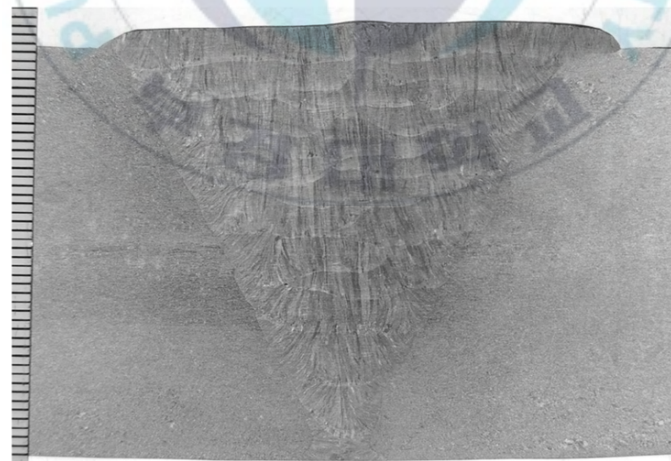


Photo 10 Macro structure of coupon No.4 (x10)

Table. 14는 탄소 함량 0.064wt.%C인 오스테나이트 스테인리스강 모재에 Min. 60kJ/in의 용접입열량을 적용한 용접 시편의 ASTM A262 Practice E의 결과를 나타내고 있으며, Photo 11 및 Photo 12와 같이 용접금속, 열영향부 및 모재의 합격 조직을 보여주고 있으며, 균열이나 떠짐이 관찰되지 않았다.

Table. 14 ASTM A262 Practice E test results for coupon No.3 & No.4

Coupon No.	Coupon Thick.	Test Locations		
		Weldment	HAZ	Base metal
3	10mm	Accept	Accept	Accept
4	40mm	Accept	Accept	Accept

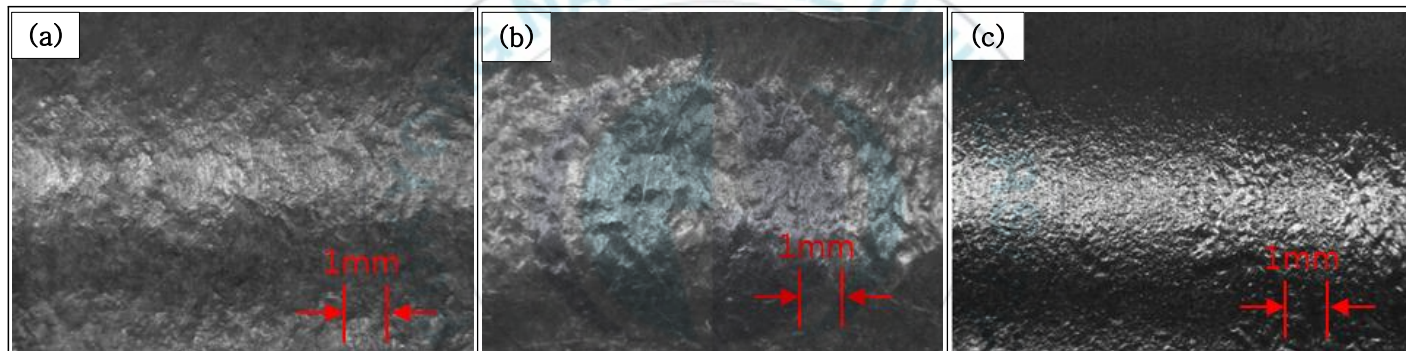


Photo 11 View of the bent area of coupon No.3 by ASTM A262 Practice E test (x10)

(a) Weldment (b) HAZ (c) Base metal

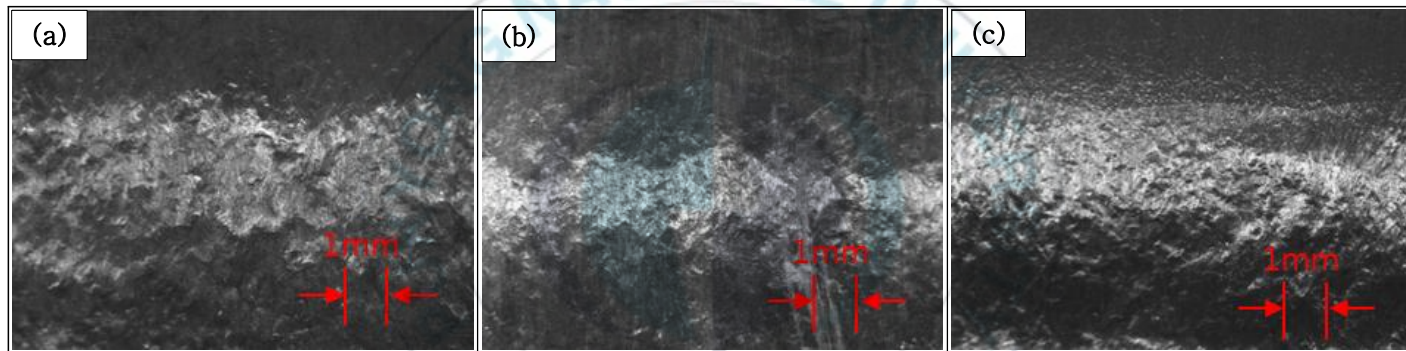


Photo 12 View of the bent area of coupon No.3 by ASTM A262 Practice E test (x10)

(a) Weldment (b) HAZ (c) Base metal

3.5.5 스테인리스강(0.064wt.%C)의 입계 부식 특성 고찰

탄소 함량 0.064wt.%C의 304계열 스테인리스강 모재에 Min. 60kJ/in의 용접입열량을 적용한 시편에 수행된 ASTM A262 Practice E 시험을 통하여 얻은 여러 가지 결과를 다음과 같이 요약하였다.

