

# 내외부 이중튜브구조를 갖는 핵연료봉의 봉단마개 용접시험 평가

김수성<sup>†</sup> · 김종현 · 김형규\*

## Evaluation of Endcap Welding Test for a Nuclear Fuel Rod having External and Internal Tube Structure

Kim Soo-Sung, Kim Jong-Hun and Kim Hyung-Kyu

**Key Words:** TIG Arc Welding(텅스텐인너트가스 아크용접), STS 316L(316L 스테인리스강), Endcap(봉단마개), Outer Cladding Tube(외부 피복관), Inner Cladding Tube(내부 피복관), Penetration Depth(용입)

### Abstract

An irradiation test of a nuclear fuel rod having external and internal tube structure was planned for a performance. To establish fabrication process satisfying the requirements of irradiation test, micro-TIG welding system for fuel rods was developed, and preliminary welding experiments for optimizing process conditions of fuel rod was performed. Fuel rods with 15.9mm diameter and 0.57mm wall thickness of cladding tubes and end caps have been used and optimum conditions of endcap welding have been selected. In this experiment, the qualification test was performed by tensile tests, helium leak inspections, and metallography examinations to qualify the endcap welding procedure. The soundness of the welds quality of a dual cooled fuel rods has been confirmed by mechanical tests and microstructural examinations.

#### 기호설명

TIG Arc Welding : 가스텅스텐아크용접  
STS 316L : 316L 스테인레스강  
Endcap : 봉단마개

### 1. 서론

핵연료 성능평가 방법의 하나로서 연구용 원자로에서 연료봉을 연소시켜 연료 성능을 분석하게 된다. 이때 연소시킬 연료의 종류와 연소 계획에 따라 사전에 조사 캡슐이 제작되고, 이 캡슐에

장착될 조사시험용 연료봉을 제조하게 된다. 본 실험에서는 조사시험의 설계 사양에 맞는 연료봉의 endcap 용접이 수행되었고,<sup>[1]</sup> 이에 따른 연료봉의 밀봉용접을 위한 micro-TIG 용접기가 개발되었으며, 또한 STS 316L endcap 용접의 적절한 변수를 선정하기 위해 예비실험이 수행되었다. 아울러 TIG 방식을 이용한 상단 모서리용접에 활용하기 위한 welding parameter를 조사하였고, 각 시편별 비드와 용접단면을 관찰하였다. 따라서 본 실험결과를 바탕으로 조사시험용 연료봉을 제조할 수 있는 endcap 용접의 기본 자료를 제공하였고, 조사시험용 연료봉의 사양을 만족할 수 있는 이음 설계, 전용 용접기의 구성, 조사연료봉 용접을 위한 변수 선정, 그리고 연료봉 용접의 자격화 시험 및 연료봉 샘플을 제조하였다.

### 2. 시편 및 실험방법

#### 2.1 용접시편

본 실험에 사용된 시편은 Fig. 1과 같이 외경

<sup>†</sup> 정회원, 한국원자력연구원

E-mail : sskim7@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-8844 FAX : (042)868-8824

\* 정회원, 한국원자력연구원

15.9mm 두께 0.57mm인 STS 316L cladding tube와 외경 15.9mm, 내경 9.0mm인 endcap이 사용되었다. 연료봉 용접 전에 cladding tube와 end-plug에 존재하는 이물질 제거를 위하여 아세톤 용액에 30분간 담구어 세척한 다음 dry oven에 의해 60°C로 건조시켰다.

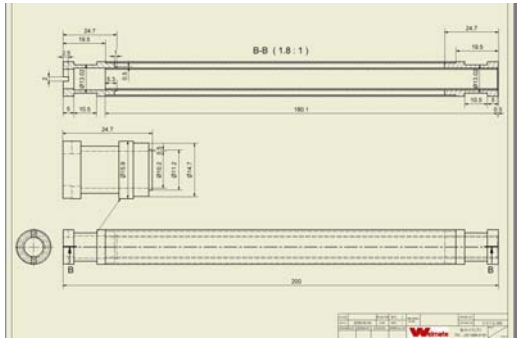


Fig. 1 Geometry of SUS 316 weld specimen.

