

TIG 기법에 의한 조사시험용 핵연료봉 용접공정의 최적화

Welding Process Optimization of Nuclear Fuel Rod Using TIG Technique for Fuel Irradiation Tests

김수성, 신윤택, 김봉구, 이정원, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료의 성능평가를 위하여 조사시험용 캡슐 연료봉 제조를 계획하고 있으며, 조사시험 사양에 적합한 연료봉 용접공정 조건 확립을 위해 봉단용접을 수행하였다. 이에 따른 캡슐 연료봉 제조를 위한 orbital-TIG 용접시스템을 개발하였으며, 조사시험용 연료봉의 용접공정 조건을 설정하기 위해 예비실험을 수행하였으며, 실험에서는 연료봉 직경 9.5mm, 두께 0.6mm 인 피복관과 봉단마개를 이루는 연료봉 용접의 최적조건이 선정되었다. 본 연구에서는 이에 따른 각각의 용접시편에 대한 인장시험, 헬륨누출시험 및 미세조직 검사를 통하여 자격화 시험이 수행되었다. 그리고 조사시험용 연료봉의 기계적 시험 및 야금학적 관찰을 통하여 용접품질의 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, orbital-TIG welding system for fuel elements was developed, and preliminary welding experiments for optimizing process conditions of fuel element was performed. Fuel elements with 9.5mm diameter and 0.6mm wall thickness of cladding tubes and end caps have been used and optimum conditions of endcap welding have been selected. In this study, the qualification test was performed by tensile tests, helium leak inspections, and metallography examinations to qualify the end cap welding procedure. The soundness of the welds quality of nuclear fuel elements has been confirmed by mechanical tests and microstructural examinations.

1. 서론

핵연료의 성능평가를 위해서 연구용 원자로에서 연소시킨 후, 핵연료 성능을 분석하게 된다. 이때 연소시킬 핵연료의 종류와 핵연료 연소 계획에 따라 캡슐 집합체가 제작되어지며, 이 캡슐에 장착될 조사시험용 핵연료봉을 제조하게 된다. 본 연구에서는 조사시험 사양에 적합한 핵연료봉의 용접공정 조건 확립을 위해 봉단용접을 수행하였고, 이에 따른 조사시험용 캡슐 집합체의 연료봉을 위한 orbital-TIG 용접시스템을 개발하였고,[1] 또한 조사시험용 봉단용접의 공정조건을 설정하기 위해 예비시험을 수행하였다. 아울러 orbital-TIG 방식을 이용한 지르칼로이 핀홀용접에 활용하기 위한 공정조건을 조사하였으며, 연료봉 봉단마개의 이음 형상별 용접비드와 용입특성을 분석하였다. 이에 따른 각각의 용접시편에 대한 인장시험, 헬륨누출시험, 치수 및 미세조직 검사가 수행되었다. 따라서 본 실험결과를 바탕으로 조사시험용 연료봉을 제조할 수 있는 봉단용접의 최적 공정조건을 확립하였으며, 조사시험용 연료봉 제조사양을 만족할 수 있는 이음부 설계, 용접장치 구성, 최적 용접을 위한 공정변수 선정, 그리고 연료봉 용접자격화 시험 및 조사시험용 연료봉을 제작하였다.

2. 실험재료 및 장치

본 실험에서 사용된 용접시편은 Fig. 2.1과 같이 지르칼로이-4 피복관과 봉단마개가 맞닿는 겹치기 이음방식으로 구성되었으며, 용접될 봉단마개시편은 외경이 9.5mm로 700℃에서 2시간 어닐링된 봉이며, 피복관은 냉간가공후 520℃에서 2시간정도 응력제거 풀립 처리하였으며, 직경은 9.5mm, 두께 0.6mm 및 길이는 150mm이다. 그리고 용접실험에 사용하게 될 지르칼로이-4 용접시편의 이음형상은 Fig. 2.2와 같다. 본 실험장비는 Fig. 2.3과 같이 TIG 용접방식으로 불활성가스 분위기에서 비소모성 텅스텐 전극과 모재 사이에 아아크(arc)를 발생시켜 용융하는 방법으로 용접챔버 및 용접제어장치로 구성되었다. 이때 아크 전류와 용접시간을 프로그래밍하여 출력제어가 가능한 upslope, 용접 및 downslope 기능이 있고, 아크 발생부터 아크 정지까지 각 단계에서 자동으로 조절할 수 있다. 여기서 용접실험은 용접단계(level)별로 용접전류와 시간을 변화시키면서 수행하였다. 본 실험의 용접시편은 기계적인 강도가 충분하여 내부 물질이 누출될 우려가 없고 각각의 연료봉을 전체의 핵연료 캡슐 집합체에 삽입해야 하므로 각각의 용접된 연료봉들은 허용치수 범위내에서 정밀하게 용접되게 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 연료봉용접 결과 및 분석