- 1) 저 탄소 함량 Max. 0.03wt.%C의 용가재가 적용된 용접금속에 대한 Practice E 시험에서 합격이 되어 입계 부식에 저항성이 있는 조직으로 확인되었다.
- 2) 고 탄소 함량 0.074wt.%C 시편의 Practice E 시험 결과, 용융경계선으로부터 2mm이상 떨어진 열영향부에서 균열이 관찰된 반면, 탄소 함량이 0.064wt.%C 시편에서 동일한 위치의 열영향부에서는 균열이나 터짐이 관찰되지 않음에 따라, 입계 부식에 미치는 직접적인 인자는 탄소 함량임을 확인하였다.
- 3) 탄소 함량이 0.064wt.%C 정도의 304계열 스테인리스강은 입계 부식의 저항성이 있음을 확인하였다.

4. 열영향부의 온도 분포 해석 및 예민화 경향 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 만족하였다.

그러나 열영향부의 ASTM A262 Practice 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.

이에 따라, 304계열 스테인리스강의 용접 입열에 따른 열영향부의 온도 분포와 예민화의 관계를 확인하기 위한 목적으로 0.074wt.%C 함량의 스테인리스강에 실제 용접한 조건과 동일하거나 혹은 유사한 값을 적용하여 SYSWELD 2014 프로그램을 통해 시편의 표면을 기준하여 용융경계선으로부터 떨어진 각 위치에서의 온도 분포 해석을 실시하였으며, 실제 적용하였던 용접 조건은 Table. 15에 나타내었다.

Table. 15 Welding conditions of coupon No.1

Parameters	Welding conditions	Remarks
Coupon material	ASTM A182 F304H	0.074 wt.%C
Coupon thickness	10mm	V-Groove
Welding process	FCAW	Semi-auto
Filler metal	E308LT1-1	Wire(Ø 1.2mm)
Welding heat input	60.8~61.7kJ/in	Total 5 Pass

ASTM A262 Practice E 시험 결과, Fig. 10과 같이 용융경계선 근처의 열영향부는 균열이나 터짐이 없는 합격 조직이 관찰되었으나, 용융경계선으로부터 2mm 이상 떨어진 열영향부는 균열이 관찰되어 입계 부식에 따른 예민화가 관찰되었다.

4.1 열영향부의 온도 분포 해석

Fig. 11의 SYSWELD 2014 프로그램을 통해 입계 부식이 시작되는 표면을 기준하여, 용융경계선 및 용융경계선으로부터 1mm 간격으로 4mm 지점까지 총 5군데에 대한 온도 분포 해석을 수행하였다. 표면의 용융경계선(Fig. 12), 표면의 용융경계선으로부터 1mm 떨어진 지점(Fig. 13), 표면의 용융경계선으로부터 2mm 떨어진 지점(Fig. 14), 표면의 용융경계선으로부터 3mm 떨어진 지점(Fig. 15) 및 표면의 용융경계선으로부터 4mm 떨어진 지점(Fig. 16)에 대한 온도 분포 해석 결과를 나타내고 있다. 예민화 영역의 온도 구간인 650~870℃ 및 용체화처리 하한선 온도인 1000℃는 Welding Metallurgy¹¹⁾를 참조하였다.

