

건식재가공 소결체의 계장 조사시험을 위한 seal tube용접에 관한 연구

A Study on the Seal Tube Welding for Measurement Irradiation Test Using Dry Process Pellets

김수성, 이철용, 김웅기, 이정원, 송기찬

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

건식재가공 핵연료를 이용한 계장 조사시험을 위하여 축소 연료봉 제조를 계획하고 있으며, 이때 조사시험 사양에 적합한 seal tube 용접공정 조건 확립을 위해 Nd:YAG 레이저용접이 사용되었다. 또한 seal tube 용접을 위한 레이저변수 및 작업조건을 조사하였으며, seal tube 용접공정 조건을 설정하기 위해 예비실험이 수행되었다. 실험에서는 인코넬 600 직경 2mm인 tube에 탄탈늄 재질의 직경 1.2mm, sheath 두께 0.15mm의 온도 센서로 삽입되는 seal tube 용접의 최적조건이 선정되었다. 본 연구에서는 각각의 용접시편에 대한 외관시험, 헬륨누출시험 및 용접단면 관찰을 통하여 자격화 시험이 수행되었고, 아울러 계장 지그 조사시험용 seal tube 용접부에 대한 품질의 건전성이 입증되었다.

Abstract

The irradiation test of mini-elements was planned for the measurement irradiation test using dry process pellets. To establish seal tube welding process satisfying the requirements of irradiation test, Nd:YAG laser welding system was used, and preliminary welding experiments for optimizing laser parameters and working conditions of seal tube welding was performed. Inconel 600 tubes with 2mm diameter and 0.15mm sheath thickness of tantalum tubes with 1.2mm diameter have been prepared and optimum conditions of the seal tube welding have been selected. In this study, the qualification test was performed by visual tests, helium leak inspections, and penetration depth examinations to verify the seal tube welding procedure. The soundness of the quality of seal tube weldments for the measurement irradiation tests has been confirmed by the procedure qualification test.

1. 서론

최근 선진국에서는 이미 새로운 핵연료개발 및 조사시험용 지그 제작 등이 활발히 진행되고 있음에 따라 핵연료제조 및 특수용도의 부품제작에 대한 원격작업으로 레이저용접기술이 수행되어지고 있다.^[1,2] 현재 DUPIC 핵연료 조사시험에서는 4차에 걸쳐서 핫셀에서 제조된 소결체에 대한 조사시험을 수행하였으며, 금년에는 DUPIC 핵연료에 대한 계장 조사시험을 수행할 예정이다. 이에 따라 건식재가공 소결체의 성능시험에 사용되는 지그 제작에서 소결체 중심온도 측정용 계장센서를 이용한 인코넬 600 튜브와 탄탈늄 재질의 seal tube 용접이 필요하게 된다. 이때 계장 지그 조사시험용 seal tube 미세부품의 중요한 역할로 볼 때, 레이저용접의 활용은 용융점이 높고 이종금속 용접은 물론 제조시 열변형이 거의 없고 핵연료 성능향상의 측면에서 매우 효과적이다. 따라서 레이저가 광섬유로 전송되어 미세용접이 얻어 질 수 있고 특히 이종금속의 용접에 적합한 초정밀 용접기술이 필요하게 되었다.^[3]

본 연구는 펄스형 200W Nd:YAG 레이저 및 SI 600um의 광섬유를 이용하여 조사시험 사양에 적합한 seal tube 용접공정 조건을 조사하였으며, 시험편인 인코넬 600 직경 2mm 튜브와 탄탈늄 재질의 직경 1.2mm, sheath 두께 0.15mm 인 온도센서가 삽입되는 seal tube 용접의 레이저변수 및 공정조건이 조사되었다. 또한 각각의 용접시험에 대한 외관시험, 헬륨누출시험 및 용접단면 관찰을 통하여 자격화 시험이 수행되었다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 Fig. 2.1과 같이 외경 1.2mm 두께 0.15mm인 탄탈늄 온도센서와 외경 2mm 인 인코넬 600 튜브로 사용되었다. 탄탈늄 온도센서 및 인코넬 튜브에 존재하는 이물질 제거하기 위하여 아세톤 용액에 30분간 담구어 세척한 다음 건조기에 의해 60℃로 건조시켰다. 이때 레이저용접시 조사시험용 seal tube 부품의 열변형 억제 및 산화방지를 위해서 Fig. 2.2와 같이 특수하게 설계된 holding fixture 및 쉴딩박스를 사용하였다.