Orbital-TIG 용접된 시편을 외관검사, He 누출검사, 기계적 시험 및 미세조직 검사를 통해 최적 용접조건을 선정하였다. Table 3.1은 조건별 용접변수이다. 용접변수에 따른 용접부의 단면용입의 결과는 Fig. 3.1과 같이 피복관 두께 이상으로 나타났으며, 그리고 용접시편 제작 후 He 누출검사에서는 Table 3.2에서와 같이 양호하게 나타났다. 지르칼로이-4 용접부의 기계적 시험에서는 Table 3.3과 같이 상온에서 인장시험한 후 항복강

도, 인장강도 및 연신율을 보여주고 있다. 여기서 용접시편의 인장강도는 ASTM B353의 기준치보다 모두 높았으며, 역시 항복강도도 기준치 24.6kg/mm^2 이상으로 나타났다. Fig. 3.2는 인장시편 및 인장시험 후 파단된 용접시편을 보여주고 있다. 그리고 Table 3.4와 같이 밀봉파열시험에서 최대파열압력의 평균치인 1150kg/mm^2 이상으로 나타났으며, 다시 표현하면 후프응력으로 WH형 피복관의 기준치인 848Mpa 이상으로 얻었다. Fig. 3.3은 파열시험후의 파단된 용접시편을 보여주고 있다. 그리고 야금학적 관찰에서는 Table 3.1의 시험번호 11, 12 및 13을 이용한 조직검사에서는 Fig. 3.4와 같이 용접면에 기공(pore)이 약간 존재하는 것으로 나타났으며, 반면에 시험번호 5와 10의 경우 Fig. 3.4에서와 같이 결함이 없는 용접부를 얻었다. 그리고 용접부의 미세조직검사에서는 Fig. 3.4의 기공이 없는 용접부의 상단에서 중앙으로 등축정 α 입자(equiaxed grain)들로 관찰되었으며, 용접 후 냉각속도가 느린 영역이어서 외부로 갈수록 주상정 β 입자(columnar grains)로 형성되었고 그 내부에 α 입자들이 생성되었다. 외각 검은띠 부분은 용융부와 모재 경계를 이루는 열영향부이다. 여기서 봉단마개와 피복관이 맞나는 용융부는 martensite 형태의 미세한 Widmanstätten α plate의 미세조직으로 관찰되었다. Table 3.1에서 최적의 조건으로 선정된 시험번호 4, 5 및 6의 용접결과에서는 외관상 결함이 없으며, He 누출 검사에서도 결함이 발견되지 않았으며, 조직검사에서도 결함이 없는 건전한 용접부를 보여주었다. 뿐만 아니라 반복되는 연료봉 용접에서 거의 같은 품질의 용접 결과를 보여주고 있어서 그 용접변수의 신뢰성을 한층 높여 주었다.

3.2. 핀홀용접 결과 및 분석

조사시험용 연료봉 내부 압력을 사용자가 요구할 시 He 가스를 이용하여 가압하여야 한다. 이 때문에 연료봉 내부압력을 사용하지 않더라도 2차 용접에서 연료봉 내부의 가스 팽창에 의한 터짐 현상이 나타나므로 핵연료봉 제조시 핀홀(pin-hole) 용접은 필수적이라 할 수 있다. 이를 위한 조사시험용 연료봉의 구조형상 및 용접전 핀홀상태는 Fig. 3.5 및 3.6과 같다. 실제 용접실험의 절차를 요약하면 먼저 봉단마개를 weld head torch를 이용하여 회전용접한 다음, EF/PF end plug를 weld head torch로 회전용접하고, 마지막으로 핀홀용 용가재를 삽입하여 weld head torch에 고정시켜 점용접하게 된다. 이때 사용된 각각의 용접조건은 Table 3.5에서 나타내며, 이에 따른 용접단면의 사진은 Fig. 3.7 및 3.8과 같다. 이번 핀홀 용접실험에서는 특수하게 weld head torch를 고정하여 용접을 수행할 수 있는 방법을 개발하였다. 그리고 핀홀용접 실험후 각 시편의 표면육안검사에서는 모두 양호하게 나타났으며, 지르칼로이-4 용접시편의 조직검사시 용입상태는 Table 3.5와 같이 조건 2와 조건 3에서 모두 만족한 결과를 얻었다.

