

DUPIC 핵연료봉 원격 X-선 투시검사기술개발
Development of the Remote X-ray Inspection Technology of DUPIC Fuel Rod

김웅기, 김수성, 이철용, 임성팔, 이정원, 양명승
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

DUPIC(Direct Use of spent PWR fuel In CANDU reactor)은 사용후 경수로(PWR) 핵연료를 건식으로 처리하여 중수로 핵연료로 재사용하는 핵연료 주기기술이다. DUPIC 제조기술에 의해 제조된 핵연료봉은 연구용 원자로인 하나로에서 조사시험되기 때문에 봉단 양단 용접부의 건전성이 매우 중요하다. DUPIC 연료봉 용접부의 건전성을 평가하기 위하여 비파괴적인 검사방법인 X-선 투시검사기술을 적용하였다. 용접부가 매우 작기 때문에 초점의 크기가 작은 마이크로포커스 X-선 검사장치를 개발하였으며 특히 실시간으로 검사가 가능하도록 필름 대신 X-선 영상변환장치를 적용하였다. 개발된 시스템을 모의 핫셀에 설치하고 지르카로이-4 재질의 연료봉과 스테인레스 재질의 소연료봉(mini-element) 용접부에 대한 검사를 실시하였다. 본 기술을 적용하여 하나로 원자로에서 조사시험될 SIMFUEL 소연료봉 양단 TIG용접부를 비파괴적으로 검사하고 용접부의 건전성을 확인하였다.

Abstract

DUPIC(Direct Use of spent PWR fuel In CANDU reactor) is one of dry processing fuel cycles to reuse irradiated PWR fuel in CANDU reactors. DUPIC fuel rod is subject to be irradiated at HANARO reactor. The soundness of end-cap weld is very important. To evaluate the soundness of end-cap weld of fuel rods, X-ray inspection technology, one of nondestructive testing technologies, has been applied. The weld is so small that micro-focus X-ray inspection system has been developed. It has been possible to inspect end-cap weld on real-time by making use of image intensifier and camera system. The DUPIC rods made of zircaloy-4 as well as the mini-elements made of stainless steel have been remotely inspected by the X-ray inspection system installed at mockup hot-cell. The soundness of TIG welded mini-elements involving the simulated DUPIC pellets(SIMFUEL) to be irradiated at HANARO reactor have been non-destructively confirmed by the X-ray inspection technique.

1. 서론

경.중수로 연계 핵연료주기기술인 DUPIC(Direct Use of spent PWR fuel In CANDU reactor)은 사용후 PWR 핵연료를 건식으로 처리하여 중수로 원자력발전소의 연료로 재사용하는 것을 목표로 하고 있다. DUPIC 핵연료는 새로운 개념의 핵연료이기 때문에 경제성과 안전성이 검증되어야 하며 핵연료로서 갖추어야 할 특성중 안전성 측면에서 핵연료의 건전성을 평가하는 작업은 무엇보다도 중요한 부분중 하나이다.

제조된 DUPIC 연료봉에 대한 품질 특성을 평가하기 위한 검사 항목에는 비파괴적인 헬륨누출 검사와 파괴적인 금상학적 검사, 인장시험, 조직시험 등이 포함된다^[1]. 헬륨누출검사는 내부 미세 결함의 검출이 곤란하며 파괴적인 방법은 샘플링 검사방법으로 통계적인 자료에 의존하게 될 뿐만 아니라 핫셀내에서 제조 셀로부터 검사셀로 오염된 샘플의 이동이 이루어져야 하고 방사성폐기물이 발생하므로 새로운 비파괴적인 방법을 고려하게 되었다. 적용 가능한 비파괴적인 방법에는 X-선 검사, 초음파검사, 와전류검사 방법 등이 있다. 기술검토결과 객관적인 데이터 확보와 핫셀에서의 검사 특성을 고려하여 X-선 검사방법을 적용하였다^[2]. 본 연구에서 적용한 X-선 검사방법은 필름을 사용하지 않고 image intensifier와 카메라를 이용하여 실시간으로 X-선 검사를 하게 된다. 특히 연료봉의 용접부는 폭이 약 2~5mm로 작기 때문에 용접부에 포함된 결함을 검사하기 위해서는 확대촬영법을 적용해야 하며 이를 위해 초점크기 10 μ m의 마이크로포커스 X-선 발생 장치와 40~60lines/inch의 고해상도 image intensifier를 적용하여 고해상도 시스템을 구성하였다. 개발된 시스템을 이용하여 레이저용접된 지르카로이-4 재질의 연료봉과 레이저와 TIG방법으로 각각 용접된 스테인레스강 재질의 조사시험용 소연료봉(mini-element)에 대한 결함검사를 수행하고 결과를 분석하였다.

