

조사시험용 핵연료봉 용접부 비파괴검사에 관한 연구

A Study on the Non-destructive Inspection for End Closure Welding of Nuclear Fuel Elements for the Irradiation Test

김 응기, 김 수성, 이 철용, 이 도연, 이 정원
한국원자력연구소

ABSTRACT Nuclear fuel elements containing dry recycling nuclear fuel pellets for the irradiation test in a reactor were remotely fabricated from spent PWR fuel materials in a hot cell. End closure welding as well as seal tube welding for thermal sensor of the elements was performed by Nd:YAG laser. The soundness of the end closure welds and seal tube welds for the elements were evaluated by a precise X-ray inspection system composed of a micro-focus X-ray generator with an image intensifier and a real time camera system. Then, helium leak test was performed for the elements. The soundness of the welds of the fuel elements was confirmed by the X-ray inspection and helium leak test. The irradiation test for the fuel elements were successfully completed at the HANARO research reactor.

1. 서 론

경수로 사용후핵연료를 건식으로 재가공하여 중수로 핵연료를 제조하는 건식 재가공 핵연료주기 기술은 핵확산 저항성을 갖추고 있으며 자원을 재활용함으로써 방사성 폐기물을 감소시킬 수 있다[1, 2]. 건식 재가공 핵연료 제조 공정 중 핵연료가 장전된 건식재가공 핵연료봉 끝단은 Nd:YAG 레이저에 의해 핫셀에서 원격으로 밀봉 용접된다[3, 4]. 특히, 원자로에서 조사시험을 수행하기 위해 온도 센서를 장착한 특수한 연료봉을 제조할 필요가 있으며 이 경우에는 한 단면인 Zircaloy-4 재질의 피복관과 봉단마개를 밀봉 용접하며 Zircaloy-4 재질의 seal tube와 tantalum 재질의 온도센서 sheath를 레이저를 이용하여 미세 용접한다.

본 연구에서는 용접 비이드 폭이 1~4 mm에 불과한 용접 영역 내부의 미세결함을 비파괴적으로 검사하고 조사시험용 연료봉 용접부의 건전성을 확인하기 위해 X-선 투과시험과 헬륨누설시험을 적용하였다. 연료봉 용접부에 대해 X-선 투과시험과 헬륨누설시험을 수행함으로써 하나로 원자로 조사시험용 건식재가공 연료봉 용접부의

건전성을 확인하였다.

2. 비파괴검사 장치

조사시험용 연료봉 용접부는 봉단 용접부와 seal tube 용접부로 구성되며 용접부의 결합검사를 위해 X-선 투과 시험 장치와 헬륨누설시험 장치를 개발하고 X-선 투과 시험과 헬륨누설시험을 수행하였다.

2.1 X-선 투과 시험 장치

연료봉 용접부 X-선 장치는 마이크로포커스 X-선 발생장치, X-선 image intensifier, 카메라 및 모니터, 영상처리장치로 구성된다. 마이크로포커스 X-선 발생장치는 20~160 kV의 관전압과 최대 1 mA의 관전류, 그리고 약 10 μ m의 최소 초점 크기를 갖는다. X-선 영상은 image intensifier에 의해 광학영상으로 변환되며, 변환된 광학영상은 모니터에 디스플레이되거나 영상처리장치에서 처리된다.

2.2 헬륨누설시험 장치

헬륨누설시험 장치는 진공챔버, 연결 호스, 글로브 박스 및 헬륨누설 감지기로 구성된다. 핫셀 내부에 설치된 진공챔버는 핫셀 외부에 설치된 헬륨누설 감지기와 진공호스로 연결되며 원격 조작기에 의해 조작이 용이하도록 설계 및 제작되었다. 헬륨누설 감지기는 ALCA TEL의 ASM 180TD 모델이며 진공펌핑 및 헬륨누설률 측정기능을 담당한다. Fig. 2는 핫셀에 설치된 헬륨누설시험 장치를 보여준다.

