

경수로용 원전연료집합체에서의 용접부위 및 건전성 시험

Welding Parts and Integrity Test in a PWR Fuel Assembly

송기남[†]*, 윤경호^{**}, 강홍석^{**}

* 한국원자력연구소

** 한국원자력연구소

ABSTRACT : The fuel assemblies as the nuclear fuel for the pressurized water reactor(PWR) are loaded in the reactor core throughout the residence time of three to five years. The fuel assembly is manufactured using special welding processes and under strict quality assurance and control systems. In this paper welding parts, welding methods, and welding tests for the integrity of the PWR fuel assemblies are introduced.

1. 서 론

우리나라에서 원자력 발전은 전체 발전량의 약 40 % 이상을 차지하는 기간 전력원이다. 근래에 원자력 발전과정에서 발생하는 원전수거물에 대한 저장시설 유치문제로 인하여 반핵 단체를 중심으로 한 일부 여론에서 원자력 발전의 유용성에 대한 의구심을 제기하며 대체에너지원 개발을 주장하고 있으나 우리나라와 같이 전력 부족자원이 풍부하지 않은 나라에서 산업생산 증대 및 국민 삶의 질 향상에 절대적으로 기여하는 전력 공급원으로서 원자력 발전은 향후에도 지속되고 더욱 증대되어야 할 것이다. 우리나라 원자력 발전량의 약 80 % 이상이 가압경수로(PWR)에 의한 것이며 우리나라에서 널리 사용되는 가압경수로용 원전연료 중에 하나인 웨스팅하우스형 원전연료는 Fig. 1과 같이 가로 및 세로 길이가 약 200 mm이고 축방향 길이가 약 4000 mm인 구조물이다. 이 원전연료는 Fig. 1에서 보듯이 상단고정체 및 하단고정체가 각각 1개, 지지격자 8개, 안내관 24개, 계측관 1개 그리고 연료봉 264개로 구성되어 있고 연료봉 속에는 핵분열에 의해 열을 생산하는 이산화우라늄(UO₂) 소결체(직경 약 8 mm, 길이 약 10 mm 정도의 원기둥형 소결체 들이 두께 약 0.6 mm인 피복관 속에 내장됨)가 얇은 피

복관속에 내장되어 있다. 경수로용 원전연료는 보통 3~5년 동안 원자로에 장전되며 지지격자의 격자(cell)내에 삽입되어 매달려있는 연료봉 사이로(간격 약 3 mm) 흐르는 1차 냉각수로 열이 전달되고 열교환기를 통하여 2차 냉각수 회로를

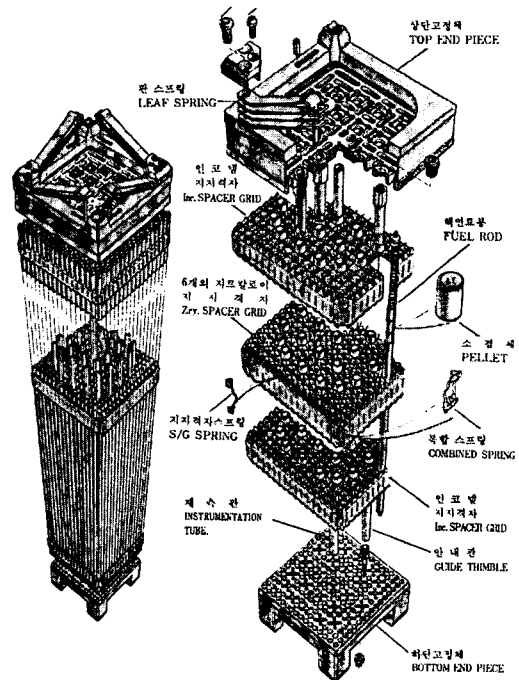


Fig. 1 Fuel Assembly for Westinghouse-type Plant.

순환하는 2차 냉각수로 열을 전달하며 궁극적으로는 2차 냉각수가 수증기화하여 터빈을 돌려서 전기를 생산한다.