2. DUPIC 핵연료봉 용접부 X-선 검사

2.1 DUPIC 핵연료봉단 용접

DUPIC 핵연료는 중수로 원자력 발전소의 연료로 사용되는 것을 목표로 하고 있기 때문에 DUPIC 연료봉의 기본적인 사양은 CANDU 연료봉과 같으며 길이 약 20cm의 조사시험용 소연료봉은 0.89mm 두께의 스테인레스강 튜브로 제조된다^[3, 4]. 그림 1은 두께가 0.4mm인 지르카로이-4 재질의 DUPIC 연료봉과 CANDU 연료봉 봉단의 구조를 보여준다. CANDU 연료봉의 봉단은 저항용접 방법으로 밀봉되며, DUPIC 연료봉의 봉단은 레이저에 의해 용접되기 때문에 봉단마개의 구조가 다르다. 그림 2는 스테인레스강 재질의 조사시험용 소연료봉 구조를 보여준다. 소연료봉에 대해서는 레이저용접과 TIG용접방법을 적용하여 용접실험을 수행하고 결과를 분석하였다. CANDU 연료봉의 저항용접기술은 신뢰성이 입증되어 있으나 DUPIC 연료봉에 대한 레이저용접 및 TIG용접방법은 아직 신뢰성이 입증되어 있지 않다. 그러나 DUPIC 연료봉은 핫셀에서 원격으로 제조되는 특성을 가지고 있기 때문에 시스템 구성이 복잡하고 용접후 용접덧살 가공이 필요한 저항용접 방법보다는 용접장치 구성이 간단하고 덧살가공 공정이 불필요한 레이저용접 방법과 TIG용접 방법을 적용하였다.

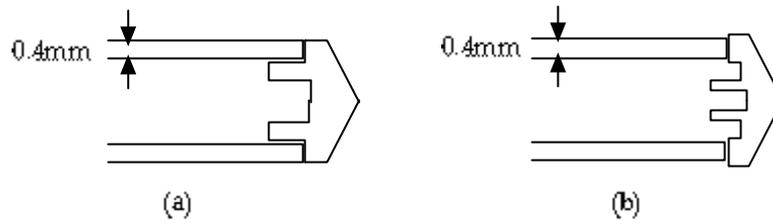


그림 1. (a) 레이저용접용 DUPIC 연료봉 봉단마개 구조,
(b) 저항용접용 CANDU 연료봉 봉단마개 구조

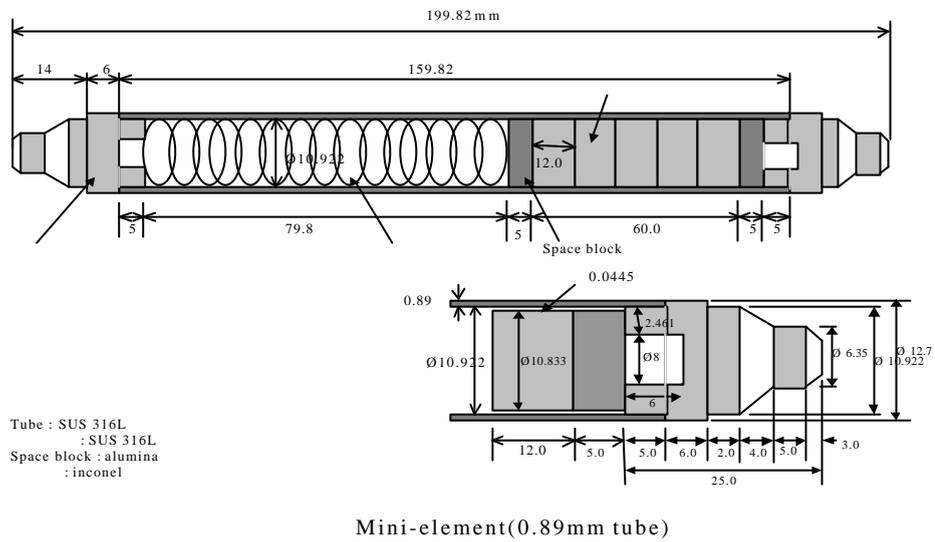


그림 2. 스테인레스 재질의 조사시험용 소연료봉의 구조



(a) (b)

