

중수로용 핵연료봉 지지체 레이저 용접부 미세초점 X-선 검사
**Micro-focus X-ray Inspection of the bearing pad welded by laser
for CANDU Fuel Element**

김웅기, 김수성, 이정원, 양명승

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중수로 핵연료봉의 지지체 접합 방법인 브레이징 공법은 독성이 강한 베릴륨을 사용할 뿐만 아니라 공정이 복잡하여 이에 대한 해결 방법으로 레이저 용접방법이 검토되고 있다. 본 연구에서는 레이저용접된 지지체 용접부의 미세결함을 비파괴적으로 검사하기 위해 X-선 검사방법을 적용하였다. 용접 비이드 폭이 2~3 mm에 불과한 용접 영역 내부의 미세결함을 비파괴적으로 검사하고 용접부의 건전성을 확인하기 위해 마이크로포커스 X-선 투과시험을 적용하였다. 마이크로포커스 X-선 투과시험을 위해 마이크로포커스 X-선 발생장치, 고분해능 image intensifier와 비디오 카메라, DUPIC 핵연료봉 회전장치 및 영상처리장치로 구성된 X-선 투과시험장치를 개발하였으며 개발된 시스템을 이용하여, Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 지지체 용접부의 결함을 검사하였다. 용접부에 존재하는 결함을 세밀하게 검사하기 위하여 영상처리방법을 적용함으로써 랜덤노이즈가 감소하고 콘트라스트가 개선된 X-선 영상을 획득하였으며 개선된 영상을 이용하여 지지체 용접부에 존재하는 결함을 검출하였다.

Abstract

To attach the bearing pads on the surface of CANDU fuel element, laser welding technique has been reviewed to replace brazing technology which is complicate process and makes use of the toxic beryllium. In this study, to evaluate the soundness of the weld of the bearing pad of CANDU fuel element, a precise X-ray inspection system was developed using a micro-focus X-ray generator with an image intensifier and a real time camera system.

The weld of the bearing pad welded by Nd:YAG laser has been inspected by the developed inspection system. Image processing technique has been applied to reduce random noise and to enhance the contrast of the X-ray image. A few defects on the weld of the bearing pads have been detected by the X-ray inspection process.

1. 서론

지지체는 중수로 핵연료봉 표면에 부착되어 핵연료 집합체와 압력관 사이의 간격을 유지하여 냉각수의 흐름을 원활하게 유지하고, 냉각수의 흐름으로 인한 피복관의 진동시 피복관 손상을 방지한다. 기존의 중수로 핵연료봉 제조시 지지체는 브레이징 방법으로 접합된다. 브레이징 방법은 독성이 강한 베릴륨을 사용할 뿐만 아니라 공정이 복잡하여 이에 대한 해결 방법으로 레이저 용접방법에 대한 적용 연구가 수행되고 있으며[1-2] 본 연구에서는 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 지지체 용접부의 미세결함을 비파괴적으로 검사하기 위해 X-선 검사방법을 적용하였다.

일반적으로 지지체 용접부의 건전성을 검사하기 위하여 금속학적 조직시험, 기계적 시험과 같은 파괴검사가 수행되지만 본 연구에서는 용접 비이드 폭이 2~3 mm에 불과한 용접 영역 내부의 미세결함을 비파괴적으로 검사하고 지지체 용접부의 건전성을 확인하기 위해 핵연료봉 봉단마개 용접부 검사에 활용된 바 있는 마이크로포커스 X-선 투과시험을 적용하였다[3]. 지지체 용접부에 대한 마이크로포커스 X-선 투과시험을 위해 마이크로포커스 X-선 발생장치, 고분해능 image intensifier와 비디오 카메라, DUPIC 핵연료봉 회전장치 및 영상처리장치로 구성된 X-선 투과시험 장치를 개발하였으며 개발된 시스템을 이용하여, Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 지지체 용접부의 결함을 검사하였다. 용접부에 존재하는 결함을 세밀하게 검사하기 위하여 영상처리방법을 적용함으로써 랜덤노이즈가 감소하고 콘트라스트가 개선된 X-선 영상을 획득하였으며 개선된 영상을 이용하여 지지체 용접부에 존재하는 결함을 검출하였다. 레이저에 의해 용접된 지지체 용접부의 결함 검사에 마이크로포커스 X-선 검사기술을 적용함으로써 중수로용 핵연료봉 지지체 접합 및 검사 공정을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

