

조사시험용 봉단마개 레이저용접의 자격화 연구

A Study on the Qualification of End Cap Laser Welding for Irradiation Testing

김수성, 김웅기, 이정원

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료 원격 제조기술 개발을 위하여 조사시험용 연료봉 제조를 계획하고 조사시험 사양에 적합한 연료봉 제조공정 조건 확립을 위해 봉단마개 레이저용접을 수행하였고, 이에 따른 지르칼로이-4 용접의 특성을 조사하였다. 또한 조사시험용 연료봉제조의 공정조건을 설정하기 위해 예비실험을 수행하였으며, 실험결과에서 연료봉 직경 13.08 mm, 두께 0.4 mm 인 피복관과 봉단마개를 이루는 연료봉용접의 최적조건이 선정되었다. 본 연구에서는 이에 따른 각각의 용접시편에 대한 인장시험, 헬륨누출시험, 진직도 치수검사, 펠시험 및 미세조직 등의 자격화시험을 수행하여 지르칼로이-4 용접에 대한 기계적 시험 및 야금학적 관찰을 통하여 연료봉 용접의 건전성이 입증되었다.

Abstract

The irradiation test of fuel elements was planned for the evaluation of nuclear fuel performance. To establish fabrication process satisfying the requirements of irradiation test, laser welding for fuel elements was performed, and the characteristics of zircaloy-4 end cap welding was investigated. Fuel elements with 13.08 mm diameter and 0.4 mm wall thickness of cladding tubes and end caps have been fabricated in the pre-qualification welding experiment. The optimum parameters for end cap welding have been established based on the result of this experiment. In this study, the qualification test was performed for tensile tests, helium leak inspections, flatness measurements, peel tests and metallography examinations to qualify the end cap welding procedure. The soundness of the welds of nuclear fuel elements has been confirmed by mechanical tests and microstructural examinations.

1. 서론

본 연구에서는 사용후핵연료를 사용하여 1999년 4월부터 핫셀에서 DUPIC핵연료를 제조하였으며 모의핵연료 및 연료봉 제조와 특성실험을 바탕으로 DFDF(DUPIC Fuel Development Facility, IMEF M6)에서 경수로 사용후핵연료를 원격공정을 거쳐 핵연료를 완성시킨 후 지르칼로이 피복관에 펠렛을 장전하여 마지막 공정인 봉단마개용접할 수 있는 장비와 기술을 확립하였다[1-4]. DFDF에서 제조된 핵연료를 두 차례에 걸쳐 하나로 원자로에서 성공적으로 조사시험을 수행한 바 있다[5, 6]. 본 실험에서는 조사시험용 연료봉 봉단마개용접을 위한 예비실험과 자격화 시험을 수행하였다. 본 연구에서는 연료봉 직경 13.08 mm, 두께 0.4 mm 인 피복관과 봉단마개를 구성하는 밀봉용접의 최적조건이 선정되었으며, 또한 500W급의 Nd:YAG레이저 및 광섬유전송장치를 이용하여 핫셀에서 원격으로 봉단용접에 활용하기 위한 공정조건을 확립하였으며, 연료봉 봉단마개의 기하학적 형상별 용접비드와 용입특성을 분석하였다[7]. 이에 따른 각각의 용접부에 대한 인장시험, 헬륨누출시험, 진직도 치수검사, 필시험 및 미세조직 검사가 수행되었고, 봉단마개 레이저용접부에 대한 기계적 시험 및 야금학적 관찰이 진행되었다. 따라서 본 실험결과를 바탕으로 조사시험용 연료봉을 제조할 수 있는 봉단마개 용접의 최적 공정조건을 확립하였고 이를 자격화하고자 하였다.

2. 실험재료 및 장치

본 실험에서 사용된 연료봉은 Fig. 2.1과 같이 조사시험용 샘플로서 지르칼로이-4 피복관과 봉단마개가 맞닿는 겹치기 이음방식으로 구성되었으며, 용접될 봉단마개는 외경이 13.4mm로 700°C에서 2시간 어닐링된 봉이며 피복관은 냉간가공후 520°C에서 2시간 정도 응력제거풀림 처리하였으며, 직경은 13.08mm, 두께 0.4mm 및 길이는 500mm이다. 그리고 용접실험에 사용될 지르칼로이-4 용접시편의 이음형상은 Fig. 2.2에서와 같다. 본 실험장비는 Fig. 2.3과 같이 평균출력 500W급 펄스형 Nd:YAG 레이저시스템으로 전원장치 및 용접챔버로 구성되었다. 용접시편은 Fig. 2.1과 같이 지르칼로이-4의 연료봉 양단을 봉단마개로 끼워맞춘 다음 용접으로 밀봉하여 제조한다. 본 용접시편은 기계적인 강도가 충분하여 내부 물질이 누출될 우려가 없고 각각의 연료봉을 전체의 핵연료 다발장치에 삽입해야 하므로 각각의 레이저용접된 연료봉들은 허용치수 범위내에서 정밀하게 용접되어야 한다.

