원자로핵계측기 튜브의 자동 제살용접 공정 개발

A Development of Automatic Autogenous Welding Process for ICI Tubes

***심덕남, 정인철**

두산중공업(주) 소재/용접기술연구팀, 경남 창원

1. 서 론

한국 표준형 원자력 발전소의 원자력 ICI(In-core Instruments) 집합체는 원자로내 출력감지의 기능을 수행하며 스테인레스강 재질로서 1차 압력계통의 압력경계를 형성하고 원자로 상부높이와 평행하게 설치된다. 설계기준 2500Psia와 650°F의 운전조건하에서 제작되어 지며 Fig.1과 같이 ICI 검출기를 원자로 내부까지 안내하기 위한 가이드 튜브(Guide Tube)와 검출기를 고정하는 실 하우징(Seal Housing)이 결합되어 실 테이블(Seal Table)에 조립된다. 초기 설치시의 가이드 튜브와 실 하우징의 용접은 엄격한 용접부 품질관리 지침에 따라 수동 TIG 방식으로 시공되지만 설치가 완료된 상태에서는 튜브간 설치배열이 협소하여 용접사의 접근이 어렵고 작업공간의 제약으로 품질문제 발생에 따른 보수용접은 사실상 불가능하므로 이에 대한 방안이 요구되었다.

본 연구는 용가재를 사용하지 않는 자동 Orbital TIG 용접기법으로 이러한 ICI 튜브용접에 이용하고자 Mock-up시험을 통해 기존의 용접개선부를 변경하고 최적의 자동 용접공정을 수립, 검증을 받아 실제 원자력 발전소의 현장 보수작업에 적용하였다.

2. 실험방법

Table 2는 Mock-up 실험에 사용한 자재의 사양을 명시하였다. 시험자재는 실 제품과 동일한 SA240-TP316 및 SA479-TP316 스테인레스강의 튜브 자재를 I형 맞대기 결합(Butt Joint) 형태로 가공하였다. 모재 표면은 아르곤(Ar)과 헬륨(He)을 혼합한 실딩가스(Shielding Gas)를 공급하고 튜브 내부는 순수 아르곤 가스를 주입하여 용융금속의 산화를 방지하였다. 또한 실 테이블을 직접 제작하여 ICI 튜브 조립시 용접 오퍼레이터(Weld Operator)의 접근성과 자동 Orbital TIG 장치의 용접헤드 취급성을 확인하였다. 용접변수는 여러 실험을 통하여 범위를 설정하였고 용접전류는 펄스(Pulse) 형태로 설정, 시컨스 제어(Sequence Control) 형태의 용접 프로그램을 입력하였다. 용접부는 인장, 굽힘, 입계부식 시험으로 특성을 평가하였고 비파괴 시험(PT & RT)으로 외·내부 건전성을 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3. 1 자동 용접공정 수립

Table 4는 Mock-up 실험을 통해 설정된 최적의 용접 조건을 나타내었다. 용접 조인트의 루트 갭(Root Gap)은 없으며 용접헤드를 용접선의 상하에 고정시키므로 가접(Tack Weld)은 생략하였다. 용접헤드 장착후 튜브 내부 가스 퍼징(Purging)을 위해 실 하우징 입구에서 탈착 가능한 특수 설계 제작된 Tool이 사용되었고 용접진행은 가스 Prepurge→아크발생→용접시작→용접종료→아크 중지→Postpurge 순으로 시컨스 처리되어 실제 용접 오퍼레이터는 용접헤드 셋팅 역할만 수행하면 되었다. 입열제어가 유리한 펄스 전류를 사용하므로 표면 및 이면비드가 미려하게 형성되었고 입열량은 12KJ/cm로서 원자력 PSA 규제한도인 23.6KJ/cm에 충분히 만족되는 조건을 유지하였다. 텅스텐봉과 모재의 간격은 아크열의 분산과 연관되므로 1.6mm 로 비교적 낮게 설정하여 아크 집중력을 높여 비드폭을 줄이고 용입을 강화시켰고 텅스텐 봉의 위치는 용접선에서 1mm 높게 설정하였다.

