

2001 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

조사시험 캡슐용 연료봉 봉단용접기술 개발

Development of Endplug Welding Technology for Irradiation Testing Capsule

이정원, 신윤택, 김수성, 김봉구, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

개발된 핵연료의 성능평가를 위해서는 연구용 원자로에서 연소시킨 후, 그 성능을 분석하게 된다. 이 때 연소시킬 원자로의 특성과 핵연료 연소 계획에 따라 캡슐이라는 일정 형태의 집합체로 만들게 되며, 이 캡슐에 장착될 조사시험용 핵연료봉이 제작되게 된다. 그리고, 핵연료의 조사특성 측정을 위해 핵연료봉에 열전대, 압력계, 변형계 등이 설치될 수 있다. 본 연구에서는 하나로 조사시험용 핵연료봉 봉단용접에 필요한 용접장치, 용접기술의 개발과 용접변수들에 대한 시험결과를 분석하여 용접공정 변수를 수립하였다. 다양한 형태의 조사시험용 연료봉 용접을 위해 여러 용접방식을 비교, 검토한 결과, 가장 널리 사용되고 있는 TIG 용접방식의 전극 회전시스템 용접이 채택되었다. 그리고 직경 9.5 mm, 두께 0.6 mm의 지르칼로이-4 피복관 연료봉 용접을 위한 용접공정 변수별 실험결과 용접전류 25A가 최적의 용접조건으로 확립되었다.

Abstract

To evaluate the performance of newly developed nuclear fuel, it is necessary to irradiate the fuel at a research reactor and examine the irradiated fuel. For the irradiation test in a research reactor, a fuel assembly which is generally called a capsule should be fabricated, considering the fuel irradiation plan and the characteristics of the reactor to be used. And also the fuel elements containing the developed fuel pellets should be made and assembled into a capsule. In this study, the welding method, welding equipment, welding conditions and parameters were developed to make fuel elements for the irradiation test at the HANARO research

reactor. The TIG welding method using automatic orbital tube welding system was adopted and the welding joint design was developed for the fabrication of various kinds of irradiation fuel elements. And the optimal welding conditions and parameters were also established for the endplug welding of Zircaloy-4 cladding tube.

1. 서론

개발된 핵연료의 성능평가를 위해서는 연구용 원자로에서 연소시킨 후, 그 성능을 분석하게 된다. 이 때 연소시킬 원자로의 특성과 핵연료 연소 계획에 따라 캡슐이라는 일정 형태의 집합체로 만들게 되며, 이 캡슐에 장착될 조사시험용 핵연료봉이 제작되게 된다. 핵연료봉은 피복관 내부에 소결체를 장전하고 피복관 양단을 봉단마개로 끼워 맞춘 후 용접으로 밀봉하여 제조된다. 이렇게 제조된 핵연료봉들을 모아 연소시험에 맞도록 핵연료의 조사특성 측정을 위한 계측기(열전대, 압력계, 변형계)와 함께 조립된 형태가 핵연료 조사캡슐이다. 이러한 핵연료봉들은 원자로내에서 연소중 피복재가 파손되지 않아야 할 뿐만 아니라 방사성 핵분열 생성물(fission products)의 누출도 방지하는 압력용기(pressure vessel)의 역할을 하도록 설계되었다. 따라서, 핵연료 피복관과 핵연료 봉단마개 또는 계측기 용접부의 건전성에 대한 요구조건은 아주 엄격하며, 핵연료 제조에 있어 아주 중요한 요구사항이다. 이러한 핵연료봉 봉단용접에는 TIG(Tungsten Inert Gas)용접, 저항용접, 레이저용접, 전자빔용접 등이 이용되고 있으나 다양한 종류의 피복관 재료와 여러 형태의 조사시험용 핵연료봉 제조와 같이 응용성과 정밀용접이 요구되는 용접방식에 대해 관심을 갖고 연구가 다양하게 진행 중에 있다[1,2].

