



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](#)

2019년 2월
박사학위 논문

2019년 2월

박사학위 논문

인코넬 82, 52 적용 이종금속용접부의 미세조직 및 기계적 특성에 관한 연구

미세조직 및 기계적 특성에 관한 연구
인코넬 82, 52 적용 이종금속용접부의

정봉완

조선대학교 대학원

선박해양공학과

정봉완

인코넬 82, 52 적용 이종금속용접부의 미세조직 및 기계적 특성에 관한 연구

A study on microstructure and mechanical characteristics
of the dissimilar weld joint with the Inconel Alloy 82, 52

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

선박해양공학과

정 봉 완

인코넬 82, 52 적용 이중금속용접부의 미세조직 및 기계적 특성에 관한 연구

지도교수

박 제 웅

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

선박해양공학과

정 봉 완

정봉완의 공학박사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교 교수	<u>안 규 백 (인)</u>
위 원	조선대학교 교수	<u>박 제 웅 (인)</u>
위 원	조선대학교 교수	<u>주 성 민 (인)</u>
위 원	창원문성대학교 교수	<u>이 유 신 (인)</u>
위 원	한밭대학교 교수	<u>서 상 철 (인)</u>

2018년 12월

조선대학교 대학원

목 차

목 차	I
표 목 차	V
그림목차	VII
Abstract	IX

제1장 서론

제1절 연구 배경 및 목적	1
제2절 연구 범위 및 방법	5
제3절 연구 흐름도	7

제2장 이론적 고찰 및 종래의 연구결과

제1절 인코넬 이종금속용접	8
1. 저합금강	9
2. 인코넬 600 및 690 모재	11
3. 종래의 연구결과	13

제3장 시험편 제작 용접 및 시험방법

제1절 시험편 제작	15
1. 82 및 52 합금 용접재료를 적용한 Butt 용접 시험편 ...	15
2. 스테인리스 309L 용접재료로 버터링 후 82 및 52 합금 용접 재료를 적용한 Butt 용접 시험편	24
3. 스테인리스 309L 용접재료로 버터링 후 82 및 52 합금 용접 재료를 적용한 오버레이 용접 시험편	28
4. 52 합금 용접재료의 입열량에 따른 5층 용접 시험편 ...	32
5. 열처리 후의 5층 용접 시험편	34

제2절 기계적 특성 평가 및 합격 기준	35
1. 비파괴 검사 및 합격 기준	35
2. 인장시험법 및 합격 기준	36
3. 굽힘시험법 및 합격 기준	36
4. 경도시험법 및 합격 기준	36
5. 화학성분 분석시험법 및 합격 기준	36
6. 미세조직 시험 및 합격 기준	36

제4장 실험 결과 및 고찰

제1절 비파괴검사 시험 결과	37
1. Butt 용접 시험편	37
2. 오버레이 용접 시험편	39
3. 5층 용접 시험편	41
제2절 Butt 용접부 인장시험 결과	43
제3절 굽힘시험 결과	44
1. Butt 용접 시험편	44
2. 오버레이 시험편	45
제4절 경도시험 결과	47
1. 오버레이 용접 시험편	47
2. 입열량이 다른 5층 용접 시험편	50
3. 후열처리 후 5층 용접 시험편	53
제5절 오버레이 시험편 화학성분 분석 시험 결과	57
제6절 미세조직 시험 분석 결과	58

1. 입열량에 따른 5층 용접 시험편	58
2. 후열처리 후 입열량에 따른 5층 용접 시험편	60
제5장 결 론	63
참고 문헌	65

표 목 차

Table 3.1 SA508 Gr.3 Cl.1 mechanical properties of steel.
Table 3.2 SA508 Gr.3 Cl.1 chemical composition of steel.
Table 3.3 Inconel 690 mechanical properties of steel.
Table 3.4 Inconel 690 chemical composition of steel.
Table 3.5 Alloy 82 chemical composition compare.
Table 3.6 Alloy 52 chemical composition compare.
Table 3.7 Specification for welding specimen for test.
Table 3.8 Alloy 82 welding conditions.
Table 3.9 Alloy 82 welding heat input conditions.
Table 3.10 Alloy 52 welding conditions.
Table 3.11 Alloy 52 welding heat input conditions.
Table 3.12 Specifications for welding specimen for test.
Table 3.13 Welding conditions.
Table 3.14 Welding heat input conditions.
Table 3.15 Welding conditions.
Table 3.16 Welding heat input conditions.
Table 3.17 Specifications for welding specimen for test.
Table 3.18 Welding conditions.
Table 3.19 Welding heat input conditions.
Table 3.20 Specifications for welding specimen for test.
Table 3.21 Welding specifications(Low, medium, high heat input).

Table 3.22 Welding conditions table(Low, medium, high heat input).

Table 3.23 Specifications for welding specimen for test.

Table 4.1 Butt specifications of welding specimen.

Table 4.2 Radiographic test results.

Table 4.3 Liquid penetration test results.

Table 4.4 Specifications for overlay welding specimen.

Table 4.5 Ultrasonic test results.

Table 4.6 Liquid penetration test results.

Table 4.7 5 Layer specifications of welding specimen.

Table 4.8 Ultrasonic test results.

Table 4.9 Liquid penetration test results.

Table 4.10 Tensile test results.

Table 4.11 Bending test results.

Table 4.12 Overlay specimens mechanical properties test items.

Table 4.13 Results of overlay specimen bending test.

Table 4.14 Overlay welding specimen hardness test results(Table).

Table 4.15 5 Layer specimen hardness test results by heat input(Table).

Table 4.16 5 Layer specimens PWHT specifications.

Table 4.17 5 Layer hardness test results of PWHT specimens(Table).

Table 4.18 Results of welding chemical composition test.

그림 목 차

- Fig. 3.1 Alloy 82 buttering and welding schematic diagram.
- Fig. 3.2 Alloy 52 buttering and welding schematic diagram.
- Fig. 3.3 309L buttering and Alloy 82 groove welding schematic diagram.
- Fig. 3.4 309L buttering and Alloy 52 groove welding schematic diagram.
- Fig. 3.5 Alloy 82, Alloy 52, 309L buttering schematic diagram.
- Fig. 3.6 Overlay welding specimen.
- Fig. 3.7 Low, medium, high weld heat input specimen.
- Fig. 4.1 Tensile test specimens.
- Fig. 4.2 Bend test specimens.
- Fig. 4.3 Specimen shape after bend test.
- Fig. 4.4 Overlay welding specimen hardness test locations.
- Fig. 4.5 Overlay welding specimen hardness test results (Graph).
- Fig. 4.6 Low, medium, high heat input specimen hardness test locations.
- Fig. 4.7 5 Layer specimen hardness test results by heat input (Graph).
- Fig. 4.8 Hardness test positions after post heat treatment.
- Fig. 4.9 5 Layer hardness test results of PWHT specimens (Graph).
- Fig. 4.10 Low weld heat input specimen test results.

Fig. 4.11 Medium weld heat input specimen test results.

Fig. 4.12 High weld heat input specimen test result.

Fig. 4.13 Low heat input specimen metal structure after PWHT.

Fig. 4.14 Medium heat input specimen metal structure after PWHT.

Fig. 4.15 High heat input specimen metal structure after PWHT.

A study on mechanical characteristics and microstructure of the dissimilar weld joint with the Inconel Alloy 82, 52 filler metals

Abstract

The dissimilar metal welding makes the complicated structure by the dilution of the base metal and filler metal. That kinds of welding structure requires an evaluation on the mechanical characteristics. Moreover, HAZ (Heat affected zone) shows a phenomenon to decrease the tension with unstable structure along with the high residual stress. The dissimilar metal welding part improves the quality of the welding part by enhancing the characteristics of deposited metal through the filler metal structuring and modified structure control. Therefore, many studies to improve by evaluating the modified structure and mechanical characteristics of the dissimilar metal welding parts had been executed. However, the study on the changes in mechanical characteristics and modified structure of the dissimilar metal welding part consists of the low Alloy steel basic material and Alloy 82, 52 filler metals had not executed systematically so far. This study the changes in structure and mechanical characteristics by the analysis on mechanical characteristics of the welding part and the post weld heat treatment through the tensile strength, flexural strength and hardness test after checking the stability of the welding part with the non-destructive test as producing the low Alloy metal welding sample.

Jeong, BongWan

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,
The Graduate School, Chosun University

제 1 장 서 론

제1절 연구 배경 및 목적

현대 산업의 발전과 함께 많은 플랜트 분야에서 용접은 그 중요성을 더 해가고 있다. 용접은 두개 이상의 금속 조각이 단일구조의 역할을 하도록 접합하는 유일한 방법으로써, 구조물의 모든 방향에서 강도를 확보 할 수 있는 단일 구조의 생산을 가능하게 한다. 또한 용접은 모든 상용금속을 접합하는데 사용되고, 서로 다른 강종과 강도가 다른 금속들도 접합 할 수 있다[40]. 이러한 용접기술은 원자력산업 시스템에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 이는 대부분의 원자력 설비들이 매우 두껍고 다양한 모재로 서로 접합하여 제작되는 용접 구조물이며, 그 접합부들이 대부분 취약하게 여겨지기 때문이다. 핵연료를 사용하는 원자력발전소 설비는 방사선 누출시 안전성을 확보하기 위해 최대한 설비 손상을 방지해야하며 이로 인하여 많은 안전계통이 필요하다. 따라서 배관계통들이 일반 산업플랜트에 비하여 매우 복잡하고, 많은 용접부위를 갖게 된다. 또한 경제성 및 효율성 향상을 위한 운전조건에 따라 다양한 모재들이 사용되므로, 적용환경에 따라서 서로 다른 종류의 모재들이 용접되는 경우도 종종 발생한다.

가압경수로(Pressurized water reactor, PWR)의 경우 저합금강 모재(SA508 Gr.3 Cl.1)와 오스테나이트 계열의 스테인리스강 및 니켈 합금계의 이종금속 접합이 주로 적용되고 있다[7]. 또한, 원자력발전소에 사용되는 압력용기들은 방사선 차폐와 대용량 발전을 목적으로 부피가 크고 두꺼운 모재로 제작되며, 용기에 접합이 되는 배관계통 또한 두꺼운 모재를 사용하여 제작된다. 따라서 두꺼운 모재를 경제적으로 용접할 수 있는 용접방법 선택 및 용접부에 대한 신뢰성 확보가 중요하다.

발전소 가동 중에는 중성자가 원자로 압력용기에 조사되면서 열화현상이 발생하게 되는데[7] 중성자에 의한 압력용기용 모재와 관련하여 발전소 가동 중 원자로 내부에서 방출되는 중성자로 인한 인성저하는 매우 중요한 문제다[40]. 따라서 원전설비들의 용접공정은 일반 산업플랜트와 달리 중성자 조사에 따른 열화 발생시 이에 대한 내구력이 있는 용접 공정이 적용되어야 한다.

현재 원자력발전소 압력용기용 강재로 사용되는 SA508 Gr.3 Cl.1 강은 탄소, 망간, 니켈, 몰리브덴 등의 주요 합금원소를 함유하며, 단조에 의해서 후판으로 제조되는 저합금 페라이트계 강으로 원자로 압력용기 제조에 주로 사용된다. 이러한 압력용기는 발전소 가동 중 사용 수명기간 동안 용기로서 안전성을 유지할 수 있는 우수한 기계적 특성이 요구되는데, 특히 압력용기에서 용접부는 설비가동 중 고속 중성자가 조사 되면 재료열화를 피할 수 없다.

Low Alloy 페라이트계 용착금속(Deposited metal)에서 발생하는 미세조직은 모재 및 용접와이어의 화학조성은 물론 용접 입열량에 따른 냉각속도 등에 의하여 결정입계 페라이트(Grain boundary ferrite, GBF), 다각형 페라이트(Polygonal ferrite, PF), 비드만스테텐 페라이트(Widmanstatten ferrite, ferrite sideplate라고도 함), 침상 페라이트(Acicular ferrite, AF)와 ferrite with aligned second phase, 마르텐사이트, 베이나이트와 잔류 오스테나이트 등으로 구성된다고 알려져 있다. 그리고 용접부에 미세조직 중 침상 페라이트가 다량으로 용접부에 생성될 때 최적의 강도와 인성을 얻게 되고, 이것은 작은 페라이트 래드들이 고각입계로 서로 분리되면서 얽혀진 바스켓 위브 형태를 하여 균열전파에 높은 저항을 갖기 때문에 인성을 증가시키는 것으로 알려져 있다[32, 33].

용접은 목적하는 재료를 모재 표면에 용착시키는 공정으로서, 높은 열을 사용하기 때문에 공정 중 발생한 열로 인해 모재의 인성저하, 조직 불균질, 잔류응력발생, 용접 열영향부에 취성과 같은 기계적 특성변화에 대해서 문제점들이 발생하게 된다. 또한 용접 후 인코넬 조직은 주조조직이 형성되어 인코넬 특유의 조직인 오스테나이트 조직을 형성시키지 못하기 때문에 기계적 특성이 저하된다. 이러한 용접부에 조직이 건전하지 못하는 문제점을 해결하기 위해 용접 후 열처리(Post weld heat treatment, PWHT)가 진행되며, 후열처리를 통하여 모재의 조직을 미세화하고 균질화 하는 것으로 기계적 특성 향상이 가능하다[21, 28].

원자로 압력용기, 관통 노즐, 제어봉 구동장치, 출구 노즐, 가압기 노즐들의 1차측 주요 설비에는 니켈합금인 Alloy 600 계열의 이종금속 용접부가 존재한다. Alloy 600 재료의 용접에는 니켈합금 용접재료인 Alloy 82/182 사용되며, Alloy 82는 비피복 용접봉으로 GTAW(Gas tungsten arc welding)에 사용되며 Alloy 182는 피복 용접봉으로 SMAW(Shielded metal arc welding)에 사용된다.

인코넬 합금은 고온에서 우수한 기계적 특성 및 내 부식성으로 인하여 원자력 발전소 압력기기들의 주요 재료로서 사용되고 있다. 초기에는 600 합금 모재를 오버레이

용접에 사용하였으나, 장기간 운전 시 나타나는 응력부식으로 인한 균열 손상을 방지하기 위해 점차적으로 Alloy 690으로 대체되었다. Alloy 600은 일차수 응력부식균열(Primary water stress corrosion cracking, PWSCC)에 민감한 재료로 알려져 있다[41]. 이에 대비하여 Alloy 690은 크롬 함유량을 증가시켜 반연속적인 입계탄화물에 의해 응력부식 균열의 저항성을 향상시킨 모재이다. 그러나 Alloy 690 용접금속은 용접 시 고온균열에 민감하여 결함 발생 확률이 높으며 기공 및 용입불량 등의 결함도 발생하기 쉽다. 특히 연성저하 응고구간에서 발생하는 연성저하균열을 방지하기 위해서는 검증된 용접조건 설정과 용접재료의 선택이 중요하다[40]. 용접관리가 쉬운 공장에서는 Alloy 600 계열을 사용하는데 현장에서는 Alloy 600계열로 용접 후 다음 층을 Alloy 690 합금으로 용접하는 방법도 사용되고 있다.

원자력발전소 초기 시공 시 설비내의 열교환기 튜브들은 GTAW 용접을 이용한 Alloy 600으로 제조되었다. 그러나 Alloy 600은 냉각을 하면서 cr-rich 탄화물(cr₂₃C₆ and cr₇C₃)이 입계에 편석 되어 예민화 되면, 점부식 응력부식균열 및 입계형 응력부식균열이 발생되며 이러한 점들은 레이저빔 혹은 전자빔과 같은 고성능의 용접기술을 선정하거나 Alloy 600보다 크롬함량이 높고 탄소함량이 낮은 Alloy 690과 같은 대체 재료를 선정함으로써 해결 되었다. 이와 같이 Alloy 600계열 모재를 Alloy 690으로 대체하는 것은 니켈계 합금의 용접에 있어서 크롬 희석에 대한 문제점을 해결 하는데 매우 효과적인 방법이 될 수 있다.

가압경수로 설비 중에 Alloy 600계열 모재인 관통노즐에 대한 일차수 응력부식균열 발생은 1991년에 시작하여 최근까지 용접부의 건전성을 저하시키는 요인이 되고 있으며, 국내에서는 가압기 측정기, 가압 가열기 슬리브 내 및 제어봉 구동장치에서 일차수 응력부식균열이 발생 되었다[13]. 또한 2010년 2월에 영광 원자로 3호기에서 노즐 용접부 2개소에 균열이 발생하여 압력용기 상부 관통부 bent line pipe(3/4in.)에서 보론이 누출(봉산 누출량: 31.8 liter) 되었는데, YGU3의 균열은 축방향의 일차수 응력부식균열로 인한 봉산누출과 관련이 있고 특히 Alloy 600 모재 사용이 일차수 응력부식균열의 발생에 있어서 가장 큰 영향을 주는 원인으로 확인 되었다. 그리고 불규칙한 크롬 탄화물의 석출물은 입계균열이 성장 하는데 있어서 많은 영향을 미치는 인자로 추정하고 있다[41]. 동일본 대지진에서 원자로 관련된 설비들의 금속에 대한 문제점은 고 니켈계 합금 모재들로 이중 용접된 용접부 응력부식균열 발생이었는데, 아직까지는 새로운 방법의 용접기술이 실용화되어 적용되고 있지 않은 실정이다[40].

이중금속 용접부의 일반적인 특징을 보면 니켈계 Alloy 600과 SUS 308SS의 이중 용

접부는 응력부식균열이 발생하기 쉬우며 이런 균열 발생의 주요 원인들 중에 하나로서 다수의 용접 사이클 및 높은 총 입열량으로 인한 입계에 크롬 희석 효과로 추정하고 있으며, 용접에서 높은 입열량은 용융부와 열영향부에 탄화물이 석출되기 쉬워 입계에 크롬 희석을 더욱 조장한다.

원전 가압기 상부 헤드에 설치된 안전 및 방출노즐은 이종금속 및 동종금속의 접합 과정을 거쳐 제작되며, 이종금속 용접부는 내열 합금강인 인코넬 재질(Alloy 600)의 버터링부와 스테인리스 강 모재의 안전단 사이에 스테인리스 강 계열의 용가제로 용접되어 구성된다. 인코넬 600계열의 용접 재료는 일차수 응력부식균열에 민감하게 반응하여 용접부에 잔류응력이 존재하면 용접부에서 균열 발생 가능성이 높으며 실제 이와 같은 용접균열 사례가 보고된 바 있다[40].

비등수형 원자로(Boiling water reactor, BWR)과 가압경수로에서 Alloy 182 용접부의 응력부식균열 사고는 광범위하게 보고되고 있다. 최근 Alloy 82/182보다 크롬 함량이 더 많은 Alloy 52/152는 용접부 응력부식균열 저항성이 우수하여 결함이 발생한 제어봉 구동장치, 가압기노즐, 열 전대관통노즐, 열관 노즐 등의 보수용접에 적용되고 있다[19, 36].

이종금속으로 구성된 용접부에 대한 용접 후 열처리 효과는 이종금속 용접부의 천이 지역에서 복잡한 미세조직 구조, 용접 잔류응력, 용가재 및 용접부의 화학성분에 따른 광범위한 변화에 따라서 후 열처리 효과가 결정되므로 주의해야 한다. 용접 후 희석효과 발생으로 용접부에 크롬 함량 감소와 용융부의 천이지역 안으로 황이 확산되는 것은 응력부식균열과 부식피로에 대한 저항성을 악화 시킨다. 이때 저합금강의 용접 후 발생된 잔류응력 및 마르텐사이트 조직을 감소하기 위해서는 용접부에 후 열처리를 실시해야한다[40].