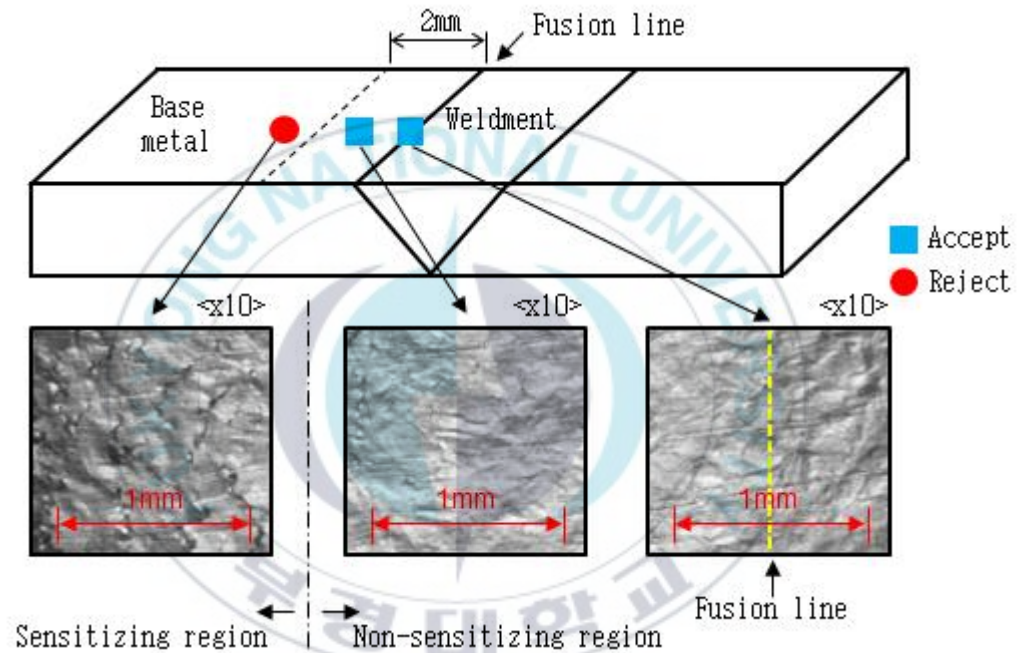


Fig. 10 The results of ASTM A262 Practice E test for 0.074 wt.%C test coupon

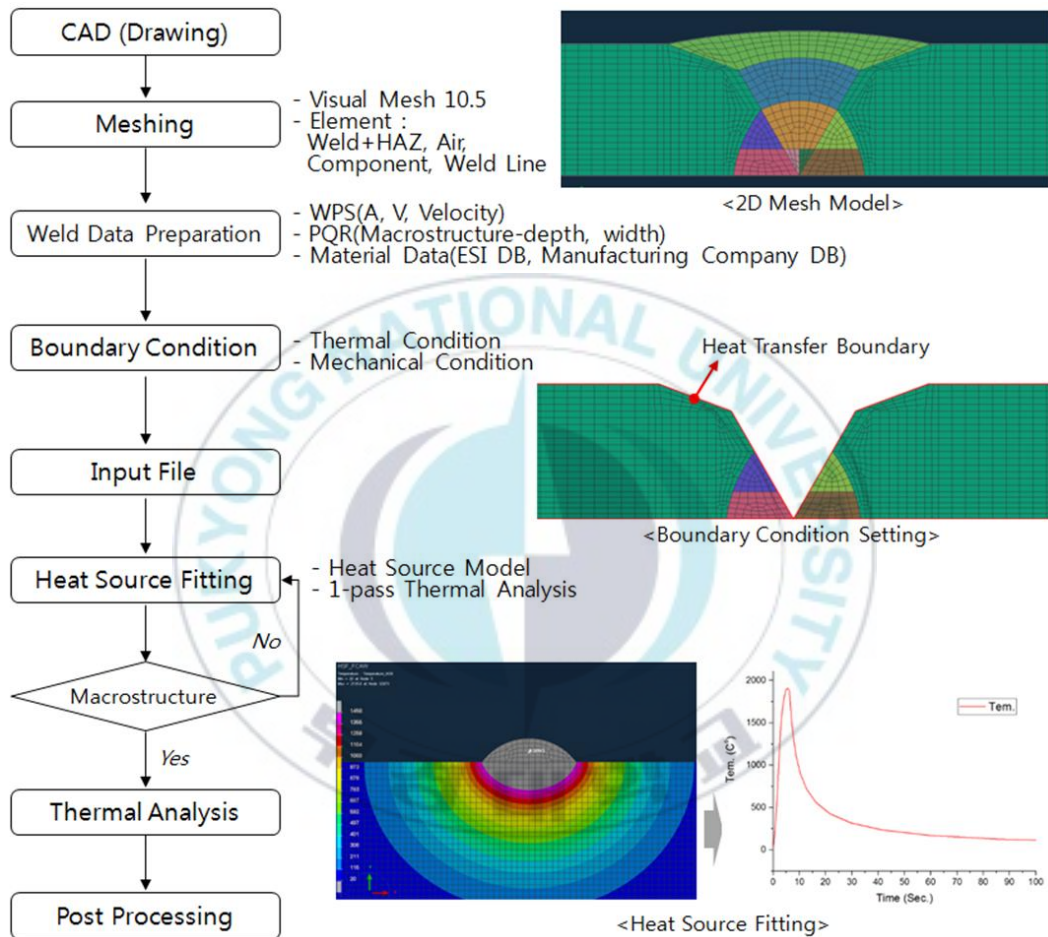


Fig. 11 Schematic sequence diagram of temperature distribution analysis by SYSWELD 2014 program