본 연구에서는 TIG 용접방식의 전극 회전시스템(Orbital Tube Welding System) 용접을 채택하여 조사시험용 연료봉 제조사양을 만족할 수 있는 용접이음부 설계, 봉단마개 및 계측기 용접부위 설계, 용접장치 제작, 그리고 최적 용접을 위한 용접변수들을 시험, 개발하였다.

2. 실험 방법

2.1. 재료

용접시편은 열처리(annealing)된 Zircaloy-4 튜브로 직경 9.5 mm, 두께 0.6 mm 길이 150 mm이며, 봉단마개 및 계측기 용접부위는 Zircaloy-4의 환봉 형태를 Fig. 1과 같이 설계된 부품형태로 절삭 가공하여 제작하였다. 그리고 시험편은 공기 중에 표면 산화 및 기계가공으로 인한 기름이나 이물질 등이 완전히 제거되도록 Freon 113 용액에 30분간 담구어 세척한 다음, 70°C의 건조기에 넣어 건조시켰다.

2.2. 용접장비 및 시편용접

실험에 사용된 장비는 TIG 용접방식으로 불활성가스 분위기에서 비소모성 텅스텐 전극과 모재 사이에 아아크(arc)를 발생시켜 용융하는 방법이다. 그러나 기존에는 전극이 고정된 상태에서 피용접물이 회전하면서 용접이 진행되었으나, Fig. 2에서 보듯이 이와는 반대로 피용접물이 고정된 상태에서 전극이 피용접물 주위를 회전하면서 용접된다. 용접은 직류 정극성(DCSP)과 전류를 주기적으로 변화시키는 방법으로 고주파 펄스 형태를 사용하였다. 이때 아아크 전류와 용접시간을 프로그래밍하여 출력제어가 가능한 upslope, 용접 및 downslope 기능이 있고, 아아크 발생부터 아아크 정지까지 각 단계에서 자동으로 조절할 수 있다. 시편용접은 Fig. 3의 용접시간별 절차도(sequence timing chart)에서 보듯이 각 용접단계(level)별로 용접전류와 시간을 변화시키면서 용접하였다.

2.3. 용접성 평가

용접 건전성 평가를 위해 용접부 외관 검사와 미세조직 검사를 수행하였다. 용접 후 외관상 이상 여부를 확대경과 육안으로 관찰하였으며, 육안검사 결과에서 의심나는 부위나 용접이 중첩되는 부위에 대해 절단한 다음, grinding, polishing, etching하여 금속현미경으로 용접계면을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 용접기술 분석

일반적으로 핵연료봉 양단의 밀봉을 위해 용접이 행해지고 있는데 이에 대한 많은 연구가 수행되었다[1-5]. 여기에는 크게 용접부가 용해되는 용융용접과, 용해가 일어나지 않는 고상용접으로 분류되며, 용융용접법으로 TIG(Tungsten Inert Gas) 용접, EBW(Electron Beam Welding), LBW(Laser Beam Welding) 등이 있고, 고상용접법으로 저항업셋버트 용접(Resistance Upset Butt Welding), 퍼커션 용접(Percussion welding) 과 플래쉬 용접(Flash Welding) 등이 있다. 이 중 저항업셋버트 용접법은 국내 경수로형 및 중수로형 핵연료 봉단용접에 이미 상용화되고 있다. 이러한 용접법들은 피용접물 재질, 용접성, 용접부 이음설계 및 경제성 등 요구관점에 따라 적용되는 용접법이 다를 수 밖에 없다. TIG 용접의 경우 장비도 단순하며 용접절차도 간단하나 용접부에 기공 및 언더컷(undercut) 등의 결함 발생이 단점이며, EBW는 고진공이 필요한 고가의 장비비가 문제이고, LBW는 용접power가 제한되며 고열에 의한 fume 발생이 문제가 된다. 저항업셋용접은 용접부 기계적 특성은 좋으나 용접장치의 복잡성이 문제가 된다.