그림 3. (a) 지르카로이-4 연료봉단 레이저용접부, (b) 스테인레스 연료봉단 TIG 용접부

2.2 X-선 검사 시스템 구성

X-선 검사장치는 마이크로포커스 X-선 발생장치, image intensifier 및 카메라, 영상처리장치, 그리고 연료봉 회전장치를 포함한 차폐캐비넷으로 구성되어 있다¹⁶⁾. X-선 검사장치 구성도는 그림 5와 같다.

X-선 발생장치는 고진공 X-선 튜브와 진공시스템으로 구성되어 있다. X-선 발생장치는 FEINFOCUS사의 FX160.23K 모델이며 160kV/1mA의 용량으로 최소 10 μ m의 초점 크기를 갖는다. Image intensifier는 X-선 영상을 광학영상으로 변환하는 장치로 X-선 검출면의 직경은 220mm이고 해상도는 40~60 lines/cm이다. 변환된 영상은 카메라를 통해 모니터에 디스플레이된다. X-선 영상은 랜덤노이즈가 많이 포함되어 있고 밝기의 분포가 고르지 않다. 개선된 영상을 통해 미세결함을 관측할 수 있도록 512x512x8bit 해상도의 영상처리보드를 탑재한 영상처리장치를 개발하였다. 그림 4는 연료봉 용접부의 X-선 영상을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 원래의 영상은 랜덤노이즈 성분이 많이 포함되어 관측이 용이하지 않지만 영상처리의 기본적인 기술중 하나인 average와 histogram equalization처리를 한 영상은 결함관측이 훨씬 용이함을 알 수 있다.