2. 용접부위 및 건전성 시험

2.1 상단고정체 및 하단고정체의 용접

상단고정체와 하단고정체는 Fig. 1에서 보듯이 경수로용 원전연료집합체의 최상부 및 최하부에 위치한 구조물로서 상·하 방향에서 원전연료에 가해지는 하중과 원자로 노심내를 돌아다닐 수 있는 이물질(볼트, 나사 및 기타 기계가공물)로부터 연료봉을 보호하며 원전연료집합체의 수로(channel)를 따라 흐르는 냉각수를 균일하게 흐르도록 분배하는 기능을 갖는다. 상·하단고정체의 재질은 보통 SUS 304나 316계열이 사용되고 있으며 유동판, 들레판, 다리, 고정쇠 등으로 구성된 부품들을 결합하기 위해 초창기에는 TiG 용접이 사용되다가 근래에는 전자빔 용접이나 고정체 일부 혹은 전부를 정밀주조방법으로 주조하여 사용되고 있다. 전자빔 용접부위에 대한 시험 및 검사로는 제조자에 대한 자격인증시험단계에서^(1,2) 용접부 외관검사, 표면균열검사(dye-penetration test), 용접부 단면에 대한 미세조직검사(조직 및 용융도 검사, 입계부식시험 등)과 인장시험 등을 시행하여 용접부의 건전성 여부를 평가한다.

2.2 연료봉의 용접

연료봉은 Fig. 1에서 보듯이 바깥지름 약 9~10 mm, 두께 0.6~0.7 mm인 Zircaloy 계열(Zirconium 합금)의 피복관속에 UO₂ 소결체와 He 기체가 내장하고 있으며 피복관 상·하단에 피복관과 동일한 Zircaloy 계열로 가공된 봉단마개가 저항용접(resistance welding)되어 있는 부품이다. 연료봉속에는 원자로 운전중/후에 UO₂ 소결체에서 발생한 핵분열생성물(fission products)이 내장되어 있으므로 연료봉의 건전성 특히 용접부의 건전성은 매우 중요하다. 용접부위에 대한 시험 및 검사⁽³⁾로는 내압시험(burst test), 용접부 단면에 대한 미세조직검사, 고온 부식시험, 헬륨기체 누설검사, 육안검사 등을 시행하여 용접건전성 여부를 평가한다. 특히 연료봉은 자격인증시험이 완료된 이후에도

(전극교환 후, 용접기 수정 후 및 매일 상용 용접시작전 등) 시편을 채취하여 내압시험, 미세조직시험 등을 추가로 수행하고 있다.

2.3 지지격자의 용접

Fig. 2는 지지격자를 개략적으로 나타낸 것인데 지지격자는 홈이 있는 격자판들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판의 교차점을 용접한 달걀바구니(egg-crate) 형상의 구조물이다. 지지격자의 각 격자에는 stamping으로 형성된 판형의 스프링과 덤플이 돌출되어 있어서 격자 안으로 연료봉이 삽입되면 스프링의 변형에 의한 스프링력의 마찰력으로 연료봉을 지지하고 있는데, 원자로 운전 중에 격자의 연료봉 지지력은 원자로심내의 여러 운전환경조건들에 의해 초기 지지력에 비해 크게 감소하고 있다. 즉, 중성자 조사에 의한 stress relaxation(응력이완)과 연료봉 직경의 변화(감소)로 인하여 원전연료가 원자로에 장전된 지 1년 이내에 이미 초기 스프링력의 90% 이상을 잃어버려서⁽⁴⁾ 연료봉 지지력이 크게 감소하는데 심한 경우에는 연료봉을 제대로 지지하지 못하여 연료봉을 지지하는 스프링의 지지력이 zero가 되거나 연료봉과 스프링 사이에서 간극이 발생- 연료봉이 낙하하여 하단 고정체 위에 놓이게 되거나 원자로 노심내를 흐르는 1차 냉각수(초속 5~8m/s)에 의하여 연료봉이 진동함으로써 연료봉 지지부(스프링 및 덤플부위)에서 연료봉이 프레팅 마모(Fig. 3 참조)되어 심한 경우에는 연료봉이 천공되고 핵분열생성물이 1차 냉각수로 누출될 수도 있다.

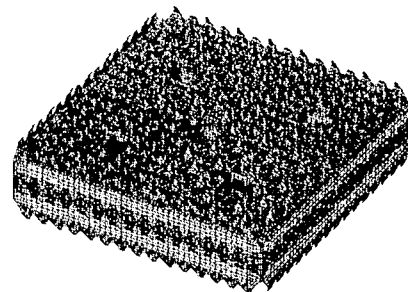


Fig. 2 Spacer Grid Assembly.

한국원자력연구소에서는 1997년부터 독자적으

로 지지격자 형상을 고안하여 15종을 국내·외에 특허출원하고 있고 2003년 9월 현재 6종의 지지격자 고유형상이 미국 및 대한민국에 특허가 등록되어 있으며 9종은 미국, 유럽연합, 중국 및 대한민국에서 특허심사중에 있다. 한국원자력연구소에서 개발한 고유 지지격자는 향후 우리 Brand의 핵연료개발 및 국산화에 초석이 될 것으로 기대된다.