Fig. 4는 하나로 조사공에서 핵연료 조사시험을 위해 개발된 핵연료 조사시험용 계장캡슐의 도면이다. 그림에서 보는 바와 같이 캡슐에 장착될 핵연료봉은 조사시험 목적에 따

라 그 재질이 스테인리스강 또는 지르칼로이-4 등이 될 수 있으며, 직경 5~60 mm, 관 두께 0.4~2.8 mm 범위의 형태를 가지는 핵연료봉, 캡슐외통 등의 부품에 대한 용접이 가능해야 한다. 더욱이 조사 중 조사거동, 특히 핵연료의 온도변화를 보기 위해 열전대, 핵연료봉 내압측정을 위한 압력계, 핵연료 변형측정을 위한 변형계 등과 같은 센서를 설치해야 하는 계장캡슐의 경우에는 캡슐 내부에 있는 핵연료봉에 조사특성 측정용 계측기가 설치되기 때문에 이들 계측기의 신호선이 캡슐 보호관과 안내관을 통해 제어 판넬까지 연결되도록 해야 한다. 이러한 여러 다양한 조사시험 요구조건을 감안할 때, 앞서 논한 여러 용접방식중 TIG 용접방식, 그 중에서도 Fig. 2와 같은 전극 회전시스템(orbital tube welding)이 다음과 같은 특징으로 가장 적절한 것으로 분석되었다.

- TIG 용접방식은 연료봉 용접에 가장 많이 사용되고 있으며, 오래 전부터 용접 신뢰성이 입증되었음.
- 직경 5~60 mm, 두께 0.4~2.8 mm를 갖는 조사시험 핵연료봉 및 캡슐외통 등의 제조 요구조건을 만족할 수 있는 용접 power를 가짐.
- 피용접물이 고정된 상태에서 전극이 회전하면서 용접하는 방식이라 열전대, 압력계, 변형계 등이 핵연료봉에 설치된 상태 그대로 용접이 가능함.
- 용접변수 프로그램방식으로 작업자 오류 없이 자동 정밀용접이 가능함.

3.2. 용접 이음매 설계

핵연료 조사시험용 캡슐에 장착될 연료봉의 외관상 형태는 상용 연료봉과 비교하여 연료봉 직경, 길이 등 칫수 상에 차이는 있으나 Fig. 5에서 보는 바와 같이 기본적인 구조는 같다. 따라서 피복관과 봉단마개 및 계측기 용접부의 용접을 위한 이음매 형태는 기존 TIG 용접이나 LBW 용접에서 사용되고 있는 이음매 설계를 준용하여 피복관에 봉단마개를 일정 길이 삽입한 다음, 삽입된 상태에서 용접선을 따라가며 용접하는 방식으로 설계하였다. Fig. 6은 이러한 개념으로 설계한 용접이음부 설계 도면이다.

3.3. 용접장치 개발

용접장치는 기존 제품으로 공급되는 여러 용접장치의 사양을 검토한 결과, 미국 AMI사의 Automatic Orbital Tube Welding System이 선정되었다. 이 시스템은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 용접전류 제어장치, 어댑터 케이블, 가스선과 튜브 용접헤드로 구성된다. 용접전류 제어장치는 용접용 펄스제어(pulsation control), 고주파 아아크 개시(high frequency arc start), 정화가스 제어(purge gas control), 용접헤드 아아크 회전(weld head arc rotation) 및 자동 시간조정 기능 등을 할 수 있도록 전류를 공급한다. 특히 용접 제어장치는 일단 특정 외경과 두께의 용접변수를 프로그램해 놓으면, 몇 번이고 이를 쉽게 불러내어 사용할 수 있으며, 용접기에 일체식으로 내장된 프린터를 이용해 문서화할 수도 있다. 이 제어장치는 더구나 품질관리 기능을 가지고 있어 특정 형태나 크기는 물론

연속적인 용접점의 불합격 여부를 표시할 수 있으며, 99개의 용접프로그램을 저장할 수 있다.

연료봉 용접에 있어 또 하나의 특징은 연료봉내 헬륨(He) 가스를 충전하는 것이다. 따라서 용접시 연료봉내 공기를 뽑아내고, 헬륨 가스를 충전하기 위해 용접철편바를 Fig. 8과 같이 개발하였다. 용접철편바내 공기를 진공펌프로서 일단 제거한 다음, 헬륨 가스를 주입하여 철편바내 뿐만 아니라 연료봉내도 헬륨가스로 충전한 후 봉단마개를 피복관에 삽입하여 용접을 하게 된다.