3. 봉단마개용접을 위한 예비실험 및 고찰

3.1. 봉단마개의 최적화

실제의 연료봉에 사용될 봉단마개는 Fig. 2.2에서 나타난 바와 같이 연료봉에서 선정된 joint design을 고려하여 레이저용접에 적합하도록 설계되었으며, 또한 지르칼로이-4 봉단마개를 이용한 직경이 13.08mm인 피복관 연료봉의 용접특성 실험이 수행되었다. Fig. 2.4에서는 봉단마개의 filler를 포함한 외경 13.12mm, 13.5mm 및 13.87mm를 사용했

을 때 용접후의 봉단마개 외경을 측정 비교하였다. 여기서 13.12mm를 사용했을 때의 용접결과는 13.10mm에서 13.13mm를 얻었으며, 13.5mm 사용시의 용접결과는 13.15에서 13.20mm를 얻었다. 그리고 13.87mm 사용시의 용접결과는 13.20mm에서 13.24mm로 나타났다. Table 2.1과 Fig. 2.5, 2.6 및 2.7은 레이저용접을 위하여 봉단마개 형상중 filler 부분의 크기 및 레이저변수에 따른 용접결과를 나타낸 것이다. Table 2.1에서와 같이 연료봉도면의 filler가 있는 봉단마개의 레이저용접실험에서 용접부의 치수검사에서는 외경이 최소 13.18mm에서 최대 13.25mm까지 나타내고 있었다. 또한 filler가 없는 13.12mm의 봉단마개 레이저용접실험에서 용접부의 치수검사는 외경이 최소 13.08mm에서 최대 13.13mm까지 나타났다. 따라서 조사시험용 연료봉의 레이저용접을 위해서는 봉단마개의 외경이 적어도 13.12mm에서 13.20mm 범위에서 유지되어야 하므로, 연료봉도면에서 제시된 봉단마개의 filler부분이 포함된 외경이 13.5mm로 선정하면 매우 적절한 것으로 판단되었다. Fig. 2.8 및 Fig. 2.9는 봉단외경과 레이저출력에 따른 용입과 비드폭을 조사하였다. Fig. 2.8의 봉단 외경별 조사에서는 외경이 커질수록 용입과 비드폭이 감소됨을 볼 수 있었으며, Fig. 2.9의 레이저 출력별 조사에서는 출력이 증가될수록 용입은 크게 커지는 반면에 비드폭은 약간 커짐을 알 수 있었다.

3.2. 봉단마개의 직진도 조사

핫셀에서 조사시험용 연료봉제조시 Fig. 2.10에서와 같이 특수구조를 가진 봉단마개를 삽입하고 연료봉 지지체와 봉단마개 끝단의 면과 수평이 되도록 원격으로 작업이 이루어져야 한다. 레이저용접후에 봉단마개 끝단의 면과 지지체와의 직진도를 검사하기 위해서 Fig. 2.11과 같이 측정장치가 설계 제작되었다. Fig. 2.12는 용접후 봉단마개 끝단면의 직진도를 마이크로메타를 이용하여 측정하는 방법을 보여주고 있다. 그리고 연료봉 봉단마개용접전에 핫셀의 챔버내에서 봉단마개홀더와 연료봉과의 일직선으로 정렬하기 위해서는 특수하게 제작된 선긋는 공구가 만들어 졌으며, 그 다음 연료봉의 중심축과 봉단마개를 정렬시키게 한 후에 봉단마개 용접을 수행하도록 하였다. 이렇게 용접작업이 끝난 후에 Fig. 2.11의 측정장치를 이용하여 연료봉의 지지체와 봉단마개 끝단면의 직진도를 측정하게 하였다.

본 연구에서는 조사시험용 연료봉 제조공정단계에서 봉단마개와 지지체간의 직진도 특성 조사를 위해서 예비실험을 수행하였다. 이때 직진도 측정방법에서 DFDF에서는 Fig. 2.11의 측정장치, 마이크로메터, V 블록 및 정밀바이스가 사용되었다. 실험결과에서는 3차례의 예비실험을 통하여 수행된 자료중에서 1차 측정의 실례를 Table 2.2에서와 같이 조사시험용 연료봉도면에서 명시된 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 허용범위내에 포함되어 있어서 만족한 결과를 얻었다.

4. 용접자격화 시험

4.1 적용범위

본 시험은 조사시험용 연료봉 봉단마개 용접공정의 재료, 제조방법, 품질표준 및

공정자격 절차를 기술한 것이며, 또한 연료봉 봉단용접공정의 건전성에 대한 시험보고서로 연료봉 제조에 사용된 용접기는 펄스형 Nd:YAG 레이저이며, 포함된 내용은 치수검사, He 누출검사, 인장시험, 봉단마개 진직도검사 및 미세조직 관찰에 대한 내용들이다.

4.2 시험작업 절차

4.2.1 재료

연료봉 봉단용접에 사용되는 재료는 지르칼로이-4 봉단마개 및 피복관이다. 봉단마개는 제조도면 DCP22-90713-ELE-ENDCAP-A에 따라 사용되어야 하고, 피복관은 중수로용 핵연료봉의 사양과 동일해야 한다.

4.2.2 용접방법

연료봉용접은 He 가스 분위기에서 레이저용접에 의해 봉단마개를 피복관 양단에 접합시킨다. 이때 사용되는 용접기는 펄스형 Nd:YAG 500Watt 급이며(모델명: 510PW), 연구소 자체에서 제작한 진공챔버를 사용한다.

