creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000267237

2019년 2월
박사학위 논문

원전기기 일차수 응력부식균열 (PWSCC) 방지를 위한 잔류응력 특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

선 박 해 양 공 학 과

배 수 진

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

원전기기 일차수 응력부식균열 (PWSCC) 방지를 위한 잔류응력 특성에 관한 연구

A study on characteristic of welding residual stress to prevent primary water stress corrosion cracking (PWSCC) in nuclear equipment

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

선박해양공학과

배 수 진

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

원전기기 일차수 응력부식균열 (PWSCC) 방지를 위한 잔류응력 특성에 관한 연구

지도교수 박 제 웅

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

선박해양공학과

배 수 진

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

배수진의 공학박사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 안 규 백 (인)

위 원 조선대학교 교 수 박 제 웅 (인)

위 원 조선대학교 교 수 주 성 민 (인)

위 원 창원문성대학교 교 수 이 유 신 (인)

위 원 한밭대학교 교 수 서 상 철 (인)

2018년 12월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

제1장 서 론 ····· 1
제1절 연구 배경 및 목적 ····· 1
제2절 연구 범위 및 방법 ····· 9
제3절 연구 구성 ····· 11

제2장 이론적 고찰 ····· 12
제1절 일차수응력부식균열(PWSCC) 및 잔류응력 ····· 12
1. PWSCC ····· 12
2. 600 및 690 합금 용접재료의 특성 ····· 14
3. 용접 잔류응력 완화기술 ····· 16
4. 용접 잔류응력 측정 ····· 24
제2절 원자력발전소에 적용되는 용접 ····· 27
1. 원전기기 용접 ····· 27
2. 원전기기 용접 프로세스 ····· 28

제3장 용접설계 및 시험방법 ····· 34
제1절 용접 시험편 제작 ····· 34
1. 모재 및 용접재료 ····· 34
2. 용접조건 및 시편제작 ····· 37
3. 1층 용접 및 3층 용접 시험편 제작 ····· 40
4. 잔류응력 완화기술 선정 ····· 41
5. 잔류응력 완화기술 적용 ····· 42

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 시험 방법 ····· 46
1. 용접이음부의 기계적 특성 ····· 46
2. 경도시험 ····· 50
3. 조직시험 ····· 52
4. 용접 잔류응력 시험 ····· 52

제4장 실험 결과 및 고찰 ····· 55
제1절 용접부 건전성 및 잔류응력 시험결과 ····· 55
1. 비파괴검사 결과 ····· 55
2. 기계적 특성 평가 결과 ····· 56
3. 경도시험 결과 ····· 58
4. 조직시험 결과 ····· 63
5. 화학분석시험 결과 ····· 63
6. 용접 잔류응력 계측 결과 ····· 64

제5장 결 론 ····· 71

참고 문헌 ····· 73

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목 차

Table 2.1 Chemical composition of inconel 600 and inconel 690
Table 3.1 Specification of welding specimen
Table 3.2 Specimen mechanical properties and chemical composition
Table 3.3 Inconel 690 mechanical properties and chemical composition
Table 3.4 Inconel 690 filler metal mechanical properties
Table 3.5 1 layer, 3 layer welding condition
Table 3.6 Pad welding and J-groove welding conditions
Table 3.7 Manufacture of specimen for residual stress relaxation technology
Table 3.8 U-groove specimen examination
Table 4.1 U-groove sample impact test results
Table 4.2 U-groove sample hardness test results
Table 4.3 1 layer sample hardness test results
Table 4.4 3 layer sample hardness test results
Table 4.5 Residual stress relaxation specimen hardness test
Table 4.6 Test results of metal chemical composition test
Table 4.7 Weld pad residual stress test condition
Table 4.8 Residual stress comparison of pad weld
Table 4.9 J-groove residual stress test condition
Table 4.10 Residual stress comparison of J-groove weld

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그 림 목 차

Fig. 2.1 PWSCC crack
Fig. 2.2 Inconel 600/690 residual stress comparison in the same operation
Fig. 2.3 Temporary bead welding heat affected part
Fig. 3.1 U-groove welding joint design
Fig. 3.2 U-groove specimen welding
Fig. 3.3 1 layer, 3 layer specimen welding
Fig. 3.4 Pad welding and inconel 690 nozzle J-groove welding
Fig. 3.5 Manufacture of test specimen using residual stress relaxation technology
Fig. 3.6 Specimen processing for tensile test
Fig. 3.7 Specimen processing for bend test
Fig. 3.8 Impact test specimen
Fig. 3.9 Overlay weld specimen chemical analysis
Fig. 3.10 1 layer, 3 layer specimen hardness test location
Fig. 3.11 Sample hardness and tissue test location
Fig. 4.1 Film after specimen radiographic test
Fig. 4.2 Liquid penetration test results
Fig. 4.3 Specimen mechanical properties test
Fig. 4.4 Specimen hardness test location
Fig. 4.5 1 layer, 3 layer hardness test
Fig. 4.6 Residual stress relaxation technology
Fig. 4.7 1 layer, 3 layer specimen test result
Fig. 4.8 Instrumented indentation tester
Fig. 4.9 Change of indentation load and indentation depth by residual stress
Fig. 4.10 Weld pad residual stress test location
Fig. 4.11 Residual stress comparison of pad weld
Fig. 4.12 J-groove residual stress test location
Fig. 4.13 Residual stress graph of J-groove weld
Fig. 4.14 Comparison of residual stresses of weld specimens
Fig. 4.15 Comparison of hardness and residual stress distribution of specimen

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

A study on characteristic of welding residual stress to prevent primary water stress corrosion cracking (PWSCC) in nuclear equipment

Abstract

Depending on increasing operation term, PWSCC(primary water stress corrosion cracking) is occurred in dissimilar metal welds used inconel 600. In case of Korea, PWSCC have been reported in dissimilar metal welds of steam generator nozzle and PZR nozzle, which are core part of nuclear generating station. When three condition(residual stress of weld zone, sensitivity of material, water chemistry environment) is matched, PWSCC is occurred. If one in three condition is unmatched, this defect don't occur. Welding residual stress adversely affect safety and crack of weld zone. Therefore, technology of residual stress relief is need. In this study, after specimen of dissimilar metal welds was made, peening, vibration, heat treatment were carried out. Then hardness and residual stress were measured in base metal, HAZ(heat affect zone) and weld zone using instrumented indentation tester for verification of technology of residual stress relief. The technology of residual stress relief is expected to secure safety of nuclear generating station by applying maintenance of dissimilar metal welds.

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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제1장 서 론

제1절 연구 배경 및 목적

원자력발전소와 같은 종합 플랜트는 다양한 크기의 수많은 배관들과 관통관(Penetrations) 및 노즐들이 용접에 의해 연결되어 있다. 용접으로 접합된 부분들 중에는 서로 다른 금속이 용접된 이종금속용접부(DMWA : dissimilar metal welding area)가 다수 포함되어 있고, 고 방사선구역인 원자력 발전소 일차측내 대부분의 관통관들과 노즐들도 서로 다른 금속들이 용접된 이종금속용접부로 이루어져 있다. 특히 이러한 관통관들과 노즐들은 1980년대 이전 초창기 신규원전 건설시 응력부식균열(SCC : stress corrosion cracking)에 강한 저항을 갖는 소재로 알려진 인코넬 600 소재를 사용하였으나, 가동년수가 비교적 오래되어 노후화된 원자력 발전소에서 인코넬 600소재를 사용한 관통관들과 노즐의 용접부에서 일차수응력부식(PWSCC : primary water stress corrosion cracking)발생 의심사례들이 1970년대 초부터 관찰되면서 1971년 운전 중인 Obrigheim 발전소 증기 발생기 고온관에서 PWSCC에 의한 균열 사례가 최초로 발견되었다. 그 후에는 1989년 Calvert Cliffs 원자력발전소 2호기 가압기 노즐 중에서 Alloy 600 재료를 사용하여 제작한 Heater Sleeve 에서 PWSCC 발생하였다. 2000년 6월부터 7월에는 스웨덴에 있는 Ringhals 원자력발전소 3호기와 4호기 Safe Ends에서 PWSCC 균열이 보고되고 균열에 대한 보수 정비는 2003년과 2004년에 각각 인코넬 690 용접재료를 사용하여 완료하였다[52]. 응력부식균열(SCC : stress corrosion cracking)의 발생원인은 민감한 재료가 잔류응력이 있는 상태에서 장시간 노출되었을 경우 발생된다. PWSCC는 이러한 SCC의 한 종류로 원자력 발전소 일차 계통수 환경에서 장시간 노출되어 운전된 인코넬 600 같은 특정 소재와 압력용기의 용접부에서 발생되는 것을 알 수 있다. 저합금강과 인코넬 600 소재로 구성된 이종 용접부에 용가재로 인코넬 600 용접재료를 사용한 용접부는 PWSCC에 강한 저항성이 있는 것으로 원자력발전소 시공 초기에 알려져 있었으나 corious에 의하여 1959년 인코넬 600 소재가 350℃의 순수한 물에서 균열을 발생한다는 것이 확인되었다[30]. 연구결과에 따르면 PWSCC는 ① 높은 온도 ② 입계탄화물이 존재하지 않는 재료 ③ 높은 잔류응력 이렇게 3 가지의 조건이 동시에 만족 할 때 발생한다고 알려져 있다[11]. 즉 PWSCC는 용접부에서의 잔류응력, 재료

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

의 민감도, 수화학 환경의 3가지 조건이 동시에 충족할 때 발생하며 이중에서 한 가지 조건이라도 만족하지 않으면 발생하지 않는다[25]. 그 결과 1980년 이후부터는 응력부식균열에 강한 저항성이 있는 소재로 알려진 인코넬 600의 Ni 함량을 줄이고 Cr함량을 상대적으로 높이고 탄소의 함량도 최대 0.05% 이하로 낮추어 열과 부식균열에 강하다고 평가되고 있는 인코넬 690 소재로 신규원전 건설 및 노즐 용접에 적용하였다. 하지만, 국내 및 해외의 많은 원전기기의 용접부가 인코넬 600을 사용한 관통관들과 노즐들을 현재 사용 중이며 이러한 관통관들 과 노즐들에서 노화(Aging)와 잔류응력으로 기인하는 PWSCC 때문에 냉각수 누출 사고의 위험성이 있다. 원자력발전소 1차측 환경은 고 방사선구역으로 인코넬 600 소재의 관통관들과 노즐들이 있기 때문에 복잡한 구조적 제한을 받는 협소구간에서 인코넬 600소재가 사용된 관통관 및 노즐 용접부의 PWSCC를 예방하는 방법으로는 사용 환경 개선 및 인코넬 690 소재로의 교체 그리고 잔류응력 완화가 있지만 현실적인 측면에서는 원자력발전소 운전조건에서 설비의 사용 환경 개선은 불가하고 인코넬 600소재로 구성된 노즐을 교체하는 것은 막대한 비용발생이 있기에 용접부 잔류응력 완화를 통한 PWSCC 예방이 가장 현실적인 해결 방법이다. 1980년대 미국 비등경수로형(BWR : boiling water reactor) 원자력발전소에서 결함이 발생된 배관 용접부를 보수하는 방법으로 예방용접 오버레이를 처음 사용하고 이후에 가압경수로(PWR : pressurized water reactor)의 안전 1등급 기기의 인코넬 600 소재로 구성된 이종금속용접부에 적용되어졌다[44]. ASME(american society of mechanical engineers) B&PV code, Sec. Ⅸ, code case N-740에서는 PWOL을 이종금속용접부에 적용하여 PWSCC 결함을 보수 및 예방하는 방법을 제시한다[16]. 해외의 경우 PWSCC 발생 전 주요 결함 발생인자들에 대하여 선제적으로 관리하여 PWSCC를 예방하는 MSIP(mechanical stress improvement process), PWOL(preemptive weld overlay), laser, water jet peening, peening, IHS(induction heating stress improvement), inlay/onlay welding 등 예방정비 방법들에 있어서 여러 가지 방안이 개발적용 되었다. MSIP는 비등 경수로 원전 설비들의 용접부에 발생하는 IGSCC(inter granular stress corrosion cracking)의 예방을 위하여 개발된 기술로 PWR의 원자로 냉각재 계통 설비들의 인코넬 600이 사용되는 이종금속용접부들에 대하여 확대 적용되어졌다[25]. Aea technology engineering service, inc.에서 개발 및 특허 등록을 한 이 기술의 개념은 원주방향 용접부 주변을 국부적으로 배관을 압축하는데 유압 작동 클램프 장비를 이용하며 장비에 의한 압축은 용접부에 오목한 형상을 발생시키고 결

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

국은 배관 원주에 상응하는 감소를 야기시킨다. 장비를 제거하면 용접부에 축 방향 응력은 두께의 절반만 압축인 상태로 남게 되고 원환응력은 대부분의 모든 두께에 걸쳐서 압축인 상태로 남게 된다. PWR 원전에 대해서는 westinghouse에 의하여 2002년 V.C. summer 원자로 출구의 이종금속 노즐 용접부에 적용한 이래, cook 1호기 원자로 노즐, harris 원자로 노즐 및 salem 원자로 이종금속 노즐 용접부에 적용되어 왔다[1]. MSIP는 장비만으로 단시간 내에 잔류응력을 효과적으로 이완시켜 압축 응력화 시키는 장점이 있지만 전체적인 형상 및 영구 소성 변형을 발생시킨다. 소성 변형으로 인한 탄소강 및 저합금강의 모재부 연성과 인성에 대한 저하로 인하여 MSIP 수행에 있어서 추가적인 재료의 물성 평가가 요구된다는 단점이 있으며 주로 적용이 되는 곳은 단순한 구조의 대구경 노즐부에 이종금속용접부가 해당된다. PWOL은 PWSCC 발생이 예상되는 이종금속용접부의 외부 표면에 예방 목적으로 weld overlay를 하는 것으로 이종금속용접부의 표면에 overlay 용접된 용착부는 응고되면서 수축하는데 이러한 수축은 용접부 내면의 인장 잔류응력을 감소시키고 압축응력을 증대 시키는 방법으로 ASME B&PV code, sec. xi, code case n-740에 이종금속용접부에 PWOL을 사용하여 PWSCC에 의한 균열 보수 및 예방 방법이 제시되었다[15]. 1980년대 미국에서 BWR 원전의 결함이 있는 배관 용접부를 정비하는 방법으로 처음 사용이 된 후 PWR(pressurized water reactor)의 안전 1등급 설비의 인코넬 600 이종금속용접부에 대하여 확대 적용되어졌으며[44] PWOL은 2006년 1월을 기준으로 하여 25년 동안 PWR 가압기 노즐에 130번 이상, BWR에 800여 번 이상 적용되었다[44]. PWOL은 전체적인 형상 및 소성 변형이 발생되지 않고 용접 준비 시 purge 방법과 자동 용접기와 치구등의 설치가 용이한 점과 내표면에 신뢰성 높은 압축응력을 부가하여 영구적으로 PWSCC 문제를 해결하는 장점이 있다. 하지만 PWOL 작업 전 과 후에 검사시행, 설계변경 사항에 대한 평가 등 수행해야할 절차가 매우 복잡하며 PWOL 시행을 위한 별도의 개발된 용접 장비가 필요하며 용접하는데 상당 한 시간이 소요되어 작업자의 피폭량도 증가가 수반된다. 최근에는 용접 효율성을 개선하여 overlay 용접 시 용접두께를 최적화 하는 용접기법으로 OWOL(optimized weld overlay)을 적용하려는 노력이 있다. 따라서 PWOL은 구경이 큰 노즐의 이종금속용접부에 적용 보다는 주로 가압기 노즐부에 이종금속 용접과 같은 상대적으로 구경이 작은 노즐의 이종금속용접부에 주로 적용이 되고 있다. laser peening에 대한 기술은 1963년 미국의 white가 충격파를 발생시키면서 금속재료의 소성 변형을 발생시킬 수 있는 레이저 특성을 처음

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

으로 확인한 이래[48]로 toshiba는 원자력발전소의 이종금속용접부에 인장응력 및 잔류응력을 이완하고 압축 응력화시키는 laser peening 방법에 대한 기술 및 장비를 개발하면서[60] 2002년 가압경수로 원자로 bottom mounted 노즐의 J-groove이 종금속용접부에 처음 적용한 후 가압경수로 용접부에 총 3번의 적용한 사례가 있다[62]. 기존 숏 피닝 작업의 경우는 대상물에 표면 및 모서리 같은 예리한 부위에 손상을 야기시키지만 레이저 피닝은 표면에 손상을 주지 않고 사용자가 원하는 부분에 국한시켜서 피닝 작업을 할 수 있는 장점이 있다. Toshiba는 1999년 BWR core shroud 용접부에 대하여 laser peening을 처음으로 적용하면서 비등 경수로 용접부에 대하여 총 11번의 수행을 하였으며 2002년 PWR 원자로 bottom mounted 노즐의 이종금속용접부인 J-groove 대해 처음으로 적용한 이후 PWR 용접부에 대해 총 3번의 현장적용 사례를 확인할 수 있다[62]. laser peening은 전체적인 형상 및 소성 변형과 야금학적 조직 변화를 야기시키지 않으며 표면 근처에만 압축응력을 발생시키는 점과 유연한 광학 fiber 전달 system을 사용하므로 J-groove 용접 형상과 같이 복잡한 용접형상에도 적용이 가능하다. 또한 진동이 발생되지 않으며 육안으로 쉽게 peening 처리가 되어 있는 영역에 대하여 확인이 가능하다. 최근에는 laser 주사 이전 및 이후에 있어서 어떠한 표면처리도 요구를 하지 않는다. 하지만, 고에너지의 laser를 발생하기 위해선 고가의 장비가 필요하며 laser를 용접할 대상까지 전달시키기 위한 복잡한 장비 및 시스템의 개발이 필요하다는 단점이 있다. 가압기 노즐부 이종금속용접부에 적용하려는 계획이 있었고 일본에서 bottom mounted 노즐의 J-groove 용접부에 적용을 하고 있다. water jet peening은 공학, 의료 및 상업적 용도로 폭 넓게 사용이 되고 있는 water jet abrasion의 확장된 기술 중에 하나로 Hitachi와 Mitsubishi 중공업은 원전의 용접부에 SCC를 예방하는 방법으로 적용이 가능한 water jet peening 기술 및 장비를 개발하였다[31]. 고압의 물이 water jet peening 노즐을 통하여 분사될 때, 고속의 water jet는 공동현상(cavitation)을 발생시킨다. water jet 내 공동현상은 순간적으로 붕괴되면서 발생되는 강력한 압력파(약 1,000MPa)를 이용하여 laser peening과 동일한 방법으로 용접부 표면에 고속의 물방울 입자가 연속적으로 충돌하면서 국부적인 QW을 발생시켜 표면층에 압축 잔류응력을 부가시키는 방법이다. Mitsubishi 중공업이 PWR 원자로 bottom head BMI 이종금속 J-groove 용접부에 Water jet peening의 유용성을 실험하여 측정한 결과[42] water jet peening의 적용에 따라서 용접부 반경 방향의 표면 및 원환 잔류응력이 저감되면서 압축 응력화 되었다. Water jet peening은 배

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

관의 이종금속용접부, 원자로 입출구 노즐 안전단, 원자로 bottom head, BMI 이종금속 J-groove 용접부 및 노즐부 표면, 그리고 원자로 안전주입 노즐 안전단의 이종금속용접부에 적용이 가능하다. 일본에서는 주로 소구경 노즐의 제작 및 용접보수에 적용을 하고 있다. Water jet peening은 전체적인 형상의 변화나 소성 변형은 발생되지 않으며 또한 야금학적인 금속조직의 변화를 발생시키지는 않으며 내표면의 근처에서만 압축응력을 형성시켜 주는 장점이 있다. 단 한 번의 패스만으로 폭이 넓고 깊은 영역에 위치해 있는 재료 표면상 잔류응력을 향상시킬 수 있다. 그리고 적용 조건 범위가 넓어 J-groove 용접부처럼 복잡한 형상의 용접부에도 적용할 수 있고 작업은 물만을 이용하기 때문에 이물질이 투입되지 않으며 그 어떠한 열영향도 없다[42]. 하지만 water jec 공동현상을 발생시키기 위해서는 고가이면서 복잡한 장비 개발이 필요하며 공동현상 발생 및 붕괴 제어가 쉽지 않다는 단점이 있다. IHSI는 1980년대 일본에서 Hitachi, IHI 등의 공동연구를 통하여 BWR primary 루프 순환 배관 용접부에서 발견되는 IGSCC의 결함발생을 예방하기 위하여 개발이 시작되었으나 아직까지 PWR에 적용이 되지는 않고 있다[61]. 고주파 유도 가열법에 따라서 외면의 설정 온도(500~550℃)까지의 가열과 동시에 용접부 내면은 물을 이용하여 냉각함으로써 배관 벽을 통하여 많은 온도 차이가 발생한다. 이런 조건에서 외면은 압축 항복 상태가 되며 내면은 인장 항복 상태의 조건이 된다. 가열이 정지되면 온도 차이는 작어지고 가열 과정에서 발생한 외표면 상의 응력은 인장응력으로 변화하게 된다. 내면의 응력은 압축 잔류응력으로 변화된다[26]. IHSI는 용접부 근처 안쪽면의 잔류응력을 효과적으로 완화하고 운전 중 내부의 냉각재를 배수하지 않아도 수행할 수 있다는 장점이 있지만 외면에 열을 가하게 됨으로써 온도 제어에 있어서 실패 시 내식성 재료인 오스테나이트 스테인리스강과 니켈기 합금 등에 야금학적인 조직 변화를 야기시킬 수 있다는 단점이 있다. BWR primary roof 순환 배관과 같은 스테인리스강 배관의 노즐부와 안전단의 용접부에 적용이[54] 되나 일부 비등수형 원자로 원전(browns ferry 3호기)의 IHSI 수행 용접부에서 IGSCC 결함 발생 사례가 있어서 미국 원자력규제위원회(US NRC : united states nuclear regulatory commission)의 승인이 아직 되지 못한 상태이며 PWR에는 아직까지 적용되지 않고 있다[35]. 이러한 예방정비 방법들은 원자로 냉각재 계통의 노즐과 접하는 내표면에 형성되는 인장 잔류응력을 압축 잔류응력으로 변화시켜서 PWSCC 발생을 예방하는 정비 방법들이다. 하지만 inlay/onlay welding은 SCC 발생에 있어서 세 가지 인자 중에서 하나인 재료 부분에서 SCC에

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

민감한 재료를 PWSCC 저항성이 강한 재료로 대체시키는 방법으로 PWSCC에 민감한 인코넬 600 모재 및 용접재료를 PWSCC 저항성이 우수한 인코넬 690 계열의 용접재료로 용접하여 PWSCC에 민감한 인코넬 600 금속을 PWSCC 발생이 용이한 부식 환경으로부터 차단하는 방법이다. inlay welding과 onlay welding의 차이점은 기존에 존재하고 있는 모재와 용접금속에 대한 제거여부로서 기존 모재와 용접금속을 일부분 제거한 다음 인코넬 690 용접재료로 용접하면 inlay welding이 되며 제거를 하지 않고 용접을 시행하면 onlay welding이 된다[57]. Areva와 Mitsubishi 중공업에서는 적용방법 및 장비를 개발하여 각각 스웨덴 ringhals 원자력발전소의 원자로 노즐부에 용접구간 및 일본 ohi 3호기 원자로의 입출구 노즐 용접부에 inlay welding을 수행하였다. 가압기 또는 원자로에 물이 가득 채워진 상태에서도 현장적용이 가능하고 템퍼비드 용접과 동등한 효과를 가져다줄 수 있는[37] 장점이 있지만 용접 전 및 후에 검사, 설계 변경 사항 등에 대한 검토와 같이 수행할 절차가 복잡하며 용접을 위한 작업환경에 특화된 용접 장비를 개발하여야 하는 점과 내면 용접을 수행한 후 발생되는 내면의 인장 잔류응력이 PWSCC 이외에도 다른 원인으로 인한 균열이 발생한다면 균열 진전력의 하나로 작용할 수 있는 단점이 있다. 내면에서 모든 작업이 이루어지는 inlay/onlay welding 특성상 대구경 원자로 입, 출구의 이종금속용접부에 한하여 사용될 것으로 예상된다. 이상의 PWSCC 방지에 대한 국내 및 해외 사례를 통하여 분석한 결과 PWSCC 방지의 가장 효율적인 방법은 용접부에 잔류응력 완화이다. 용접은 두 금속소재를 열에너지를 이용하여 용융시켜 접합시키는 방법으로 용접과정에서 용접부에 국부적으로 열이 가해지면 금속은 팽창하게 되며 반대로 냉각되는 중에 용융금속의 온도가 감소하면 금속은 수축하게 된다. 이와 같이 잔류응력 및 용접 변형의 발생 원인은 용접금속의 수축으로 인하여 발생되는 것이다. 용접 잔류응력은 금속재료의 종류, 용접되는 형상, 구속 조건, 용접순서에 따라서 변하게 된다[36]. 용접된 내부에 발생된 잔류응력은 구조물의 건전성(변형, 응력 부식균열, 균열)에 영향을 주기 때문에 일반적으로 용접 후열처리(PWHT : post weld heat treatment)를 하여 잔류응력을 제거해준다[23]. PWHT는 강의 재결정 온도 이상인 600~700℃의 고온 처리를 통하여 재료의 야금학적 물성에 특성을 개선하고 크리프 특성을 통하여 잔류응력을 완화시켜 주는 방법이다[23]. 하지만 PWHT는 재료의 종류 및 두께에 따라 PWHT에 조건인 온도 및 시간이 달라서 이종금속용접부에서는 PWHT 조건에 대한 세부적인 절충 및 오스테나이트계 스테인레스강의 예민화로 인하여 작업에 주의가 필요하다. 인코

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

넬 600 용접재료가 사용된 이종금속용접부에 대하여 후열처리를 적용하면 열영향부(HAZ : heat affected zone)에 템퍼링 효과를 줄 수 있어 PWSCC 저항성를 향상시킬 수 있다. 그 원인으로는 후열처리를 통하여 열영향부의 경도를 저감시키면서 용접부 잔류응력이 완화되는 것이다. 또한 용접부 표면에 분포하는 잔류응력을 저감하고 입계에 탄화물을 석출시켜 PWSCC 생성에 저항성을 증가시킨다[50]. 이처럼 용접 후열처리를 하는 주된 목적은 열영향부에 tempering을 통하여 소재의 인성 및 연성의 회복과 재료의 강도를 감소시켜 모재와 동등 또는 그 이상의 물성 특성을 갖도록 하는 데 있다[5]. 가동 중 원전 압력용기의 관통관 및 노즐배관의 인코넬 600으로 구성된 이종재료 용접부의 경우 PWSCC 손상을 방지하기 위하여 오버레이 다층 용접과정을 통해 손상 예상 영역에 압축응력을 발생시키도록 overlay 용접 후 열영향부의 취약해진 조직을 회복하기 위해 후열처리를 하여야 하나 현장에서는 용접 후열처리가 불가능한 경우가 대부분이며 overlay welding으로 인하여 형성된 배관 내벽의 압축 잔류응력은 후열처리 완료 후 제거될 수 있으므로 전체 설비에 대한 후열처리는 수행을 할 수 없다. 그리하여 취약한 용접부에 조직들만 용접작업을 통해 템퍼링 시키는 기술이 적용된다. 원자력 주기기 소재인 저합금강을 용접하는 경우에는 용접 열영향부에 마르텐사이트처럼 조대화된 취약한 조직이 형성된다. 이처럼 취약한 조직을 제거하면서 건전한 용접부를 얻기 위해서는 후열처리를 통하여 취약한 열영향부에 템퍼링 효과를 주어야 한다. 작업환경이 열악한 플랜트 현장에서 주로 시행하는 보수용접은 배관 및 기계장치들과의 열적 기계적 간섭에 의해 후열처리 적용이 곤란할 때 제어된 용접비드 적층인 temper bead 용접을 하여 용접부에 후열처리 없이 템퍼링 효과를 부여할 수 있다. ASME code section ix에서는 원전 배관 및 설비의 보수용접에 적용이 가능한 후열처리 면제 조건의 temper bead 용접에 대한 규정을 제시하고 있고[15] 저합금강에 대하여 후열처리 공정 대신으로 비드의 적층방법과 입열량 조절을 통하여 열영향부 조직에 tempering을 부여하는 기술로 ASME code section ix의 qw-290 에서는 보수용접기술에 사용할 수 있는 템퍼비드 용접의 적용에 대하여 내용을 규정하고 있다[13]. 후열처리를 면제하는 조건으로 템퍼비드 용접기법을 용접공정으로 적용하여 보수용접을 수행하고, 용접성을 만족하는 경우에는 후열처리를 하지 않아도 되는 후열처리 면제 조항의 근거를 마련했다. 이같은 규정을 적용해서 가동원전에서 인코넬 600으로 구성된 이종금속용접부의 PWSCC 손상을 예방하기 위한 기술로 사용되고 있다. 템퍼비드 용접방법은 용접할 모재에 여러 개의 용접비드 층을 다층으

