

'99 추계학술발표회논문집

한국원자력학회

모의 DUPIC 핵 연료봉의 조사시험

A irradiation test of the simulated DUPIC fuel rod

이철용, 박희성, 문제선, 송기찬, 강권호,

정홍준, 배기광, 양명승

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

DUPIC 핵연료의 조사시험을 위하여 압력강하 시험과 진동시험 및 내구성 시험을 거쳐 하나로에서 사용될 무계장 캡슐을 개발하였다. 제작된 무계장 캡슐은 하단의 guide부분, 중간부의 mini-element assembly, 상단부의 top guide 부분 및 캡슐 내외통으로 구성되어 있으며 원격으로 분해조립이 가능하도록 만들어졌다. 또한 조사시험 할 핵연료로 SEU 5개, 모의 DUPIC 소결체 10개를 제조하였으며, STS 피복관에 삽입 후 TIG용접으로 밀봉하였다. 제조된 mini-element내에는 소결체 5개가 장착되었으며 3개의 mini-element를 캡슐에 장착하였다. 하나로 조사시험의 안전성 분석을 수행한 후 하나로 OR4 조사공에 캡슐을 장착하여 조사시험을 수행하였다.

Abstract

Non-instrumented capsule was developed and tested for vibration and pressure drop, endurance test for the DUPIC fuel irradiation at HANARO. Developed capsule is composed of 4 parts to be easy to do remote dismantle and assembly: guide part of lower part, mini-element assembly of mid part, top guide part of top part, in-out tube of capsule. Also 5 SEU pellets and 10 simulated DUPIC pellets were fabricated for the irradiation and after TIG welding, a sound tests were carried out on the STS cladding and endcap, 3 mini-elements were fabricated. A irradiation test was carried out successfully at HANARO OR4 hole after HANARO safety analysis.

1. 서론

DUPIC 핵연료 개발은 고방사선의 사용 후 핵연료를 재가공하여 중수로에서 사용할 수 있는 새로운 개념의 핵연료를 만드는 연구이다. 이때 만들어진 DUPIC 핵연료는 노내 조사시험을 수행하여 그 성능을 확인하여 노내거동을 분석하고 해석하는 기술을 개발하게 된다. 우리나라에서 가동되는 연구로는 하나로서 이곳에서 조사시험을 수행하게 되는데, 이에 필요한 조사시험기술의 개발과 조사장치의 개발도 중요한 분야의 하나이다[1]. 따라서 DUPIC 핵연료 성능평가의 1단계로 DUPIC 핵연료의 노내 거동을 위한 자료확보와 국내기술로 제작되는 조사시험용 캡슐의 성능입증, 하나로의 조사조건, 장전, 운반등의 관련기술을 확보하기 위하여 모의 DUPIC 핵연료를 제조하여 연구용 원자로인 하나로에서 조사시험을 수행하였다. 본 논문에서는 99년 8월에 하나로 OR4 조사공에 장전하여 조사중인 모의 DUPIC 핵연료 조사시험에 대해 기술하였다.

2. 캡슐설계 및 제조

무계장 캡슐은 DUPIC 핵연료의 조사시험을 위하여 원격조립 및 취급의 가능성 확인과 열유동 시험을 위하여 97년에 설계를 완료하였다. 이후 열유동 시험을 거치고 부분적인 설계 변경을 통하여 시제품의 제조가 98년에 완료되었다. 제작된 무계장 캡슐은 그림 1과 같이 중심축을 중심으로 캡슐하단의 guide부분, 중간부에 3개의 mini-element로 구성된 element assembly, 상단부의 top guide 부분 및 캡슐 내 외통으로 분해조립이 가능하도록 만들어졌다. 총 길이 960mm의 무계장 캡슐은 외경이 56mm, 두께 3mm인 aluminum 재질의 tube를 사용하였으며 캡슐 상부와 하단 locking part는 하나로 핵연료와 동일하게 제작되었다. 본 DUPIC 캡슐의 중요한 특징으로 element assembly 는 3개의 mini-element 핵연료를 장착하여 3종류의 소결체를 동시에 조사시험을 할 수 있도록 설계되었으며, mini-element 주위로 냉각수가 흐르도록 하여 열수력 특성을 향상시키도록 설계하였다. 그리고 DUPIC 핵연료용 캡슐의 설계특징으로 하나로 구동핵연료와는 달리 mini-element의 핵연료봉이 element assembly와 support tube 및 상,하단 end plate에 걸쳐있는 구조로 구성되어 있으며, 캡슐 취급 시에는 main 하중이 구동핵연료와 같이 grapple head로부터 central rod를 거쳐 cup spider에 전달되도록 설계되었다. 또한 DUPIC 핵연료용 캡슐 장입시의 압축하중전달은 grapple head, locking spacer, top guide, top end plate, out tube, bottom end plate를 거쳐서 bottom spring과 cup spider로 전달되며, 하나로 구동핵연료에서 설계된 알루미늄 재질의 end plate는 접촉하중의 2 배까지 견디도록 설계 제한치가 있는데, DUPIC 핵연료용 캡슐에 사용된 end plate 또한 같은 재질로 설계되어 최대 허용하중 200 kg에서도 충분한 강도유지가 가능하게 설계되었다. DUPIC 핵연료봉의 조사중 길이변화가 있을지 모르지만 캡슐 내