4.2.3 작업절차

- ① 시편 30개를 준비하여 치수측정을 하고 장전길이 조정 및 소결체를 장전한 후 봉단마개 용접을 수행한다.
- ② 용접된 연료봉은 모두 He 가스 누출검사를 하였다.
- ③ 모든 용접작업은 용접사양서의 절차에 따라 실시하였다.

4.2.4 품질표준

봉단마개용접된 연료봉은 아래의 ①-⑤의 항목에서 요구되는 품질수준을 만족하여야 한다.

① 접합율(weld rating)

용접부 접합율은 해당 설계도면에 명시된 최소 피복관 두께에 대한 용접 계면에서의 완전한 접합길이(length of sound weld)의 백분율로 정의한다. 광섬유전송에 의한 레이저용접의 접합면에 이물질 내재, 기공, 부접합 및 균열 등의 불연속들은 불완전 접합(unsound bond)으로 간주된다. 이때 접합율은 최소 피복관 두께의 80% 보다 적지 않아야 한다.

② 인장시험

인장시험에서 파괴가 용접부가 아닌 피복관 부위에서 일어나야 한다.

③ 치수검사(dimensional measurement) 및 외관검사

해당 연료봉 제조도면(DCP20-90713-ELE)의 요구사항들을 만족시키는지 확인하기 위하여 치수를 측정한다. 그리고 육안으로 부품의 손상을 검사한다.

④ 연료봉내 He 가스함량 및 충전압력

연료봉내 분위기는 최소 80%의 He 가스와 최대 20%의 공기로 이루어지며, 이는 용접공정 자격승인 시험에서 증명되어야 한다. 그리고 사용하는 He 가스는 순도 99.999% 이어야 한다. 연료봉 내부 압력은 대기압 \pm 4psi(100 \pm 30 KPa) 이어야 한다.

⑤ 누출시험

측정된 연료봉에 대한 Helium 누출율이 측정된 Background Helium 누출율보다 크면 불합격으로 평가되며 그렇지 않으면 합격으로 판정된다.

3.3.5 공정자격승인 시험절차

봉단마개 용접조건을 확립하기 위한 공정자격승인 시험절차는 다음과 같다.

(가) 설정된 용접조건에 의해 만들어진 연료봉이 (마) ①-⑤의 품질표준을 만족하는가에 대한 검사를 실시하며 절차는 다음과 같다. 품질표준이 만족될 경우 해당 작업조건으로 연료봉단마개 용접공정이 자격화된 것으로 한다.

① 용접전 시편에 대한 치수검사를 완료한 후 30개의 용접시편을 만들어 용접 부위에 대한 치수검사 및 외관검사를 한다.

② ①에서 제조된 시편에 대해 He leak 검사를 수행하고, 이중 15개에 대하여 접합률 검사(30개 용접부위)를 수행하며, He 함량분석은 이전의 자격화된 시험성적서로 대체하기로 한다.

③ 5개 인장시편 및 25개 필시험 시편을 제조하여 기계적 시험을 수행한다. 공정자격화 승인시험이 완료되면 이 결과를 검토하여 승인보고서를 발간한다.

(나) 연료봉단 용접공정의 자격화 이후 공정상의 변화가 발생되어 품질에 영향을 미칠 수 있는 경우 공정자격승인시험을 실시하여, 공정을 재자격화하여야 하며, 이때 변경사항에 따라 완전 재자격 승인시험과 일부 재자격 승인시험으로 구분한다.

(다) 공정중 품질관리

봉단마개 용접공정은 피복관에 소결체를 장입전에 out-cell에서 용접하는 경우와 in-cell에서 용접하는 경우로 나누어진다. 이때 연료봉 더미 시편을 이용하여 접합률, 연료봉치수, 봉단마개 직진도검사 및 외관검사와 연료봉내 분위기를 검사하여 관리한다. 이들은 각각 (마) ①-⑤항의 품질표준을 만족시켜야 하며, 절차는 (2)항을 따른다.

(라) 조직검사

① 옛칭된 용접부위에 대해 금속 현미경의 조직검사를 한다.

② 지르칼로이-4 봉단용접에 대하여 용융된 부분은 피복관두께의 80%이상이어야 하며, 자격승인시 피복관두께의 80% 이하를 벗어난 것은 불합격 처리한다.

(마) He 가스 누출시험

연료봉들은 2일(48시간) 이내 헬륨 누출시험을 받아야한다. 누출검사시 헬륨 누출 검사장비의 검출감도는 4×10^{-8} STD.cc/sec 이상을 검출할 수 있는 성능을 가져야 하며, 상기 검출장비의 background 헬륨 누출율은 5×10^{-7} STD.cc/sec 이하이어야 한다. 합부판정기준은 background 헬륨 누출율 보다 크면 불합격으로 평가된다.

(바) 부적합 재료

본 시방이나 해당 설계도면의 요구조건들을 만족시키지 못하는 부적합 재료는 품질관리 담당자가 검토할 수 있도록 부적합 재료에 대한 통보가 이루어 져야 한다.

시료가 부적당한 준비나 시험으로 해당 시료를 대표하지 못할 때, 그 시료는 폐기되고 새로운 시료로 대체한다.