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

로 적층하는 용접이다. 같은 비드 층 안에서 반복적으로 비드를 겹침(overlap)시켜서 열영향부에 템퍼링 효과를 얻으며 계속되는 용접비드 적층 수행시 위의 층에서 발생된 용접입열이 아래층에 용접금속을 통과하면서 열영향부의 취약한 미세조직에 전달이 되도록 하여 템퍼링 효과가 발생되도록 하는 용접기술이다. temper bead 용접 원리는 두 개의 비드 층을 높이 방향으로 적층을 하는 경우 아래층에 의하여 형성이된 열영향부는 위층 용접비드 적층에 사용된 용접입열에 의해 템퍼링이 되고 아래층 용접시에 적용한 입열량보다는 좀더 큰 입열량으로 위층에 적용하는 경우는 아래층에 먼저 형성된 열영향부 조직까지 재 가열시켜서 조직을 미세화시키거나 템퍼링 시킨다. 세 개 이상의 용접비드 적층으로 후열처리 없이 템퍼링 효과를 열영향부에 부여한다[59]. 템퍼비드 용접방법을 이용한 후열처리 대체기술은 이론적으로 보면 쉽게 적용이 가능할 것 같으나 실제 현장의 적용에 있어서는 용접 효율성, 숙련성, 신뢰성 등을 고려한 최적의 용접공정 기술이 개발되어야 한다. 1980년대부터 미국의 EWI와 영국의 TWI를 비롯한 여러 연구 기관에서는 temper bead 용접에 평가 및 여러 종류의 소재들중에 탄소강 및 합금강 적용을 위한 기술개발이 현재까지도 수행되고 있다. 용접재료의 다양한 적용을 통한 용접공정 개발 및 현장의 전반적인 주변여건 등을 고려한 다양한 방식의 템퍼비드 용접기술이 제시되었으나 국내에서는 아직 이런 규정을 적용하는데 체계적인 기술 기반 및 이해가 확립되지 못하고 있다. 국내 발전소 현장의 보수 및 생산용접에 관하여는 많은 경험적 기술이 있으나 후열처리와 동등한 효과를 얻을 수 있는 용접공정은 아직 부족하며 또한 현장에 적용하기 위한 기반기술도 아직 부족하다. 원자력 발전소의 운전 중 예측하지 못한 결함이 발생하면 대응을 하기 위한 보수기술이 확보되어야 하며 이런 보수 작업은 원전의 운전을 정지하지 않고 또 방사선 피폭으로부터 작업자의 안전성을 고려하여 신속히 수행되어야 한다. 즉 현장 보수용접 상황 발생시 신속하고 안전한 보수작업인 템퍼비드 용접기술이 필요하며 이종금속 용접부의 PWSCC 발생에 주요 인자인 용접부 잔류응력을 완화시킬 수 있는 연구가 필요하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 연구 범위 및 방법

본 연구를 통하여 PWSCC 방지를 위한 용접방법인 템퍼비드 용접기술 및 잔류응력 완화 기술을 개발하고자 한다.

1. 템퍼비드 용접기술 개발을 위하여 실험에는 자동 GTAW(gas tungsten arc welding) 용접을 적용하여 원자력 주기기와 노즐에 사용 되는 SA508 Gr.3 Cl.1 소재와 인코넬 690 용접재료를 사용하여 용접시편 제작 후 열영향부의 미세경도 및 템퍼링의 정도를 비교 분석하여 최적의 용접조건을 찾는 방법을 사용한다. 이 방법은 주요 용접 조건인 용접전류, 용접전압, 용접속도, 비드 층간온도, 용접 입열량 등의 여러 용접변수들이 중첩되어 열영향부에 템퍼링 효과를 주어 각각 용접 시 적용한 변수에 대한 관리와 PQT(procedure qualification test)수행을 통하여 최적 용접기술을 개발하고 용접에 대한 건전성 확인은 비파괴검사 및 용접부 기계적 성질(인장, 굽힘, 충격, 경도)시험, 용착금속의 화학성분등을 수행하여 검증한다. 또한 다층용접에서 각 비드를 적층하면서 열영향부에 대한 템퍼링 효과 검증은 1 layer, 3 layer 시편을 제작하여 비파괴검사(PT : liquid penetrant testing, UT : ultrasonic testing)를 통하여 용접부에 대한 건전성 확인 후 HAZ의 미세조직 및 경도시험을 통하여 템퍼링 효과를 확인한다.
2. 이종금속용접부에 존재하는 잔류응력의 생성원인들로는 용접으로 인하여 용접부 주변에 발생하게 되는 국부적 온도 구배, 용접 시 구속되는 경계 조건, 재료 물성의 불일치 등의 다양한 용접변수들에 상호작용으로 인하여 발생이 된다. 잔류응력이 용접부 건전성에 미치는 영향은 부식을 동반한 파괴의 영향으로 나타나므로 이러한 영향을 최소화하기 위한 기술문서인 ASME code에서는 용접부 후열처리 등을 통하여 잔류응력을 완화 처리 또는 특정한 용접방법을 사용하는 등 잔류응력에 영향을 최소화 하는 방법을 기술하고 있고 지금도 새로운 용접소재, 용접 방법, 공정 절차 등을 개발하고 있다. 결함이 ASME code에 명시한 허용기준을 초과하는 경우에는 결함이 발생된 부분을 제거한 다음 보수용접이 되어야 하지만 이때는 기존 용접으로 인하여 발생된 잔류응력에 추가적인 보수용접으로 인하여 잔류응력이 생길 수 있다. PWSCC 발생에 주요 인자인 용접부 잔류응력 완화에 대한 연구로 열화민감 용접부에 있어서 보수용접 시 잔류응력 건전성 확보에 대한 연구를 국내에서 수행한 사례는 있으나 PWSCC 방지에 대한 다양한

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

잔류응력 완화기법에 대하여 체계적인 연구는 아직까지 많이 부족한 상태로, 본 연구를 통하여 잔류응력 완화 용접기술을 개발하고자 한다. 잔류응력 완화 기술 개발을 위한 실험에는 자동 GTAW 용접을 적용하여 원자력 주기기 소재인 SA508 Gr.3 Cl.1 및 인코넬 690 노즐에 인코넬 690 용접재료를 사용하여 관통노즐 형상의 용접시편을 다음에 5가지 Type(① 오버레이 용접, ② 오버레이 용접 + 진동적용, ③ 오버레이 용접 + 피닝적용, ④ 오버레이 용접 + 진동적용 + 피닝적용, ⑤ 오버레이 용접 + 후열처리)로 제작하여 비파괴검사(PT, UT)를 통한 용접부 건전성 확인 후 base, HAZ, weld metal부에 경도 및 계장화압입시험을 통한 각 시편들에 잔류응력 측정 후 최적에 잔류응력 완화기술을 찾는 방법을 사용하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3절 연구 구성

제1장 서론

- 제1절 연구 배경 및 목적
- 제2절 연구 범위 및 방법
- 제3절 연구 구성

제2장 이론적 고찰

- 제1절 일차수응력부식균열(PWSCC) 및 잔류응력
  1. PWSCC
  2. 600 및 690 합금 용접재료의 특성
  3. 용접 잔류응력 완화기술
  4. 용접 잔류응력 측정
- 제2절 원자력발전소에 적용되는 용접
  1. 원전기기 용접
  2. 원전기기 용접 프로세스
- 이종금속용접부에 PWSCC 및 용접부 잔류응력 완화기술 제시

제3장 용접설계 및 시험방법

- 제1절 용접 시험편 제작
  1. 모재 및 용접재료
  2. 용접조건 및 시편제작
  3. 1층 및 3층 용접 시편제작
  4. 잔류응력 완화기술 선정
  5. 잔류응력 완화기술 적용
- 제2절 시험 방법
  1. 용접이음부의 기계적 특성
  2. 경도시험
  3. 조직시험
  4. 용접 잔류응력 시험
- 잔류응력완화 기술개발을 위한 시편제작 및 시험방법 제시

제4장 실험결과 및 고찰

- 제1절 용접부 건전성 및 잔류응력 시험결과
  1. 비파괴검사 결과
  2. 기계적 특성 평가 결과
  3. 경도시험 결과
  4. 조직시험 결과
  5. 화학분석시험 결과
  6. 용접 잔류응력 계측 결과
- 용접조건 검증용 시편의 기계적 특성을 통한 용접조건 확인 후 잔류응력 완화기술 적용 시편의 경도 및 잔류응력 계측

제5장 결론

- 결 론

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2장 이론적 고찰

제1절 일차수응력부식균열(PWSCC) 및 잔류응력

1. PWSCC(primary water stress corrosion cracking)

1950년대 원전기기 이종용접부에 주재료로 사용되는 stainless Steel이 고온수 환경에서 응력부식균열에 민감한 것으로 확인되면서 대체 재료인 인코넬 600이 개발되었다. 하지만, 인코넬 600 재료에 대한 응력부식균열의 발생에 대하여 1950년대부터 1960년대 이르기까지 프랑스 CEA의 Coriou와 미국 Inco의 Copson간의 논쟁이 있었고 Inco의 Copson은 인코넬 600은 응력부식균열이 발생하지 않는다고 발표하였다[32]. 1970년대 초 인코넬 600 전열관에서 응력부식균열이 독일 원전기기에서 발생을 시작으로 증기발생기 전열관에서도 발생되면서 니켈 합금인 인코넬 600 용접재료를 사용한 가압경수로형 원전기기 이종금속용접부에서 PWSCC에 의한 균열 발생 사례가 국내를 포함하여 전 세계적으로 보고되고 있다[43]. PWSCC에 의한 균열은 원전기기의 각종 노즐 용접부, 가압기 노즐 등 인코넬 600 용접재료를 사용한 이종금속용접부에서 발생되면서 이에 따라 한국을 비롯한 세계 각국의 원자력 산업계에서는 인코넬 600 용접재료가 사용된 용접부에 인코넬 690 용접재료를 사용하여 예방정비를 수행하였다[28]. 원전기기 중에서 특히 안전 1등급 기기들의 이종금속용접부는 일차수응력부식균열이 발생되는데 필요한 3가지 주요 인자들(고온 수화학 환경으로 인한 부식환경, 높은 잔류응력, 응력부식균열에 민감한 재질)을 동시에 만족하기 때문에 응력부식균열이 발생할 잠재성이 있다[56]. 원자력발전소에서 1차 계통냉각수는 원자로 안에서 핵연료의 핵분열로 인한 열을 냉각시키는 기능을 하고 사용되는 냉각수는 핵연료 및 계통구조물의 최소한의 부식을 위해 순수가 사용된다. 사용되는 순수는 하천 또는 강물 등의 담수를 사용하여 원자력발전소에서 정화처리 과정을 통하여 불순물이 없는 상태로 만들어 1차 계통수 및 보충수로 사용한다. 원전기기의 부식성을 약화시키는 수질조건은 원전가동을 ph 6.0~8.0 사이의 원전운전이 필요하며 이를 위해서는 1차 계통 냉각수에 리튬을 사용하여 ph 조절을 하고 붕소사용으로 핵분열 억제를 위한 중성자 흡수를 한다. 일차수응력부식균열을 설명할 때 중성 또는 알칼리분위기에서의 응력부식균열로 표현을 하지만 주요 발생 인자로는 알칼리와 같은 환경적인 요소보다는 잔류응력 요소이다. PWSCC의 전파는 주로 입계를 따라서

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

일어나며 fig. 2.1에서 보이는 바와 같이 PWSCC의 전파가 대부분 입계를 따라서 발생하고 있음을 알 수 있다.

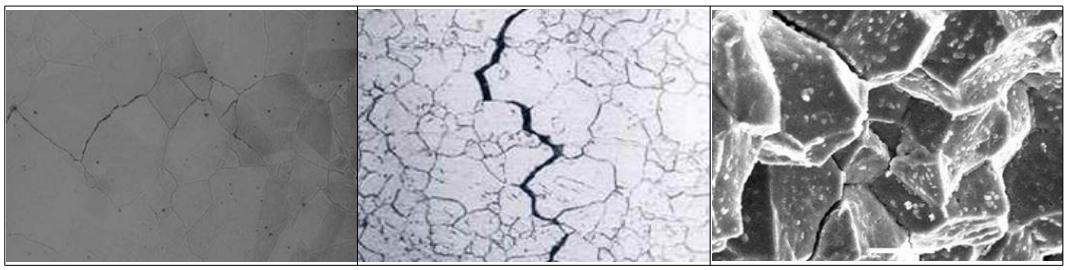


Fig. 2.1 PWSCC crack[49]

PWSCC의 전파는 대부분 입계를 따라서 발생하며 PWSCC는 균열이 개시하는 단계와 전파하는 단계 두 단계로 나눌 수 있는데 균열의 개시는 미세조직, 환경, 응력 세 가지 조건 외에 표면 산화층이 깨지는 환경과 선택부식(selective corrosion) 등 다른 요인들에 의해 시작될 수 있어서 표면 산화막이나 입계 산화 등이 균열 개시에 큰 영향을 주는 요소가 될 수 있다. 균열의 개시는 환경 및 기타 다른 조건에 따라서 많은 차이를 보일 수 있어서, 운전환경과 조건 등이 영향을 미칠 수 있다. 또한, 한번 균열이 개시가 되면 균열은 빠른 속도로 전파되어 원자력발전소에서는 상당히 위험한 요소가 될 수 있다. 균열의 개시와 전파는 4단계로 구분할 수 있는데[4] 1~3단계에서는 긴 균열 개시시간을 유지하면서 4단계에서는 한번 개시된 균열은 빠른 속도로 전파하여 균열의 깊이와 길이가 짧은 시간 안에 증가함을 보이고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 600 및 690 합금 용접재료의 특성

2001년 미국 원전 northanna 2호기의 1차측 원전기기인 제어봉구동장치(CRDM : control rod diver mechanism) J-groove 용접부에서 균열 발생으로 원자로 헤드를 교체하였는데 균열발생의 원인은 CRDM 관통관 노즐부에 PWSCC 발생으로 1차측 냉각수가 누설된 상태에서 원전 운전으로 인한 증발 및 건조 과정을 거쳐 붕산농축으로 원자로 상부헤드에 붕산부식이 발견되었다[34]. 초기 원자력 산업계에서 인코넬 600 제조는 항복응력과 인장강도를 증가시켜 결정립 크기를 작게 만들어 기계적 강도를 개선하고자 저온 mill annealing한 LTMA(low temperature mill anneal) 열처리방법을 적용하였다. 하지만 LTMA 재료는 응력부식균열에 민감한 것으로 확인되어 westinghouse와 CE(combustion engineering)는 인코넬 600의 응력부식균열 저항성 개선에 필요성을 인식하였으며 그 결과 westinghouse에서 LTMA 열처리 공정을 개선한 TT(thermal treatment, 700°C-15 hrs) 재료를 사용하게 되었으며 CE도 열처리공정을 개선하여 HTMA(high temperature mill anneal) 재료를 사용하게 되었다. 원전기기 설비 소재로 사용 초기에는 TT 재료와 HTMA 재료 모두 응력부식균열에 저항성이 있었지만 원전의 가동연수 증가에 따라 TT 재료가 응력부식균열의 저항성이 더 뛰어난 것으로 확인되었다. 하지만 인코넬 600 TT 재료도 응력부식균열이 발생되면서 저항성이 더 뛰어난 재료가 필요하게 되었고 그 결과 인코넬 690 재료가 개발되었다. 2000년대 이후부터는 원전기기에 인코넬 690TT 재료를 사용하게 되었고 1989년 최초로 인코넬 690TT 재료가 원전기기에 사용되면서 현재까지 원전기기에 응력부식균열은 관찰되지 않고 있다.

Table 2.1 Chemical composition of Inconel 600 and Inconel 690 (unit : %)

Material	Ni+Co	C	Mn	Fe	S	Si	Cu	Cr
Inconel 600	≤ 72.0	≤ 0.15	≤ 1.0	6.0- 10.0	≤ 0.015	≤ 0.50	≤ 0.50	14.0- 17.0
Inconel 690	≤ 58.0	≤ 0.05	≤ 0.50	7.0- 11.0	≤ 0.015	≤ 0.50	≤ 0.50	27.0- 31.0

PWSCC 저항성은 원전의 조건상 개선이 불가한 환경적인 영향을 제외하면 금속재료의 화학성분 함유량 측면과 기계적 측면으로 구분할 수 있다. 화학적인 면에서는 인코넬 600과 인코넬 690의 차이는 table 2.1과 같이 Cr 함량으로 인코넬 600의 Cr 함량이 15%인 반면에 인코넬 690은 Cr이 2배 이상인 30% 정도이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

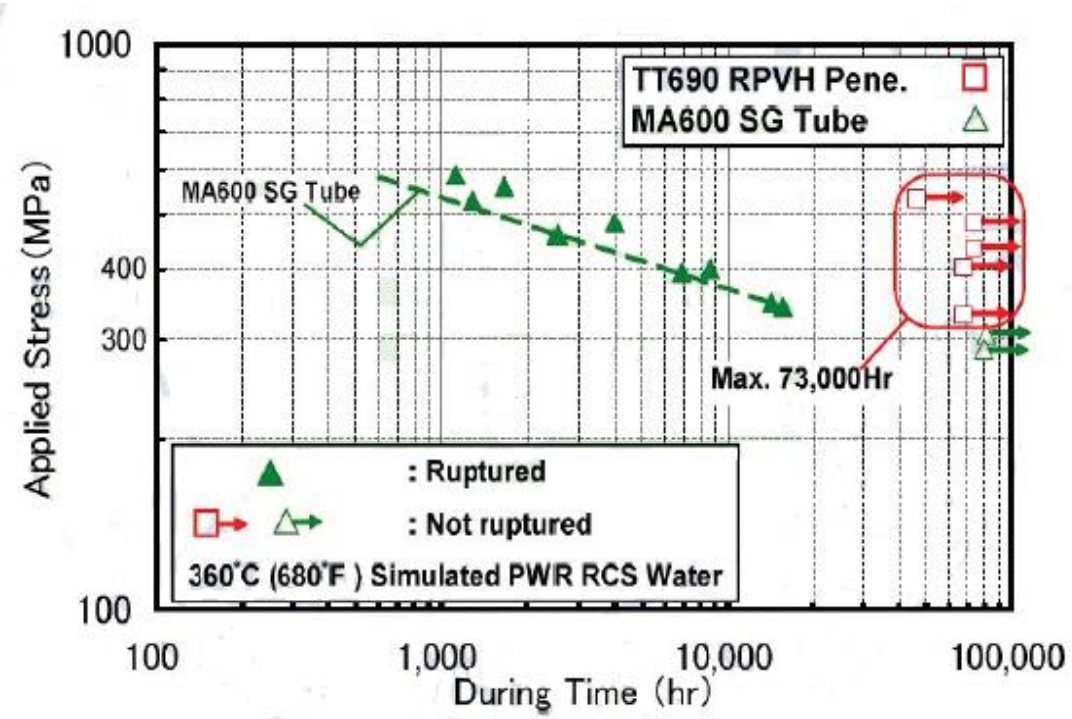


Fig. 2.2 Inconel 600/690 residual stress comparison in the same operation[33]

조직의 미세구조 측면에서 보면 Cr 함량이 많을수록 얇고 치밀한 표면 산화막이 형성되어 PWSCC에 대한 저항성이 증가하고 고온에서 부식 저항성도 높아진다. 인코넬 690은 PWSCC 저항성이 우수하면서 인코넬 600에 비하여 균열 성장속도가 수십분의 1에서 수백분의 1정도로 매우 느리다. 그리고 fig. 2.2와 같이 미국 NRC의 연구결과에서도 기계적인 특성을 고려하면 인코넬 600과 인코넬 690 재료를 동일한 운전상태에서 잔류응력을 비교한 결과 인코넬 600은 600MPa 작용 및 운전시간이 1,100시간에 도달되었을 경우 파단되며 인코넬 690의 경우는 300MPa와 500MPa 조건에서 최대 73,000 시간까지도 파단되지 않는다는 것이 확인되었다[35]. 이러한 이유로 원자력 산업계에서는 2000년 초반부터는 응력부식균열의 저항성이 인코넬 600보다 강한 인코넬 690 재질을 원전기기의 설비 재료로 사용하게 되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 용접 잔류응력 완화기술

용착금속이 냉각되면서 저온 상태의 체적으로 수축을 하려고 할 때 인접되어 있는 모재로부터 제한을 받아 수축이 자유롭지 못하게 된다. 이 때문에 용접부에는 응력이 남게 되고 이것을 잔류응력이라 한다. 아크용접 같은 용융 용접들은 접합부에 열의 집중과 국부적인 용융 및 응고로 인하여 열팽창 및 수축과 QW이 발생되면서 잔류응력으로 인한 변형은 필연적이다. 이러한 변형 및 잔류응력은 구조물 강도의 신뢰성을 떨어뜨리기 때문에 현재에 와서는 구조물의 건전성과 제품을 설계, 제작, 보수 관리하는데 고려하지 않으면 안 되는 중요한 품질관리 사항이다. 고 입열량의 단층용접보다 저 입열량의 다층 용접방법 선택 및 용접 후열처리를 통하여 용접 잔류응력을 저감할 수 있다. 잔류응력은 외부에서 가해진 하중을 제거해도 내부에 있는 응력으로 특히 용접 이음부에는 물체에 외력이 없어도 용접에 의한 국부가열로 인하여 용접부의 불균일한 온도분포와 용접 용탕(molten weld puddle)의 응고 및 수축이 발생된다. 수축응력 불균일로 마르텐사이트 상의 변태 및 전위로 인한 잔류응력 발생과 용접재와 인접 모재가 냉각하면서 수축을 하여 용접부에도 주위 금속에 의한 구속으로 잔류응력이 발생하게 된다. 이 잔류응력은 이음형상, 판두께, 모재의 크기, 용접입열, 외적구속, 용접순서 등의 인자들로 인하여 영향을 받게 되며 후판에서는 모재의 변형은 허용되지 않아서 큰 잔류응력이 남게 되고 이로 인하여 용접부가 갈라지는 사례가 있다. 잔류응력이 용접 구조물에 미치는 영향으로는 취성파괴 및 응력부식 발생과 기계부품에서는 사용 중 변형 그리고 박판 구조물에서는 국부 좌굴을 촉진한다. 용접 이음부는 잔류응력이 항상 존재하는 곳으로 때로는 재료의 항복점에 가까운 높은 값으로 연강에서 20~30kg/㎟ 이르는 것도 있다. 그런데 강구조물의 허용응력은 정하중에 대하여 10~14kg/㎟ 정도이고, 동하중에는 더욱 적고 잔류응력은 허용응력보다 훨씬 커서 용접이음과 용접구조물의 성능에 영향을 주는 중요한 문제가 된다. 이처럼 잔류응력은 용접 구조물의 건전성에 영향을 주며 크게 정적강도, 취성파괴, 피로강도, 부식, 다듬질 가공에 미치는 영향으로 나눌 수 있다. 정적강도에 미치는 영향으로는 연성이 풍부한 재료로 만들어진 용접이음 및 용접물이 정하중을 받아 파괴되기까지 얼마간의 QW이 일어나는 경우, 즉 항복점 잔류응력이 존재하여도 정적강도에는 별로 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 연강과 같은 연성재료의 용접이음이 저온에서 정하중을 받는 경우에 용접부에 노치가 존재하면 어느 온도 이하에서는 항복점 수분의 일정도 낮은

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

평균응력이 걸려도 취성파괴를 일으켜 균열이 전파된다. 용접부 주변에서는 항복점에 가까운 잔류응력이 존재하여 외부하중에 의한 응력이 가산되기만 해도 취성파괴가 발생할 가능성이 있다. 연강은 저온에서 연성이 상실되어 교량, 선박, 압력용기, 송급관, 저장탱크 등의 구조물이 동계의 저온 정하중 상태에서는 유리나 도자기 같이 취성파괴가 될 수 있다. 피로강도에 영향을 주는 인자로 잔류응력의 영향 여부는 아직까지는 확실한 결론이 나와 있지 않지만 연강과 같이 분명한 항복점을 갖는 재료에서의 잔류응력은 피로강도(fatigue strength)를 저하시키고, 반대로 압축잔류응력이 존재하고 있으면 피로강도를 향상시킨다. 부식에 미치는 영향으로는 재료에 응력이 존재하는 상태가 되면 재료의 부식 저항이 약화되면서 부식의 촉진이 쉬운데 이런 현상을 응력부식균열이 생긴다고 한다. 용접에 의하여 잔류응력이 존재하는 시험편을 부식환경 중에 노출시키면 균열이 발생하는 것을 알 수 있다. 금속재료를 현미경으로 관찰하면 부식을 받기 쉬운 부분은 침식이 되어 작은 노치가 된다. 응력부식이 생기는 데는 부식매질, 재질, 온도, 응력의 크기 및 유지시간 등이 크게 영향을 미친다. 응력부식균열의 대표적인 것들은 오스테나이트계 스테인리스강의 부식균열, 연강의 알칼리 취성, 고장력강의 응력부식균열, Al합금, Mg합금, Cu합금, 특히 황동이나 청동은 일반적으로 응력부식을 받기 쉽다. 잔류응력이 내재되어 있는 상태로 고온에서 수개월 이상 방치하면 소성변형 없이 취약한 균열이 발생하여 파괴되는 season crack이 나타난다. 잔류응력은 물체 내에서 자기 평형을 유지하고 있으므로 응력이 잔류하고 있는 물체의 일부를 절삭하면 전체의 균형이 무너져 변형이 생긴다. 따라서 용접 조립시 잔류응력이 있는 상태에서 가공하면 치수가 변할 염려가 있다. 용접변형을 용접 후에 교정하려면 많은 경비와 시간이 걸리므로 미리 그 발생을 줄이는 조치가 필요하다. 그것에는 구속력을 크게 하여 변형발생을 저지하는 것이 가장 효과적이지만 그것에 의해 잔류응력이 크게 되고 또 용접균열이 일어나기 쉽다. 변형을 적게 하기 위하여 필요한 방법은 용접 입열량을 가능한 적게, 용접 입열량이 한 군데에 집중하지 않도록 할 것, 용접속도를 빠르게 할 것, 처짐 변형의 방지에 주의할 것 등이다. 이처럼 용접 구조물의 건전성을 해치는 잔류응력 및 용접변형의 개선대책으로는 용착 금속량을 적게 하여 수축에 따른 변형량 및 잔류응력의 크기를 줄일 수 있다. 이와 같은 용착 금속량을 줄이기 위해서는 열에 집중을 가하면서 용접 홈의 각도를 가능한 작게 만들고 root gap을 최대한 좁혀 용접부 자체에서 발생하는 내부 구속(internal restraint)을 경감시키는 방법과 용착법과 용접순서를 적절하게 선정하는 방법 즉 비석법으로 용접하여 잔

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

류응력을 줄이거나 적당한 포지셔너 및 회전대 등을 이용하는 방법이 있다. 용접부에 전달되는 용접 열원은 단시간에 고온이 전달되는 관계로 열원 분포도상에서 보면 열원의 분포 곡선이 급경사를 형성하게 된다. 즉 급랭에 의한 용접부의 변화가 심해질 수 있는 가능성이 있는 것이다. 그래서 잔류응력이 용접부에 많이 생기게 되고 이것을 경감하기 위해서는 용접 이음부를 50~150℃ 정도로 예열을 한 다음 용접을 하면 온도 분포도에 경사가 완만해지면서 용접완료 후의 수축 변형량도 감소가 되어 구속응력도 전체적으로 줄어들게 열처리를 적용할 수 있다. 용접부가 상온에 도달하게 되면 용접부의 잔류응력은 항복점과 거의 같게 존재한다. 이와 같은 힘을 막아주기 위하여 구속을 풀어 주면 이 잔류응력은 일부 해방되면서 모재를 변화되게 하는데 이것이 용접변형이다. 이상과 같이 가열 후 금속의 변화를 보면 잔류응력과 변형의 관계를 파악할 수 있다. 즉 팽창과 수축의 정도는 가열된 면적의 크기에 정비례하고 구속된 상태의 팽창과 수축은 금속의 변형과 잔류응력을 발생되게 한다. 또한 구속된 상태의 수축은 금속이 그 장력에 견딜만한 연성이 없으면 파단된다. 산업계에서 적용되고 있는 각 잔류응력 완화기술에 대한 종류 및 원리는 다음과 같다.