mini-element가 support tube 사이에 끼워지는 element assembly내에 길이방향으로 치수변화를 수용할 수 있도록 설계되어있기 때문에 조사중 치수변화에 기인된 Stress 발생은 없도록 설계되었다. 하나로 구동핵연료 집합체는 취급시 핵연료의 비틀림에 대한 힘이 가해져서는 안 되는 것으로 규정되어 있다. 그러나 DUPIC 핵연료용 캡슐은 캡슐본체가 외경 56 mm, 두께 2 mm의 A16061-76 tube에 의해 상,하단 end plate와 연결된 구조이기 때문에 구동핵연료에 비해 비틀림에 대한 저항성이 매우 커서 핵연료 장전용 tool을 이용한 장,탈착시 발생할 수 있는 비 수직적인 힘이 가해져도 안전하게 설계되었다. 이와 같이 DUPIC 무게장 캡슐은 기계적 강도 검토와 치수안전성 및 캡슐취급계통에 대한 모든 설계가 반영되었으며, 차후 계장 캡슐개발의 기본으로 활용될 예정이다[3].

3. DUPIC 캡슐의 열유동 실험

제작된 캡슐의 원자로 운전조건에서 노외 실증실험을 통하여 캡슐의 구조적 건전성 및 내마모 특성을 평가하여야 한다. 이를 위해 압력강하 실험, 진동실험 및 내구성 실험을 그림3의 열유동 실험장치에서 수행하였다[2]. 먼저 압력강하 실험은 내구성실험 전후 각 2회씩 4회 실시하였다. 유량을 변화시키면서 DUPIC Capsule 전체 압력 강하량을 측정하였다. 실험결과로부터 200 kPa의 압력강하를 유발하는 유량은 약 9.632 kg/s로 측정되었으며, 이는 하나로 제한조건 12.7kg/s 를 만족시킨다.

DUPIC Capsule에 대한 진동실험은 유량을 0.5 kg/s 간격으로 증가시키면서 Capsule의 Grapple Head에 대하여 90° 간격을 두고 서로 다른 두 지점에서 실시되었다. 진동주파수 범위는 약 14 - 18.5 Hz 로 측정되었으며, 최대 진동변위는 유량에 따라 거의 일정한 값을 보였으며, 약 54 μm 이하였다. 따라서 실험결과로부터 DUPIC Capsule의 진동변위는 하나로 제한조건인 허용간격 300 μm 이하의 범위를 만족한다. 또한 내구성 실험은 순환수 온도 40 °C, 200 kPa 압력강하 유발유량(약 9.632 kg/s) 110%인 10.6 kg/s 조건에서 10일간 실시되었다. 매 24시간마다 진동수준의 변화를 육안 관찰하였고 실험종료 후 실험부를 해체하여 DUPIC Capsule의 Wear 발생 여부에 대한 육안검사와 DUPIC Capsule 구성부품에 대한 검사를 실시하였다. 검사결과 대부분의 집합체 부품에서는 제작치수와 비교해 보면 뚜렷한 치수변화가 없었으며 무게변화 및 마모의 현상이 관찰되지 않았다. 이는 대부분의 집합체 부품 표면이 제작 후 anodizing 처리되어있기 때문에 내구성 시험조건하에서도 안정된 마모특성을 나타낸 것이라 판단된다. 또한 DUPIC Capsule 부품의 색상 변화는 대부분의 경우에 냉각수의 scale에 기인된 것이라 판단되며, 특별한 부식현상은 발견할 수 없었다.