3.3. 용접공정 자격화 및 연료봉 제조

핵연료 캡슐제작을 위한 조사시험용 연료봉용접의 예비실험을 바탕으로 지르칼로이 튜브에 펠릿을 장진하여 마지막 공정인 봉단마개 용접을 하게 된다. 앞의 3.1절에서 기술된 내용과 같이 외경9.5mm, 두께0.6mm인 연료봉과 봉단마개를 구성하는 봉단마개 용접의 최적 공정조건이 선정되었으며, 아울러 핀홀용접에서도 특수하게 weld head torch를 고정하여 용접할 수 있는 연료봉의 공정조건이 제시되었으며, 또한 조사시험용 연료

봉의 이음설계 및 용접장치가 확립되었다. 그리고 조사시험용 용접자격화의 검사계획서 [2] 및 공정시방서[3]에 따라 용접시편이 제작되었고, 각각의 봉단용접부에 대한 치수검사, 인장시험, He 누출시험 및 조직검사가 수행되었다.[4-7] 이것은 핵연료 캡슐제작을 위한 연료봉의 용접자격화 시험이 수행된 것으로, 각각의 용접시편에 대한 결과는 양호하게 나타났다.[8] 따라서 본 자격화 시험의 승인 절차에 따라 조사시험용 연료봉을 제조하였다.[9] 앞으로 다양한 핵연료 개발을 위한 캡슐 조사시험을 위해 자격화된 공정 조건으로 봉단연료봉을 제조할 수 있게 되었다.

4. 결론

본 실험에서는 조사시험용 핵연료봉 밀봉용접기술 개발을 위한 용접방식, 용접이음매 설계, 용접장치 개발과 주요 용접변수들이 용접에 미치는 영향을 조사하여 신뢰성 있는 용접조건을 확립하고 자격화하기 위한 것으로 실험결과 및 연료봉 제조 관련하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지르칼로이-4 피복관을 이용한 외경 9.5 mm, 두께 0.6 mm인 연료봉 용접인 경우 부분 용접단계에서 전류 25A-24A-23A-22A에서 적절한 용입을 얻었다.
2. 용접시편의 기계적 시험에서는 인장강도 및 항복강도 모두 기준치 이상으로 나타났으며, 밀봉파열시험에서는 후프 응력 기준치 이상으로 나타나 모두 양호한 결과치를 얻었다. 지르칼로이-4 용접부의 미세조직은 유사한 martensitic α' 와 Widmanstätten 형태의 혼합조직으로 나타났다.
3. 핀홀용접의 적정용입을 위해서는 weld head torch를 고정하여 용접전류 80A 시간 0.3sec. 및 80A 0.4sec.에서 만족한 결과를 얻었다.
4. 연료봉 용접의 예비시험을 바탕으로 핵연료 캡슐제작을 위한 연료봉 용접자격화 시험이 수행되었으며, 조사시험용 봉단마개 용접에 적용시켜 성공적으로 연료봉 용접을 수행하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] V. Ram, G. Kohn and A. Stern, Welding Journal, July, 33 (1986)
- [2] 조사시험용 연료봉 용접자격화 검사계획서(문서번호: HAN-IC-ITP-01), (2003)
- [3] 용접공정시방서(문서번호: HAN-IC-DD-SP-WP-03-1), (2003)
- [4] 품질관리지침서, 연료봉 치수검사(문서번호: HAN-IC-QCI-03), (2003)
- [5] 품질관리지침서, 연료봉 용접부위 인장시험(문서번호: HAN-IC-QCI-02),(2003)
- [6] 품질관리지침서, 연료봉 Helium 누출검사(문서번호: HAN-IC-QCI-01), (2003)
- [7] 품질관리지침서, 연료봉 용접부위 조직검사(문서번호: HAN-IC-QCI-01),(2003)
- [8] 용접자격승인보고서(문서번호: HAN-IC-DD-RT-QR-03-1), (2003)
- [9] 조사시험용 연료봉 제조보고서(문서번호: HAN-IC-DD-RT-QR-03-2), (2003)

