

조사시험용 DUPIC 소연료봉 봉단 용접부에 대한 마이크로포커스 X-선 검사기술 개발

Development of the Micro-focus X-ray Inspection Technology of End Closure Weld of DUPIC Fuel Mini-element for Irradiation Test

김웅기, 김수성, 이정원, 양명승

한국원자력연구소

1. 서 론

DUPIC (Direct use of spent PWR fuel in CANDU reactors)은 사용후 PWR 핵연료를 건식으로 재가공하여 중수로 핵연료를 제조하는 비핵확산성 경중수로 연계 핵연료주기기술이다. DUPIC 핵연료 봉단은 TIG 용접 또는 Nd:YAG 레이저용접 방법에 의해 핫셀에서 원격으로 용접된다.^[1~3]

일반적으로 핵연료봉단 용접부의 건전성을 검사하기 위하여 헬륨누출검사, 와전류검사, 초음파검사, X-선 검사와 같은 비파괴검사와 금속학적 조직검사, 기계적 검사와 같은 파괴검사가 수행된다. 각각의 검사방법은 장단점이 있으며 본 연구에서는 용접 비이드 폭이 2~4 mm에 불과한 용접 영역 내부의 미세결함을 비파괴적으로 검사하기 위한 마이크로포커스 X-선 라디오그래피를 연구하였다. X-선 검사시스템은 마이크로포커스 X-선 발생장치, 고분해능 image intensifier 및 비디오 카메라로 구성된다. 개발된 시스템을 이용하여, Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 Zircaloy-4 연료봉과, TIG용접 방법으로 용접된 스테인레스강 연료봉을 검사하였다.

2. X-선 검사시스템 개발

X-선 검사시스템은 마이크로포커스 X-선 발생장치, X-선 image intensifier tube, 카메라, 영상처리 장치 및 연료봉 조작도구를 갖춘 차폐캐비넷으로 구성된다.

X-선 발생장치는 FEINFOCUS의 FXE160.23K 모델이며 20~160 kV의 관전압과 최대 1 mA의 관전류, 그리고 최소 초점의 크기는 약 10 μm 이다. X-선 image intensifier에 의해 X-선 영상은 광학영상으로 변환된다. 변환된 영상은 비디오 카메라를 통해 CRT 모니터에 디스플레이되거나 영상처리 장치에 전송되어 처리된다. X-선 영상은 일반적으로 많은 랜덤노이즈를 포함하고 있으며 밝기 분포가 고르지 못하다. 그러므로 원래 영상은 미세 결함의 검출을 위해 영상처리방법에 의해 개선된다.

봉단 용접부의 X-선 영상은 Fig. 1과 같다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 원래의 X-선 영상은 많은 랜덤노이즈를 포함하고 있어 결함을 검출하기가 용이하지 않다. 그러나 average와 histogram equalization 영상처리를 통해 개선된 영상을 얻을 수 있으며 이를 통해 결함을 용이하게 검출할 수 있다.

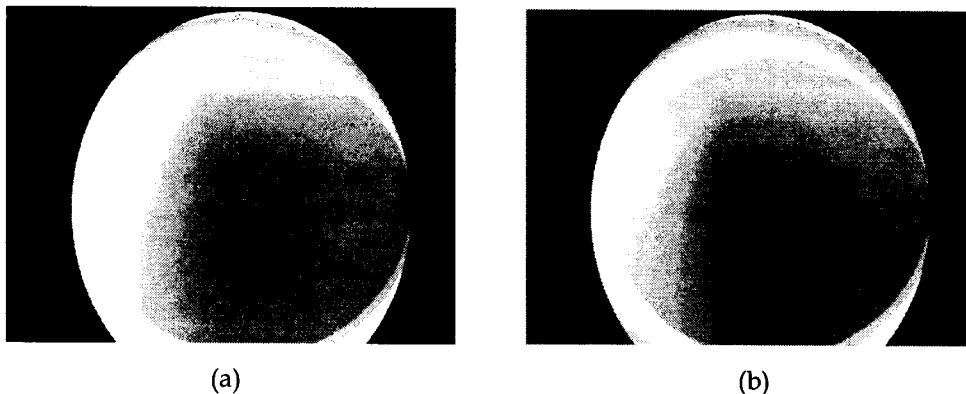


Fig. 1. X-ray image processing (a) Original image, (b) Averaged and histogram equalized image