가. 레이저 피닝

레이저 피닝은 레이저를 이용하여 배관의 내면에 압축 잔류응력을 형성시키는 방법으로 shot peening에 비하여 최대 10배 깊이까지로 압축 잔류응력을 생성할 수 있는 방법으로 보고되고 있다. 기존의 잔류응력 제거 방법 중에서 숏 피닝의 경우는 대상물의 표면 및 예리한 부분에 손상을 주는 일이 있지만 레이져 피닝은 표면 손상 없이 원하는 부분에만 국부적으로 피닝 처리가 가능하다.

나. 워터젯 피닝

용접부 표면에 고속의 물방울 입자가 연속적으로 충돌하면서 국부적인 소성변형을 주면서 용접부의 표면층에 압축 잔류응력을 형성시켜 주는 방법이다.

다. 고주파 피닝

용접 잔류응력이 집중되어 있는 용접비드 toe부에 구형의 직경 2mm 피닝 핀을 표면에 초당 200~250회로 타격하여 잔류응력을 완화시키는 기술로 용접 천이구역의 예민화, 표면층의 소성가공, 1.5mm 깊이까지의 압축 잔류응력을 발생하며 인장 잔류응력 저감, 표면경도 저감, 노치효과의 저감, 용접부의 내 피로성(Fatigue Resistance)를 80~100% 증가, 외부 압축응력에 의한 표면 균열과 균열의 진행을

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

방지하는 방법으로 작업방법은 모재 표면으로부터 60~80° 유지하면서 움직이는 방향으로는 70~90° 유지하고 용접부를 따라 3~5mm/sec 속도로 움직이면서 용접비드 toe부를 초당 180~300회로 타격하면서 작업을 한다.

라. 초음파나노표면개질(UNSM)

초음파나노표면개질(UNSM: ultrasonic nano-crystal surface modification) 기술은 초음파 진동에너지를 사용하여 하중이 부가된 볼로 1초에 20,000번 이상 금속표면을 타격하는 방법인데, 탄성 및 소성을 발생시켜 표면층의 조직을 나노결정 조직으로 개질시키면서 아주 크고 깊은 압축응력을 형성시킨다.

마. 진동 응력완화

용접부에 편중한 잔류응력 완화를 위하여 진동에 의한 기계적인 에너지를 금속소재에 가함으로써 이러한 편중 현상을 비파괴적으로 해소시키는 효과를 얻을 수 있다. 외부로부터 유입된 에너지는 그 강도에 따라서 금속 소재에 각각의 다른 영향들을 미친다. 열 대신 가해진 진동의 적절한 강도의 에너지는 응력완화를 가능케 한다. 모든 금속 부품은 외부로부터 에너지를 받게 되면(직선 파형이 종모양의 곡선 파형으로 바뀌는 현상) 이에 대해 harmonic과 non-harmonic적인 응답을 한다. 이때 금속 부품의 변위 진폭은 유입된 진동주파수의 함수이다. 진동주파수가 증가되면서 금속은 내부의 충돌에 의해 유입된 에너지가 분산되어 낮은 진폭을 초래한다. 이렇게 금속에 의해 분산된 에너지의 양이 금속 내부의 응력완화를 위한 잠재력이 된다. 최적의 진동응력제거 주파수인 hamonic 곡선의 시작부와 그 부근 영역(sub-harmonic구역)의 주파수에 도달하게 되면 분산되는 에너지는 최대가 될 것이다. 이 sub-harmonic 범위를 벗어나게 되면 금속 부품은 유입된 에너지를 분산시키지 않고, 격렬한 반응(더 높은 진폭)으로 응답하는데, 이는 흔히 볼 수 있는 떨림과 큰 소음을 내는 현상이 발생된다. Harmonic 범위를 넘어선 범위에서는 금속은 유입된 에너지를 분산시키는 능력이 다시 회복되며 낮은 진폭을 유발시킨다. 만일 금속이 열에 의해 유래된 응력을 가지고 있다면 harmonic 곡선은 응력이 없는 상태에서 나타내는 고유 주파수와 비교하여 다른 상을 보이게 될 것이다. 여기에 진동응력 이완처리를 하게 되면 초기 harmonic 곡선은 이동하게 되고, 금속의 고유 주파수인 새로운 위치에서 안정화될 것이다. 즉, sub-harmonic vibration 응력 제거는 금속부분에 존재하는 harmonic 주파수를 측정하고, 이 harmonic 주파수 이하의 특정 주파수(sub-harmonic)로 소재를 진동시켜 응력제거가 진행될 수 있도록 한

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

것이다. 이러한 기술은 미국의 NASA, U.S. department of energy 및 california university 등에서 자체적으로 성능 시험을 거쳐 사용되어 왔으며, 이미 상업화 되어 많은 업체에서 제작되어 시중에 판매중인 제품도 여러 가지이다. 주로 사용되어지는 곳은 용접 및 기계가공 분야이며, 특히 die 가공 및 생산업체에서는 필수적으로 사용되고 있다. 장비의 기본 작동은 먼저 소재에 진동을 가하여 소재가 가진 고유 harmonic 주파수를 찾아내고 이에 대해 컴퓨터에 의한 자동 계산으로 찾아낸 sub-harmonic 주파수로 다시 소재에 진동을 가함으로써 잔류응력을 제거하는 공정으로 이루어진다. 일반적으로 처리시간은 약 5분 이내 정도이며 이는 열처리에 비해 많은 시간과 경비절감이 가능하고 처리 제품의 이동이나 대기가 필요 없게 된다. C. bouhelier 등[39]은 잔류응력 제거를 위해 사용된 방법들의 효과를 비교하기 위해 용접된 감속 기어박스 casing(1200kg) 2개를 이용하여 열 및 진동에 의한 잔류응력 제거 처리를 동시에 실시하여 비교하였다. 그 결과를 x-선 응력 측정기로 조사한 결과 열에 의한 경우 약 70~100%의 잔류 응력 감소 효과를 얻은 반면에 진동에 의한 기계적인 방법으로는 45~100%의 인장응력에 대한 제거 효과가 있었다고 보고하고 있다. 한편 후지인 경우 압축응력에 대해서는 단지 0~45%만이 응력 제거 효과가 있었다고 한다. 중국의 Liu, G.K[40]는 중량물에 대한 진동응력제거에 관한 연구결과 약 75%의 응력제거 효과를 보았다고 하였으며, Cr-Ni강에 대한 static과 35hz 및 10hz의 불균일 cyclic loading을 가하였을 때에 대한 vlasenko, V. L.[58]의 연구에 의하면 작업 테크닉에 따라 응력제거 효과가 좌우된다고 하였다. 한편 내식성 martensitic Steel에 대한 온도와 처리 시간을 변화시키면서 열처리와 초음파 진동에 의한 응력제거 효과를 비교한 결과 오히려 후자가 더 효과적인 응력제거가 이루어졌다는 보고도 있다[41]. 폴란드에서 구조용 탄소강이나 내식강 등의 압력용기 제작시 진동에 의한 응력제거 처리를 한 결과 90%의 시간과 에너지 절감 및 고효율적인 응력제거를 이룰 수 있었다고 하고, 후열처리 없이도 사용중에 우수한 내구성을 얻을 수 있었다는 사례도 있다[46].

용접부에 진동 응력완화 기술을 적용 시 효과로는 다음과 같다.

(1) 용접에 의해 발생되는 열응력을 효과적으로 제거시킨다.

(2) 엔진, 펌프 등은 작은 응력의 반복적인 부하로 인해 피로 균열을 발생시킬 수 있는데 이들의 발생 및 전파되는 것을 방지시킬 수 있으며 특히 고속 추진 선박의 저판이나 경기용 차량의 고속 회전 시 재료가 받을 수 있는 피로를 감소시킨다.

(3) 진동은 용융 금속에 대한 미세 교반 효과를 줄 수 있으므로 용접동안 가해진

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

진동은 용접 효율을 증대시키고, 미충진 기공의 발생을 감소시킨다. 미세한 진동이 가해지는 상태에서 용접을 실시하게 되면 용접 금속이 접합부에 쉽게 침투되어 용접 pool에서의 기공 발생률을 저하시킨다.

(4) 밀링이나 선반 가공 또는 금형 가공 시 발생되는 열응력이나 잔류응력을 효과적으로 표면 손상 없이 제거할 수 있다.

(5) 정밀 구조물 조립 용접 시 구조물의 비틀림이 발생되며 이는 최종 단계의 제품의 결함을 곤란하게 하고 전체 구조물의 성능을 저하시킨다. 이를 방지하기 위해 용접 직후 계속 열처리하기는 곤란하여 전체 구조물을 후열처리한다. 하지만 시간 경과에 따른 구조물 비틀림 발생 방지는 어려워 진동 잔류응력 제거기술을 도입하면 용접 중에도 응력제거가 가능해진다.

(6) 용접 후 냉각 과정동안 발생된 열응력의 편중을 신속히 이완시킴으로써 발생될 수 있는 용접 균열을 방지할 수 있다. 즉 용접 재열 균열 등은 용접 후에 열영향부에 수소의 확산이나 불순원소의 편석 및 조대결정립 구역의 경화와 취약화에 따라 균열을 발생시키기도 하며 오스테나이트계 스테인레스강은 후열처리 동안에 열영향부가 재 가열되면서 475℃ 취성, 탄화물 석출 등으로 인한 균열 위험이 있다.

(7) 미세 진동으로 인한 기계 가공 절삭성을 향상시킨다.

(8) 잔류응력이 존재하는 부위가 어떤 부식 환경에 노출되면 잔류응력이 없는 경우보다 쉽게 파괴가 되는데 잔류응력 제거로 응력부식 파괴의 발생을 줄일 수 있다.

(9) 열처리 후의 금속 표면은 고온에 의한 산화로 제품 표면이 거칠고, 산화 스케일이 발생되며 재가공을 필요로 한다. 하지만 진동에 의한 응력제거는 이러한 표면 손상이 발생치 않는다. 잔류응력 완화장비(formula 62)를 사용한 진동 응력완화 기술은 기존의 자기 공명에 기초한 진동 응력완화 처리방법으로 피로강도의 손실 없이 치수 관리를 개선하고 항복강도를 높일 수 있는 기술로 진동을 통해 작업 대상물에 단시간 동안 낮은 주파수, 높은 진폭의 진동을 가하면 용접 부분의 잔류응력이 완화되는 원리를 이용한다.

바. PWHT

용접 후 PWHT는 600~700℃의 고온처리를 통하여 재료의 야금학적 특성들을 개선하고 크리프 특성을 통하여 잔류응력을 개선시키는 방법으로[48] 용접부와 용접부 인접 모재를 대상으로 하는 열처리며, 응력제거 열처리라고도 하며 용접부와

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그 주변의 모재를 재료의 a1 변태점 이하의 온도범위에서 일정하게 가열하면서 적정 온도에서 유지한 후 냉각하는 과정을 거친 다음 필연적으로 용접부에 존재하게 되는 잔류응력을 완화시킨다. 잔류응력을 완화하면 저 응력 파괴와 응력부식균열을 예방하면서 용접으로 인하여 발생된 응력을 제거하여 제품의 형상치수를 안정화한다. 하지만 PWHT는 재료의 종류 및 두께에 따라서 PWHT 온도와 유지시간이 달라지기 때문에 서로 다른 용접 PWHT 조건에 대한 검토가 필요하다. PWHT의 주 목적은 재질의 안정성 개선에 더 큰 목적이 있으며 부수적으로 잔류응력을 감소시키는 작업이다. 따라서 잔류응력의 제거 외에 수소 방출, 조직연화, 기계적 또는 금속학적 개선 등 여러 가지 목적을 가지고 PWHT를 실시하기 때문에 그 열처리 조건 설정은 복잡한 함수로 이루어진다. 따라서 순수한 잔류응력 제거만을 목적으로 실시하는 진동이나, 폭발, shot peening 등에 의한 잔류응력 제거 방법과 직접적으로 그 효과를 비교하기에는 무리가 있지만 PWHT를 할 수 없거나 곤란한 제품 또는 기계적 특성의 개선이 필요하지 않는 제품에 대해서는 잔류응력 제거를 위한 다른 방법들을 이용할 수 있다. 다만 열처리 후에 얻을 수 있는 복합적인 효과를 단순한 잔류응력 제거처리(진동, 폭발, peening)으로 완전히 대체하기는 어렵다. 용접 후열처리의 적용은 인코넬 600 용접 금속의 PWSCC 저항성 증가에 긍정적인 영향을 미친다고 알려져 있다. 그 원인은 입계 탄화물의 생성과 잔류응력 감소에 의한 것으로 판단되고 있다. 후열처리는 용접부 표면에 분포하는 잔류응력을 저감하고 입계에 탄화물을 석출시켜 PWSCC 생성에 저항성을 증가시킨다.

사. IHSI

배관 외면부에 고주파를 전달하면서 내, 외면의 온도 구배를 통하여 배관 내면에 압축응력이 잔류하도록 하는 방법으로[51] 균열의 size가 작을 때는 효과적이나 깊은 균열의 경우는 균열에 끝단이 인장 잔류응력 영역구간에 속하게 되어 균열의 성장을 촉진시킬 수 있는 위험이 있다[63].

아. 정수압 테스트

용접으로 제작된 제품에 설계치 압력의 1.25 배를 가하여 잔류응력 및 기계하중의 상호작용에 의한 잔류응력을 완화하는 방법으로[14] 원자력발전소의 1차측 배관의 경우에는 보통 두께비(i.d의 반지름/공칭 두께)가 6 이하로서 정수압 실험을 할 때 1차 응력이 그다지 크지 않고 잔류응력을 완화시키는데 극히 작다고 본다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

자. LPB

잔류응력을 제거하고자 하는 대상물 표면에 베어링 및 강철 구슬로 된 장비를 활용하여 압축 하중을 부가하면서 잔류응력을 저감하는 방법으로 표면에 구슬을 이용하여 압축 하중을 부가하여 굴려줌으로써 용접부 표면에 QW이 발생되게 하여 압축응력을 형성시키며 기계적으로 용접부에 압축 잔류응력을 가해주는 MSIP, pipe lock과 방법이 비슷하다.

차. 인레이/온레이 용접

부식의 환경에서 저항성이 높은 용접재료를 사용하여 부식을 방지하는 방법인 인레이 및 온레이 용접은 용접재료와 용접방법에 개선을 통한 부식방지 용접기술이다. 인레이 용접은 부식 발생가능성이 있는 용접구간에 일부 영역을 기계 가공 후 부식 저항성이 높은 용접재료를 사용하여 용접을 하는 기법이고 온레이 용접은 용접부 표면 바로 윗부분에 부식 저항성이 높은 용접재료로 용접하는 방법이다.

카. 극저온 이산화탄소 냉각

극저온 이산화탄소 냉각방법은 용접작업 완료 직후 극저온 이산화탄소를 용접부 표면에 접촉하게 하여 급속 냉각을 실시하는 것으로 용접 구조물에 영향을 미치는 열을 감소하는 방법으로 이 방법은 항복 현상과 영구적 소성변형이 일어나는 구역의 범위를 좁히는 결과를 가져오며 fillet 용접부에 극저온 이산화탄소 냉각을 했을 경우에는 빠른 냉각 시간으로 인하여 급격한 열 경사도의 특징이 있다.

타. 개량된 용접 와이어 사용

용접이 완료된 후 용접부가 빠른 속도로 냉각하는 중에 용접부에서 마르텐사이트 변태가 시작하는 온도는 용접부 변형에 영향을 미치면서 결국 치수불량을 초래하게 된다. 변태 온도가 높으면 용접부의 변태가 주변 온도에 도달하기 이전에 이미 완료되어 마르텐사이트상의 열 수축에 의한 인장응력의 증가를 가져오게 된다. 그리고 변태 온도가 너무 낮게 되면 상온에 용접부 변태가 충분하게 되지 못하여 파괴 인성이 나빠지는 결과가 나온다. 일반적으로 상변태 온도가 200~250℃일 경우에는 인장 잔류응력에 많은 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 온도에 따른 금속의 변태 및 변형의 속성을 이용하여 용접부에 잔류응력을 완화하는 방법은 용접봉을 구성한 합금이 상온에서 완전히 냉각이 가능한 상태에서 마르텐사이트 변태 온도를 갖게 되도록 구성 합금에 있어서 재설계가 되어져야 한다. 관련 연구 결과 [12]에서 용접 와이어에서 잔류응력 완화능력을 확인하는 SATOH 테스트에서 개

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

발된 용접 와이어(series b, camalloy)가 기존의 와이어(ok 75.78, 308lsi)와 비교한 결과 잔류응력 완화 효과가 있음이 확인되었다.

파. Scanning of a defocused beam 방법

구조물 용접완료 후 용접부에 스트레스 완화를 목적으로 자주 사용되는 풀림이나 LSND(low-stress-no-distortion) 방법은 단순한 형상에만 적용이 가능하여 작업 적용에 있어서 제한이 있었지만 scanning of a deforcused beam을 활용한 응력 완화기법은 아주 복잡한 구조물의 형상에 적용이 가능한 장점이 있다. Scanning of a deforcused beam을 사용하는 응력 완화 기법[53]은 용접선의 중심면 양쪽을 beam을 사용하여 재료를 가열하는 방법이다.

4. 용접 잔류응력 측정

최근 국내에서는 배관의 이종금속용접부에 대한 잔류응력 측정을 위해서 많은 연구가 수행되었다[2]. 용접부의 잔류응력을 측정하는 기존의 방법들은 비파괴적인 방법과 파괴적인 방법 이렇게 크게 둘로 나눌 수 있다. 비파괴적인 방법들로는 x-선 회절, 기판의 곡률측정, 중성자 회절, 자기적 방법, 초음파 속도 측정법 등이 있고 파괴적인 방법으로는 크게 홀 드릴링법과 절단법이 있으며 국부적인 영역에 잔류응력 평가는 x선 회절 시험, 홀 드릴링 시험, 계장화압입시험이 잔류응력 평가에 기존에 널리 사용되고 있으며 각 방법에 대한 원리는 다음과 같다.

가. 홀 드릴링 시험(hole drilling method)

마모입자를 포함하여 고속에 제트류를 발생하거나 기계적인 드릴링 작업이 가능한 장비를 활용하여 잔류응력 측정부분에 원형의 구멍을 형성하고 원형 홀과 동심원이 되도록 주변에 부착한 rosette형 스트레인 게이지를 사용하여 드릴링 작업으로 잔류응력 제거 후 표면에서 완화되는 변형률에 대하여 여러 방향에서 측정하고 수식을 이용하여 잔류응력의 존재가 예상되는 주방향(principal direction)과 주응력(principal stress)의 크기를 결정한다. 하지만 이 시험방법은 기계적인 다른 절단법과 같이 홀이 형성되면서 소성변형이 발생하는 점과 홀 주변에서 발생된 소성변형은 탄성적 잔류응력의 완화를 방해하고 근접한 스트레인 게이지에 추가적으로 변형을 발생시킬 수 있는 문제점이 있다. 이렇게 형성된 원형 홀은 rosette 스트레인 게이지가 있는 원과 동심원을 이루는 상태의 정도에 따라서 잔류응력 측정에 많은 영향을 끼치게 된다. 만약 홀의 중심이 이동되어 스트레인 게이지 중심에서 편심되

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

어 있으면 가장 근접한 스트레인 게이지에서 잔류응력 완화에 대한 변형률이 측정되는 반면에 가장 거리가 먼 스트레인 게이지에서는 실제 변형률보다는 낮은 변형률이 측정되는 문제점이 있다.

나. X선 회절 시험(X-ray diffraction method)

X-ray가 금속에 조사되면 bragg 조건에 속하는 특정 결정면에서는 회절피크가 발생하고 용접부에 잔류응력이 존재하면 격자상수의 변화에 따라서 결정면에서 수축 및 이완이 발생하여 X-ray에 의한 회절피크에 발생 위치와 폭이 달라진다. 잔류응력이 있을 때에는 발생한 회절피크와 무응력 상태에서 발생된 회절피크에서 면간거리 d와 d0를 결정하게 되면 변형률의 계산이 가능하여진다. 그러나 X-ray 회절법의 문제점으로는 검사체의 침투 깊이에 있어서 제한이 있다는 점과 검사할 제품의 재료에 있어서 그 결정성이 우수해야 한다는 제한성 및 배향성과 같은 미세 조직에 의해서도 영향을 받는 문제점으로 인하여 중성자 회절법이 개발이 되었지만 이것도 산란강도와 중성자 선원이 적은 문제점이 있다.

다. 계장화압입시험법(IIT: instrumented indentation technique)

산업계에서 기존에 사용되고 있는 잔류응력 평가 기법들인 hole drilling 및 X-ray는 크게 두 가지의 문제점을 가지고 있다. 첫째로는 비파괴적인 시험법들은 대부분 응력과 직접적인 연관관계가 있는 인자를 통하여 잔류응력을 평가하는 것이 아니라 다른 인자를 이용하고 이것을 응력 항으로 변환하여 잔류응력을 구한다. 따라서 변환과정 중에서 오차가 발생될 수 있는 여지가 많아져 정확도가 낮아지고 재료에 따라서는 적용상에 있어서 한계점을 갖게 된다. 둘째로는 응력과 직접 연관이 되어 있는 인자 즉 변형률을 통하여 잔류응력을 평가하는 방법들은 모두 파괴적인 시험법으로서 현장에 적용하는데 있어서 현실적으로 불가능하다. 앞으로 새로운 잔류응력 평가방법은 비파괴적으로 적용이 가능해야 하며 미세조직이나 외부 환경 인자들에 영향을 활용하여 물리적인 인자 도출을 통하여 연관되게 하는 것 보다 실제 금속재료의 직접적인 변형거동에서 용접 잔류응력을 평가하는 것이 보다 정확한 검사법이 되며 용접부와 같은 응력의 변화가 급격한 영역을 가지는 곳에 적용하기 위해서는 국부물성의 측정이 가능하여야 한다. 이와 같은 사항의 조건들을 만족하는 기계적 물성 평가법으로 계장화압입시험법이 각광받고 있으며 이 시험법은 변형곡선을 구하고 이 곡선을 분석하여 다양한 기계적 물성들을 측정하는 방법으로 발전이 되고 있다. 압입하중과 압입깊이를 연속적으로 측정하는 계장화압입시험 시 금속제품에 용접 후

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

존재하는 잔류응력에 따라 압입하중 및 변위곡선의 차이가 발생하며 압입시험을 할 때 최대 압입 깊이가 일정하도록 하면 인장 잔류응력 속에서는 응력이 존재하지 않은 경우에 비하여 작은 하중을 가해도 최대 압입 깊이에 도달할 수 있다. 하지만 반대로 압축 잔류응력 상태에서는 압입하중이 증가하게 된다. 압입하중 차는 잔류응력의 증가와 비례관계를 가지게 되며 분석을 통하여 잔류응력을 계산할 수가 있다. 그리고 계장화압입시험을 적용한 잔류응력 평가방법은 시편준비에 있어서 간단하고 비파괴적이며 이에 대한 장점으로는 현장의 적용성이 뛰어나서 국소부위의 평가에 유리하고 탄소성 변형 전반에 대한 명확한 정보를 얻을 수 있는 점과 재료의 종류 및 형상과 크기에 관계없이 잔류응력 측정이 가능하여 활용성이 크다. 계장화압입시험의 이론적 배경은 기하학적 형상의 압입자를 사용하여 시험할 대상의 소재 표면에 하중을 인가 및 제거하는 과정 중에서 하중 및 압입 깊이를 연속적으로 기록하면서 해석하여 검사할 소재에 기계적 물성을 측정하는 방법으로 계장화압입시험은 경도 및 탄성계수 측정을 포함하여 잔류 응력, 인장 물성, 파괴인성 등의 물성에 측정 도구로 활용되는 연구와 압력 유기 상변태, 항복 거동 등 소재에 변형 상태를 인가하는 도구로 사용하는 방향으로도 활용하고 있으며 계장화압입시험을 통하여 경도만 아니라 다른 물성에 대해서도 평가를 할 수 있다. 최근에 와서는 구형 압입자를 사용한 인장물성 평가를 하고 있으며 첨단 압입자는 기하학적인 자기유사성을 갖고 있어서 압입 깊이 증가에 따라 소성영역의 크기도 같이 커지지만 형태는 동일하다. 하지만 기하학적인 자기 유사성이 없는 구형 압입자는 압입 깊이에 따라서 검사할 소재와 접촉되는 접촉각이 연속적으로 변화되면서 압입자 하부에서 발생되는 응력장의 형태가 연속적인 변화를 하게 된다. 연속적으로 변화가 일어나는 응력장을 해석하여 각기 다른 대표 응력 및 대표 변형률을 정의할 수 있고 이를 통하여 얻어지는 대표 응력 및 대표 변형률 인장곡선을 바탕으로 하여 인장곡선 구성방정식을 제시함으로써 인장 유동 곡선을 모사할 수 있게 된다. 이와 같이 완전 소성영역에서의 응력장을 해석한 대표 응력 및 대표 변형률은 유동곡선 중에서 소성영역에 해당하는 값을 제시할 수 있고 초기의 선형적인 탄성부분은 계장화압입시험의 하중 제거 곡선을 통하여 얻을 수 있는 탄성계수를 활용하여 구할 수 있다. 재료의 기계적 물성을 측정하기 위해서는 시험할 재료에서 인장 시험편을 채취하여 인장시험을 수행하여 인장강도, 항복강도, 변형률 경화지수 등을 측정하는 게 일반적인 방법이다[27]. 하지만 시험할 재료의 특성상 채취가 곤란하거나 국부 물성이 급격하게 변화하는 경우는 기계적 물성 측정이 곤란하다. 이러한 한계를 극복하고자 기계적 물성 측정방법 중에 검사환경 및 방법에

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제한이 적은 계장화압입시험법이 산업계에서 많이 사용되고 있으며 선단이 뿔 형태의 압입자를 활용하여 하중에 대한 검사할 소재의 반응을 변위로 나타내어 역학적인 상태에 대하여 해석하는 계장화압입시험법의 장점은 시험편의 형상 및 치수에 대한 환경적인 제한이 없고 비파괴적이며 측정 장비의 이동이 가능하여 실험 절차가 매우 간단하다. 본 연구에서 잔류응력 완화기술 적용된 용접 시편들의 잔류응력 평가는 계장화압입시험법을 사용한다.