4.3 시험결과

- 연료봉 치수측정에서는 관련된 기준치를 모두 만족하였다.
- He가스 누출검사에서는 누출되는 연료봉이 없음을 확인하였다.
- 연료봉 인장시험에서는 관련된 기준치를 모두 만족하였다.
- 연료봉 필시험에서는 모두 양호한 결과를 얻었다.
- 봉단마개와 지지체간의 진직도 검사에서는 관련된 기준치를 모두 만족하였다.
- 용접부의 미세조직 및 용입을 검사에서는 관련된 기준치를 모두 만족하였다.

이상의 실험결과를 종합한 결과 광섬유전송에 의한 레이저용접 및 연료봉 용접 절차서를 사용하여 수행된 조사시험용 연료봉의 봉단마개용접 자격화 시험은 모든 평가 기준을 만족하였다.

5. 결론

본 연구에서는 예비적인 용접특성 실험을 통해 조사시험용 연료봉 제조공정에서 원격으로 자격화 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 연료봉 레이저용접을 위해서는 연료봉의 외경이 적어도 13.12mm에서 13.20mm 에서 유지되어야 하며, 조사시험용 연료봉도면에서 제시된 봉단마개의 외경(filler부분포함)이 13.5mm로 선정하면 매우 적절한 것으로 판단되었다.
- 조사시험용 연료봉 제조공정단계에서 봉단마개와 지지체간의 진직도 특성 조사를 위해서 3차례의 예비실험을 수행하였으며, 실험결과는 연료봉도면에서 명시된 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 허용범위내에 포함되어서 만족한 결과를 얻었다.

- 조사시험용 연료봉의 봉단마개용접 자격화 시험을 통해서 다음과 같은 각각의 실험 결과를 얻었다.

- 연료봉 치수측정에서는 관련된 기준치를 모두 만족하였다.
- He가스 누출검사에서는 누출되는 연료봉이 없음을 확인하였다.
- 연료봉 인장시험에서는 관련된 기준치를 모두 만족하였다.
- 연료봉 필시험에서는 모두 양호한 결과를 얻었다.
- 봉단마개와 지지체간의 진직도 검사에서는 관련된 기준치를 모두 만족하였다.
- 용접부의 미세조직 및 용입을 검사에서는 관련된 기준치를 모두 만족하였다.

이상과 같이 조사시험용 연료봉의 사양을 만족하는 봉단마개용접을 할 수 있는 안정된 공정조건을 확립하였고 이를 자격화하였다.

감사

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 양명승 등, DUPIC 핵연료제조 및 품질관리기술 개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1744/96, 1997. 9
- [2] 양명승 등, DUPIC 핵연료제조장비 및 검사기기 개발, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1319/99, 1999. 5
- [3] 양명승 등, DUPIC 핵연료제조 및 공정기술 연구, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1336/99, 1999. 6
- [4] 양명승 등, DUPIC 핵연료제조 및 공정기술개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-2022/99, 2000. 5
- [5] 김용기 등, 2차 조사시험용 DUPIC 핵연료제조, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1876/2001, 2001. 7
- [6] 김용기 등, 3차 조사시험용 DUPIC 핵연료제조, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1894/2001, 2001. 8
- [7] 양명승 등, DUPIC 핵연료제조 및 공정기술개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-2234/2001, 2002. 3