Table 3.1 Welding parameters used for Zr-4 element

시험	Level 1 (시간/전류)	Level 2 (시간/전류)	Level 3 (시간/전류)	Level 4 (시간/전류)	비 고
1	4/22	4/20	5/16	4/14	용접전류 부족
2	4/22	5/20	6/16	6/14	용접전류 부족
3	4/24	4/22	5/18	4/16	전극간격 0.6mm 유지
4	4/24	5/23	6/22	6/20	적정
5	4/25	5/24	6/23	6/22	적정
6	4/25	4/24	4/23	5/22	용접부 중첩 부족
7	4/25	4/24	4/23	4/23	용접부 중첩 부족
8	4/24	5/22	6/18	6/16	용접전류 부족
10	4/26	5/24	6/22	6/22	적정
11	4/28	5/26	6/24	6/24	과전류
12	4/28	5/26	6/24	6/24	과전류
13	4/30	5/28	6/26	6/24	과전류

Table 3.2 Results of helium leak test

시편 No.	시험압력(mbar)		결과	비고
	배경누출	연료봉 누출		
1	6.1*10 ⁻⁹	1*10 ⁻⁹	O.K.	
2	6.1*10 ⁻⁹	1*10 ⁻⁹	O.K.	
3	6.1*10 ⁻⁹	1*10 ⁻⁹	O.K.	
4	6.1*10 ⁻⁹	1*10 ⁻⁹	O.K.	
5	6.1*10 ⁻⁹	1*10 ⁻⁹	O.K.	

Table 3.3 Results of tensile test

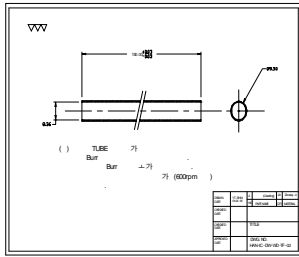
Specimen Types	Cladding Tube Dimensions	YS (kg/mm ²)		UTS (kg/mm ²)		% E in 50mm	
		Each	Ave.	Each	Ave.	Each	Ave.
EF/PF Plug	9.5x0.57mm (O.D) (Thick)	54.36	52.1	81.99	81.7	7.07	7.06
		51.11		81.86		7.11	
		50.72		81.30		7.01	
T/C Plug		56.39	56.3	81.99	81.7	6.87	6.98
		57.92		81.85		6.98	
		54.67		81.36		7.09	
End Pulg		52.69	52.2	74.73	78.2	0.7	3.30
		53.07		78.55		1.2	
		50.92		81.23		7.99	
Tube	38.81	38.8	81.62	81.6	6.24	6.24	

Table 3.4 Results of endcap burst Test

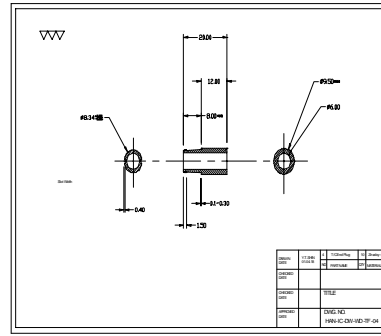
시편 No.	평균외경 (mm)	평균두께 (mm)	최저두께 (mm)	파열압력 (kg/cm ²)	후프 응력
1	9.5	0.578	0.576	1180	896
2	9.5	0.578	0.574	1180	899
3	9.5	0.578	0.569	1172	901
4	9.5	0.578	0.576	1184	899
5	9.5	0.578	0.576	1156	878

Table 3.5 Welding parameter used for pin-hole weld experiments

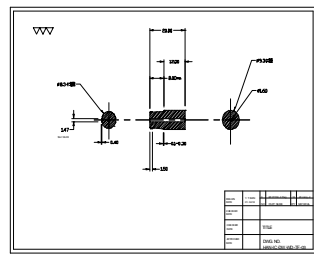
조건 1	전류 28-26-24-24 시간 5-6-6-5 sec.	weld head torch 이용 회전용접
조건 2	전류 80A 시간 0.3sec.,60A 0.1sec.	weld head torch 고정 접용접
조건 3	전류 80A 시간 0.4sec.	weld head torch 고정 접용접



