

## Mini-Plate 핵연료 조사시험

### Irradiation Test of Mini-Plate Fuel

박 종만, 이 윤상, 정 홍준, 류 정수, 이 충성, 김 학노, 김 창규

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

원심분무  $U_3Si_2$  분말의 우수성을 증명하기 위하여 원심분무  $U_3Si_2$  분산핵연료와 기존의 파쇄분말 분산핵연료와의 연소성능을 비교하는 조사시험을 국내의 하나로 원자로를 활용하여 추진하였다. 이에 따라 RERTR program의 일환으로 미국 ANL에서는 저농축 우라늄 금속원료를 공급하고 KAERI는 LEU 원료로 원심분무  $U_3Si_2$  분말을 제조하여 제공하였고 미국의 BWXT에서는 원심분무  $U_3Si_2$  분말 분산핵연료와 파쇄  $U_3Si_2$  분말 분산핵연료를 각각 사용한 조사시험용 mini-plate를 제조한 후 KAERI에 제공하였다. KAERI는 mini-plate가 하나로 조사시험공에 적절하게 조사시험 될 수 있도록 조사시험용 Rig를 설계/제작하였으며 조사전 안전성 확인에 필요한 노내거동해석, 열유동 특성, 기계적 구조해석, 열 해석 등 필요한 모든 해석과 특성시험을 수행하였다. 현재 mini-plate rig는 하나로 OR6 조사공에 장착되어 조사시험이 수행되고 있으며 지금까지 확인된 mini-plate의 조사이력은 48-77 kW/m의 선출력을 나타내었으며 약 9 at%의 연소도에 도달하였다. 앞으로 mini-plate 핵연료는 평균연소도가 70 at%에 도달할 때까지 조사시험이 수행될 예정이다.

#### Abstract

The irradiation test for the comparison of in-reactor behaviors between the atomized and comminuted  $U_3Si_2$  dispersed fuels has been planned using HANARO reactor in order to demonstrate a better irradiation performance of the atomized  $U_3Si_2$  fuel powder. At this point, ANL provided LEU metal to KAERI for fabrication of the atomized  $U_3Si_2$  powder. BWXT fabricated the atomized and comminuted mini-plate fuels for irradiation test and provided mini-plates to KAERI. These works are all in connection with an international research co-operation under the RERTR program.

KAERI has designed and fabricated an irradiation rig for mini-plate and has conducted all safety analyses as well as characterization tests which include in-pile performance, thermo-hydraulic behavior, structural and thermal analyses. The mini-plates that is being irradiated at OR6 hole in HANARO will be irradiated until 70 at% BU.

## 1. 서론

1970년대 말부터 세계 모든 연구용 원자로의 핵연료를 핵확산 방지의 목적으로 저농축 우라늄 핵연료로 대체하려는 시도를 하여왔다.[1] 그 결과 현재까지 약 90%의 연구용 원자로가 고농축 우라늄 핵연료에서 우라늄 실리사이드계( $U_3Si$  또는  $U_3Si_2$ )의 합금을 이용하여 48 g-U/㎏의 우라늄 밀도를 갖는 저농축 우라늄 핵연료로 대체되었다.[1-2] 이에 따라 한국원자력연구소의 연구로인 하나로에서는 A1 기지에  $U_3Si$  핵연료 입자가 분산된 금속핵연료를 채택하여 사용하고 있다.