2.2 실험 및 시험방법

레이저용접 실험시 광학출구커플러부는 레이저절단 보다는 가스압력이 낮으며, 이때

사용되는 보호가스도 용접부의 산화를 방지하기 위한 것으로 seal tube의 전체 용융면을 채울 수 있도록 380. 로 회전하여 밀봉하게 하였다. 이러한 보호가스의 역할은 용접시편의 산화방지 이외에 레이저용접시 플라즈마 형성에 높은 에너지를 요하는 Ar 가스가 레이저와 재료의 상호작용에 밀접한 관계를 가지고 있다. 레이저가 용접시편을 정확하게 초점위치를 가지도록 CCD 카메라와 광학출구커플러를 사용하여 정렬하였으며, 초점위치는 다이오드레이저를 집광렌즈로 통하여 시험편에 초점을 맺히게 한 다음 CCD 카메라의 모니터에 의해 가장 작은 초점이 될 때 용접을 수행하였다. Fig. 2.3은 seal tube 용접을 위한 감시장치 및 용접제어장치를 보여주고 있다.

레이저용접된 시편은 외관시험과 용접단면 관찰이 수행되며, 이때 seal tube 용접부에서 용입부족이나 파괴가 발생되지 않으면 건전한 용접으로 평가된다. Seal tube 용접부의 용접단면 관찰은 시편의 원주방향으로 임의의 한 단면을 절단하여 마운팅한 후 연마지로 No. 200, 400, 600 및 1000 순으로 갈아낸 다음 폴리싱된 시험편은 증류수로 10분간 초음파 세척하고 건조시킨 후, 부피분율로 H₂O: 45, HNO₃: 45, HF₄: 10의 용액에 스웽엣칭하여 용접단면과 결함 등을 금속광학 현미경으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 레이저변수에 따른 용접특성

인코넬 및 탄탈늄의 재질은 고밀도 에너지방법인 전자빔이나 레이저를 이용한 용접에 매우 우수하다. 특히 Nd:YAG 레이저용접은 진공을 사용하지 않고 매우 작은 빔크기를 가지고 있어서 열변형이 거의 없다. Fig. 3.1은 광섬유 600um을 이용한 레이저변수별 seal tube 시편의 용접상태를 보여준다. 여기서 Table 3.1에서와 같이 사용된 레이저변수는 펄스폭을 5 ms, 반복율 5 Hz를 일정하게 하고 평균출력은 15 W에서 30 W로 변화시켰다. 시편 1은 평균출력 15 W 일 때 전반적으로 탄탈늄 튜브의 용입상태가 약하게 나타나고 있으며, 시편 4는 평균출력 30 W 일 때 탄탈늄의 튜브가 과용융으로 인한 boiling 현상으로 용입부분이 함몰상태로 나타나고 있었다. Fig. 3.2는 레이저용접시 펄스당 에너지에 따른 용접깊이를 나타낸 것이다. 여기서 충전전압 185 V의 펄스에너지 6J 부터 Ta의 피복재 두께 0.15mm를 관통된 과용융 상태가 발생하였으며, Fig. 3.3과 같이 충전전압이 180 V에서 펄스당 에너지가 5 J 정도에서 적절한 용입상태를 보여주고 있다. 여기서 seal tube 용접을 최적화하게 하기 위해서는 Table 3.1 에서와 같이 레이저출력 20 W에서 27 W 범위에서 용입은 0.1 내지 0.15 mm 이며, 이때 회전속도는 6 rpm으로 하였다. 실제로 계장 조사시험용 연료봉의 seal tube 부품형상이 너무 작기 때문에 회전

척에 고정치구를 사용하여도 회전용접시 균일한 원주형태로 유지하기가 불가능하다. Fig. 3.4는 원주용접시 시편의 불규칙적인 배열로 인하여 한쪽면이 용입부족(lack of fusion) 즉 함몰 현상이 일어난 것을 보여주고 있다. Fig. 3.5는 이러한 용입부족된 부분을 채워주기 위해서 결함된 부위에서 90°cw 방향으로 이동하여 재용융(remelting) 방법으로 이 행한 것을 도식적으로 보여주고 있다.