3.4. 용접변수 개발

용접된 시편을 외관검사, X-선검사, 그리고 미세조직검사를 통해 최적 용접변수를 개발하였다. Table 1은 조건별 실험내용이다. 실험조건에 따른 외관검사 결과 Fig. 9와 같이 불완전한 용접의 경우 정상용접과 확실히 차이가 있었으며, X-선 검사에서도 그 결함이 Fig. 10과 같이 발견되었다. 그러나 외관상 정상용접인 경우에도 X-선 검사에서는 용접면에 기공(pore)이 존재하는 것이 확인되었다. 그리고 미세조직 검사에서는 X-선 검사에서 정상인 시편의 경우 결함을 발견할 수 없었으며, 그 조직은 Fig. 11과 같이 급냉 조직인 Widmanstätten 조직을 보여준다. 따라서 본 용접의 경우 용접품질을 X-선검사와 같이 비파괴 방법으로 잘 관리만 한다면 TIG 용접방식의 단점인 용접부 기공 및 언더컷(undercut) 등의 결함을 사전에 발견하여 제거할 수 있다.

Table 1에서 최적의 용접조건으로 선정된 시험 5의 용접결과에서는 외관상 결함이 없으며, X-선 검사에서도 결함이 발견되지 않았으며, 조직검사에서도 결함이 없는 완전한 용접품질을 보여주었다. 뿐만 아니라 반복되는 용접에서 거의 같은 품질의 용접결과를 보여주고 있어 그 용접변수의 재현성 및 신뢰성을 한층 높여 주었다.

4. 결 론

본 실험은 조사시험용 핵연료봉 밀봉용접기술 개발을 위한 용접방식, 용접이음매 설계, 용접장치 개발과 주요 용접변수들이 용접에 미치는 영향을 조사하여 신뢰성 있는 용접조건을 확립하기 위한 기초자료를 얻기 위한 것으로 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 다양한 조사시험용 연료봉 형태 및 치수에 적합한 용접방식으로 TIG 용접방식의 전극 회전시스템 용접이 선정되었다.
2. 신뢰성 있는 용접품질의 기초가 되는 용접부 이음매 설계는 피복관에 봉단마개를 삽입하여 용접선을 따라 용접하는 방법으로 설계되었다.
3. 재질이 지르칼로이-4, 외경 9.5 mm, 두께 0.6 mm인 연료봉인 경우 용접단계별 용접 전류 25A, 24A, 23A, 22A, 용접시간 4, 5, 6, 6이 적절하였다.

4. 용접변수의 신뢰성이 높아 용접부 품질평가는 비파괴 검사인 외관검사 및 X-선 검사가 파괴검사인 미세조직검사와 일치하는 바, 비파괴검사만으로도 가능하였다.

감사의 글

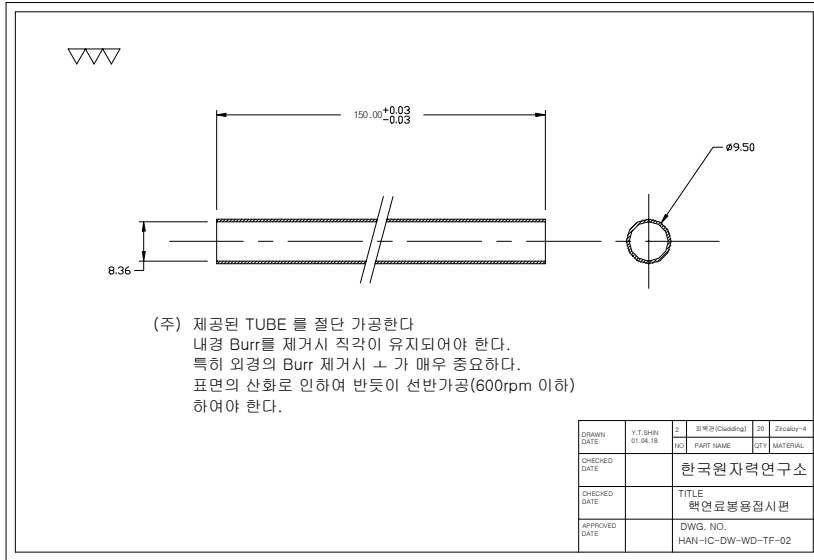
본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