2. X-선 검사시스템 개발

개발된 중수로 핵연료봉 지지체 용접부 X-선 검사시스템은 그림 1의 구성도에서 볼 수 있는 바와 같이 마이크로포커스 X-선 발생장치, X-선 image intensifier, 비디오 카메라 및 모니터, 핵연료봉 회전장치 및 영상처리장치로 구성되었다.

마이크로포커스 X-선 발생장치는 FEINFOCUS의 FXE160.23K 모델로서, 20~160 kV의 관전압과 최대 1 mA의 관전류, 그리고 약 10 μm 이하의 최소 초점 크기를 갖는다. X-선 image intensifier는 X-선 영상을 광학영상으로 변환시켜주는 장치로 X-선 검출면의 직경은 220 mm이고 분해능은 40~60 lines/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 512x512x8 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. 연료봉 회전장치는 임의의 각도에서 지지체 용접부 검사가 가능하도록 연료봉을 회전시킬 수 있다.

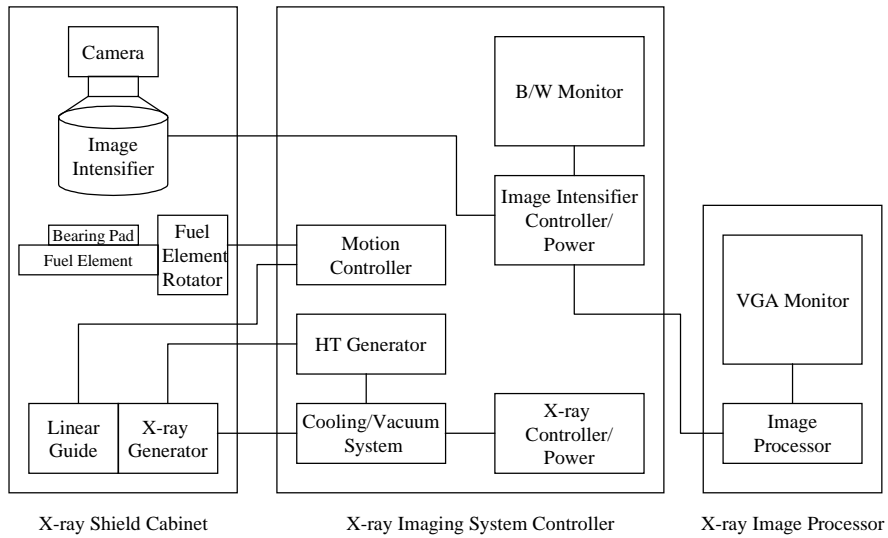


그림 1. 중수로 핵연료봉 지지체 용접용 X-선 검사시스템 구성도



그림 2. 중수로 핵연료봉 지지체 용접용 X-선 검사시스템

3. 핵연료봉 지지체 용접부 검사

3.1 지지체 용접

중수로 핵연료봉의 표면에 접합된 지지체는 그림 3과 같이 집합체 제조시 집합체의 표면에 노출되도록 조립된다. 집합체를 제조하기 전에 핵연료봉이 완성되며 지지체 용접공정은 피복관에 핵연료 소결체를 장전하기 전에 수행된다. 지지체의 재질은 피복관과 같은 Zircaloy-4 재질로 제조된다. 평균출력 500 W, 파장 1.06 μm 의 펄스형 Nd:YAG 레이저시스템과 코아직경 600 μm 및 800 μm , 길이 20 m의 스텝 인덱스형 광섬유로 구성된 레이저빔전송장치 및 헬륨분위기의 용접챔버를 이용하여 지지체를 용접하였다. 그림 4는 Nd:YAG 레이저에 의해 연료봉 표면에 용접된 지지체 외관을 보여준다.