지난 2000년도에 미국에서 발생한 V.C. Summer 원자력 발전소 사고[41]과 같이 해외 원자력 발전소에서 Alloy 82/182가 사용된 이종금속 용접부에서 일차수 응력부식균열의 발생이 보고[40] 되면서 이종금속 용접부에 대한 건전성 확보 요구가 늘어나고 있다. 이종 금속 용접부의 건전성 확보 방안으로, 관심 대상에 대한 개별적 해석 및 최적 용접조건을 확보하기 위한 연구가 필요하며 이를 위해서는 용접할 대상이 되는 모재의 화학성분과 기계적 특성, 용가재의 화학성분과 인장강도에 대한 시험 및 WPS/PQR 개발이 필요하다. 그리고 용접 입열량 변화에 따른 열 영향부의 미세조직과 기계적 특성의 변화와 용접 후 열처리에 따른 용접부 미세조직 및 기계적 특성의 변화에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 저합금강에 내식성이 우수한 Alloy 82, 52 용접재료를 적용하여 Butt 및 오버레이 용접을 수행하고 비파괴 검사 등을 통해 용접부의 기계적 특성을 확인하고자 하였다. 또한 저합금강에 입열조건을 달리하여 5층 용접 후 입열량의 변화가 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향을 분석 하여 입열량 변화에 따른 상관관계를 규명하고자 하였다.

제2절 연구 범위 및 방법

이종금속 용접은 용접부에 협소한 영역에서 모재와 용가재 희석에 의한 복잡한 조직이 나타나 이러한 용접부 미세조직에 따른 기계적 특성 평가가 요구되며 용접 열영향부에는 높은 잔류응력과 더불어 조직이 불안정하여 인성이 저하되는 현상이 나타난다. 용접 후 열처리는 이러한 용접 열영향부의 물성을 회복하기 위해 필요한 공정으로, 용접부에 대한 평가를 할 때 이러한 용접 후 열처리의 영향도 고려하여야 한다.

용접부는 용접재료의 조성 및 미세조직을 제어함으로써 용착금속의 특성을 향상시켜 용접부의 품질을 향상 시킬 수 있고 용접부에 미세조직과 기계적 특성은 서로 상관관계로 체계화되어 있어 용접재료의 고강도, 고인성화를 만드는 것은 미세조직의 미세화에 의해 추진되고 있다.

용접부 주변의 저합금강 내에 형성되는 HAZ는 결정립 조대화, 탄화물 석출, 마르텐사이트 생성 등의 미세조직 변화가 발생되어 인성저하 및 취성파괴에 대한 민감성이 증가하게 되며 열 사이클을 받은 HAZ는 용접선으로부터의 거리에 따라 세분화 된다. 용접과정 중에 온도곡선의 변화 및 미세조직 변화에 근거하여 1200℃ 이상으로 가열된 결정립 조대화 영역, 900~1100℃ 사이의 결정립 미세화 영역, 700~900℃ 사이의 페라이트/오스테나이트 부분 변태영역, 700℃ 이하의 템퍼링 영역으로 나누어진다[4]. 이 중 가장 취약한 특성을 보이는 곳은 용접선 근처의 결정립 조대화 영역이다. 그러나 다층 용접에서는 용접 열 영향을 반복하여 받게 되기 때문에 가장 취약한 특성을 가지는 영역이 다르게 된다. 따라서 용접 후 용접 열영향부의 미세조직 및 기계적 특성에 대한 평가 및 개선을 위하여 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔으나 저합금강에 인코넬 용가재(Alloy 82, 52)로 용접 시 입열량 변화에 따른 이종금속 용접부의 기계적 특성 및 미세조직 변화에 관한 연구는 현재까지 체계적인 수행이 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 저합금강(SA508 Gr.3 Cl.1)에 내식성이 우수한 Alloy 82, 52 용가재

로 Butt 및 오버레이 용접을 수행한 후 비파괴검사, 인장, 굽힘, 경도 및 화학성분 시험을 통해 용접부의 기계적 특성을 확인하였다. 또한 저합금강(SA508 Gr.3 Cl.1)에 저입열 조건, 중입열 조건, 고 입열 조건을 설정하여 5층 용접 후, 용접 입열량 변화에 따른 미세조직 및 기계적 특성의 상관관계를 규명하였다.

제3절 연구 흐름도

제1장 서론	제1절 연구 배경 및 목적
	제2절 연구 범위 및 방법
	제3절 연구 흐름도
제2장 이론적 고찰 및 종래의 연구결과	제1절 인코넬 이중금속용접
제3장 시험편 제작 용접 및 시험방법	제1절 시험편 제작
	제2절 기계적 특성 평가 및 합격기준
제4장 실험 결과 및 고찰	* 입열량에 따른 미세조직 관찰을 위한 시험편 및 시험 준비
	제1절 비파괴검사 시험 결과 제2절 Butt 용접시험편 인장 및 굽힘시험 결과 제3절 굽힘시험 결과 제4절 경도시험 결과 제5절 오버레이 시험편 화학성분 분석 시험 결과 제6절 미세조직 시험 분석 결과 * 오버레이 및 5층 용접시험편들의 비파괴검사를 통한 용접부에 대한 건전성 검증과 기계적 특성, 경도, 조직관찰
제5장 결론	결론

제 2 장 이론적 고찰 및 종래의 연구결과

제1절 인코넬 이종금속용접

고온 및 고압에서 가동되는 장비가 증가함에 따라, 장비 구성품에 다양한 종류의 고합금 재료가 사용되면서 인코넬 재료가 많이 사용되고 있다. 하지만 장비의 구성품 전체를 인코넬 같은 고합금 재료로 제작하면 비용이 많이 소요되므로 저합금 재료와 고합금 재료를 적절하게 조합하여 제작비용의 절감을 꾀하였다. 이와 같이 이종금속 용접은 두 가지 이상의 서로 다른 금속끼리의 용접을 말하며, 최적의 용접품질을 확보하기 위해 이종금속간의 용접기술을 확보하는 것은 매우 중요하다.

고온 및 고압에 놓이는 이종금속간의 용접부는 저합금 재료와 고합금 재료간의 열팽창계수 차이에서 발생하는 변형과 파괴 등을 포함하여 많은 문제점과 건전한 접합부를 얻는데 있어 기술적인 어려움이 존재하고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 열팽창계수가 저합금 재료와 고합금 재료의 중간에 해당하는 용가재가 사용되며 용가재 선택 시 희석률을 고려하여 선정해야 한다.

이종금속간 용접부는 저합금 재료와 고합금 재료간의 열팽창계수 차이 외에도 고온에서 발생하는 탄소의 이동(Carbon migration)과 마이크로피셔(Microfissuring)에 의해 수명이 단축된다. 용접모재에서 용착금속으로 이동함에 따라 용착금속 중에 취약한 탄화물이 생성되며 용접모재에 탄소의 농도가 낮은 저탄소 지역이 생기는데, 용접부의 마이크로피셔에 응력이 집중되면 피로에 대한 저항성이 감소하면서 용접부에서 파단을 일으키게 된다. 따라서 용접부의 마이크로피셔를 줄이거나 제거시키면 용접부의 수명이 연장되며 이는 궁극적으로 용접 구조물의 경비를 절약하는 결과를 가져온다.

이종금속간 용접에 사용하는 용가재의 화학성분을 향상시키면 이종금속간 용접부에서 주요 과제가 되고 있는 열팽창계수의 차이에 의한 탄소의 이동 그리고 마이크로피셔와 같은 문제점들을 해결할 수 있게 된다. 물리적, 화학적, 기계적 성질이 서로 다른 이종금속 간 용융용접에 필요한 용가재는 두 금속의 용점, 열전도도, 열팽창계수의 차이를 고려하여 이종 금속 간 용접부의 강도와 인성을 확보하며 용접균열과 부식손상을 방지할 수 있도록 여러 사항들이 종합적으로 고려되어야 한다. 또한 용착금속의 화학성분과 기계적 특성은 모재와 근사한 값을 가져야 하며 용착금속의 부식과 산화에

대한 특성이 가능한 모재와 일치되거나 그 차이는 최소화 되어야 한다.

이종금속 용접에 적용되는 인코넬 합금은 고온에서 사용가능한 우수한 기계적 특성 및 내 부식성으로 원자력발전소 압력기기의 주요 재료로서 사용되고 있다. 초기에는 오버레이 용접에 인코넬 600 합금 모재가 사용되었으나, 원자력 발전소 운전 후 용접 부에 발생하는 응력부식 균열을 방지하기 위해 크롬 함유량을 증가시켜 응력 부식균열의 저항성을 향상시킨 모재인 690합금으로 대체되었다. 인코넬 690합금 용접금속은 응력 부식균열의 저항성을 높이는 반면에 고온균열에 민감하여 용접 결함 불량률이 높고 용입 불량, 기공 등의 결함이 발생하기 쉬운 단점이 있다.

원자력 발전소는 압력용기와 고온배관을 비롯하여 많은 부분이 이종금속 용접부로 구성이 되어있어 인코넬 용접을 할때 고 청정도 유지와 용융물의 저 유동성, 얇은 용입 등의 특성이 있고 산화물이나 황, 납, 인 등의 취화원소에 유의하여 용접을 해야 한다. 유동성이 낮은 용융금속은 용접 조건이 고 전류 영역일 때 기공 결함이 발생하므로 용접을 할 때에는 와이어 직경의 3배 이내에서 위빙기법을 적용해야한다.

이러한 이종금속 용접부는 모재자체의 물리적, 화학적 성질이 서로 다른 두 금속 간 접합으로써 동일 금속간의 용접보다 많은 기계적 결함을 가져올 수 있으므로 용접 시 최적의 용접조건 확립을 위한 다양한 테스트가 필요하다.

1. 저합금강

저합금강(원자로용 단조강 기호 SA 508 Gr.3 Cl.1)으로 제작된 원자로 압력용기용 강은 오랜 기간 원전운전의 사용 실적에 근거하여 개량 및 개발되어 왔다. 압력용기용 강은 화학성분은 압력용기의 사용 환경에서 요구되는 기계적 특성, 즉 우수한 강도와 인성, 용접성, 중성자 조사 취화특성 등이 주요인자로 작용하여 결정된다.

저합금강의 탄소량은 우수한 품질을 위해 강도, 인성, 용접성을 고려하여 0.15~0.20 wt.%의 범위에서 첨가하도록 규정되어 있으며[1] 망간과 니켈은 경화능 향상 및 고용강화 효과를 목적으로 하여 각각 1.2~1.5 wt.%와 0.4~1.0 wt.%의 범위에서 첨가를 하고 있다. 특히 니켈은 기계적 특성 중에서 인성을 유지하면서 강도 향상을 할 수 있는 원소로서 중성자 조사 취화와 관련하여 첨가량을 최대 1.0 wt.%로 규정하고 있다. 몰리브덴은 미세한 M2C의 석출을 통해 모재의 강도를 향상시킬 수 있는 장점이 있으나 첨가량을 증가시킬 경우 인성과 용접성에서 악영향을 줄 수 있기 때문에, 첨가 가능한 범위를 0.45~0.6wt.%로 설정하였다. 크롬은 언더클래드 균열(Under clad cracking, UCC)을 발생 시키는 원소로 알려져 있어 0.25 wt.%인 대체로 작은 함량이

상한으로 제한되어 있고, SA508 Gr.3 Cl.1강의 조성은 원전용 강재로써 장시간에 걸쳐 얻어진 결과를 토대로 규정되었다.

원자로 압력용기인 SA508 Gr.3 Cl.1의 기지 조직은 대부분이 수냉-템퍼링의 열처리 과정을 거치게 되는데 원자로 압력용기는 대형 구조물로서 두께가 20~30cm 에 달하며 수냉시는 두께 효과로 인하여 전체적인 영역에서 냉각속도가 느려진다. 저합금강(SA508 Gr.3 Cl.1)으로 압력용기 제작 후 열처리를 하고 나면, 대부분의 영역에서 페라이트 래스 사이에 시멘타이트 밀집 층이 존재하는 상부 베이나이트 조직으로 변태가 일어나는데, 저합금강의 미세조직은 전형적인 템퍼드 상부 베이나이트 조직으로, 래스와 래스 사이에는 조대한 막대 형태의 시멘타이트 밀집영역이 존재한다. 이러한 래스 간 시멘타이트 층은 베이나이트 변태 시, 베이나이트 페라이트 래스로부터 방출된 탄소 원자가 집적되어 이루어진다. 래스 내부에는 미세한 침상의 몰리브덴계 탄화물인 M2C 석출물이 밀집되어 있고 M2C 석출물은 주로 템퍼링 중에 형성되는 것으로 보고되었다[40].

저합금강에서 관찰된 형상비가 큰 석출물(Precipitate)은 래스간의 긴 막대모양의 시멘타이트인 것으로 보고되었다[40]. 즉 저합금강에서는 막대모양의 조대한 시멘타이트와 미세한 침상의 몰리브덴계 탄화물인 M2C가 안정적으로 축발시키는 것으로 보고되었다[40].

SA508 Gr.3 Cl.1강과 SA508 Gr.4N강의 고용강화 효과는 침입형 및 치환형 합금원소들의 고용강화 효과와 관련하여 많은 연구가 진행되어 왔으며[40] 침입형 합금원소인 탄소와 질소의 고용강화 효과는 매우 큰 편이다. 침입형 합금원소에 의한 강화는 약 $1900(C+N)^{1/2}$ 의 강화 효과를 보고한 Brozzo 등의 경우처럼 고용량의 제곱근에 비례한다는 견해[12]와 치환형 합금원소의 경우처럼 선형적인 관계를 가진다는 보고가 있다[40]. 그러나 원자로 압력용기용 강재가 템퍼링된 경우 대부분의 탄소는 석출에 소모되어 페라이트 기지 내의 탄소 고용량은 매우 낮을 것으로 판단된다. 크롬 원소도 원자로 압력용기 강에서 탄화물을 형성하는 원소로서 실제 고용량이 작아 경험식에 의한 고용강화 효과보다는 그 효과가 미비할 것으로 판단된다.

상업용 가압경수로 발전소 노심은 약 300℃의 온도와 15MPa 정도의 압력에서 운전 중이며, 특히 원자로 압력용기는 원자력 발전소에서 가장 핵심 설비이다. 현재 상용 원자로 압력용기용 모재로 사용하고 있는 저합금강은 상부 베이나이트 조직을 갖는다[5]. 저합금강으로 제작된 원자로 압력용기는 고온, 고압 및 중성자 조사 등의 매우 가혹한 환경 속에서 수십 년 이상동안 사용되면서 재료가 취화되어 인장강도의 증가

및 파괴인성의 감소가 나타난다. 이러한 파괴인성 저하는 연성 취성 천이온도를 상승시켜 모재의 취성파괴 가능성이 증가하고 압력용기의 안전여유도가 감소하게 된다. 따라서 원자로 압력용기용 저합금강에 대해 높은 인성 및 강도 등의 우수한 기계적 특성이 요구되며 저합금강에 천이영역에서의 파괴인성에 대한 정확한 이해 및 평가가 필요하다.

원자로 압력용기의 경우 300℃의 온도에서 운전을 하기 때문에 고온에서의 장시간 운전시 안정성이 요구되고 특히 고온에서의 장기 가동에 따른 템퍼 취성현상이 발생하지 않아야한다. 원자력 발전소의 원자로 압력용기(RPV)는 저합금강으로 두께가 200mm에 달하는데, 압력용기의 내부표면은 원자로 냉각제에 의한 환경부식에 민감하여 몇 mm두께의 오스테나이트 스테인리스 강을 오버레이 클래딩으로 보호하고 있지만 이 부분에서의 가압 열 충격은 가압경수로의 파괴를 일으키는 주요 원인이 될 수 있는 관계로 운전 중 특별 관리가 필요하다[11, 31].

2. 인코넬 600 및 690 모재

용접기술은 원자력발전소에서 핵심기술로 중요한 위치를 차지하고 있다. 이는 원자력발전소의 설비들이 대부분 매우 두껍고, 이종금속의 모재를 사용해 용접으로 제작되는, 매우 취약하게 여겨지는 구조물이기 때문이다.

원자력발전소의 주요설비들에 사용되는 인코넬 합금은 고온에서 사용 시 우수한 기계적 특성 및 내 부식성으로 열악한 운전조건에서 견딜 수 있는 모재로 원자력발전소의 핵심기기인 압력기기의 주요재료로 사용되고 있다. 인코넬은 니켈, 크롬, 철 합금으로 구성된 합금으로 원소의 성분 비율에 따라 모재의 종류가 구분되는데 대표적인 것으로는 인코넬 600합금, 인코넬 690합금 등이 있다.

초기에는 오버레이 용접에 인코넬 600 합금모재가 사용되었으나 발전소의 장기간 운전 후 응력부식에 의한 균열발생으로 발전소의 안전을 확보하기 위하여 점차 적으로 인코넬 690으로 대체되었다. 인코넬 690 합금은 크롬 함유량을 증가시켜 반연속적인 입계 탄화물 생성에 의하여 응력 부식균열의 저항성을 개선시킨 모재이다.

인코넬 600 재료는 1932년 미국 웨스트 버지니아주 헌팅턴에 위치한 International nickel company사의 O.B.J. Fraser가 개발하였고, 이는 당시 최초로 크롬을 함유한 합금의 개발사례가 되었다. 그 이후 1950년대 후반부터 1970년대 후반까지 인코넬 600합금 모재는 원자력 발전소에서 증기발생기 및 가압기 등 주기기기의 핵심재료로 사용되면서 액체 환경에서 부식 저항성 및 기계적 특성이 우수한 것으로 평가되었다. 하지만

1970년대 중반부터 원자력 발전소의 운전 경험이 축적되면서 부터는 이 재료가 일차냉각수 환경에서 취약하여 응력부식균열이 발생된다는 점이 발견되었다. 미국 등 해외 원자력산업계에서는 과대한 설비교체 비용문제로 장기간 동안 재료 교체를 유보하고, 냉각수 화학세정 등 정비 방법의 변경을 통해 응력부식균열 완화에 집중하였지만 1980년대 초반 응력부식균열로 인한 증기발생기의 전열관 균열과 냉각수 누설이 발생되면서 원전의 안전성 문제와 이용률 저하가 심각한 쟁점이 되었다. 결국 서구 원자력산업계는 1980년대 초반에 이르러 인코넬 600 모재가 사용된 증기발생기를 교체하는 것으로 결정하였고, 이는 인코넬 690 모재를 증기발생기 전열관에 적용하도록 개발이 이어지는 계기가 되었다.

니켈-크롬 합금 중에 Alloy 600, 690모재는 고온에서 우수한 내식성 및 내열성 그리고 강도가 장점이다. 또한 염화물에 강하고 응력부식 균열의 저항성이 뛰어나 상온에서부터 저온용까지 액화 가스 저장에 널리 사용된다. Alloy 690은 특히 응력부식균열에 대한 저항성이 좋다. Alloy 214와 601은 산화성 분위기와 질화 분위기에 저항성이 뛰어나고, 1200℃ 정도까지의 영역에서 스케일에 대한 저항성이 크다. 이보다 더 높은 온도 영역에서는 Alloy 600에 1.4%정도를 추가하여 사용한다.

인코넬 600모재는 염화물에 대한 응력부식균열 감수성이 매우 낮고 가공성 및 기계적 특성이 우수하여 원자력 발전 설비에 적용되는 배관, 압력용기, 기계부품들에 많이 사용되고 있다. 또한 인코넬 합금은 Incoloy 800과 같이 내열성도 우수하여 내열성 및 내식성이 동시에 요구되는 사용 환경에 적용이 가능하다. 일반적으로 석유화학장치, 약품설비, 식품공업 등에 쓰이고 있는데, 이들 합금은 고온의 염수환경에서 사용을 하면 내국부부식성이 떨어져 공식이 발생된다.