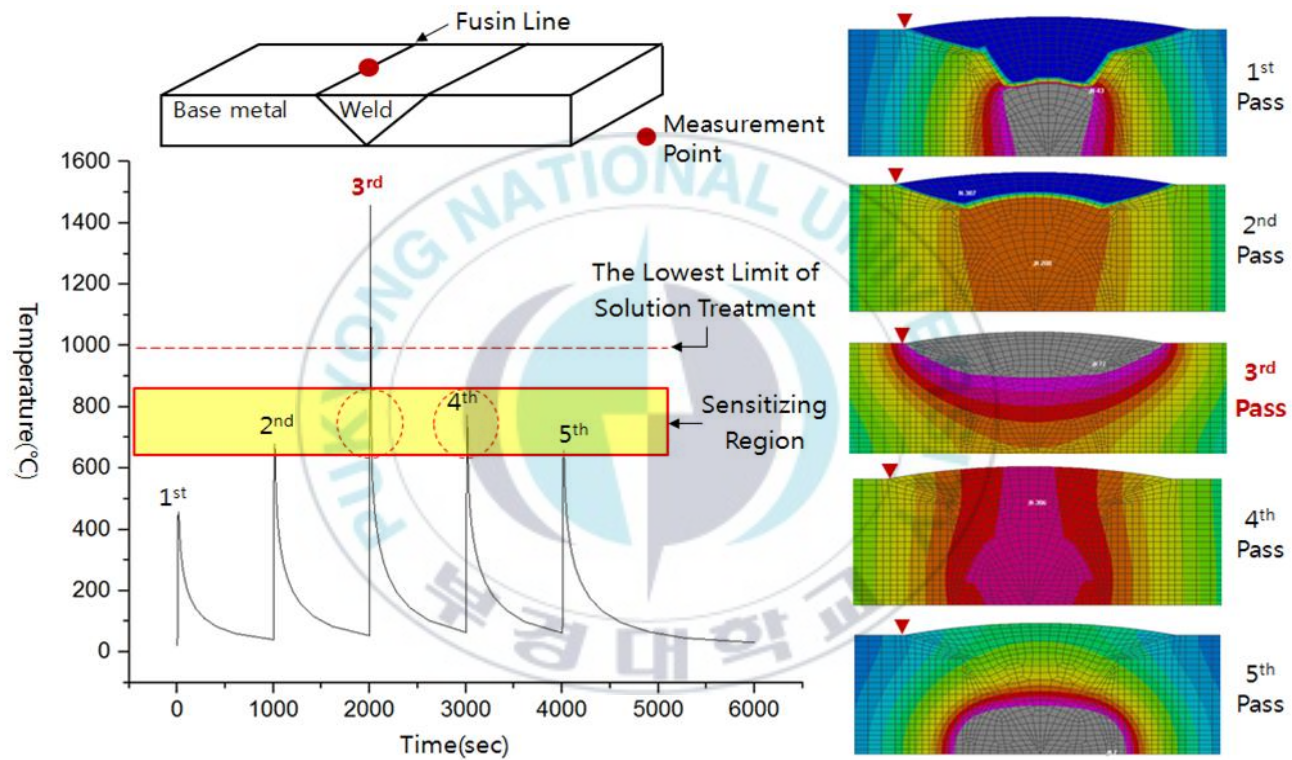


Fig. 12 Temperature distribution analysis at fusion line of the surface

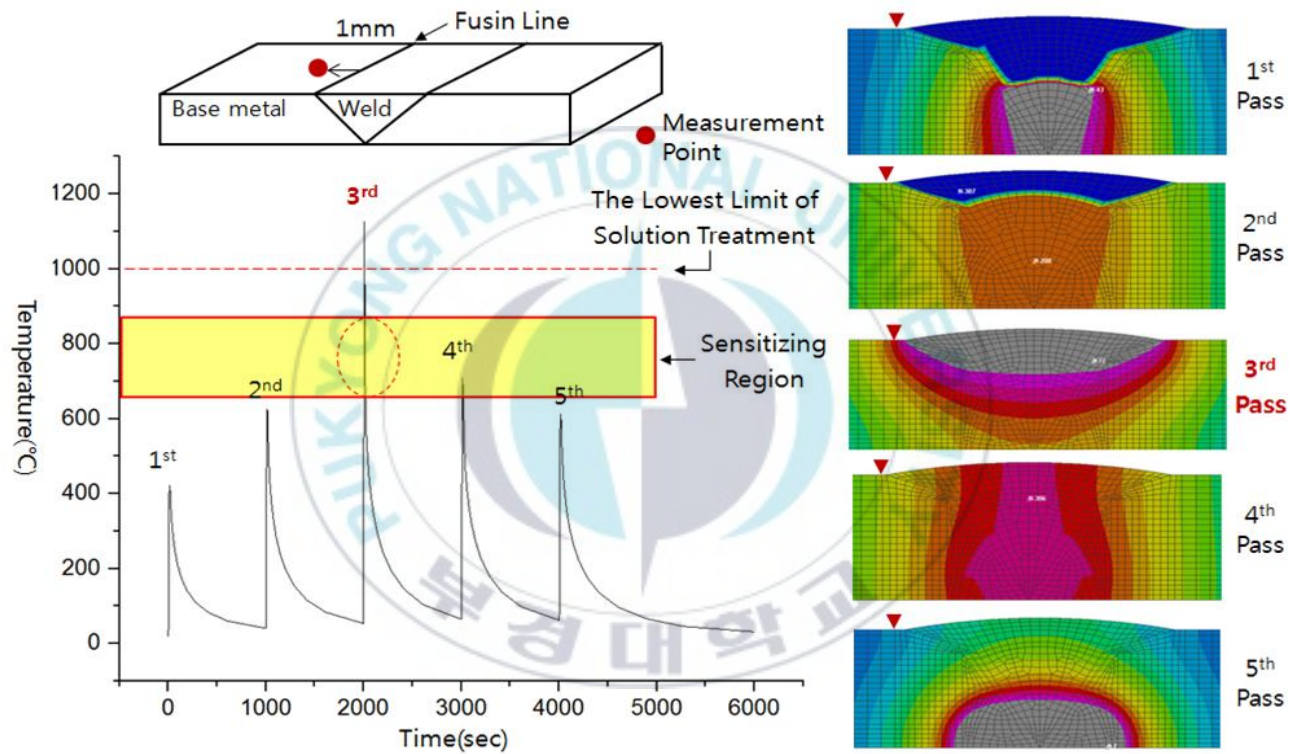


Fig. 13 Temperature distribution analysis at a point 1mm away from fusion line of the surface