4. 모의핵연료 제조

하나로에 조사시킬 핵연료를 모의 DUPIC 핵연료 10개와 SEU 핵연료 5개를 표준 모의 핵연료와 같은 방법으로 제조하였다. 조사시험용 모의 DUPIC 핵연료는 실제 DUPIC 핵연료의 선출력과 동일하도록 농축도를 2.35%로 조절하였으며, SEU 핵연료는 1.47%로 조절하였다. DUPIC SIMFUEL의 밀도는 10.361 g/cm^3 , 길이는 9.816 mm, 직경은 10.908 mm, 홈깊이는 상하 0.182/0.168 mm, 표면조도는 $0.49 \mu\text{m}$, 결정립 크기는 $4.58 \mu\text{m}$, 장전길이는 48.975 mm였다. 그리고 SEU 핵연료의 밀도는 10.539 g/cm^3 , 길이는 10.037 mm, 직경은 10.913 mm, 홈깊이는 상하 0.184/0.164 mm, 표면조도는 $0.58 \mu\text{m}$, 결정립 크기는 $3.19 \mu\text{m}$, 장전길이는 50.06 mm였다. 분말과립은 두종류 핵연료모두 관찰되지 않았다. 육안으로는 소결체 표면에 균열이 관찰되지 않았으나, 연삭 후에 균열이 다소 관찰되었다.

5. mini-element 제조

길이 약200mm, 직경 12.7mm의 3개의 조사시험용 연료봉은 mini-element로 구성되어 하나로 core center에 위치하도록 설계되었다. 스테인레스 316L 재질의 연료봉(두께 0.89mm)과 봉단마개는 1.2기압의 He가스 분위기 하에서 TIG(Tungsten inert gas) 용접을 하여 밀봉하였으며, 용접 전에 공정과 장비에 대한 자격화 시험으로 조직검사, 인장시험 및 방사선 투과검사 등을 수행하였다[4-5]. 또한 용접 후에는 정해진 검사절차에 따라 용접부위의 건전성을 검사하였다. 그림 2에 mini-element의 제원을 나타내었다.

5.1 mini-element 구성

1개의 mini-element는 피복관, 소결체, 스프링, space block으로 구성된다. mini-element 내에 삽입되는 5개의 소결체의 직경은 약 10.9mm이며, 길이는 약 9.8mm이다. 표면은 연삭하고 피복관과 소결체 사이의 CANLUB은 사용하지 않는다. 또한 He가스로 채워진 연료봉 내부는 INCONEL 재질의 스프링(길이 79.8mm), 알루미늄 재질의 space block(길이 5mm) 2개로 채워진다. 또한 밀면도 알루미늄 space block 2개를 삽입하였다. 봉단마개의 상하구분을 위해 상단마개의 한쪽 끝에 폭 0.5mm의 원형테를 가공하며, 방사선 투과검사를 고려하여 길이 6mm, 직경8mm 길이로 가공하였다.

5.2 mini-element 용접

조사 연료봉은 연료봉내에 1.2기압 상태에서 He 가스를 채우고 스프링, space block, 소결체를 넣고 STS 316L 재질의 피복관과 봉단마개를 TIG 아크용접을 하였다. 본 연구에서는 제살용접을 기준으로 용접시 직류 아크전류와 용접시간 및 용

접속도 등의 변수를 프로그램하여 자동제어할 수 있는 orbital TIG 용접장치를 사용하였는데, 용접시 산화방지와 연료봉내 He 충전을 위해 0.01 Torr 의 진공 후 He 을 주입한 다음 Ar 차폐상태에서 용접하였다. 그림4와 같은 TIG 용접기로 차폐가스인 Ar을 14ℓ/min 유량으로 흘리면서 4단계 레벨별로 아크 전류값을 34A에서 50A로 변화를 주어 용접하였을 때, 피폭관과 봉단마개의 경계면에 생기는 용접비드와 용접깊이의 변화를 관찰하였다. 여러 실험을 통해 피폭관과 봉단마개가 완전하게 용접되기 위해서는 텅스텐 tip의 위치를 경계면에서 봉단마개 쪽으로 이동하여야 하고 50A 보다 큰 용접 전류값이 필요함을 알 수 있었다. 그림5의 용접형상에서와 같이 용접위치를 봉단마개 쪽으로 약간 이동시키고, 아크전류를 1레벨 70A, 2레벨 65A, 3레벨 60A, 4레벨 56A값으로 용접하였을 때 최적의 조건을 얻었다.