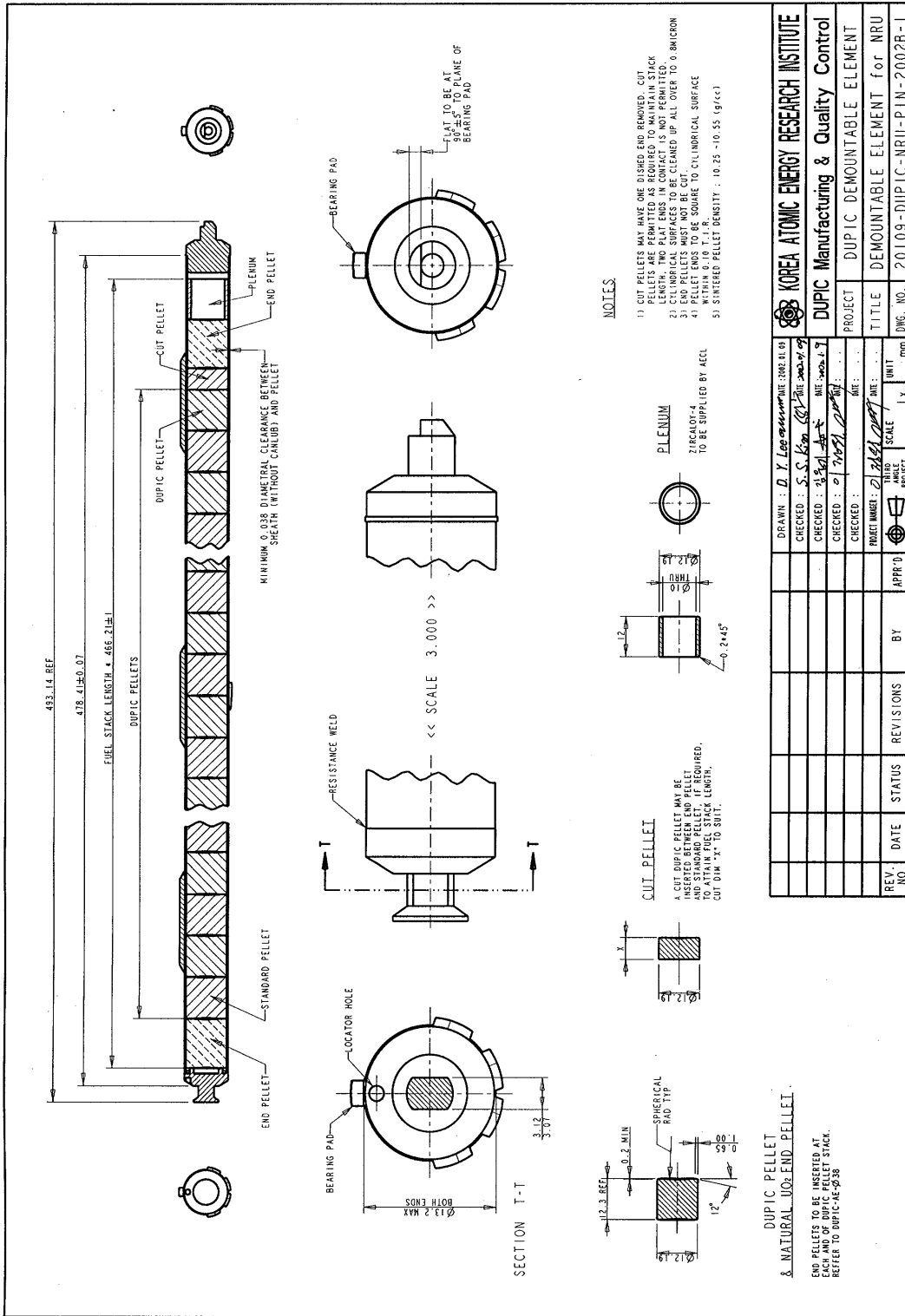


Fig. 2.1 조사시험용 연료봉

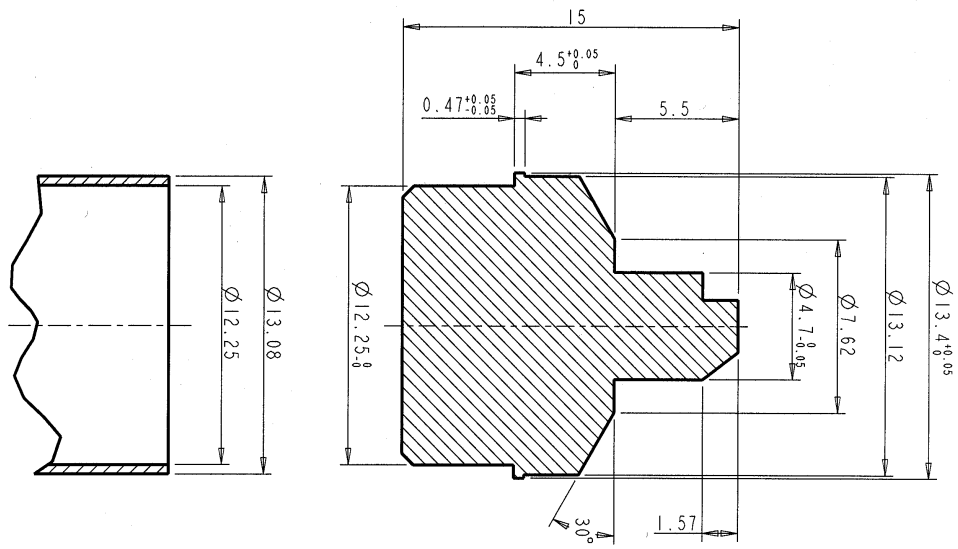


Fig. 2.2 지르칼로이-4 봉단마개와 피복관의 이음형상



Fig. 2.3 Nd:YAG 레이저용접 장치



(No. 2 with filler)



(No. 6 without filler)



(No. 1 with filler)



(No. 4 without filler)



(No. 3 with filler)



(No. 5 without filler)

Fig. 2.4 외경 13.12, 13.5 및 13.87mm 사용된 레이저용접시편 (×8)

Table 2.1 레이저출력 및 외경별 레이저 실험변수 및 용접결과

Specimens No.	Laser Power (W)	Cladding Tube O.D. (mm)	Dimension test after welding				Visual Test	
			O.D. (with filler)		O.D. (without filler)			
			Min.	Max.	Min.	Max.		
1	Top	280	13.12/13.87	13.20	13.24			O.K.
	Bottom	280	13.12/13.87	13.21	13.25			O.K.
2	Top	210	13.12/13.87	13.21	13.24			O.K.
	Bottom	210	13.12/13.87	13.20	13.22			O.K.
3	Top	350	13.12/13.87	13.21	13.24			O.K.
	Bottom	350	13.12/13.87	13.18	13.23			O.K.
4	Top	280	13.12			13.11	13.13	O.K.
	Bottom	280	13.12			13.08	13.13	O.K.
5	Top	350	13.12			13.11	13.13	O.K.
	Bottom	350	13.12			13.10	13.12	O.K.
6	Top	210	13.12			13.10	13.12	O.K.
	Bottom	210	13.12			13.09	13.12	O.K.
7	Top	280	13.12/13.5	13.16	13.19			O.K.
	Bottom	280	13.12/13.5	13.15	13.18			O.K.
8	Top	210	13.12/13.5	13.21	13.22			O.K.
	Bottom	210	13.12/13.5	13.14	13.17			O.K.
9	Top	350	13.12/13.5	13.15	13.20			O.K.
	Bottom	350	13.12/13.5	13.20	13.22			O.K.