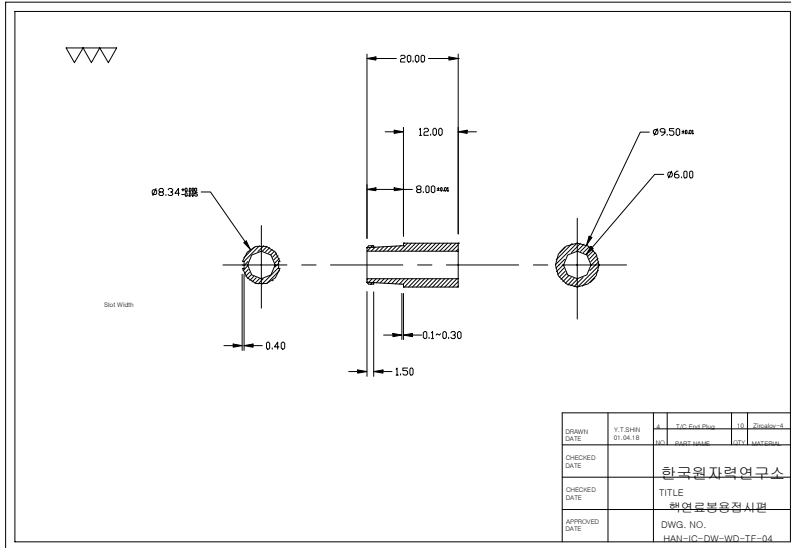
1. V. Ram, G. Kohn and A. Stern, *Welding Journal*, July, 33 (1986)
2. S. S. Kim, D.H. Kim, C. J. Kim and J. M. Lee, *J. Kor. Wel. Soc*, 9(1) 23 (1991)
3. R. A. Wilgoss, et al., *Weld Metal Fabrication*, March, 117 (1979)
4. S. L. Engel, *Laser Focus*, Feb. 44 (1976)
5. J. Mazumder, *Laser Materials Processing*, p.131, North-Holland, (1983)

Table 1. Welding Parameters used for Zircaloy-4 Element

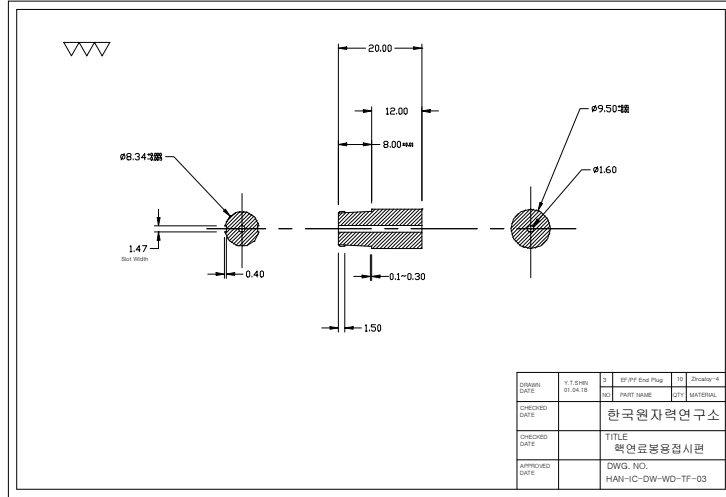
시험	Level 1 (시간/전류)	Level 2 (시간/전류)	Level 3 (시간/전류)	Level 4 (시간/전류)	비 고
1	4/22	4/20	5/16	4/14	용접전류 부족
2	4/22	5/20	6/16	6/14	용접전류 부족
3	4/24	4/22	5/18	4/16	전극간격 0.6mm 유지
4	4/24	5/23	6/22	6/20	적정
5	4/25	5/24	6/23	6/22	적정
6	4/25	4/24	4/23	5/22	용접부 중첩 부족
7	4/25	4/24	4/23	4/23	용접부 중첩 부족
8	4/24	5/22	6/18	6/16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



