

DUPIC 핵연료봉 봉단 용접부 건전성 확인을 위한 미세초점 X-선 투과시험에 관한 연구

김용기* · 김수성* · 이정원* · 양명승*

* 한국원자력연구소

A Study on the Micro-Focus X-Ray Inspection for Confirming the Soundness of End Closure Weld of DUPIC Fuel Elements

*Woong Ki Kim, *Soo Sung Kim, *Jung Won Lee and *Myung Seung Yang

* Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract

DUPIC (Direct use of spent PWR fuel in CANDU reactors) nuclear fuel is a CANDU fuel fabricated remotely from spent PWR fuel materials in a hot cell. The soundness of the end closure welds of nuclear fuel elements is an important factor for the safety and performance of nuclear fuel. To evaluate the soundness of the end closure welds of DUPIC fuel element, a precise X-ray inspection system is developed using a micro-focus X-ray generator with an image intensifier and a real time camera system.

The fuel elements made of Zircaloy-4 and stainless steel by an Nd:YAG laser welding and a TIG welding are inspected by the developed inspection system. The soundness of the welds of the fuel elements was confirmed by the X-ray inspection process, and the irradiation test of DUPIC fuel elements has been successfully completed at the HANARO research reactor.

(Received October 23, 2000)

Key Words : Micro-focus X-ray inspection, Nd:YAG laser welding, TIG welding, End closure weld, DUPIC fuel element, Irradiation test, Image processing

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 핵연료주기기술이며 자원 재활용 및 방사성 폐기물 감소가 기대되는 신개념의 핵연료주기 기술이다^{1,2)}. DUPIC 핵연료 봉단은 TIG 용접 또는 Nd:YAG 레이저용접 방법에 의해 핫셀에서 원격으로 밀봉 용접된다^{3,4)}.

일반적으로 핵연료봉단 용접부의 건전성을 검사하기 위하여 헬륨누설시험, 와전류탐상시험, 초음파탐상시험, 방사선투과시험과 같은 비파괴검사와 금속학적 조

직시험, 기계적 시험과 같은 파괴검사가 수행된다^{5,6)}.

각각의 검사방법은 장단점이 있으며 본 연구에서는 용접 비이드 폭이 2~4 mm에 불과한 용접 영역 내부의 미세결함을 비파괴적으로 검사하고 DUPIC 핵연료봉 용접부의 건전성을 확인하기 위해 마이크로포커스 X-선 투과시험을 적용하였다. DUPIC 핵연료봉 용접부에 대한 마이크로포커스 X-선 투과시험을 위해 마이크로포커스 X-선 발생장치, 고분해능 image intensifier와 비디오 카메라, DUPIC 핵연료봉 회전장치, 방사선 차폐체 및 영상처리장치로 구성된 X-선 투과시험장치를 개발하였으며 개발된 시스템을 이용하여, Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 Zircaloy-4 연료봉과, 레이저와 TIG용접 방법으로 각각 용접된 스테인리스강 연료봉을 검사하였다. 용접부에 존재하는

결함을 세밀하게 검사하기 위하여 영상처리방법을 적용함으로써 랜덤노이즈가 감소하고 콘트라스트가 개선된 X-선 영상을 획득하였으며 개선된 영상을 이용하여 DUPIC 핵연료봉 용접부에 존재하는 수십 μ m 크기의 결함을 검출하였다. 이를 통해 DUPIC 핵연료봉 용접공정을 확립하였으며 확립된 용접공정에 의해 제조된 하나로 원자로 조사시험용 DUPIC 핵연료봉 용접부의 건전성을 확인하였다.

2. X-선 검사시스템 개발

개발된 DUPIC 핵연료봉 용접부 X-선 검사시스템은 Fig. 1의 구성도에서 볼 수 있는 바와 같이 마이크로포커스 X-선 발생장치, X-선 image intensifier, 비디오 카메라 및 모니터, 핵연료봉 회전장치, 방사선 차폐체 및 영상처리장치로 구성되었으며 구성된 시스템은 Fig. 2와 같다.