3.2 Seal tube 용접의 자격화시험

핵연료 캡슐제작을 위한 조사시험용 seal tube 용접의 예비실험을 바탕으로 인코넬과 탄탈늄 튜브간의 밀봉용접을 하게 된다. 앞의 3.1절에서 기술된 내용과 같이 외경 1.2 mm, 두께 0.15 mm인 탄탈늄과 외경 2 mm 인 인코넬 튜브를 이루는 seal tube 용접의 최적 공정조건이 선정되었으며, 아울러 균일한 원주용접을 위해서 Fig. 3.5와 같이 용입부족된 부분을 채워주는 용접방법이 제시되었으며, 또한 조사시험용 seal tube 용접부에 대한 He 누출시험 절차가 확립되었다. 그리고 조사시험용 용접자격화의 검사계획서 및 공정시방서[Fig. 3.6]에 따라 용접시편이 제작되었고, 각각의 용접시편에 대한 치수검사, He 누출시험 및 용접단면 검사가 수행되었다. 이것은 핵연료 지그 제작을 위한 seal tube 용접자격화 시험이 수행된 것으로, 각각의 시편에 대한 결과는 모두 양호하게 나타났다. 따라서 본 자격화 시험의 절차에 따라 조사시험용 seal tube 부품을 제조하였다. 앞으로 다양한 핵연료 개발을 위한 계장 지그의 조사시험을 위한 자격화된 공정 조건으로 seal tube 부품을 제조할 수 있게 되었다.

4. 결론

본 실험에서는 건식재가공 핵연료의 계장 조사시험용 seal tube 용접을 위한 공정조건, 이음설계, 용접주변장치의 개발과 아울러 주요 변수들이 용접에 미치는 영향을 조사하여 신뢰성 있는 공정조건을 확립하였으며, 이에 대한 실험결과 및 샘플제조 관련하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

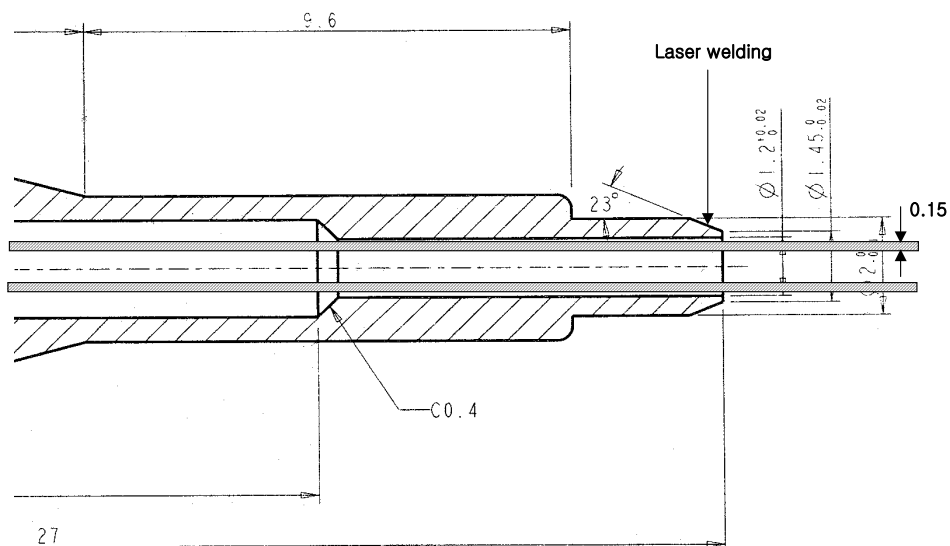
1. 인코넬 및 탄탈늄을 이용한 외경 1.5 mm, 두께 0.15 mm인 seal tube 용접인 경우 평균출력 20 W 내지 27 W, 펄스당 에너지가 5 J 에서 적절한 용입을 얻었다.
2. 용접시편의 외관검사 및 용접단면 조사에서 모두 양호하게 관찰되었으며, He 누출검사에서도 양호한 결과치를 얻었다.
3. Seal tube 용접의 예비실험을 바탕으로 용접자격화 시험이 수행되었으며, 향후 계장 지그 핵연료 조사시험용 연료봉에 활용되어 seal tube 샘플 제조에 수행될 예정이다.