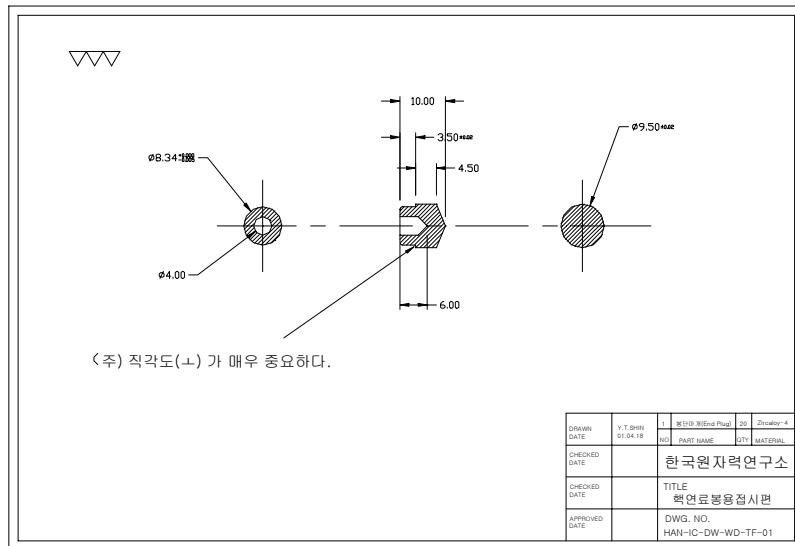
(a) Cladding Tube



(b) T/C End Plug



(c) EF/PF End Plug



(d) T/C End Plug

Fig. 1. Cladding Tube and End Plug

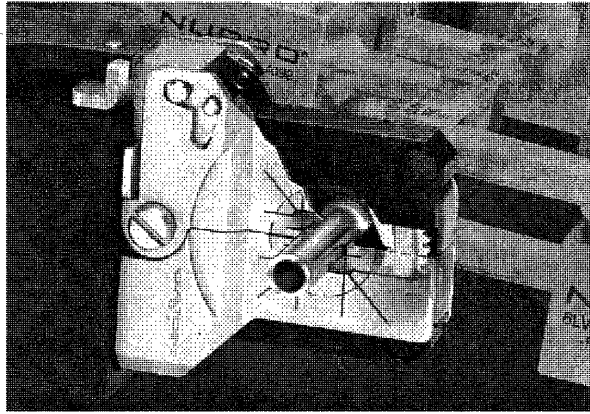


Fig. 2. Orbital Tube Welding System

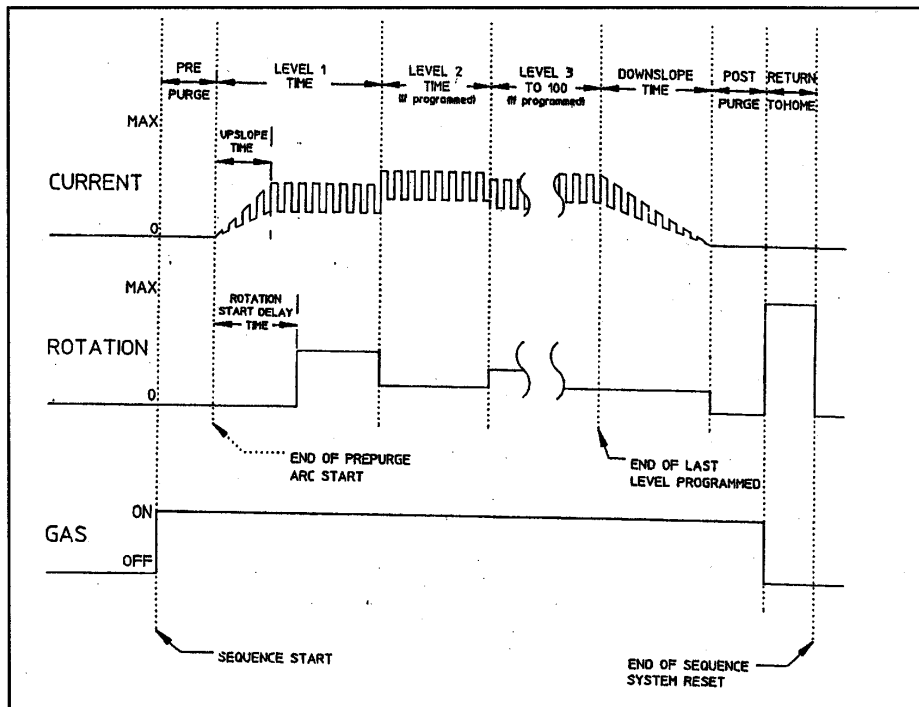


Fig. 3. Sequence Timing Chart

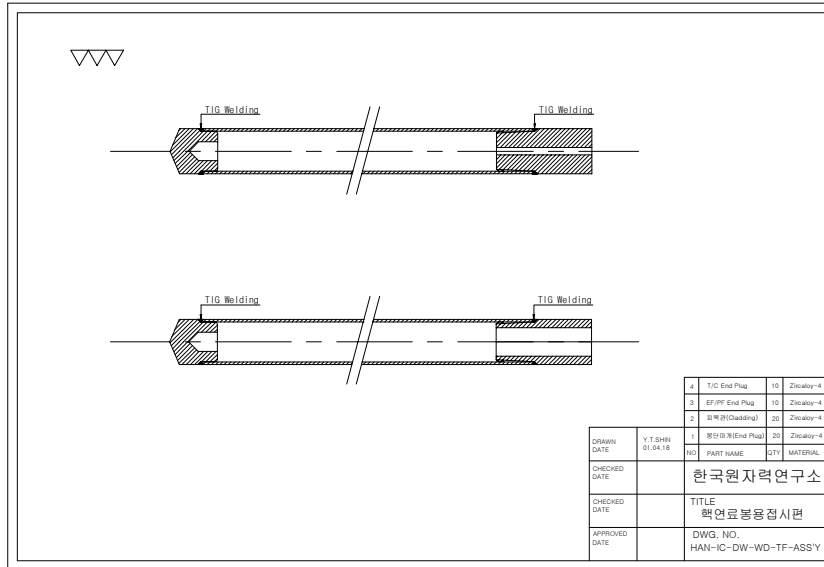


Fig. 6. The Drawing of Joint Geometry for End Plug Welding