3. 2 용접비드 형상

자동 Orbital TIG 용접방법에서 고펄스 전류는 모재가 완전용융되고 저펄스 전류는 용융된 금속이 응고되는 과정이 반복되므로 용융지의 흘러내림 방지는 직류전류보다 우수하지만 용가재를 사용하지 않는 특성상 용접부 표면은 0.04~0.07mm의 Concavity 현상이 전반적으로 나타났다. 용접부

표면의 Concavity 발생은 모재 표면으로부터 약 2% 정도이며 모재 두께 3.45mm보다 감소는 없으며 오히려 이면비드의 형성으로 용접부 두께가 모재보다 0.15~0.25mm 증가한 3.6~3.7mm로 나타났다. 이것은 튜브 용접의 입열제어 중요성과 관련되는 것으로, 튜브 용접은 입열 누적에 따른 모재 온도의 증가로 인해 용접구간을 두고 입열을 단계적으로 줄여 가는 것이 비드처짐을 방지하고 균일한 비드형상을 유지하였다.

* 용접부 Concavity에 대한 관련 Code
  - ASME VIII, UW-35 Finished Longitudinal And Circumferential Joint
    : 용접부 두께 감소는 0.79mm을 넘지 않거나 평균두께 10%보다 작을 것.
  - AWS Code - Welding Structure 3.6.3(Steel)
    : 모재 두께의 0.79mm 또는 평균두께의 5% 보다 작을것.

3. 3 용접부 시험 결과

(1) 인장시험(Tension Test) : 용접부 인장시편은 튜브 시편을 길이 200mm로 절단하고 Full Section으로 시험하였다. 열영향부에서 파단이 일어났고 인장강도는 571~586MPa로서 튜브 모재 평균 517MPa의 강도보다 우수하게 나타났다.

(2) 굽힘시험(Bend Teat) : 굽힘시험편의 폭은 튜브외경 1/4로 가공하고 Face Bend 2개와 Root Bend 2개로 시험하였으며 No Open Defect로서 용접부 건전성이 확인되었다.

(3) 입계부식 시험(Intergranular Corrosion Teat) : 입계부식 시험은 오스테나이트계 스테인레스강이 예민화 영역(550~950℃)에서 장시간 노출될 경우 입계에서 크롬탄화물($Cr_{23}C_6$)이 석출되어 입계부식균열(Intergranulaur Corrosion Cracking) 등이 발생하므로 이에 대한 감수성 시험을 목적으로 ASTM A262-93의 Practice-A(옥살산 부식시험)와 Practice-E(황산-황산동부식시험)에 따라 실시하였다. Practice-A시험결과 200배율로 확대한 부식면 조직은 Dual Structure와 유사하게 관찰되었고, Practice-E 시험에서는 10배율로 굽힘시험편의 굽힘면을 관찰하였으나 균열이나 은점등의 결함은 발견되지 않았다.

4. 결 론

원자력 발전소의 원자로핵계측 ICI 튜브 보수용접에 적용된 자동 Orbital TIG 용접방식은 협소한 작업공간의 제약조건에 따른 작업수행의 지연과 불안정한 용접품질의 문제점을 가진 수동 TIG 용접방식과 비교하여 더욱 균일하고 안정적인 품질을 확보할 수 있었다. 특히 용가재를 사용하지 않은 기계화된 작업공정은 효율적인 작업진행이 가능함으로 무리없는 공사일정 준수에도 효과를 거둘 수 있었다.

국내 원자력 발전소 보수공사에 이러한 자동 용접방식이 성공적으로 수행됨으로 향후 보수 또는 교체공사 분야에 활발히 전개될 것으로 기대된다.

Table1. Comparison of characteristics Between Square Butt and V-groove Weld Joint

구분	보수 공사	설치 공사
용접조인트	맞대기 용접(Square Butt)	그루브 용접(V Groove)
용가재	Non-filler 적용	Filler Wire 사용
용접패스	1 Pass / 1 Layer	1~2 Pass / Layer
용접조건	정밀 입열제어 요구	입열제어 용이
용접방법	자동방식(Orbital TIG Welding)	수동방식(GTAW)

Table2. Specifications of Mock-up Test Material

구분	재질	사양	수량(EA)
Seal Table	SA240-TP304	Thickness 12.7mm	1
Seal Housing	SA479-TP316	Thickness 3.4mm	45
Guide Tube	SA240-TP316	OD26.67mm x 3.45T	45

Table3. Welding conditions for Experiment

조건 / 그루브	전류(A)	자세	용접속도 (cm/s)	펄스시간 (sec)	보호가스 (kg/cm^2)	내부가스 (kg/cm^2)
Square Butt	High : 75~95 Low : 35~40	2G	5~6	High : 0.7 Low : 0.7	Ar + He (10~13)	Ar (4~6)