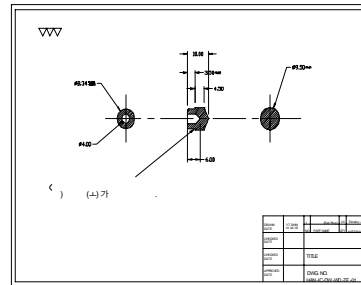
(a) Cladding tube



(b) T/C end plug



(c) EF/PF end plug



(d) T/C end plug

Fig. 2.1 Cladding tube and end plug

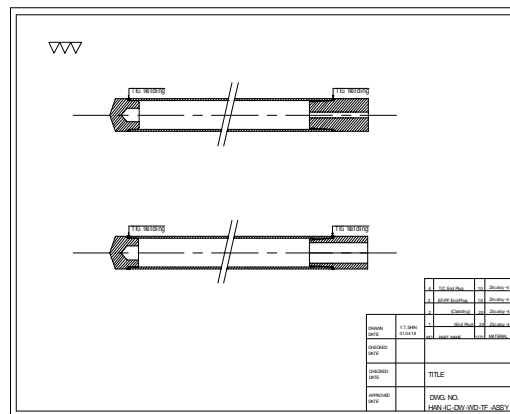
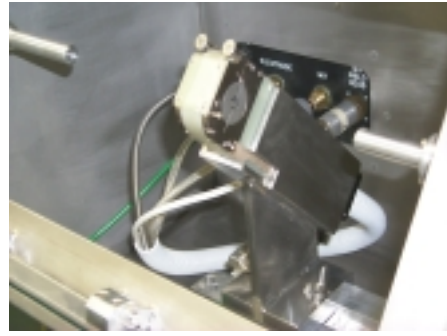


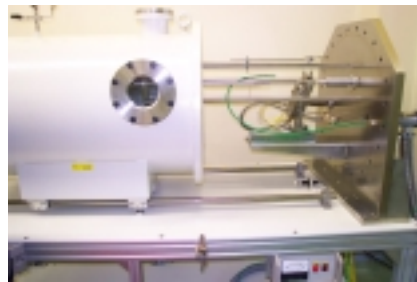
Fig. 2.2 Drawing of joint geometry for end plug welding



(a) Welding control console



(b) Weld head



(c) Weld chamber

Fig. 2.3 Automatic orbital TIG welding system

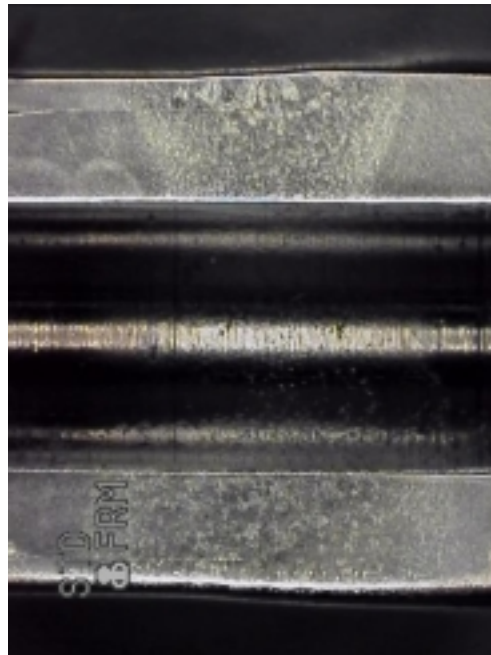
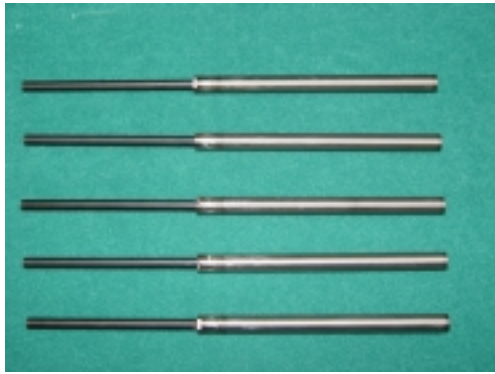
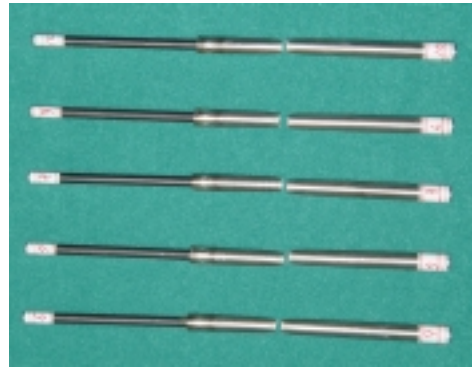