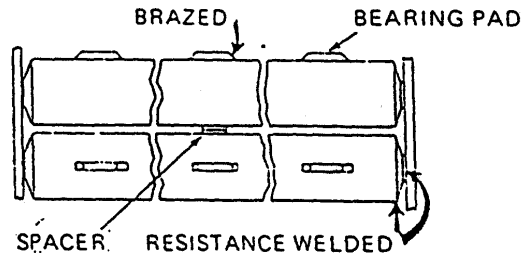


그림 3. 중수로 핵연료 집합체

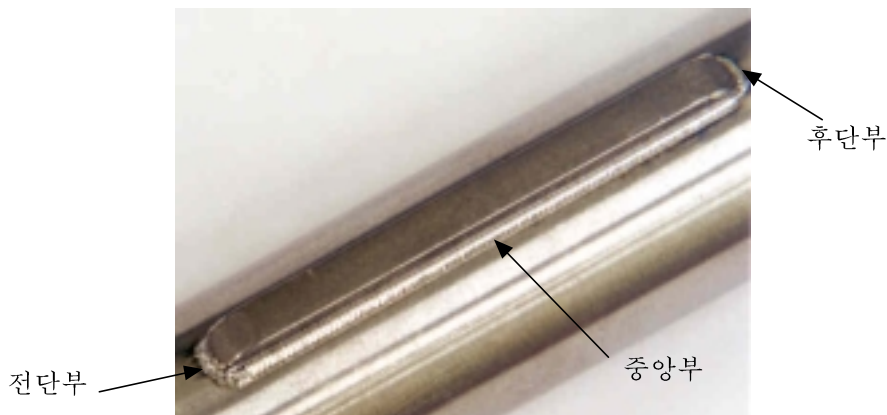


그림 4. Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 Zircaloy-4 재질의 지지체

3.2 지지체 용접부 X-선 검사

X-선 투과 두께는 약 0.4~3 mm이다. 검출 가능한 결함의 크기는 투과 두께의 약 1% 정도이므로, X-선 검사로 검출가능한 결함의 크기는 각각 6~30 μm 정도이다. 결함의 크기를 확인하기 위해 직경 50 μm 의 동선을 용접 표면에 부착하였다.

X-선 검사를 위해 검사용 챔버에 삽입된 연료봉은 연료봉 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. 그림 5는 지지체 용접부를 정밀하게 검사하기 위한 기하학적 배치를 보여준다. X-선 발생장치와 연료봉 사이의 거리는 20 mm, X-선 발생장치와 스크린 사이의 거리는 450 mm로 조절되었으며 이 때의 배율은 약 22.5이다. 관전압과 관전류는 최적의 X-선 영상을 얻기 위하여 각각 140~150 kV, 30 μA 범위에서 조정되었다. 그림 6은 타겟의 종류에 따른 X-선 발생장치의 초점 크기 특성을 보여준다. 사용된 X-선 발생장치의 타겟 재질은 텅스텐이며 연료봉 용접부 검사조건에서 X-선 출력은 최대 4.5 W이다. 이러한 검사 조건에서 X-선 발생장치의 초점 크기는 10 μm 이하로 유지된다.