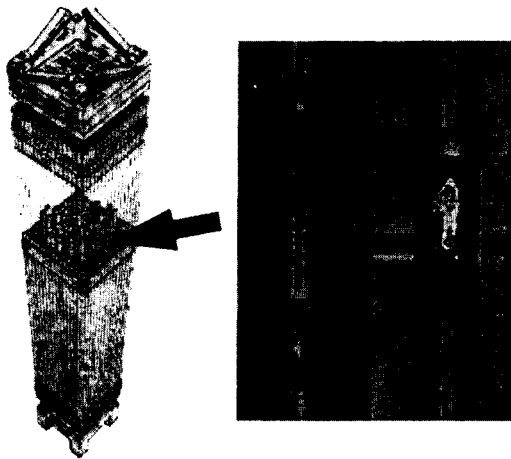


Fig. 3 Fretting Wear Scar at Fuel Rod.

지지격자는 Fig. 1에서 보듯이 연료봉을 지지하는 구조물로서 격자판들이 교차하는 교차점상·하면을 용접하고 있다(Fig. 2참조). 초창기 격자판의 재질로 Inconel이 사용될 때 격자판 사이의 결합에 Brazing을 사용한 적도 있으나 근래에는 중성자 경제성 관점에서 유리한 Zircaloy 계열로 만든 격자판이 널리 사용됨에 따라 격자판 용접에 TiG 용접, 전자빔 용접, 레이저 빔 용접 등의 특수용접법이 사용되고 있다. 용접부위에 대한 시험 및 검사로는⁽⁵⁾ 용접부위에 대한 외관검사, 용접부 종/횡단면에 대한 미세조직검사, 부식 시험후 외관검사 등을 시행하여 용접건전성 여부를 평가한다.

2.4 안내관과 지지격자간의 용접

원자로를 제어하거나 비상조건에서 원자로를 긴급 정지시킬 때 제어봉의 삽입경로를 제공하는 안내관은 지지격자와 연결되어 끌격체 구조물을 형성한다(Fig. 1참조). 안내관과 지지격자 사이의 연결은 점용접, TiG 용접 혹은 전자빔 용접 등이 시행되고 있다. 용접부위에 대한 시험 및 검사로는^(6,7) 표면 외관검사, 용접부 단면의 미

세조직검사, 고온 부식검사, 용접부의 인장검사 등을 시행하여 용접건전성 여부를 평가한다.

3. 결 론

경수로용 원전연료집합체의 용접부위와 용접방법 그리고 용접건전성 평가를 위한 시험 및 검사 방법을 간략히 소개하고 기술하였다.

3~5년 동안 중성자 조사 및 핵분열 등이 발생하는 특수한 환경하에 원전연료집합체 구조물이 기능을 건전하게 유지하기 위해 원전연료집합체 구조물제작에는 특수용접법이 사용되고 엄격한 품질관리, 품질보증 체계하에서 용접건전성 시험 및 검사가 수행되고 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. K. N. Song, "End Pieces(Top End Piece and Bottom End Piece) for PWR Fuel Assemblies," Specification LF-FE 113, KAERI LWR Fuel Div. (1988).
2. K. N. Song, "Electron Beam Welding(EB Welding) and TiG Welding of End Pieces in Stainless Steel," Specification LF-FE 112, KAERI LWR Fuel Div. (1988).
3. D. S. Sohn, "UO₂ Fuel Rods for Pressurized Water Reactors Resistance Welded," Specification LF-FE 125, KAERI LWR Fuel Div. (1988).
4. Kreyns P. H. and Burkart M. W., 1968, "Radiation-enhanced Relaxation in Zircaloy-4 and Zr/2.5 wt % Nb/0.5 wt % Cu Alloys," *J. of Nuclear Materials*, Vol.26, pp. 87~104.
5. I. K. Kim, "TiG Welding of Zry-4 Sheets," Specification LF-FE 114, KAERI LWR Fuel Div. (1988).
6. J. S. Yim, "TiG Welding of Zircaloy Guide Thimbles for PWR Fuel Assemblies," Specification LF-FE 107, KAERI LWR Fuel Div. (1988).
7. S. K. Park, "Spot-welding of Sheets and Tubes," Specification LF-FE 111, KAERI LWR Fuel Div. (1988).