## 2.2 실험장비 및 실험방법

Fig. 2의 연료봉 용접기는 TIG 방식으로 He 불활성가스 분위기에서 비소모성 텅스텐 전극과 모재 사이에 아크(arc)를 발생시켜 용융하는 방법으로 전원 공급부(모델명: TW-10-100)와 용접제어부로 구성되었다. 이때 아크 전류와 용접시간을 프로그래밍하여 출력제어가 가능한 upslope 및 downslope 기능이 포함되어 있고, 아크 발생부터 아크 정지까지 각 공정단계에서 자동으로 조절할 수 있다.



Fig. 2 Photography of the GTA welding chamber.

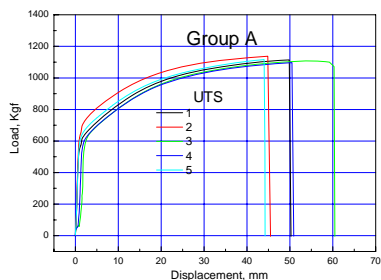
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 연료봉 봉단마개 용접시편 결과 및 분석

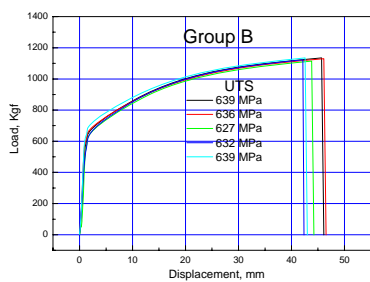
핵연료봉 조사시험용 endcap 용접을 위한 예비 실험과 mock-up sample 실험에서 TIG용접된 시편을 외관검사, 인장시험, 용접단면 및 미세조직 관찰을 통해 welding parameter를 조사하였다. 조건별에 따른 상단 butt 용접의 외관 형상과 용접단면의 결과는 Fig. 3에서와 같이 대체로 양호하게 나타났고 연료봉의 원주용접의 단면 결과는 cladding tube의 두께 이상으로 나타났으며, 또한 용접비드에 대한 열 변형(concave)이 거의 없음을 알 수 있었다. TIG 용접 및 EB 용접을 이용한 STS 316L 피복관 및 endcap (group A=corner joint, Group B=lap joint 및 Group C=butt joint) 구성하는 인장시험의 기계적 시험에서는 Fig. 4와 같이 상온에서 인장시험한 후 인장강도를 보여주고 있다. 여기서 용접시편의 인장강도는 ASTM A240의 기준치 49 kg/mm<sup>2</sup> 보다 모두 높았으며, Fig. 5는 인장시험 후 파단된 상부 butt 용접시편을 보여주고 있다. 그리고 TIG 용접을 이용한 STS 316L 용접부의 조직관찰에서는 Fig. 6과 같이 모재(base metal), 열영향부(Heat Affected Zone) 및 용접금속(weld metal) 순으로 나타났으며, 용접금속에는 결함이 없는 미세조직으로 상단에서 중앙부로 대부분 등축정(equiaxed grain)으로 관찰되었고, 열영향부와 모재에서 용접금속으로 갈수록 결정립의 성장(Grain Growth)이 전형적으로 나타내고 있다. 여기서 결정립의 성장은 가열온도에서 가장 온도가 높게 작용되는 용융되거나 용융되지 않은 금속이 존재하는 용융선(Fusion Line)에 가장 근접된 영역에서 일어났으며, 이러한 현상은 결정립의 성장에 중요하게 영향을 주어서 TIG 용접과 같은 용융용접(fusion welding)에서 초기응고가 전형적으로 등축적인 성장이 발생하게 된 것이다.



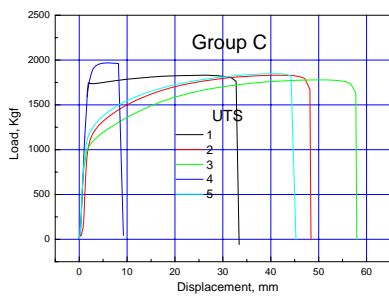
Fig. 3 Macro-sections of STS 316L endcap welds with dual rod specimens.



