

## 하나로 핵연료 및 캡슐의 중심축 용접부 인장시험

### Tension Test of Central Rod Welded Section of the HANARO Fuel and the Capsule

김대호, 이찬복, 방제건, 김영민, 정연호, 양용식, 허성필

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

하나로 핵연료집합체 및 조사시험용 캡슐의 중심에 Central Rod를 사용하게 되며  $\phi$  8mm 환봉에 Rod Tip을 용접하게 된다. 전자빔에 의해 용접된 부위에 대한 인장시험을 수행하여 용접전 가공상태에 따라 최대인장응력을 측정하여 가공방법의 영향을 평가하였다. 나선형태의 체결방법과 원반형 체결상태에서 전자빔 용접후 인장시험을 수행한 결과 나선형 체결상태에서 용접한 경우 최대강도는  $429 \text{ N/mm}^2$ 이었으며,  $\phi$ 4mm 원반형태 체결상태에서 용접한 것은  $475 \text{ N/mm}^2$ 으로써 Central Rod의 인장강도 설계요건을 모두 만족시켰다.

#### Abstract

The central rod in HANARO fuel assembly and irradiation capsule is manufactured by electron beam welding of  $\phi$ 8mm rod and rod tip. Effects of pre-welding joint of the welding specimens were evaluated by tensile tests of the welded specimen. The screw type pre-welding joint gives the tensile strength of  $429 \text{ N/mm}^2$  while disk shape joint gives the tensile strength  $475 \text{ N/mm}^2$ . Therefore, both pre-welding joint methods of the central rod satisfied the design requirement of the tensile strength.

## 1. 서 론

하나로 18봉 및 36봉 핵연료집합체[1] 및 대부분의 하나로를 이용한 조사시험용 계장/무계장캡슐[2,3]은 그림 1과 같은 동일한 형태의 central rod를 사용하게 된다. 일반적으로 하나로내에서 안전 취급조건에 부합되도록 설계·제작되어 사용하고 있다. central rod는 하나로 핵연료나 캡슐에서 집합체의 기본골격을 유지하는 척추뼈와 같은 역할을 한다. 하나로 연료의 경우 핵연료봉을 이어주는 그리드와 연결되어 중심 구조재 기능을 함으로서 central rod에 용접되어 붙어 있는 rod tip을 하나로 노심바닥에 있는 spider cup의 구조물에 고정시켜 핵연료집합체가 수직선상에서 진동과 흔들림이 없도록 유지하는 역할을 한다. 캡슐이나 리그의 경우 시험시편 또는 시험봉 집합체를 보호하기 위해 하나로 18봉 또는 36봉 핵연료와 유사하도록 알루미늄 튜브를 이용하여 외곽의 형태를 만들게 되고 central rod에 의해 중심축 역할을 수행하게 된다. 일반적으로 central rod를 rod tip과 일체형으로 제작하는 것이 바람직하나  $\Phi 8\text{mm}$  환봉에 rod tip을 가공하여 용접하여 사용하는 것이 경제적이고 기술적인 측면에서 central rod의 직진도 유지를 위해서도 용접하여 사용하는 것이 합리적인 방법이다. 그러나 하나로 핵연료 제조분야와 캡슐 또는 리그를 제작하는 분야에 따라 용접전 가공조건의 차이가 있어 실제 압축하중은 취급하중을 충분히 넘는 범위를 나타내고 있으나 인장하중은 용접전 가공상태에 따라 차이를 보이게 된다.

용접은 전자빔을 이용한 용접으로 그림 1에서 보는 것과 같이 용접깊이[4]를 3.5mm 이상으로 용접함으로써 용접부위는 견고한 상태로 용접이 수행된다. 그러나 용접전 central rod와 rod tip사이의 가공상태가 나사식 또는 원반형 형태의 체결상태에 따라 central rod가 받는 인장하중의 정도는 서로 조금씩 차이를 보이게 된다. 따라서 기존의 central rod와 rod tip 사이의 용접전 체결상태와 변경된 하나로 핵연료의 가공조건에서 인장시험을 통하여 비교·분석을 수행하였다.