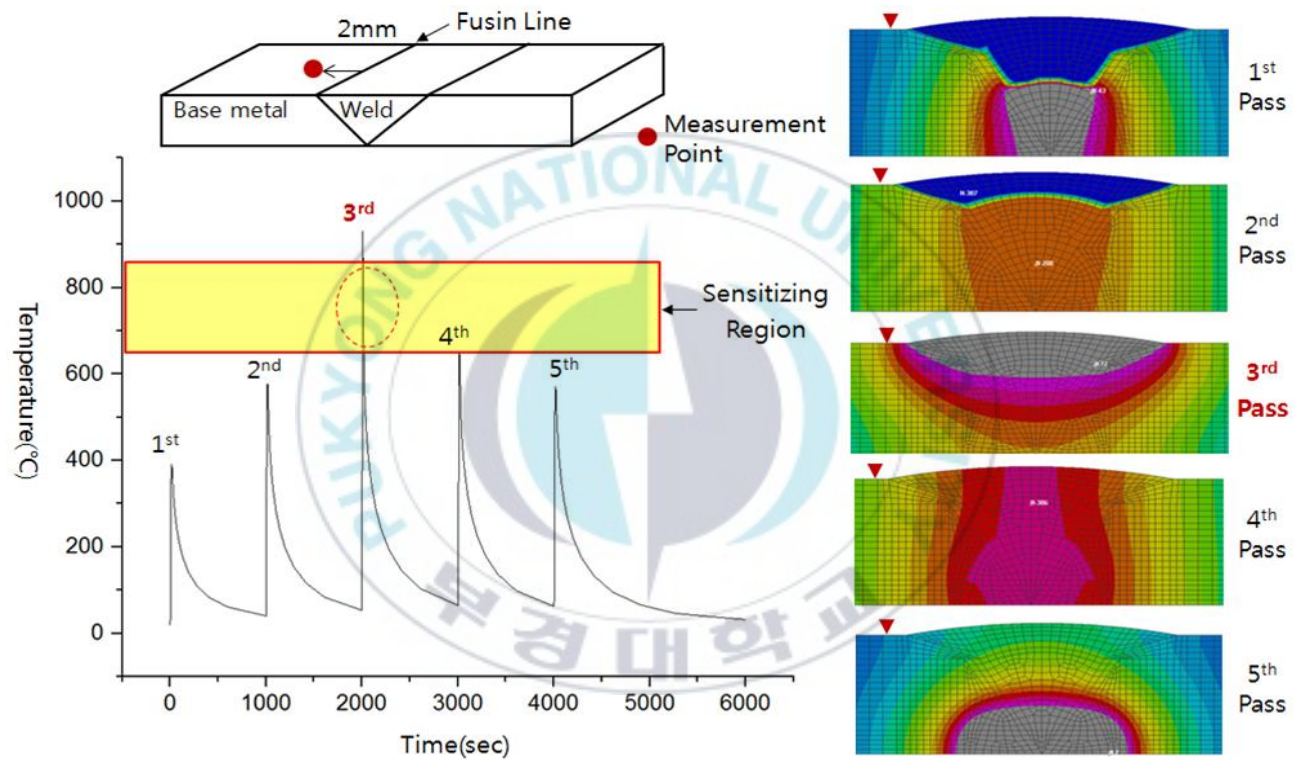


Fig. 14 Temperature distribution analysis at a point 2mm away from fusion line of the surface