3. 핵연료봉 봉단마개 용접부 검사

3.1 봉단 마개 용접

조사시험용으로 스테인레스강 소연료봉과 Zircaloy-4 소연료봉이 사용되었다. 스테인레스강 소연료봉은 길이 20 cm, 외경 12.7 mm, 두께 0.89 mm이며 TIG 방법에 의해 용접된다. 이 소연료봉은 DUPIC 모의 핵연료를 조사시험하기 위해 사용된다. Zircaloy-4 소연료봉은 길이 20 cm, 외경 10.6 mm, 두께 0.66 mm이며 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된다. 이 소연료봉은 핫셀에서 제조된 DUPIC 핵연료의 조사시험용으로 사용된다. 레이저용접은 헬륨분위기의 챔버내에서 광섬유에 의해 전송된 파장 1.06 μm 의 Nd:YAG 레이저빔에 의해 이루어진다.

3.2 봉단마개 용접부 X-선 검사

X-선 투과 영상은 고해상도 모니터에 디스플레이되며 이 영상을 통해 실시간 검사가 가능하다. X-선 영상은 부분적으로 컴퓨터 하드디스크에 정지영상 형태로 저장되며 영상처리기술에 의해 처리되어 세밀한 검사에 이용된다. Fig. 2는 마이크로포커스 X-선 검사시스템을 이용하여 구성된 연료봉 봉단마개 용접부 정밀 검사용 X-선 검사 개략도이다. 관전압과 관전류는 최적의 X-선 영상을 얻기 위하여 140~150 kV, 50 μA 로 조정되었다.

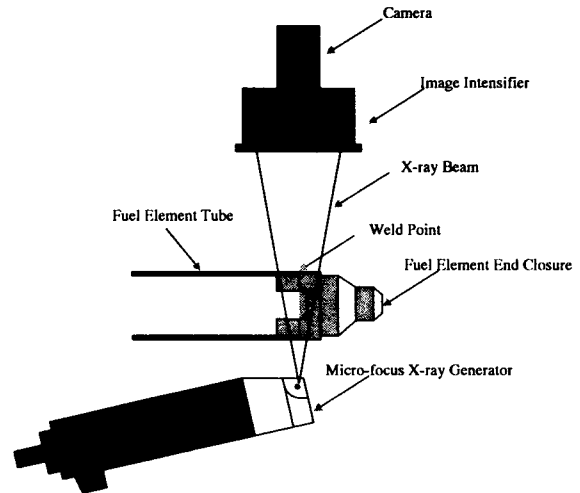


Fig. 2. The precise X-ray inspection of a fuel element end closure weld

3.2.1 스테인레스강 소연료봉 X-선 검사

용접부 투시 영상은 그림 3과 같다. 용접선의 배열 불량 및 에너지의 부족 때문에 TIG 용접부에서 일부 용입불량 결함이 검출되었다. 용접 위치와 아크 전류를 조절하여 최적 용접조건을 찾았으며 최적조건하에서 용접된 3 개의 조사시험용 소연료봉을 검사한 결과 결함이 발견되지 않았다. 제조 및 검사가 완료된 소연료봉은 캡슐로 조립되어 하나로 원자로에서 성공적으로 조사되었다.

3.2.2 Zircaloy-4 소연료봉 X-선 검사

용접부 투시 영상은 그림 4와 같다. Zircaloy-4 소연료봉은 핫셀에서 광섬유에 의해 전송된 Nd:YAG 레이저에 의해 원격으로 용접된다. Zircaloy-4 소연료봉은 매우 방사능이 높은 핵연료를 포함하고 있기 때문에 연료봉의 한쪽 부분만 X-선 검사를 수행한다. 세 개의 소연료봉을 검사한 결과 결함이 발견되지 않았다. 이 소연료봉은 국내에서 최초로 제조된 DUPIC 핵연료를 장전하고 캡슐로 조립되어 하나로 원자로에서 2개월간 성공적으로 조사되었다.