5.3 mini-element 검사

조사 연료봉 용접 후 건전성을 평가하기 위해 용접부위 조직검사, 인장시험, 헬륨 누출(He leak)시험, 연료봉내 He 성분분석 및 치수검사 등을 수행하였는데 검사기준은 CANDU의 QA문서를 참조하였다. 먼저 최적화된 용접조건에서 모의 시편을 제조하여 용접실험을 수행하였는데, 용접전후의 연료봉의 길이변화에서는 약 0.3에서 0.5mm의 감소가 측정되었으며, 용접 후 He 누출 검사에서는 2.5×10^{-7} cc/sec 의 기준치 이하로 He누출은 없음이 확인되었다. 그리고 연료봉내 채워진 He 성분분석을 하였는데, He 충전율은 평균 89%로 기준치 80% 이상이었고, 용접부위 인장시험에서는 피복관 중간부위에서 파단됨을 알 수 있었다. 또한 용접부위 조직검사에서는 총24부위를 관찰하였는데 피복관 두께의 최소 130%에서 최대 204%의 만족스러운 용접결과를 보였다. 따라서 조사 연료봉의 TIG 용접에 대해 건전성이 입증되고, 최종적으로 연구용 원자로에서 조사될 연료봉을 그림6,7과 같이 제조하였다.

6. 조사시험

조사시험을 위하여 핵적, 기계적, 열수력적인 안전성 평가가 수행되었으며 하나로 사고시의 분석도 수행하였다. 이에 대한 자세한 내용은 안전성분석 보고서에 잘 나타나 있다[3]. 안전성 평가 및 분석이 완료된 후 하나로의 OR4 조사공에 장전하였다. 그림8는 조사시험을 위하여 조립된 DUPIC 캡슐을 하나로 OR4에 장전하는 사진이다. 조사기간은 1999년 8월4일부터 1999년 9월30일 까지 약 2개월이며, 약 1500MWd/THM의 연소도에 해당한다. 약 2개월의 조사시험이 완료되면, 냉각기간을 거친 다음 조사 후 시험을 수행할 예정이다. 조사 후 시험항목으로는 외관검사, NDA 검사, 치수검사, fission gas 분석, 핵연료 미세구조, 연소도 측정 등이 있다. 또한 2단계 계획으로 DUPIC 핵연료의 조사시험을 준비중에 있는데, 소결체 및 mini-element 제조과정 등이 모두 핫셀에서 원격으로 이루어져야 한다.

7. 결 론

국내에서 최초로 세라믹 핵연료에 대해 조사시험이 하나로 OR홀에서 수행되었다. 이를 위해 3개의 mini-element를 동시에 조사 시험할 수 있는 무게장 캡슐을 개발하였다. 개발된 무게장 캡슐은 하단의 guide부분, 중간부의 mini-element assembly, 상단부의 top guide 부분 및 캡슐 내외통으로 구성되어 있으며 원격으로 분해조립이 가능하도록 만들어졌다. 또한 조사시험 할 핵연료로 SEU 5개, 모의 DUPIC 소결체 10개를 제조하였으며, STS 피복관에 삽입 후 TIG용접으로 밀봉하였다. 제조된 mini-element내에는 소결체 5개가 장전되었으며 3개의 mini-element를 캡슐에 장착하였다. 그리고 원자로에서 안전성 확보를 위한 건전성 평가를 통하여 안전성을 확인하였으며, 성공적으로 하나로 OR 조사공에 장전되어 조사시험을 수행하였다.

감 사

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 강영환 외, 계장캡슐 활용기술개발, KAERI/RR-1760/96, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1997.
2. 정홍준 외, DUPIC Capsule 내구성실험, KAERI/TR-1367/99, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1999.
3. 배기광 외, DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안전성분석 보고서, KAERI/TR-1157/98, 한국원자력연구소, 1998.
4. 이철용 외, STS 316L 조사연료봉의 TIG 용접에 관한 연구, 대한용접학회, 제33권, pp193-195, 1999.
5. 김수성, 광섬유에 의한 Zircaloy-4 봉단마개 밀봉의 Nd:YAG LBW의 최적조건에 관한 연구, 대한용접학회, 제15권6호, pp 85-95, 1997.