KAERI에서 창안개발한 원심분무 핵연료 제조기술을 핵비확산형 연구로 핵연료 개발에 활용하고자 1992년부터 미국 ANL과 공동연구를 수행하고 있다. 1995년 한미 공동상설위원회 의제로 상정되어 정부간 합의가 이루어졌고 1996년 12월에는 KAERI와 ANL과의 공동연구협정을 맺게 되었다. 그간 공동연구 추진 내용으로 1992년 12월에 원심분무  $U_3Si_2$  분말 2 Kg을 ANL에 제공하여 BWXT에서 ANS 핵연료 시험제조에 사용하였고 그 결과를 서울에서 개최되었던 제 19차 RERTR 국제회의에서 발표한 바 있다.[3] 최근들어 미국에서는 이를 micro-plate형으로 가공한 후 INEEL의 ATR원자로를 이용하여 조사시험을 수행하였다. 시험 결과 원심분무법에 의한 핵연료가 기존의 파쇄기법에 의한 핵연료에 비하여 성능이 우수함이 입증되었다.[4] 원심분무  $U_3Si_2$  분말의 우수성을 증명하기 위하여 원심분무  $U_3Si_2$  분산핵연료와 기존의 파쇄분말 분산핵연료와의 연소성능을 비교하는 조사시험을 국내의 하나로 원자로를 활용하여 추진하고 있다. 이에 따라 RERTR program의 일환으로 미국 ANL에서는 저농축 우라늄 금속원료를 공급하고 KAERI는 LEU 원료로 원심분무  $U_3Si_2$  분말을 제조하여 제공하였고 미국의 BWXT에서는 원심분무  $U_3Si_2$  분말 분산핵연료와 파쇄  $U_3Si_2$  분말 분산핵연료를 각각 사용한 조사시험용 mini-plate를 제조한 후 KAERI에 제공하였다. KAERI는 mini-plate가 하나로 조사시험공에 적절하게 조사시험 될 수 있도록 조사시험용 Rig를 설계/제작하였으며 조사전 안전성 확인에 필요한 노내거동해석, 열유동 특성, 기계적 구조해석, 열 해석 등 필요한 모든 해석과 특성시험을 수행하였다.

본 연구에서는 원심분무  $U_3Si_2$  분말의 우수성을 증명하기 위하여 하나로 원자로에서 원심분무  $U_3Si_2$  분산핵연료와 기존의 파쇄분말 분산핵연료와의 연소성능을 비교하는 mini-plate 핵연료를 이용한 Rig 조사시험에 대한 제조과정, 안전성 분석 및 조사이력을 기술하였다.

## 2 Mini-Plate 핵연료 집합체의 조사시험 조건

### 가. 조사 핵연료

조사시험의 대상 핵연료는 A1 기지에 각각 파쇄 및 원심분무 분말  $U_3Si_2$ 로 분산되어

제조된 mini-plate이다. 이러한 mini-plate 핵연료를 이용한 조사시험은 미국의 Oak Ridge Research Reactor에서  $U_3Si$ ,  $U_3SiAl$ ,  $U_3Si_2$  분산핵연료를 대상으로 처음으로 시작되었다.[5] Mini-plate의 기본적인 특성은 아래와 같으며 그림 1에 구체적인 치수를 나타내었다.

- 조사연료 : 파쇄분말 핵연료 mini-plate(1 개) 및 원심분말 핵연료 mini-plate(3 개)
- $U^{235}$  농축도 :  $19.75 \pm 0.20\%$                       - Mini-plate 두께 : 1.27 mm
- $U^{235}$  content :  $0.84 \pm 0.03$  g/plate                - Mini-plate 내 핵연료 심재 두께 : 0.51 mm
- Target U Density : 48 g-U/cm<sup>2</sup>                - Mini-plate 내 피복재 두께 : 0.38 mm

#### 나. 조사공

4 개의 mini-plate(W35 x L130 x T1.27)를 조사시험용 집합체인 Rig에 넣어서 하나로 정상적인 가동조건하에 OR6 시험공에서 조사하며 상세 조건은 다음과 같다.

- 조사공 : 하나로 OR6 Hole (6-22주기, 20 MW)
- Thermal neutron flux(<0.625 eV) :  $1.7 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>·sec
- Fast neutron flux (>0.821 MeV) :  $1.0 \times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>·sec

#### 다. 안전성 관련 요구사항

저농축 우라늄(LEU) 분산 핵연료로 제조된 mini-plate를 30 MWth 출력의 하나로 원자로에서 조사시험하기 위한 mini-plate 및 조사집합체의 설계 요구 조건 중에는 다음 사항과 같은 열수력 양립성 및 핵연료 안전성 관련 요구 사항이 있다.