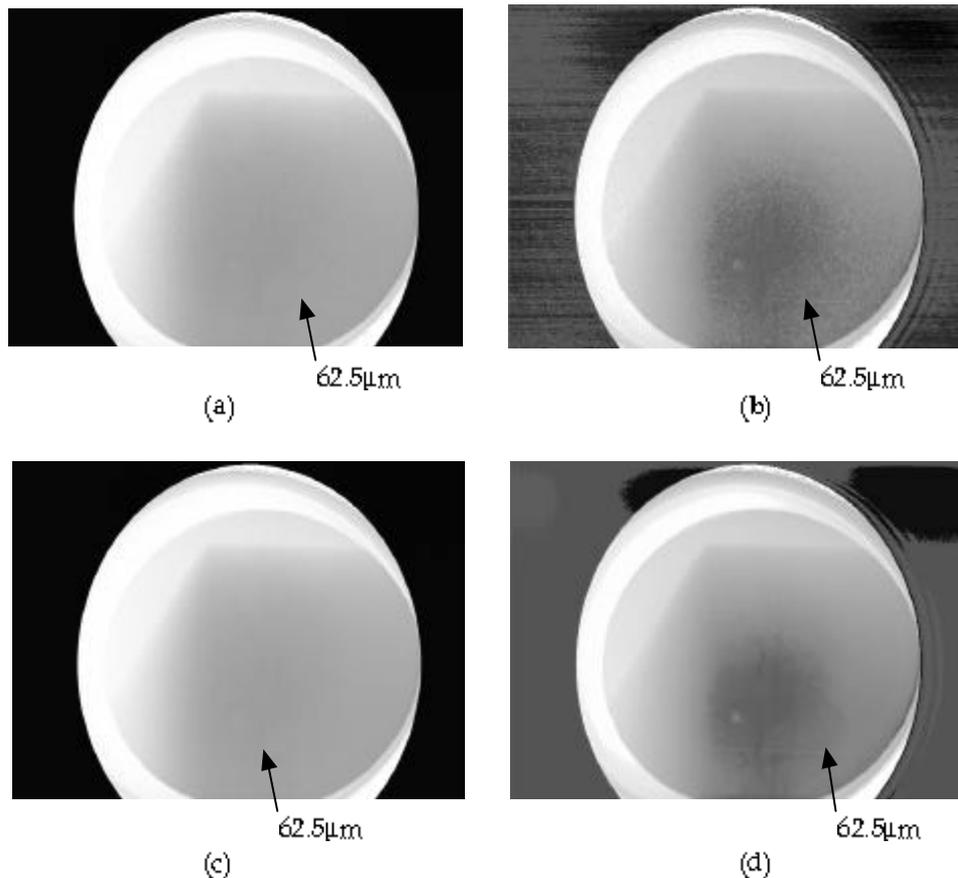


그림 4. X-선 영상 처리 결과 (a) Original image, (b) Histogram equalized image, (c) Averaged image, (d) Averaged and histogram equalized image

X-선의 외부방사를 차폐하는 차폐캐비닛의 크기는 약 70x90x180 (cm)이고, 재질은 두께 3mm의 납과 두께 2mm의 철판이다. 핫셀의 공간을 적게 차지하도록 세우는 형태로 제작하였으며 핫셀에서의 설치 및 분리를 용이하게 수행할 수 있도록 상하 2단으로 구성하여 조립 및 해체가 가능하도록 설계하였다. 하부에는 X-선 발생장치가 설치되며, 배율을 조절하기 위해 X-선 발생장치를 상하로 이동시키는 구동장치도 포함된다. 하단 중앙부에는 연료봉을 회전시키는 회전구동부와 연료봉으로부터 방사되는 방사선을 차폐하며 X-선 발생장치와 image intensifier를 보호하기 위한 원통형 차폐체가 설치된다. 원통형 차폐체의 두께는 약 7cm로 연료봉으로부터 방사되는 방사선을 차폐하게 된다. 연료봉 회전부는 연료봉의 장착 및 제거작업이 원격조작기에 의해 조작이 용이하도록 설계제작되었다. 상단부에는 image intensifier와 카메라가 설치된다. 그림 6은 모의핫셀에 설치된 X-선 검사시스템을 보여준다.

2.3 DUPIC 핵연료봉 X-선 검사

X-선 검사방법을 이용하면 DUPIC핵연료봉의 봉단마개의 용접부위에 존재하는 결함을 비파괴적으로 전수검사할 수 있다. 봉단마개 용접부의 결함에는 크랙, 기공, 용접부 용입불량 등이 있다. 용접부 조직검사를 실시한 결과 용접조건에 따라 이와 같은 종류의 결함이 존재함을 확인하였다. 검출이 가능한 결함의 크기를 살펴 보면, X-선 투과 두께의 1% 정도가 검출 가능한 크기이므로 지르카로이-4 재질의 DUPIC 연료봉은 외경이 약 13mm, 봉단마개 용접부의 내경이 7mm이므로 투과 두께는 6mm이다. 따라서 검출 가능한 결함의 X-선 방향 크기는 약 60 μ m이다. 스테인레스 재질의 조사시험용 소연료봉은 외경이 12.7mm, 용접부 내경이 8mm이므로 투과두께는 약 4.7mm이다. 이 때 검출가능한 X-선 방향의 크기는 약 47 μ m이다. 검출한 결함의 크기를 확인할 수 있는 기준설정을 위해 직경 62.5 μ m의 구리선을 용접면에 접촉시켜 X-선 영상을 획득하였다.

연료봉은 X-선 검사장치에 삽입되며 봉 회전장치에 의해 360도 이상 회전된다. 고해상도 모니터상에서 용접부 투시영상을 관찰하여 실시간으로 결함유무를 육안검사한다. 필요한 경우 컴퓨터에 영상을 저장하고 영상처리를 함으로써 개선된 영상을 획득함으로써 결함유무를 정밀하게 검사하였다.