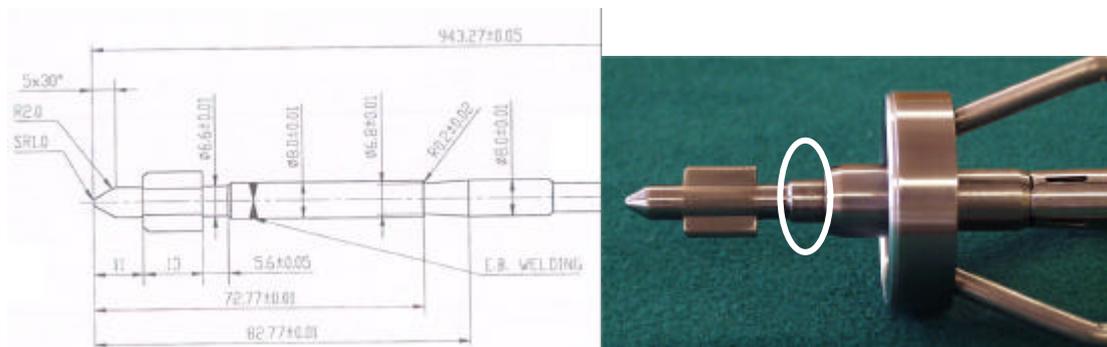


그림 1. Central Rod와 Rod Tip의 용접부위 도면 및 사진

## 2. 시편 제조 및 시험방법

## 2.1 시편

시편은 Zircaloy-4 R60804를 이용하여 그림 2와 같이 나사식으로 체결된 시편과 원반 형태로 체결된 시편 2종을 용접조건에 맞춰 각 5개씩 제조한다.



그림 2. 시험시편 개략도 및 사진

## 2.2 용접조건 및 방법

Central rod와 rod tip사이의 용접은 전자빔 용접(Electron Beam Welding)을 시행한다. 용접조건 표 1과 같이 Zircaloy-4를 EB 용접할 때에는 재료가 쉽게 산화가 잘되는 금속이므로 gun은  $10^{-6}$ Torr, chamber은  $10^{-4}$  Torr이하의 진공도에서 용접해야 하며( $10^{-3}$ Torr으로 운전 시에는 진공도를 1시간 이상 유지시킨 후 용접할 것) 용접 후 10분 이상 진공도를 유지한 후 알곤가스를 주입하여 냉각한다. 용접 후 표면에 언더컷 등 표면결함이 없고 직진도가 0.05mm/1000mm 이내로 유지하여야 하며 용입 깊이는 표면으로부터 3.5mm 이상이 되어야 한다. 2종류의 시편 10개에 대해 용접상태를 검사하고 X-ray 촬영을 통하여 기록을 유지한다.

표 1. Central rod와 Rod tip(Zircaloy-4)의 EB 용접조건

구 분	I (Zircaloy-4)	II(Inconel)	비 고
Accelration Voltage(kV)	50	150	
Beam Current(mA)	3.1	1.4	
Focus Current(mA)	600	598	
Focus Distance(mm)	160	165	
Welding Speed(mm/min)	400	240	
Vacuum(Torr)	$5 \times 10^{-4}$		

## 2.3 시험방법

시험은 그림 3과 같이 10톤 용량의 상·고온 압축 인장시험기(DTU-900MLC10T)를 이용하여 상온에서 인장시험을 수행하고 Data는 DAS 장비를 이용하여 자동 취득토록 한다. 2종류의 시편을 시험전 용접상태를 검사하고 인장시험기 양쪽에 치구를 이용하여 용접부위가 풀리지 않도록 고정시킨다. 시험속도는 1.3 mm/min으로 파단까지 각 5개씩 차례대로 인장시험을 수행하여 항복강도, 최대응력 및 파단지점에서의 연신율을 DAS장비를 이용하여 자동취득한다.