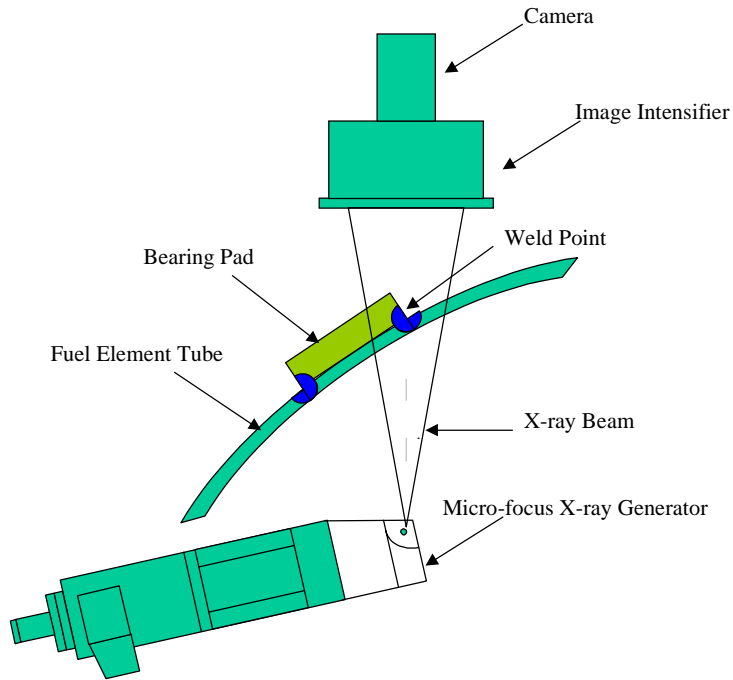


그림 5. 지지체 용접부 정밀 X-선 검사를 위한 기하학적 배치

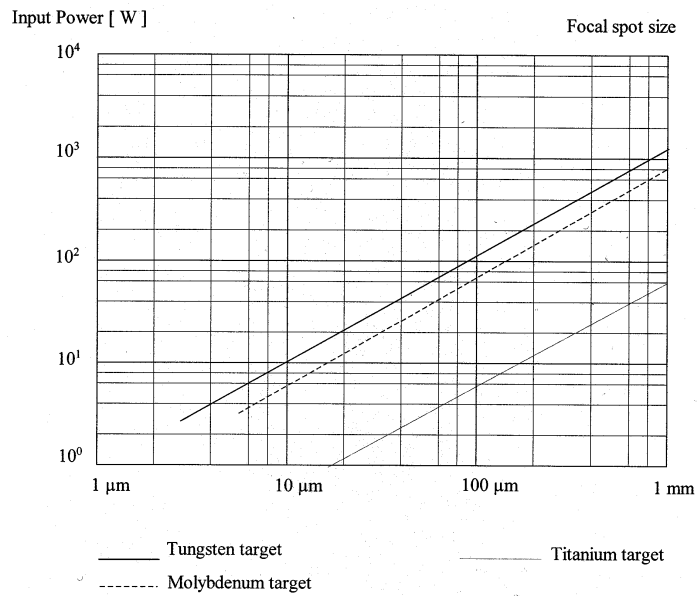


그림 6. X-선발생장치의 초점 크기

3.2.1 지지체 용접부 X-선 영상처리

지지체 용접부의 X-선 영상은 그림 7과 같다. 그림 7(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 정지영상에 대해 시간상에 M 개 영상을 획득한 후 각각의 위치에 대해 평균을 구하는 영상처리기법으로 이 기법을 적용할 경우에 본래의 신호는 변화가 없으나 랜덤노이즈 신호는 상쇄효과에 의해 크기가 $1/\sqrt{M}$ 로 감소된다[4]. 그림 7(c)는 average 영상처리기법이 적용된 용접부 영상을 보여준다. Histogram equalization은 영상의 밝기 분포를 효과적으로 확대시킴으로써 영상의 콘트라스트를 개선시켜 영상의 선명도를 증가시킨다[5]. 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. 그림 7(b)는 histogram equalization 기법에 의해 콘트라스트가 개선된 영상을 보여준다. Average와 histogram equalization 기법을 연속적으로 적용함으로써 랜덤노이즈가 감소하고 선명도가 증가한 영상을 그림 7(d)와 같이 얻을 수 있다.

