

## 자동 오비탈 TIG 용접기술을 이용한 배관 용접

(The Use of Orbital TIG Welding Process for the Construction and the Repair of Field Piping)

정인철\*, 심덕남\*

\* 두산중공업 기술연구원

**ABSTRACT** Orbital TIG welding process being used for the new construction, the repair of nuclear piping system and other critical piping. When weld quality is important or there are a large number of similar weld to be made or when access is restricted with manual torch, Orbital TIG welding is most effective process because of practical for out-of-position and high weld quality. Furthermore, typically superior to manual TIG welding process where the pipe remains in place and the tungsten electrode orbits the weld. As smaller and more compact welding head is being developed, could operate in tight spaces and lend itself to this type of application better than any other welding process. Orbital TIG welding has become more and more field practical process.

### 1. 서 론

오비탈 용접(Orbital Welding)은 1960년대 초 항공산업분야에 처음 사용되었다가 1970년대 들어 원자력 발전 산업부문의 파이프 용접에 주 적용된 것을 볼 수 있다. 그러나 당시의 오비탈 용접 장치는 가격이 너무 비싸 원자력 발전산업 Piping 시스템 용접부에 대해 요구 규격(Code)을 만족하고서도 널리 보급되지는 못했다.

원자력 발전산업의 신규건설이 점점 줄어드는 1980년대에 이르러, 오비탈 튜브 및 파이프 용접 장치의 적용은 입계응력부식균열(IGSCC)과 같이 가동 중 문제가 야기되어 수정이 요구되는 원자력 Piping 시스템 분야에 정착되었고, 오비탈 TIG(또는 GTAW) 파이프 용접장치는 재순환 루프(Recirculation Loop) 파이프와 Primary 파이프의 교체 및 보수공사의 전 분야에 걸쳐 적용되기 시작했다. 이러한 결과는 1980년대 후반과 1990년 대에 접어 들어 오비탈 TIG 파이프 용접기술의 전파를 더욱 가중시키게 되었고, 고도의 청결이 요구되는 식료품제작 파이프라인에까지 적용분야가 확산되는 효과를 가져 왔다.

근래 오비탈 TIG 용접기술은 반도체, 식품, 약품, 화학, 항공 등 고품질이 요구되는 튜브 및 배관의 용접작업의 표준공법으로 널리 이용되고 있으며 기존의 수동 용접방식과 대비하여 생산성 증가, 품질향상 및 원가절감에 기여하는 프로세

스로서 인정을 받고 있다.

본 원고에서는 이러한 오비탈 TIG 용접프로세스를 이용하여 원자력 발전소의 건설 및 보수분야 공사를 수행한 경험을 바탕으로 실제 현장에서 활용될 수 있는 사례를 통해 배관용접 분야의 기계화/자동화의 적용에 도움이 되고자 한다.

### 2. 시험방법

실제 공사적용을 위한 시험은 크게 용접부에 요구되는 특성의 사전평가를 위한 용접절차인정(Procedure Qualification Test)과 공사에 적용되는 용접기술의 검증에 대한 모의시험(Mock-up Test)의 두 가지로 구분된다.

용접절차인정을 위한 기본적인 시험에는 물성 치 시험(인장, 굽힘, 인성, 화학 등), 비파괴 시험(UT, RT, PT 등)과 조직시험(Macro & Micro) 등이 있으며 이 외에도 추가적으로 적용 Code에서 요구되는 시험(Austenitic Stainless Steel의 경우 Intergranular Corrosion Cracking Test)이나 규제조건(최대 용접 입열량 60KJ/in. 제한)에 따른 시험을 준수해야 한다.