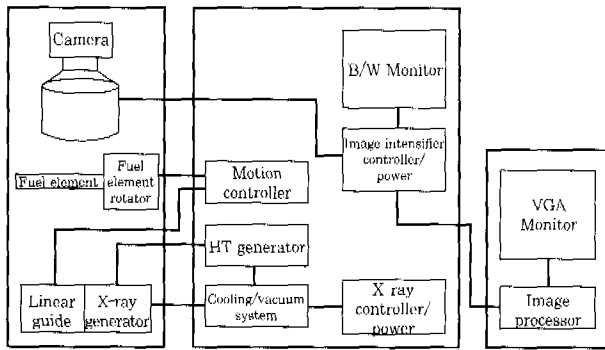


Fig. 1 Block diagram of the X-ray inspection system

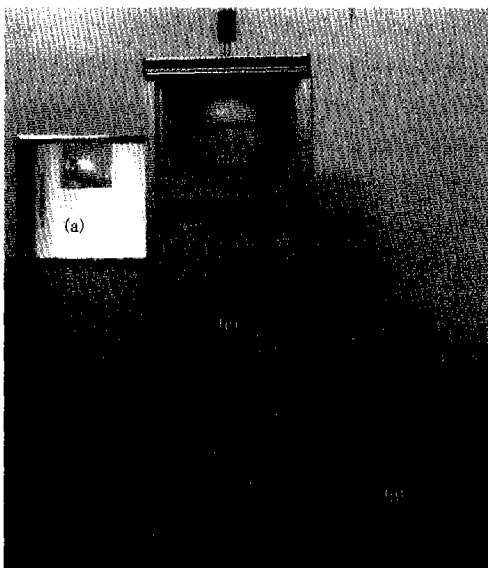


Fig. 2 X-ray inspection system (a)Shield cabinet (b)CRT monitor (c)Image intensifier controller (d)Motion controller (e)X-ray generator controller (f)High voltage generator (g)Vacuum system

마이크로포커스 X-선 발생장치는 FEINFOCUS의 FXE160.23K 모델로서, 고진공 X-선 발생 튜브, 진공 펌핑 시스템, 고전압 공급장치 및 제어기로 구성되어 20~160 kV의 관전압과 최대 1mA의 관전류, 그리고 약 10m의 최소 초점 크기를 갖는다. X-선 image intensifier는 X-선 영상을 광학영상으로 변환시켜주는 장치로 X-선 검출면의 직경은 220mm이고 분해능은 40~60lines/cm이다. 변환된 광학영상은 비디오 카메라를 통해 CRT 모니터에 디스플레이되거나 영상처리장치에 전송되어 처리된다. X-선 영상은 일반적으로 많은 랜덤노이즈를 포함하고 있으며 밝기 분포가 고르지 못하기 때문에 미세 결함의 검출을 용이하게 하기 위하여 영상처리방법에 의해 개선될 필요가 있다. 영상처리장치에서는 512 \times 512 \times 8 비트의 분해능을 가진 영상처리보드를 통해 X-선 영상을 획득하며, 획득된 X-선 영상은 average와 histogram equalization 영상처리를 통해 랜덤노이즈가 감소되고 콘트라스트가 개선되며 개선된 영상은 정밀한 결함검사에 이용된다.

핵연료봉 회전장치는 연료봉의 전면 검사가 가능하도록 연료봉을 360도 이상 회전시켜주며, 연료봉으로부터 방출되는 방사선에 의해 X-선 발생장치와 image intensifier가 영향을 받지 않도록 7cm 두께의 납으로 제작된 원통형 차폐체를 설치하였다. X-선 차폐용 캐비닛은 X-선 발생장치 및 image intensifier, 연료봉 회전장치, 원통형 차폐체 등을 지지하고 X-선의 외부누설을 방지할 뿐만 아니라 외부 방사선으로부터 X-선 발생장치 등을 보호하기 위하여 3mm 두께의 납과 2mm 두께의 강철판으로 약 70 \times 90 \times 180cm³ 크기로 제작되었다. 차폐캐비닛은 좁은 면적을 차지하도록 타워 형태를 갖추고 있으며 핫셀에 용이하게 설치될 수 있도록 상부와 하부로 분리되도록 설계제작되었다. 하부에 설치된 X-선 발생장치는 상하로 이동하는 직선운동축에 설치되어 있으며 직선운동축에 의해 X-선 발생장치와 연료봉사이의 거리 및 X-선 발생장치와 image intensifier 사이의 거리를 조절함으로써 확대율을 조정할 수 있다.