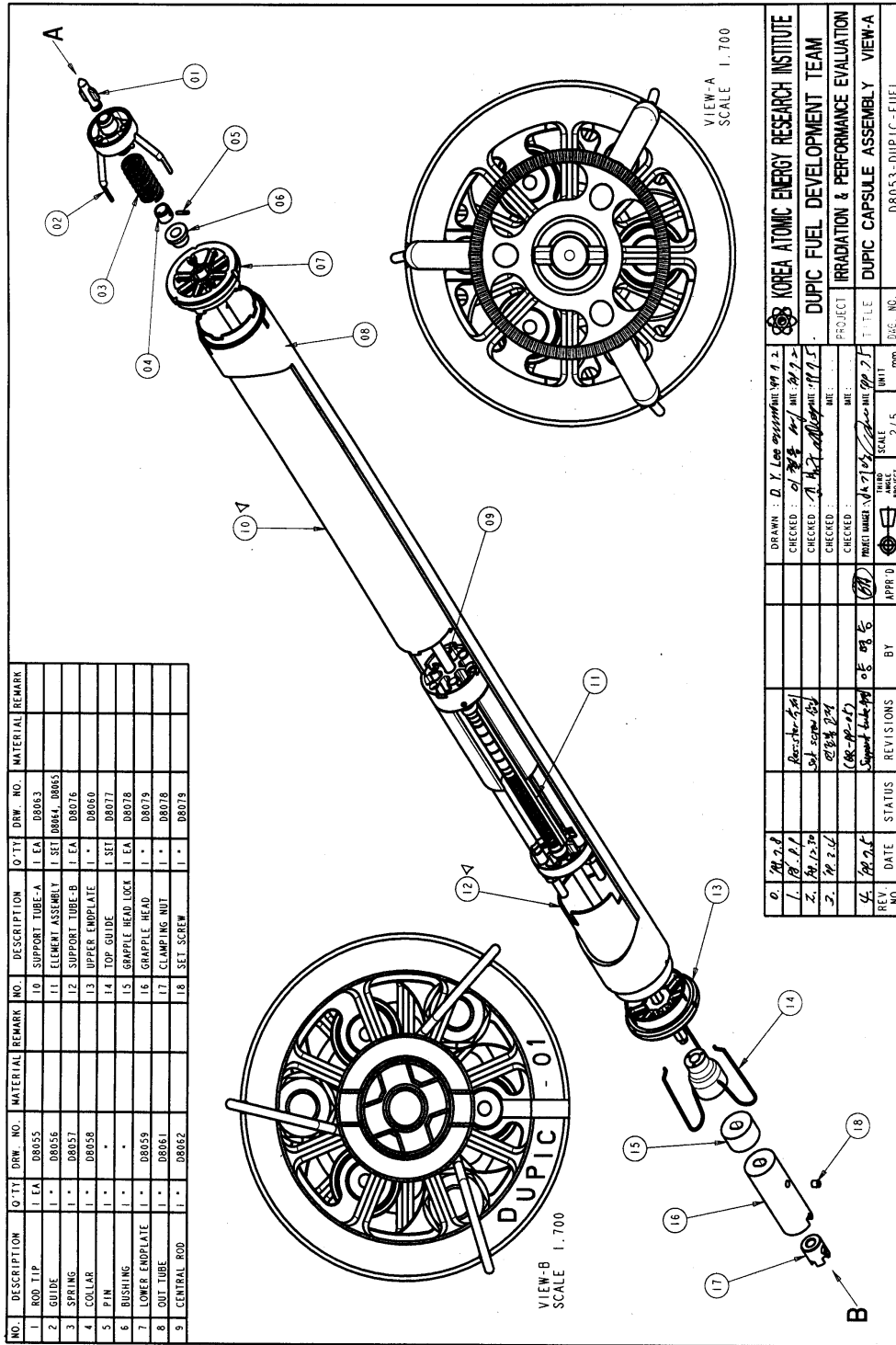