원자로 압력용기의 인코넬 용접부는 높은 온도의 물과 접촉했을 때 응력부식균열이 발생되는데 이는 전기화학적인 국부 부식에 의한 영향으로 결정 입계만이 먼저 부식이 진행되기 때문이며 응력이 걸려 있는 곳에서의 부식이 가장 크다. 특히 경수로 원전에서 냉각수 누출사고와 같은 안전과 직결되는 1차 계통에서의 사고는 일차수 응력부식균열이라 부른다. 부식에 저항성이 강한 합금재료로 평가된 인코넬 600합금은 1990년대 이전까지는 원자력산업에서 주요 기기들의 핵심재료로 사용이 되었지만 이 재료는 일차수 응력부식균열에 취약하여 균열발생이 자주 나타나게 되었다. 가압경수로 원전에서 인코넬 600 모재가 적용된 주요부위는 원자로 헤드 노즐, 증기발생기 세관, 원자로와 가압기의 관통관 등이다. 결과적으로 부식과 균열이 발생하게 되면 교체 및 보수용접이 이루어져야 하는 주요 부분이다.

국내에서도 20년 이상 운전 중인 원전은 이렇게 균열에 취약한 인코넬 600합금 모재로 제작되었다. 이에 따라 20년 이상 운전 중인 원전의 핵심 설비 및 부품들도 순차적인 교체가 이뤄질 예정이다. 외국 원전의 다양한 설비 중 인코넬 600 모재가 사용된 곳은 균열이 발생 하였지만 인코넬 690 모재가 사용된 경우는 20년 동안 균열 현상이 발생한 적이 없다. 이는 인코넬 690이 인코넬 600에 비하여 응력부식균열에 대한 저항성이 우수하다는 것을 증명한다.

미국이 원자력발전소를 건설하던 지난 1960~1970년대에는 인코넬 600 합금이 열전달 효율 및 부식 저항성이 뛰어나 가압경수로 증기발생기 내부 부품인 세관 재료로 선택이 되었지만 1980년대에 오면서는 인코넬 600 합금으로 구성된 세관에서 누수 및 용접부 균열이 발생되고 응력부식균열에 취약성이 나타나면서 설계수명의 절반 기간정도에 증기발생기교체 및 발전소를 폐쇄 하는 추세이다. 미국에서는 가동 중인 69기 가압경수로 중 지금까지 약 60기에서 증기발생기 교체가 되었고, 1989년부터는 응력부식균열에 저항성이 강한 인코넬 690 모재가 적용되었다.

3. 종래의 연구 결과

황성식 등[40]은 Alloy 600 모재의 응력부식균열을 감소시키기 위해 차단, 재료교체, 예방 오버레이용접, 잔류응력개선, 수화학 처리(아연첨가 및 최적화된 수소 조업)를 연구하였으며, 이종금속에 대한 용접기술 개선으로 노즐교체와 오버레이 용접을 실시하였다.

D.H.Kim 등[13]은 Alloy 600에 비해 아직 가동경험이 부족한 Alloy 690으로 구성된 이종금속 용접부의 잔류응력 해석을 수행하여 구조 건전성을 확인하고자 하였다. 열응력 해석 결과 Alloy 600 재료를 사용한 결과와 비교하여 최대응력 발생 위치 및 응력값은 유사하였으나 전반적인 응력분포는 Alloy 690을 사용하였을 때 감소함을 보였다.

S.H.Lee 등[37]은 이종금속 맞대기 용접부의 일차수 응력부식균열의 건전성 평가 기술을 정립하고 균열에 대한 공학적 건전성 평가 수단을 확보하고자, 응력 해석을 수행하여 그 결과 및 균열 건전성 평가 기준에 기반하여 웹 기반의 응력부식균열의 건전성 평가용 전산 시스템을 개발하였다.

이종금속으로 구성된 용접부를 대상으로 한 용접 후 열처리 효과에 관한 연구로 J. Y. Huang 등[26]은 비등수형 원자로 냉각환경에서 Alloy 52와 A508F2, Alloy 82와 A508F2 모재를 이종 접합하여 621℃에서 24시간 조건으로 열처리한 결과 열처리 하기 전에 용접 상태보다 균열 성장속도는 빨랐으나 621℃에서 열처리한 다음 다시 400℃에

서 200시간 열처리 하였을 때는 용접 그대로의 상태보다 응력부식균열 저항성이 높아진 것을 보여 주었다. 황은 모재에서 빠져나와 희석지역의 입계를 따라 편석하여 Alloy 52와 SA508 Gr.3 Cl.1의 입계 강도와 응력부식균열 저항성을 약화시켰으며 응력부식균열 저항성에 크롬 함량은 단독으로 영향을 미치지 않았고 국소화된 변형농도와 관계가 있었다. 용접 후 열처리는 탄화 석출물의 분포변화와 변형농도의 국소화를 가져와 용접부 잔류응력에 전체적인 재분포를 유도하였으며, 이처럼 용접 잔류응력과 마르텐사이트 조직을 감소시키기 위해서는 합금강의 이중금속 용접부에 용접 후 열처리를 적용해야 한다는 결과를 보였다.

제 3 장 시험편 제작 용접 및 시험방법

제1절 시험편 제작

1. 82 및 52 합금 용접재료를 적용한 Butt 용접 시험편

실험에서 사용된 모재는 원전 주기기로서 많이 사용되는 저합금강 및 인코넬 690 plate이고 용가재는 Alloy 82, 52를 사용하였다. Table 3.1는 SA508 Gr.3 Cl.1 강재의 기계적 특성에 대한 ASME Spec.을 나타내었고 table 3.2에는 SA508 Gr.3 Cl.1 강재의 화학성분에 대한 ASME Spec.을 나타내었다.

Table 3.1 SA508 Gr.3 Cl.1 mechanical properties of steel.

Items	YS(Yield strength)	TS(Tensile strength)	EL(Elongation), (%)
SA508 Gr.3 Cl.1 ASME Spec.	345~450 MPa	550~795 MPa	Min 18%

Table 3.2 SA508 Gr.3 Cl.1 chemical composition of steel.

Unit: %

Material	C	P	Mn	S	Ni	Si	Mo	V	Ca	Cu	Cr
SA508 Gr.3 Cl.1 ASME Spec.	≤ 0.25	≤ 0.025	≤ 1.5	≤ 0.025	≤ 1	≤ 0.4	≤ 0.6	≤ 0.05	≤ 0.015	≤ 0.2	≤ 0.25

SA508 Gr.3 Cl.1 강재의 기계적 특성 및 화학성분의 ASME Spec.은 시험편 선정에 있어서 기준이 되며 시험편 용접 후 용접부에 대한 인장강도와 화학성분을 ASME Spec.과 비교 하여 용접부의 건전성을 확인 할 수 있다. 또한 SA508 Gr.3 Cl.1 강재 용접 후 용접부의 인장강도는 ASME Spec.의 인장강도인 550~795 MPa 범위안에 있어야 하며 용가재 선정에 있어서도 강재의 화학성분과 유사한 성분으로 구성된 용가재를 선택해야 한다.

Table 3.3에는 인코넬 690 강재의 기계적 특성에 대한 ASTM Spec.을 나타내었고 table 3.4에는 화학성분에 대한 ASTM Spec.을 나타내었다.

Table 3.3 Inconel 690 mechanical properties of steel.

Items	YS(Yield strength)	TS(Tensile strength)	EL(Elongation).(%)
Inconel 690 ASTM Spec.	≥241 MPa	≥586 MPa	≥30

Table 3.4 Inconel 690 chemical composition of steel.

Unit: %

Material	C	Si	Mn	S	Ni	Fe	Cu	Cr
Inconel 690 ASTM Spec.	≤ 0.05	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.015	58.0 min.	≤ 11.0	≤ 0.5	27.0 - 31.0

이종금속 용접은 모재와 화학성분이 다른 재료가 접합되므로 금속에서의 미세조직, 용융선경계의 특성변화에 대한 검토가 필요하며 이런 검토를 위한 선행조건으로 이종 금속 용접에 사용되는 용접재료의 화학성분 및 건전성이 확인 되어야 한다. 사용된 용접재료는 GTAW에 적용 가능한 용가재를 사용하였고 Alloy 82와 Alloy 52의 화학성분을 각각 table 3.5 및 table 3.6 에 나타내었다.

Table 3.5 Alloy 82 chemical composition compare.

Unit: %

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Nb+Ta
ERNiCr-3 ASME Spec.	0.02	0.11	3.09	20.32	71.90	1.04	2.44

Table 3.6 Alloy 52 chemical composition compare.

Unit: %

Material	C	Mn	Fe	S	S	Cu	Ni	Al	Ti	Cr	Nb+Ta	Mo
ERNiCrFe-7 ASME Spec.	≤ 0.04	≤ 1	7-11	≤ 0.015	≤ 0.5	≤ 0.3	Rem	≤ 1.1	≤ 1.0	28- 31.5	≤ 0.1	≤ 0.5

용가재(Alloy 82, 52)의 ASME Spec.을 기준으로 시험편 용접에 사용할 용가재를 선

정하고 시험편 용접부에 대한 용착금속의 화학시험을 하여 크롬의 함량을 ASME Spec. 과 비교하였다.

용접부에 예열은 저온균열의 방지를 위해 적용할 수 있는 대책 중 가장 효과적인 것으로 균열 발생이 높은 모재에 대하여 용접작업 수행 전 용접할 대상물의 전체 또는 용접할 구간에 온도를 올리고 용접을 수행하였다. 이를 통해 용접부 냉각 속도를 지연시켜 열영향부의 경도를 낮게 하고 인성을 증가시킴과 동시에 용착금속의 수소 방출을 용이하게 하여 저온균열 방지와 용접부의 기계적 특성을 향상시키고 경화조직의 석출 방지 및 급가열의 방지로 변형과 잔류응력을 완화하고자 하는데 목적이 있다.

용접을 하면 용접이 수행된 구간보다 용접부 주변이 용접 입열에 의해 구조적으로 취약해지는 현상이 발생하는데, 이처럼 열을 받는 영역을 열영향부(Heat affected zone, HAZ)라고 하며 이 부분은 용접 잔류응력 제거, 응력집중 완화, 조직 안정화와 같은 용접 후 열처리를 필요로 하게 된다. 용접 중 잔류열의 영향을 받는 지점인 열영향부를 포함, 모든 용접부에 대한 후열처리의 온도 및 유지시간은 ASME Sec.VIII DIV 1 Sub Sec.C UCS 56~UHA 32에 따라 최소 유지시간 동안 해당온도 범위 내에서 유지해야 한다. 모재에 용융(Fusion) 용접을 하면 아크에 의하여 용접할 구간이 용융되어야 하므로 응고가 진행되는 중에 모재와 용융부가 충분한 금속 간 화합물을 생성할 수 있는 시간과 에너지를 필요로 하게 된다. 이런 과정에 필요한 전기적 에너지를 용접 입열량이라 정의할 수 있으며 이 전기적 에너지는 모두 모재를 용융시키는 용접열원으로 사용 되지 않고 다음과 같은 에너지 소모 분포를 갖게 된다.

- ① 용접봉 용융으로 인한 에너지 소모 : 15%
- ② 용착 금속 생성으로 인한 에너지 소모 : 20~40%
- ③ 모재의 가열, 대류, 복사로 인한 에너지 소모 : 60~85%

일반적으로 아크 용접에서의 용접 입열량은 식 3.1과 같다.

$$\text{입열량} = (V \cdot A \cdot 60 \cdot K) / (1000 \cdot S) \text{ (kJ/mm)} \text{ ----- 식 3.1}$$

V = Voltage a current

S = Speed

K = Thermal efficiency factor (k = 1)

용접 입열량은 용접 전 예열이나 용접 중에 패스 간 온도와 같은 아크 발생 이전에 모재가 흡수한 열에너지에 대해서는 고려되지 않은 것으로 용접 입열량의 많고 적음은 용접부가 냉각되는 속도와 용접 패스 수에 영향을 미친다. 용접선의 단위 길이에 부여되는 용접 입열량이 많을수록 용접부 냉각속도가 지연되고 두꺼운 비드가 형성되면서

조대한 조직이 된다. 용접 수행 중에 아크 길이가 길어지면 전압이 높아지고 복사에 의한 열에너지 손실이 많아지므로 용접부 유효 열량이 적어지게 되는데, 이와 같이 아크 전압의 영향은 무시할 수 있을 정도로 작으며 용접 입열에 영향을 주는 변수는 용접전류 및 용접속도이다. 그러므로 용착금속 항복점의 저하, 용접 재료와 모재의 경계인 본드존 및 용착금속의 충격값 저하를 방지하기 위해 과대한 용접 입열은 피해야 한다. 또한, 낮은 용접 입열은 용접부에 냉각 속도를 빠르게 하고 이로 인하여 모재 열영향부의 용접금속 경화로 균열 발생의 원인이 되며, 비드의 시작점과 종착점 및 아크 발생점에서는 적은 용접 입열로 인하여 냉각 속도가 빨라진다. 따라서 용접 균열을 방지하고 건전한 용접부를 확보하기 위해서는 모재의 특성 및 형상에 따라서 적절한 범위의 용접 입열량을 선택해야 한다.

용접부는 주소에 비해 냉각속도가 빠르기 때문에 용융금속의 응고에는 주조공정과는 다른 응고이론을 적용하게 되고 응고조직도 비평형상의 미세조직을 띄게 된다. 용접 중에 금속이 녹았다가 응고된 FL(Fusion line)의 미세조직은 용융지(Weld pool)에서의 응고거동에 따라 결정된다. 즉 응고과정에서 결정립의 크기와 형태, 편석, 불순물의 분포와 기공등이 결정된다. 또한 용융지에서의 응고거동은 결정의 성장속도, 온도경사, 과냉, 그리고 합금의 조성 등에 의해 결정된다. 용융지의 형태는 용접금속 결정립자의 성장과 수지상(Dendrite)의 성장과정에 중요한 영향을 미친다. 아크 용접 시 용융지에서의 대류(Convection)는 전자기력, 부력(Buoyance), 용융금속의 표면 인장력 등에 의해 결정되며 이와 같은 대류의 크기에 따라 용접부의 용입 깊이가 정하여지므로 용접 시 주의하여 작업을 해야 한다.

희생층(Sacrificial layer)용접에서 Alloy 52 용접재료는 100% 오스테나이트계로 용접부에 델타 페라이트가 함유되지 않아 오버레이 용접부의 델타 페라이트 축정은 할 필요가 없고 용접재료의 화학조성비는 ASME Code Case 2142-2 요건 및 ASME Code Sec.II Part C 요건을 만족한다. 모재로부터의 희석률을 줄이기 위해서 용접 수행 시 전력비를 감소하여 용접 하였으며 이는 오버레이 용접에 희생 층 용접 시 적용한다.

패스 간 온도 관리는 최저한계와 최고한계의 2가지 개념에서 고려하였다. 패스간 용접 중에 층간온도의 과도한 상승은 용접 입열량이 증가되게 하여 결정입자 조대화, 탄소의 흑연화(Graphitization), 각종 탄화물 생성 등 야금학적으로 건전하지 못한 조직구조가 발생할 수도 있다. 패스간 온도관리를 최고한계로 규정하는 이유는 탄소강 모재의 흑연화를 방지하고, 소입, 소려(QT : Quenching & tempering)강재의 소려효과 유지와 저온용강 모재의 경우에는 용접 입열량 제어를 통하여 충격인성을 확보하는 것이

주된 목적이다.

오스테나이트계 스테인리스 강 및 니켈 Alloy 등의 모재는 예민화(Sensitization)에 의한 입계부식(Intergranular corrosion)방지와 탄화물의 일종인 시그마상의 석출에 의한 균열 등을 예방한다. 그러나 필요이상으로 최고 패스간 온도를 제한하는 것은 작업성을 저하시킨다.

모재에 용접 후 형성된 용착금속은 한번 금속이 용융된 후 응고한 부분으로 주조직을 형성하고 모재와는 명확하게 구분이 된다. 또한, 인접한 모재는 용착금속으로부터 전도된 열에 의하여 급열 및 급랭에 의한 열 이력(Thermal hysteresis)을 받아 용융점 직하에서는 광범위한 온도영역으로 가열되어 열영향부가 형성된다. 이때 각 부분이 도달한 최고 온도를 최고 가열온도(Peak temperature)라고 한다.

용융면(Fusion face)은 용접금속과 열영향부와와의 경계를 의미하며 본드(Bond)라고 한다. 용융면은 용융점(Melting point) 또는, 응고온도 범위(Melting range)까지 가열된 곳으로 원소가 용착금속과 열영향부 사이를 이동 확산된 구간으로 균열 발생에 취약하고 야금학적으로도 건전하지 못한 곳이다. 용접 중 용융지는 아크의 이동에 따라 운동을 하며 결정립의 성장속도와 온도 구배도가 위치마다 다르다. 즉 용융선 주변에서는 결정립의 성장속도는 느린 반면 온도경사는 매우 큰 경사를 보이며 용융지의 중심부로 이동함에 따라 결정립의 성장속도는 증가하고 온도경사는 점차로 감소하게 된다.

니켈계 초내열합금의 점 용접부에서 고액 계면의 성장속도가 용접부 중심으로 갈수록 빨라져서 응고조직도 셀상에서 수지상으로 변화하는 형태를 보이고 용융지의 응고 과정에서 용질원소의 분포에 따라 재료의 용접성과 미세조직, 그리고 물성에 영향을 미칠 수 있는 편석이 발생하게 된다. 주조직의 성격을 갖는 용접금속은 조직 압연과 열처리를 통해 제조된 미세립의 모재에 비해 매우 취약하고 기공, 균열, 용합불량과 같은 용접결함이 발생하기 쉽기 때문에 용접구조물의 기계적 특성과 내 부식성 등을 모재수준으로 확보 할 수 있도록 용접 중에 일어나는 응고거동을 분석하고 응고조직을 분석해야 한다. 본 실험에서 수행된 Butt 용접(Alloy 82, 52)시험편 제작 사양 및 내 용은 table 3.7과 같다.

Table 3.7 Specification for welding specimen for test.

No.	Specifications of specimen	Type of specimen
1	SA508 Gr.3 Cl.1(1ea) + SB168 N06690(1ea) Size : 40T*150W*350L + 10T*150W*350L	Butt(V-groove) weld, Alloy 82 Alloy 82 : Inconel 600(ERNiCr-3)
2	SA508 Gr.3 Cl.1(1ea) + SB168 N06690(1ea) Size : 40T*150W*350L + 10T*150W*350L	Butt(V-groove) weld, Alloy 52 Alloy 52 : Inconel 690(ERNiCrFe-7A)

Butt(V-groove) 용접 시험편 2개를 준비하여 No.1 시험편은 인코넬 600계 용가재 (Alloy 82)로 버터링 및 용접을 하고 No.2 시험편은 인코넬 690계 용가재(Alloy 52)로 버터링 및 용접을 하여 시험편을 제작하였다.

SA508 Gr.3 Cl.1와 인코넬 690 plate의 Butt 용접에 Alloy 82 용가재로 버터링 용접을 Min 3.2mm 하고 V-groove 홈의 용접은 총 7패스로 4층 용접을 하였다.

No.1 시험편의 Butt 용접 시 Alloy 82를 적용한 시험편 schematic diagram은 fig. 3.1와 같고 용접조건은 table 3.8 및 용접 입열량 조건은 table 3.9에 나타내었다.

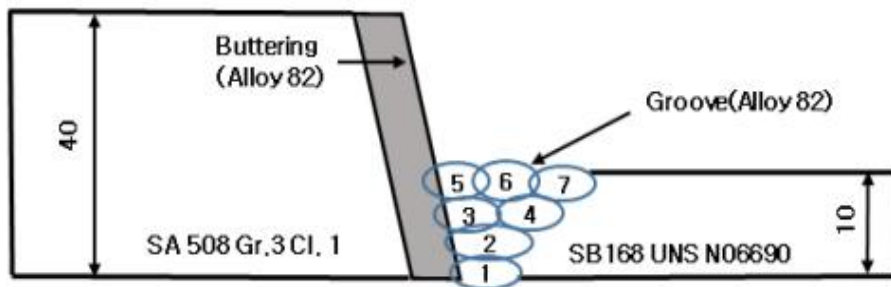


Fig. 3.1 Alloy 82 buttering and welding schematic diagram.