3. 핵연료봉 봉단마개 용접부 검사

3.1 봉단 마개 용접

DUPIC 핵연료 조사시험에는 단계적으로 3 가지 종류의 핵연료봉이 사용된다. 첫 번째는 표준 CANDU 연료봉과 유사하며 최종 단계에서 사용되는 Zircaloy-4 재질의 연료봉으로 길이는 49.3cm, 외경은 13.2

mm, 두께는 0.4mm이며 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된다. 두 번째는 스테인리스강으로 제조된 길이 20cm, 외경 12.7mm, 두께 0.89mm의 연료봉으로 TIC와 Nd:YAG 레이저에 의해 용접되며 DUPIC 모의 핵연료를 조사시험하기 위해 가장 먼저 사용된다. 세 번째는 Zircaloy-4 재질의 길이 20cm, 외경 10.6mm, 두께 0.66mm의 연료봉으로 Nd:YAG 레이저에 의해 용접되며 핫셀에서 제조된 DUPIC 핵연료의 조사시험용으로 사용된다. 스테인리스강 소연료봉의 구조 및 제원은 Fig. 3과 같고 Zircaloy-4 소연료봉의 구조 및 제원은 Fig. 4와 같으며 봉단마개는 튜브와 같은 재질로 제조된다. 레이저용접은 헬륨분위기의 챔버내에서 광섬유에 의해 전송된 파장 1.06 μ m의 Nd:YAG 레이저빔에 의해 이루어진다. 레이저와 TIG에 의해 용접된 봉단마개의 형상은 Fig. 5에서 Fig. 8과 같다.

DUPIC 연료봉 봉단마개 용접부에서 검출된 용접결합은 균열, 기공, 용입불량 등이며 이는 파괴적인 금속학적 조직시험에서 확인되었다.

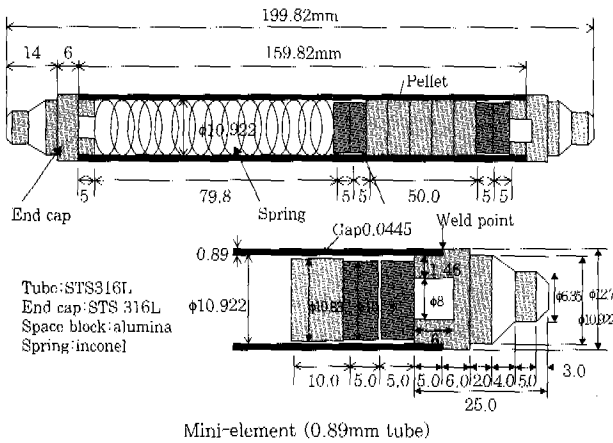


Fig. 3 Stainless steel mini-element for irradiation test of the simulated DUPIC pellets

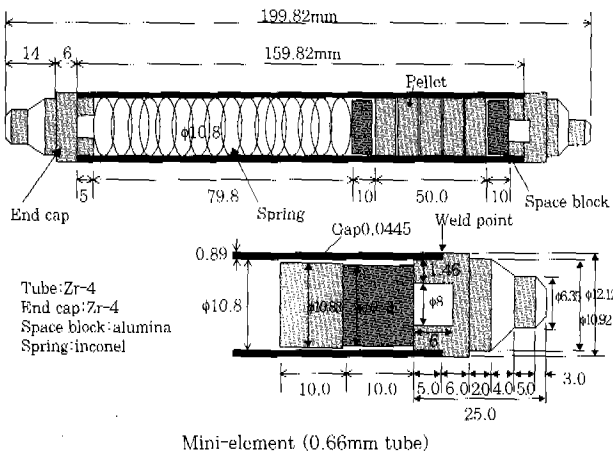


Fig. 4 Stainless steel mini-element for irradiation test of the simulated DUPIC pellets

3.1.1 Nd:YAG 레이저 용접

평균출력 500W, 파장 1.06 μ m의 펄스형 Nd:YAG 레이저시스템과 코아직경 600 μ m 및 800 μ m, 길이 20 m의 스텝 인덱스형 광섬유로 구성된 레이저빔전송장치 및 헬륨분위기의 용접챔버를 이용하여 연료봉을 원격으로 용접하였다. Zircaloy-4 소연료봉에 대한 최적용접조건은 Table 1과 같다. Zircaloy-4 CANDU 연료봉과 스테인리스강 소연료봉은 모의 핫셀에서 용접되었으며 DUPIC 핵연료 소결체 조사시험용 Zircaloy-4 소연료봉은 조사재시험시설의 M6 핫셀에서 용접되었다. Fig. 5에서 Fig. 7은 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 각 연료봉의 외관을 보여준다.