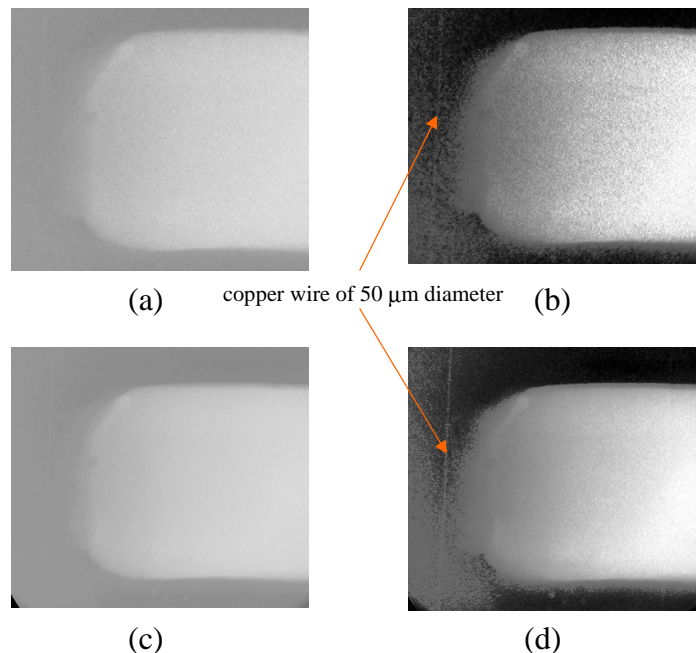


그림 7. X-선 영상 (a) 원영상 (b) Histogram equalized image
(c) Averaged image (d) Averaged and histogram equalized image

3.2.2 Zircaloy-4 지지체 용접부 X-선 검사

초점이 유지되고 균일한 밝기 분포를 가진 최적 영상을 얻기 위하여 관전압과 관전류는 각각 150 kV, 50 μ A로 조절하여 지지체 용접부 투시 영상은 획득하였다. 각각의 지지체 용접부에 대해 연료봉을 길이 방향으로 이동시키면서 용접부를 검사하다. 확대율이 높기 때문에 하나의 영상에 용접부가 모두 표현되지 못하며 부분적으로 표현된다. 실험 결과 영상은 양쪽 끝단부와 중심부에 대한 영상을 나타내고 있다. 정밀한 결함 검사를 위해 획득된 영상을 average 처리하여 노이즈를 제거하였고 밝기 분포를 30% 정도 어둡게 조절한 후에 histogram equalization 처리하여 선명한 영상을 획득하였다. 결과 영상은 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 영상의 좌측부에 존재하는 흰색의 수직선은 직경 50 μ m의 IQI 동선에 의한 것으로 결함의 크기 추정에 사용된다. 실험결과 중심부의 직선 용접부에서는 결함이 검출되지 않았으나 양 끝단의 모서리 부분에서 기공이 일부 검출되었다. 이는 용접 장치의 기하학적 구조의 미비로 용접부와 용접 팁 사이의 각도 및 거리가 맞지 않고 지지체의 용접면이 피복관 표면과 밀착되지 않아 발생한 것으로 사료된다. 따라서 레이저 용접용 지지체는 피복관 표면의 곡면과 밀접한 구조를 갖도록 설계하는 것이 요구된다.