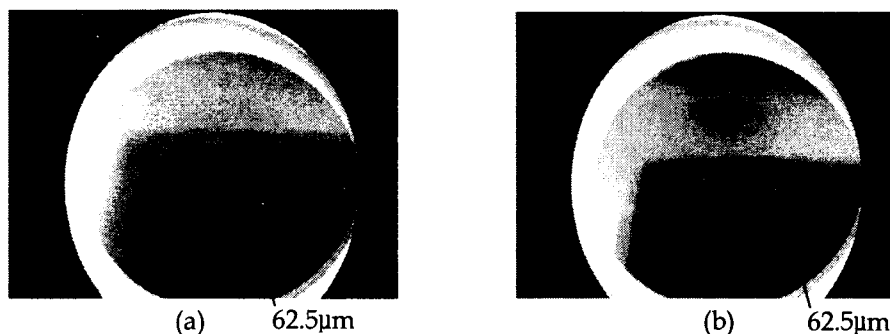


Fig. 3. X-ray inspection of stainless steel mini-element #1 involving DUPIC SIMFUEL for irradiation tests at HANARO (a) The left weld area, (b) The right weld area

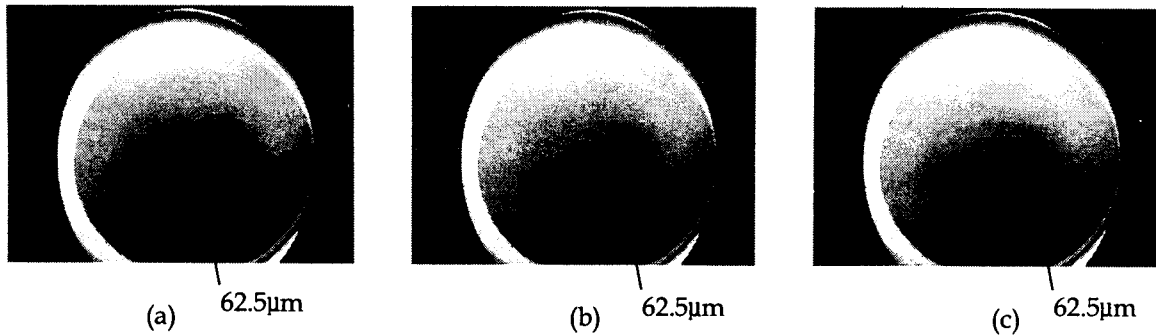


Fig. 4. X-ray inspection of Zircaloy-4 mini-element (a)#1, (b)#2, (c)#3

4. 결 론

DUPIC 핵연료봉 봉단 용접부 미세 결함을 검사하기 위해 10 μm 초점 크기의 마이크로포커스 X-선 검사시스템을 개발하고 조사시험용 모의 DUPIC 핵연료를 장착하고 TIG 방법으로 용접된 스테인레스강 소연료봉, 그리고 조사시험용 DUPIC 핵연료를 장착하고 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 Zircaloy-4 소연료봉의 용접부를 검사하였다. 실험결과 조사시험용 스테인레스강 소연료봉 및 Zircaloy-4 소연료봉의 용접부를 X-선 검사방법을 이용하여 정밀하게 검사하고 건전성을 확인할 수 있었으며 DUPIC 핵연료를 장착하고 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 Zircaloy-4 재질의 소연료봉의 건전성도 확인하였다. 스테인레스 소연료봉 및 Zircaloy-4 소연료봉 모두 핵연료를 장전하고 캡슐로 조립되어 하나로 원자로에서 성공적으로 조사되었다.

5. Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 중장기 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

6. 참고문헌

1. 양명승 등 : DUPIC 핵연료 제조장비 및 검사기기 개발, KAERI/TR-1319/99, 한국원자력연구소, (1999), pp.72-75
2. 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), pp.571-581
3. C. Y. Lee etc. : A study on TIG welding of STS 316L mini-element for irradiation test, Proceedings of KWS, Vol. 33, (1999), pp.193-195