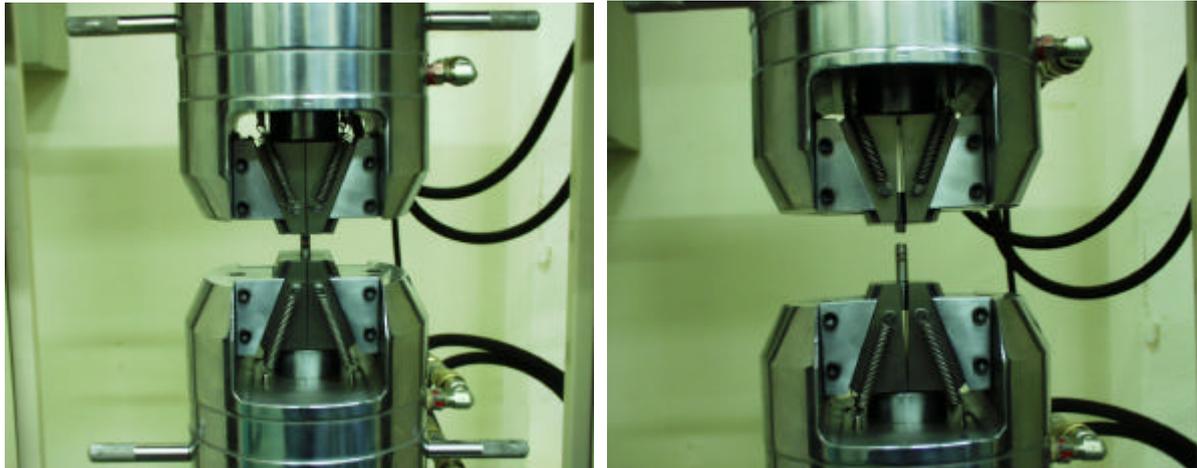


그림 3. 인장시험기에 장착된 시편사진

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 최대응력

시험결과 나사식과 원반형의 체결상태에서 용접된 central rod의 인장시험결과 표 2와 표 3과 같이 정리되었다. 시험결과는 최대하중 및 강도와 파단지점에서의 연신율을 확인하였다. 아울러, 시험결과는 그림 4와 같다.

표 2. 나사식 시편의 인장시험결과

시편번호	최대지점		파단지점		비 고
	하중(kgf)	강도(N/mm <sup>2</sup> )	하중(kgf)	연신율(%)	
No. 10	2,164	422	2,006	8.28	
No. 9	2,220	433	2,009	8.76	
No. 8	2,192	428	2,048	8.56	
No. 7	2,208	431	2,087	8.48	
No. 6	2,204	430	2,011	8.40	

표 3. 원반형 시편의 인장시험결과

시험번호	최대지점		파단지점		비 고
	하중(kgf)	강도(N/mm <sup>2</sup> )	하중(kgf)	연신율(%)	
No. 1	ERROR	ERROR	ERROR	ERROR	
No. 2	2,421	472	2,064	6.68	
No. 3	2,429	474	2,097	6.80	
No. 4	2,421	472	2,126	6.60	
No. 5	2,474	483	2,036	7.40	