Table 1 The optimum laser welding condition for Zircaloy-4 mini-element for irradiation test of DUPIC pellets

Welding machine	Pulsed Nd:YAG laser welder Model No. 510PW Full average power 500W
Charging voltage	400 V
Pulse width	7 ms
Pulse frequency	7 Hz
Average power	380 W
Nozzle shielding gas	He (99.999 %)
Shielding gas flow rate	40 LPM
Nozzle cooling gas	He
Welding chuck speed	6 rpm
Rotation angle	390°

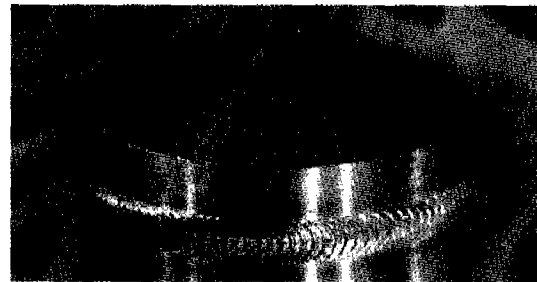


Fig. 5 Zircaloy-4 CANDU fuel element end closure welded by Nd:YAG laser

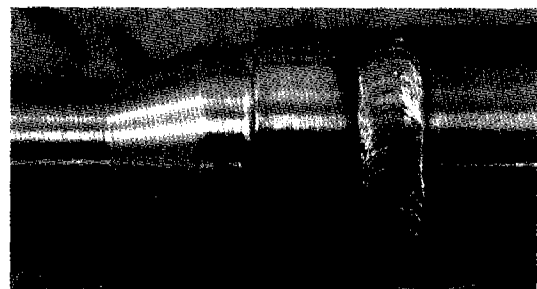


Fig. 6 Zircaloy-4 mini-element end closure welded by Nd:YAG laser

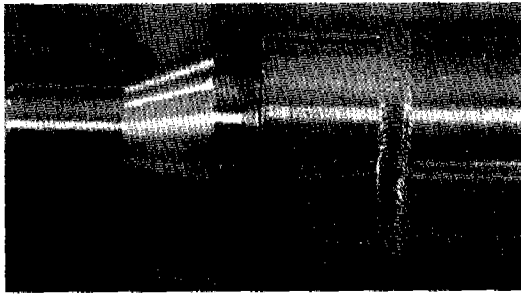


Fig. 7 Stainless steel mini-element end closure welded by Nd:YAG laser

3.1.2 TIG 용접

제철용접을 기준으로 용접시 직류 아크 전류와 용접 시간 및 용접 속도 등의 변수를 프로그램하여 자동제어할 수 있는 Orbital TIG 용접장치를 사용하였으며 용접시 산화방지와 연료봉내 He가스 충전을 위해 0.01 Torr의 진공후 He를 주입한 다음 Ar 차폐상태에서 용접하였다. Fig. 8은 TIG 용접된 스테인리스강 소연료봉 외관을 보여주며 스테인리스강 소연료봉에 대한 최적용접조건은 Table 2와 같다.

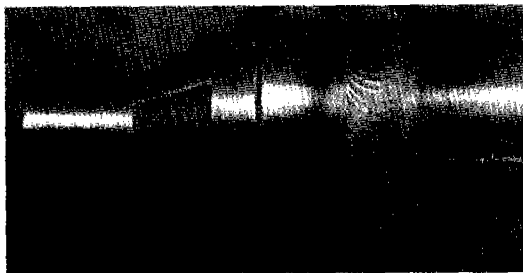


Fig. 8 Stainless steel mini-element end closure welded by TIG

Table 2 The optimum TIG welding condition for stainless steel mini-element for irradiation test of the simulated DUPIC pellets

Welding machine	AMI 207A TIG welder
Ar gas flow rate	14 l/min
Arc current	70 A
He gas pressure	20 psi (99.99%)

3.2 봉단마개 용접부 X-선 검사

X-선 투과 두께는 Zircaloy-4 연료봉의 경우 약 6 mm, 스테인리스강의 경우 약 4.7mm, 그리고 Zircaloy-4 소연료봉의 경우 약 4.5 mm이다. 검출 가능한 결함의 크기는 투과 두께의 약 1% 정도이므로, X-선 검사로 검출가능한 결함의 크기는 각각 60 μ m, 47 μ m, 45 μ m 정도이다. 결함의 크기를 확인하기 위해 직경 62.5 μ m의 동선을 용접 표면에 부착하였다.