Table 3.8은 No.1 시험편의 SA508 Gr.3 Cl.1와 인코넬 690 plate의 Butt 용접 조건으로 버터링 용접 전 예열온도는 123℃로 하였고 그루브 용접 전 예열온도는 17℃로 하였다.

버터링 용접은 저합금강과 용접이 되기 때문에 예열이 필수사항인 반면에 그루브 용접은 Alloy 82로 버터링 용접된 부위에 용접이 이루어지기 때문인데, 인코넬 조직으로 형성된 용접부에 겹침 용접에는 예열 없이 상온에서 용접이 가능하다.

Table 3.8 Alloy 82 welding conditions.

Specification	SA508 Gr.3 Cl.1 to SB168 N06690
Thickness	40 mm(SA508 Gr.3 Cl.1) + 10 mm(SB168)
Type	P-No. : 3 Gr.No.3 to P-No. : 43 Gr.No.-
Filler metal	F-No. : 43, AWS Classification : ERNiCr-3
Preheat temperature	17°C(Groove), 123°C(Buttering)
Interpass temperature	Groove: 175°C, Buttering: 65°C(1st~3rd layer)
Preheat maintenance	Maintained more than Min. preheat temp. during welding
Post heating	Temp.: 223~296°C, Time: 2Hr
Post weld heat treatment	Range of temp. : 608~611°C, Range of time : 1Hr 22Min(Hr/inch)
	PWHT was applied to 1~3 layers buttered weld but not to 1~4 layers groove weld.
	After buttering welding 608~611°C 1Hr 22min PWHT
Shielding gas	AR, 99.99%
Flow rate	10 ~ 20 L/Min
Polarity	DCEN(Direct current electrode negative)
Amps, volts range	130 ~ 220 A, 11 ~ 13 V
Bead type	String
Gas cup size	I.D 12 mm
Interpass cleaning	Grinding
Multiple or single pass of electrodes	Multiple / Single

Table 3.9는 No.1 시험편 용접에 적용된 입열량을 나타낸 것으로 Max. 13.7kJ/cm 조건으로 그루브 용접을 하고 층간온도는 Min. 175°C로 하여 고온균열을 방지하였다.

Table 3.9 Alloy 82 welding heat input conditions.

Welding pass	Welding methods	Welding rod		Current		Volts range	Speed range (cm/min)	ETC. (Max heat input)
		Type	Diameter (mm)	Polarity	Range			
Buttering	GTAW	ERNiCr-3	2.4	DCEN	130-220	11-13	10-13	13.7kJ/cm
Groove	GTAW	ERNiCr-3	2.4	DCEN	130-220	11-13	10-13	13.7kJ/cm

No.2 시험편의 Butt 용접 시 Alloy 52를 적용한 시험편 schematic diagram은 fig. 3.2와 같고 용접조건은 table 3.10 및 용접 입열량 조건은 table 3.11에 나타내었다. SA508 Gr.3 Cl.1과 인코넬 690 Plate의 버터링 및 그루브 용접에 Alloy 52 용가재로 용접을 하며 버터링 용접의 두께는 Min 3.2mm 하고 V-groove 홈의 용접은 총 7패스에 4층 용접을 하였다.

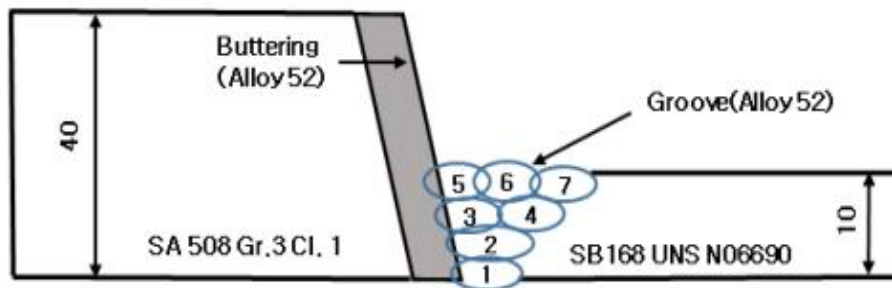


Fig. 3.2 Alloy 52 buttering and welding schematic diagram.

Table 3.10은 No.2 시험편의 SA508 Gr.3 Cl.1와 인코넬 690 plate의 Butt 용접 조건으로 버터링 용접 이후 용접 후 열처리 하였다. 후열처리 조건은 온도 608~611℃에서 유지시간을 1Hr 22 Min(Hr/inch당)로 하였다. 버터링 용접은 저합금강에 Alloy 52 용가재로 이종 금속용접이 되는 곳으로 용접 후 열처리를 꼭 해야 하며 그 이유는 저합금강의 열 영향부가 용접으로 인해 취약하게 되며 침상조직으로 경도가 상승하여 용접 후 열처리를 통한 열영향부에 템퍼링이 필요하기 때문이다.

Table 3.10 Alloy 52 welding conditions.

Specification	SA508 Gr.3 Cl.1 to SB168 N06690
Thickness	40 mm(SA508 Gr.3 Cl.1) + 10 mm(SB168)
Type	P-No. : 3 Gr.No.3 to P-No. : 43 Gr.No.-
Filler metal	F-No. : 43, AWS Classification : ERNiCrFe-7A
Preheat temperature	17°C(Groove), 123°C(Buttering)
Interpass temperature	Groove: 175°C, Buttering: 65°C(1st~3rd layer)
Preheat maintenance	Maintained more than Min. preheat temp. during welding
Post heating	Temp.: 223~296°C, Time: 2Hr
Post weld heat treatment	Range of temp. : 608~611°C, Range of time : 1Hr 22Min(Hr/inch)
	PWHT was applied to 1~3 layers buttered weld but not to 1~4 layers groove weld.
	After buttering welding 608~611°C 1Hr 22min PWHT
Shielding gas	AR, 99.99%
Flow rate	15 ~ 20 L/Min
Polarity	DCEN(Direct current electrode negative)
Amps range	130 ~ 220 A
Volts range	11 ~ 13 V
Bead type	String
Gas cup size	I.D 12 mm
Interpass cleaning	Grinding
Multiple or single pass and electrodes	Multiple / Single

Table 3.11은 No.2 시험편 용접에 적용된 입열량을 나타낸 것으로 Max. 13.7kJ/cm 조건으로 그루브 용접을 하고 층간온도 Min. 175°C를 준수하면서 용접하였다.

Table 3.11 Alloy 52 welding heat input conditions.

Welding pass	Welding methods	Welding rod		Current		Volts range	Speed range (cm/min)	ETC. (Max heat input)
		Type	Diameter (mm)	Polarity	Range			
Buttering	GTAW	ERNiCr Fe-7	2.4	DCEN	130-220	11-13	10-13	13.7kJ/cm
Groove	GTAW	ERNiCr Fe-7	2.4	DCEN	130-220	11-13	10-13	13.7kJ/cm

2. 스테인리스 309L 용접재료로 버터링 후 82 및 52 합금 용접재료를 적용한 Butt 용접 시험편

본 실험에서는 저합금강(SA508 Gr.3 Cl.1)모재에 버터링 용접을 309L 용가재로 적용 후 홈 용접시 Alloy 82, 52 용가재를 적용하여 시험편 제작을 하였으며 시험편에 대한 제작 사양 및 내용은 table 3.12와 같다.

Table 3.12 Specifications for welding specimen for test.

No.	Specifications of specimens	Type of specimens
1	SA508 Gr.3 Cl.1(1ea) + SB168 N06690(1ea) Size : 40T*150W*350L + 10T*150W*350L	Buttering weld : 309L Butt weld : Alloy 82(ERNiCr-3)
2	SA508 Gr.3 Cl.1(1ea) + SB168 N06690(1ea) Size : 40T*150W*350L + 10T*150W*350L	Buttering weld : 309L Butt weld : Alloy 52(ERNiCrFe-7)

버터링 용접에 Alloy 82, 52 용가재 대신에 309L 적용 시 용접부의 기계적 특성을 관찰하고자 Butt 용접 시험편을 제작 하였다. No.1 시험편의 Butt 용접시 Alloy 82를 적용한 시험편의 schematic diagram은 fig. 3.3과 같고 용접조건은 table 3.13 및 용접 입열량 조건은 table 3.14 에 나타내었다.

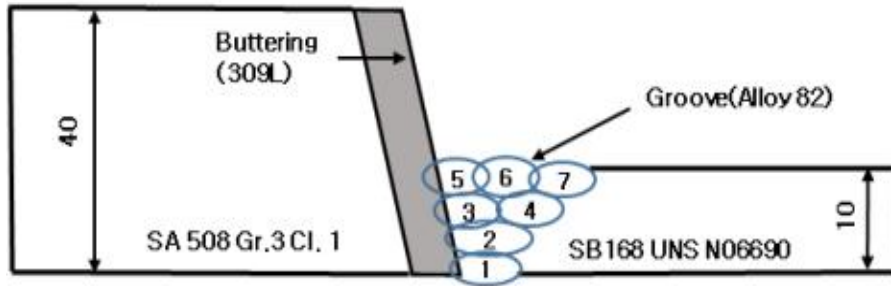


Fig. 3.3 309L buttering and Alloy 82 groove welding schematic diagram.

SA508 Gr.3 Cl.1와 인코넬 690 plate의 Butt 용접에 309L 용가재로 버터링 용접을 Min 3.2mm 하고 V-groove 홈 용접은 Alloy 82로 7 패스에 4층 용접을 하였다.

Table 3.13은 SA508 Gr.3 Cl.1와 인코넬 690 plate의 Butt 용접공정 중 버터링 용접에 309L 용가재를 적용 했을 때의 용접조건으로 버터링 용접 후 온도 608~611℃에서 유지 시간을 1Hr 22Min(Hr/inch당)로 하여 용접 후 열처리를 수행하였다.

Table 3.13 Welding conditions.

Type	P-No.:8(*) Gr.No.- to P-No.:43 Gr.No.- (*):P-No.3 with P-No.8(309L) buttered over 3.2 mm & PWHT
Filler metal	F-No. : 6 / 43, AWS Classification : 309L / ERNiCr-3
Preheat temperature	17℃(Groove), 123℃(Buttering)
Interpass temperature	Groove:175℃, Buttering:65℃(1st~3rd layer)
Post heating	Temp.: 223~296℃, Time: 2Hr
Post weld heat treatment	After buttering welding 608~611℃ 1Hr 22min PWHT
Shielding gas	AR, 99.99%
Flow rate	10 ~ 20 L/Min
Polarity	DCEN(Direct current electrode negative)
Amps range	130 ~ 220 A
Volts range	11 ~ 13 V
Interpass cleaning	Grinding

Table 3.14는 시험편 용접에 적용된 입열량을 나타낸 것으로 Max. 13.7kJ/cm 조건에서 버터링 용접 시 층간온도는 65℃, 그루브 용접 시 층간온도는 Min. 175℃로 하였다.

Table 3.14 Welding heat input conditions.

Welding pass	Welding methods	Welding rod		Current		Volts range	Speed range (cm/min)	ETC. (Max heat input)
		Type	Diameter (mm)	Polarity	Range			
Buttering	GTAW	309L	2.4	DCEN	130-220	11-13	10-13	13.7kJ/cm
Groove	GTAW	ERNiCr-3	2.4	DCEN	130-220	11-13	10-13	13.7kJ/cm

Fig. 3.4는 No.2 시험편의 Butt 용접 시 Alloy 52를 적용한 시험편에 schematic diagram이고 용접조건은 table 3.15에 용접 입열량 조건은 table 3.16에 나타내었다.

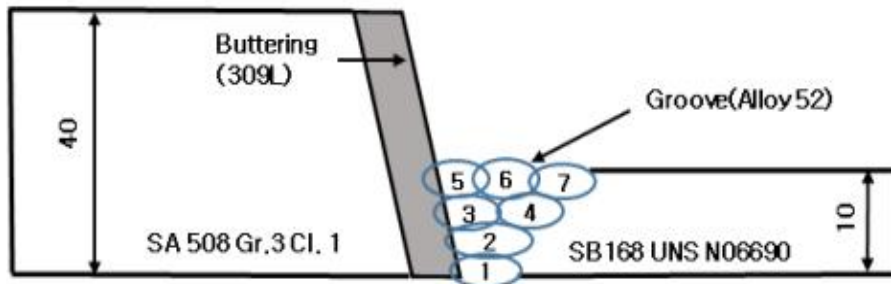


Fig. 3.4 309L buttering and Alloy 52 groove welding schematic diagram.

SA508 Gr.3 Cl.1와 인코넬 690 plate의 Butt 용접에 309L 용가재로 버터링 용접을 Min 3.2mm 하고 V-groove 홈 용접은 Alloy 52로 7 패스에 4층 용접을 하였다.

Table 3.15는 SA508 Gr.3 Cl.1와 인코넬 690 plate의 Butt 용접에 버터링 용접 시 309L 용가재를 사용 하고 V-groove 홈 용접에는 Alloy 52를 사용 했을 때의 조건으로 버터링 용접 후 온도 608~611℃, 유지시간 1Hr 22Min(Hr/inch당)로 용접 후 열처리를 수행 하였다.

Table 3.15 Welding conditions.

Specification	SA508 Gr.3 Cl.1 to SB168 N06690
Thickness	40 mm(SA508 Gr.3 Cl.1) + 10 mm(SB168)
Type	P-No. : 8(*) Gr.No.- to P-No. : 43 Gr.No.- (*): P-No.3 with P-No.8(309L) buttered over 3.2 mm & PWHT
Filler metal	F-No. : 6 / 43, AWS Classification : 309L / ERNiCrFe-7A
Preheat temperature	17°C(Groove), 123°C(Buttering)
Interpass temperature	Groove: 175°C, Buttering: 65°C(1st~3rd layer)
Preheat maintenance	Maintained more than Min. preheat temp. during welding
Post heating	Temp.: 223~296°C, Time: 2Hr
Post weld heat treatment	Range of temp. : 608~611°C, Range of time : 1Hr 22Min(Hr/inch)
	PWHT was applied to 1~3 layers buttered weld but not to 1~4 layers groove weld.
	After buttering welding 608~611°C 1Hr 22min PWHT
Shielding gas	AR, 99.99%
Flow rate	15 ~ 20 L/Min
Polarity	DCEN(Direct current electrode negative)
Amps range	130 ~ 220 A
Volts range	11 ~ 13 V
Bead type	String
Gas cup size	I.D 12 mm
Interpass cleaning	Grinding
Multiple or single pass of electrodes	Multiple / Single

Table 3.16은 시험편 용접에 적용된 입열량을 나타낸 것으로 Max. 13.7kJ/cm 조건에서 정극성 특성을 사용하여 버터링 및 그루브 용접을 하였다.

Table 3.16 Welding heat input conditions.

Welding pass	Welding methods	Welding rod		Current		Volts range	Speed range (cm/min)	ETC. (Max heat input)
		Type	Diameter (mm)	Polarity	Range			
Buttering	GTAW	309L	2.4	DCEN	130-220	11-13	10-13	13.7kJ/cm
Groove	GTAW	ERNiCrFe-7	2.4	DCEN	130-220	11-13	10-13	13.7kJ/cm

3. 스테인리스 309L 용접재료로 버터링 후 82 및 52 합금 용접재료를 적용한 오버레이 용접 시험편

본 실험에서는 저합금강(SA508 Gr.3 Cl.1)모재에 오버레이 용접 시 버터링 용접을 Alloy 82, 52, 309L 용가재를 사용하여 시험편 제작을 하였으며 제작사양 및 내용은 table 3.17와 같다.

Table 3.17 Specifications for welding specimen for test.

No.	Specifications of specimens	Type of specimens
1	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Buttering weld : 309L Overlay weld : Alloy 52
2	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Buttering weld : Alloy 82 Overlay weld : Alloy 52
3	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Buttering weld : Alloy 52 Overlay weld : Alloy 52

오버레이 용접 시험편 제작 시 버터링 용접에 Alloy 82, 52, 309L 용가재를 사용하여 시험편을 용접하여 버터링 용접에 사용된 용가재 성분에 따른 용접부 기계적 특성을 관찰하고자 시험편을 준비하였다.

Fig. 3.5는 오버레이 용접 시험편에 버터링 용접 시 Alloy 82, 52, 309L 용가재를 사용하여 제작할 시험편의 schematic diagram이고 table 3.18에는 용접조건 그리고 table 3.19에는 용접 입열량 조건을 나타내었다.

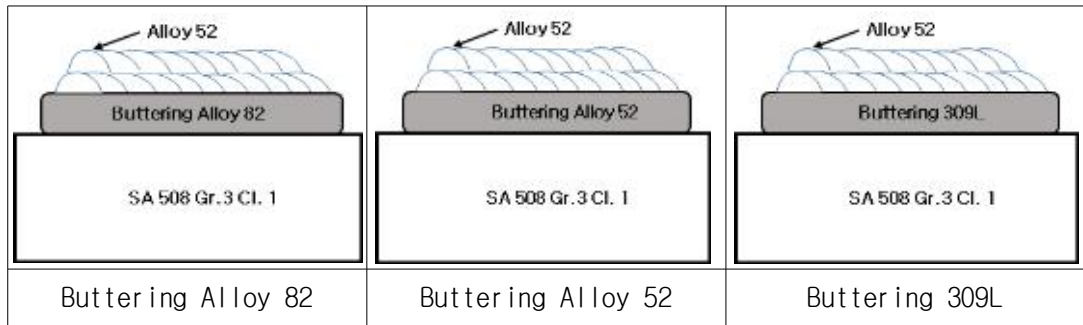


Fig. 3.5 Alloy 82, Alloy 52, 309L buttering schematic diagram.

Table 3.18는 저합금강 오버레이 용접시험편 제작 시 적용된 용접 조건을 나타낸 것으로 정극성으로 용접을 하였고 예열온도는 버터링 용접 시 123℃, 그루브 용접 시 17℃로 하고 층간온도는 버터링 용접은 65℃, 그루브 용접은 175℃로 하고 용접 후 열처리는 버터링 용접 후 온도 608~611℃, 유지시간 1Hr 22Min(Hr/inch당)로 하였다.

Table 3.18 Welding conditions.

Specification	SA508 Gr.3 Cl.1
Thickness	40T*300W*300
Preheat temperature	17°C(Groove), 123°C(Buttering)
Interpass temperature	Overlay : 175°C, Buttering : 65°C(1st~3rd layer)
Preheat maintenance	Maintained more than Min. preheat temp. during welding
Post heating	Temp.: 223~296°C, Time: 2Hr
Post weld heat treatment	Range of temp. : 608~611°C, Range of time : 1Hr 22Min(Hr/inch)
	PWHT was applied to 1~3 layers buttered weld but not to 4~5 layers
	After buttering welding 608~611°C 1Hr 22min PWHT
Shielding gas	AR, 99.99%
Flow rate	10 ~ 20 L/Min
Polarity	DCEN(Direct current electrode negative)
Amps range	130 ~ 220 A
Volts range	11 ~ 13 V
Bead type	String
Gas cup size	I.D 12 mm
Interpass cleaning	Grinding

버터링 용접에 있어서 화학성분이 각기 다른 Alloy 82, 52, 309L 용가재를 사용하여 용접하고 4층 및 5층은 인코넬 690계 화학성분인 Alloy 52 용가재로 용접을 하였다.