감사

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

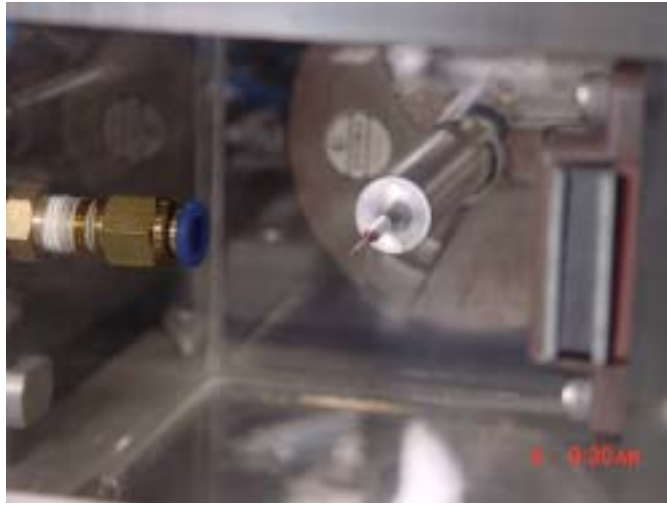
참고문헌

- [1] J. Saito, M. Shimizu : Development of Re-instrumentation Technology for Irradiated Fuel Rod, The 2nd Kaeri-Jaeri Joint Seminar on PIE Tech., KAERI-NEMAC/TR-32, (1995), pp.125-135
- [2] H. Sakai, H. Kawamura : New Apparatus of JMTR Hot Laboratory, Department of JMTR, The 2nd Kaeri-Jaeri Joint Seminar on PIE Tech., KAERI-NEMAC/TR-32, (1995), pp.65-77
- [3] Pankaj B. Desai & P. G. Kulkarni : Trends in Joining Technology Development for PHWR Fuel Assemblies in India. (1999), pp.205-214

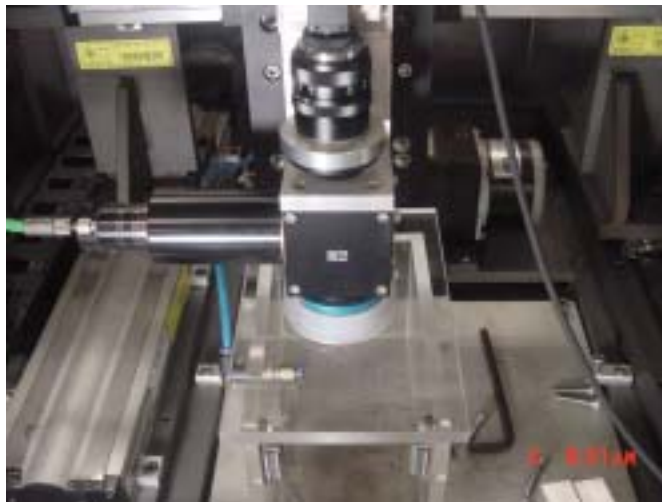


Inconel Tube+Ta Tube 형상

Fig. 2.1 용접시편의 형상



(holding fixture)



(shielding box)

Fig. 2.2 용접실험을 위한 고정구 및 쉴딩박스



(감시장치)



(용접제어장치)

Fig. 2.3 Seal tube 용접을 위한 감시장치 및 용접제어장치

Table 3.1 Seal tube 용접을 위한 레이저변수 값

구분	충전전압(V)	펄스폭(ms)	반복율(Hz)	평균출력(W)
시편 1	160	5	5	15
시편 2	170	5	5	21
시편 3	180	5	5	27
시편 4	185	5	5	30



(시편 1 ; 15W 3J)



(시편 3 ; 27W 5J)



(시편 4 ; 30W 6J)

Fig. 3.1 Seal tube 레이저용접된 시편 ($\times 20$)