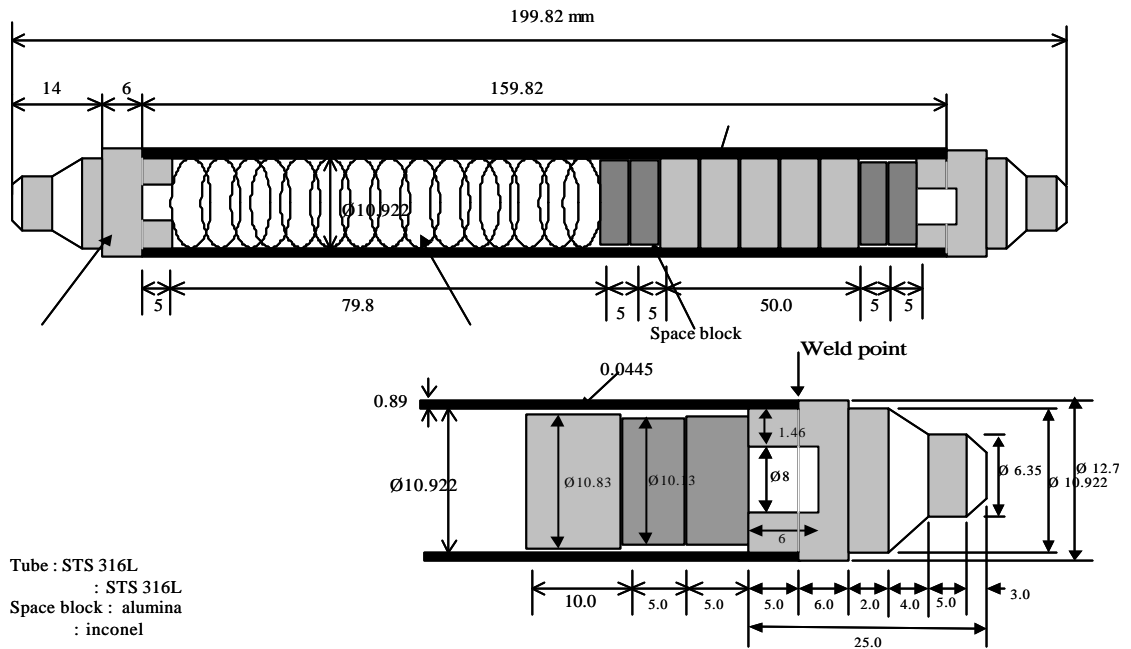