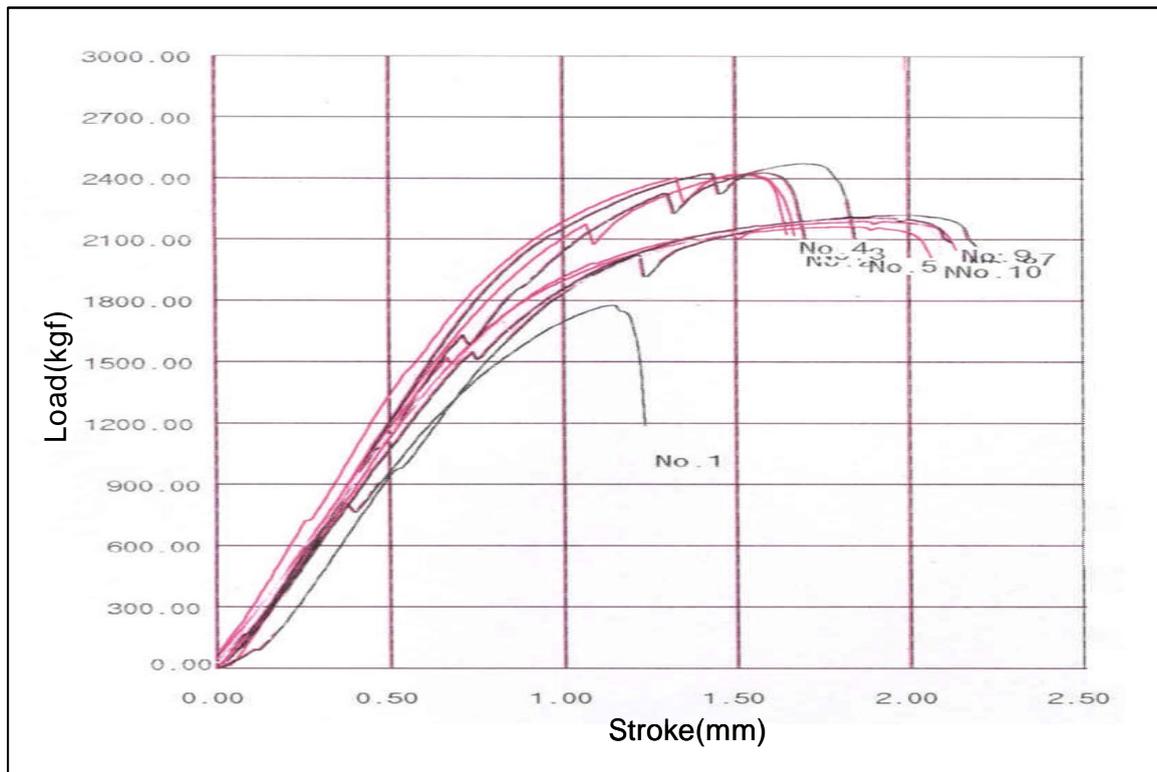


그림 4. 나사식 및 원반형 체결방법에 대한 용접부 인장시험결과

### 3.2 결과

시험결과 원반형의 용접전 체결형태가 최대강도가 나사식 체결방법보다 약간 강한편으로 나타났다. 그림 4와 같이 나사식의 경우 최대강도는 평균 429 N/mm<sup>2</sup> 이었으며 원반형 형태의 체결의 경우 최대강도는 평균 475 N/mm<sup>2</sup>로 2종의 시험 모두 하나로 취급조건에 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 그림 5와 같이 시험사진에서 보듯이 시험모두는 용접부위에서 파단되지 않고 가공상태에서 가장 취약한 단면에서 파단이 일어났다. 특히 사항으로 나사식 체결상태에서는 원반형 체결상태보다 약간 높은 연신율을 보였다. 나사식의 경우 8.5 %의 연신율로 나타났으며 이때 하중은 2,044 kgf이었다. 반면에 원반형 체결상태에서는 6.85 %의 연신율로 이때의 하중은 2,081 kgf이었다. 인장에 따른 연신율로

는 나사식이 약간 우수한 결과를 보였다. 실제 하나로 핵연료나 캡슐 또는 리그의 central rod의 건전성이 어느 측면에서 최적화가 되어야 하는가에 초점을 두고 개발되어져야 한다. 강도 측면에서 보강이 필요할 경우 용접전 체결상태를 보다 단면적을 충분하게 확보 되어야 하며 이를 위해서는 용접전 가공방법은 보다 작은 원반형형태의 체결방법이 유리 할 것으로 판단된다. 아울러, 인장시험에 대한 단편적인 연구결과 제시한 것에 불과하며 고려되어야 할 많은 소요가 있을 것으로 판단된다. 따라서 활용분야의 적용성을 고려하여 최적화된 용접방법을 도출하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