- 1) 200 kPa 압력강하에서 조사집합체의 유량 < 127 kg/sec (채널 입,출구 orifice 영향포함)
- 2) 핵비등 여유도( $\Delta T_{\omega, QNB}$ ) > 127 °C
- 3) 임계열속비(CHFR) > 2.50
- 4) 핵연료 중심 온도( $T_{max}$ ) < 350°C (핵연료 표면 산화층에서 온도 증가 포함)
- 5) 핵연료 표면 산화층에서 온도 증가( $\Delta T_{OX, max}$ ) < 114 °C
- 6)  $\Delta V/V$ (fuel swelling) < 20 vol%

이중에서 1)항은 실험을 위해 다른 핵연료 채널에 유량 분포 등 수력학적인 영향을 주지 않기 위함이고, 2)와 3) 항은 냉각수 비등에 의한 냉각수의 불완전 유동과 냉각수 열계거 기능의 급격한 악화로 인한 온도 상승에 의해 피복재 표면에 blister가 형성되어 핵연료가 손상되는 것을 방지하기 위함이다. 4)와 5)는 핵연료의 기하학적 및 금속적 변화방지와 spallation에 의한 핵피복재 손상을 방지하기 위함이다. 6)의 핵연료 팽윤은 연소도와 핵연료 온도에 주로 영향을 받으나 핵연료 자체 문제뿐만 아니라 이로 인한 핵연료 채널유량에 영향을 주어 냉각 기능 악화를 방지하기 위한 고려사항이다. 6)항은 일반적으로 핵연료 온도만 낮으면 연소기간 중 큰 문제가 발생하지 않는다.

### 3. Mini-plate 핵연료의 제조

#### 3-1. 제조

조사시험용 mini-plate는 미국 BWXT에서 제조한 파쇄  $U_3Si_2$  분말과 KAERI에서 제공한 원심분무  $U_3Si_2$  분말을 각각 사용하여 심재압분 과정보터는 동일한 공정을 적용하여 제조되었다. Mini-plate 핵연료를 제조하기 위해서는 A1-6061 재질로 만든 frame 및 cover에 압분체인 핵연료 심재를 넣고 assembling 한 후, 용접하였다.

열간압연을 위하여 용접된 assembly를  $500 \pm 5^\circ C$ 의 box furnace에 넣고 45 분간 예열하였다. 압연시에는 핵연료 assembly의 방향성을 잘 고려하여 feeding 방향을 적절하게 조절하였다. 최종 핵연료 plate로 압연하기까지 총 8 회의 압연을 반복하였다. 10% 이상 over size로 열간압출된 핵연료 plate에 대한 최종 칫수 조정은 냉간압연으로 수행하였다. 한번 냉간압연 과정을 거치면서 약 0.002~0.003 inch의 두께 감소가 일어나도록 미세하게 조정하여 최종 두께에서  $\pm 0.001$  inch 범위 내에 올 때까지 압연을 반복하였다.

압연이 끝난 핵연료 plate에 대하여 피복재의 결합상태 및 핵연료 건전성을 측정하기 위하여 비파괴 X-ray 검사와 조직검사를 수행하였다. 검사과정에서 통과된 mini-plate는 최종 핵연료 plate 규격에 맞도록 cutting과 machining을 한 후 다시 모든 시편에 대한 UT 검사를 실시하였다. UT 검사에서 통과하면 plate 크기 및 무게, plate 표면결합, flatness, 모서리 직각도, 육안관찰 등의 최종검사를 수행한 후 pickling 공정을 거쳐 ID 번호를 각인하였다.

#### 3-2 Mini-plate 제조결과

미국의 BWXT에서 제작된 총 6 개의 mini-plate에 대하여 IAEA에서 정한 판상핵연료의 검사기준 및 절차에 따라 제조후 검사를 수행하였다.[6] 그 결과 2 개의 파쇄분말 mini-plate 핵연료에서는 모든 검사 기준을 만족하였으나 4 개의 원심분말 mini-plate에서는 모두 제조중에 stray particle(white spot)이 발생하였다. White spot이란 압연과정 중에 핵연료입자가 심재영역 밖으로 튀어나와 존재하는 것으로서 X-ray 검사시 film에 white spot의 형태로 나타나며 frame과 피복재 사이에 주로 존재한다. 그림 2는 mini-plate 내에서 white spot의 허용위치를 나타낸 것으로서 이러한 white spot의 위치와 clustering에 대한 제한은 아래의 두 가지 이유에서 필요하다.

- fission product의 방출을 억제
- turbulent flow로 냉각되지 않는 핵연료 plate 부위에서도 충분한 냉각을 유지

따라서 BWXT에서는 허용범위 밖의 stray particle을 수작업으로 모두 제거하고 심재영역 밖의 clad 영역에 존재하는 stray particle에 대해서는 안전성 분석을 수행하였고 조사중에도 별다른 영향이 없을 것이라고 평가되어 NCR을 작성후 사용승인을 하였다.