Fig. 3.6과 같이 버터링 용접에 Alloy 82, 52, 309L 용가재를 사용하여 제작한 오버레이 용접 시험편을 나타내었다. 3개의 시험편 모두 같은 용접 입열량 및 층간온도를 준수하여 용접을 하였다.



Fig. 3.6 Overlay welding specimen.

Table 3.19는 저합금강 모재에 오버레이 용접을 Alloy 82/52, 309L 용가재를 사용하여 시험편 제작 시 적용한 용접 입열량을 나타낸 것으로, Max. 13.7kJ/cm 조건으로 버터링 및 오버레이 용접을 하고 총간온도 Min. 175℃를 준수하면서 용접하였다. 버터링 용접에는 Alloy 82/52, 309L을 사용하고 오버레이 용접에는 인코넬 690계 화학성분의 용가재인 Alloy 52를 사용하여 용접하였다. 버터링 용접 후에는 후열처리를 하며 후열처리 조건은 온도 608~611℃ 범위에서 유지시간을 1Hr 22min 유지 후 서냉하였다.

Table 3.19 Welding heat input conditions.

No.	Welding pass	Welding methods	Welding rod		Current Range	Volts range	Speed range (cm/min)	ETC. (Max heat input)
			Type	Diameter (mm)				
1	Buttering	GTAW	309L	2.4	130-220	11-13	10-13	13.7kJ/cm
	Over lay	GTAW	ERNiCrFe-7A	2.4				
2	Buttering	GTAW	ERNiCr-3	2.4	130-220	11-13	10-13	13.7kJ/cm
	Over lay	GTAW	ERNiCrFe-7A	2.4				
3	Buttering	GTAW	ERNiCrFe-7A	2.4	130-220	11-13	10-13	13.7kJ/cm
	Over lay	GTAW	ERNiCrFe-7A	2.4				

4. 52 합금 용접재료의 입열량에 따른 5층 용접 시험편

본 실험에서는 저합금강(SA508 Gr.3 Cl.1) 오버레이 용접에서 용접 입열량 변화에 따른 기계적 특성 및 조직변화를 관찰하고자 table 3.20와 같이 시험편을 준비하고 저, 중, 고입열량으로 용접을 하여 시험편을 제작하였다.

Table 3.20 Specifications for welding specimen for test.

No.	Specifications of specimens	Type of specimens
1	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Low heat input Overlay weld : Alloy 52
2	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Medium heat input Overlay weld : Alloy 52
3	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	High heat input Overlay weld : Alloy 52

Alloy 52 용가재를 사용하여 각 시험편들에 저, 중, 고입열량으로 오버레이 용접을 하는 시험편의 schematic diagram은 fig. 3.7에 나타내었으며, 각 용접조건은 table 3.21 그리고 각 시험편들의 용접 입열량은 table 3.22에 나타내었다.

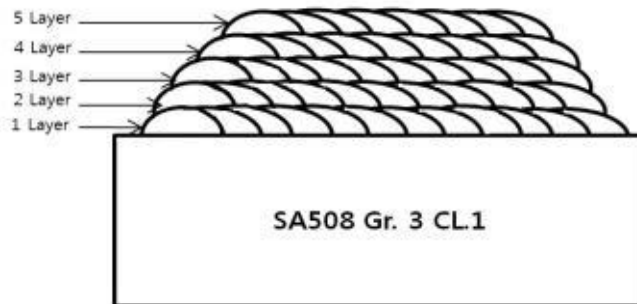


Fig. 3.7 Low, medium, high weld heat input specimen.

Table 3.21은 저합금강 오버레이 용접 시 입열량 변화를 적용한 용접조건을 나타낸 것으로 예열온도는 버터링 용접 시 123℃, 그루브 용접은 17℃로 하였고 층간온도는 버터링 용접 시는 65℃, 그루브 용접 시는 175℃로 하였다. 그리고 용접 후 열처리는 버터링 용접 후 온도 608~611℃, 유지시간 1Hr 22Min(Hr/inch당)로 하였다.

Table 3.21 Welding specifications(Low, medium, high heat input).

Specification	SA508 Gr.3 Cl.1
Thickness	40T*300W*300
Type	P-No. : 3(*) Gr.No.3 (*): P-No.3 with P-No.43(ERNiCrFe-7A) Cladded over 3.2 mm & PWHT
Filler metal	F-No. : 43, AWS Classification : ERNiCrFe-7A
Preheat temperature	17°C(Groove), 123°C(Buttering)
Interpass temperature	Overlay : 175°C, Buttering : 65°C
Preheat maintenance	Maintained more than Min. preheat temp. during welding
Post heating	Temp.: 223~296°C, Time: 2Hr
Post weld heat treatment	Range of temp. : 608~611°C, Range of time : 1Hr 22Min(Hr/inch)
	PWHT was applied to 1~3 layers buttered weld but not to 4~5 layers
	After 3 layer welding for Alloy 52 608~611°C 1Hr 22min PWHT
Shielding gas	AR, 99.99%
Flow rate	10 ~ 20 L/Min
Polarity	DCEN(Direct current electrode negative)
Bead type	String
Gas cup size	I.D 12 mm
Interpass cleaning	Grinding
Multiple or single pass and electrodes	Multiple / Single

Table 3.22는 저, 중, 고 입열량으로 시험편 제작 시 적용된 입열량을 나타낸 것으로 그루브 용접 시 층간온도 Min. 175°C를 준수하면서 용접하였다.

Table 3.22 Welding conditions table(Low, medium, high heat input).

Heat input condition	Welding pass	Welding methods	Welding rod	Current		Volt range	Speed range (cm/min)	ETC. (Max heat input)
			Diameter (mm)	Polarity	Range			
Low heat input	Buttering	GTAW	2.4	DCEN	175	11	10	11.5kJ/cm
	Over lay				180			11.8kJ/cm
Medium heat input	Buttering	GTAW	2.4	DCEN	210	13	10	16.3kJ/cm
	Over lay				220			17.1kJ/cm
High heat input	Buttering	GTAW	2.4	DCEN	240	13	9	20.8kJ/cm
	Over lay				250			24.3kJ/cm

5. 열처리 후의 5층 용접 시험편

저합금강(SA508 Gr.3 Cl.1)모재에 Alloy 52를 사용하여 저, 중, 고 입열량으로 용접된 시험편에 후열처리 적용시 기계적 특성 및 조직변화를 관찰하고자 table 3.23과 같이 시험편을 준비하고 후열처리 조건은 625°C에서 1Hr 30분 유지하여 후열처리하였다.

Table 3.23 Specifications for welding specimen for test.

No.	Specimen specification	Specimen type
1	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Apply annealing(625°C, 1Hr 30min.) after low heat input overlay welding with Alloy 52.
2	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Apply annealing(625°C, 1Hr 30min.) after medium heat input overlay welding with Alloy 52.
3	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Apply annealing(625°C, 1Hr 30min.) after high heat input overlay welding with Alloy 52.

제2절 기계적 특성 평가 및 합격 기준

1. 비파괴검사 및 합격기준

용착금속 내부에 공동(Void)과 같은 용접결함이 발생 했을 때 파괴해서 육안으로 확인하면 결함에 이상 유무를 확인할 수 있지만 이러한 파괴검사는 경제적 손실이 크고 모든 제품을 조사하는 데는 적용이 곤란하여 적합하지 않다. 본 연구에서는 용착금속 내부를 검사하여 용접에 건전성을 확인 하는 방법으로 X선 · γ 선 · β 선 등의 방사선투과검사, 철판 · 단조품 · 관재 등의 상처나 내부 결함 등을 검사하는 초음파 탐상검사 및 용접부 표면의 작은 상처의 발견을 위한 액체침투법이 사용되는 액체 침투 탐상검사를 수행하였다. 이와 같이 용접부를 파괴하지 않고 검사하는 방법들을 총칭하여 비파괴검사(Nondestructive testing)라 한다.

설비들의 용접부에 방사선 투과시험을 하면 보통 X선이 많이 사용되며 검출 가능한 결함의 크기를 정하는 방법은 물품과 같은 재료로 된 여러 가지 굵기의 철사를 물품과 같은 두께의 평판 위에 놓고 X선으로 사진을 찍고 각각의 선의 상태를 확인 가능하도록 X선의 강도 및 노출시간을 조절하여한다. 방사선투과검사법의 원리는 결함 부분은 제품의 일반 부분과는 다른 물질(개재물) 또는 공동 같은 용접결함이 존재하기에 X선을 통과하는 능력이 서로 다른 특성을 이용한 방법으로 필름 위에는 이 결함 부분이 일반 부분과는 다르게 농도가 감광되므로 검출된다. X선이 아니고 γ 선을 사용할 때는 코발트 60과 같은 방사선 동위원소를 사용한다.

초음파탐상법은 타진의 원리를 이용한 방법으로 발진장치에서 나온 초음파를 물품의 한 면에서 투입하면 다른 면에서 오는 반사된 음파를 받아서 검사를 하는 방법으로 내부에 결함이 존재하면 결함에서 반사되는 음파가 돌아오는 것으로 결함의 유무를 알 수 있는 방법이다. 방사선을 투과할 때도 초음파의 경우처럼 검출된 결함신호를 파악하기 위해서는 2개 이상의 방향에서 입사를 하여 그 교점으로서 정할 수가 있고, 결함의 크기도 확인 할 수 있다.

액체침투방법은 표면 결함을 찾는 데 사용하는 방법으로 색소나 형광체를 함유하는 액을 결함이 생긴 면에 살포하고 스며들게 한 다음 표면을 세척제를 이용하여 청정작업을 한 후 백묵을 칠하여 침투작업을 한 다음 색소가 밖으로 나오는 것을 보고 육안으로 결함을 발견한다.

본 실험에 적용하는 비파괴검사법들은 Butt 용접시험편에는 방사선투과 및 액체침투

탐상검사를 적용하고 오버레이 용접시험편에는 초음파탐상 및 액체침투탐상검사를 적용하였다.

2. 인장시험법 및 합격기준

인장시험에 사용할 시험편 가공은 ASME Code Sec. IX QW-462.1(A)를 기준으로 하고 시험은 ASME Code BPVC Sec. IX : QW-150 tension test에 따라서 시험하였다[9]. 인장 시험 후 합격기준은 용접부의 인장강도는 모재의 최소 인장강도 이상이 되어야 하고 만약, 두 모재의 인장강도가 서로 다르면 인장강도 값이 작은 것 보다는 커야한다. 마지막으로 fusion line 또는 모재가 파손이 되었을 때는 모재 인장강도에 95% 이상의 값이 나와야 한다.

3. 굽힘시험법 및 합격기준

Butt 용접 시험편의 굽힘 시험에 사용할 시험편 가공은 ASME Code Sec. IX QW-462.2, QW-462.3를 기준으로 하고 시험은 ASME Code BPVC Sec. IX : 2013ED/QW-160 guide bend test에 따라서 시험하였다. 오버레이 시험편의 굽힘 시험 방법은 Butt 용접 시험편의 굽힘 시험 방법과 동일하다. 굽힘 시험 후 최소 품질 요구사항으로는 transverse 굽힘 시험 용접부와 열영향부에서 crack 발생이 없어야 하며 용접부 및 열영향부 부위에 3.175 mm를 초과한 결함이 있으면 안된다. 또한 오버레이 용접시 1.6 mm를 초과한 결함이 없고 bond line에서는 3.175 mm를 초과한 결함이 있으면 안된다.

4. 경도시험법 및 합격기준

오버레이 시험편의 경도시험 방법은 ASTM E-92를 기준으로 하여 fusion line에서 하부방향으로 1mm 간격에 1kg 하중으로 경도시험을 수행하였다. 5층 용접 시험편의 경도시험 방법은 오버레이 시험편의 경도시험과 동일한 방법으로 하였다.

5. 화학성분 분석시험법 및 합격기준

오버레이 용착금속의 화학성분 시험은 ASME Code Sec. IX QW-453에 따르며 화학시험 합격 기준은 화학성분 시험 결과 ASME Code Sec. II Part C의 용가재 Spec.을 만족해야 하며 시험편 치수는 ASME Code Sec. IX QW-462.5(a)를 따라서 가공하였다.

6. 미세조직시험 및 합격기준

조직시험 방법은 용접부에서 weld metal, HAZ, base metal의 미세조직 검사 위치를 선정하고 시험방법은 ASTM E407-07e1에 따라서 용접시 열영향에 의한 조직의 미세화 및 영역별 결정립 크기 및 미세조직의 분포 영역 등을 관찰하였다.

제 4 장 실험 결과 및 고찰

제1절 비파괴검사 시험 결과

1. Butt 용접 시험편

Butt 용접 시 Alloy 82/52, 309L 용가재의 화학성분에 따른 용접부의 기계적 특성을 확인하고자 table 4.1과 같이 버터링 용접부에 용가재(Alloy 82, Alloy 52, 309L)를 사용하여 제작한 Butt 용접시험편을 준비하여 동일한 용접 입열량 및 층간온도 준수, 버터링 용접 후 후열처리 등 용가재의 변경을 제외하고 모든 용접 조건들이 같도록 하여 시험편 용접을 수행하였다.

Table 4.1 Butt specifications of welding specimen.

No.	Specimen specification	Type of specification
1	SA508 Gr.3 Cl.1 + SB168 N06690 Size: 40T*150W*350L + 10T*150W*350L	(1) Buttering weld : Alloy 82 Butt weld : Alloy 82(ERNiCr-3)
2	SA508 Gr.3 Cl.1 + SB168 N06690 Size: 40T*150W*350L + 10T*150W*350L	(2) Buttering weld : Alloy 52 Butt weld : Alloy 52(ERNiCrFe-7)
3	SA508 Gr.3 Cl.1 + SB168 N06690 Size: 40T*150W*350L + 10T*150W*350L	(3) Buttering weld : 309L Butt weld : Alloy 82(ERNiCr-3)
4	SA508 Gr.3 Cl.1 + SB168 N06690 Size: 40T*150W*350L + 10T*150W*350L	(4) Buttering weld : 309L Butt weld : Alloy 52(ERNiCrFe-7)

Butt 시험편의 용접이 완료되고 용접부의 건전성을 확인하고자 No.1 ~ No.4 시험편들에 대하여 table 4.2와 같이 radiographic test를 하였고 적용규격은 ASME Sec. V. Art.2를 따르며 판정기준은 ASME Sec. IX 절차에 따라 시험한 결과 No.1 ~ No.4 시험편들 모두 결함이 없는 양호한 용접부임을 확인 하였다.

Table 4.2 Radiographic test results.

	(1)Alloy 82	(2)Alloy 52	(3)309L+Alloy 82	(4)309L+Alloy 52
Volatge, Current	240 kV, 5 mA			
Focus size	2.5 mm			
Material, Thickness	Pb, 0.127 mm			
Film density	1.8~4.0			
Exposure time	1M 10Sec			
Source to film distance	600 mm			
Develop condition	20°C, 5 min			
Test results	Pass	Pass	Pass	Pass

용접부 표면의 건전성을 확인하기 위한 액체침투탐상검사의 결과를 table 4.3에 나타내었다.

Table 4.3 Liquid penetration test results.

	(1)Alloy 82	(2)Alloy 52	(3)309L+Alloy 82	(4)309L+Alloy 52
Preparation time of test	5 min			
Time before applying developer	1 min			
Penetrant type	P2, spray			
Penetration time	15 min			
Cleaner type	RI-3, Handwipe			
Developer type	NPD-4, spray			
Develop time	15 min			
Lighting and type	Artificial light, 200W Incandescent Buld With Reflector			
Intensity of illumination	1100 lx			
Application and judgment	ASME Sec. V, Art.4, ASME Sec IX			
Test results	Pass	Pass	Pass	Pass

용접부 표면 결함을 확인하고자 용접부에 액체 침투제 분사 후 15min 동안 표면 결함이 있는 곳에 침투제가 스며들도록 기다린 다음 세척하고 현상제 분사를 하여 용접부 표면에 pit, hair crack 있는지 확인 하였으며, 확인결과 표면결함이 없는 용접부임을 확인 하였다. 용접부에 대한 비파괴시험(방사선투과, 액체침투탐상) 결과 모두 합격으로 판정이 되어 기계적 특성시험(인장 및 굽힘)을 시행하였다.

2. 오버레이 용접 시험편

오버레이용접 시험편들의 사양 및 제작 내용은 table 4.4와 같다.

Table 4.4 Specifications for overlay welding specimen.

No.	Specimen specification	Type of specification
1	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	(1) Buttering weld : 309L Overlay weld : Alloy 52
2	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	(2) Buttering weld : Alloy 82 Overlay weld : Alloy 52
3	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	(3) Buttering weld : Alloy 52 Overlay weld : Alloy 52

Table 4.5와 같이 오버레이용접 시험편들에 교정각도 60°C 및 기준감도 50 dB 설정 후 초음파 탐촉자를 사용하여 초음파 탐상검사를 수행하였다. 용접부에 반사된 음파를 받아 검사한 결과 결함으로 인한 반사 음파가 돌아오는 것이 없는 것으로 확인되어 내부 결함이 없는 건전한 용접부임을 확인하였다.

Table 4.5 Ultrasonic test results.

	(1) Buttering(309L)	(2) Buttering(82)	(3) Buttering(52)
Probe	2MHz Φ 24 S/N 57745-1932, 4MHz.8x9. 60°C S/N ABC-0445		
Linearity	Amp. Control 1dB Control : within \pm 1% FSH within \pm 1% FSH		
Test and correction angle	0°C, 60°C		
Test method and temperature	Contact type, Room temperature		
Couplant	Glycerine		

Reference sensitivity	50 dB (+6dB)		
Application standard	ASME Sec. V, Art.4		
Judgment standard and grade	ASME Sec. IX		
Test results	Pass	Pass	Pass

오버레이용접 비드 표면부에 결함을 확인하고자 table 4.6과 같이 액체침투탐상검사를 수행하였다. 현상제 분사 후 표면부 관찰결과 pit, hair crack등의 표면결함이 없는 것이 확인 되었으며 오버레이용접 시험편들에 대한 비파괴시험(초음파탐상, 액체침투탐상) 결과 모두 합격으로 판정이 되어 굽힘 및 경도시험을 시행하였다.

Table 4.6 Liquid penetration test results.

	(1) Buttering (309L)	(2) Buttering (82)	(3) Buttering (52)
Time after test preparation	5 min		
Time before applying developer	1 min		
Penetrant type, Application	P2, Spray		
Penetration time	15 min		
Cleaner type, Application	RI-3, Handwipe		
Developer type, Application	NPD-4, Spray		
Develop time	15 min		
Lighting and type	Artificial light, 200W incandescent bulb with reflector		
Intensity of illumination	1100 lx		
Application standard	ASME Sec. V, Art.4		
Judgment standard and grade	ASME Sec. IX		
Test results	Pass	Pass	Pass

3. 5층 용접 용접 시험편

용접 입열량 변화에 따른 용접부의 기계적 특성 및 조직변화를 관찰하고자 table 4.7과 같이 저, 중, 고입열로 용접조건을 설정하여 시험편에 5층 용접을 수행 하였다.

Table 4.7 5 Layer specifications of welding specimen.

No.	Specimen specification	Type of specification
1	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Low heat input Overlay weld : Alloy 52
2	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Medium heat input Overlay weld : Alloy 52
3	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	High heat input Overlay weld : Alloy 52

5층 용접 시험편들의 용접부 결함을 확인하고자 초음파탐상검사를 table 4.8의 조건으로 수행 하였으며 검사결과 내부결함이 없는 양호한 용접부임이 확인되었다.

Table 4.8 Ultrasonic test results.