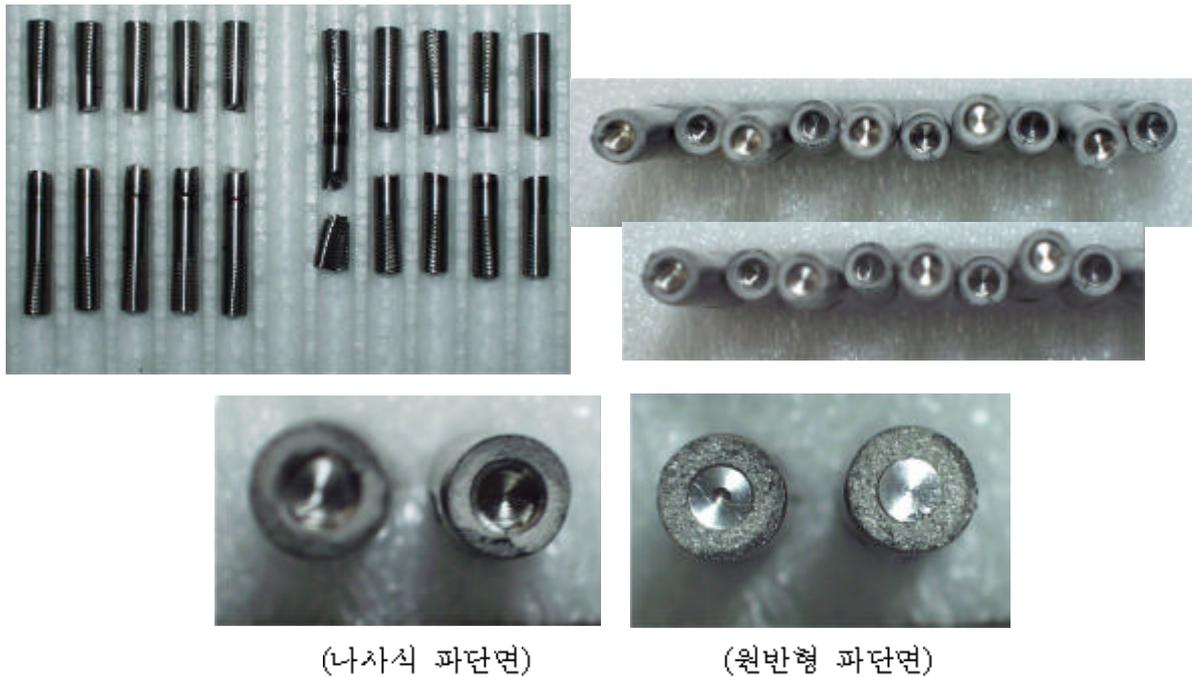


그림 5. 인장시험후 시편 및 파단면 사진

#### 4. 결 론

하나로 핵연료집합체 및 일부 조사시험을 위해 사용되는 캡슐 중심에 central rod를 사용하게 되며  $\phi 8\text{mm}$  환봉에 spider cup에 체결될 수 있도록 설계된 rod tip을 용접하게 된다. 이때 전자빔에 의해 용접된 부위에 대한 인장시험을 수행하여 용접전 가공상태에 따라 최대인장응력을 측정하여 최적의 가공방법을 도출하였다. 하나로 핵연료의 설계변경된 나사형태의 체결방법 용접후 인장시험을 실시한 결과 파단시 최대강도는  $429 \text{ N/mm}^2$  이었으며 이때 하중은 2,198 kgf이다. 기존의 원반형 체결상태에서 전자빔 용접상태에서 인장시험을 수행한 결과 파단전 최대강도는  $475 \text{ N/mm}^2$ 이었으며 이때 하중은 2,436 kgf이다. 연신율로는 나사형태의 용접부가 원반형보다는 약간 높은 연신율을 보였다. 실제 하나로 핵연료나 캡슐 또는 리그의 central rod의 건전성이 어느 측면에서 최적화가 되어야 하는가에 초점을 두고 개발되어져야 한다. 강도 측면에서 보강이 필요할 경우 용접전 체결상태를 보다 단면적을 충분하게 확보되어야 하며 이를 위해서는 용접전 가공방법은 보

다 작은 원반형 형태의 체결방법이 유리할 것으로 판단된다. 아울러, 본 인장시험은 단편적인 시험결과를 제시한 것에 불과하며 고려되어야 할 많은 소요가 있을 것으로 판단되고 활용분야의 최적화된 용접방법을 도출하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

## 5. 후기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력연구개발 중장기계획사업의 지원으로 수행되었다.

## 6. 참고문헌

- [1] 하나로 18봉 핵연료집합체 도면, AECL37-37000-102-01-GA-A0 Division 10, 2001. 2.
- [2] 김대호 외 "경수로용 신형소결체 조사시험용 무게장캡슐 설계 및 제작", KAERI/TR-2117/2002, 2002. 4.
- [3] 배기광 외 "DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안전성분석보고서," KAERI/TR-1157/98, 1998.10.
- [4] 김대호 "경수로용 신형소결체 노내 조사시험용 무게장캡슐 및 안내관 제작구매시방서", APFCAP-PS-01-01, 2001. 11.