그림 1. DUPIC 무게장 캡슐



Mini-element(0.89mm tube)

그림 2 mini-element 구성

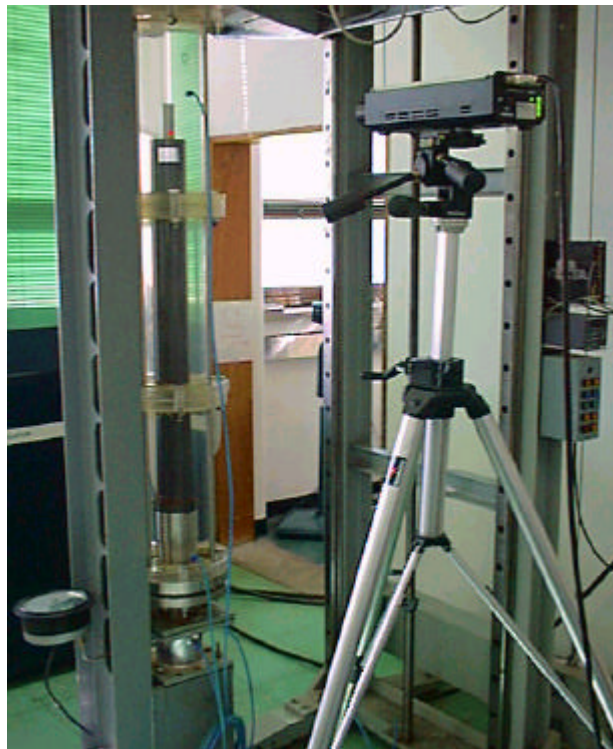


그림 3. 열유동 측정실험



그림4. TIG 용접장치

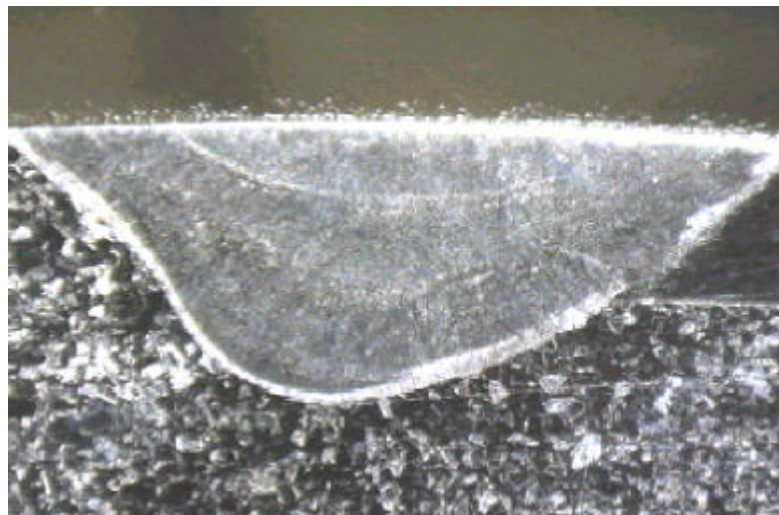


그림 5. 아크전류 70A에서 용접형상

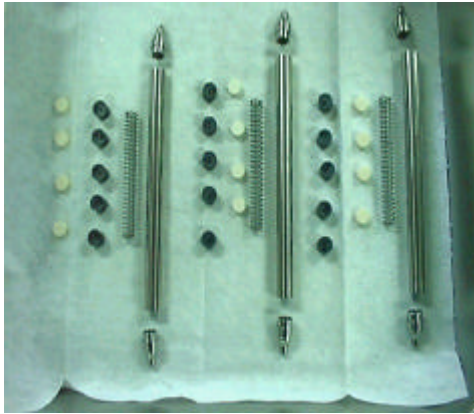


그림 6. mini-element 용접전



그림 7. mini-element 용접후

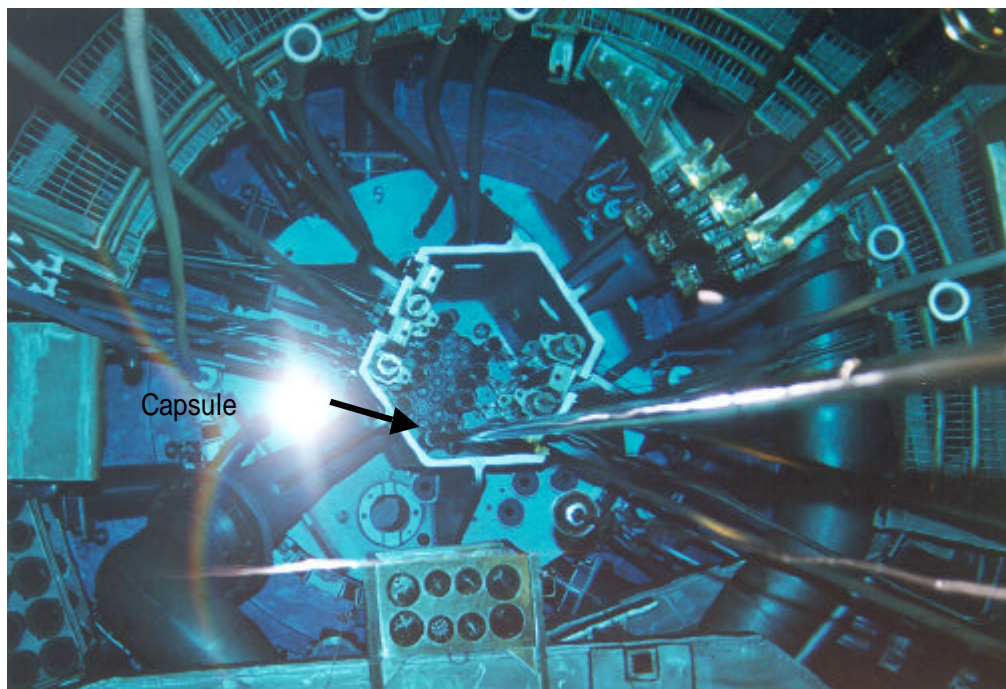


그림 8. DUPIC 캡슐의 하나로 장전