2.4 DUPIC 핵연료봉 X-선 검사 결과 및 분석

X-선 발생장치로부터 연료봉 검사면까지의 거리는 20mm, 발생장치로부터 검출기까지의 거리는 450mm였으며 약 22.5배의 확대율을 나타냈다. 최적의 영상을 얻을 수 있도록 X-선 발생장치의 관전압과 관전류를 조정하여 관전압은 140kV, 관전류는 50 μ A로 설정하였다. 검사의 신뢰성을 높이기 위하여 결함이 발생하면 불합격으로 평가되며 그렇지 않으면 합격으로 판정하도록 검사지침을 작성하였다.

본 실험에서 헬륨분위기의 용접챔버내에서 광섬유에 의해 원격전송된 Nd:YAG 레이저빔에 의해 용접된 지르카로이-4 재질의 연료봉과, 레이저용접된 스테인레스 재질의 조사시험용 소연료봉, 그리고 TIG용접된 조사시험용 소연료봉 봉단 용접부를 X-선 투시 검사를 수행하였다.

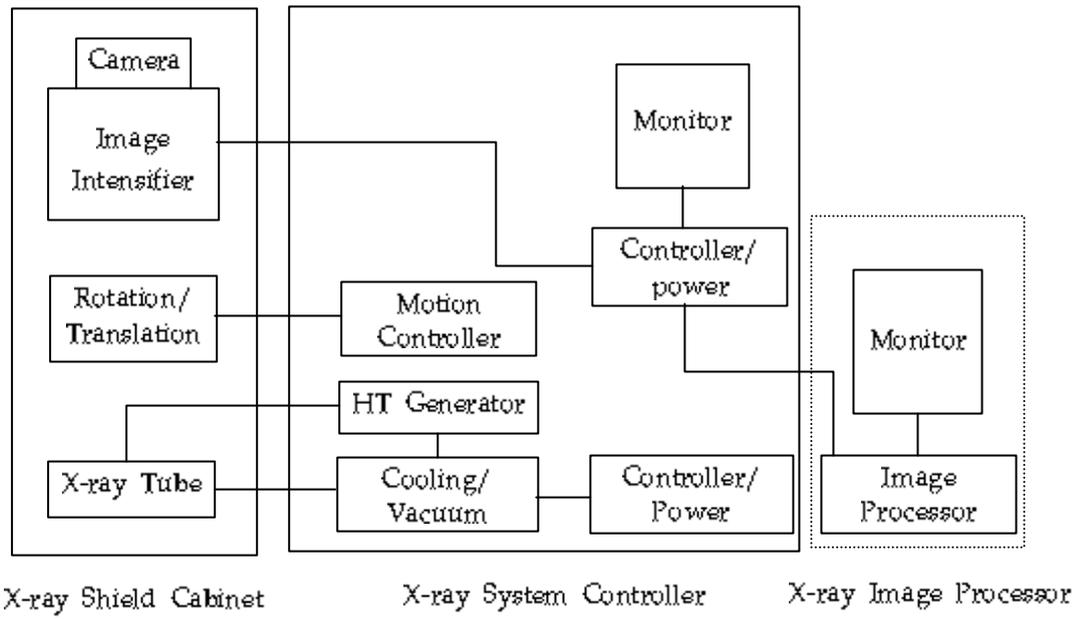


그림 5. X-선 검사장치 구성도



그림 6. 모의 핫셀에 설치된 X-선투시 검사장치

그림 7~12는 검사결과 영상을 보여준다. 영상의 아래 부분에 수평으로 그어진 백색선은 62.5 μ m 직경의 구리선을 나타낸다. X-선 영상에서 중앙하부에서 고정적으로 나타나는 흰점 부분은 X-선 발생면이나 검출기면에 붙어있는 이물질에 의한 노이즈이다. 실험결과, 레이저용접된 지르카로이-4 연료봉에서 최적 용접조건을 찾기 전에 기공과 용입불량의 결함이 발견되었으며 최적 조건에서는 거의 결함이 발견되지 않았다. 한편 레이저용접된 스테인레스강의 소연료봉에서는 조건에 따라 용입선 주변에서 크랙과 기공이 다수 발견되거나 용입불량의 결함이 지속적으로 검출되었으며 조직검사를 통해 결함을 확인하였다. 정확한 결함원인 발생은 분석중에 있으며 급속한 열전달을 한 원인으로 보고 있다. 이 결과 스테인레스강 소연료봉 제조시 레이저용접기술의 적용을 재검토하게 되었다. TIG용접된 소연료봉의 경우에는 최적조건을 찾기 전에는 주로 용접선의 어긋남과 에너지량의 부족으로 용입불량에 따른 결함이 발견되었으며 조직검사를 통해 역시 결함의 존재를 확인하였다. 최적조건에서는 결함이 발견되지 않았다. 조사시험할 SIMFUEL 핵연료를 장착한 소연료봉의 검사에서도 결함이 발견되지 않았으며 이 연료봉은 현재 하나로 원자로에서 조사되고 있으며 아직까지 용접부에서의 이상은 발견되지 않았다. SIMFUEL 조사시험용 연료봉에 대한 검사결과는 표 1과 같다.