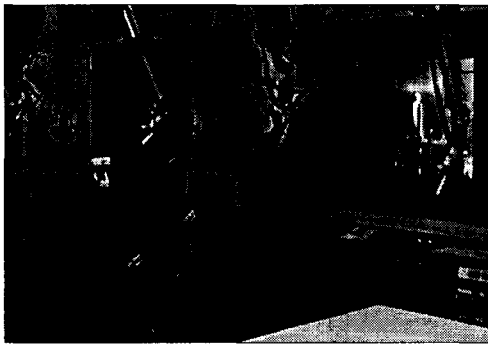


Fig. 2 핫셀에 설치된 헬륨누설시험 장치

3. 연료봉 용접부 검사

3.1 봉단마개 및 seal tube 용접

조사시험용 연료봉은 Zircaloy-4 재질이며 구조 및 제원은 Fig. 3과 같다. 연료봉은 길이 37 cm, 외경 12 mm, 두께 0.66 mm이다. Zircaloy-4 재질의 피복관과 봉단마개는 헬륨분위기의 챔버내에서 광섬유에 의해 전송된 파장 1.06 μm 의 Nd:YAG 레이저빔에 의해 핫셀에서 용접되며, Zircaloy-4 재질의 seal tube와 0.15 mm 두께를 가진 tantalum 재질의 온도센서 sheath는 모의 핫셀에 설치된 레이저 용접장치에 의해 작은 출력으로 미세하게 용접된다.

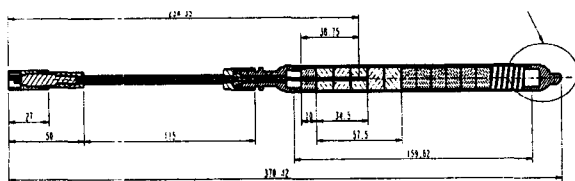


Fig. 3. 계장형 조사시험용 연료봉



Fig. 4. Seal tube 용접 시편

3.2 용접부 X-선 검사

봉단마개 용접부의 X-선 투과 두께는 약 4 mm이며 seal tube 용접부의 X-선 투과 두께는 1 mm 이내이다. 검출 가능한 결함의 크기는 각각 투과 두께의 약 1% 정도인 40 μm 및 10 μm 이다. X-선 발생장치의 관전압과 관전류는 최적의 X-선 영상을 얻기 위하여 각각 140~150 kV, 10~50 μA 범위에서 조정되었으며 초점 크기는 10 μm 이하로 유지되었다.

기존에 설정된 최적 조건하에서 용접한 봉단마개 용접부를 X-선 투과시험한 결과 결함이 관찰되지 않은 양호한 결과를 나타냈다. 반면에 seal tube의 용접에 있어서는 두께가 0.15 mm에 불과한 tantalum 재질의 온도센서 sheath를 zircaloy-4 재질의 seal tube와 용접해야 하기 때문에 최적 용접조건 설정에 많은 어려움이 발생하였다. 최종적으로 레이저빔의 출력을 적절히 제어하여 seal tube를 용접하였으며 X-선 투과시험결과 양호한 결과를 보여주었다. Fig. 5는 seal tube 용접부의 X-선 투과 영상을 보여준다. Zircaloy-4의 밀도는 6.5 g/cm^3 , tantalum은 16.6 g/cm^3 이기 때문에 X-선 투과 영상을 통해 용접부의 건전성을 용이하게 확인할 수 있다. 용접시 zircaloy-4 재질은 tantalum sheath에 침투되어 경계면이 제거되지만 밀도가 작은 zircaloy-4 재질은 짙은 색으로 표현되어 X-선 영상에서 침투 깊이를 명암으로 확인할 수 있었다.