X-선 검사를 위해 검사용 챔버에 삽입된 연료봉은 연

료봉 회전장치에 의해 360도 이상 회전되며 X-선 투과 영상은 고해상도 모니터에 디스플레이되어 실시간으로 검사된다. X-선 투과 영상은 부분적으로 영상처리장치의 영상처리보드에 의해 획득된 후 컴퓨터 하드디스크에 정지영상 형태로 저장되며 영상처리기술에 의해 처리되어 세밀한 검사에 이용된다. Fig. 9는 연료봉 봉단마개 용접부를 정밀하게 검사하기 위한 기하학적 배치를 보여준다. X-선 발생장치와 연료봉 사이의 거리는 20mm, X-선 발생장치와 스크린 사이의 거리는 450mm로 조절되었으며 이 때의 배율은 약 22.5이다.

관전압과 관전류는 최적의 X-선 영상을 얻기 위하여 각각 140~150kV, 50A 범위에서 조정되었다.

Fig. 10은 타겟의 종류에 따른 X-선 발생장치의 초점 크기 특성을 보여준다. 사용된 X-선 발생장치의 타겟 재질은 텅스텐이며 연료봉 용접부 검사조건에서 X-선 출력은 최대 7.5W이다. 이러한 검사 조건에서 X-선 발생장치의 초점 크기는 10 μ m 이하로 유지된다.

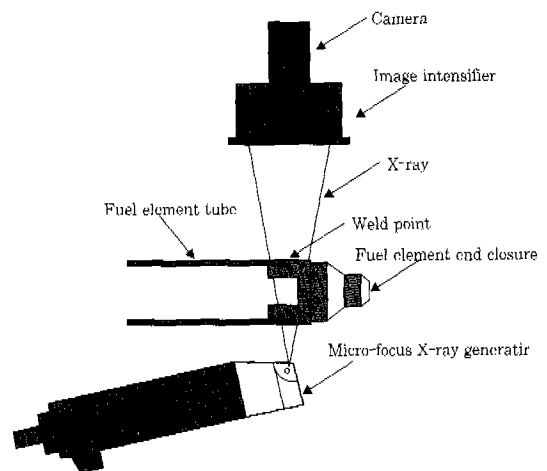


Fig. 9 The precise X-ray inspection of a fuel element end closure weld

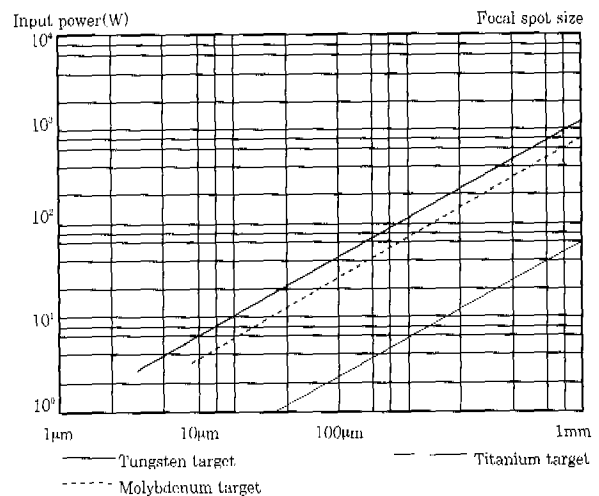


Fig. 10 Spot size of the X-ray generator

3.2.1 봉단마개 용접부 X-선 영상처리

봉단 용접부의 X-선 영상은 Fig. 11과 같다. Fig. 11(a)에서 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.

Average는 시간상에 M 개 영상을 획득한 후 각각의 위치에 대해 평균을 구하는 영상처리방법으로 이 기법을 적용할 경우에 본래의 신호는 변화가 없으나 랜덤노이즈 신호는 상쇄효과에 의해 크기가 1/M로 감소된다⁷⁾.

M이 증가함에 따라 랜덤노이즈의 평균 크기는 감소하지만 M이 증가할 경우 메모리와 처리 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 따라서 시스템에 맞는 적절한 M값을 설정하면 랜덤노이즈가 효과적으로 축소된 선명한 영상을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 M값을 10으로 설정하고 10개의 영상에 대한 평균 영상을 획득하였다. Fig. 11(c)는 average 영상처리방법이 적용된 용접부 영상을 보여준다. Histogram equalization은 영상의 밝기 분포를 효과적으로 확대시킴으로써 영상의 콘트라스트를 개선시켜 영상의 선명도를 증가시킨다⁸⁾. 일반적인 영상 뿐만 아니라 특히 X-선 영상은 콘트라스트가 낮아 일정한 밝기 영역에 데이터가 집중해 있는 현상을 볼 수 있다. Histogram equalization은 데이터가 집중해 있는 밝기 영역을 확장시키고 그에 따라 데이터가 집중되지 않는 영역은 축소시켜 전체적인 밝기 영역은 변화하지 않지만 데이터를 전체 밝기 영역으로 분산시킬 수 있다. 이를 통해 콘트라스트가 개선되어 선명한 영상을 획득할 수 있다.