(Group A : corner joint)



(Group B : lap joint)



(Group C : butt joint)

Fig. 4 Stress-strain curves for STS 316L welded specimens with Group A, B and C.



Fig. 5 Photographs of fractured tensile specimen using upper butt welding.

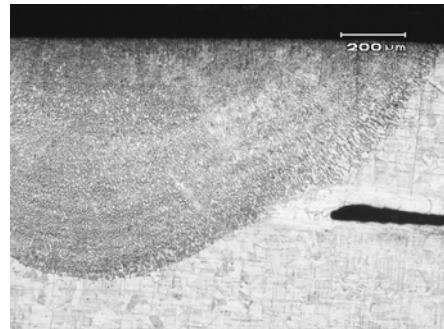


Fig. 6 Micro-structures of TIG welded specimen.

### 3.2 용접공정 자격화 및 연료봉 샘플 제조

핵연료 캡슐제작을 위한 조사시험용 연료봉용 접의 예비실험을 바탕으로 STS 316L 피복관에 소결체를 장진하여 마지막 공정인 endcap용접을 하게 된다. 앞에서 기술된 내용과 같이 STS 316L 피복관 외경19.5mm, 두께0.57mm인 연료봉과 상하부 endcap을 구성하는 연료봉용접의 최적 공정 조건이 선정되었으며, 아울러 내측 피복관과 endcap용접에서도 정밀하게 EB(전자빔) 용접할 수 있는 연료봉의 공정조건이 제시되었으며, 또한 조사시험용 연료봉의 이음설계 및 전용 용접 장치가 확립되었다. 그리고 조사시험용 용접자격화의 공정시방서에 따라 용접샘플이 제작되었고, 각각의 endcap 용접부에 대한 치수검사, He 누출 시험 및 단면 조직검사가 수행되었다. 이것은 핵연료성능 캡슐제작을 위한 연료봉의 용접자격화 시험이 수행된 것으로, 각각의 용접시편에 대한 결과는 양호하게 나타났다. 따라서 본 자격화 시험의 WPS 및 PQT 승인절차에 따라 조사시험용 연료봉을 제조하였다. 향후 다양한 핵연료 개발을 위한 캡슐 조사시험을 위해 자격화된 공정 조건으로 봉단 연료봉을 제조할 수 있게 되었다.

## 4. 결론

본 실험에서는 내외부의 이중튜브구조를 갖는 새로운 핵연료봉의 조사시험용 endcap 용접을 위한 공정조건, 이음설계, TIG 용접기 및 진공챔버 설계 및 제작과 아울러 주요 변수들이 선정되어 신뢰성 있는 용접조건을 사전에 확립하여 용접공정의 자격화하기 위한 것으로 실험결과 및 연료봉 제조 관련하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. STS 316L 피복관을 이용한 외경 19.5 mm, 두께 0.57 mm인 butt용접인 경우 부분 용접단계에서 전류 40A-5A-40Hz-60%에서 적절한 용입을 얻었다.

2. 인장시편의 기계적 시험에서는 인장강도 모두 ASTM A240의 기준치 49 kg/mm<sup>2</sup> 이상으로 나타났으며, 또한 내측 endcap 용접의 EB 인장시편에서도 기준치 이상으로 나타나 모두 양호한 결과치를 얻었다.

3. STS 316L 하부 Corner용접의 적정 용입을 위해서는 weld head torch를 45° 고정하여 용접전류 28A 회전속도 4.5rpm, 40Hz, 및 60% 에서 만족한 결과를 얻었다.

4. 연료봉 용접의 mock-up sample 실험을 바탕으로 핵연료 캡슐제작을 위한 연료봉 용접자격화 시험이 수행되었으며, 조사시험용 endcap용접에 적용시켜 성공적으로 이중튜브 구조를 갖는 연료봉용접을 수행하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업에서 이중냉각 핵연료 구조설계 기술개발과제의 일환으로 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) J. Saito, M. Shimizu "Development of Re-instrumentation Technology for Irradiated Fuel Rod," The 2nd KAERI -JAERI Joint Seminar on PIE Tech., pp.125 (1995)