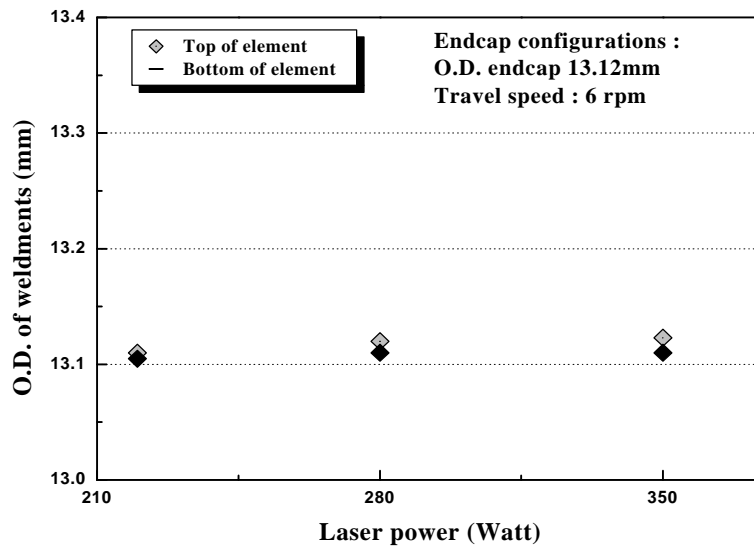


Fig. 2.5 외경 13.12mm 사용시 출력별 용접시편의 외경치 비교

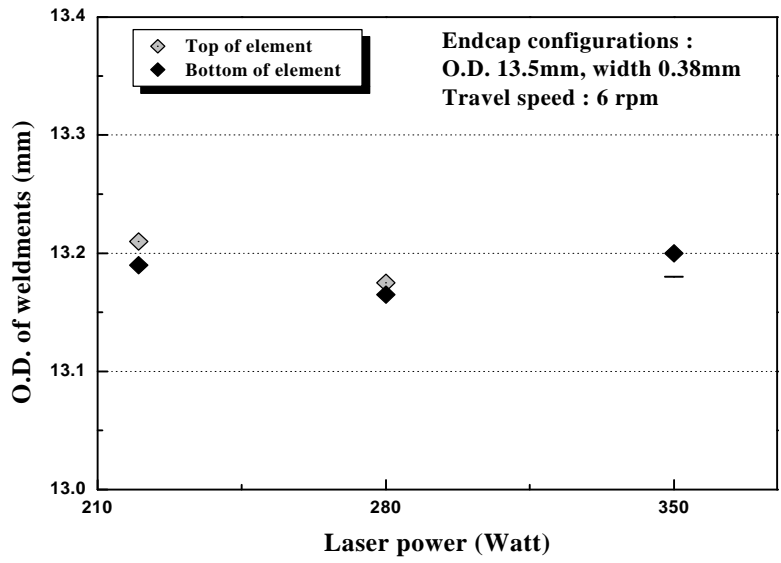


Fig. 2.6 외경 13.5mm 사용시 출력별 용접시편의 외경치 비교

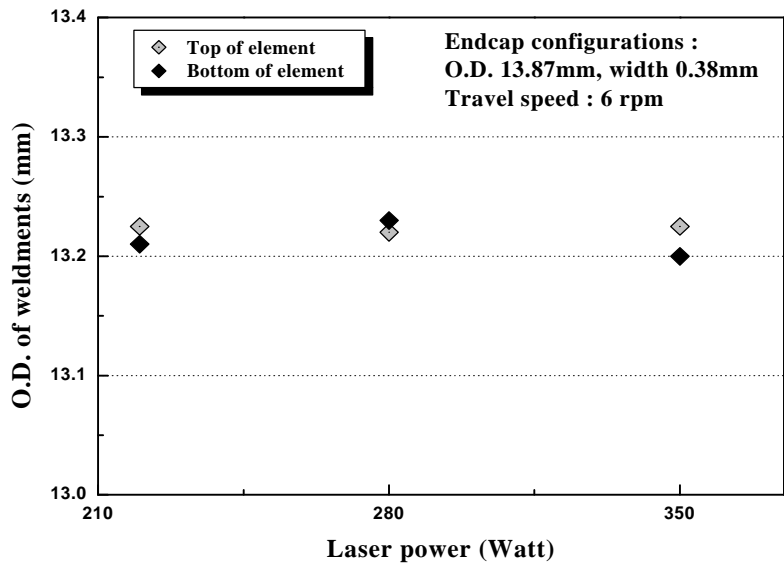


Fig. 2.7 외경 13.87mm 사용시 출력별 용접시편의 외경치 비교

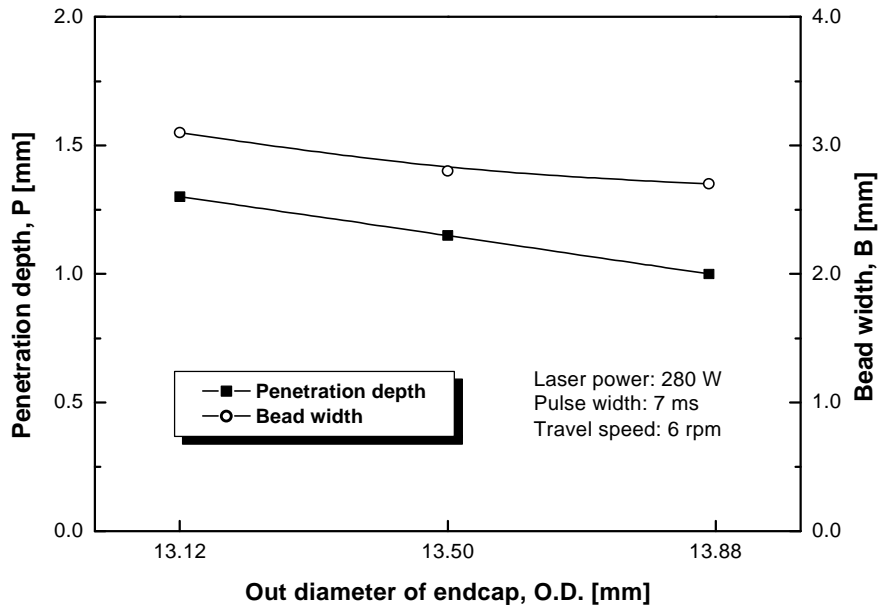


Fig. 2.8 봉단마개 외경별 용접비드 및 용입 비교

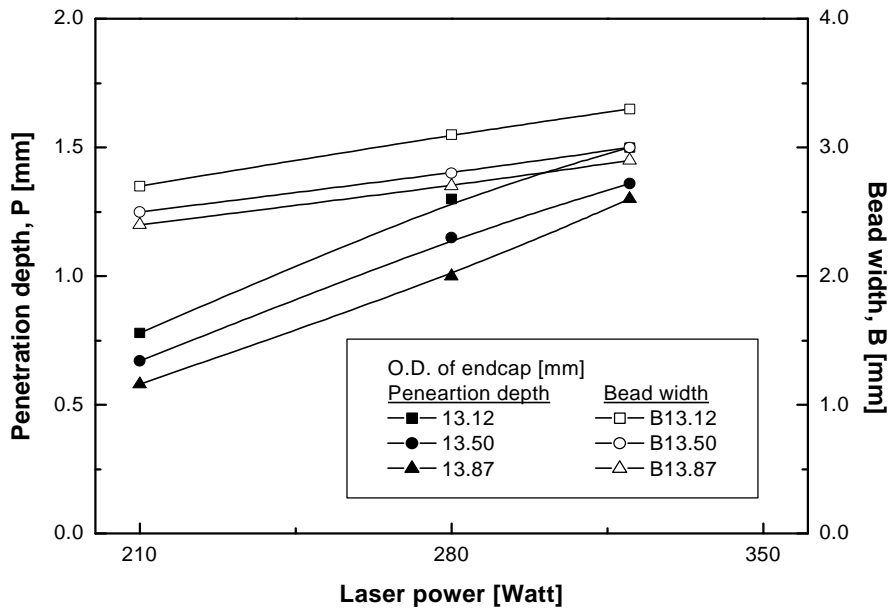


Fig. 2.9 레이저출력 및 외경별 용접비드, 용입 비교

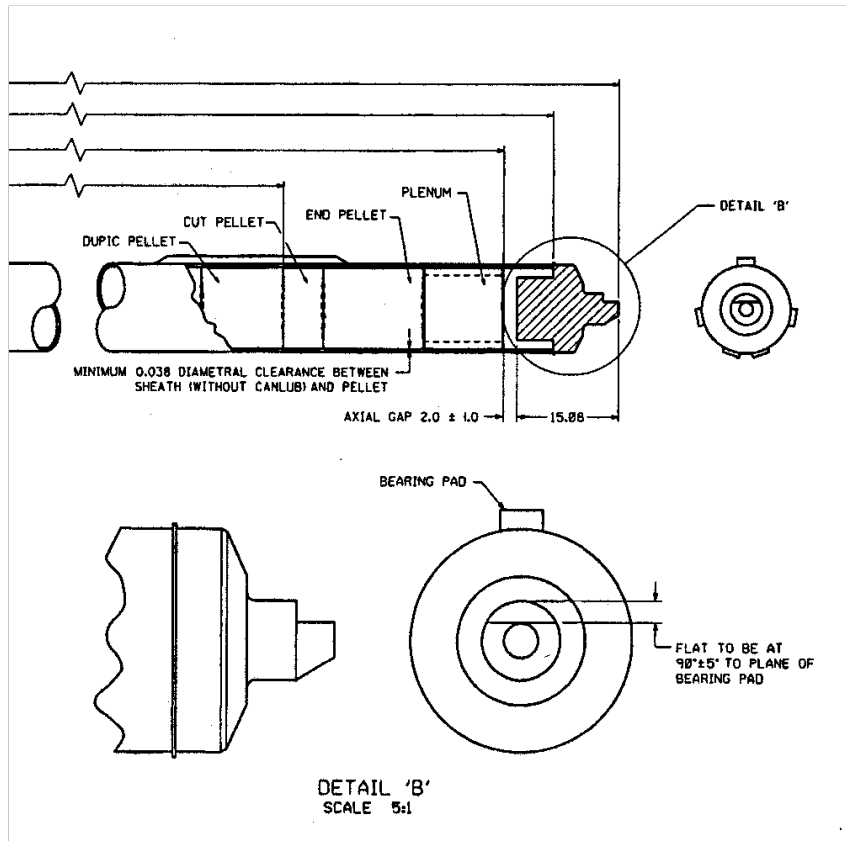