그림 3-4는 BWXT에서 제조된 원심분말 mini-plate와 단면 사진을 나타낸다.

### 4. Mini-plate 핵연료 조사시험용 rig 설계 및 제작

Mini-plate 핵연료 조사시험용 rig는 하나로 OR 조사시험공에 장착할 수 있도록 열수력학적 및 구조적 건전성을 갖는 개념설계를 거쳐 1997 연도에 상세설계를 완료하였고 열유동 시험을 거친 후 부분적인 설계변경을 통하여 시제품의 제조가 완료되었다. 제작된 rig는 첨부된 도면그림 5와 같이 중심 축을 중심으로 rig 하단의 guide 부분, rig 중간 부에 mini-plate가 위치하는 housing, 상단 부의 top guide 부분 및 rig 외통을 구성하는 support tube 및 out-tube로 분해 조립이 가능하도록 구성되었다. 특히 mini-plate가 위치하는 housing part는 그림 6에서와 같이 4 개의 mini-plate가 끼워질 수 있는 slot이 aluminum block 내에 위치하며 이는 다시 상,하의 housing cap에 의해서 빠지지 않도록 고정되도록 설계되었다. 총길이 960 mm의 조사시험용 rig는 외경이 56 mm, 두께 3 mm인 aluminum 6061 재질의 tube를 사용하였으며 rig 상부와 중심 축 그리고 하부의 locking part는 기계적인 강도요건이 충족된 하나로 핵연료 집합체용 부품과 동일한 규격의 부품을 인용하여 최대 허용하중 200 kg에서도 충분한 강도유지가 가능하게 설계되었다.

Mini-plate 조사시험용 rig의 제작은 관련된 품질규격 요건에 따라 대우정밀에서 제작되었으며 조사시험용과 내구성실험을 위하여 동일한 규격으로 2 set의 rig를 제작하였다.[7,8] 그림 7은 제작된 mini-plate 조사시험용 rig의 사진을 보여주고 있다.

제작된 mini-plate rig의 조사시험시의 치수 및 구조안전성을 검토한 결과 mini-plate 핵연료는 조사중 길이변화가 있더라도 rig의 mini-plate가 끼워지는 housing part 내에서 길이방향으로 치수변화를 수용할 수 있도록 설계되어있기 때문에 조사중 치수변화에 기인된 stress 발생은 없을 것이라 평가되었고 mini-plate 이외의 rig를 구성하는 부품들의 조사에 기인한 길이 변화는 없을 것이라 예상된다.

## 5. 압력강하 및 내구성실험

현재 가동되고 있는 하나로에 mini-plate fuel 용 rig를 장전하기 위해서는 정상 운전중 rig의 구조적 강도가 충분하여야 하고, 또한 하나로 일차냉각계의 설계기준이 되는 열수력학적 요구조건이 만족되어야 한다. 이러한 측면에서 원자로 운전조건에서의 노외 실험을 통하여 rig의 구조적 건전성 및 열수력학적 특성 등을 평가함으로써 원자로의 안전성을 확보하여야 한다.

노외 실험의 항목으로는 압력강하 실험, 유체유인진동실험 및 내구성실험 등이 있다. 대부분의 노외 실증실험은 원자로 실제 운전조건과 동일한 온도, 압력 및 유량조건에서 실시된다. 압력강하 실험을 통하여 rig 설계요건을 검증하고 원자로 노심과의 수력학적 양립성을 입증한다. 그리고 유체유인 진동실험 및 내구성 실험을 통하여 장시간 동안 장전되어 운전되었을 때, 유체유인 진동에 의해 마모(Wear)가 발생하는지 여부를 실험적으로 규명하여 rig 및 유동관(Flow Tube)의 건전성을 확인해야 한다. 이 실험의 목적은 하나로의 OR 조사공에 mini-plate fuel 용 rig가 장전되었을 때, 하나로 운전조건을 만족하는지 확인하고 또한 내구성실험을 통하여 Rig 및 유동관의 건전성을 검증하는 것이다.