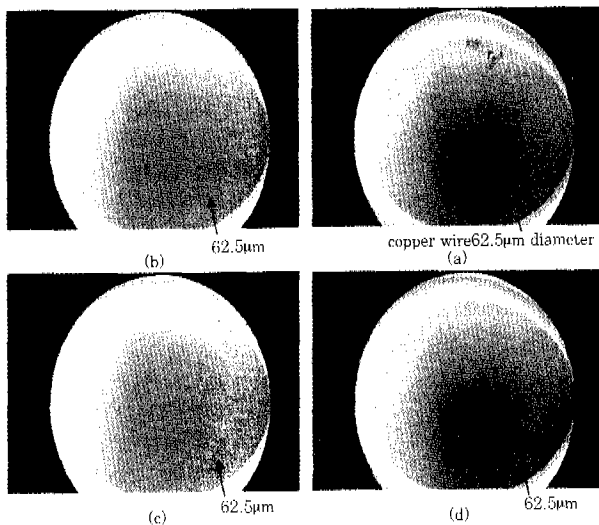


Fig. 11 X-ray image processing (a) Original image (b) Histogram equalized image (c) Averaged image (d) Averaged and histogram equalized image

Fig. 11(b)는 histogram equalization 기법에 의해 콘트라스트가 개선된 영상을 보여준다. Average와 histogram equalization 기법을 연속적으로 적용함으로써 랜덤노이즈가 감소하고 선명도가 증가한 영상을 Fig. 11(d)와 같이 얻을 수 있다.

3.2.2 Zircaloy-4 연료봉 X-선 검사

초점이 유지되고 균일한 밝기 분포를 가진 영상을 얻기 위하여 관전압과 관전류는 각각 140kV, 50A로 조절되었다. 용접부 투시 영상은 Fig. 12와 같으며 영상의 하부에 있는 흰색의 수평선은 직경 62.5µm의 동선에 의한 것이다. X-선 영상의 하부 중앙의 흰 점은 X-선 발생장치 표면에 붙은 금속 이물질에 의한 것이다.

레이저 용접된 Zircaloy-4 연료봉 용접부에서는 최적 용접조건이 아닌 상태에서는 기공과 용입불량이 발생하였으며 최적 용접 조건에서는 결함이 발견되지 않았다.

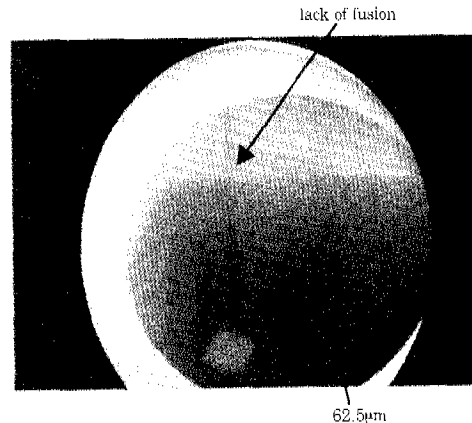


Fig. 12 X-ray inspection of Zircaloy-4 fuel element weld area welded by the Nd:YAG laser

3.2.3 스테인리스강 소연료봉의 X-선 검사

관전압과 관전류는 각각 140kV, 50A로 조절되었으며 용접부 투시 영상은 Fig. 13에서 Fig. 15와 같다.

레이저용접된 스테인리스강 연료봉의 용접부에서는 균열, 기공, 용입불량이 자주 검출되었으며 이러한 결함들은 금속학적 조직시험에서 확인되었다. 결함 발생의 원인 중 하나는 스테인리스강 구조내에서의 빠른 열전달에 의한 급속냉각 영향으로 분석된다.

레이저용접과 함께 스테인리스강 소연료봉 용접을 위해 TIG 용접을 사용하였다. 용접선의 배열 불량 및 용접에너지의 부족 때문에 TIG 용접부에서 일부 용입불량 결함이 검출되었으며 조직시험을 통해 확인되었다.

반복 실험을 통해 용접 위치와 아크 전류를 조절하여 최적 용접조건을 찾았으며 최적조건하에서는 거의 결함이 발견되지 않았다. 따라서 조사시험용 모의 DUPIC 핵연료를 포함한 스테인리스강 소연료봉의 봉단 밀봉 용접방법으로 TIG 용접을 최종적으로 선택

하였으며 3 개의 조사시험용 소연료봉을 TIG 용접한 후 용접부를 검사한 결과 결함이 발견되지 않았다. 검사가 완료된 소연료봉은 캡슐로 조립되어 하나로 원자로에서 성공적으로 조사되었다.