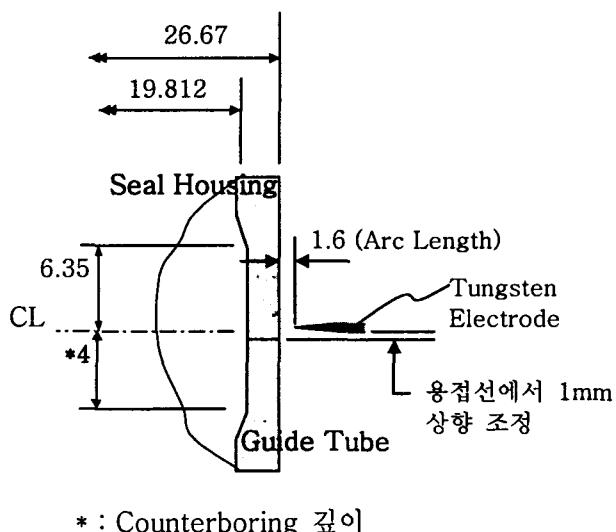
모의시험에서는 공사수행을 위한 해당 시공법의 문제점 도출 및 해결과 전체 용접공정의 적정 여부 등을 평가하고 원자력 공사의 경우에는 Regulatory Guide에서 요구되는 용접사 접근성 시험과 용접변수의 변동여부를 검증해야 한다.

### 3. 시험결과

#### 3.1 원전 핵계측기의 실 하우징 용접

##### 3.1.1 자동 용접공정 수립

실험을 통해 설정된 최적의 용접 조건이 설정되었으며, 용접 조인트의 루트 갭(Root Gap)은 없고 용접헤드를 용접선의 상하에 고정시키므로 가접(Tack Weld)은 생략되었다. 용접헤드 장착 후 튜브 내부 가스 퍼징(Purging)을 위해 실 하우징 입구에서 탈착 가능한 특수 설계 제작된 Tool이 사용되었고 용접진행은 가스 Prepurge→ 아크 발생→ 용접시작→ 용접종료→ 아크 중지→ Postpurge 순으로 시퀀스 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 1.6mm로 비교적 낮게 설정하여 아크 집중력을 높여 비드폭을 줄이고 용입을 강화시켰고 텅스텐봉의 위치는 용접선에서 1mm 높게 설정하였다.



\* : Counterboring 깊이

Fig. 3 The Conditions of Welding Joint and Tungsten Setting

##### 3.1.2 용접부 시험 결과

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

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

3) 입계부식 시험(Intergranular Corrosion Test) : 입계부식 시험은 오스테나이트계 스테인레스강이 예민화 영역(550~950°C)에서 장시간 노출될 경우 입계에서 크롬탄화물(Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>)이 석출되어 입계부식균열(Intergranular 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-A 시험결과 200배율로 확대한 부식면 조직은 Dual Structure와 유사하게 관찰되었고, Practice-E 시험에서는 10배율로 굽힘시험편의 굽힘면을 관찰하였으나 균열이나 은점등의 결함은 발견되지 않았다.

Table1. Welding Parameters

전류(A)	자세	속도(cm/s)	펄스시간(sec)	가스(kg/cm <sup>2</sup> )
High : 75~95			High : 0.7	
Low : 35~40	2G	5~6	Low : 0.7	Ar+He (10~13)

##### 3.1.3 공사 적용

영광 원자력 핵계측기의 실 하우징 교체 공사에 적용된 자동 오비탈 TIG 용접방식을 통해 작업공간의 제약조건에 따른 작업수행의 지연과 불안정한 용접품질의 문제점을 가진 수동 TIG 용접방식과 비교하여 더욱 균일하고 안정적인 품질을 확보하게 되었다. 특히 용가재를 사용하지 않은 기계화된 작업공정은 효율적인 작업진행이 가능함으로 공사일정 준수(설치45일→ 보수 15일)에도 효과를 얻을 수 있었다.

Table2. Comparison of characteristics Between Square Butt and V-groove Weld Joint

구분	보수 공사	설치 공사
용접 조인트	Square Butt	V-groove
용가재	Non-filler 적용	Filler Wire 사용
용접패스	1 Pass / 1 Layer	2Pass / 1 Layer
용접조건	정밀 입열제어	입열제어 용이
용접방법	Orbital TIG Welding	수동 GTAW

### 3.2 원자로 CEDM의 노를 용접

#### 3.2.1 최적변수 및 용접공정 설정

도의실험을 통해 설정된 최적의 가접(Tack Welding)과 Seal 용접 조건을 Table에 나타내었다. 가접은 본 용접의 아크 스타트성에 중요한 영향을 미치므로 가접부 길이는 짧게 하고 이면비드의 형성을 반드시 유지하도록 주의하였다.