	Low heat input specimen	Medium heat input specimen	High heat input specimen
Probe	2MHz Φ 24 S/N 57745-1932, 4MHz.8x9. 60°C/S/N ABC-0445		
Linearity	Amp. Control 1dB Control : within \pm 1% FSH within \pm 1% FSH		
Test and correction angle	0°C, 60°C		
Test method and temperature	Contact type, Room temperature		
Couplant	Glycelin		
Reference sensitivity	50 dB (+6dB)		
Application standard	ASME Sec. V, Art.4		
Judgment standard and grade	ASME Sec. IX		
Test results	Pass	Pass	Pass

5층 오버레이용접 시험편들의 용접비드 표면부 결함을 확인하고자 table 4.9의 조건으로 액체침투탐상검사를 수행하였다. 현상제 분사 후 용접 표면부 관찰결과 표면 결함이 없는 것으로 확인되었다. 5층 용접 시험편들에 대한 비파괴시험(초음파탐상, 액체침투탐상) 결과 모두 합격으로 판정이 되어 경도 및 조직시험을 수행하였다.

Table 4.9 Liquid penetration test results.

	Low heat input specimen	Medium heat input specimen	High heat input specimen
Time after test preparation	5 min		
Time before applying developer	1 min		
Penetrant type, application	P2, spray		
Penetration time	15 min		
Cleaner type, application	RI-3, Handwipe		
Developer type, application	NPD-4, Spray		
Develop time	15 min		
Lighting and type	Artificial light, 200W incandescent bulb with reflector		
Intensity of illumination	1100 lx		
Application standard	ASME Sec. V, Art.4		
Judgment standard, Grade	ASME Sec. IX		
Test results	Pass	Pass	Pass

제2절 Butt 용접부 인장 시험 결과

버터링 용접부에 용가재(Alloy 82/52, 309L)를 사용하여 제작한 Butt 용접 시험편들의 시편사양은 table 4.1과 같으며 Butt 용접 시험편들의 인장시험 결과는 table 4.10에 나타내었다.

인장시험은 ASME BPVC SEC. IX(QW-150 Tension test)를 기준으로 하여 수행하였으며 시험장소 온도는 $22.9 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 습도 $56 \pm 0\%$ 환경에서 시험 결과, SA508 Gr.3 CL.1 소재의 인장강도 Min 550MPa(ASTM)와 인코넬 690 소재의 인장 강도 Min 586MPa(ASTM)요구조건을 모두 만족하는 인장강도 값이 도출되었다. 버터링 및 V-groove 용접 시 Alloy 82 용가재를 사용한 시험편 1-1, 2의 인장강도가 가장 높게 나왔고 이렇게 시험편의 인장강도가 다르게 나온 이유는 버터링 용접에 사용된 용가재 인장강도가 Alloy 82(640MPa), 52(600MPa), 309L(590MPa)이기 때문이다. Fig. 4.1은 Butt 용접 시험편에서 인장시험편 2개의 시험 완료 후 실물 형상을 나타낸 사진으로 시험편 표면에 crack이 발견되지 않았다.



Fig. 4.1 Tensile test specimens.

Table 4.10 Tensile test results.

Specimen	Breadth (mm)	Thickness (mm)	Area (mm^2)	Maximum load (kg)	Tensile strength (kg/mm^2)	Tensile strength (MPa)	Fracture shape and location
1-1	19.07	10.93	208.44	15080.63	72.35	709	Ductile, Weld metal
1-2	19.05	10.96	208.79	13422.07	69.21	678	
2-1	19.07	11.03	210.34	13865.6	65.92	646	

2-2	19.11	11.07	211.55	13405.3	63.37	621
3-1	19.06	9.44	179.93	11952.75	66.43	651
3-2	19.12	9.65	184.51	12369.55	67.04	657
4-1	19.13	10.87	207.94	13685.78	65.82	645
4-2	19.09	11.12	212.28	13061.59	61.53	603

제3절 굽힘 시험 결과

1. Butt 용접 시험편

Butt 용접 시험편들의 시편사양은 table 4.1과 같으며 Butt 용접부의 굽힘시험 결과는 table 4.11에 나타내었다. 굽힘 시험 시험편 준비는 각 Butt 용접 시험편에서 표면 굽힘 시험편 두개와 이면 굽힘 시험편 두 개를 각각 가공 및 시험한 결과, 표면 및 이면 굽힘 시험편의 표면에서 crack 또는 pit등이 발견되지 않았고 용접 line이 균일하게 되면서 용접부에 건전성이 확인되었다.

Table 4.11 Bending test results.

Specimens	Specimen shape and picture	Results
1-1, 2	Face bend QW-462.3(a)	Satisfactory
1-3, 4	Root bend QW-462.3(a)	Satisfactory
2-1, 2	Face bend QW-462.3(a)	Satisfactory
2-3, 4	Root bend QW-462.3(a)	Satisfactory
3-1, 2	Face bend QW-462.3(a)	Satisfactory
3-3, 4	Root bend QW-462.3(a)	Satisfactory
4-1, 2	Face bend QW-462.3(a)	Satisfactory
4-3, 4	Root bend QW-462.3(a)	Satisfactory

Fig. 4.2는 Butt 용접 시험편에서 굽힘 시험편(Side bend 2개, Face bend 2개)4개의 시험 완료 후 실물 형상을 나타낸 사진으로 시험편 표면에서 crack이 발견되지 않았다.

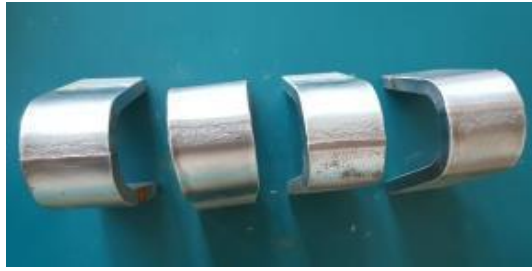


Fig. 4.2 Bend test specimens.

2. 오버레이 시험편

용접부에 용가재(309L, Alloy 82/52)를 사용하여 제작한 오버레이 용접 시험편들의 제작 사양은 table 4.12와 같고 굽힘시험을 위한 시험편 형태 및 시험결과는 table 4.13에 나타내었다.

굽힘 시험은 ASME BPVC SEC. IX(QW-160 Guided-bend test)를 기준으로 시험을 하였으며 시험편 준비는 각 오버레이용접 시험편에서 측면 굽힘 시험편 4개를 각각 가공하여 준비하였다. 시험환경 온도 $23 \pm 0.1^\circ\text{C}$, 습도 $74 \pm 1\%$ 에서 롤 지름 40 mm, 각도 180° 로 굽힘 시험 기계를 셋팅하여 시험결과, 모든 측면 굽힘 시험편 용접부에서 균열이 발생되지 않아 용접부의 건전성을 확인하였다.

Table 4.12 Overlay specimens mechanical properties test items.

No.	Specimen specification	Test Items		
		Bend test	Material	Hardness test
1	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L) (1) Buttering (309L)	Bend test	Material	Hardness test
2	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L) (2) Buttering (82)			
3	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L) (3) Buttering (52)			

Table 4.13 Results of overlay specimen bending test.

Specimens	Specimen No.	Specimen shape and picture	Results
1-1	SB-1	Side bend QW-462.5(d)	Satisfactory
1-2	SB-2		Satisfactory
1-3	SB-3		Satisfactory
1-4	SB-4		Satisfactory
2-1	SB-1	Side bend QW-462.5(d)	Satisfactory
2-2	SB-2		Satisfactory
2-3	SB-3		Satisfactory
2-4	SB-4		Satisfactory
3-1	SB-1	Side bend QW-462.5(d)	Satisfactory
3-2	SB-2		Satisfactory
3-3	SB-3		Satisfactory
3-4	SB-4		Satisfactory

굽힘 시험 후 시험편형상은 fig.4.3과 같다.



Fig. 4.3 Specimen shape after bend test.

제4절 경도 시험 결과

1. 오버레이 용접 시험편

용접부에 용가재(309L, Alloy 82/52)를 사용하여 제작한 오버레이용접 시험편들의 경도측정은 ASTM E92를 기준으로 fig. 4.4와 같은 위치에서 수행하였으며 시험 중 환경으로 온도는 $23.5 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 습도 $67 \pm 1\%$ 에서 시행하였다.

용착금속의 경도측정은 용접비드 surface에서 깊이 2mm에 위치한 곳에서 10개에 대하여 2mm 간격으로 측정하였고 fusion line에 경도측정은 base metal과 용착 금속의 경계부에서 base metal 방향으로 깊이 1mm에 위치한 곳에서 10개에 대하여 2mm 간격으로 측정 하였다. 그리고 base metal의 경도측정은 base metal 바닥에서 상부 방향으로 10mm 위치한 곳에서 10개에 대하여 2mm 간격으로 측정하였다. 시험결과는 table 4.14 및 fig. 4.5에 그래프로 나타내었다.

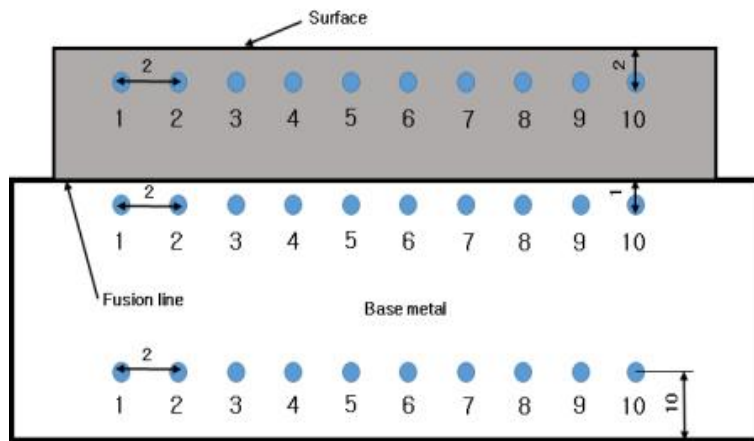


Fig. 4.4 Overlay welding specimen hardness test locations.

Table 4.14 Overlay welding specimen hardness test results (Table).

Specimen 1 Buttering (309L) hardness(HV10)											
Test locations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ave.
Surface	237	230	238	239	241	245	234	243	240	244	239
Fusion line	245	248	253	249	252	250	248	238	241	240	246
Base metal	204	190	196	195	199	200	198	202	200	198	198
Specimen 2 Buttering (Alloy 82) hardness(HV10)											
Test locations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ave.
Surface	243	245	242	234	245	238	244	242	238	241	241
Fusion line	328	326	324	326	321	327	332	329	327	324	326
Base metal	203	202	203	200	202	204	200	204	205	203	202
Specimen 3 Buttering (Alloy 52) hardness(HV10)											
Test locations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ave.
Surface	238	247	236	237	236	242	240	243	246	242	240
Fusion line	253	257	256	259	251	254	258	254	260	257	255
Base metal	198	196	204	195	197	201	204	202	204	202	200

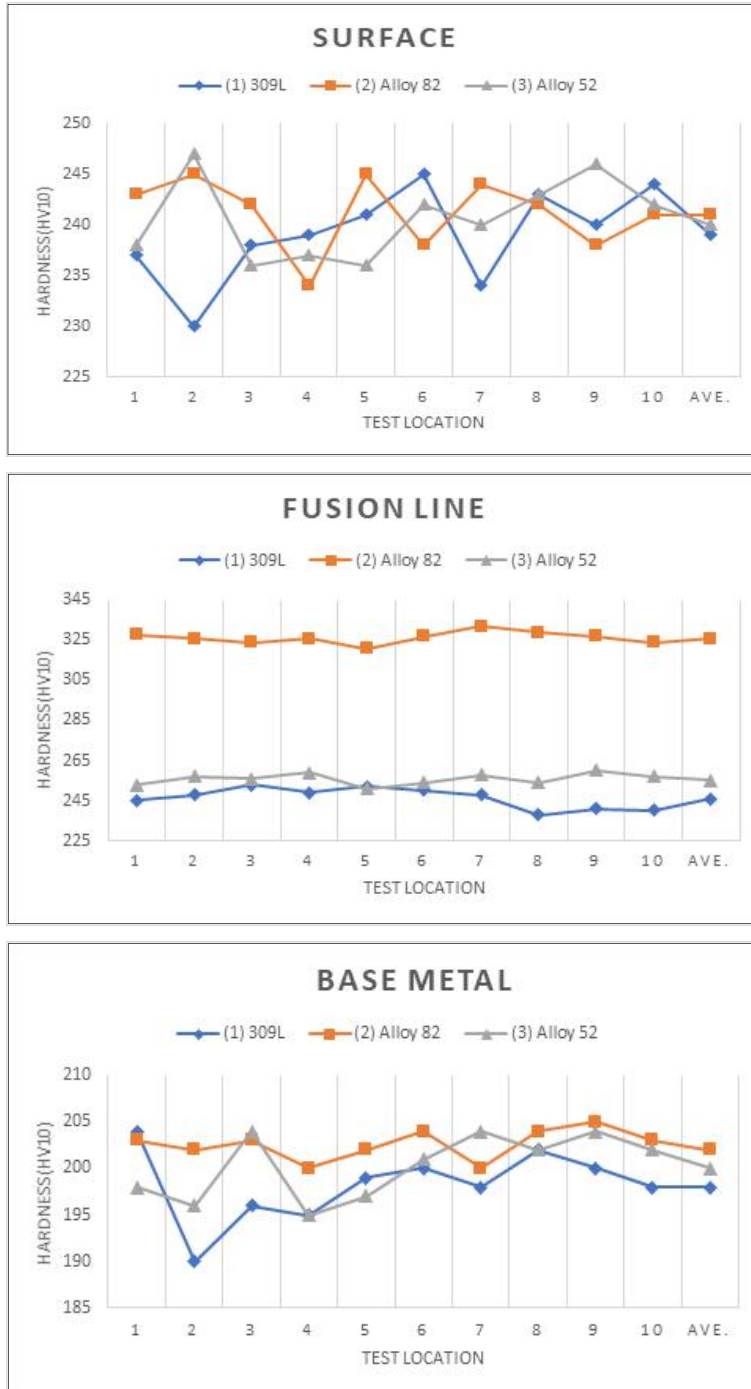


Fig. 4.5 Overlay welding specimen hardness test results (Graph).

오버레이 시험편의 버터링 용접에 용가재(309L, Alloy 82, Alloy52)를 사용하여 제작한 시험편들의 경도시험 결과 fusion Line에서 경도 값이 가장 높은 것은 시험편 2번(326HV)이었으며 반대로 경도 값이 가장 낮은 것은 시험편 1번(246HV)로 확인 되었다.

오버레이 시험편의 버터링 용접에 사용된 용가재 인장강도가 309L(590MPa), Alloy 82(640MPa), 52(600MPa)로 Fusion Line에서 경도가 가장 높은 시험편인 2번은 버터링 용접에 Alloy 82를 사용 하였다. 즉 인장강도와 경도가 비례하다는 것을 알 수 있다.

2. 입열량이 다른 5층 용접 시험편

용접 입열량의 변화를 주며 5층 오버레이 용접한 시험편의 경도시험은 ASTM E92를 기준으로 fig. 4.6과 같은 위치에서 수행하였으며 용착금속부의 경도측정은 용접비드 surface에서 깊이 2mm에 위치한 곳에서 10개 지점에 대해 2mm 간격으로 경도측정을 수행하였다. Fusion line의 경도측정은 base metal과 용착 금속의 경계부에서 모재 방향으로 깊이 1mm에 위치한 곳에서 10개 지점에 대해 2mm 간격으로 수행하였으며 base metal의 경도측정은 base metal 바닥에서 상부 방향으로 10mm 위치한 곳에서 10개 지점에 대해 2mm 간격으로 경도를 측정 하였다.

저, 중, 고 입열량의 변화를 주며 5층 용접한 시험편의 경도시험 결과를 table 4.15 및 fig. 4.7에 그래프로 나타내었다.

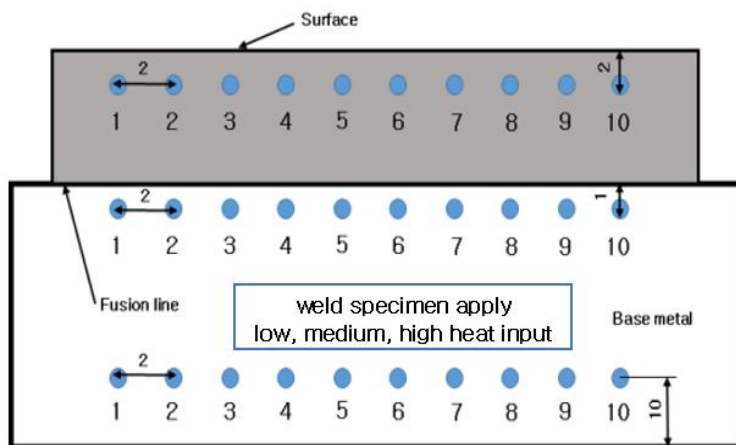


Fig. 4.6 Low, medium, high heat input specimen hardness test locations.

Table 4.15 5 Layer specimen hardness test results by heat input(Table).

Low heat input weld hardness(HV10)											
Test location	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ave.
Surface	192	200	204	201	197	198	198	201	202	204	199
Fusion line	250	259	254	258	252	257	251	258	253	256	254
Base metal	195	193	190	193	192	194	195	188	192	189	192
Medium heat input weld hardness(HV10)											
Test location	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ave.
Surface	191	185	192	190	192	192	196	200	195	201	193
Fusion line	238	234	239	230	234	235	237	231	235	240	235
Base metal	189	194	192	191	192	189	190	193	192	190	191
High heat input weld hardness(HV10)											
Test location	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ave.
Surface	187	186	182	183	178	184	182	184	185	180	183
Fusion line	209	204	217	214	210	207	208	214	210	212	210
Base metal	191	196	187	190	192	188	195	193	194	192	191

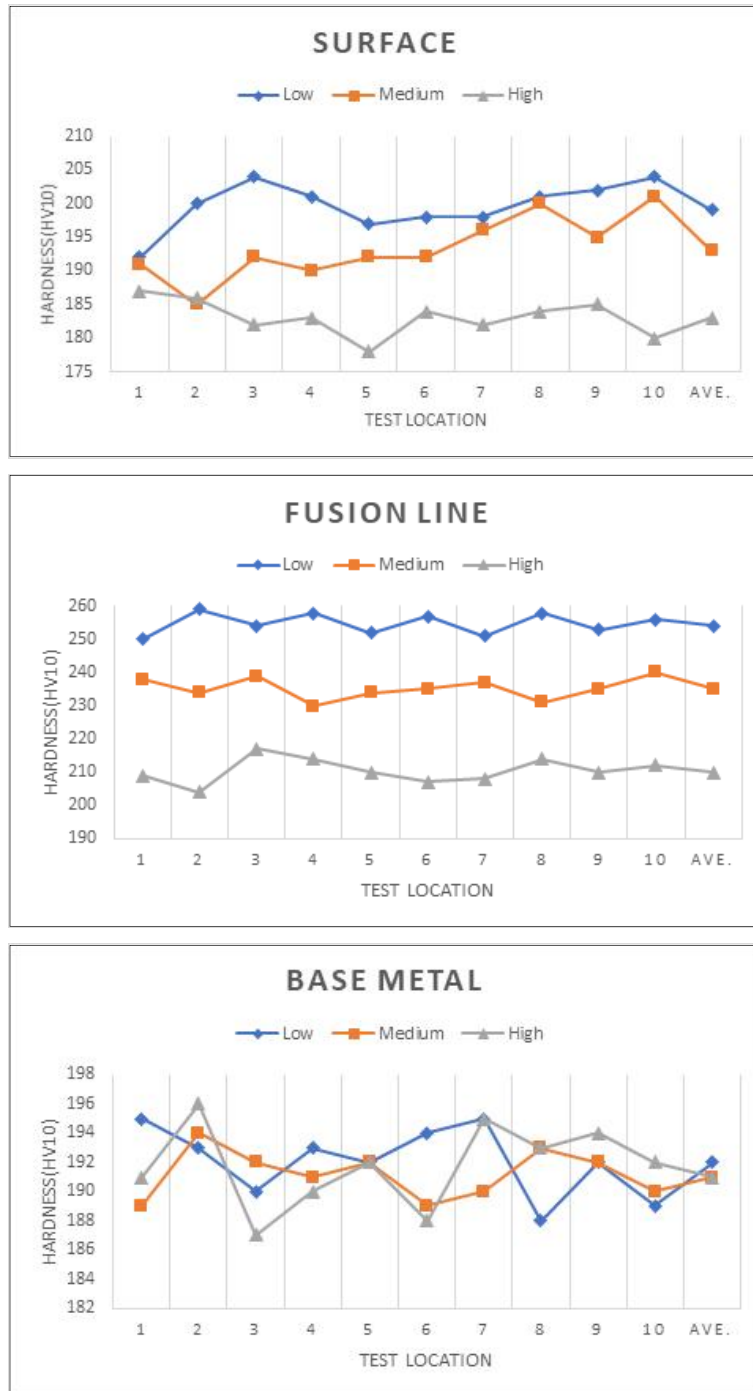


Fig. 4.7 5 Layer specimen hardness test results by heat input(Graph).