Fig. 3.1 Cross section of the weld part($\times 50$)



(a) Tensile test specimens



(b) Fractured specimens

Fig. 3.2 Tensile test and fractured specimens



Fig. 3.3 End plug burst fractured specimens



(a) with porosities



(b) without porosities

Fig. 3.4 Microstructure of the welded specimen ($\times 100$)

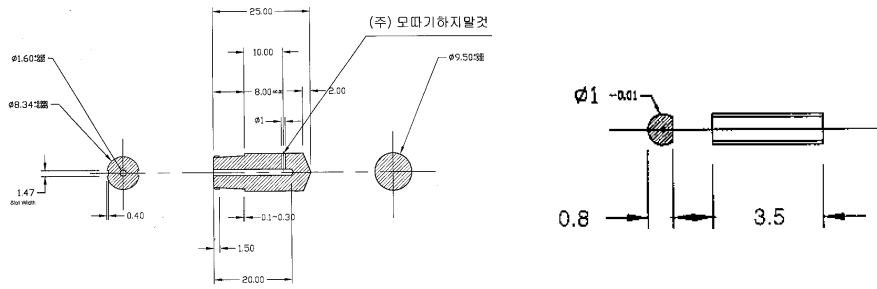
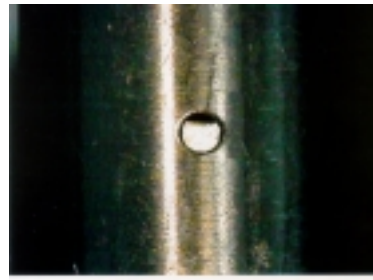
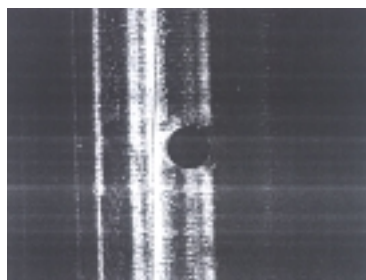


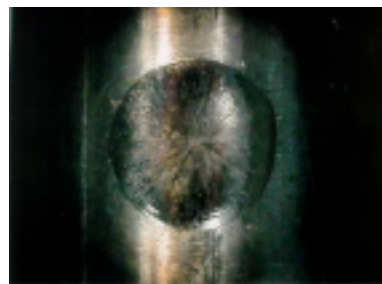
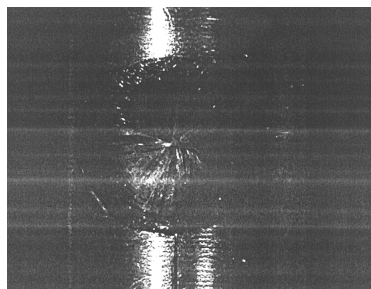
Fig. 3.5 Configuration of the pin-hole specimen



(용접전의 Φ 1mm 핀홀)

(용접전의 Φ 1mm 핀 삽입)

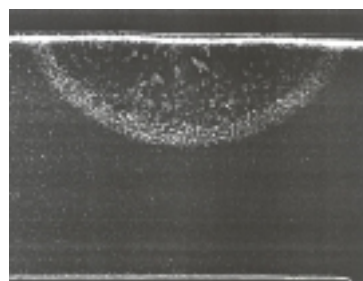
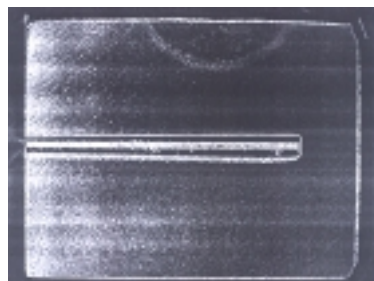
Fig. 3.6 Shape of the pin-hole before welding



(용접후 80A 0.3sec. 60A 0.1sec.)

(용접후 80A 0.3sec.)

Fig. 3.7 Surface appearances of the pin-hole welded part



a:(용접단면 80A 0.3sec. 60A 0.1sec. He \times 30)

b:(용접단면 80A 0.3sec. 60A 0.1sec. He \times 50)

Fig. 3.8 Macro-sections of Pin-Hole Welded Part with 80A, 0.3sec.