## 5.1 실험결과

압력강하 실험결과 약 200 kPa의 압력강하를 유발하는 유량은 그림 8에서 나타낸 바와 같이 6.78 kg/s 로 측정되었고, 하나로 제한 조건을 만족하였다. 진동실험 결과 진동주파수 영역은 약 14 - 19 Hz로 나타났다. 실험범위에서의 RMS 진동변위는 약  $7\ \mu\text{m}$ 이하, 최대진동변위는 약  $20\ \mu\text{m}$  이하로 측정되어 역시 하나로 제한조건을 만족하였다. 이와함께 순환수 온도  $40\ ^\circ\text{C}$  에서, 압력강하 200 kPa 유발유량(약 6.78 kg/s)의 114 %인 약 7.7 kg/s 조건으로 15 일간 실시된 내구성 실험결과[9] 대부분의 Rig 집합체 부품에서는 인식할 만한 마모가 발생하지 않았으나 그림 9에서와 같이 mini-plate와 upper housing cap이 겹치는 면에서 측정하기 어려운 마모가 발생하였으며 bottom endplate와 bottom guide arm이 접하는 3 개의 slot에서 약간의 마모가 발생하였다. 이러한 내구성실험 결과는 유체유발 진동으로 bottom end-plate에서 발생된 마모보다는 더욱 높은 유속을 가지는 housing part에 위치한 mini-plate에서의 마모가 작더라도 더 큰 사고를 일으킬 수 있으므로 유체유발진동과 마모현상을 감소시킬 수 있도록 정밀한 검토의 필요성이 있다. 그러나 육안 마모검사를 기초로 보면 장시간 조사기간 동안 마모가 발생하더라도 허용범위 내에 있을 것이라 예상된다.

## 6. 안전성 검토

OR6에서 Mini-plate를 조사 시험할 때의 출력과 열적 여유도 평가를 통하여 원자로 및 시험 안전성에 대하여 검토하였다.

### 6.1 Mini-plate의 출력 분포

Mini-plate 조사 시험의 분석 대상 노심으로 표 1과 같이 CT, IR1, IR2, OR3, OR4, OR5, OR6에서 여러 가지 다른 조합의 핵연료다발/시험다발/모의다발 등이 장전되는 12 가지 경우를 고려하였으며[10], 각각의 경우에 대하여 축방향 및 횡방향의 선출력을 계산하였다[11]. 분석 대상 노심은 부분장전 노심에 대해서 다음과 같은 조건에 대해 계산하였다.

MCNP를 사용하여 선출력을 계산한 결과 하나로 출력에 대한 핵연료의 평균 및 최대 선출력은 각각 다음과 같다.

- 원자로출력 : 20 MW (핵연료 출력 : 18.00 MW)
- 핵연료 : 36봉 집합체 18다발, 18봉 집합체 10다발 (현재 운전 노심)
- 모의다발 : R02, R19, SOR3, SOR4
- 제어봉위치 : 1/2 삽입
- 정지봉위치 : 완전 인출
- 평균 선출력 : 51.26~60.52 kW/m
- 최대 선출력 : 56.49~66.97 kW/m

Mini-plate 시험용 rig의 반응도값과 관련하여서는 하나로 운영기술지침서의 제한 조

건인 125 mk를 만족하며 운전중 rig 집합체의 인출이 없으므로 모든 조건을 만족한다.

## 6.2 열여유도 평가

조사 조건하에서 mini-plate의 핵비등 여유도, 임계열속비, 핵연료 온도 분포 등 주요 설계 변수 계산에는 plate-type 핵연료를 사용하는 노심 열수력 계산 코드인 PLTEMP 프로그램[12]을 사용하였다.

계산 결과를 표 1에 정리하였다. 비교를 위해 98년도에 수행하였던 이전의 계산 결과[12]도 함께 나타내었다. 본 분석은 참고자료[12]의 결과에 비해 출력은 약 20% 높고, 유량은 약 8% 낮은 조건에 대한 결과이다. 표에서 알 수 있듯이 정상 상태의 조사 시험 중, ONB 여유도, 최대 핵연료 온도 및 최소 CHF 값이 39.5°C, 88.3 °C 및 9.2로서 앞서 고려하는 요구 조건들과 비교할 때, 본 mini-plate 조사시험에 대한 열여유도는 충분한 것으로 나타났다.