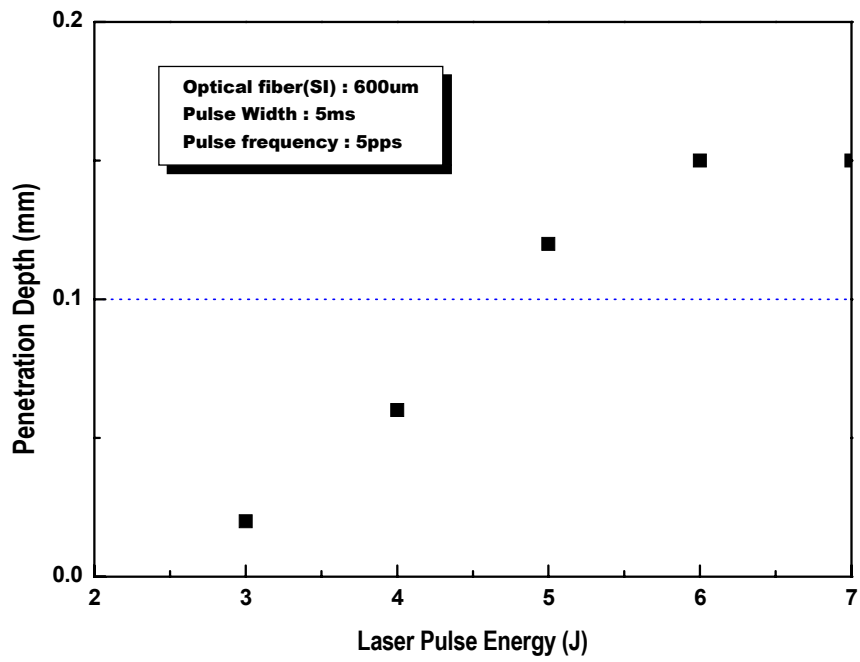


Fig. 3.2 레이저 펄스에너지에 따른 용접깊이의 변화

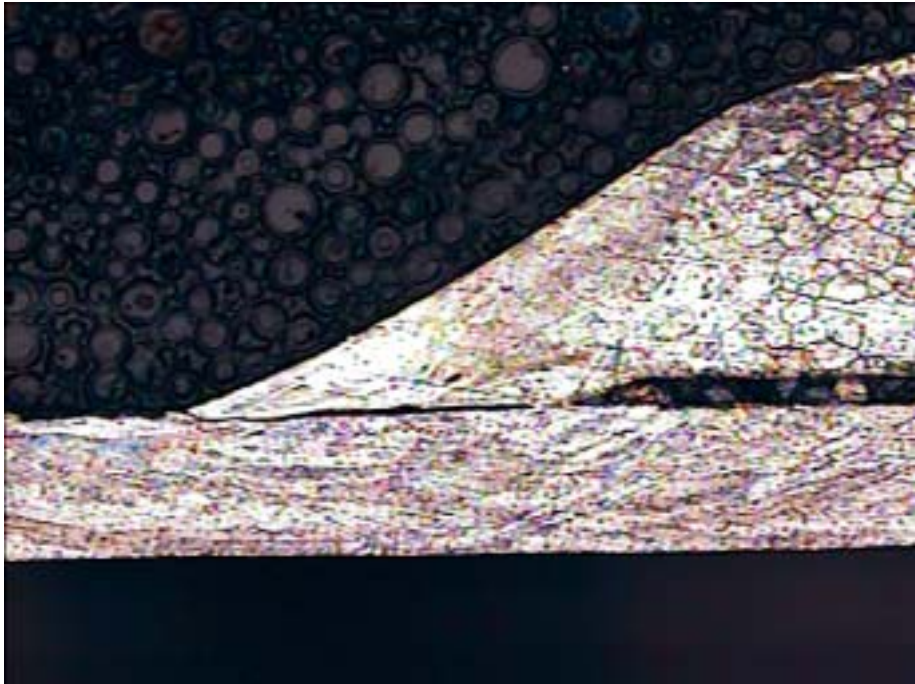


Fig. 3.3 레이저를 이용한 seal tube 용접단면 ($\times 50$)