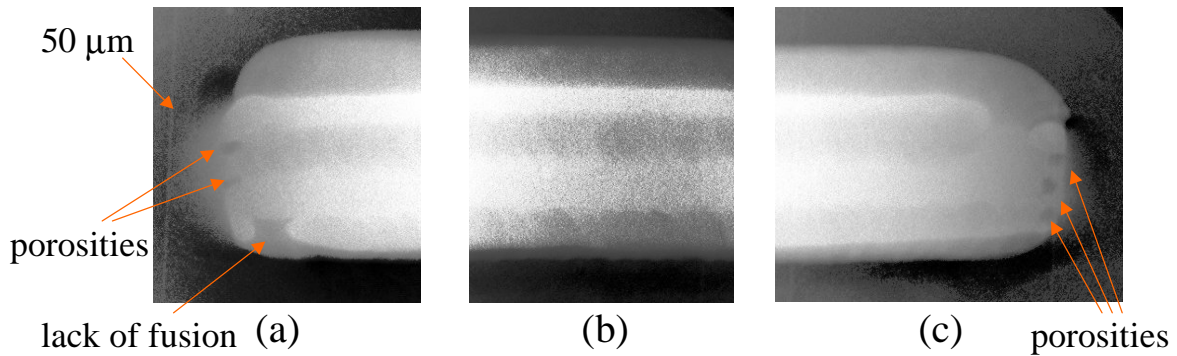


그림 8. 지지체1 레이저 용접부 X-선 검사
(a) 전단부, (b) 중앙부, (c) 후단부

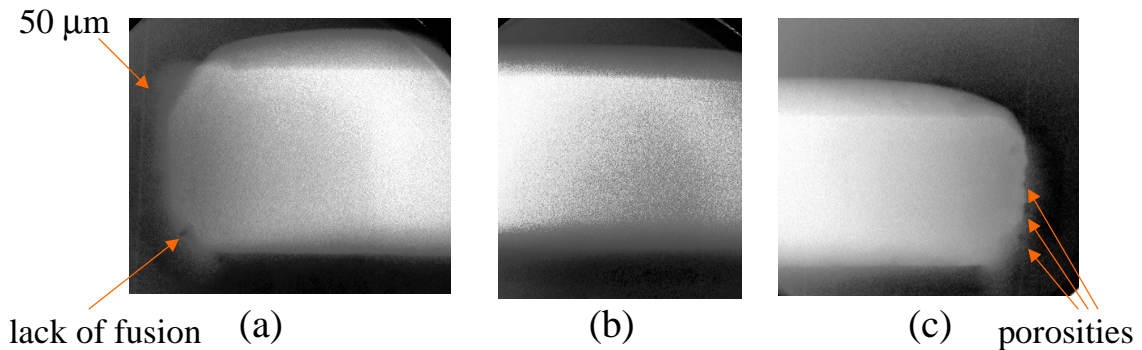


그림 9. 지지체2 레이저 용접부 X-선 검사
(a) 전단부, (b) 중앙부, (c) 후단부

4. 결론

중수로 핵연료봉 지지체 레이저 용접부의 건전성을 비파괴적으로 검사하기 위하여 미세초점 X-선 투과시험 방법을 적용하였다. 2~3 mm 폭의 지지체 용접부를 세밀하게 검사하고 미세 결함을 검출하기 위해 10 μm 초점 크기의 마이크로포커스 X-선 검사시스템을 개발하고 Nd:YAG 레이저에 의해 용접된 Zircaloy-4 재질의 중수로 핵연료봉 지지체 용접부를 검사하였다. 실험결과를 종합하면 다음과 같다.

- 사용된 연료봉에 대한 X-선 투과 두께는 0.4~3 mm이며 X-선 검사로 검출가능한 결함의 최소 크기는 4~30 μm 정도이다.
- 지지체 용접부를 X-선 투과 영상을 이용하여 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 140~150 kV, 30 μA 범위에서 조절되었으며 X-선 발생장치의 초점 크기는 10 μm 이하가 유지되도록 하였다.
- X-선 투과시험 결과 레이저에 의해 용접된 지지체 용접부의 직선부분에서는 결함이 검출되지 않았으나 모서리 부분에서 기공이 일부 검출되었다.
- 마이크로포커스 X-선 검사기술을 레이저에 의해 용접된 지지체 용접부 뿐만 아니라 간격체의 결함 검사에도 적용함으로써 중수로용 핵연료봉 지지체 및 간격체에 대한 접합 공정과 검사 공정을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 김수성 등, "핵연료 가공용 초정밀 레이저 용접기술 개발," KAERI/RR-2080/2000, 한국원자력연구소, pp.46-65, (2000)
- [2] 김수성 등, "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, pp.571-581, (1997)
- [3] 양명승 등, "Development of DUPIC fuel fabrication and inspection equipment," KAERI/TR-1319/99, 한국원자력연구소, pp.72-75, (1999)
- [4] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, "Digital image processing," Addison Wesley, pp.187-189, (1992)
- [5] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, "Digital image processing," Addison Wesley, pp.173-178, (1992)