그리고, 단상 및 ONB 열전달 상관식, 그리고 CHF 상관식을 어떤 것을 사용하느냐에 따라 그 결과가 일부 차이가 날 수 있다. 그러나 단상 열전달 계수를 잘 알려진 Dittus 상관식을 사용하면 5% 정도 차이가 나지만 이로 인한 핵연료 표면 온도는 1.5°C 이하이고, ONB는 Bergles-Rohsenow 상관식에 비해 11°C 정도 작은 상관식을 사용하고 있으므로 보수적이다. 한편, CHF도 CHF 상관식에 따라 많은 차이가 있을 수 있으나, 표에서 보듯이 현재 계산되고 있는 mini-plate 경우처럼 열여유도가 충분할 때에는 전혀 문제가 되지 않는다. 또한, 핵연료 온도도 충분히 낮은 온도에서 유지되므로 급격한 핵연료 평윤에 대해서는 문제가 없을 것으로 판단된다.

## 7. 선출력이력 및 조사거동

각각 3 개와 1 개의 원심분말 및 파쇄분말  $U_3Si_2$  mini-plate를 조사시험용 rig에 장입한 후 장입전 검사를 거쳐서 1999년 7월 15일에 하나로의 OR 조사공에서 조사시험을 시작하였다. 1999년 10월 2일 까지 확인된 mini-plate의 조사이력은 그림 10에서와 같이 장전 초기에 약 65-77 kW/m, 이후에는 48-55 kW/m의 선출력을 나타내었으며 현재까지 약 9 at%의 연소도에 도달하였다. 앞으로 mini-plate 핵연료는 평균연소도가 70 at%에 도달할 때 까지 조사시험이 수행될 예정이며 조사시험이 완료되는 2000년 말에 IMEP에서의 조사후 시험을 위하여 미국의 ANL과 구체적인 기술협력을 계획하고 있다.

## 8. 결론

원심분무  $U_3Si_2$  분말의 우수성을 증명하기 위하여 원심분무  $U_3Si_2$  분산핵연료와 기존의 파쇄분말 분산핵연료와의 연소성능을 비교하는 조사시험을 국내의 하나로 원자로를 활용하여 추진하였다. 이에 따라 HERT program의 일환으로 미국 ANL에서는 저농축 우라늄 금속원료를 공급하고 KAERI는 LEU 원료로 원심분무  $U_3Si_2$  분말을 제조하여 제

공하였고 미국의 BWXT에서는 원심분무  $U_3Si_2$  분말 분산핵연료와 파쇄  $U_3Si_2$  분말 분산핵연료를 각각 사용한 조사시험용 mini-plate를 제조한 후 KAERI에 제공하였다. KAERI는 mini-plate가 하나로 조사시험공에 적절하게 조사시험 될 수 있도록 조사시험용 Rig를 설계/제작하였으며 조사전 안전성 확인에 필요한 노내거동해석, 열유동 특성, 기계적 구조해석, 열 해석 등 필요한 모든 해석과 특성시험을 수행하였다. 현재 mini-plate rig는 하나로 OR6 조사공에 장전되어 조사시험이 수행되고 있으며 앞으로 mini-plate 핵연료는 평균연소도가 70 at%에 도달할 때까지 조사시험이 수행될 예정이다.

## 9. 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기사업의 일환으로 수행되었음.

## 10. 참고문헌

1. G.L. Hofman, J. Nucl. Mater., 140(1986)256
2. R.C. Birther, C.W. Allen, L.E. Rehn, G.L. Hofman, J. Nucl. Mater., 152(1988)73
3. J.L. Snelgrove, et. al., Pro. of 19th Inter. Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Seoul, Korea, 1996
4. 김 창규, 김 기환, 박 종만, 이 윤상, 이 돈배, "연구로용 우라늄 고밀도 후보재료에 대한 제2차 노내조사시험 고찰" '99 원자력학회 춘계학술발표 요약집, 포항공대, 1999, 5.
5. G.L. Hofman and L.A. Neimark, "Post Irr. Analysis of Experimental Uranium Silicide Dispersion Fuel" ANL/BERTR/TM-6, CONF-8410173
6. "Standardization of specifications and inspection procedures for LEU plate-type research reactor fuels", IAEA-TECDOC-467, 1996.
7. Technical Specification, "Mini-plate Fuel 용 Rig", RRF-MPRIG-SP-01, Rev.0, 1998, 8.7.
8. Purchasing Specification, "Mini-plate Fuel 용 Rig 부품", RRF-MPRIG-PS-01, Rev.0, 1998, 8.10.
9. 정 홍준, 양 선규, 박 종만, 김 창규, 류 정수, "Mini-plate 핵연료 내구성실험", KAERI/TR-1360/1999.
10. 김학노, "고밀도 miniplate 조사시험관련 분석의뢰", 내부통신문, HAN-RR-CR-99-029, 1999, 4, 28.
11. 이병철, "고밀도 mini-plate 조사시험관련 분석결과 요약", 내부통신문 HAN-RO-CR-99-014, 1999, 6, 14
12. 임인철, "PLTEMP를 이용한 Mini plate조사시험의 열적여유도 평가(I)" 내부통신문, HAN-RR-CR-98-015, 1998, 3, 12