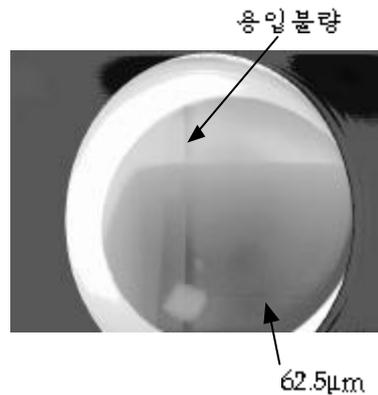


그림 7. 지르카로이-4 연료봉 Nd:YAG 레이저 용접부 검사, 용입 불량 검출

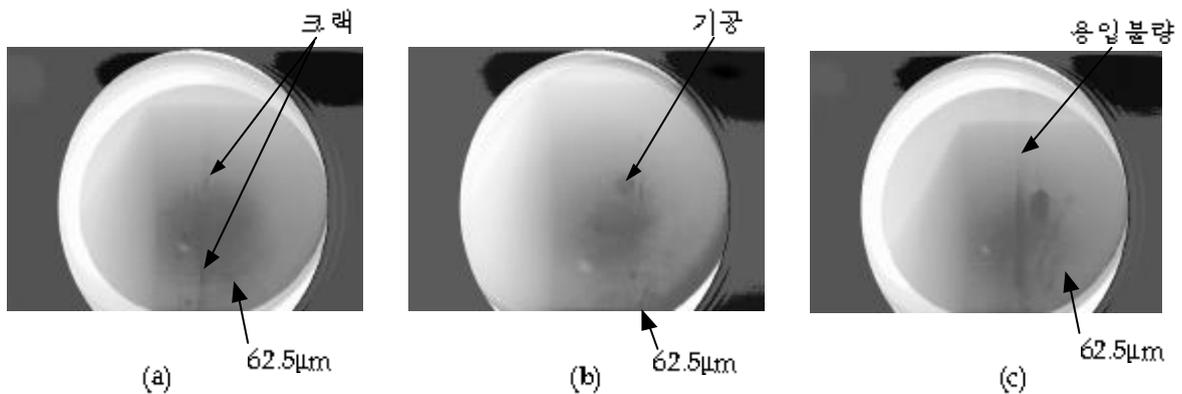


그림 8. 스테인레스 연료봉 Nd:YAG 레이저 용접부 검사 (a) 크랙, (b) 기공, (c) 용입 불량

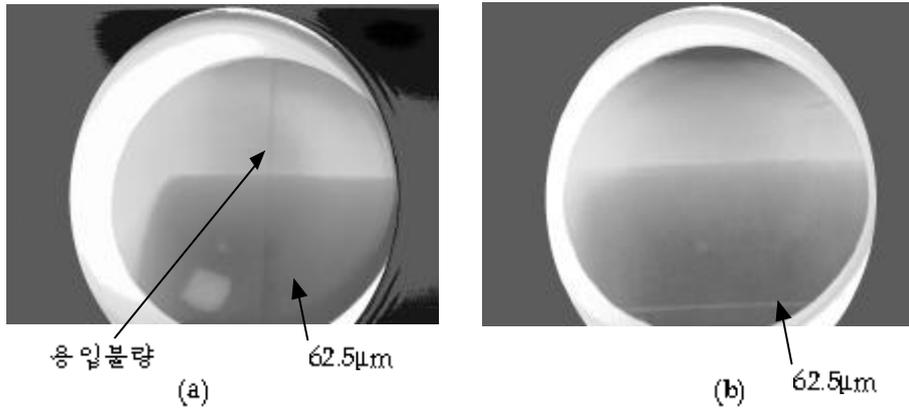


그림 9. 스테인레스 연료통 TIG 용접부 검사 (a) 용입 불량, (b) 무결함