(a) Welding Control Console



(b) Weld Head

Fig. 7. Automatic Orbital TIG Welding Equipment



Fig. 8. Welding Chamber



(a) Sound Weld

(b) Unsound Weld

Fig. 9. Cross Section of the Weld Part

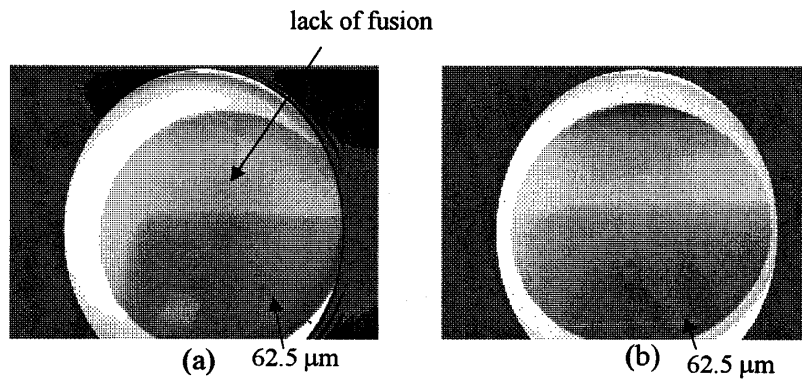


Fig. 10. X-ray Inspection of the Weld Part
(a) Lack of Fusion (b) No Defect



Fig. 11. Microstructure of the Weld Part