표 1. Mini-plate의 열여유도 평가 결과

변 수	평가 결과('99)	평가 결과('98)
출력, kW	25.5	21.3
Plate 압력강하, kPa	137.0	157.0
유량, kg/s	6.77	7.30
Plate 두께, mm	1.27	1.50
핵연료 두께, mm	0.51	0.5
피복재 두께, mm	0.38	0.5
유속, m/s	18.9	20.4
최대 열속, MW/m <sup>2</sup>	2.64	2.21
냉각재 출구 온도, °C	36.9	36.5
최대 핵연료 온도, °C	88.3	79.4
최대 피복재 내부온도, °C	83.0	74.9
최대 피복재 표면온도, °C	77.7	69.1
ONB 여유도, °C	39.5	48.1
CHFR	9.2	11.4

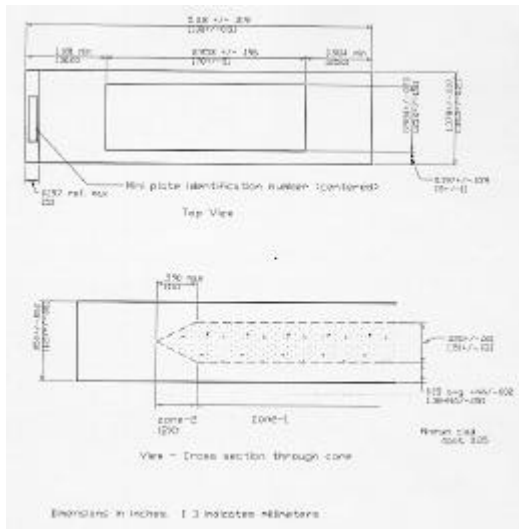


그림 1. Mini-Plate 핵연료의 제원

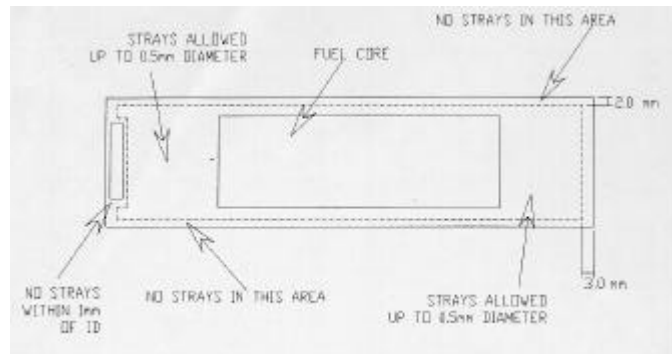


그림 2. Stray 입자 요구조건

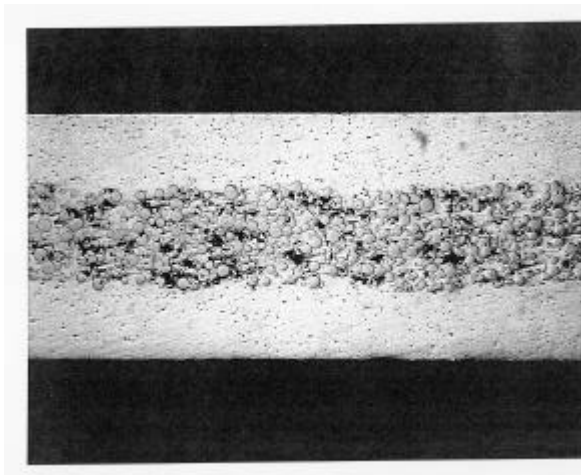


그림 3. 원심분말 Mini-Plate 사진.



그림 3. 원심분말 Mini-Plate 단면사진.