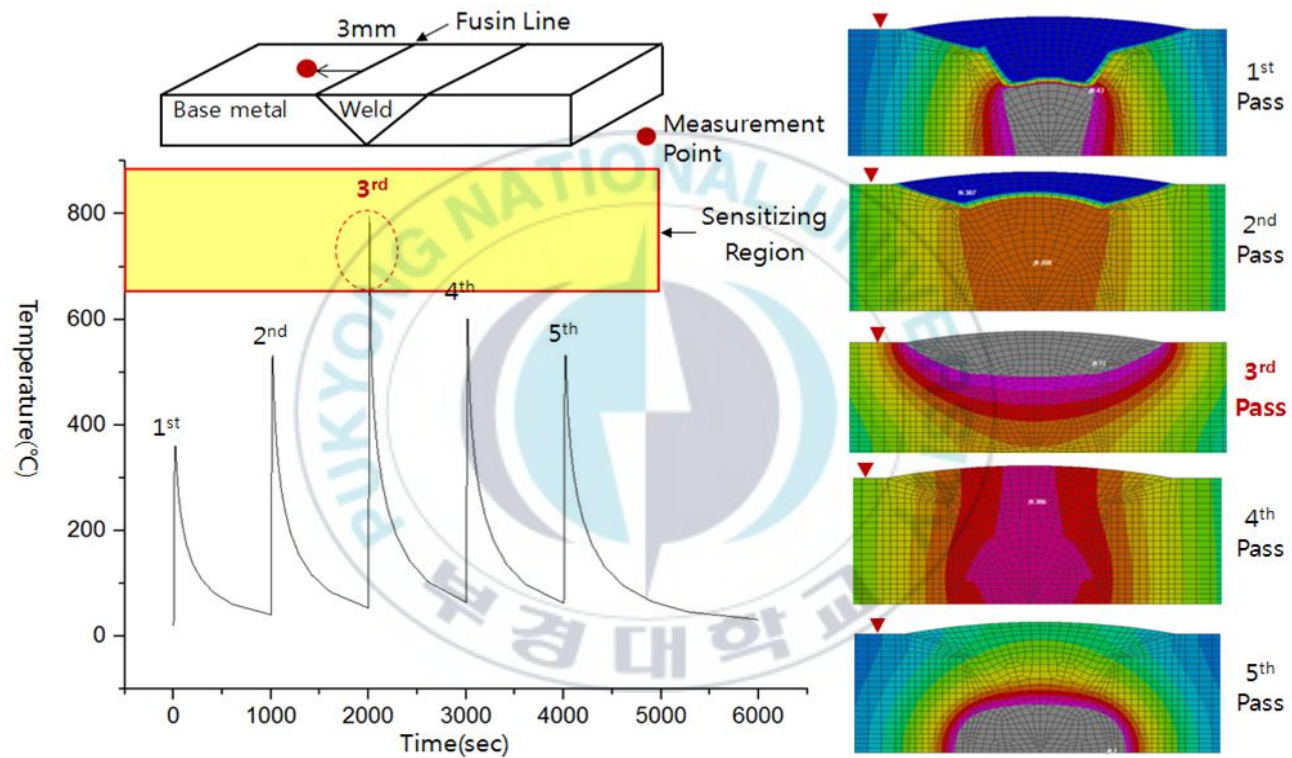


Fig. 15 Temperature distribution analysis at a point 3mm away from fusion line of the surface

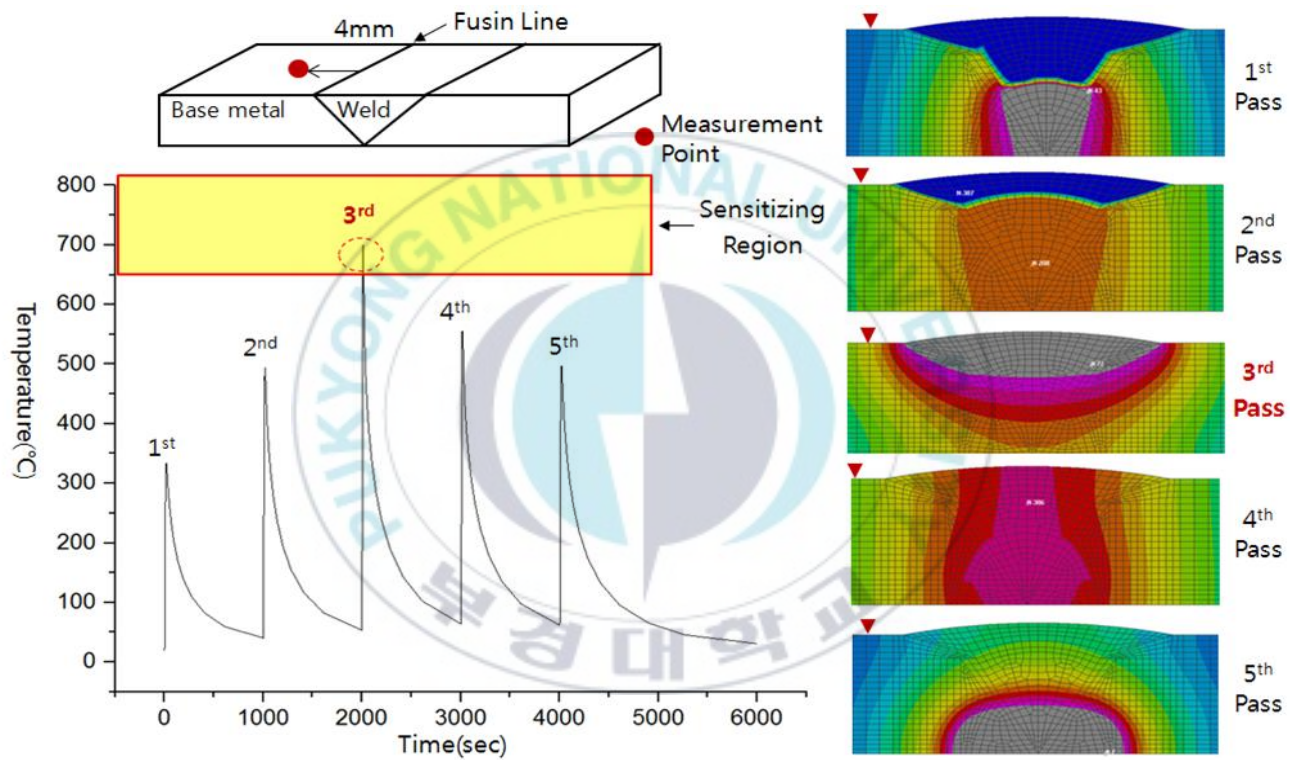


Fig. 16 Temperature distribution analysis at a point 4mm away from fusion line of the surface

Fig. 12에서 Fig. 16의 매 패스 용접시 용융경계선 및 용융경계선으로부터 1mm 간격으로 4mm 지점까지 총 5군데에 대한 온도 분포 해석 결과, Table. 16과 같이 2~3mm 지점이 예민화 온도 구간인 650~870℃에서 12.0~14.6sec 동안 가장 긴 지속 시간을 유지하였으며, 0~1mm 지점과 비교할 때, 약 3~6sec의 지속 시간 증가 현상이 확인되었다. 0~1mm 지점은 용체화처리 온도 구간인 1,000℃에 진입하여 가열 중 예민화 온도 구간의 지속 시간을 배제하였다.