용접 공정은 상, 하부 모두 용접 조인트 부분의 이 물질을 제거한 후 수동 GTAW 방식으로 가접을 실시하였다. 용접 조인트는 그루브 내부로 각종 이 물질 유입을 방지하기 위해 보호테이프를 부착한 다음 보호 테이프를 주사바늘로 뚫고 바늘을 통해 아르곤 가스를 충분히 펴징하여 Omega Seal 내부 공간을 채우는 형태로 작업이 진행되었다.

모든 준비 작업이 완료되면 용접헤드를 가이드 링에 장착하고 가이드 링을 따라 용접헤드를 일정 속도로 회전시키면서 Seal 용접을 수행하는데, 이때 공급되는 용접 Wire는 텅스텐 전극봉 팀 위치에서 약간 위쪽으로 송급하여 용착금속의 용입을 강화하였다. 또한 보호 테이프는 용접이 진행되면 작업자가 손으로 조금씩 벗겨주고, 아르곤 가스는 계속 펴징시켜 줌으로써 Seal 내부 산화를 방지하며, 용접이 완료되기 직전 가스 공급용 주사바늘을 제거함으로써 보다 우수한 용접부를 얻을 수 있었다.

Table3. Welding Parameters of Tack Welding

구분	전류 (A)	전압 (V)	용접 조인트	가스 (kg/cm <sup>2</sup> )
상부	46~56	7~9	Single-B	Ar,
하부	65~75	9~12	evel	(8~13)

Table4. Welding Parameters of Omega Seal Welding

구분	전류 (A)	전압 (V)	용접 Wire	가스 (kg/cm <sup>2</sup> )
상부	75~85	7~9	ER316L	Ar,
하부	80~90	9~12	ERNiCr-3	(10~15)

#### 3.2.2 용접부 시험 결과

1) 액체 침투 탐상 검사 : Mock-up 시편에 대해 Omega Seal 용접을 실시한 후 용접부 표면에서의 결함 발생 유무를 확인하기 위한 침투 탐상 검사를 실시하였고, 초기 가접 부위를 포함한 용접 전범위에 걸쳐 특별한 결함은 발생하지 않았다.

2) 조직 검사 : 상·하부 Seal 용접부에서의 Macro 조직 사진을 살펴보면 이면비드의 형성이 양호하고 용착금속부는 어떠한 결함도 발견되지 않았다.

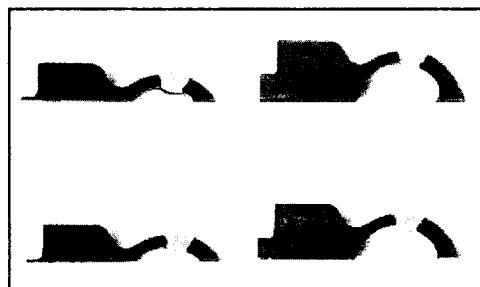


Fig. 4 The Macrostructure of Upper Omega Seal Welding Joint

#### 3.2.3 공사 적용

영광 및 울진 원자력 핵연료 제어봉 구동 장치의 Omega Seal 용접은 시험을 통해 확립된 오비탈 TIG 용접공정 및 최적변수를 바탕으로 수동 용접사를 대신하여 효율적인 작업수행이 가능하게 되었고, 또한 수동작업 방식보다 더욱 균일하고 우수한 용접부 품질을 얻을 수 있게 되었다.

## 4. 결 론

원자력 발전분야와 같이 많은 배관라인의 구조물이 설치되는 현장공사조건에서 오비탈 TIG 용접기술은 점차 초기의 설비투자비에 비해 생산성 향상을 통한 제작비용 절감효과, 불량률 감소로 인한 용접품질 우수 그리고 고기량 용접사를 대신할 수 있는 최적의 공정으로 인식되고 있다.

따라서 자동 오비탈 TIG 용접기술은

- 1) 기계화/자동화된 용접기술의 요구 증대에 대한 생산성 만족
- 2) 수동방식보다 균일하고 안정된 용접품질 획득 및 작업공기 단축 가능
- 3) 용접사 확보 용이 등의 장점이 있으며,

발전소나 생산공장의 주요기기의 보수 및 교체공사로부터 건설현장의 설치 시공분야로 적용범위가 점차 확대되어 갈 것이다.