Fig. 2.10 조사시험용 연료봉의 봉단마개 형상

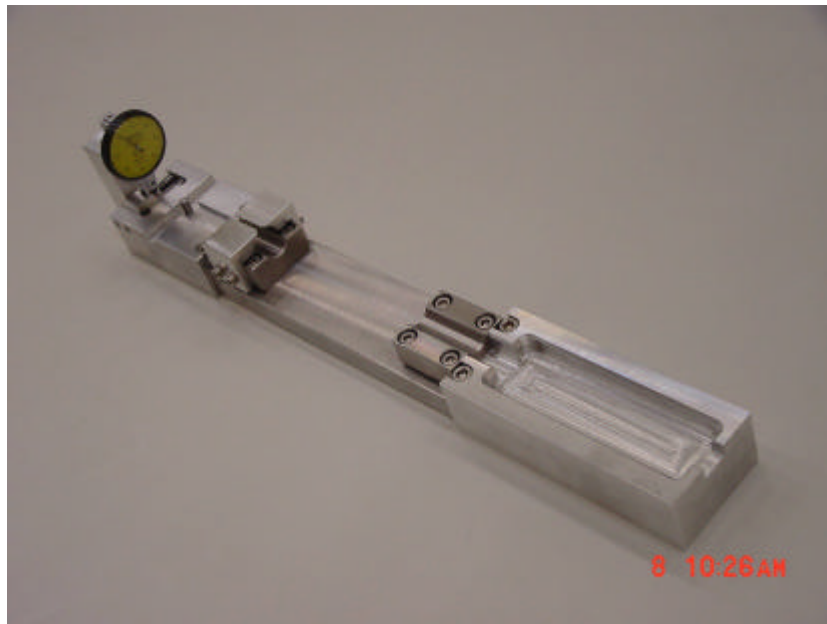


Fig. 2.11 봉단마개와 지지체간의 진격도 검사용 측정장치

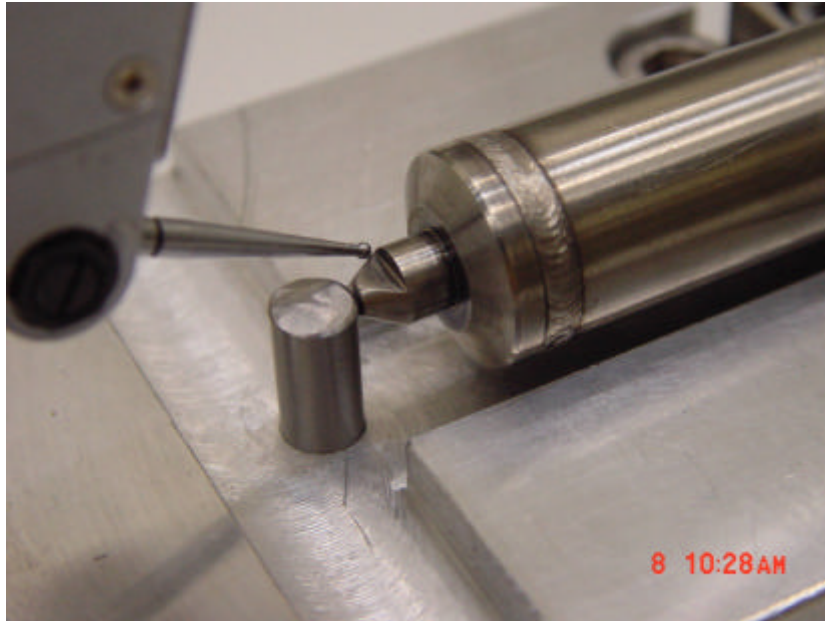


Fig. 2.12 마이크로메타를 이용한 진직도 측정방법

Table 2.2 봉단마개와 지지체간의 진직도 1차 측정 결과

시편번호	기준($90^{\circ} \pm 5^{\circ}$) $\delta \geq 340 \mu\text{m}/4\text{mm}$	변위량 및 변위각도(DFDF)		변위량 및 변위각도(KNFC)		결과
E01		$30 \mu\text{m}$	0.43°	$80 \mu\text{m}$	1.15°	양호
E02		$42 \mu\text{m}$	0.52°	$100 \mu\text{m}$	1.32°	양호
E03		$62 \mu\text{m}$	0.90°	$70 \mu\text{m}$	0.98°	양호
E04		$25 \mu\text{m}$	0.36°	$70 \mu\text{m}$	0.98°	양호
E05		$40 \mu\text{m}$	0.56°	$160 \mu\text{m}$	2.28°	양호
E06		$30 \mu\text{m}$	0.43°	$50 \mu\text{m}$	0.72°	양호
E07		$48 \mu\text{m}$	0.70°	$60 \mu\text{m}$	0.80°	양호
E08		$60 \mu\text{m}$	0.80°	$50 \mu\text{m}$	0.72°	양호
E09		$45 \mu\text{m}$	0.68°	$60 \mu\text{m}$	0.80°	양호
E10		$35 \mu\text{m}$	0.46°	$70 \mu\text{m}$	0.98°	양호