Table. 16에 따르면, 세 번째 패스 용접시 예민화 온도 구간인 650~870℃에 가장 긴 시간인 14.6sec를 지속하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 Fig. 17과 같이 세번째 패스 용접시 표면의 온도 분포에 대한 상세 해석을 수행하였다.

Fig. 17의 세 번째 패스 용접시의 용융경계선 및 용융경계선으로부터 1mm 간격으로 4mm 지점까지 총 5군데에 대한 최고 온도에 도달하기 전 가열 중 시간 및 도달 후 냉각 중 시간의 온도 분포 해석 결과, Table. 17과 같이 2~3mm 지점이 예민화 온도 구간인 650~870℃에서 12.0~14.6sec 동안 가장 긴 지속 시간을 유지하였으며, 0~1mm 지점과 비교할 때, 약 3~6sec의 지속 시간 증가 현상이 확인되었다. 0~1mm 지점은 용체화처리 온도 구간인 1,000℃에 진입하여 가열 중 예민화 온도 구간의 지속 시간을 배제하였다.

Table. 16 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

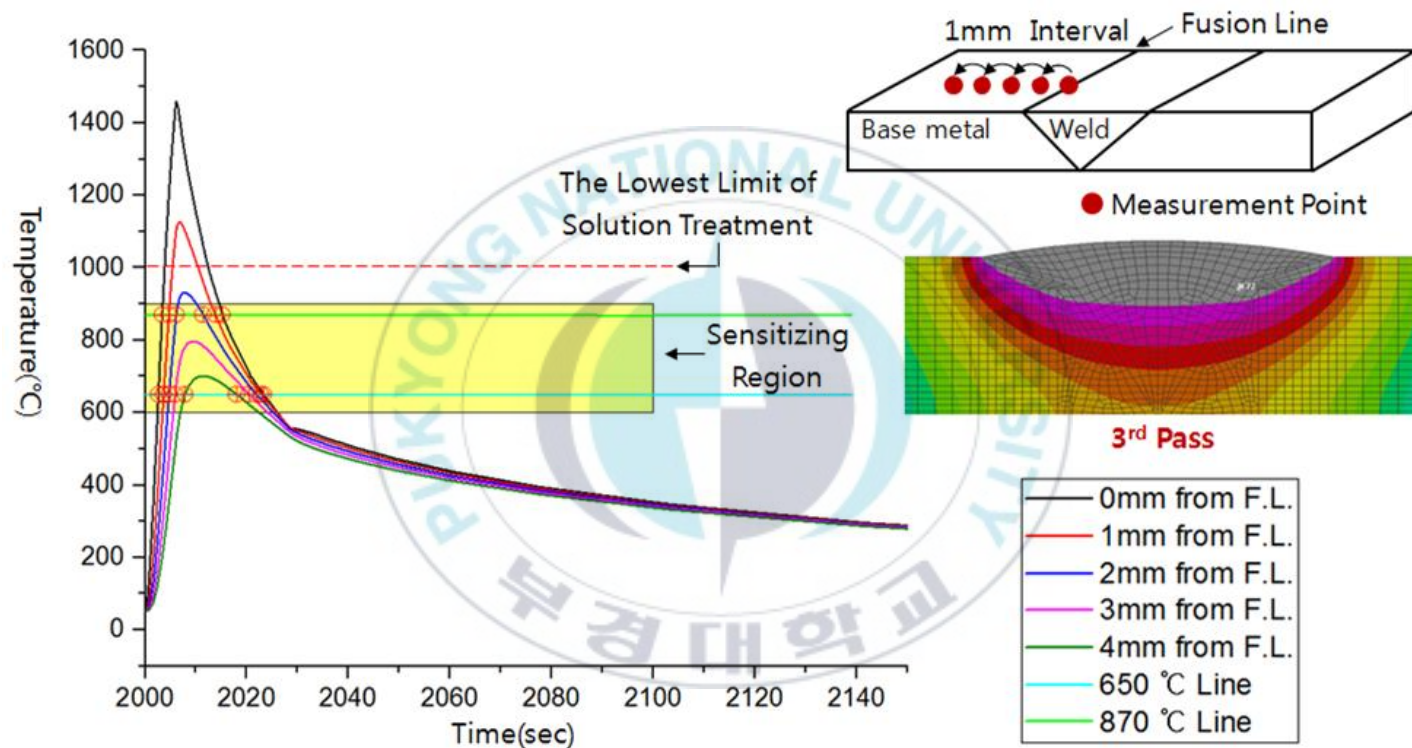


Fig. 17 Temperature distribution analysis of 3rd pass

Table. 17 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

4.2 열영향부의 예민화 경향 분석

앞서 수행한 고 탄소 0.074wt.%C 함량의 오스테나이트 스테인리스강 모재에 Min. 60kJ/in의 용접입열량을 적용한 시편에 수행된 ASTM A262 Practice E 시험 결과, 열영향부의 입계 부식은 용융경계선 근처에서는 관찰되지 않았던 반면, 용융경계선으로부터 2mm 이상 떨어진 지점부터 관찰이 되었다.