제2절 원자력발전소에 적용되는 용접

1. 원전기기 용접

용접기술은 원자력발전소에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 그 이유는 원자력 설비가 대부분 다양한 금속소재들을 사용하여 접합 및 제작하는 용접구조물이란 이유와 이런 용접으로 연결된 부분이 가장 취약하기 때문이다. 원자력발전소에서 사용되는 설비는 일반 산업플랜트 현장에서와 같이 여러 종류의 금속들을 사용하여 서로 용접으로 연결하여 원하는 기능을 안전하면서도 원하는 기간 동안 발휘할 수 있도록 설계되고 제작이 된다. 보통 용접부는 용접과정 중에서 물성에 대한 제어가 어려워서 모재에 비하여 취약한 특성이 있다. 용접 구조물은 설계 시 용접부가 모재보다는 그 이상의 물성을 갖도록 제작 관리를 한다. 원전 설비의 제작에 있어서 용접방법을 적용할 때 일반 산업플랜트의 제작방법과 유사하나 원전 설비와 그 설비의 운전조건이 갖는 특수성에 의하여 다음과 같은 다른 점들을 고려해야 한다. 원자력발전소에서 사용하는 설비들의 경우 핵연료 저장에 사용되는 설비로서 설비 손상으로 인한 방사선 누출을 사전에 방지하기 위하여 여러 가지 안전계통이 필요하다. 이런 이유로 일반 산업플랜트에 비해 원전의 설비들은 배관계통이 복잡하고 많은 이종용접부위를 가지게 된다. 그리고 효율성과 경제성 향상을 위하여 운전조건에 따라서 각 설비에 맞는 금속소재들이 사용되므로 소재의 종류가 서로 다른 소재들끼리 용접이 되는 경우도 발생하게 된다. 가압경수로(PWR)형 원자력발전소의 경우 저 합금 소재와 austenitic stainless steel(300계)의 이종금속 용접이 많이 적용되고 있다. 원전 설비에 사용되고 있는 압력용기들은 대용량의 발전과 방사성 차폐를 위하여 대부분 매우 크고 두꺼운 소재로 제작이 되고 압력용기에 용접되는 배관계통 또한 두꺼운 소재로 제작을 하며 이로 인하여 두꺼운 소

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

재를 경제적이면서도 용접부에 대한 물성의 신뢰가 확보될 수 있는 이런 용접방법의 적용이 필요하다. 원자로 압력용기는 운전 중에 중성자 조사로 인한 열화 현상이 발생하게 되며 그리하여 용접부와 모재는 중성자 조사로 인한 소재의 열화 정도를 지속적으로 감시해야 한다. 따라서 일반 산업플랜트의 제작과는 다르게 중성자 조사에 의한 영향을 견딜 수 있도록 즉 열화를 견딜 수 있는 용접기술이 적용되어야 한다. 원전이 운전되는 동안에 원자로에서 핵분열로 인하여 발생되는 열을 냉각시키는데 사용되는 냉각수에는 독성이 매우 강한 첨가물들을 사용하게 되므로 원자로와 용기 및 각종 배관계통에는 내 부식성이 강한 소재가 사용되며 모재는 소재의 초기 제작 단계에서부터 내 부식성을 향상시킨 소재를 개발하여 사용할 수 있으나 이종용접부의 경우에는 모재와 같이 동일한 내 부식성을 얻기는 어렵고 이런 용접부의 부식특성은 용접을 통하여 형성된 잔류응력 등에 의하여 더욱 나빠진다. 가동 중인 원전 설비는 중성자 조사로 인하여 높은 방사선 준위에 있고 오염된 냉각수 등으로 이종용접부에서 발생된 결함에 대한 보수방법이 산업플랜트의 보수방법과 비교해 볼 때 복잡하고 어렵다. 보통 산업설비의 경우에는 작업자가 용접부 근처에 접근하여 손상부위를 제거 후 보수용접이 수행가능 하나 원자력발전소의 설비는 높은 방사선으로 인하여 용접사가 설비 근처까지 접근하기 어려워 자동화 용접장치 및 작업에 있어서 원격제어가 필요하다. 이로 인하여 제작 단계에서부터 철저한 용접관리로 높은 품질조건이 만족되면서 용접부의 손상발생을 최대한 방지하도록 해야 한다. 용접부들은 운전과정 중에서 정하여진 절차에 따라 관리 및 유지되고 국내 원자력발전소에 사용되는 설비 제작에 필요한 용접은 기술기준인 ASME code section Ⅲ와 section Ⅸ에서 제시하는 규정을 따른다.

2. 원전기기 용접 프로세스

원자력 발전소에 주기기 설비들의 제작 및 보수 용접작업 시 적용된 공정으로는 두꺼운 소재의 용접 시 작업시간 연장으로 인한 용접의 경제성 및 용접부에 물성을 확보하기 위한 협개선 용접(NGW : narrow gap welding), 레이저빔 용접(LBW : laser beam welding), 이종금속용접부에서 발생되는 PWSCC를 예방하기 위한 오버레이 용접 시 적용되는 불활성 가스 텅스텐 아크용접(GTAW : gas tungsten arc welding) 등이 있다. 내로우 갭 용접은 30~200mm 정도의 두께가 두꺼운 용접은 개선 간격을 20mm 이내로 용접하고 두께가 200mm 이상 되는 경우에는 텅스

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

텐 전극봉이 들어가서 용접이 가능한 정도의 개선 간격으로 약 30mm 정도로 하여 용접을 한다. 용접부에 개선을 면적을 최소화하여 용접패스를 감소시키는 내로우 갭 용접은 보통 압력용기 및 보일러와 같은 극 후판 강재의 용접 기술로 발전되었으며 이 기술의 핵심은 후판용접의 고능률화와 저 입열화에 의한 용접 열영향부의 인성 확보와 적층되는 비드의 루트부에 용입 부족과 융합 불량 등의 용접결함이 발생하지 않도록 조치하는 것으로 groove 내부로 삽입시킬 수 있는 컴팩트한 용접토치의 설계, 2중 실드와 박스 등 특수한 가스 실드법 groove의 코너부를 확실하게 용융시켜 주는 아크유동 등이다. 대략 1985년에 확립된 소모 전극식 협개선 용접기술은 GTAW를 활용하여 기술개발이 활발하게 이루어졌으며 불활성보호가스를 이용하여 고품질의 용접 이음부를 생산할 수 있어 원자력과 같은 발전설비의 제작에 많이 사용되고 있다. 우승완 등[7]은 내로우 갭 용접기술을 이용하여 탄소강 보수용접 완료 후 후열처리 조건(620℃±20℃, 2hr 30min)를 적용하여 기계적 물성을 확인한 결과 인장강도는 감소하고 용접선 근처에서는 경도 값 차이가 명확하게 줄어들면서 충격 흡수에너지가 증가함을 확인하여 후열처리가 용접부 건전성에 있어서 좋은 영향을 미치는 것으로 확인이 되었다. 원자력 발전소 설비 중에서 스팀을 발생하는 원자로 용기 및 가압기와 같은 후육 관상 구조물에 적용이 되고 용접할 때 펄스전류 모드 조절로 작업을 하면 냉각 후에 변형을 감소시키는 효과가 있다[22]. 하지만 내로우갭 용접의 불균형은 용접전류의 상승, 높은 황의 함량, marangoni 전단응력에 의해 야기될 수 있으므로 주의가 필요하며 아래 부분에 용입 증가는 용접속도, 펄스인자(폭과 주기), 와이어 종류, 용접전극 각도 등에 다변화를 주어 용접부 형태를 개선해야 하는 문제가 있다. 또한 협개선 용접에서 용접 입열량을 높이면 용접금속 용착량 증가로 인한 용접 효율성을 높일 수는 있으나 용접부에 고온균열 발생으로 문제로 용접 효율에는 한계가 있고 용접조건을 저 입열량으로 설정하여 용접하면 열영향부의 인성은 향상시킬 수 있지만 반대로 용접 입열량이 너무 낮으면 열영향부 인성 감소가 발생할 수 있기에 내로우 갭 용접에 있어서 입열량 적용에 많은 검토가 필요하다. 협개선 용접은 다른 process보다 변형 방지를 위해 개발되어 groove의 angle이 작고 ESW나 SAW에 비해 heat input이 낮은 점 그리고 ESW나 SAW는 용접시 자세 제한이 아래 보기 자세로만 국한되나 NGW에서는 전자세 용접이 가능하여 용접자세에 대한 제한이 없다. 다음에 레이저빔 용접은 광 섬유빔 전송체제를 갖춘 고체상태의 레이저 사용으로 방사능환경에서 절단 용접 드릴링과 같은 재료 공정 적용에 극히 유용한 장비이며 특히 장비의 취급, 비

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

접촉성, 유동성, 장시간 수명의 툴, 많은 시간과 비용 절감이 되어 다른 용접방법에 비하여 매우 유리하여 이에 대한 적용분야가 원자력 반응로와 연료 사이클 내에 점차 증가되고 있다[45]. 레이저빔 용접 원리는 유도방사에 의한 광의 증폭기(LASER : light amplification by stimulated emission of radiation)로서 첫 자를 따서 LASER란 명칭을 사용한 것으로 기존에 진공관 방식과 특성이 매우 다른 증폭 발진방식으로 이것은 원자와 분자의 유도반사 현상을 이용해서 얻어지는 빛으로 아주 강한 에너지를 가지며 집속성이 대단히 강한 단색광선이다. 이것은 각 원자에서 나오는 빛의 위상들을 모아서 이들의 중첩작용을 이용하여 진폭을 증대하면서 평면파로 만들어 보통 전파와 같이 복사가 되게 한다. 그리고 이들의 레이저광은 coherent로서 먼 거리까지 레이저 광은 흐트러짐 없이 진행을 하게 된다. 레이저빔 용접은 진공이 필요치 않으며, 공기중, 진공중, 고압하, 불활성가스 중, 액체 중에서도 용접할 수 있고 광속을 굴절시키면 숨어있는 부재도 용접할 수 있다. Kim 등은[38] 원전 설비들의 인코넬 600 소재로 된 배관 부품들의 펄스 Nd-YAG 레이저를 이용한 용접은 기존의 용접방법인 가스텅스텐아크용접 공정과 비교하여 빠른 용접속도와 집중화된 입열량 및 냉각속도가 특징임을 강조하고 있다. 이 결과로 좁은 열영향부 낮은 잔류응력 및 냉각 시 미세한 탄화물 석출로 예민화를 감소시킬 수 있다. Nd-YAG 레이저 용접의 특징으로는 열에너지의 전달을 광섬유를 통하여 원격으로 용접부분에 공급할 수 있다는 장점이 있어 원전에 사용되는 설비들과 같이 유해한 환경에서 설비를 정비하는데 이상적이다[29]. 하지만 레이저 용접은 저 에너지 효율(약 30%)로 박판에 주로 사용하며 비교적 고 출력의 레이저가 필요하다. 이중에서 가장 큰 요인으로는 용접부에 조사가 되는 집광 면적은 절단 천공에 비해 조금 크며, 이에 따른 에너지 밀도가 낮기 때문이다. 레이저빔 용접장비 유지와 경제성 문제로 현장에 적용하는 데는 많은 어려움이 있다. 마지막으로 불활성 가스 텅스텐 아크용접은 불활성가스인 Ar, He 가스들을 shield gas로 사용하면서 용접 중 용접부가 대기로부터 보호를 받고 텅스텐 전극과 모재의 공간사이에서 발생되는 아크열을 이용하여 용접을 수행한다. 보수 작업 시 적용된 용접공정 사례 중에 원자력발전소 핵심설비 중 인코넬 600 용접재료가 사용된 노즐의 이종금속용접부에서 PWSCC에 의한 결함이 최근 국내외 원전에서 발견된 바 있고 이러한 PWSCC 민감 부위에 대한 예방 대책 중 하나로 오버레이 용접 방법이 있다[17]. 이 방법은 원자력 발전소의 이종금속용접부에 미국에서 처음으로 적용되면서 인코넬 600 용접재료를 사용한 이종금속용접부에서의 일차수 응력부식균열을 예방

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하기 위한 방법으로 사용되었다. 오버레이 용접은 용접부 외면부에 추가 용접을 하는 오버레이 용접은 용접재료 선정 시 부식 환경에 대한 저항성이 높은 내 부식성 재료를 사용하여 부식 및 균열을 예방하는 기술로서 용접 후 발생하는 수축변형으로 인하여 용접부 내면에 압축응력을 부가하면 설비의 오랜 사용으로 인한 부식발생 시 기존에 용접부가 손상되어도 추가 용접부에 의하여 부식이 방지되는 방법으로 BWR austenitic Stainless Steel 배관에서 발생하는 IGSCC 문제 해결을 위하여 1982년 미국 원전에 처음 적용하고 나서 장기 보수 방법 중에 하나로 오버레이 용접이 승인을 받았다[24]. PWR에는 1993년 처음으로 적용이 되었고 PWSCC 잠재가능성으로 인하여 앞으로 확대하여 적용하려는 추세에 있다. 균열의 성장 및 발생을 완화하는 효과가 있는 WOL의 장점은[47] 두께부분에 용접보강을 통하여 기계적 강성에 대한 물성치 보강과 PWSCC에 대한 민감도 낮은 인코넬 690 용접재료를 노즐 용접에 사용하여 노즐부 균열 발생시 PWSCC에 의한 균열의 발전에 대한 억제 효과 및 용접 내면에 압축 잔류응력을 주어서 균열 성장 및 발생을 억제한다. 원자력발전소에서 오버레이 용접이 주로 적용이 되는 곳은 배관 외벽으로 overlay multy 용접과정을 통하여 손상이 예상되는 부분에 압축응력을 발생시키도록 한다. 그리고 현장 오버레이 용접의 단점으로는 취약해진 용접부에 기계적 물성을 해소하기 위하여 후열처리를 수행해야 하나 현실에서는 용접 후열처리 적용이 불가능한 경우가 대부분이다. 더욱이 오버레이 용접으로 인하여 발생된 배관 내벽의 압축잔류응력은 후열처리를 통하여 제거될 수 있다. 취약한 열영향부의 조직만을 용접기술을 통하여 tempering 할 수 있는 기술이 요구되며 이 필요기술인 템퍼비드 용접은 저합금강 용접 후 PWHT 없이 용접비드의 적층방법과 입열량을 조절하여 용접부의 조직 중에서 열영향부의 미세조직에 템퍼링 효과를 부여하는 기술이다. ASME code section IX의 QW-290에는 보수 용접기술에 사용할 수 있는 템퍼비드 기술의 적용에 관한 내용이 규정되어 있다. PWHT를 면제하는 대신에 템퍼비드 용접기술을 적용하여 보수용접을 수행하고 용접성이 만족되면 PWHT를 하지 않아도 되는 면제 조항의 근거가 마련되었다. 이 같은 규정을 적용해서 원전의 관통부 및 배관의 인코넬 600 재료로 용접된 용접부의 PWSCC 손상을 예방하기 위한 기술로 사용이 되고 있다. 템퍼비드 용접은 fig. 2.3과 같이 여러 개의 비드 층을 모재에 적층하는 다층 비드 용접은 같은 용접 layer에서 용접비드들을 반복적으로 overlap 시켜 템퍼링 효과를 얻으며 또한 계속되는 비드 적층으로 위의 층에서 발생된 용접 입열량이 아래층에 용접비드를 통과하면서 열영향부의 취약한 미세조직에 전달

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하면서 템퍼링 효과를 주는 기술로서 후열처리를 대체할 수 있는 용접기술이다.

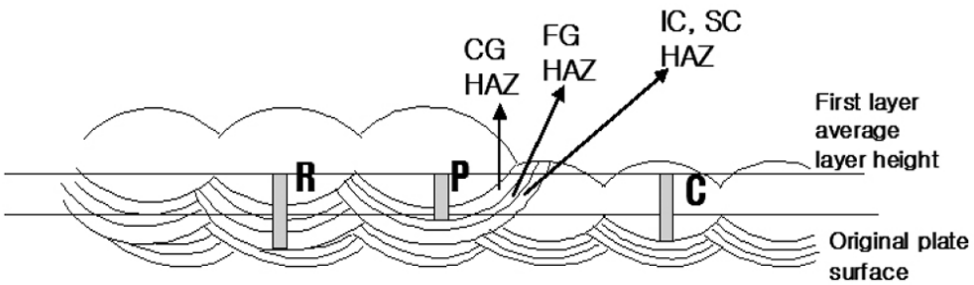


Fig. 2.3 Temporary bead welding heat affected part[10]

템퍼비드 용접 시 주의사항으로는 용접 층간 온도는 max 176℃이며 최소 3층 이상 템퍼비드 용접을 하면서 층별 최소 용접두께는 1/8"되어야 하며 템퍼비드 용접 방법 중에서 가장 많이 알려진 공정의 방법들은 다음과 같다[55].

(1) Consisitent layer temper bead technique

1990년대 EPRI에서 개발한 것으로 GTAW와 SMAW에 대하여 정밀한 용접 입열량 조절을 통하여 열영향부에 금속조직의 미세화를 가져오는 템퍼링 효과를 얻는 것으로 이 공정은 6개의 용접비드를 적층하여(layer refinement) 열영향부에 템퍼링 효과를 얻는다. 적층이 계속 될 때 용접 입열량을 점진적으로 증가시키는 방법으로 열영향부와 적층되는 비드층 및 주변에 템퍼링 효과를 제공하면서 미세조직의 상변화는 억제하면서 인성만을 증가시키기 위한 템퍼링 효과만을 제공한다.

(2) Controlled deposition method

ontario hydro와 tennessee 대학에서 개발된 템퍼비드 용접법으로 consisitent layer temper bead technique과 거의 유사하다. 이 방법은 제어가 잘된 세 개의 비드 층으로부터 템퍼링 효과를 얻는 것으로 비드와 비드 사이에는 50% overlap을 적용하며 이때 최대의 조직이 미세화된 결정립을 얻을 수 있는 것으로 확인되었다.

(3) Alternative EWI/TWI 방법

3개의 비드 층을 적층하여 열영향부에 tempering 효과를 부여한다. 첫째 비드 층은 80% 정도의 미세화, 두 번째 층은 20% 정도의 미세화, 그리고 3번째 비드 층은 열영향부에 템퍼링 효과를 주는 방법이다. 네 번째 비드 층부터는 열영향부에 tempering 효과를 주지 않는다. 이상과 같은 용접기법들은 다층 용접으로 인한 재

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가열 개념 속에서 해석이 되어질 수 있다. 각 용접 방법의 차이점으로는 용접 입열량의 결정요건인 용접속도와 전류 및 전압 등과 같은 변수의 조절이 다르다. 현장에서 수행되는 템퍼비드 공정은 복잡하고 용접사의 숙련된 기능을 필요로 한다. 더욱이 용접 중 비드 적층과정에 대하여 모니터링을 할 필요가 있고 가장 좋은 방법으로는 설비가 운전되고 있는 주위환경에 대하여 가장 신뢰성을 줄 수 있는 비드 적층 제어 방법이다. 오버레이 적용의 효과로는 구조보강, PWSCC에 민감하지 않는 재료로의 압력경계 및 누설 경계부 대체 그리고 일차수 환경과 접하는 PWSCC 민감 부위에서 균열생성 및 성장 가능성이 매우 희박한 상태의 잔류응력 분포 조성으로 인하여 해외에서는 인코넬 600 이종 금속용접부에 대해 다수의 오버레이 적용 사례가 있으며, 국내에서도 WEC 형 원전 1차측 설비의 노즐에 오버레이가 적용되면서 미국에서는 ASME code case n-740 요건을 적용한 오버레이 용접방법을 이용하여 이종금속용접부의 구조적 취약성을 보완해 왔다. 원자력발전소에서 운전에 사용되는 설비 중에는 방사능물질을 발생하면서 내부에 포함하는 1차 냉각재가 외부에 유출이 되지 않도록 하기 위하여 폐회로를 구성하는 전열관과 연결된 증기발생기의 튜브시트에 오버레이 용접이 적용된다. 튜브시트는 저합금강(SA508 Gr.3 Cl.1)의 소재를 사용하며 전열관은 Ni-Cr-Fe계 합금인 소재로 인코넬 600 재료를 활용하여 제작되면서 이것은 고온균열이 발생할 수 있는 가능성이 높은 이종금속 접합으로 구성이 되면서 저합금강에 전열관과 같은 소재인 니켈기 합금을 사용하면서 Co: 0.2% max., Fe: 15.0% max. Ni: res.의 조성비를 갖도록 오버레이 용접을 하며[62] 여기에 용접공정은 자동화된 고능률의 불활성 가스텅스텐 아크용접 적용으로 고품질의 용접부를 얻을 수 있다. 또한 불활성 가스 텅스텐 오버레이 용접공정은 원전 설비들의 튜브시트 주기기 노즐표면부 등에 적용된 적이 있다. 이 용접은 플럭스를 사용하지 않아서 불순물의 혼입은 최소화가 되면서 용접부의 입열량 제어가 용이하다. 또한 정밀한 overlay 용접을 필요로 하는 부위에 주로 적용되며, 용접 결함 발생에 민감한 인코넬 690 합금에는 가장 적절한 방법이다. 본 연구 실험에 적용하는 용접 프로세스는 자동 GTAW로 선정을 하였으며 이 오버레이 용접부에 대한 평가는 비파괴검사, 굽힘 시험, 용착금속의 화학 성분 분석, 경도, 미세조직 시험 등을 통하여 용접부에 대한 건전성을 검증한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3장 용접설계 및 시험방법

제1절 용접 시험편 제작

1. 모재 및 용접재료

본 실험에서 사용된 강재는 원자력발전소에 주기기로 사용 중인 저합금강 SA508 Gr.3 Cl.1와 인코넬 690으로 시험용 용접시편을 준비하였으며 제작 사양에 대한 내용은 table 3.1과 같다.

Table 3.1 Specification of welding specimen

No.	Specimen specification	Welding method
1	SA508 Gr.3 Cl.1 (1EA) 52t*205w*500l	U-groove welding(inconel 690 welding materials application) for welding condition verification.
2	SA508 Gr.3 Cl.1 (1EA) 40t*150w*150l	1 layer overlay welding inconel 690 welding materials
3	SA508 Gr.3 Cl.1 (1EA) 40t*150w*150l	3 layer overlay welding inconel 690 welding materials
4	SA508 Gr.3 Cl.1 (5EA) 40t*150w*150l Inconel 690 welding materials use	Overlay welding
5		Overlay welding+vibration
6		Overlay welding+peening
7		Overlay welding+vibration+peening
8		Overlay welding+PWHT

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

시편에 오버레이 용접 후 인장시험 및 용착금속에 대한 화학성분 검사 시 원소재인 SA508 Gr.3 Cl.1의 기계적 성질 및 화학성분은 기준이 되는 평가 자료로서 중요하다. 또한 강재의 건전성을 확인하고자 ASME Sec. Ⅱ 1998 ed을 적용하여 PT, UT 검사 후 합격된 물성 성적표를 확인하였다. 다음은 실험에 사용할 SA508 Gr.3 Cl.1 시편재료의 인장시험을 위하여 직경 12.5mm*200mm 시험편을 ASME code BPVC sec. Ⅱ part A SA370에 따라 시험 후 인장강도 및 항복강도를 ASTM spec과 비교하여 table 3.2와 같이 나타내었으며 또한 화학성분 시험을 위하여 40*40*40mm 시험편을 KS D 1652 : 2007 시험기준에 따라 금속성분분석기를 이용하여 금속에 arc를 주어 발생하는 발색파장으로 금속원소를 분석 후 ASTM spec과 비교하여 나타내었다.

Table 3.2 Specimen mechanical properties and chemical composition (unit : %)

Item	YS (Yield strength)			TS (Tensile strength)		EL (Elongation).(%)		
SA508 Gr.3 Cl.1 ASTM Spec	345~450 MPa			550~795 MPa		Min 18%		
SA508 Gr.3 Cl.1 test result	445 MPa			613 MPa		29%		
Item	C	P	Mn	S	Ni	Mo	V	Cr
SA508 Gr.3 Cl.1 ASTM Spec	≤0.25	≤0.025	≤1.5	≤0.025	≤1	≤0.6	≤0.05	≤0.25
SA508 Gr.3 Cl.1 test result	0.19	0.010	1.23	0.005	0.90	0.57	0.01	0.16

고온 환경에서 내부식성과 우수한 기계적 특성 요구 시 사용되는 Ni계 합금인 인코넬 690은 Ni을 주체로 한 내열 합금으로 본 실험에서는 SA508 Gr.3 Cl.1 에 U-groove 용접이 되는 인코넬 690 강재의 기계적 특성 및 화학성분 분석 후 ASTM spec과 비교하여 table 3.3과 같이 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.3 Inconel 690 mechanical properties and chemical composition (unit : %)

Item	YS (Yield strength)			TS (Tensile strength)			EL (Elongation).(%)	
Inconel 690 ASTM Spec	≥241MPa			≥586MPa			≥30	
Inconel 690 test results	266MPa			630MPa			36.7	
Items	C	Si	Mn	S	Ni	Fe	Cu	Cr
Inconel 690 ASTM Spec	≤0.05	≤0.5	≤0.1	≤0.015	≤58.0	≤11.0	≤0.5	27.0-31.0
Inconel 690 test results	0.02	0.21	0.26	0.012	59	10.4	0.02	30.5

이종 금속 용접에서는 모재와는 화학성분이 다른 용접재료가 사용되기 때문에 이종금속에서의 조직, 용융선 경계의 특성 등에 대한 이해와 용접결함 및 사용 환경에 따른 이종 금속 용접부 특성변화에 대한 검토가 필요하다. 이런 검토를 위한 우선 조건으로 용접재료의 기계적 성질 및 화학성분 확인이 필요하다. 오버레이 용접 시 사용하는 인코넬 690 용접재료는 ASME code Sec. Ⅱ part C의 SFA-5.14 및 ASME code case 2142-2에 명시된 재료이며 용접부에 대하여 산화물 혼입 및 연성저하균열(DDC : ductility dip cracking) 같은 결함을 발생을 억제할 수 있는 특성을 가진 용가재로서 인코넬 오버레이 용접에 적용하였다. 용접재료 자동 GTAW용으로 K사의 인코넬 690(0.9ϕ)를 오버레이 용접에 사용하였고, 용접재료에 대한 기계적 성질 및 화학성분 분석 후 ASTM spec과 비교하여 table 3.4와 같이 나타내었다.