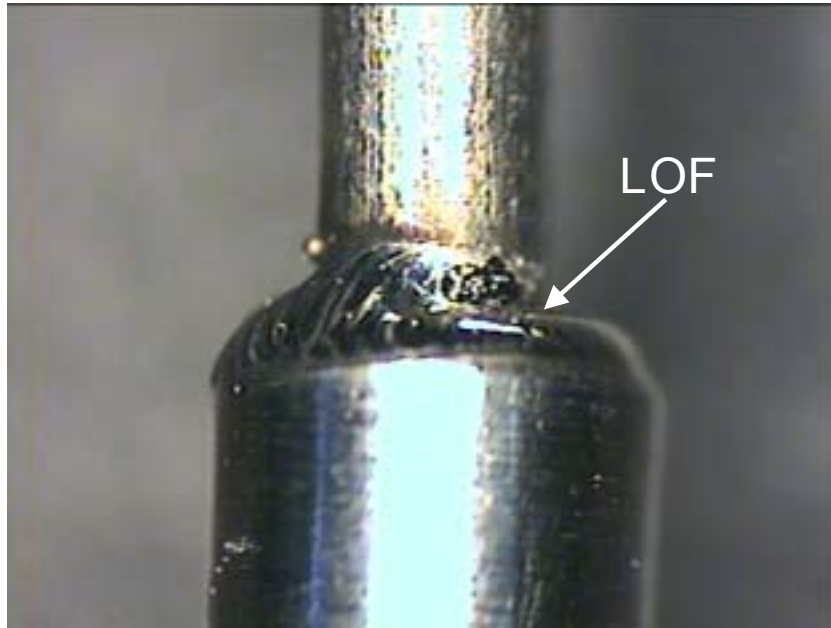


Fig. 3.4 Seal tube 원주부분의 용입부족 현상 (×20)

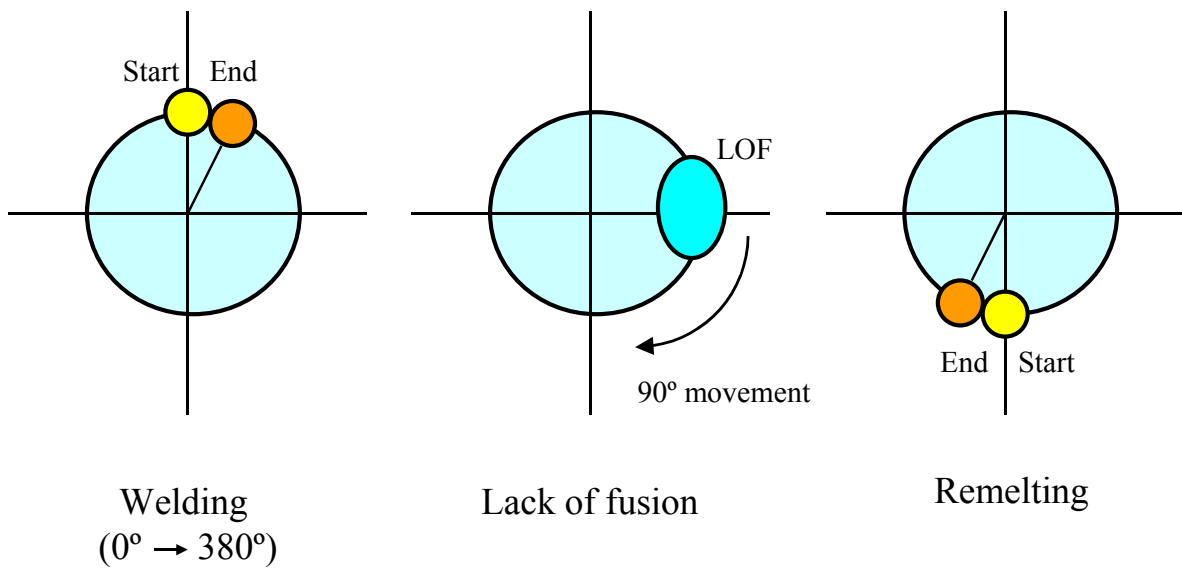


Fig. 3.5 Seal tube 용접을 위한 재용융방법의 도식도

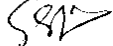



KAERI
한국원자력연구원

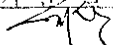
공 정 시 방 서
PROCESS SPECIFICATION

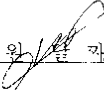
문서번호 WP-04 Doc. No.	개정번호 0 Rev. No.	날짜 2003. 8. 18. Date
------------------------	--------------------	-------------------------

제 목 Element Seal Tube Welding
Subject

작 성 핵연료원격제조기술개발 김수성 날짜 2003. 8. 18.
Prepared by 

검 토 건식재가공 핵연료성능평가기술개발 이철용 날짜 2003. 8. 19
Reviewed by 

검 토 건식재가공 핵연료성능평가기술개발 송기찬 날짜 2003. 8. 19
Reviewed by 

검 토 핵연료원격제조기술개발 이정원 날짜 2003. 8. 19
Reviewed by 

검 토 품질보증실장 임남진 날짜 2003. 8. 27
Reviewed by 


승 인 건식공정핵연료기술개발부장 양명승 날짜 2003. 8. 27
Approved by 

Fig. 3.6 Seal tube 용접을 위한 공정시방서