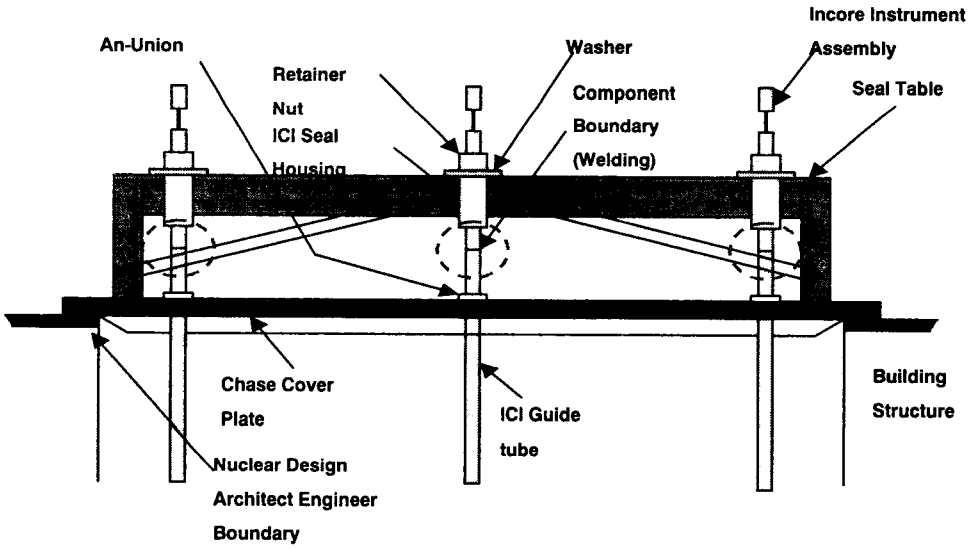

Fig. 1 Configuration of ICI Assembly

[unit : mm]

Fig. 2. The Conditions of Welding

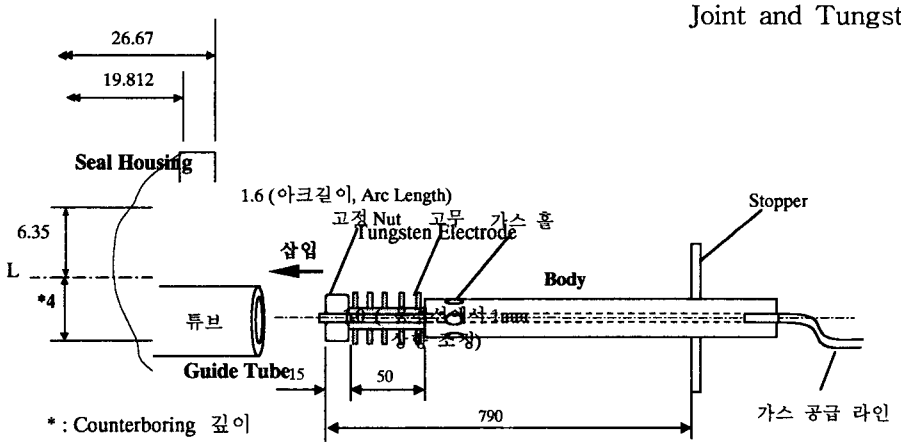

Fig. 3. Special Designed Tool to Purge the Inside of ICI Tubes

Photo. 1. Field Welding

Photo. 2. Mock-up Test

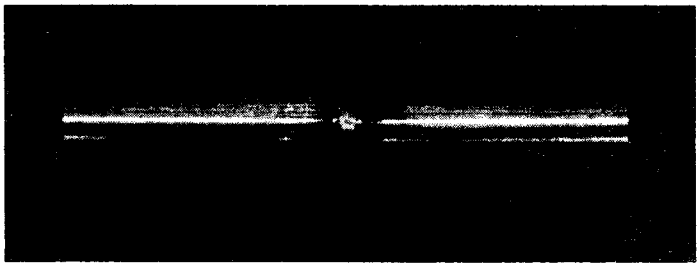

Photo. 3. Welded Tube Specimens

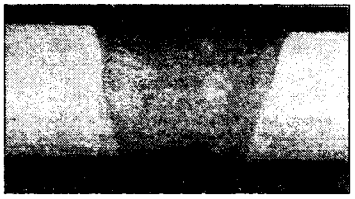

Photo. 4. Macro Structure (x 10.24)