Table 3.4 Inconel 690 filler metal mechanical properties (unit: %)

Items	TS (Tensile strength)				EL (Elongation).(%)			
Inconel 690 filler metal ASTM Spec	≥586MPa				≤30			
Inconel 690 filler metal test results	600MPa				40			
Items	C	Mn	Fe	S	S	Cu	Ni	Al
Inconel 690 filler metal ASTM Spec	≤0.04	≤1	7-11	≤0.015	≤0.5	≤0.3	Rem	≤1.1
Inconel 690 filler metal test results	0.01	0.36	9.2	0.001	0.21	0.002	60	0.5

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 용접조건 및 시편제작

원자력발전소 이종금속용접부에 적용된 인코넬 600 용접재료는 원자력발전소 가동 중에 PWSCC 손상이 다수 발생하였고 이에 대한 대안으로 Cr성분을 증가시킨 인코넬 690의 용접재료를 사용하여 적용하고 있다. 인코넬 690의 용접재료의 사용을 위해선 먼저 선행될 점이 사용할 용접재료를 모재에 용접 후 인장, 굽힘, 용착금속의 화학성분, 기계적 성질, 용접재료에 건전성 확인이다. 이런 용접부에 대한 건전성 확인 및 현장 용접을 위하여 필요한 것이 WPS/PQR 기술문서이다. 즉 WPS(welding procedure specification)와 PQR(procedure quatification record)의 주된 목적은 구조물의 제작 있어서 용접부가 사용하고자 하는 용도에 맞는 기계적 특성을 갖추고 있는가를 확인 및 결정하는 것으로 WPS는 용접사의 용접작업을 위한 지침에 제공을 목적으로 하고 PQR은 WPS를 자격부여 하는데 용접 중에 사용하였던 변수와 시험결과를 기록한다. PQ test를 수행하게 되는 용접사는 용접작업에 숙련된 작업자야 한다는 것이 전제 조건이며 PQ test는 용접사의 기능뿐만 아니라 용접부에 대한 기계적 성질을 확인하는데 있다. WPS는 용접 작업의 전반적인 이음매의 요구조건, 두께 용착 금속형태, 모재 재질, 용접자세, 용접의 전기적 특성 등을 기록한 문서이고 PQR은 시험편을 용접하는데 사용된 용접정보에 대한 기록서로 시편의 시험결과를 포함한다. 기록된 변수는 일반적으로 현장 용접에 사용할 실제 변수들 안에서 좁은 범위에 든다. 용접은 WPS에 주어진 용접조건에 따라 용접이 이루어지며 주요 용접조건들은 용접전류(극성 및 세기), 용접전압, 용접속도, 예열온도, 패스 간 온도, 보호가스의 종류, 후열처리 온도 및 유지시간, 전극의 크기와 개수, 용접 와이어 돌출 길이, 용가재 종류, 용접비드 쌓기 순서, 용접자세 등이 있으며 이 값들은 소재, 용접방법, 이음 종류 및 형태, 용접자세 등에 따라 각각 다르다. overlay 용접에서 템퍼비드 용접기술은 저합금강에 대하여 용접 PWHT의 공정이 필요 없이 용접비드의 적층순서와 입열량을 조절을 통하여 열영향부의 조직에 템퍼링 효과를 부여하는 유용한 기술이다. 열영향부의 취약한 조직인 조대화된 마르텐사이트조직은 다층용접 중에 계속 적층되는 비드들의 재가열 효과에 의해 템퍼링 된다. 용접으로 인한 재가열 효과는 비드 층간의 총 입열량비, 용접속도, 예열온도, 비드높이, 용접재료 등에 의해 최적 조건으로 결정된다. PQT 시편 제작 수행 시 용접 전 예열 및 패스간 온도 관리가 중요한 이유는 저합금강 용접부에 용접 입열로 인한 빠른 시간에 가열 및 냉각이 이루어지고 이런 현상으

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

로 인하여 열영향부는 미세조직 변화, 용접변형, 용접응력이 발생하게 된다. 열영향부에서의 조직은 통상 급격한 냉각에 의하여 경화조직이 나타나기 쉽고 이것을 예방하기 위하여 예열을 실시한다. 예열의 목적은 열영향부의 냉각속도를 느리게 하여 경화조직이 발생하는 것을 방지해 준다. 그리고 예열을 할 때에는 예열온도를 재질과 두께에 따라서 정해진 온도기준의 이하로 낮게 해서는 안 된다. 그러나 예열온도를 규정온도보다 필요 이상으로 높게 하여 작업을 할 경우에는 경제적인 손실과 열영향부의 강도 및 인성이 저하할 위험이 있기 때문에 적절한 관리가 필요하다. 예열과 패스간 온도는 모재의 화학조성뿐만 아니라 용접 입열량, 모재의 두께, 용착금속의 수소량 등에도 영향을 받는다. PQT를 위한 U-groove 시편 용접에 joint design은 fig. 3.1에 나타내었다.

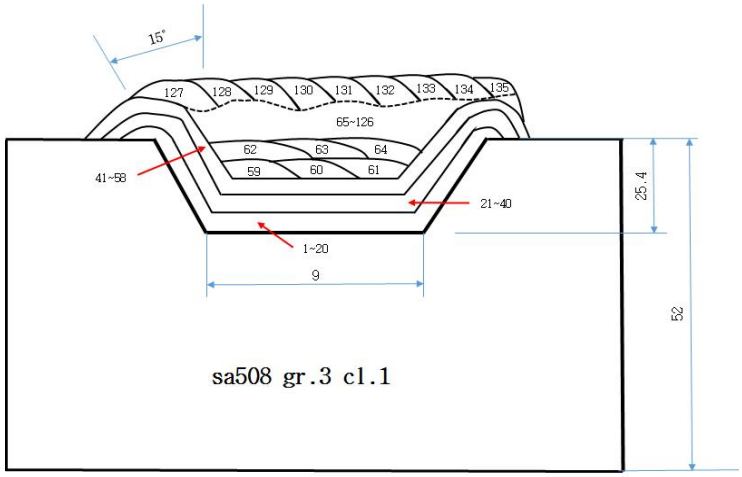


Fig. 3.1 U-groove welding joint design

U-groove 시편 용접은 인코넬 690 용접재료를 사용하고 용접방법은 자동 GTAW 프로세스를 선택하였다. 용착금속의 비드 겹침 구성은 135pass로 용접을 하여 시편을 제작한다. 인코넬 690 용접재료의 와이어 직경은 0.9mm를 사용하며 용접기 전원 특성은 DCSP(direct current straight polarity) 특성을 선택하여 용접한다. 용접조건은 1pass에서 20pass까지는 175(ampere), 11(volt), 10(cm/min), max. heat input(11.5 kJ/cm)로 하고 21pass에서 135pass까지는 175(ampere), 11(volt), 9(cm/min), max. heat input(12.8kJ/cm)로 용접조건을 설정한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

고온균열과 같은 미세한 균열이나 표면부 산화, 불순물 혼입, 기공 등의 결함에 유의하여 작업하였다. 용접 입열량은 변수 선정에 중요한 요소로서 용접부에 용접 길이당 부가되는 열량을 의미하고 자동 가스텅스텐아크용접의 경우 용가재를 별도로 공급하므로 같은 입열량이라도 용가재 공급량에 따라서 용접 입열량이 다르게 나타난다. 이런 점을 고려하여 전력률(power ratio)과 에너지밀도(energy density) 개념이 도입되었고 전력률은 단위 길이당 공급되는 용가재에 투입되는 전력량으로서 와이어 송급량을 증가시키면 낮아진다. 전력률이 낮으면 용접시 희석률은 줄어들지만 용입 부족 같은 결함이 발생할 확률은 높아진다. 용가재 단위 부피당 사용하는 에너지인 에너지 밀도는 그 수치가 커지면 가열에너지가 증대함을 의미한다. 이러한 특성을 반영하여 용접속도를 설정하고 패스 간 온도는 고온균열 및 재질의 열화를 피하기 위해 최대한 낮은 온도인 175℃ 이하로 용접하여 fig. 3.2와 같이 u-groove 시편용접을 완료하였다.

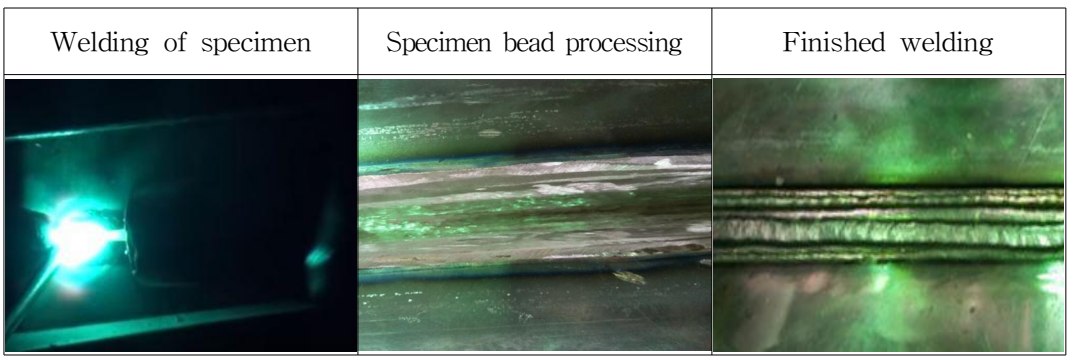


Fig. 3.2 U-groove specimen welding

이종금속용접부는 저합금강(SA508 Gr.3 Cl.1) 모재에 인코넬 690 용접재료로 버터링을 한 이후에 인코넬 690 용접을 한 부위다. 인코넬 690 용접재료로 용접 시 자주 발생하는 용접결함으로 응고균열이 있으며 용접결함 중에서 고온 균열의 일종인 연성저하균열(DCC)는 재결정화 온도 또는 약간 낮은 온도에서 용접재료 연성의 급격한 저하로 발생되는 용접 수축 변형률(weld shrinkage strain)을 수용하지 못할 때 결정립계를 따라 발생한다. 650~1200℃의 온도영역에서 연성 저하균열에 민감한 부분에 대한 대안을 가지고 용접조건을 찾아가는 것이 용접부에 대한 신뢰성을 확보하는데 중요 변수가 된다. 인코넬 690 용접은 결정립이 상당히 크며, 입계는 대부분 직선

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

형태를 나타내고 있다. 이러한 용접부의 입계에는 m23c6 형태의 미세한 탄화물이 존재하기 때문에 일반적으로 DDC에 민감한 용접부를 갖는다. 이러한 문제는 용접방향을 아래에서 위쪽 방향으로 진행하고 용접 입열량을 규정된 범위로 조절하며 다층용접 시 표면 산화물 제거 후 다음 층에 용접작업을 하는 청정작업 및 기타 용접절차 확립으로 이러한 문제를 완화해 나갈 수 있다.

3. 1층 용접 및 3층 용접 시험편 제작

시편에 템퍼비드 용접기술 적용 후 열영향부의 잔류응력 및 경도변화 관찰을 위해 fig. 3.3과 같이 시편을 용접하고 용접조건은 table 3.5에 나타내었다.

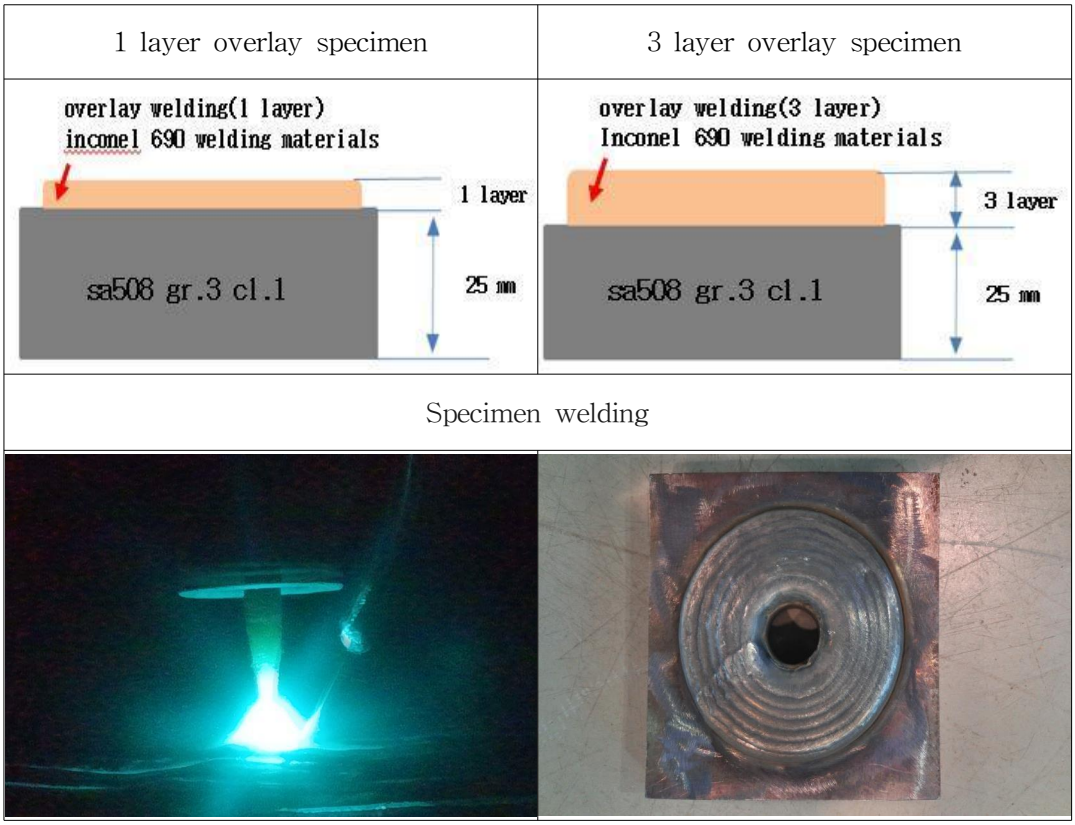


Fig. 3.3 1 layer, 3 layer specimen welding

저합금강 시편에 1층 및 3층 오버레이 용접 후 열영향부 경도를 비교하기 위하여 시편용접을 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.5 1 layer, 3 layer welding condition

1 layer overlay specimen							
Layer no	Process	Size(mm)	Type	Ampere(A)	Volt(V)	Speed (cm/min)	Max. heat input
1 layer	GTAW	0.9	DCSP	175	11	9	12.8kJ/cm
3 layer overlay specimen							
Layer no	Process	Size(mm)	Type	Ampere(A)	Volt(V)	Speed (cm/min)	Max. heat input
1-2 layer	GTAW	0.9	DCSP	175	11	9	12.8kJ/cm
3 layer	GTAW	0.9	DCSP	175	11	9	12.8kJ/cm

저합금강 시편에 인코넬 690 용접재료를 사용한 1 층 및 3 층 오버레이 용접은 u-groove 용접조건의 입열량인 max. 12.8kJ/cm 조건으로 용접을 하고 층간온도는 min. 175℃를 준수하면서 용접한다.

4. 잔류응력 완화기술 선정

가압경수로형(PWR : pressurized water reactor) 원전의 내부식성 및 용접성 향상을 위해 인코넬 600계열의 모재와 용접재료가 이용되어 왔다. 그러나 1980년대 PWR 원전의 기기 및 배관에 적용된 인코넬 600계열의 용접재료에서 일차수응력부식균열로 인하여 발생된 결함이 확인되면서 원자력발전소의 구조 건전성이 주요 현안으로 다루어지고 있으며 원자력발전소의 소형 관통노즐은 대부분 PWSCC 발생 가능성이 높은 인코넬 600 계열 모재와 용접재료로 제작되어 있다. PWSCC는 용접 잔류응력, 재료의 민감도, 수화학적 환경(water chemistry environment)의 3가지 조건 중에서 한 가지 조건이라도 동시에 만족하지 않으면 발생이 되지 않는다[25]. 이중에서 잔류응력은 용접 중에 구속 조건 및 국부적인 가열 및 냉각으로 인한 온도의 불균일한 구배로 인하여 발생하게 된다[3]. 용접 시 금속재료는 열을 받으면 팽창해야 하지만 구속되어 있는 경우에는 팽창을 하지 못하여 연신이 되지 않으면서 재료에는 압축응력이 걸리게 된다. 이와 같은 원리에서 보면 재료는 냉각

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

할 때 수축해야 하지만 양 끝단이 고정된 상태가 되어 있어서 인장응력이 잔류한다. 그래서 용접 후에는 용접부 주변에 인장 잔류응력이 존재하며 용접 변형 및 균열로 발전하게 된다. 이런 변형 및 균열을 예방하기 위하여 용접 후에는 인장 잔류응력의 제거가 요구되며 후열처리 시행을 통하여 잔류응력 제거를 하는 것이 원칙이다. 하지만 현장의 작업환경 여건이 상황에 따라서는 후열처리를 할 수 없는 주변 환경일 경우에는 물리적인 방법으로 인장 잔류응력을 제거해 줄 수 있는 방법이 압축응력을 형성시켜 주는 것이다. 이런 방법들로는 여러 가지가 기술들이 적용 가능하지만 실제 현장에의 접근 및 활용성을 고려하여 선택해야 한다. 본 연구에서는 용접시편에 적용할 잔류응력 완화 기술 선정을 위하여 현재 산업체에서 적용하는 잔류응력 완화기술을 분석하였다. 용접부 인장 잔류응력을 감소시키는 기술로는 오버레이 용접, 레이저 피닝, 워터젯 피닝, UNSM(ultrasonic nanocrystal surface modification)처리, 고주파 피닝(high frequency peening), 진동응력완화(vibration stress relaxation), PWHT(post weld heat treatment), MSIP(mechanical stress improvement process), pipe lock, IHSI(induction heating stress improvement), 정수압 실험(hydro-static proof test), LPB(low plasticity burning) 등이 있으며 부식 저항성이 높은 재료를 적용시키는 기술로는 인레이 및 온레이 용접이 있다. 본 연구에서는 용접부 잔류응력 완화 기술들에 대한 잔류응력 완화효과를 확인하기 위하여 원자력발전소의 협소한 작업환경에서도 쉽게 적용이 가능한 방법으로 오버레이 용접, 진동 적용, 피닝 적용, 진동 및 피닝 적용, 후열처리 적용 이렇게 5가지 잔류응력 완화기술을 선정하였다.

5. 잔류응력 완화기술 적용

원전 1차측 관련 설비의 수명연장을 위한 보수 용접 시 적용 가능한 최적의 잔류응력 완화기술 개발을 위하여 용접시편을 제작을 한다. 시편은 저합금강 모재에 인코넬 690 용접재료(0.9mm wire)로 용접을 하여 두께 약 15mm 육성 용접 후 용접 pad부에 J-groove 가공 및 인코넬 690소재의 노즐 삽입을 하였다. 690 노즐 용접은 인코넬 690 용접재료인 0.9 mm 와이어로 용접하여 시험편을 제작하고 용접의 단면 형상은 fig. 3.4와 같은 구조이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

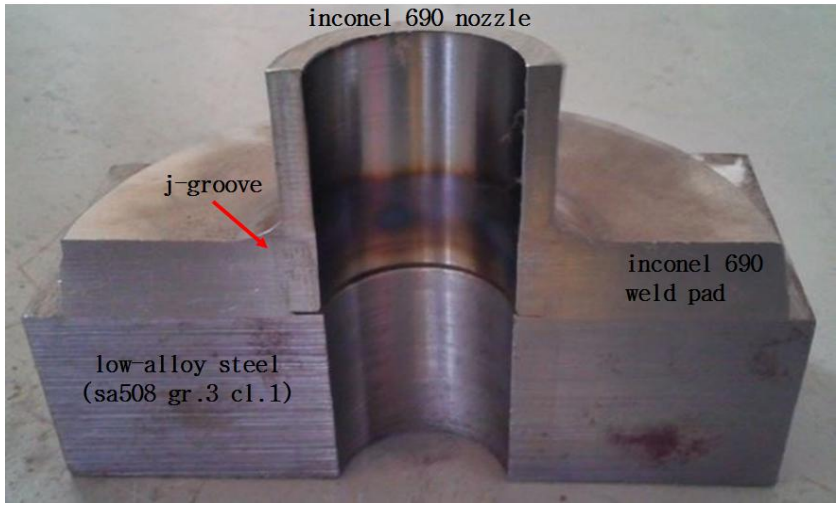


Fig. 3.4 Pad welding and inconel 690 nozzle J-groove welding

Table 3.6은 pad 용접 및 J-groove 용접조건을 나타낸 것으로 용접 입열량 설정은 3층 오버레이시편 용접에 적용한 Max. heat input 12.8kJ/cm로 하였고 인코넬 소재의 경우 용접 수행 시 층간온도를 높게 하여 용접하면 용착금속의 열화가 발생되기 쉬운 특성으로 각각의 층과 패스 용접을 할 때에는 층간온도가 175℃ 이상이 되지 않도록 용접을 한다.

Table 3.6 Pad welding and J-groove welding conditions

Specimens	Ampere (A)	Volt (V)	Speed (cm/min)	Interpass temp. (max. ℃)	Max. heat input (kj/cm)	Filler metal
Pad	175	11	9	175	12.8	Inconel 690 (0.9 mm)
J-groove	175	11	9	175	12.8	

잔류응력 완화조건에 따른 시편제작 사양을 table 3.7에 나타내었고 잔류응력 완화조건에 따라서 발생되는 잔류응력의 변화된 위치 및 양을 확인하기 위해 아래와 같이 시편을 제작한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.7 Manufacture of specimen for residual stress relaxation technology

Specimens	Residual stress relaxation conditions	Detail
1	Overlay welding	
2	Overlay welding+vibration	Formula 62(Use of equipment)
3	Overlay welding+peening	Weld toe peening
4	Overlay welding+vibration+peening	Apply vibration after finishing peening
5	Overlay welding+PWHT	Holding temperature and time 625℃ / 1 hour 30 minutes

용접부의 잔류응력 형성에 영향을 주는 주요 변수로는 용접부의 구조 및 형상과 용접 재료의 물성, 용접 속도, 용접방법 등이 있으며 이런 용접조건의 변화로 인하여 용접부의 특성이 변하게 된다. 용접부 특성에 크게 영향을 주는 변수는 ASME sec. ix에서는 다음과 같다.

(1) 용접 이음부의 형상(qw-402, joints)
(2) 모재 특성(qw-403, base metals)
(3) 용가재 특성(qw-404, filler metals)
(4) 용접 시 구조물의 자세(qw-405, position)
(5) 예열(qw-406, preheat)
(6) 용접 후열처리(qw-407, postweld heat treatment)
(7) 용접 보호 가스(qw-408, gas)
(8) arc 전류 특성(qw-409, electrical characteristic)
(9) 용접 bead 형상(qw-410, technique)

이와 같이 ASME code section Ⅸ에서 규정하는 용접 변수는 용접을 하는데 있어서 꼭 필요한 용접할 재료의 물성 요구치 와 용접 시작 전에 예열 및 용접완료 후열처리인 후열처리 조건 그리고 용접부 이음부에 대한 형상 등을 정의하고 있으며 이와 같은 용접변수들에 대하여 최적 용접조건을 선정한 후에 잔류응력 완화 기술을 적용하여 용접시편을 제작한 것에 대하여는 fig. 3.5에 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

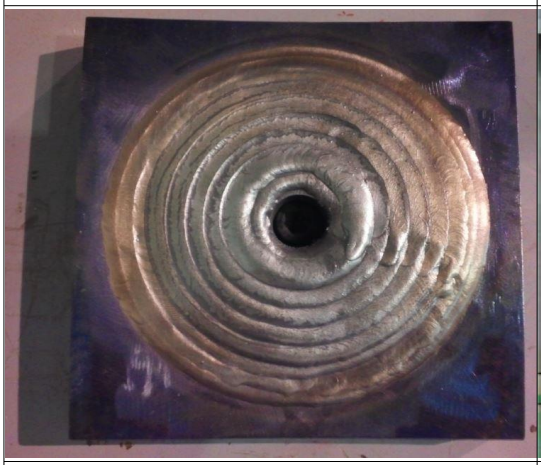
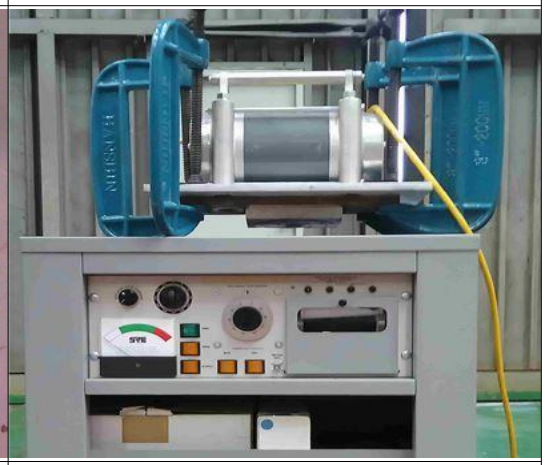
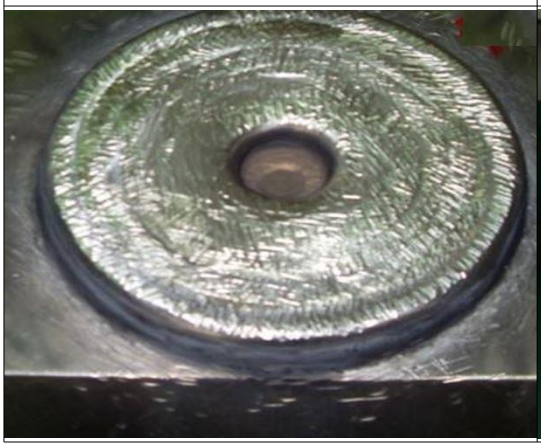
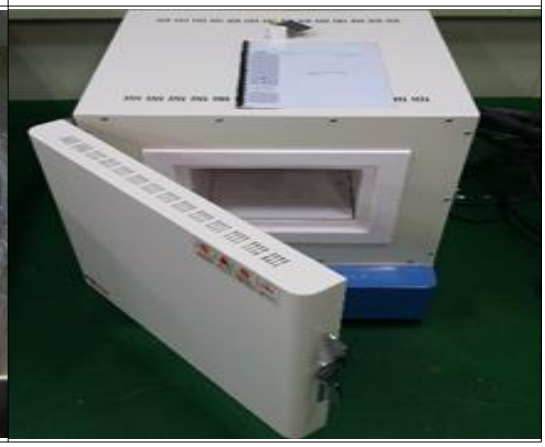
1. Overlay welding	2. Vibration after overlay welding
	
3. Peening after overlay welding	4. Heat treatment after overlay welding
	

Fig. 3.5 Manufacture of test specimen using residual stress relaxation technology

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 시험 방법

1. 용접이음부의 기계적 특성

용접조건 검증을 위하여 u-groove 시편 용접부 검사를 ASME Sec. Ⅸ를 기준으로 하고 시편 검사에 대한 세부사항은 table 3.8에 나타내었다.

Table 3.8 U-groove specimen examination

Specimen	Inspection contents			
	Tensile	Bending	Impact	Hardness
SA508 Gr. 3Cl.1 (U-groove)	2ea	4ea	Base Metal HAZ	Base metal Fusion line Surface

가. 인장시험

인장시험은 ASME code BPVC Sec. Ⅸ : 2013ed/QW-150 tension test에 따라서 시험을 하며 시편 가공은 ASME code Sec. Ⅸ QW-462.1(a)를 기준으로 fig. 3.6과 같이 시편을 가공한다.