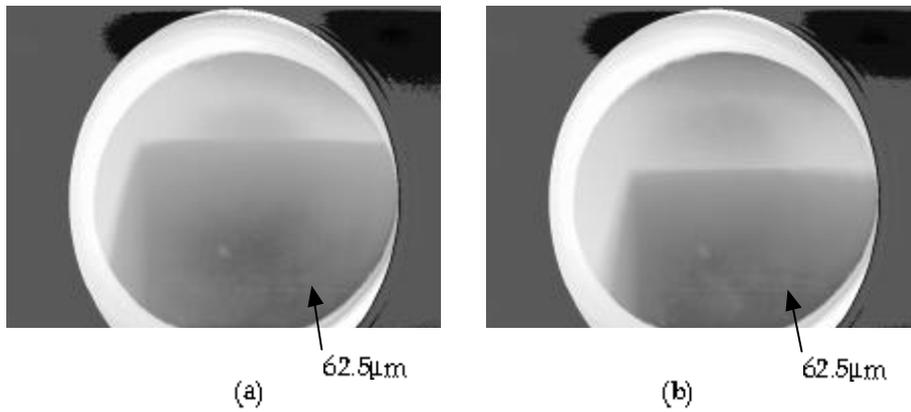


그림 10. SIMFUEL을 장전한 조사시험용 스테인레스 연료통(1) 양단 TIG 용접부 검사, (a) 좌측 봉단 용접부, (b) 우측 봉단 용접부

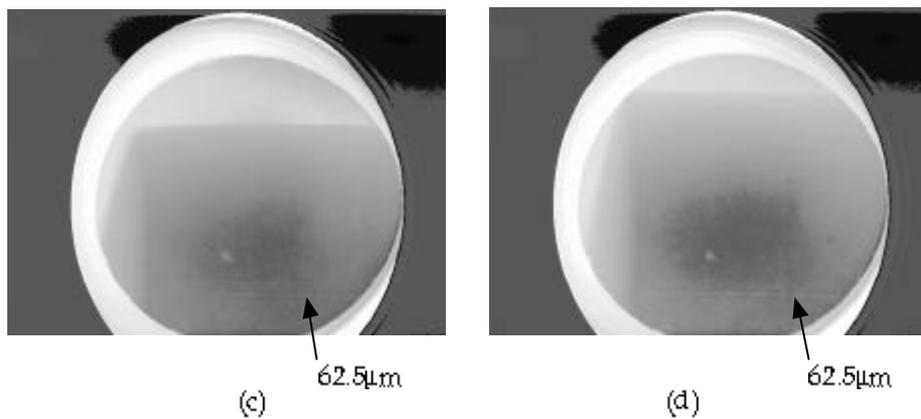


그림 11. SIMFUEL을 장전한 조사시험용 스테인레스 연료통(2) 양단 TIG 용접부 검사 (a) 좌측 봉단 용접부, (b) 우측 봉단 용접부