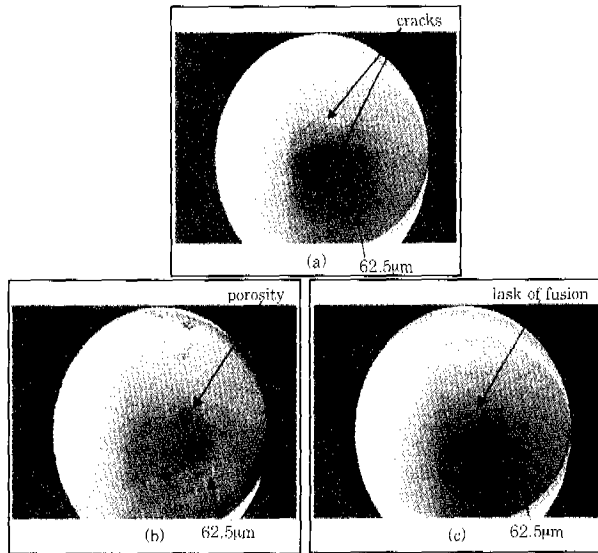


Fig. 13 X-ray inspection of stainless steel mini-element welded by the Nd:YAG laser (a) Cracks (b) Porosity (c) Lack of fusion

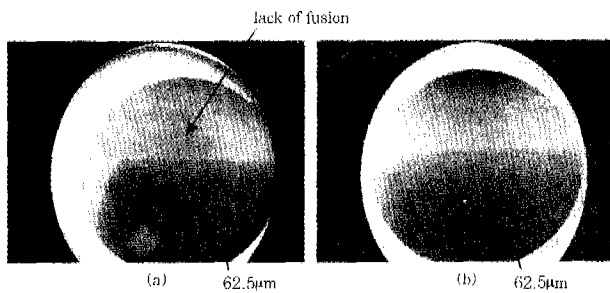


Fig. 14 X-ray inspection of stainless steel mini-element welded by TIG welding (a) Lack of fusion (b) No defect

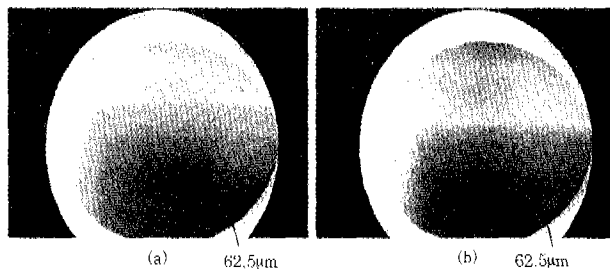


Fig. 15 X-ray inspection of stainless steel mini-element #1 involving DUPIC SIMFUEL for irradiation tests at IANARO (a) The left weld area (b) The right weld area

3.2.4 Zircaloy-4 소연료봉 X-선 검사

최적 영상을 얻기 위하여 관전압과 관전류는 각각

150kV, 50A로 조절되었으며 용접부 투시 영상은 Fig. 16과 같다. Zircaloy-4 소연료봉은 핫셀에서 제조된 DUPIC 핵연료를 원자로에서 조사시험하기 위해 사용되며 핫셀에서 광섬유에 의해 전송된 Nd:YAG 레이저에 의해 원격으로 용접된다.

Zircaloy-4 연료봉에 대해 최적 레이저용접 조건을 찾았으며 최적 조건에서 반복적으로 용접실험을 수행하고 용접시편에 대한 조직시험, 기계적 시험, 헬륨누설시험과 더불어 X-선 투과시험을 수행하였다. 시험 결과 결함이 검출되지 않는 조건에서 Zircaloy-4 소연료봉에 대한 레이저용접 공정을 확립하였으며 확립된 공정에 따라 DUPIC 핵연료 소결체를 장착할 Zircaloy-4 소연료봉을 제조하였다. 매우 방사능이 높은 핵연료를 포함한 연료봉에 대해서는 연료봉의 한쪽 부분만 X-선 투과시험을 수행하였다. 조사시험용 3 개의 소연료봉을 X-선 검사한 결과 Table 3에 정리된 바와 같이 결함이 발견되지 않았으며, 이 소연료봉은 사용후핵연료를 재가공하여 국내에서 최초로 제조된 DUPIC 핵연료를 장착하고 캡슐로 조립되어 하나로 원자로에서 2개월간 성공적으로 조사되었다.