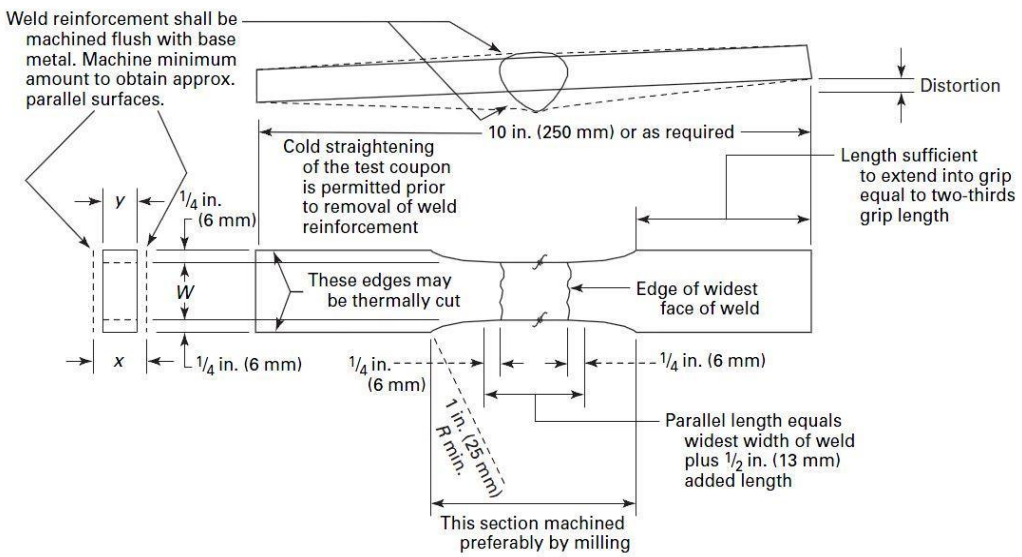


Fig. 3.6 Specimen processing for tensile test[18]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

인장시험에 합격 요건은 아래와 같다.

(1) 용접부의 인장강도는 최소한 모재의 인장강도 이상이어야 한다.

(2) 모재의 인장강도가 서로 다른 경우에는 작은 것보다는 커야 한다.

(3) 모재나 fusion line이 파손되었을 때 모재 인장강도의 95% 이상이 되어야 한다.

나. 굽힘 시험

굽힘 시험은 ASME code BPVC Sec. Ⅸ : 2013ed/QW-160 guide bend test에 따라서 하며 시편 가공은 ASME code Sec. Ⅸ QW-462.2, QW-462.3를 따라 fig. 3.7과 같이 시편 가공을 한다.

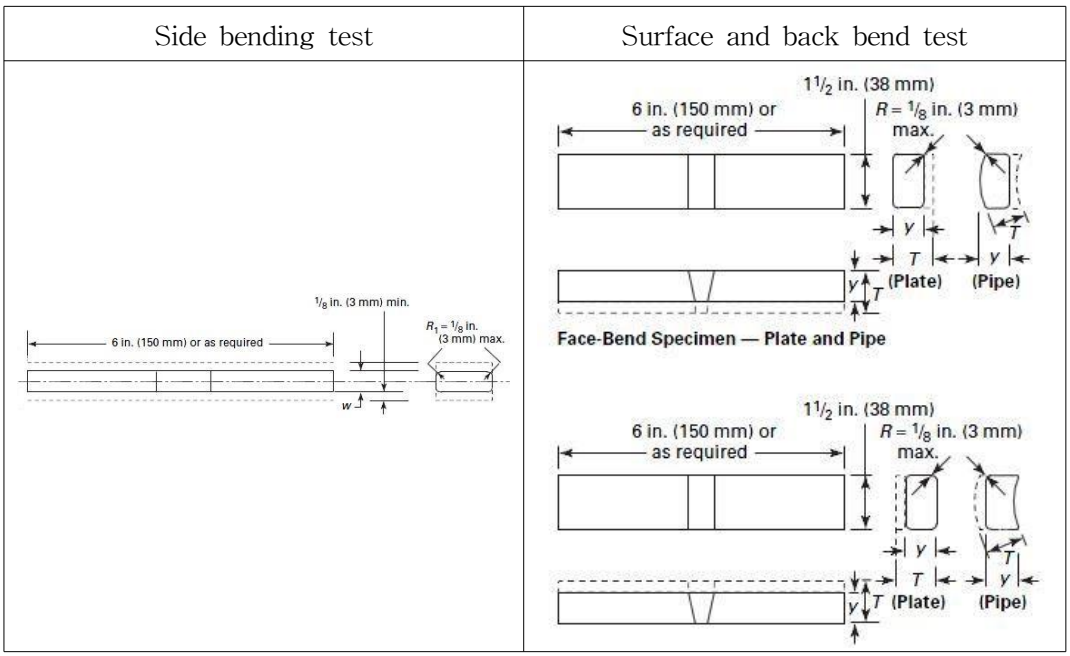


Fig. 3.7 Specimen processing for bend test[19]

굽힘 시험에 합격 요건은 아래와 같다.

(1) Transverse 용접 굽힘 시험의 용접부와 HAZ는 시험 후에 건전하고 용접부에 3.175 mm를 초과하는 open defects가 없어야 한다.

(2) 슬래그 혼입이나 내부결함의 원인인 crack이 coner에서 나타나지 않아야 한다.

(3) 오버레이 용접 시 1.6 mm를 초과하는 open defects가 없어야 하며 bond line에서는 3.175mm를 초과하는 open defects가 없어야 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 충격시험 방법

충격시험(Charpy impact test)의 목적은 재료에 동적하중이 부가될 때 저항력을 평가하는 것으로 재료의 특성 중에서 취성 및 인성이 중요한 판단 요소가 되며 이런 재료 자체의 특성을 파악하기 위한 목적으로 충격시험을 시행한다. 충격시험의 원리는 시험편에 충격을 가하면서 시험편이 파괴되는 과정 중에서 소모하는 전체 에너지를 측정하여 이것을 기준으로 하여 재료의 충격저항을 측정하는 원리로 측정 시 중요변수로는 상온에서 연성 파괴가 발생되는 재료라 하여도 특정 온도 이하에서 취성 파괴가 일어날 수 있으므로 시험 시 주변 온도에 대한 영향과 시편 노치에 의한 영향 그리고 가해지는 충격하중의 속도에 의한 영향 이렇게 크게 3가지의 중요변수 관리가 필요하다. 충격 시험편 제작은 용접된 시편을 Fig. 3.8과 같이 용접 중앙선을 기준으로 하여 용접 방향으로 55mm를 절단하고 모재 표면부에서 밑으로 용접비드를 2mm 정도 절삭가공 후 10x10x55mm 치수로 샤르피 V 노치 충격 시편을 준비하여 ASME BPVC Sec. Ⅸ QW-170 notch-toughness test에 따라서 충격시험을 한다.

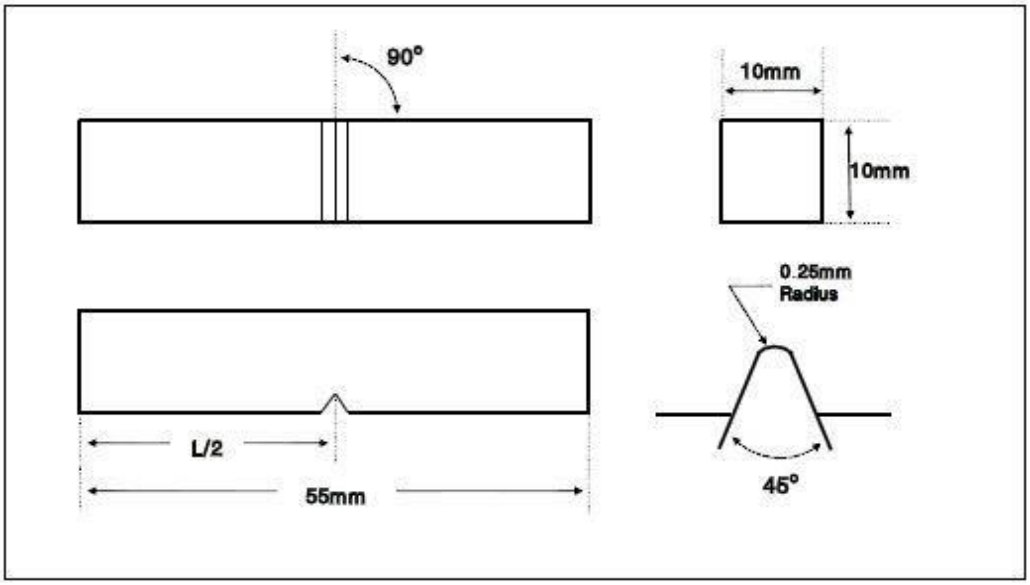


Fig. 3.8 Impact test specimen[9]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

라. overlay 시험편 용착금속 화학분석 방법

오버레이 용착금속 화학성분 시험은 ASME code Sec. Ⅸ QW-453에 따르며 시편 size는 ASME code Sec. Ⅸ QW-462.5(a) 따라 fig. 3.9와 같이 시편 가공한다.

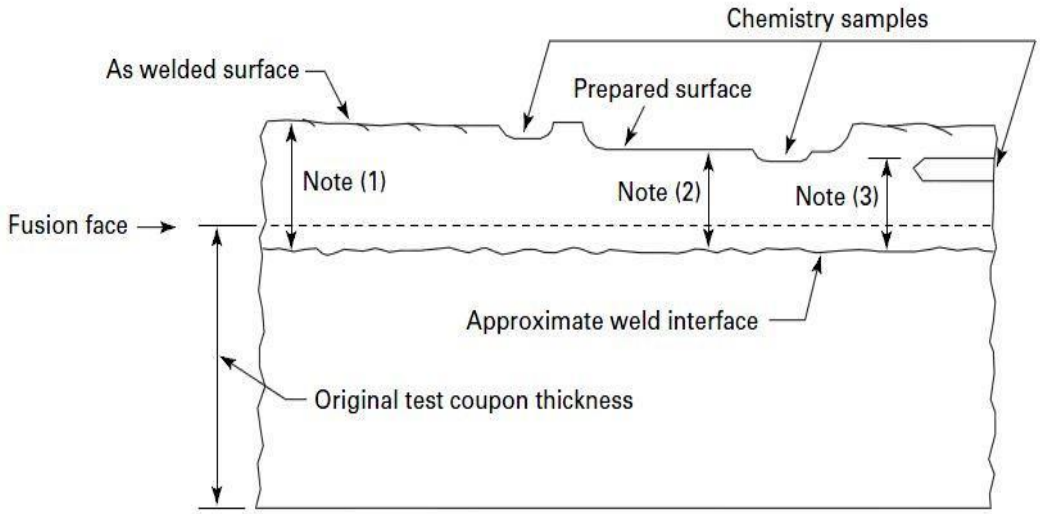


Fig. 3.9 Overlay weld specimen chemical analysis[21]

(1) Overlay 시험편의 화학분석 시험을 할 때 면 가공전인 용접된 상태의 표면에서 하게 되는 경우는 용접 경계선에서부터 가공하지 않은 용접된 상태의 표면까지의 거리는 최소한 ASME code 인정하는 육성 두께 이상으로 하고 화학분석시험은 가공하지 않은 상태로 용접 표면부에서 바로 실시되거나 가공하지 않은 용접된 상태의 표면에서부터 채취한 시험편에서 실시한다.\

(2) 화학분석 시험은 용접부 표면에서 수평구멍으로부터 채취한 시료에서 하게 되면 용접 경계부에서 수평구멍의 최상부까지의 거리는 최소한 ASME code 인정하는 육성 두께 이상으로 하고 화학분석시험은 시험편을 수평구멍에서 채취하여 실시되어야 한다.

(3) 화학시험에 합격 요건 용착금속 화학성분 시험 결과 ASME code section.Ⅱ part C에 요구 Spec.을 만족해야 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 경도시험

Fig. 3.10에는 1층, 3층 용접 시험편의 경도시험 위치를 나타내었으며 시편에 경도시험은 ASME Sec. Ⅸ를 기준으로 하여 weld metal, HAZ, base metal에서 경도시험을 한다.

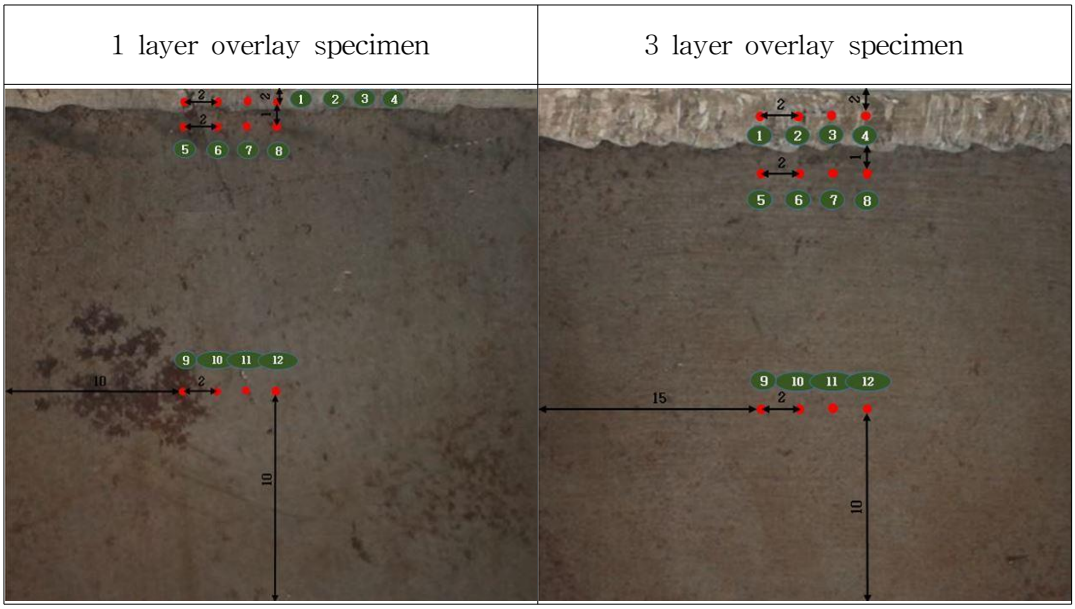


Fig. 3.10 1 layer, 3 layer specimen hardness test location

경도란 한 물체가 다른 물체와의 접촉 및 압축에 의하여 변형을 받았을 때 나타나는 저항의 크기로, 경도는 산업계에 사용되는 재료의 평가에 있어서 중요 요소 중 하나이며 재료가 가지고 있는 강도와 밀접한 관계가 있다. 경도 측정 방법의 종류에는 물체에 변형을 가하는 방법들에 따라 압입 경도시험, 긋기 경도시험, 반발 경도시험으로 분류되며 본 연구에서의 경도시험 방법은 ASTM e384-11e1에 따라서 비커스 경도측정기를 사용하여 압입자를 꼭지각 136°인 사각뿔 다이아몬드를 시험편에 시험하중을 설정하여 압입하고 시험하중을 제거한 다음에는 표면에 남아 있는 압입 자국의 대각선 길이를 측정하고 다음 식을 이용하여 비커스 경도(Hv)를 구한다[식 1].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$HV = \frac{0.1891 F}{d^2} \quad (\mathrm{N/mm^2}) \qquad \cdots\cdots [식\ 1]$$

여기서 Hv : 비커스 경도 (N/㎟)

F : 하중

d : 다이아몬드 압입자국의 대각선 길이(d_1과 d_2)의 산술 평균(㎜)

용접부 하부에서 상부로 1mm 간격에 1kg 하중으로 비커스 경도시험 수행.

Figure 3.11에는 잔류응력 완화기술이 적용된 시편의 용접부 경도 시험 위치를 나타내었으며 ASTM e384-11e 시험기준에 따라 weld metal, HAZ, base metal에 대하여 경도시험을 한다.

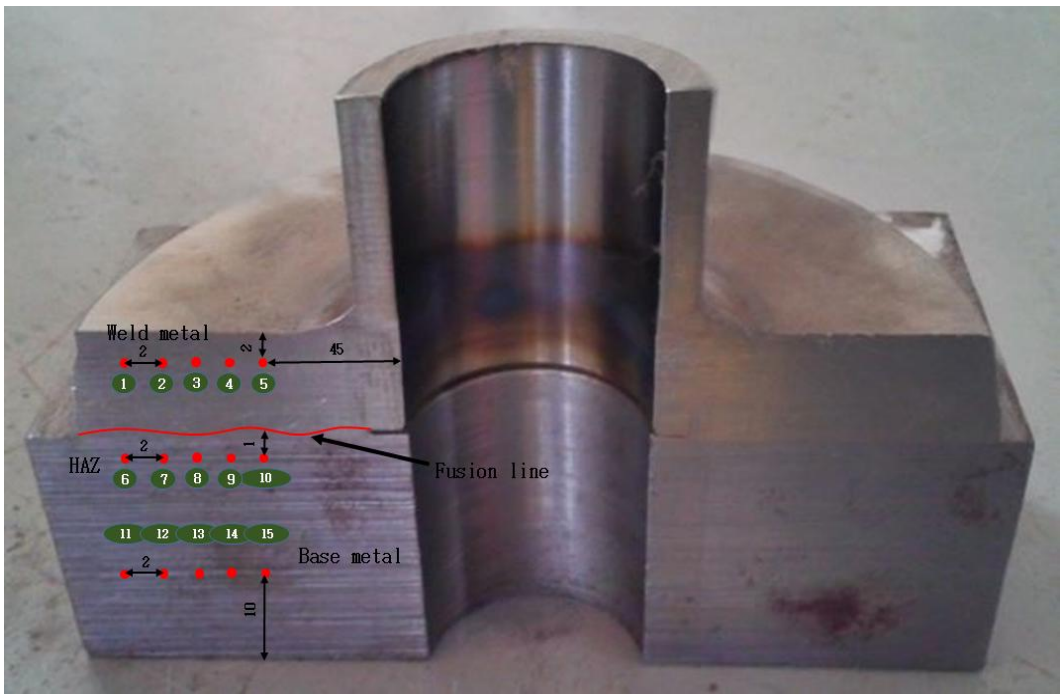


Fig. 3.11 Sample hardness and tissue test location

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

잔류응력 완화기술이 적용된 시편들에 경도시험을 하였다. weld metal의 경도측정은 용접비드 표면부에서 깊이 2mm에 위치한 지점에서 5곳에 대하여 2mm 간격을 주어 경도측정을 하고 fusion line에 경도측정은 base metal 방향으로 깊이 1mm 위치한 지점에서 5곳에 대하여 2mm 간격으로 경도측정 하였다. 그리고 base metal의 경도측정은 시편의 밑면에서 용착금속 방향으로 10mm 위치한 지점에서 5곳에 대하여 2mm 간격으로 경도측정을 한다.

3. 조직시험

1층, 3층 용접 시험편의 조직시험은 ASME Sec. Ⅸ와 ASTM e407-07e1 따라서 weld metal, HAZ, base metal 경도 및 미세조직을 다음과 같이 분석한다.

(1) Macro 시험방법은 ASME BPVC Sec. Ⅸ : 2013ed/QW-470 etching-process and reagents 따라서 하며 에칭액을 이용하여 6V 전압에서 1분간 전해 에칭 실시 후 base, HAZ, weld metal에서 용접부의 용입 상태, 개선형상, 수축공, 균열 등을 저배율로 관찰하여 용착금속 두께, 비드 폭을 측정한다.

(2) Micro 시험방법은 ASTM e407-07e1에 따라서 열영향부 조직 검사를 하여 용접 시 열영향에 의한 조직의 미세화 및 영역별 결정립 크기, 미세조직의 분포영역 등을 관찰한다.

4. 용접 잔류응력 시험

가. 용접부 잔류응력 측정 배경

용접으로 구성된 구조물의 용접부는 용접을 통하여 투입된 열에너지로 인하여 용융부 및 열영향부가 형성된다. 용접이 완료된 다음 후열처리를 하지 않을 경우에는 용융부 및 HAZ에서 조직은 모재와는 미세조직이 다르게 형성이 되어 재료에 있어서 기계적 물성(항복응력, 인장강도)가 모재에 비하여 다를 수 있고 용융부 및 열영향부에서는 용접에 의한 잔류응력도 발생한다. 이에 대한 구조물의 구조특성에 대한 해석 및 평가를 할 때는 구조재의 물성치가 구조물의 거동에 있어서 영향을 준다. 따라서 모재와 열영향부 및 용융부의 기계적 물성치가 서로 다른 용접 구조물인 경우는 구조물의 특성을 동일한 기계적 물성으로만 해석 및 평가한 구조 특성과는 좀 다르게 나타난다. 즉 모재만의 기계적 물성치를 기준으로만 하여 해석 평가한 것과는 다르게 되는 것이다. 즉 모재 열영향부 및 용융부에 대한 각각의 기

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

계적 물성치에 평가가 필요하게 된다. ASTM 규정에 따라 제작된 인장시편을 활용하여 재료의 기계적 물성치를 구하고자 할 때는 ASTM 절차에 따라서 인장시험을 하지만 인장시편 채취가 곤란한 환경에서 기계적 물성치를 비교적 용이하게 얻을 수 있는 방법으로 계장화압입시험법(IIT : instrumented indentation technique)을 사용할 수 있다.

나. 계장화압입시험 원리

Oliver-pharr 계장화압입시험 분석방법은 탄성 접촉의 한계성에도 불구하고, 현재까지 가장 일반적으로 활용되고 있으며 요즘에 계장화압입시험은 일반적으로 측정이 되는 경도 및 탄성계수 이외에도 인장 및 압축 물성, 파괴인성, 잔류응력 등의 물성에 대한 측정 도구로 활용되어진다. 계장화압입시험은 재료에 부가하여지는 압입하중에 따른 압입에 대한 깊이를 연속적으로 측정한 다음 압입 하중 및 변위곡선을 구하여 이것을 분석하여 대상이 되는 재료에 대하여 기계적 특성들을 평가 하는 기법으로 기존에 경도시험 방법과 유사한 점이 있지만 직접 압흔의 크기를 측정하지 않는 것과 기존의 경도 값 외에 유동특성, 탄성계수, 파괴인성, 잔류응력 등 재료 고유의 여러 가지 물성들을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그리고 최대 수백 마이크로미터 이내에 있는 미세 영역을 평가하여 용접부처럼 국부적 물성변화가 있는 재료에 대해서도 변화되는 양상들에 평가를 할 수 있고 시험하는 위치에는 미세한 흔적만 남아서 비파괴적인 시험법이기도 하다. 그리고 시험 준비를 위한 표준시편 채취가 불필요하여 설비가 운용중이거나 용접이 완료된 구조물에 직접 적용이 가능한 장점을 가지고 있다. 계장화압입시험은 구형의 형태(sphere type)인 압입자를 이용하여 시험을 진행하게 되며 검사할 재료는 압입하중이 증가함에 따라서 완전탄성, 탄소성, 완전소성의 3단계를 거치게 되고 압입자와 시험할 시편의 평균 접촉압력은 압입하중이 증가함에 비례하여 같이 증가하게 된다. 구형 압입자는 압입 깊이에 비례하여 시험재료의 변형이 증가하게 되며 이점을 이용하여 압입 하중 및 압입 깊이 곡선으로부터 일축 인장시험에서 구해지는 유동특성을 유도할 수 있게 된다.

다. 잔류응력 평가 진행순서

측정방법은 지그에 장비를 부착하고 장비제어 및 측정 소프트웨어가 탑재된 pc와 연결 후 잔류응력 측정을 진행하며 일련의 시험 진행순서는 KS B0951에 따른다. 잔류응력 평가 절차는 KS B0951의 규격에 나온 순서대로 진행한다. 시편 용접에 따른 용접부 잔류응력 평가를 위해서 연속압입 시험기(AIS 3000 : Advanced

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

indentation system 3000)을 이용하여 계장화압입시험을 통한 잔류응력 측정을 한다. 시험대상은 관통 노즐 시험편이며 측정 부위는 용접으로 인하여 잔류응력의 영향을 받을 것이라 판단되는 base, HAZ, weld 위치에서 잔류응력 평가를 진행한다. 잔류응력 평가에 대한 진행순서는 무응력(stress-free)상태서 모재의 압입하중 인가곡선 확보 및 응력(stressed)상태의 압입하중 인가곡선를 확보하고 무응력 및 잔류응력 상태의 압입하중 인가곡선 비교를 하여 잔류응력 평가를 하며 다음과 같은 순서로 이루어진다.

(1) 시험표면의 이물질 제거
(2) 미세표면 연마(grinding/polishing)
(3) 장비부착
(4) 잔류응력 평가

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4장 실험 결과 및 고찰

제1절 용접부 건전성 및 잔류응력 시험결과

1. 비파괴검사 결과

가. 방사선투과시험 결과(RT: radiographic testing)

용접조건 검증용 시편에 대하여 방사선투과시험을 위하여 검사장비 조건을 관 전압 220kv, 초점크기 2.5mm, 노출시간 1m 10sec, 선원거리 600mm, 현상 조건은 20℃에서 5min 유지 후 ASME sec V. Art.2 적용하여 ASME sec Ⅸ에 의한 판정결과 fig. 4.1과 같이 용접부에 불연속지시가 없었다.

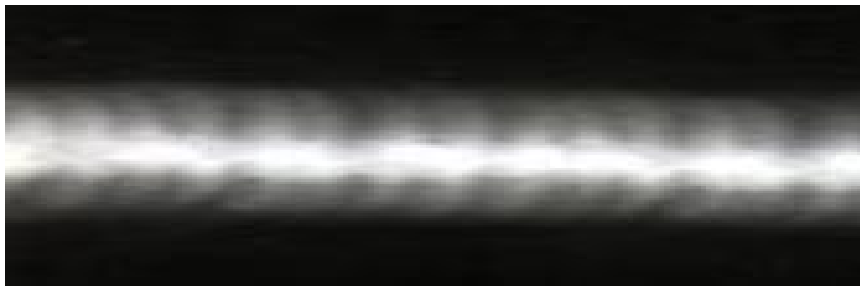


Fig. 4.1 Film after specimen radiographic test

용접조건 검증용 시편인 u-groove 용접 시편에 γ-ray 방사선을 용접부에 투과시켜 flim 판독 결과 용접부에 방사선 투과량이 일정하고 flim 감광이 균일한 것으로 확인되어 용접부의 건전성을 확인하였다.

나. 액체침투탐상시험 결과(PT: penetrant testing)

용접조건 검증용 시편에 대하여 액체침투탐상시험을 위하여 용접부에 침투제 분사 후 침투시간 15min 유지 및 세척 후 현상제 분사를 하였다. 현상조건은 시간을 15min으로 하고 조도는 1100lx 하여 시험을 하였다. ASME Sec. V. Art. 4 적용하여 ASME Sec. Ⅸ에 의한 판정결과 용접부에 불연속지시가 없었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4.2 Liquid penetration test results

용접조건 검증용 u-groove 시편 용접부 표면에 fig. 4.2와 같이 적색염료가 포함된 침투제 분사 후 세척 및 현상제 분사를 하여 결함 검출을 위해 흰색의 현상제위에서 적색의 결함지시 모양을 관찰한다.

2. 기계적 특성 평가 결과

1층, 3층 시편용접 및 잔류응력 완화기술 적용 시편 제작에 적용할 용접조건을 선정하기 위해 fig. 4.3과 같이 용접조건 검증용 시편의 용접부에 대한 기계적 성질 시험을 하였다.