Fusion line에서 경도 값이 가장 높은 시험편은 저 입열로 용접한 시험편으로 경도 값이 254HV 였으며 반대로 경도 값이 가장 낮은 시험편은 고 입열로 용접한 시험편으로 경도 값이 210HV로 확인 되었다. 저 입열로 용접한 시험편의 fusion line에서 경도 값이 가장 높은 이유는 저입열량의 용접조건으로 인하여 용접 후 시험편이 급냉되었기 때문이며 반대로 고 입열로 용접한 시험편의 fusion line에서 경도 값이 가장 낮은 이유는 시험편의 냉각시간이 길게 됨으로써 용접부가 서냉되어 열영향부에 급냉 시 발생하는 침상조직이 발생되지 않아서이다.

용접 입열량 변화에 따른 위치별 경도 측정결과를 보면 surface 부에서 경도가 가장 높은 시험편은 저입열량 용접조건의 시험편으로 경도 값이 199HV로 확인되었다. Fusion line에서 시험편들의 경도 관찰결과 저 입열 용접시험편 경도(254HV), 중 입열 용접시험편 경도(235HV), 고입열 용접시험편 경도(210HV) 순으로 미소하게 경도 값이 내려갔다. 즉 fusion line에서 저, 중, 고 입열량으로 용접한 시험편의 경도는 용접 입열량이 높을수록 경도 값이 낮아지는 형태를 보였으며 이로써 용접 시 fusion line에서의 경도는 용접 입열량과 반비례 한다는 것이 확인되었고 저, 중, 고 입열량의 변화를 주어 용접한 시험편의 위치별 경도분포 형태는 전체적으로 비슷하게 나타났다.

3. 후열처리 후 5층 용접 시험편

저, 중, 고 입열량으로 저합금강에 5층 용접한 시험편에 후열처리 적용 시 용접부의 기계적 특성 및 조직변화를 확인하고자 하였다. 5층 용접 시험편들의 제작 사양은 table 4.16과 같다.

Table 4.16 5 Layer specimens PWHT specifications.

No.	Specimen specification	Type of specification
1	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Apply annealing(625°C, 1Hr 30min.) after low heat input overlay welding with Alloy 52
2	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Apply annealing(625°C, 1Hr 30min.) after medium heat input overlay welding with Alloy 52
3	SA508 Gr.3 Cl.1(40T*300W*300L)	Apply annealing(625°C, 1Hr 30min.) after high heat input overlay welding with Alloy 52

각각 저, 중, 고 입열량으로 5층 오버레이 용접된 시험편의 후열처리 후 경도시험은

ASTM E92를 기준으로 fig. 4.8과 같은 위치에서 수행하였으며 용착금속의 측정은 surface에서 깊이 2mm에 위치한 지점에서 2mm 간격으로 측정 하고 fusion line의 측정은 base metal과 용착 금속의 경계부에서 base metal 방향으로 깊이 1mm에 위치한 지점에서 2mm 간격으로 측정을 하였다. 그리고 base metal의 측정은 모재 바닥에서 상부 방향으로 10mm 위치한 지점에서 2mm 간격으로 경도측정을 수행하였다.

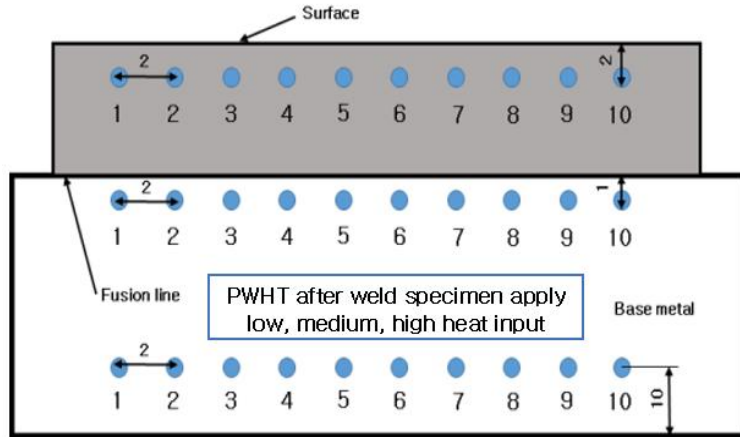


Fig. 4.8 Hardness test positions after post heat treatment.

5층 용접 시험편의 후열처리 후 경도 측정결과를 table 4.17 및 fig. 4.9에 그래프로 나타내었다.

Fusion line에서 경도가 가장 높은 시험편은 경도 값이 201HV 인 저 입열 용접 및 후열처리를 한 시험편이고 반대로 경도가 가장 낮은 시험편은 경도 값이 192HV인 고 입열 용접 및 후열처리를 한 시험편이다.

Table 4.17 5 Layer hardness test results of PWHT specimens(Table).

Low heat input weld and PWHT hardness(HV10)											
Test locations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ave.
Surface	176	184	179	185	179	175	174	184	173	175	178
Fusion line	198	200	204	194	200	209	204	206	203	201	201
Base metal	189	185	184	187	187	185	192	184	189	194	187
Medium heat input weld and PWHT hardness(HV10)											
Test locations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ave.
Surface	172	178	180	182	175	177	175	173	182	175	176
Fusion line	201	204	195	200	204	202	192	192	197	195	198
Base metal	189	185	193	183	180	182	185	190	188	192	186
High heat input weld and PWHT hardness(HV10)											
Test locations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ave.
Surface	178	168	173	169	172	170	174	172	174	170	172
Fusion line	191	189	189	192	194	189	192	195	193	197	192
Base metal	180	196	185	184	190	182	194	192	187	194	188

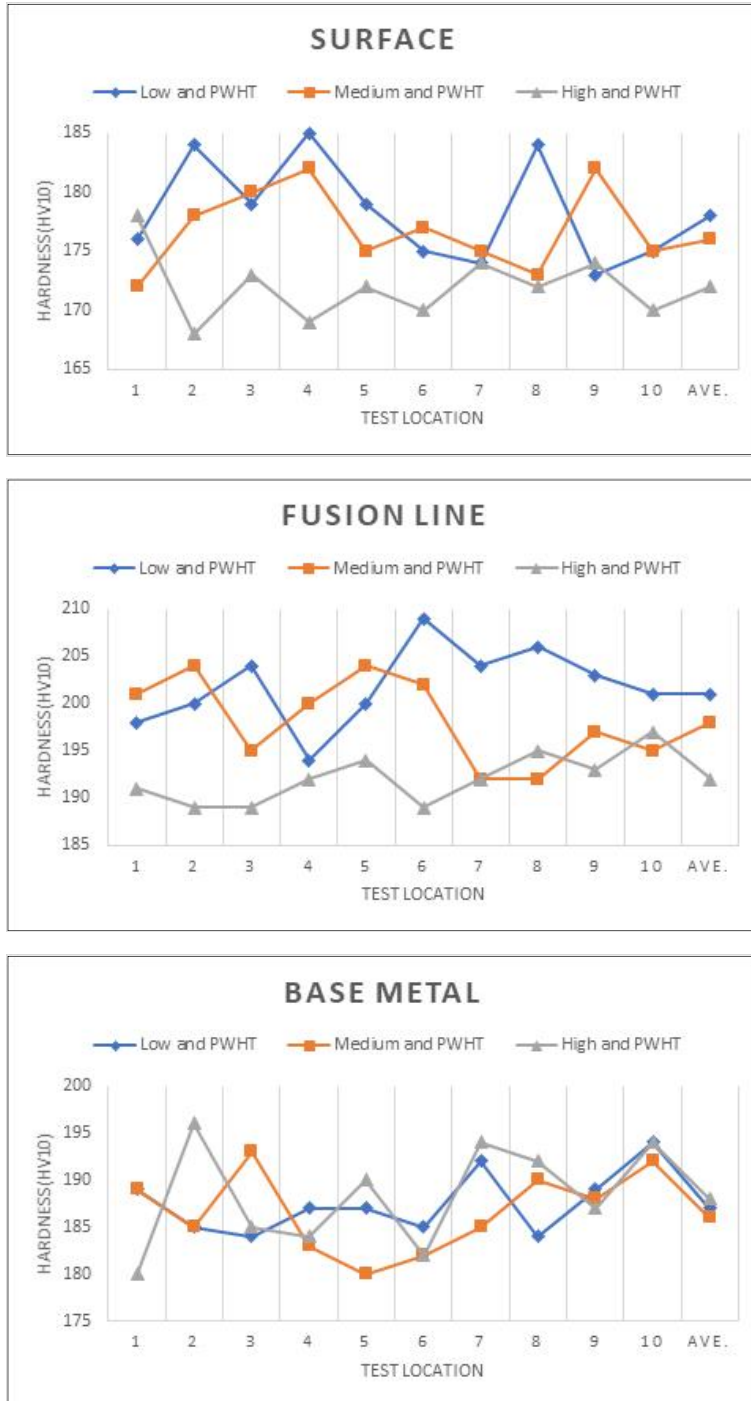


Fig. 4.9 5 Layer hardness test results of PWHT specimens(Graph).

용접 시험편 제작 시 저, 중, 고 입열량 변화를 주고 후열 처리한 시험편에 대하여 위치 별 경도 측정결과를 정리하면 다음과 같다.

① 저 입열 시험편의 경도 값이 surface (199HV), fusion line (254HV), base metal(192HV)에 반하여 후열처리 후 surface(178HV), fusion line(201HV), base metal(187HV)로 전반적으로 경도 값이 감소하였다.

② 중 입열 시험편의 경도 값이 surface (193HV), fusion line (235HV), base metal(191HV)에 반하여 후열처리 후 surface (176HV), fusion line (198HV), base metal(1861HV)로 전반적으로 경도 값이 감소하였다.

③ 고 입열 시험편의 경도 값이 surface (183HV), fusion line (210HV), base metal(191HV)에 반하여 후열처리 후 surface (172HV), fusion line (192HV), base metal(188HV)로 전반적으로 경도 값이 감소하였다.

저, 중, 고 입열량 변화를 주어 용접 및 후열처리한 시험편들의 조직별 경도는 fusion line, base metal, surface 순으로 경도가 낮아졌으며 위치 별 경도 분포의 형태는 전체적으로 비슷하게 나타났다.

제5절 오버레이 시험편 화학성분 분석 시험 결과

오버레이 시험편의 용착금속에 대한 화학성분 시험결과를 table 4.18에 나타내었다.

Table 4.18 Results of welding chemical composition test.

Specimen No.	No. 1	No. 2	No. 3
Cr ingredient(%)	29.5	30	30.2

오버레이 용접 시험편의 용착금속 화학성분 시험결과 크롬 성분이 ASTM Spec. 기준인 28-31.5% 범위 안으로 화학성분 요구조건인 ASME Code Sec.II Part C Spec.을 만족하였다. 시험편 No.3의 크롬 함유량이 30.2%로 가장 높았던 이유는 버터링 용접에 Alloy 52를 적용하여 저합금강과 이중용접 시 희석으로 인한 크롬 미미했던 것으로 판단된다.

향후 원자력 발전소 설비 중 이중금속 용접부의 용가재가 Alloy 600으로 사용되어 일차수 응력부식균열이 발생된 부분에 보수용접을 하게 될 경우 용가재를 Alloy 690으

로 대체하면 이종금속 용접부는 크롬 함유량이 증가되어 반연속적인 입계탄화물에 의한 응력부식균열의 저항성을 향상시켜주는 역할을 하게 되어 건전한 용접부를 얻을 수 있다.

제6절 미세조직 시험 분석 결과

1. 입열량에 따른 5층 용접 시험편

저 입열량 시험편의 조직 시험 결과를 fig. 4.10에 나타내었다. 저 입열 조건의 용접으로, 인코넬 690 용가재인 Alloy 52의 0.9mm 와이어로 저합금강에 5층 용접을 실시하고 조직시험용 시험편을 가공하여 weld metal, HAZ, base metal의 조직을 관찰하였다.

관찰 결과, weld metal의 미세조직은 오스테나이트 columnar 수지상이 관찰되었으며 HAZ에서는 base metal의 조대한 조직 대비 입열량의 영향에 의한 조직의 미세화가 나타났는데 주로 베이나이트와 페라이트가 혼재된 형태로 나타났다.

Base metal에서는 상부 베이나이트 조직과 넓고 희게 분포된 페라이트 조직이 관찰되었다.

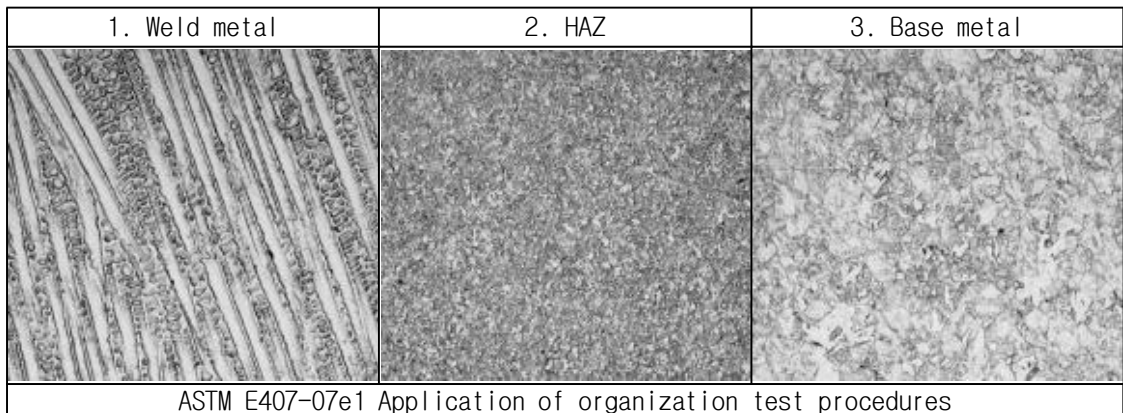


Fig. 4.10 Low weld heat input specimen test results.

중 입열량 시험편의 조직 시험 결과를 fig. 4.11에 나타내었다. 중 입열 조건으로, 인코넬 690 용가재인 Alloy 52의 0.9mm 와이어로 저합금강에 5층 용접을 실시하고 조

직시형용 시험편을 가공하여 weld metal, HAZ 및 base metal의 조직을 관찰하였다.

관찰 결과 weld metal에서는 인코넬 Alloy 52 용착금속의 조직으로 오스테나이트 cellular 수지상으로 조직이 형성 되어있고 저입열과 고입열 조건을 비교할 때 grain size는 중간정도 크기를 나타내고 있다. 고입열 용접에서 주로 나타나는 탄화물 또는 입계주변의 변태된 조직이 많이 관찰되었다.

HAZ에서는 SA508 Gr.3 Cl.1의 조직사진으로 모재의 조대한 조직 대비 입열량의 영향에 의해 조직이 미세화 되어 있었으며 주로 베이나이트와 페라이트가 혼재된 형태를 나타낸다. HAZ의 조직으로 볼 때 저입열과 중입열간의 유의차는 많이 없는 것으로 확인되었다.

Base metal에서는 SA508 Gr.3 Cl.1 base metal부 조직으로 상부 베이나이트 조직과 넓고 희게 분포된 페라이트 조직이 관찰되었고 탄화물로 추정되는 부분적으로 검은 부분은 불규칙하게 입계주변에서 관찰이 되었다.

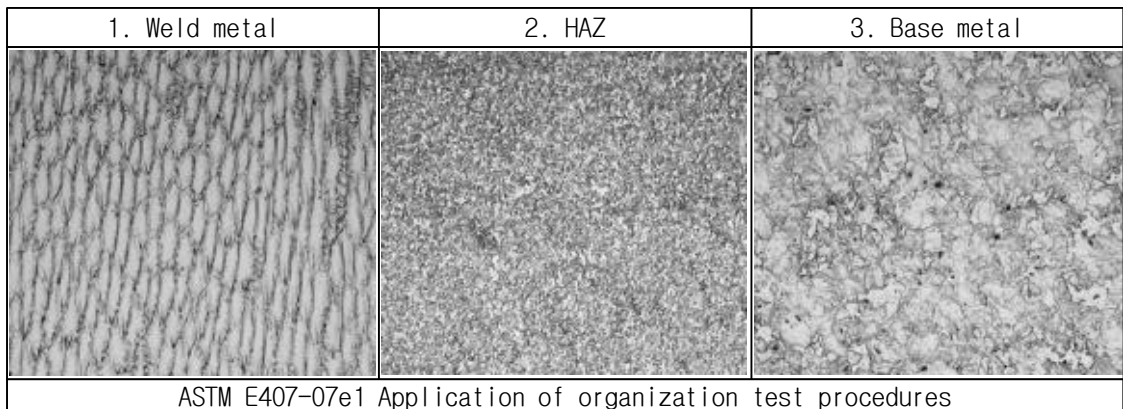


Fig. 4.11 Medium weld heat input specimen test results.

고입열량 시험편의 조직 시험결과를 fig. 4.12에 나타내었다. 고입열 조건의 용접으로, 인코넬 690 용가재인 Alloy 52의 0.9mm 와이어로 저합금강에 5층 용접을 실시하고 조직시험용 시험편을 가공하여 weld metal, HAZ 및 base metal의 조직을 관찰하였다.

관찰결과, weld metal에서는 고 입열 용접조건에 인코넬 Alloy 52 용착금속 조직으로 cellular 수지상에서 interdendritic 상이 발견되고 저입열 및 중입열 조건과 비교하면 많은 차이가 있는데 이는 입열량 증가에 따른 응고시간 지연으로 주상정 조직이 크게 형성된 것으로 보인다. 또한 입계부분에는 변태된 조직이 상대적으로 많이 관찰된다.

HAZ에서는 저입열과 중입열 조건과 비교할 때 조직이 상대적으로 큰 grain size를 나타내고 있고 tempered 상부 베이나이트 및 페라이트로 추정되는 조직이 나타났다.

Base metal에서는 용접 입열량의 조건과 상관없이 유사한 조직특성을 나타내고 있으며 베이나이트와 페라이트가 혼재된 특성을 나타내고 있다.