온도 분포 해석 결과에서는 용융경계선으로부터 0~1mm 지점과 비교하여 2~3mm 떨어진 지점에서 예민화 온도 구간인 650~870℃에서 약 3~6sec의 지속 시간 증가가 확인되는 등 예민화 온도 및 이 온도에서의 지속시간 등이 상세하게 확인됨에 따라 ASTM A262 Practice E 시험 결과를 뒷받침하는 매우 우수한 분석 결과를 보여 주었다. 또한, 용융경계선 근처의 탈 예민화(Desensitization) 현상은 용체화처리 온도의 진입에 따른 가열 중 생성된 Cr 탄화물의 분해 작용 및 냉각 중 2~3mm 떨어진 지점보다 상대적으로 급냉이 되는 효과에 의한 결과라 판단된다.

5. 결 론

304 계열 오스테나이트 스테인리스강의 열영향부에 미치는 탄소 함량과 용접입열량의 영향을 조사한 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었으며, 이러한 스테인리스강을 부식 환경에서 사용하기 위해서는 탄소 함량 Max. 0.065wt.%C 및 용접입열량 Max. 60kJ/in로 제한하여 산업 현장 용접에서 적용할 필요가 있다고 판단된다.

- 1) 고 탄소 0.074wt.%C 함량의 304계열 스테인리스강 모재에 Min. 60kJ/in의 입열량으로 용접을 수행한 시편은 굽힘 시험, 인장 시험, 경도 시험, 충격 시험의 기계적 물성시험과 비파괴시험, 화학 성분 분석, 델타 페라이트 함량, 조직 관찰을 실시한 결과, 모든 요건을 만족하였으나, ASTM A262 Practice E 시험에서 용융경계선으로 부터 2mm 이상 떨어진 열영향부에서 균열이 관찰되어 열영향부의 취약한 입계 부식 특성을 확인하였다.
- 2) 탄소 0.064wt.%C 함량의 304계열 스테인리스강 모재에 Min. 60kJ/in의 입열량으로 용접을 수행한 시편의 열영향부는 ASTM A262 Practice E 시험에서 균열이나 터짐이 관찰되지 않아 입계 부식의 저항성이 있음을 확인하였다.

3) 실험에 사용된 304계열 스테인리스강 모재의 탄소 함량과는 상관없이 용융경계선 근처의 열영향부는 ASTM A262 Practice E 시험에서 균열이나 터짐이 관찰되지 않았다.

4) 304계열 스테인리스강의 열영향부에 대한 ASTM A262 Practice E 시험 결과를 토대로 SYSWELD 2014 프로그램을 통해 온도 분포 해석을 수행한 결과, 용융경계선에서 2~3mm 지점은 0~1mm 지점과 비교하여, 예민화 온도 구간인 650~870℃에서 약 3~6sec의 지속 시간 증가 현상이 확인되었다. 이러한 결과는 용융경계선으로부터 2mm 이상 떨어진 열영향부에서 입계 부식이 관찰되었던 고 탄소 함량의 304계열 스테인리스강의 ASTM A262 Practice E 시험 결과를 뒷받침하는 계기를 제공하였다.

향후 탄소 함량 0.065wt.%와 0.074wt.% 사이의 탄소 함량을 갖는 304 계열 오스테나이트 스테인리스강에 Min. 60kJ/in의 용접입열량을 적용하여 실험을 수행함으로써, 입계 부식이 발생하지 않는 모재의 최대 탄소 함량 기준을 찾는 노력이 필요하다고 판단된다.

참고 문헌

- 1) 스테인리스강 편람 (1992), pp 17.
- 2) D. Gandy, Austenitic Stainless Steel Handbook, Electric Power Research Institute (EPRI, 2008), pp. 4-23, 4-27.
- 3) Setion II Part A & C, Section III, Section V, Section IX of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, American Society of Mechanical Engineers (2015).
- 4) 대한용접 · 접합학회, 용접 · 접합 편람, III 공정 및 열가공(2007), pp. 59~64.
- 5) Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials(ASM E384-16, 2016).
- 6) D. J. Kotecki, T. A. Siewert, WRC-1992 Constitution diagram for stainless steel weld metals: A modification of the WRC-1988 diagram, Welding research supplement, pp. 171~178.
- 7) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens(ASM E3-11, 2011).
- 8) Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels(ASM A262, 2014).
- 9) H. P. Kim, S. S. Hwang, C. K Rhee, K. M. Kim, J. S. Kim, A Review of Sensitization of Stainless Steel, J. Corros Sci. Soc. of Korea Vol. 27 No.1 (1998).
- 10) 대한용접 · 접합학회, 용접 · 접합 편람, I 철강재료의 용접 및 접합 (2007), pp. 143~144.
- 11) Sindo Kou, Welding Metallurgy, Second edition, Wiley Interscience (2003), pp. 433~440.