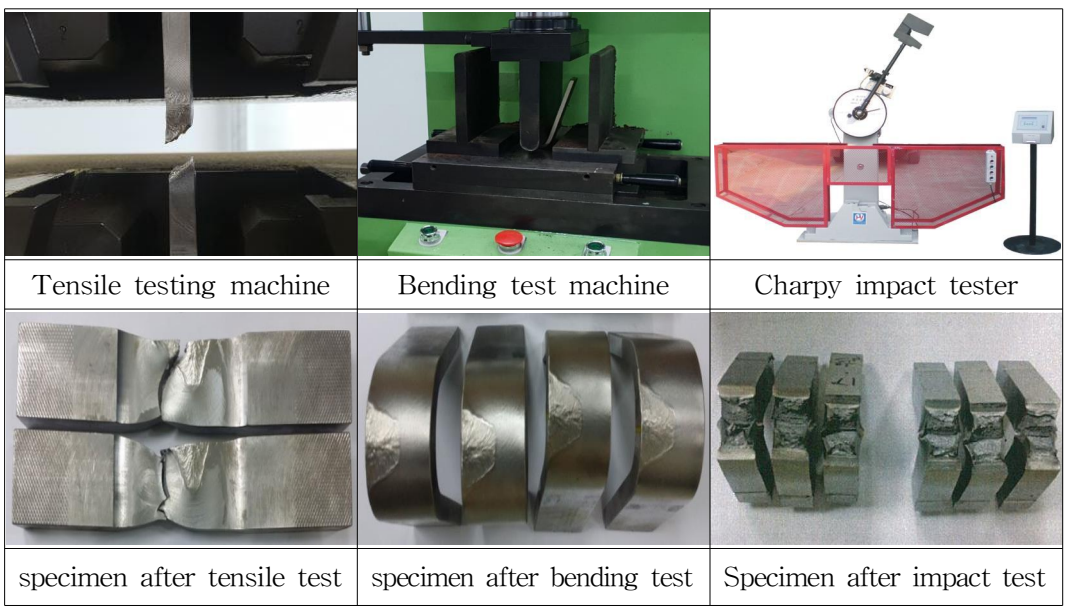


Fig. 4.3 Specimen mechanical properties test

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가. 인장 시험 결과

시험 방법은 ASME BPVC Sec. Ⅸ(QW-150 tension test)에 따라 인장시험 하고 가공할 시편 치수는 폭 19.24mm, 두께 52.04mm, 단면적 1001.95㎟인 시편과 폭 19.23mm, 두께 52.13mm, 단면적 1003.16㎟인 두 개의 시편을 가공하여 시험환경 온도 22.8±0.2℃, 습도 56±0%에서 시험결과 632MPa, 636MPa로 나왔으며 이것은 인코넬 690 강재의 ASTM spec의 인장강도 min 586MPa 및 용접시편에 인장강도 min 630MPa보다 이상으로 접합강도 건전성이 확인되었다.

나. 굽힘 시험 결과

시험 방법은 ASME BPVC Sec. Ⅸ(QW-160 guided-bend test)에 따라 굽힘 시험 하고 시편 준비는 두 개의 표면 굽힘 시편과 이면 굽힘 시편 두 개로 시험환경 온도 22.6±0.2℃, 습도 56±0%에서 굽힘 시험기계를 각도 180°, roll 지름 40mm로 setting하여 시험결과 표면 굽힘 및 이면 굽힘 시편 4개의 모든 용접부에 균열 발생 없이 용접부 건전성이 확인되었다.

다. 충격 시험 결과

시험 방법은 ASME BPVC Sec. Ⅸ(QW-170 notch-toughness test)에 따라 충격 시험을 수행하였으며 시험을 위한 시편의 가공은 6개의 시편을 V-노치로 10mm×10mm×55mm로 가공하여 시험환경 온도 21.4±0.2℃, 습도 51±0%에서 시험한 결과는 table 4.1과 같다. 해머를 사용해 충격 시편을 타격하여 파괴시키고, 이때 파괴 발생 시 흡수 에너지를 측정하여 시편의 충격 저항성을 확인하는 충격 시험 결과 모재부 흡수 에너지 평균은 224J인 반면 열영향부에서는 191J로 낮게 나왔다. 이는 용접으로 인하여 열영향부가 모재부보다 열이 가하여져 금속 조직이 재결정되고 상온에서 보다 급랭되어 결정들이 크지를 못하고 작은 결정으로 금속이 이루어지면서 동일한 면적보다 많은 결정이 존재함을 알 수 있고 이런 이유로 열영향부는 결정 경계가 많아서 단단하지만 취성에는 약하다. 소재에 다량의 탄소가 함유되고 여기에 열을 준 후 급랭시키면 매우 높은 경도의 소재를 얻을 수 있다.

경도의 증가는 외부의 변형에는 강하지만 충격에는 약한 취성소재가 된다. 취성소재의 특성은 동일한 면적 내에 보다 많은 결정이 존재하고 또한 결정은 결정경계의 양과 비례하며 결정경계가 많은 소재는 단단하지만 취성에는 약한 특성이 있으며 이러한 이유로 용접부에 대한 충격시험을 하면 흡수 에너지가 적게 나오는 결과를 얻게 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4.1 U-groove sample impact test results

no.	Test item	Unit	Test location	Test result
1	Absorbed energy(21 ℃)	J	Base metal	213
2				195
3				262
Average		J	Base metal	**224**
1	Lateral expansion	mm	Base metal	2.45
2				2.27
3				2.54
4	Absorbed energy(21 ℃)	J	HAZ	180
5				196
6				199
Average		J	HAZ	**191**
4	Lateral expansion	mm	HAZ	1.59
5				2.18
6				2.00

3. 경도시험 결과

가. 용접조건 검증용 시편 경도시험

시편의 경도시험 방법은 ASTM e384-11e1를 기준으로 fig. 4.4와 같은 위치에 경도시험을 하여 시험결과는 table 4.2에 나타내었다.

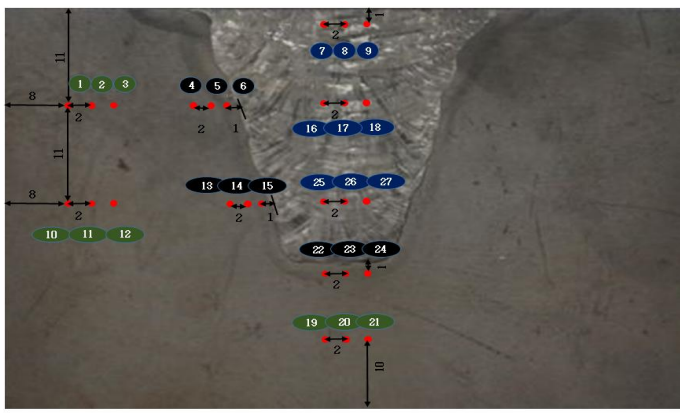


Fig. 4.4 Specimen hardness test location

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4.2 U-groove sample hardness test results

Hardness location(Hv10)									
Location	Base metal			HAZ			Weld metal		
no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Result	187	189	192	281	278	283	204	206	208
No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Result	187	192	190	278	272	279	208	213	211
No.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Result	190	192	195	275	273	277	210	208	211

U-groove 시편의 경도 시험결과는 HAZ에서 6번 경도 값 283Hv가 가장 높게 나왔으며 각 조직 Base, Weld, HAZ 순으로 경도 값이 상승하였다.

나. 1층 및 3층 용접시편의 경도시험

1층, 3층 용접시편의 경도시험은 ASTM e384-11e1을 기준으로 fig. 4.5와 같은 위치에서 하였으며 시험환경은 온도 24.8±0.2℃, 습도 49±1%로 1층 시편의 시험 결과는 table 4.3에 3층 시편의 시험 결과는 table 4.4에 나타내었다.

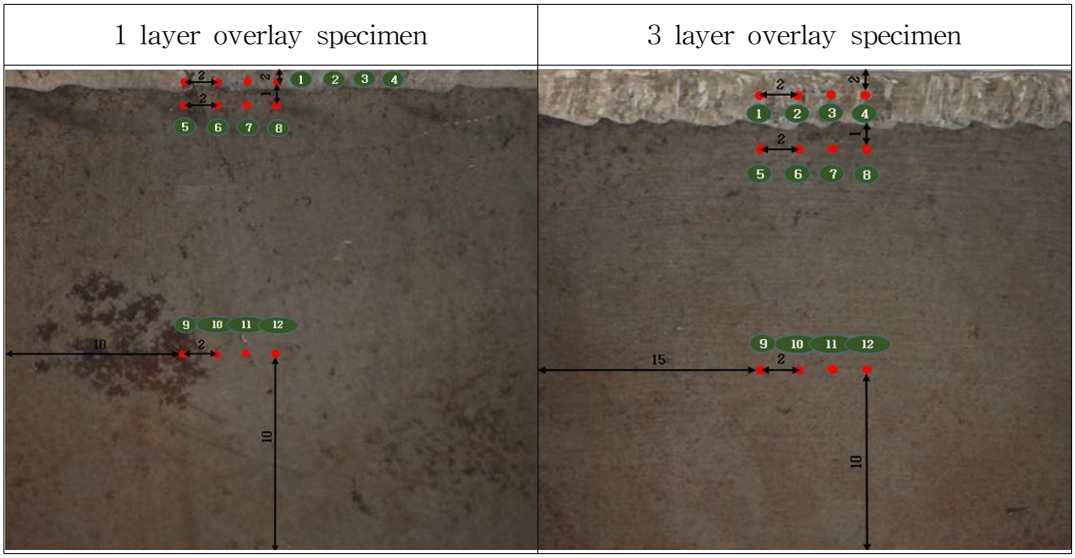


Fig. 4.5 1 layer, 3 layer hardness test

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4.3 1 layer sample hardness test results

Hardness location(Hv10)												
Location	Weld				HAZ				Base			
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Result	184	188	185	184	373	376	380	375	187	190	192	195

1층 용접시편의 경도시험 결과 HAZ 7번 위치에 경도 값이 380Hv로 가장 높게 나왔으며 HAZ 경도 값이 base부 경도 값인 12번 위치에 경도 값인 195Hv보다 약 1.9배 높은 380Hv로 나타났으며 취화된 열영향부에 대한 조직 안정화가 필요하며 즉 템퍼링 처리가 필요함을 알 수 있었다.

Table 4.4 3 layer sample hardness test results

Hardness location(Hv10)												
Location	Weld				HAZ				Base			
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Result	195	200	202	196	263	265	263	269	190	197	192	191

3층 용접시편의 경도시험 결과 HAZ 8번 위치에 경도 값이 269Hv로 가장 높게 나왔다. 1 layer 용접에서 HAZ 최고 경도 값이 380Hv인데 반하여 3 layer HAZ 최고 경도 값이 269Hv로서 이와 같은 결과로 부터 1 layer 단층용접 시편 보다는 3 layer 다층용접 시편이 HAZ의 취화된 결정립 조립부 영역을 템퍼링 처리하여 조직 안정화를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다. 저합금강 용접에 인코넬 690 용접재료를 사용하면 급격한 가열 및 냉각이 열영향부의 조직 형성에 영향을 주면서 용접 입열량의 불균일로 인하여 구속응력을 받게 되며 응력 및 열 사이클은 열영향부에 액화균열을 발생시키는 원인으로 작용한다. 응력의 크기는 용접부 근처에서 발생되는 응력이 가장 크며 초기 용융으로 인하여 발생된 액막이 결정립계를 취화

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

시키며 이와 같은 구속응력이 취화된 결정립계에 작용하면 균열발생이 쉽게 되는 것으로 알려져 있다. 저합금강과 인코넬 690 모재로 이종 접합된 강재를 후열처리하게 되면 저합금강의 base metal 조직은 구 austenite상 위에 존재하는 martensite이며 입계는 구 austenite상이고 버터링 작업과 용접 후열처리에 의하여 모재의 원조직 대비 조직이 성장하여 조대화된 조직이 된다는 것과 저합금강의 열영향부 즉 저합금강과 버터링 용접된 용접계면에서 약 1㎜ 정도에 위치한 열영향부의 조직은 ferrite와 martensite가 혼재하고 GTAW시의 아크열에 의해 입열량에 영향이 많았을 것으로 예상되는 계면 근방에서는 ferrite grain size가 완전히 미세화된다. 이종 용접부에서 기계적 특성에 거동은 금속의 미세조직에 변화에 따라서 기계적 특성에 거동이 달라져서 경도시험을 통하여 기계적 특성의 거동을 미시 역학적 관점에서 확인한 결과 용접완료 후 형성되는 조직 상태에 따라서 경도 변화가 발생된다는 것을 알 수 있다. overlay 용접에서 temper bead 용접에 경우 ASME code case n-638-4 요건을 만족하는 최적의 용접 변수(용접전압, 전류, 용접속도, 용가재, 와이어 송급속도)들에 정량적인 도출을 위하여 용접조건 선정 후 용접을 하여 절단면에 대한 경도와 미세조직 관찰을 하였다.

다. 잔류응력 완화기술 적용 시편 경도 시험결과

잔류응력 완화기술 적용된 용접시편들의 경도 결과 값은 table 4.5과 같고 각 용접시편들의 조직별 경도변화는 fig. 4.6에 나타내었다. 시편들은 HAZ, weld metal, base metal 순으로 경도 값이 낮아지는 것을 보여준다. 모재인 base metal는 181~201Hv 경도 값을 나타내었으며. 열영향부의 경도 값은 212~274Hv로 확인이 되면서 가장 높다는 것이 확인되었다. 용접 열영향부의 경도 값이 크게 나온 이유는 용접 후 용접부 주변에 형성되는 급격한 온도구배와 용접 구조물의 구속 조건에 의한 잔류응력 발생이 있고 또한 용접 열에 의한 상변태 발생은 조직변화를 통한 경도변화를 가져온다. 용접 열영향부의 경도상승은 충격인성이 저하되는 원인으로 용접시 중요관리 사항이다. 인코넬 690으로 오버레이 용접된 금속인 weld metal의 경우는 188~211Hv 수준으로 열영향부보다는 낮은 특성을 나타내었고 각각의 조건에 따른 용접금속, 열영향부, 모재부의 경도 값 비교를 위해서 그래프화해서 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4.5 Residual stress relaxation specimen hardness test (unit : Hv)

hrdness lcation(Hv10)															
location	weld					HAZ					base				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	203	205	204	209	211	266	271	274	272	267	189	182	192	197	201
2	200	198	203	205	201	250	252	259	262	264	188	190	194	195	192
3	194	192	195	203	204	237	240	248	235	252	183	185	188	190	194
4	192	194	196	199	197	230	230	234	234	242	188	188	188	188	188
5	188	193	190	194	192	215	212	224	229	225	181	185	182	187	191

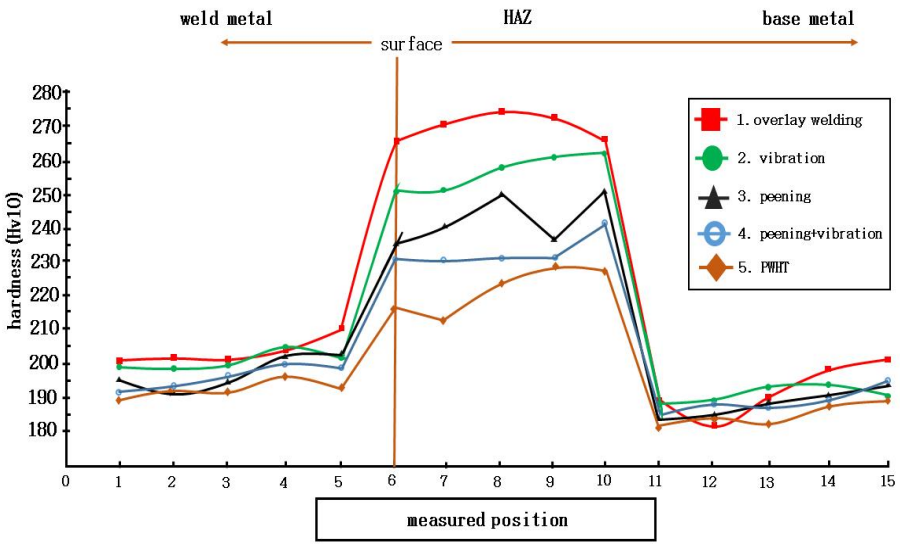


Fig. 4.6 residual stress relaxation technology

열영향부에 경도 값은 1번 시편보다는 2번, 3번, 4번, 5번의 시편 조건처럼 오버레이 용접 후에 진동이나 피닝 그리고 진동과 피닝, 열처리 조건을 동시에 적용한 조건의 용접부가 용접만한 상태의 시편의 조건보다 용접부의 경도 값이 순차적으로 조금 낮게 나타났으며, 5번 시편 용접조건인 오버레이 용접 및 후열처리 조건에서 경도 값이 가장 낮게 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 조직시험 결과

1층 및 3층 용접의 fusion line 조직변화를 관찰하고자 1층 및 3층 시편 fusion line의 미세조직을 fig. 4.7에 나타내었다.

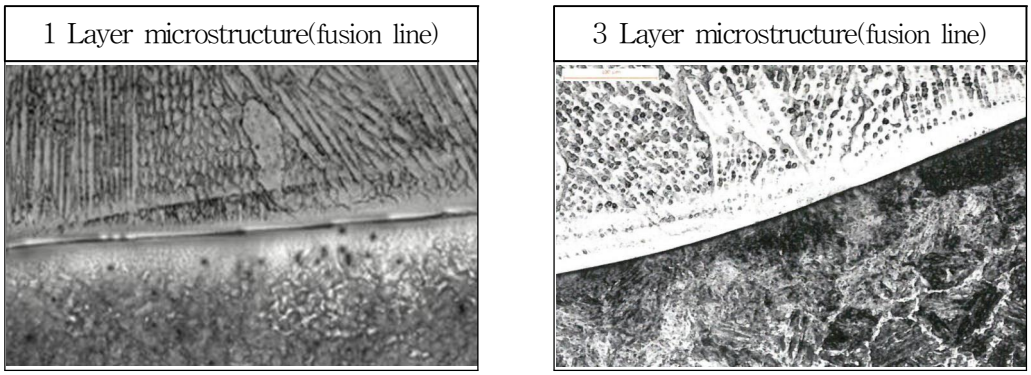


Fig. 4.7 1 layer, 3 layer specimen test result

ASTM e407-07e1을 기준으로 1 layer, 3 layer 용접시편 절단면에서 각 조직별 micro 조직시험을 하여 열영향부의 미세조직을 관찰하였다. 시편 fusion line 조직에서는 weld metal 결정립계와 수지상간 영역(interdendritic region)이 보이며 HAZ 영역에서는 취화하기 쉬운 침상조직이 발견되었고 결정립 미세부 주변 영역에서 base metal에 가까운 쪽으로 펄라이트조직이 나타남을 확인하였다. fusion line 조직은 두께가 수십 ㎛의 좁은 carbon-rich 층으로 이루어져 있고 금속조직이 침상조직으로 형성 되어있으며 1 layer 시편 HAZ 영역의 취화하기 쉬운 침상조직이 3 layer 시편 HAZ에서는 pearlite 조직으로 변화되었다.

5. 화학분석시험 결과

1층 및 3층 용접시편의 용착금속에 Cr 성분 확인을 위하여 화학성분 시험을 하였으며 시험 결과는 table 4.6과 같다.

Table 4.6 Test results of metal chemical composition test (unit: %)

Items	C	Si	Mn	S	Cu	Fe	Ni	Cr
1 layer	0.06	0.4	0.6	0.007	0.017	43.7	36.4	17.9
3 layer	0.02	0.02	0.41	0.001	0.02	12.2	57.7	28.5

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

용착금속의 화학성분 분석을 KS D 1789 : 2004을 기준으로 1층 및 3층 용접시편 제작에 사용된 용접재료인 인코넬 690의 용착금속 화학성분 시험결과 용가재의 Cr 성분이 29.2%인데 반하여 1층 용접시편은 용착금속에 Cr성분이 17.9%로 관찰되었고 이것은 모재부가 용융되면서 인코넬 690 용접재료의 희석에 의한 Cr 감소로 확인되었다. 3층 용접시편의 용착금속 화학성분 시험결과는 Cr성분이 28.5%로 ASME code case N-754 요건에서 요구하는 기술기준과 ASTM spec의 Cr 기준인 28%에서 31.5% 범위 안으로 화학성분 요구조건인 ASME code section.Ⅱ part C Spec. 을 만족한다. 이는 이종금속 접합에 인코넬 690 용접재료를 사용하면 Cr 함유량이 증가되어 반연속적인 입계 탄화물로 인한 응력부식균열 저항성을 개선시켜주는 역할 및 건전한 용접부 확보와 원전기기의 PWSCC의 감수성을 낮출 수 있다.

6. 용접 잔류응력 계측 결과

용접시편들의 잔류응력을 확인 하고자 fig. 4.8과 같은 계장화압입시험기를 사용하여 pad 시편에 용접부 라인을 따라 잔류응력 시험을 하였다.

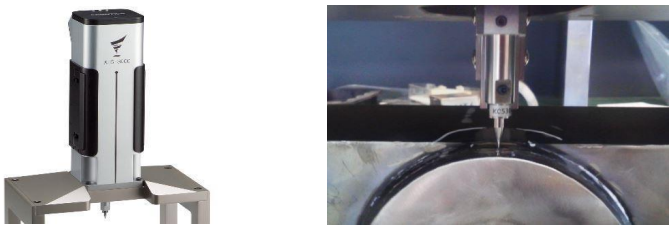


Fig. 4.8 Instrumented indentation tester

가. 잔류응력 평가 진행순서

잔류응력 평가를 위한 무응력 상태의 압입하중 인가곡선과 응력상태의 압입 인가곡선 확보를 위해 압입하중 인가곡선 시험에 조건을 압입자는 vickers indenter, 하중 인가속도는 0.3mm, 최대 압입하중 50kgf, 하중제거율 50%, 하중인가 및 제거 반복횟수 15회로 하였으며 무응력 곡선 생성시험에는 압입자는 spherical(dia. 500um) indenter, 하중 인가속도 0.3mm, 최대 압입변위 150um, 하중 제거율 50%, 하중 인가 및 제거 반복횟수는 15회로 하였으며 잔류응력에 의한 압입하중 및 압입 깊이의 변화는 fig. 4.9에 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

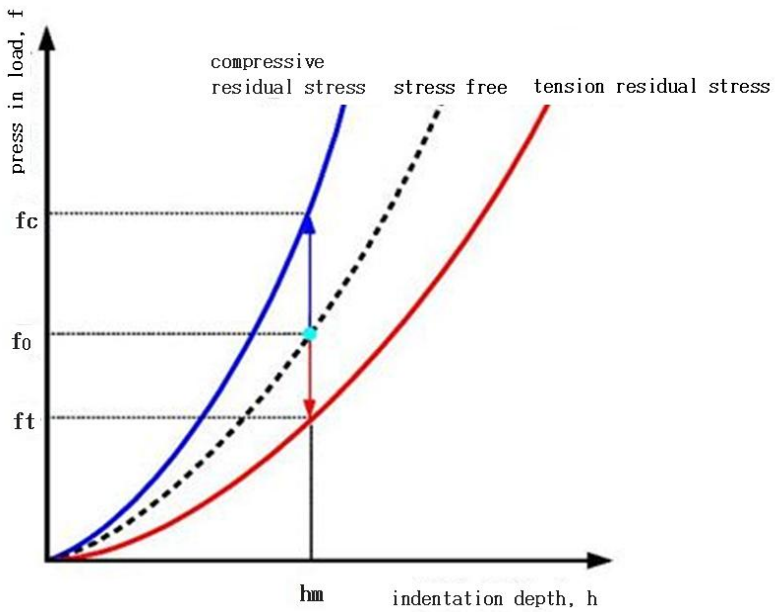


Fig. 4.9 Change of indentation load and indentation depth by residual stress

f : 압입하중

fc : 압축 잔류응력이 부가될 때의 압입하중

f_0 : 잔류응력이 존재하지 않을 때의 압입하중

ft : 인장 잔류응력이 부가될 때의 압입하중

h : 압입하중을 가한 상태에서의 압입 깊이

hm : 잔류응력 유무에 따른 하중 변화를 비교하기 위한 임의의 압입 깊이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 잔류응력 완화기술 적용된 용접 시편 잔류응력 측정

(1) 잔류응력 완화기술 적용된 시편(1번~5번) weld pad 용접부 잔류응력 비교

잔류응력 완화기술 적용된 용접 시편(1번~5번)들 weld pad 용접부 잔류응력 측정은 fig. 4.10에 base, HAZ, weld 위치에서 table 4.7의 조건으로 측정하여 잔류응력 변화를 비교하였으며 그 결과는 table 4.8 및 fig. 4.11과 같다.

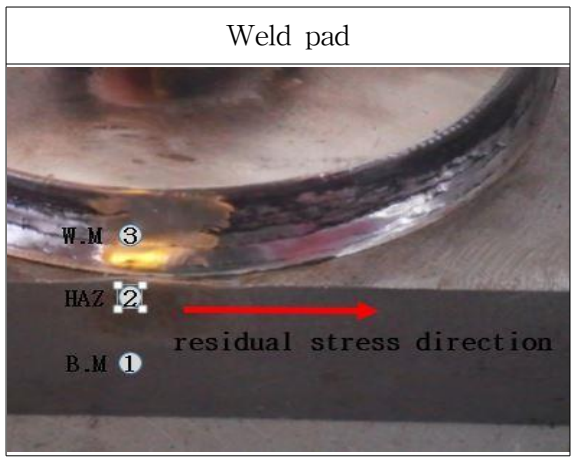


Fig. 4.10 Weld pad residual stress test location

Table 4.7 Weld pad residual stress test condition

Equipment	AIS3000C	Test conditions	50Kgf/150um
Test temperature	26℃.	Analysis program	AIS3000
Indentor	Vickers indenter / Spherical indenter(Ø : 0.5mm)		

Table 4.8 Residual stress comparison of pad weld (unit : MPa)

No. 1		No. 2		No. 3		No. 4		No. 5	
Overlay welding		Vibration		Peening		Peening+vibration		PWHT	
location	result	location	result	location	result	location	result	location	result
B.M	-148.20	B.M	-132.45	B.M	-85.21	B.M	-24.14	B.M	-14.75
HAZ	-163.06	HAZ	-132.14	HAZ	-68.47	HAZ	-46.52	HAZ	7.49
W.M	-172.32	W.M	-60.42	W.M	-35.52	W.M	-28.47	W.M	25.72
#. (-) : means compressive stress, (+) : means tension stress									

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

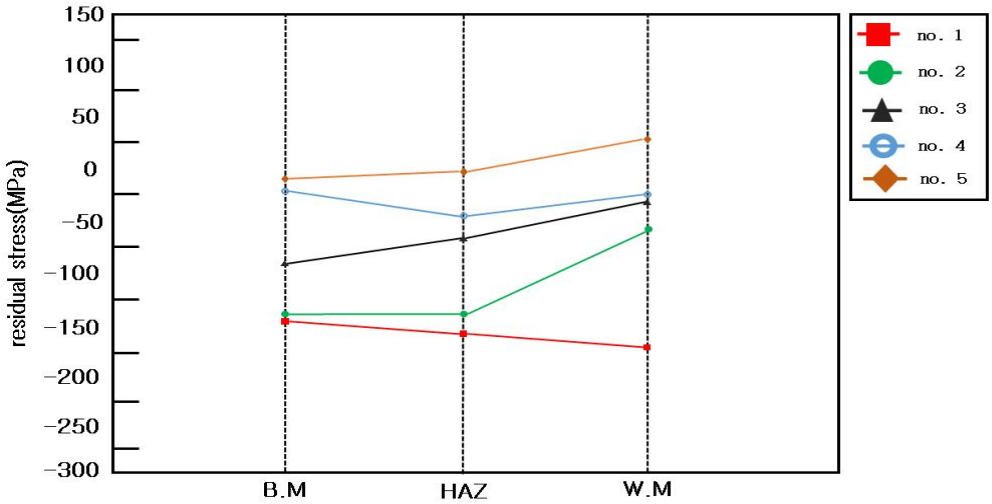


Fig. 4.11 Residual stress comparison of pad weld

시편(1번~5번) weld pad HAZ에 응력이 가장 높은 곳은 1번 시편(-163.06MPa)이고 가장 낮은 곳 5번 시편(7.49MPa)으로 관찰되었다.