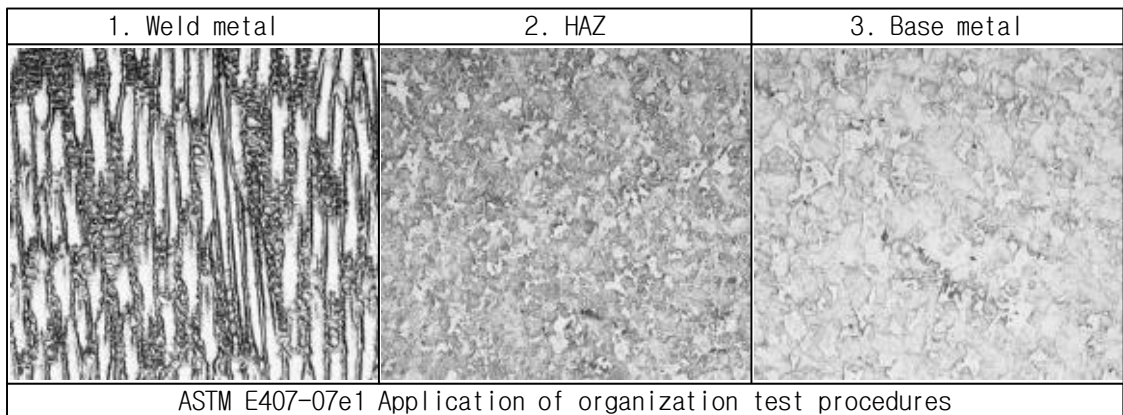


Fig. 4.12 High weld heat input specimen test result.

2. 후열 처리 후 입열량에 따른 5층 용접 시험편

저 입열 용접시험편에 후열처리 후 조직을 fig. 4.13에 나타내었다. 5층 용접된 시험편을 후열처리 하고 조직시험용 시험편을 가공하여 weld metal, HAZ, base metal의 조직을 관찰하였다.

Weld metal에서 후열처리를 실시한 인코넬 690계 용접부의 조직으로 고입열 조건의 용접부와 유사하나 상대적으로 입계주변의 변태조직은 많이 없으며 주로 후열처리에

의해 columnar 수지상이 cellular 수지상으로 변화한 것으로 판단된다.

HAZ에서는 상대적으로 후열처리를 하지 않은 조직대비 grain size가 크게 관찰되는데 이는 열처리에 의한 A1 변태점 온도 주변에서 일부 조직이 변태된 것으로 추정되며 많이 완화된 것으로 확인된다. 특히 HAZ의 조직과 거의 유사한 형태로 변화된 것을 알 수 있다.

Base metal에서는 열처리에 의해서 상부 베이나이트 및 페라이트의 일부가 열처리에 의해 조직이 미세화된 형태로 HAZ와 비슷한 형태를 나타내고 입계주변에 검게 보이는 탄화물은 열처리 영향으로 추정된다.

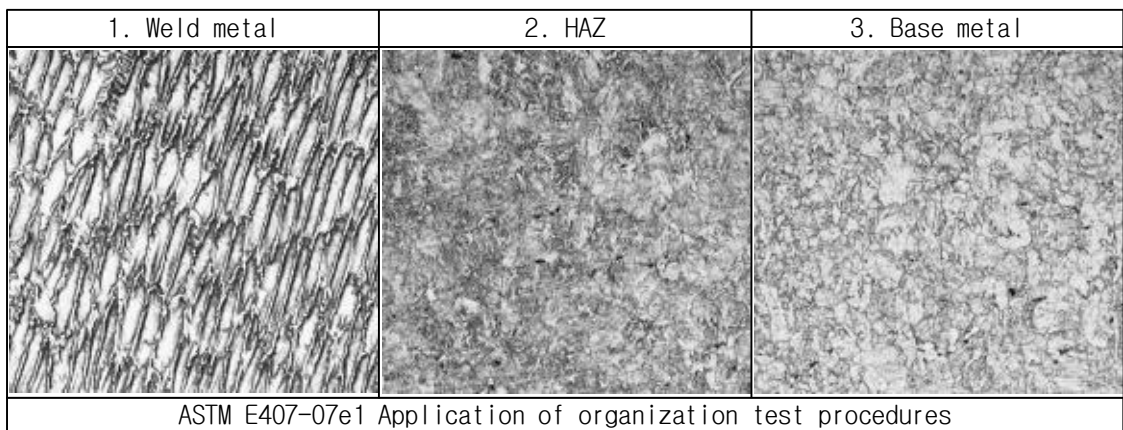


Fig. 4.13 Low heat input specimen metal structure after PWHT.

중입열량 용접시험편에 후열처리 후 조직을 fig. 4.14에 나타내었다. 중입열 조건의 용접으로 인코넬 690 용가재인 Alloy 52의 0.9mm 와이어로 저합금강에 5층 용접을 실시하고 후열처리를 625도에서 1시간 30분 실시한 시험편에 대해서 미세조직 검사를 위한 시험편 가공 후 weld metal, HAZ 및 base metal의 조직을 관찰하였다.

Weld metal에서는 저입열 조건대비 입열량의 증가로 columnar 수지상이 cellular 수지상으로 변화한 것이 조금 더 많이 진행된 것으로 관찰되었고 HAZ에서는 일반적으로 관찰되는 열영향부의 조직특성을 보이고 있으며 저입열 조건대비 열 영향을 많이 받은 것으로 추정할 수 있고 그 결과 미세화된 조직과 베이나이트 조직으로 구성되었다.

Base metal에서는 상부 베이나이트 및 페라이트의 일부가 열처리에 의해서 조직이 미세화된 형태를 띄고 있으며 HAZ와 비슷한 형태를 나타내고 있다. 저입열 조건에 후열처리한 base metal부와 유사한 조직특성을 보이고 있다.

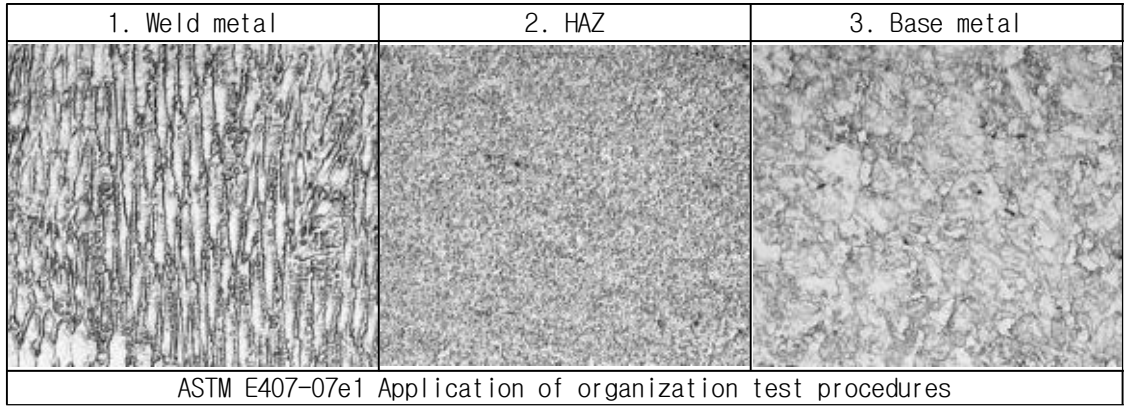


Fig. 4.14 Medium heat input specimen metal Structure after PWHT.

고입열량 용접시험편에 후열처리 후 조직은 fig.4.15에 나타내었다. 고입열 조건의 용접으로 인코넬 690 용가재인 Alloy 52의 0.9mm 와이어로 저합금강에 5층 용접을 실시하고 후열처리를 625도에서 1시간 30분 실시한 시험편에 대해서 미세조직 검사를 위한 시험편 가공 후 weld metal, HAZ 및 base metal의 조직을 관찰 하였다.

Weld metal에서는 Alloy 52 용착금속을 열처리한 조직으로 수지상과 interdendritic 상이 혼합되어 있고 입열량의 영향으로 초기 미세조직 형성시 부분적인 변태조직을 생성한 것으로 추정된다. HAZ에서는 저 입열 조건 대비 열영향을 많이 받은 것으로 추정되며 그 결과 조직이 미세화 되어 있고 주로 베이나이트로 구성된 조직이라 추정된다. Base metal에서는 상부 베이나이트 및 페라이트의 일부가 열처리에 의해서 조직이 미세화된 형태를 띄고 있으며 입열량에 의한 조직의 변태정도는 저입열 및 중입열 조건보다 많이 진행 되었다.

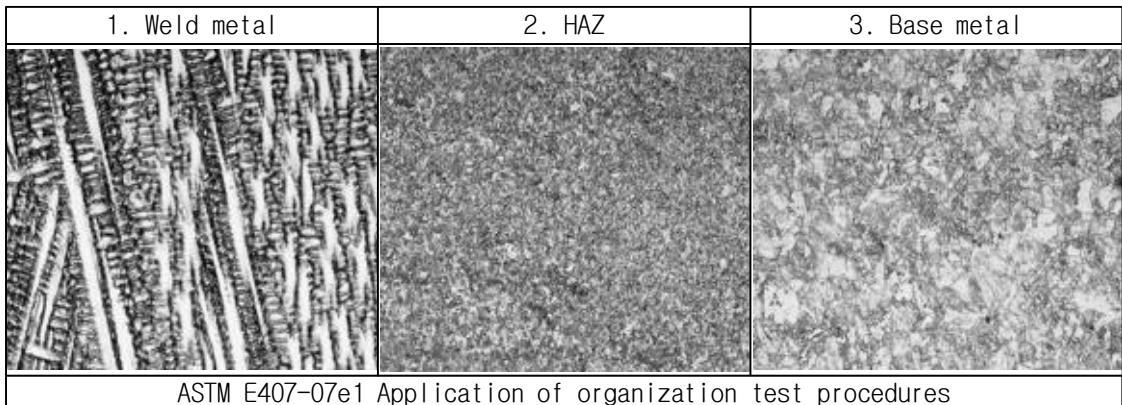


Fig. 4.15 High heat input specimen metal structure after PWHT.

제 5 장 결 론

본 연구는 저합금강(SA508 Gr.3 Cl.1)에 내식성이 우수한 Alloy 82, 52 용접재료를 적용하여 Butt 및 오버레이 용접을 수행하여 비파괴검사, 인장, 굽힘, 경도, 화학성분 시험을 통한 용접부의 기계적 특성을 관찰하였다. 또한 저합금강에 입열조건을 달리하여 5층 용접 후 입열량 변화가 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하여 용접 입열량 변화에 따른 상관관계를 규명하였다. 용접 수행내용 및 각종 시험을 통해 도출된 결과는 아래와 같다.

1. Butt 용접시험편(SA508 Gr.3 Cl.1 + SB168 N06690)들의 버터링 용접에 사용한 용접재료(Alloy 82, Alloy 52, 309L)를 재질별로 구분하여 인장시험을 실시한 결과, Alloy 82 용접재료를 사용한 용접 시험편의 인장강도(709MPa)가 가장 높게 나타났으며, 이것은 버터링 용접에 사용된 용접재료의 인장강도에 비례한 결과라는 것을 알 수 있다. 또한, 경도시험결과도 예상과 같이 인장강도가 가장 높은 시험편의 용접부에서의 경도값이 가장 높게 나타났다. 이것으로 종래의 결과와 동일하게 용접부의 인장강도는 용접금속의 강도 및 경도와 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

2. 저, 중, 고 입열량 변화를 달리하여 5층 용접한 시험편의 경도시험 결과, surface부 및 base metal에 비해 fusion line에서의 경도 값이 높게 나타났다. Fusion line에서 저입열 조건의 경우 냉각속도가 빠르게 되고 ferrite side plate(FSP)와 acicular ferrite (AF) 및 상부 베이나이트 등의 경한 미세조직의 생성에 의해 가장 높은 경도값을 나타내었다. 한편, 고입열에서는 grain boundary ferrite (GBF)의 폭이 커지고, ferrite 분율이 증가하여 열영향부에서 급냉시 발생하는 침상조직이 생성되지 못했기 때문에 경도 값이 가장 낮게 나타났다. 이로써 용접시 fusion line에서의 경도는 용접 입열량과 반비례 한다는 것이 확인되었고 입열량 변화에 따른 경도분포 형태는 전체적으로 비슷하게 나타났다.

3. 저, 중, 고 입열량을 달리하여 5층 용접한 시험편의 후열 처리 후 미세 조직시험 결과, weld metal에서의 경우 저입열 조건의 시험편은 고입열 조건의 용접부와 유사하나 상대적으로 입계 주변의 변태조직은 많이 발견되지 않았으며 후열처리에 의해 columnar 수지상이 cellular 수지상으로 변화한 것으로 판단된다. 중입열 시험편은 저입열 조건대비 입열량 증가에 의해 columnar 수지상이 cellular 수지상으로 변화한 것이 조금 더 많이 진행된 것으로 관찰되었다. 고입열 시험편은 수지상과

interdendritic 상이 혼합되어 있고 입열량의 영향으로 초기 미세조직 형성시 부분적인 변태조직을 생성한 것으로 추정된다.

HAZ에서는 저입열 시험편의 경우 상대적으로 후열처리를 하지 않은 조직대비 grain size가 크게 관찰되는데 이는 열처리에 의한 A1 변태점 온도 주변에서 일부 조직이 변태된 것으로 추정되며 많이 완화된 것으로 확인된다. 특히 base metal의 조직과 거의 유사한 형태로 변화된 것을 알 수 있다. 중입열 및 고입열 시험편은 저 입열 조건 대비 열 영향을 많이 받은 것으로 추정되며 그 결과 조직이 미세화 되어 있고 주로 베이나이트로 구성된 조직이라 추정된다.

Base metal부에서는 저, 중, 고 입열 시험편 모두 열처리에 의해서 상부 베이나이트 및 페라이트의 일부가 조직이 미세화된 형태로 열영향부와 비슷한 형태를 나타내고 있으며 입계주변에 검게 보이는 탄화물은 열처리 영향으로 추정된다. 중입열 조건의 경우 저입열 조건에 후열처리한 base metal부와 유사한 조직특성을 보이고 있다.

고입열 조건의 경우 입열량에 의한 조직의 변태정도는 저입열 및 중입열 조건보다 많이 진행 되었다.

참고 문헌

1. 김민철, 이봉상, 박상규 & 이기형.(2008). 상용 원자로 압력용기용 고 Ni 저합금강 개발 현황 *Current Status of Development of High Nickel Low Alloy Steels for Commercial Reactor Pressure Vessel*.(기술현황분석보고서 KAERI/AR-822/2008), pp.13. 한국원자력연구원.
2. 민용기.(2011). 특수용접(pp.29). 서울: 한국산업인력공단
3. 이정훈, 장창희, 김종성 & 진태은.(2007). 인코넬 82/182 이종금속 용접부의 기계물성 평가, *대한기계학회 춘계학술지*, pp.244.
4. 이진희.(2013). 재료와 용접(pp.384). 경기도: 21세기사
5. 이진희.(2005). 용접기술 실무(pp.70). 경기도: 21세기사
6. 유택인, 신영식 & 최현순.(2004). 현장실무를 위한 신 접합공학(pp.241). 경기도: 동명사
7. 홍준화.(2012). 원자력재료. 한스하우스
8. Ahmed Elmesalamy et al.(2014). A comparison of residual stresses in multi pass narrow gap laser welds and gas-tungsten arc welds in AISI 316L 스테인리스강. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 113, pp.49-59.
9. American Society of Mechanical Engineers.(2010). *ASME Code Sec. IX QW-150 TENSION TESTS*, pp.4~5
10. American Society of Mechanical Engineers.(2010). *ASME Code Sec. IX QW-451 Procedure Qualification Thickness Limits and Test Specimens*, pp.145
11. A. Moser & A. Legat.(1969). *Harterei Technische Mitteilungen Journal of heat treatment and materials* 24, pp.100.
12. B. I. Yang et al.(2002). *Journal of the Korean Welding Society*(20-1)
13. Da Hye Kim et al.(2013). Residual stress analysis of Alloy 690 dissimilar metal welds, *Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp.209-210.
14. D. J. Paraventi et al.(2007). Assessment of the interaction of variables in the intergranular stress corrosion crack growth rate behavior of alloys 600, 82, and 182. *The 13th International Conference on Environmental Degradation of*

Materials in Nuclear Power Systems, pp.19-23.

15. E. J. Pickering & H. K. D. H.(2014). *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45A, pp.2991.

16. Electric Power Research Institute.(2005). *Technical Basis for Preemptive Weld Overlays for Alloy 82/182 Butt Welds in PWRs(MRP-169)*.

17. Electric Power Research Institute.(2005). *Materials Reliability Program : Technical Basis for Preemptive Weld Overlays for Alloy 82/182 Butt Welds in PWRs (MRP-169)*. EPRI Technical Report(1012843).

18. G. E. Linnert.(1994). *Welding Metallurgy, Volume 1, 4th edition*, pp.858. American Welding Society.

19. G. R. Odette.(1985). *Scripta Metallurgica*, 17 (1983) 1183

20. G. S. Was et al.(2003). *Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System, Water Reactors*, pp.1071-1081.

21. Howard B. Cary.(2002). *Modern Welding Technology, Prentice Hall, Fifth edition*, pp.15-18.

22. H. S. Yu, Y. S. Chang, B. G. Ahn & S. H. Chung.(1998). *Journal of Korean Welding and Joining Society* 16, pp.44

23. Hwa Teng Lee et al.(2010). Numerical and experimental investigation into effect of temperature field on sensitization of Alloy 690 butt welds fabricated by gas tungsten arc welding and laser beam welding. *Journal of Materials Processing Technology(210)*, pp.1636-1645.

24. In Chul Jung et al.(2009). Overlay Welding of Inconel Material for Nuclear Power Components. *Journal of Korean Welding and Joining Society* 27(2), pp.122-124.

25. J. H. Kim, S. G. Park, S. H. Kim, B. H. Kim & D. J. Kim.(2013). *Korean Journal of Metals and Materials* 52, pp.597-604.

26. J. Y. Huang et al.(2013). Effects of hat treatment and chromium content on the environmentally assisted cracking behavior of the dissimilar metal welds in simulated BWR coolant environments, *Corrosion Science*, 75, pp.386-399.

27. Japan Welding Society.(2013). *Journal of the Japan Welding Society*, 82 (1),

pp.57-63.

28. J. P. Naylor & R. Blondeau.(1976). *Metallurgical and Materials Transactions A* 7, pp.891.
29. J. Liu, Hao Yu, Tao Zhou, Chenghao Song & Kai Zhang.(2014). *Mater. Sci. Eng. A* 619, pp.212.
30. Kameyama Masashi.(2013). Nuclear Power supply(Japan Nuclear Safety Institute), *Journal of the Japan Welding Society* 82 (1), pp.57-63.
31. Kameyama Masashi.(2014). Nuclear power(Design), *Journal of the Japan Welding Society* 83(4), pp.270-274.
32. P. R. Kirkwood.(1978). New Observation on Microstructural and Toughness Control in Low Carbon Weld Metals, *Metal Construction*, pp.260.
33. Q. Peng et al.(2005). SCC behavior in the transition region of an Alloy 182, SA508 Cl.2 dissimilar weld joint under simulated BWR-NWC conditions, *Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System, Water Reactors*, pp.589-599.
34. R. E. Dolby.(1983). *Advances in Welding Metallurgy of Steel, Volume 10*, pp.349-361.
35. Seong Sik Hwang et al.(2013). Review of PWSCC and mitigation management strategies of Alloy 600 materials of PWRs. *Journal of Nuclear Materials* 443, pp.321-330.
36. S. S. Kang & Y. J. Lee.(2003). *Journal of Korean Welding and Joining Society* 21, pp.622.
37. Sung Ho Lee et al.(2012). Evaluation of PWSCC at Dissimilar Metal Butt Welds in NPP, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A* 36(9), pp.1047-1052.
38. T. R. Allen et al.(2005). *Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System, Water Reactors*, pp.833-842.
39. U.S. Nuclear Regulation.(2000).*Crack in weld area of reactor coolant system hot leg piping at V. C. Summer, IN00-17*.
40. Wanjae Kim et al.(2008). Parametric study for Welding Residual Stresses in

Nozzle of Nuclear Power Plants using Finite Element Method. *Autumn Annual Meeting of The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp.104-109.

41. Yong-Ding Lin et al.(2010). Effects of beam offset on mechanical properties and corrosion resistance of Alloy 690-SUS 304L EBW joints for nuclear power plant, *Journal of Nuclear Materials* 401, pp.78-85.