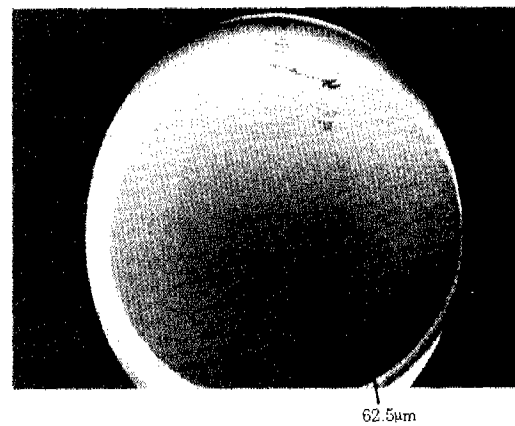


Fig. 16 X-ray inspection of Zircaloy-4 mini-element #1

Table 3 X-ray inspection of Zircaloy-4 mini-elements containing DUPIC pellets for irradiation tests

X-ray generator : Feinfocus(Germany) FXE-160.23K X-ray image intensifier & detector : Balto(Belgium), Baltoscope BIX220 Results : Existence of defects						
No.	Voltage, kV	Current, uA	Defects			Remarks
			lack of fusion, µm	Crack, µm	Porosity, µm	
1	150	50	0	0	0	PASS
1	150	50	0	0	0	PASS
1	150	50	0	0	0	PASS

4. 결 론

DUPIC 핵연료봉 봉단 용접부의 건전성을 비파괴적으로 평가하기 위하여 X-선 투과시험 방법을 적용하였다. 2~4mm 폭의 봉단 용접부를 세밀하게 검사하고 미세 결함을 검출하기 위해 10 μ m 초점 크기의 마이크로포커스 X-선 검사시스템을 개발하고 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 Zircaloy-4 재질의 CANDU 핵연료봉, 조사시험용 모의 DUPIC 핵연료를 장착하고 레이저와 TIG 방법으로 각각 용접된 스테인리스강 소연료봉, 그리고 조사시험용 DUPIC 핵연료를 장착하고 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 Zircaloy-4 소연료봉을 검사하였다. 실험결과를 종합하면 다음과 같다.

- 사용된 연료봉에 대한 X-선 투과 두께는 4.5~6 mm이며 X-선 검사로 검출가능한 결함의 최소 크기는 45~60 μ m 정도이다.

- 연료봉 용접부 X-선 투과 영상에 대해 실시간으로 검사할 수 있으며, 또한 오프라인 방식으로 영상처리장치에서 average와 histogram equalization 기법을 연속적으로 적용함으로써 랜덤노이즈가 감소하고 선명도가 증가한 영상을 통해 정밀한 검사를 수행할 수 있다.

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

- X-선 투과시험 결과 레이저에 의해 용접된 스테인리스강 소연료봉 용접부에서는 스테인리스강 내에서의 열전달 특성으로 인해 균열, 기공, 및 용입불량이 종종 검출되었다.

- Zircaloy-4 CANDU 연료봉의 레이저 용접부, 하나로 원자로에서 조사시험될 모의 DUPIC 핵연료를 장착한 스테인리스강 소연료봉의 TIG 용접부, DUPIC 핵연료를 장착한 Zircaloy-4 소연료봉의 레이저 용접부에서는 결함이 발견되지 않았다.

X-선 투과시험을 통해 건전성이 확인된 모의 DUPIC 핵연료를 장착한 스테인리스강 소연료봉 및

사용후핵연료를 재가공하여 국내에서 최초로 제조된 DUPIC 핵연료를 장착한 Zircaloy-4 소연료봉은 캡슐로 조립되어 하나로 원자로에서 2개월간 성공적으로 조사되었다. 계속적으로 핫셀에서 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 Zircaloy-4 재질의 소연료봉과 중수로용 핵연료봉의 건전성을 개발된 X-선 투과시험 방법으로 확인할 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 중장기 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

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), pp.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), pp.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), pp.571-581
4. 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
5. M. S. Yang etc. : Quality control instruction of CANDU fuel, (1988)
6. F. L. Yapuncich : Remote real time X-ray examination of fuel elements in a hot cell environment, Proceedings of the ANS Fifth Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, (1993), pp.843-848
7. Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods : Digital image processing, Addison Wesley, (1992), pp.187-189
8. Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, Digital image processing, Addison Wesley, (1992), pp.173-178