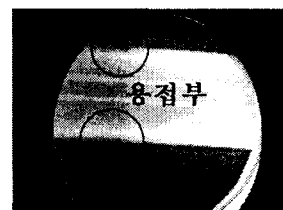


Fig. 5. Seal tube 용접부 X-선 투과 영상

3.3 연료봉 헬륨누설시험

조사시험용 건식재가공 연료봉에 대한 헬륨누설시험 지침으로 중수로형 핵연료봉에 대한 검사지침을 적용하였다. 헬륨누설감지기의 검출감도는 2×10^{-11} mbar.l/s를 나타내 1×10^{-9} mbar.l/s이하의 검사지침을 만족하였다. 대기중의 헬륨이나 누출검사장치에 흡착된 헬륨 등에 의한 배경누설률을 측정된 결과, 5×10^{-7} mbar.l/s 이하이어야 한다는 검사지침도 만족되었다. 합격 및 불합격 판정은 연료봉에 대한 헬륨누설률이 배경 헬륨누설률보다 크면 불합격으로 평가되며 그렇지 않으면 합격으로 판정된다.

본 실험에서는 계장형 조사시험용 연료봉 3개를 제조하였으며 각 연료봉에 대한 헬륨누설시험 결과, 0.1 mbar의 시험압력에서 연료봉의 헬륨누설률은 배경누설률과 같은 5×10^{-7} mbar.l/s를 나타냈으며 0.01 mbar의 시험압력에서 연료봉의 헬륨누설률은 배경누설률과 같은 5×10^{-8} mbar.l/s를 나타냄으로써 용접부의 결함은 없다고 사료되며 본 실험에 사용된 연료봉의 봉단마개 및 seal tube의 레이저 용접부에는 헬륨이 누설될 정도의 큰 결함은 없었다고 판단된다.

4. 결 론

계장형 조사시험용 건식재가공 핵연료봉 용접부의 건전성을 비파괴적으로 평가하기 위하여 X-선 투과시험 방법과 헬륨누설시험 방법을 적용하였다. 봉단마개 및 seal tube 용접부를 세밀하게 검사하고 미세 결함을 검출하기 위해 10 μ m 초점 크기의 마이크로포커스 X-선 검사와 헬륨누설 시험 방법을 적용하여 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 연료봉을 검사하였다. 실험결과를 종합하면 다음과 같다.

1) 최적의 X-선 투과 영상을 얻기 위하여 관전압과 관전류는 각각 140~150 kV, 10~50 μ A 범위에서 조절되었으며 X-선 발생장치의 초점 크기는 10 μ m 이하가 유지되도록 하였다.

2) 봉단마개 및 seal tube 용접부에 대한 X-선 투과시험 결과 기공, 크랙, 용입불량 등의 결함이 발견되지 않아 용접부의 건전성을 확인할 수 있었다.

3) Seal tube 용접부 X-선 투과시험 과정에서 zircaloy-4와 tantalum의 밀도 차이에 따른 영상의 명암 차이에 의해서 용접부의 건전성을 용이하게 확인할 수 있었다.

4) 계장형 조사시험용 연료봉 3개를 제조하고 각 연료봉에 대한 헬륨누설시험 결과, 연료봉의 헬륨누설률은 배경누설률과 같은 값을 나타냄으로써 연료봉의 봉단마개 및 seal tube의 레이저 용접부에는 헬륨이 누설될 정도의 큰 결함은 없었다고 판단된다.

5) X-선 투과시험과 헬륨누설시험을 통해 건전성이 확인된 연료봉은 캡슐로 조립되어 하나로 원자력에서 성공적으로 조사되었다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구소의 자체연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. M. S. Yang etc. : A study on manufacturing and quality control technology of DUPIC fuel, KAERI/RR-1744/96, Korea Atomic Energy Research Institute, (1997), 601-610
2. M. S. Yang etc. : Development of DUPIC fuel fabrication and inspection equipment, KAERI/TR-1319/99, Korea Atomic Energy Research Institute, (1999), 72-75
3. S. S. Kim etc. : A study on the optimum conditions of Nd:YAG LBW for Zircaloy-4 end cap closure by optical fiber transmission, Journal of KWS, Vol. 15, No. 6, (1997), 571-581
4. W. K. Kim etc. : A study on the micro-focus X-ray inspection for confirming the soundness of end closure weld of DUPIC fuel elements, Journal of KWS, Vol. 19, No. 1, (2001), 88-94