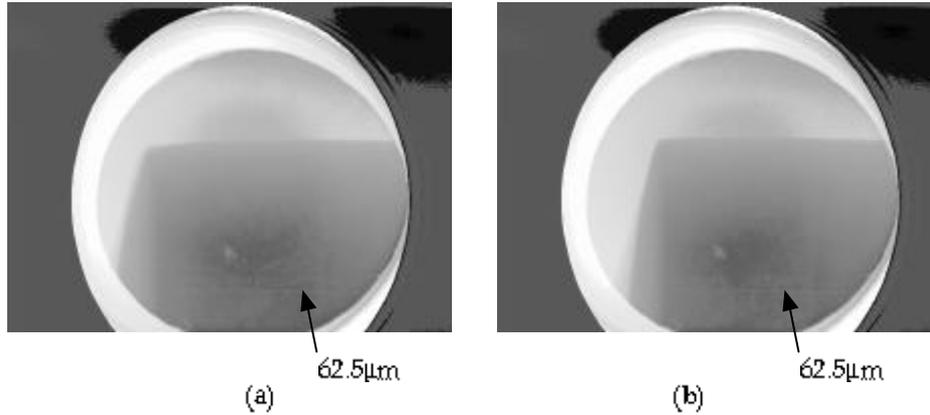


그림 12. SIMFUEL을 장전한 조사시험용 스테인레스 연료봉(3) TIG 용접부 검사

(a) 좌측 봉단 용접부, (b) 우측 봉단 용접부

표 1. SIMFUEL 조사시험용 소연료봉 X-선 투시 결함 검사

X-선 발생장치 : Feinfocus(독) FXE-160.23K						
X-ray image intensifier & detector : Balto(벨), Baltoscope BIX220						
판정기준 : 결함유무						
No.	관전압, kV	관전류, uA	결함			판정
			용입선, μm	크랙, μm	기공, μm	
1	140	50	없음	없음	없음	합격
2	140	50	없음	없음	없음	합격
3	140	50	없음	없음	없음	합격
4	140	50	없음	없음	없음	합격
5	140	50	없음	없음	없음	합격
6	140	50	없음	없음	없음	합격

3. 결 론

DUPIC 제조기술에 의해 제조된 연료봉은 연구용 원자로인 하나로에서 조사시험되기 때문에 봉단 용접부의 건전성이 매우 중요하다. 본 연구에서는 DUPIC 연료봉 용접부의 건전성을 평가하기 위하여 비파괴적인 검사방법인 X-선 투시검사기술을 적용하였다. 매우 작은 봉단 용접부를 정밀하게 검사하기 위하여 초점의 크기가 10μm인 마이크로포커스 X-선 검사장치를 개발하였으며 특히 실시간으로 검사가 가능하도록 X-선 영상변환장치를 적용하였다. 개발된 시스템을 모의 핫셀에 설치하고 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 지르카로이-4 재질의 CANDU 연료봉과 레이저와 TIG방법으로 각각 용접된 스테인레스 재질의 조사시험용 소연료봉 용접부에 대한 결함검사를 실시하고 결과를 분석하였다.

CANDU 연료봉을 검사한 결과 최적용접조건하에서는 결함이 검출되지 않아 최적조건이 유지되는 경우 레이저용접방법이 신뢰성이 있음을 확인하였다. 조사시험용 소연료봉을 검사한 결과 레이저용접방법의 경우 기공과 크랙 등의 결함이 지속적으로 발생하였으며 TIG 용접방법을 사용한 경우에는 최적조건하에서 결함이 검출되지 않았다. 따라서 조사시험용 연료봉 용접방법으로는 TIG 방법을 선정하게 되었으며 본 기술을 적용하여 하나로 원자로에서 조사시험될 SIMFUEL을 장착한 소연료봉 양단 TIG용접부를 비파괴적으로 검사하고 용접부의 건전성을 확인하였다. 본 X-선 검사시스템을 보완하여 DUPIC 핵연료가 장전되고 봉단이 레이저로 용접된 지르칼로이-4 재질의 DUPIC 연료봉에 대한 비파괴검사를 수행함으로써 DUPIC 핵연료의 건전성을 원격으로 확인할 수 있는 검사시스템으로 활용할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 양명승 등, "중수로핵연료 품질관리지침서", (1988)
- [2] 양명승 등, "DUPIC 핵연료제조 및 품질관리 기술개발", KAERI/RR-1744/96, 한국원자력연구소, pp.601-610, (1997)
- [3] 김수성, "광섬유에 의한 Zircaloy-4 봉단마개 밀봉의 Nd:YAG LBW 최적조건에 관한 연구," 대한용접학회, 제15권 6호, pp.85-95, (1997)
- [4] 이철용 등, "STS 316L 조사연료봉의 TIG용접에 관한 연구," (1999)
- [5] 양명승 등, "DUPIC 핵연료 제조장비 및 검사기기 개발", KAERI/TR-1319/99, 한국원자력연구소, pp.72-75, (1999)