(2) 잔류응력 완화기술 적용된 시편(1번~5번) J-groove 용접부의 잔류응력 비교

잔류응력 완화기술 적용된 용접시편(1번~5번)들의 J-groove 용접부의 잔류응력 측정은 fig. 4.12에 base, HAZ, weld 위치에서 Table 4.9의 조건으로 측정하여 잔류응력 변화를 비교하였으며 그 결과는 table 4.10 및 fig. 4.13과 같다.

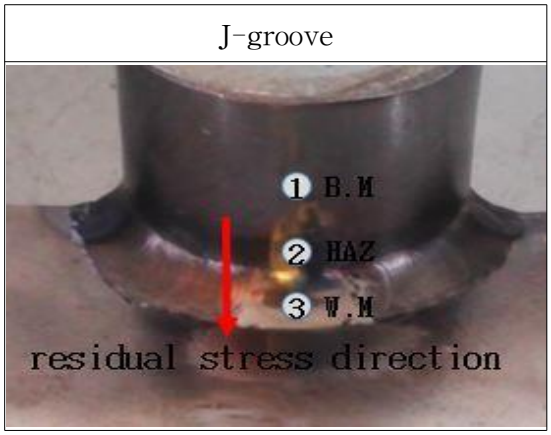


Fig. 4.12 J-groove residual stress test location

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4.9 J-groove residual stress test condition

Equipment	AIS3000C	Test conditions	50Kgf/150um
Test temperature	26℃.	Analysis program	AIS3000
Indentor	Vickers indenter / Spherical indenter(Ø : 0.5mm)		

Table 4.10 Residual stress comparison of J-groove weld (unit : MPa)

No. 1		No. 2		No. 3		No. 4		No. 5	
Overlay welding		Vibration		Peening		Peening+vibration		PWHT	
location	result	location	result	location	result	location	result	location	result
B.M	-113.42	B.M	-91.54	B.M	-72.43	B.M	-73.31	B.M	-43.27
HAZ	-176.24	HAZ	-167.42	HAZ	-135.43	HAZ	-114.28	HAZ	-96.82
W.M	-155.42	W.M	-119.38	W.M	-56.41	W.M	-47.52	W.M	-27.53
#. (-) : means compressive stress, (+) : means tension stress									

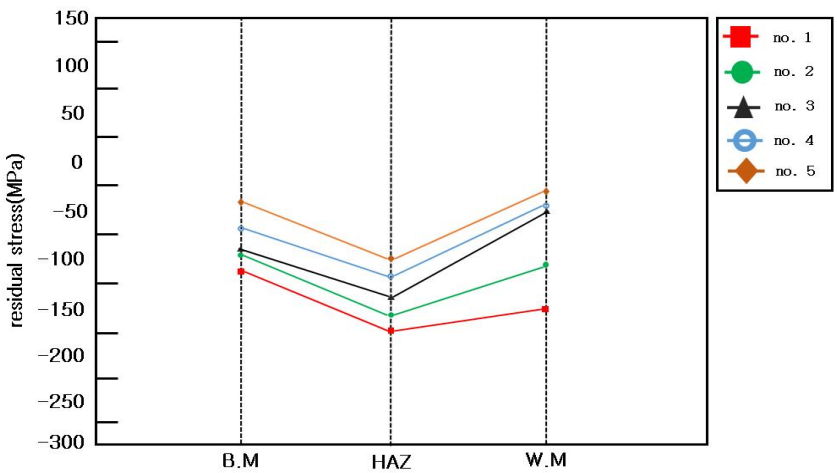


Fig. 4.13 Residual stress graph of J-groove weld

잔류응력 완화기술 적용된 시편(1번~5번) J-groove HAZ에서 응력이 가장 높은 곳은 1번(-176.24MPa)이고 가장 낮은 곳 5번(-96.82MPa)으로 관찰되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(3) 시편(1번~5번) weld pad 및 J-groove 용접부의 잔류응력 비교분석

잔류응력 완화기술 적용된 용접 시편(1번~5번)들의 base, HAZ, weld부의 잔류응력 값을 측정하여 각 위치별 잔류응력 변화량을 fig. 4.14에 나타내었다.

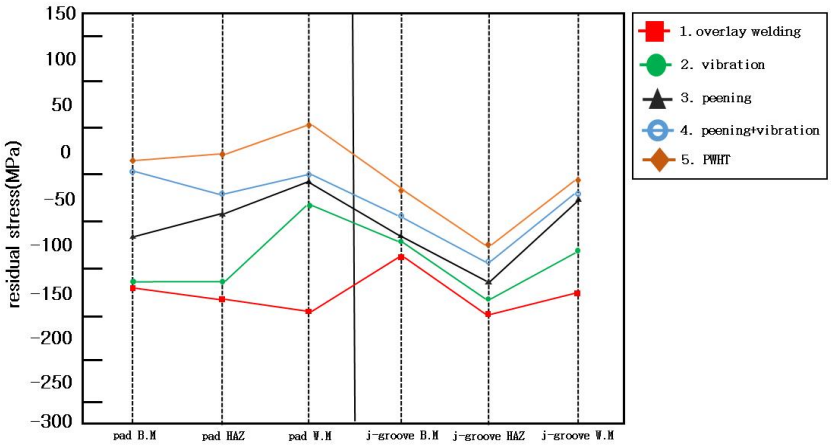


Fig. 4.14 Comparison of residual stresses of weld specimens

시편(1번~5번) weld pad들 중에서 HAZ 잔류응력이 가장 큰 시편은 1번 시편(-163.06MPa)이고 가장 낮은 시편은 오버레이 용접 후에 후열처리를 적용한 5번 시편(7.49MPa)으로 관찰되었다. 잔류응력 완화기술이 적용된 시편(1번~5번)들에 대하여 pad 용접부에서 J-groove 용접부 방향으로 weld line을 따라 계장화압입 시험을 한 결과 잔류응력의 형태가 비슷하게 나타났다. 용접부에 잔류응력이 높으면 전위밀도가 높아지게 되면서 원자들은 안전한 평형 위치에 있지 못한 상태로 응력에 의해 변형되게 되는데 이와 같은 상태는 에너지 상태가 평형상태보다 높은 상태이므로 부식 및 크랙에 취약하게 된다. 즉 잔류응력이 높을수록 응력부식균열 및 부식에 의한 용접부 손상이 잘 발생하며 ASME code Spec.에서는 응력부식균열 및 부식 환경에서 사용되는 설비들에 대하여 용접 후 잔류응력 제거를 위하여 용접 후열처리를 하도록 규정하고 있다[20]. 또한 원전기기의 이종금속용접부로 구성된 배관 내면에서는 PWSCC에 민감하며 인장 용접 잔류응력이 발생되고 용접부 내면은 수화학 환경에 있으므로 균열 발생 잠재 가능성이 높아 후열처리를 통한 잔류응력 개선으로 이종금속용접부의 PWSCC 발생을 예방할 수 있다[6].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 잔류응력 완화기술 적용된 시편의 경도와 잔류응력 비교

용접부에 경도와 잔류응력의 관계를 비교하고자 fig. 4.15에 나타내었다.

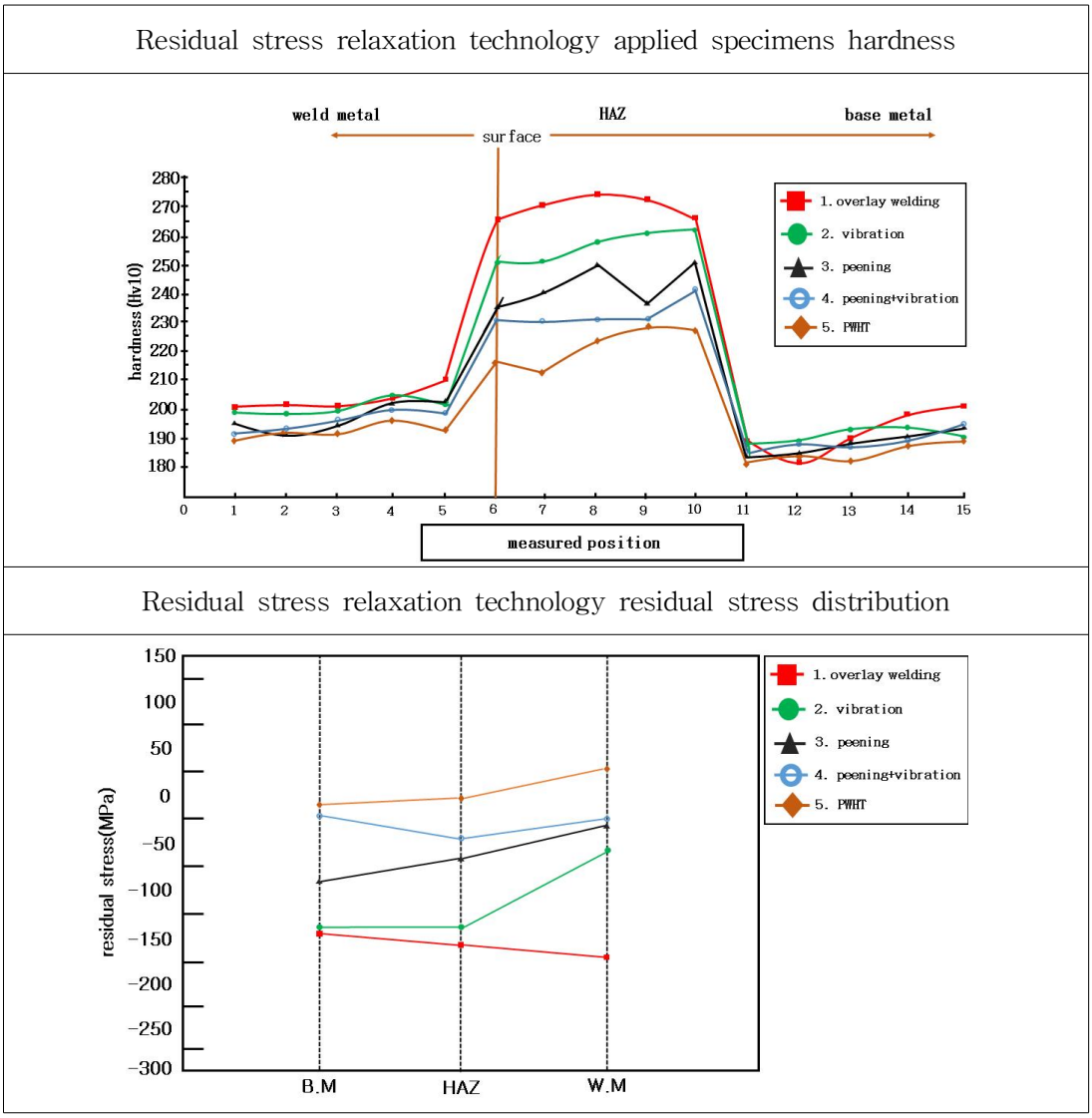


Fig. 4.15 Comparison of hardness and residual stress distribution of specimen

직접 용접부의 잔류응력을 측정한다는 것은 현실적으로 많은 어려움이 따른다. 용접부 잔류응력 측정은 용접부 경도를 통하여 간접적으로 측정할 수 있으며 알루미늄 등의 일부 강재를 제외하고는 대부분의 강재는 용접부에 경화현상이 나타나며 경화의 크기는 잔류응력의 크기와 비례하게 된다[8].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제5장 결 론

본 논문에서는 원자력발전소 설비 중에서 이종금속용접부에 인코넬 690 용접재료를 사용한 용접부의 PWSCC 예방을 위해 적용 가능한 용접공정 기술들을 검토하고, 그 영향을 평가하여 각 용접방법에 따른 잔류응력 완화 특성을 정량적으로 제시하였다. 그리고 인코넬 이종금속용접부의 물리적 특성 규명을 위하여 각 용접부에 대한 경도, 조직, 그리고 기계적 성질에 대한 평가 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 1 층 용접시편의 각 위치별 마이크로 조직을 관찰한 결과 HAZ 에서 취화되기 쉬운 침상조직이 발견되었으며, 용접부의 각 조직별 경화상태를 확인하기 위한 경도 측정 결과 HAZ 영역에서 모재부 경도보다 약 1.9배 높게 측정되어 HAZ 경화현상이 나타났다.
2. 3층 용접시편을 제작하여 HAZ 마크로 조직 관찰결과 1층 용접시편 HAZ의 침상 조직이 템퍼비드 용접 적용 후 펄라이트 조직으로 변화된 것과 비커스경도 측정 결과 결정립 영역의 조립부 경도 값이 약 269Hv로 감소되었음이 확인되었고, 이와 같은 결과를 통하여 템퍼비드 용접이 열영향부 연화와 조직 안정화가 되도록 하며 용접 후열처리 대안으로 사용할 수 있음이 확인되었다. 그리고 오버레이 용접에서 요구사항인 ASME Code Case N-754의 용착금속 Cr 함유량에 대하여 28.5% Cr 함유량 존재 및 적정성에 대한 건전성이 확인되었다. 또한 pad 오버레이 용접수행 시 ASME Code Case N-754 요구조건 만족과 동시에 PWSCC의 감수성을 낮출 수 있는 것이 확인되었다.
3. 잔류응력 완화기술이 적용된 시편 제작 후 HAZ 경도시험 결과 각 시편들에 최고경도 값 기준으로 모든 시험편에서 경도 값이 감소됨을 확인하였으며, 이 결과 중에서도 오버레이 용접 후 후열처리를 적용한 방법이 경도 값을 가장 감소시킬 수 있는 조건으로 평가되었다. 그리고 각 위치에서 경도분포는 HAZ(212~274Hv), weld metal(188~211Hv), base metal 경도(181~201Hv) 순으로 낮아지는 경향을 보였다.
4. 잔류응력 완화기술이 적용된 시편의 계장화압입시험을 통한 잔류응력 시험결과 weld pad 시편들의 열영향부 중에 잔류응력이 가장 큰 시편은 오버레이 용접시

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

편으로 약 -163.06MPa의 압축응력이 분포하였고, 가장 낮은 시편은 오버레이 용접 후에 후열처리를 적용한 시편으로 약 7.49MPa의 인장응력이 분포하였다. 따라서, 용접부 잔류응력 완화를 위한 최적에 방법은 후열처리를 하는 것으로 판단된다. 그리고 잔류응력 완화기술이 적용된 시편에 대하여 pad 용접부에서 J-groove 용접부 방향으로 weld line을 따라 계장화압입시험을 한 결과 잔류응력의 형태가 전체적으로 비슷하게 나타났다.

5. 잔류응력 완화기술이 적용된 시편의 경도분포와 잔류응력 분포를 비교한 결과 용접부 경화현상으로 경화의 크기 변화가 있었으며 경화의 크기는 잔류응력의 크기와 비례하여 나타났으며, 알루미늄 등의 일부 강재를 제외한 용접부 잔류응력 측정은 용접부 경도를 통하여 간접적으로 측정할 수 있다.

이상의 결과로부터, 본 연구에서는 원전기기의 제작 시 용접부는 열의 집중과 국부적인 용융 및 응고로 인하여 열팽창 및 수축으로 HAZ에 용접 잔류응력 발생과 경도가 높아지게 한다. 용접 잔류응력 및 경도를 감소시키는 방법으로는 용접시공 시 일층 용접법을 지양하고 가능한 다층용법에 의한 시공을 추천하며, 원전기기 용접부에 대하여 후열처리 시행으로 용접 잔류응력 등을 감소시킴으로 더욱 안전한 용접구조물의 제작을 제안한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고 문헌

[1] 김종성.(2011). 원자로 냉각재 계통 내 기기의 이종금속용접부에 대한 예방 정비 방안 고찰, *대한용접·접합학회지 제29권 제2호,* pp.149.

[2] 김윤재, 배홍열, 이경수, 송태광 & 박치용.(2008). 원전 이종 금속 다층 용접부 잔류응력 예측을 위한 유한요소 변수 민감도 해석, *대한기계학회논문집,* pp.770～781.

[3] 김종성 & 진태은.(2003). 용접 구조물의 사용중 적합성 평가를 위한 잔류응력 해석절차 개발, *대한기계학회논문집 제27권 5호,* pp.713～723.

[4] 류승우.(2016). *대한기계학회지 제56권 제4호,* pp.39.

[5] 변진귀 & 박광수.(2009). Alloy 82/182 용접부의 수명 연장 오버레이를 위한 템퍼비드 용접 공정개발, *대한용접접합학회 추계학술지*, pp.16.

[6] 송태광, 배홍열, 전윤배, 오창영, 김윤재, 이경수&박치용.(2008). 예방용접 Overlay가 원전 가압기 이종금속용접부 잔류응력완화에 미치는 영향, *대한기계학회논문집 A권, 제32권 제10호*, pp.873～881.

[7] 우승완, 권재도, 이춘열 & 강석철.(2004). 원전 배관용 SA 106 Gr.C의 협개선 자동용접 적용에 관한 연구, *대한기계학회 추계학술대회논문집*, pp.96～101.

[8] 이진희.(2005). *용접기술 실무*(pp.73). 경기도: 21세기사.

[9] 이진희.(2013). *재료와 용접*(pp.731). 경기도: 21세기사.

[10] 이호진, 이봉상, 박광수, 변진귀&정인철.(2010). 해석 해의 온도곡선을 이용한 템퍼비이드 용접공정 평가기술, *대한용접·접합학회지 제28권 제5호,* pp.544.

[11] 황성식.(2013). *원자력 발전소 Alloy 600 부품의 PWSCC-Part 1 제12권 1호*, pp.7.

[12] 장경호, 이진형 & 김재환.(2003). 상변태에 의한 잔류응력 완화효과에 관한 실험적 연구, *대한용접학회 학술발표대회 개요집 제2권,* pp.216～218.

[13] American Society of Mechanical Engineers.(2004). *ASME Code Sec. IX QW-290 Temper bead welding,* pp.49～50.

[14] American Society of Mechanical Engineers.(2004). *ASME Boile and Pressure Vessel Code, Sec. III, Rule for Construction of Nuclear Power Plant Components.*

[15] American Society of Mechanical Engineers.(2007). *ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section IX QW290,* pp.48～50.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[16] American Society of Mechanical Engineers.(2007). *ASME B&PV Code, Sec. XI, Code Case N-740, Dissimilar Metal Weld Overlay for Repair of Class 1, 2, and 3 Items, Section XI Division 1.*

[17] American Society of Mechanical Engineers.(2010). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Code Case N-740-1, Dissimilar Metal Weld Overlay for Repair or Mitigation of Class 1, 2 and 3 Items, Section XI, Division 1.*

[18] American Society of Mechanical Engineers.(2010). *ASME Code Sec. IX QW-462.1(A) TENSION PLATE,* pp.157.

[19] American Society of Mechanical Engineers.(2010). *ASME Code Sec. IX QW-462.2 SIDE BEND, QW-462.3 FACE AND ROOT BENDS,* pp.161~162.

[20] American Society of Mechanical Engineers.(2010). *ASME Code Sec. IX QW-407 Postweld Heat Treatment,* pp.67~68.

[21] American Society of Mechanical Engineers.(2010). *ASME Code Sec. IX QW-462.5(a) Chemical Analysis and Hardness Specimen Corrosion-Resistant and Hard-Facing Weld Metal Overlay,* pp.165.

[22] A. Traidia et al.(2013). On the effects of gravity and sulfur content on the weld shape in horizontal narrow gap GTAW of stainless steels, *Journal of Materials Processing Technology 213,* pp.1128~1138.

[23] E.A. Ray, K. Weir, C. Rice, & T. Damico.(2003). First Use of Mechanical Stress Improvement Processs(MSIP) to Prevent and Mitigate Primary Water Stress Corrosion Cracking(PWSCC) in Reactor Vessel Piping at VC Summer, *Proceedings of the 18th KAIF-KNS Annual Conference.*

[24] Edwards, N. W.(1986). Weld Overlay of BWR Flawed Piping, *Internation Journal of Pressure Vessels and Piping Volume* 25, pp.17~24.

[25] Fox, M.(1979). An Overview of Intergranular Corrosion Cracking in BWRS, *Journal of Materials in energy system 1:3.*

[26] F. Tolle, A. Gumenyuk, A. Backhaus, S. Olschok, M. Rethmeier & U. Reisgen.(2012). Welding residual stress reduction by scanning of a defocused beam, *Journal of Meterials Processing Technology Volume 212,* pp.19~26.

[27] Goo, B.C., Lee, D.H., Kwon D.I. & Choi, Y.(2004). Evaluation of Mechanical

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Properties of Welded Jointsby an Instrumented Indentation Test and Fatigue Life Evaluation, *Journal of the Korean Society for Railway Volume 7 2th editon,* pp.142～148.

[28] Huang, Chin-Cheng&Liu, Ru-Feng.(2012). Structural Integrity Analyses for Preemptive Weld Overlay on the Dissimilar Metal Weld of a Pressurizer Nozzle. *International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume. 90～91,* pp.77～83.

[29] 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 Volume 210,* pp.1636～1645.

[30] H. Coriou, L. Grall, M. Pelras & S. Vettier.(1959). Stress Corrosion Cracjing of Inconel in High Temperature Water, Third Metallurgy Conference on Corrosion. Saclay: North Holland Publishing Co.

[31] Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd. & Mitsubishi Heavy Industry, Ltd.(2009). Water Jet Peening Technology for Preventing Stress Corrosion Cracking by Using Cavitations, *E-Jouranl of Advanced Maintenance 1-2 NT7.*

[32] H. Domian, R.H. Emanuelson, L.Katz, L.W.Sarver & G.J. Theus.(1977). Effect of microstructure on stress corrosion cracking of Alloy 600 in high purity water, Corrosion Volume 33, pp.26

[33] IAEA.(2011). Stress Corrosion Cracking in Light Water Reactors: Good Practices and Lessons Learned, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.13.

[34] J. H. Hong.(2012). *Nuclear Materials*. Hanshouse.

[35] J. Wilson & M. Arey.(2007). Overview of Industry Activites on Mitigation of PWSCC in NI-Basec RCS Components, MRP/PWROG Briefing to NRC RES.

[36] Janosch, J. J.(2008). International Institute of Welding work on residual stress and its application to industry, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* Volume 85 3th editon, pp.183～190.

[37] Kansai Electric Power Co., Inc. and Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.(2010). Inlay Method Using the Cylindrical Container for Reactor Vessel of PWR, E-journal of Advanced Maintenance 2-1, NT19.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[38] Kim, D. J et al.(2001). Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG laser, *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics Volume 14*, pp.51～56.

[39] Leonard Mordfin.(1988). Mechanical Relaxation of Residual Stress, *American Society for Testing and Materials Special Technical Publications 993,* pp.59.

[40] Lie, G.K.(1990). Study on new technology of VSR for special large and heavy duty steel structure, Metallurgical equipment (China) (2), pp.45～49.

[41] Movchan V. I., Kovzel A.S.(1989). Relaxation of residual stresses during ultrasonic treatment, Metalloved Term. Obrab. Met (6), pp.57～60.

[42] Mitsubishi Heavy Industry, Ltd.(2009). Water Jet Peening as Residual Stress Improvement Method for Alloy 600 PWSCC Mitigation, *E-Jouranl of Advanced Maintenance 1-2 NT7(2).*

[43] Moffat, G., Bamford, W. H&Seeger, D.(2001) Development of the technical basis for plant startup for the V.C Summer Nuclear plant. *Trans. of ASME PVP conference, PVP-Volume. 427,* pp.33～39.

[44] P. Riccardella.(2009). Nozzles and Penetrations in PWR Nulcear Power Plants, Expert Seminar of Structural Integrity Associate, Suzhou, China

[45] P. D. Gupta et al.(2011). Laser Applications in Indian Nuclear Power Programme, *Energy Procedia 7*, pp.560～576.

[46] Robakowski T.(1991). Energy aving technologies for the manufacture of welded structures, Polish Welding Institute, *Welding International Volume 5 4th editon,* pp.262～264.

[47] Riccardella, P. C., Pitcairn, D. R., Giannuzzi, A. J. & Gerber, T. L.(1988). Weld Overlay Repairs from Conception to Long-Term Qualification, *Internation Journal of Pressure Vessels and Piping Volume 34*, pp.59～82.

[48] Smith, D. J. & Garwood, S. J.(1992) Influence of postweld heat treatment on the variation of residual stresses in 50 mm thick welded ferritic steel plates. *International Journal of Pressure Vessels and Piping Volume 51 2th edito*n, pp.241～256.

[49] S. Hwang.(2013). Review of PWSCC and mitigation management strategies of Alloy 600 materials of PWRs. *Journal of Nuclear Materials 443,* pp.325.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[50] Scott, P.(2007). Materials Reliability Program : Experimental Program on the Effects of Surface Condition on Primary Water Stress Corrosion Cracking of Alloy 182 Welds(MPR-215), Electric Power Research Institute.

[51] Shimizu, T., Enomoto, K. & Sakata, S.(1984). Residual Stresses in Girth Butt Welded Pipes and Treatments to Modify These, *Internation Journal of Pressure Vessels and Piping Volume 16,* pp.299~319.

[52] Seong Sik Hwang et al.(2013). Review of PWSCC and mitigation management strategies of Alloy 600 materials of PWRs. *Journal of Nuclear Materials Volume 443 3th editon,* pp.321~330.

[53] T. Sato, K. Yonekura, S. Hongo, S. Hayashi & H. Saito.(2004). Introduction of Repair/Maintenance Techniques for SCC in Primary Loop Recirculation System Piping Maintenology 3-3.

[54] Toshiba Corporation.(2009). IHSI(Induction Heating Stress Improvement) Preventive Maintenance Technique for Primary Loop Recirculation Piping, *E-Journal of Maintenance 1-2 NT6.*

[55] T. Lant, DL. Robnson, B. Spafford & J. Storesund..(2001). Review of weld repair procedure for low alloy steels designed to minimise the risk of future cracking, *Internation Journal of Pressure Vessels and Piping 78,* pp.813~818.

[56] U. S. NRC.(2005). U. S. Plant Experience with Alloy 600 Cracking and Boric Acid Corrosion of Light-Water Reactor Pressure Vessel Materials, NUREG-1823

[57] US NRC.(2008). Slide Presentation-Inlay Mitigation, Public Meeting with Nuclear Energy Institute and Industry Regarding Inlay and Onlay Applications on DMBW.

[58] Valsenko V.L & Senyukov V.L.(1990). Study of static stress relaxation in Cr-Ni steel specimens under cyclic loading, *Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Probl Prochn Volume 3*, pp.39~42.

[59] Walter J. Sperko, et al.(2005). Exploring Temper Bead Welding, *Welding Journal,* pp.37~40.

[60] Y. Sano.(2008). Dvelopment and Applications of Laser Peening System for Field Operation, Proceedings of the First *International* Conference on Laser Peening.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[61] Y. Ando, G. Yagawa, and Y. Hayase.(1982). Evaluation of Induction Heating Stress Improvement(IHSI) Treatment Applied to Nuclear Primary Piping, *International Journal of Pressure Vessels and Piping 10-5,* pp.399~406.

[62] Y. Q. Wang et al.(2012). Localized Corrosion of Thermally Aged Cast Duplex Stainless Steel for Primary Coolant Pipes of Nuclear Power Plant, *Procedia Engineering 36,* pp.88~95.

[63] Yen, H. J., Lin, M. C. and Chen, L. J.(1996). Residual Stress Measurement in 304 Stainless Steel Weld Overlay Pipes. *Journal of Engineering Materials and Technology Volume 118,* pp.135~142.

Collection @ chosun