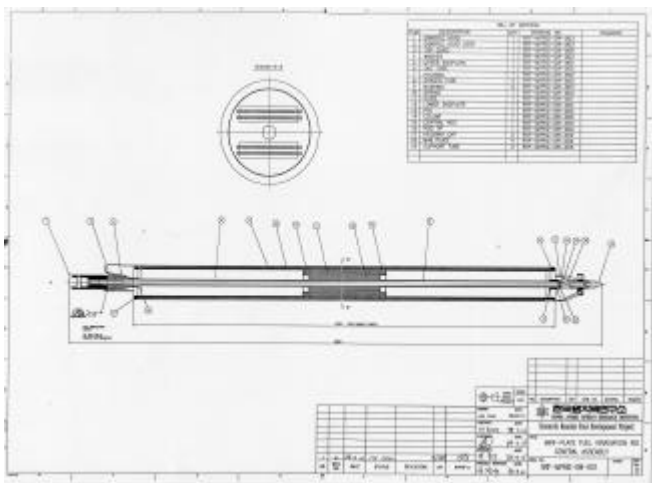


그림 5. Mini-Plate 조사시험용 rig 도면.

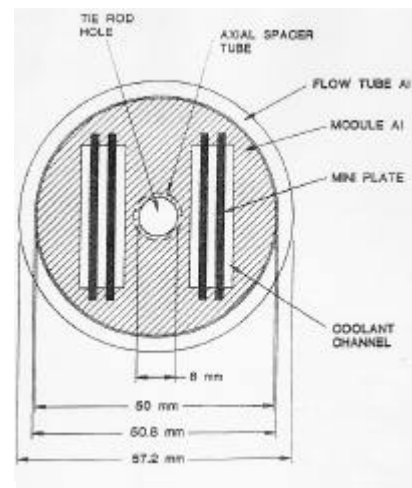


그림 6. Housing Part 단면도.



그림 7. 제작후의 mini-plate 조사시험용 rig 사진.

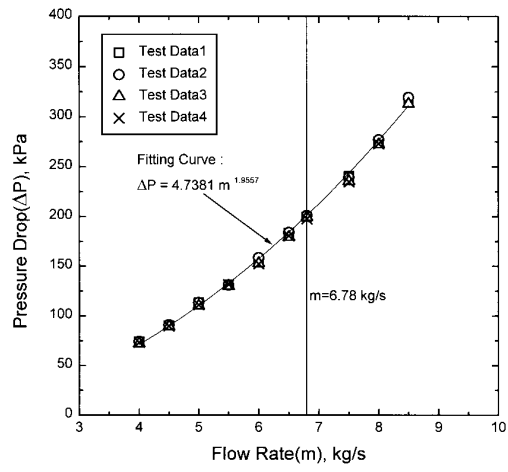


그림 8. 유량변화에 따른 입력강하 변화

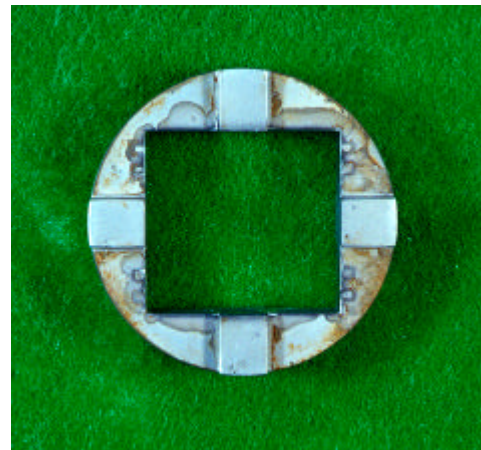
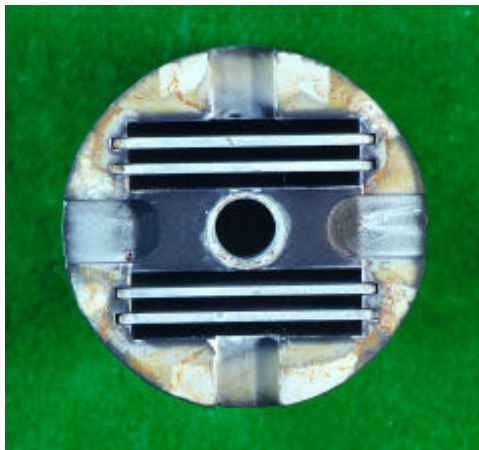


그림 9. 내구성 실험후 mini-plate housing part 사진

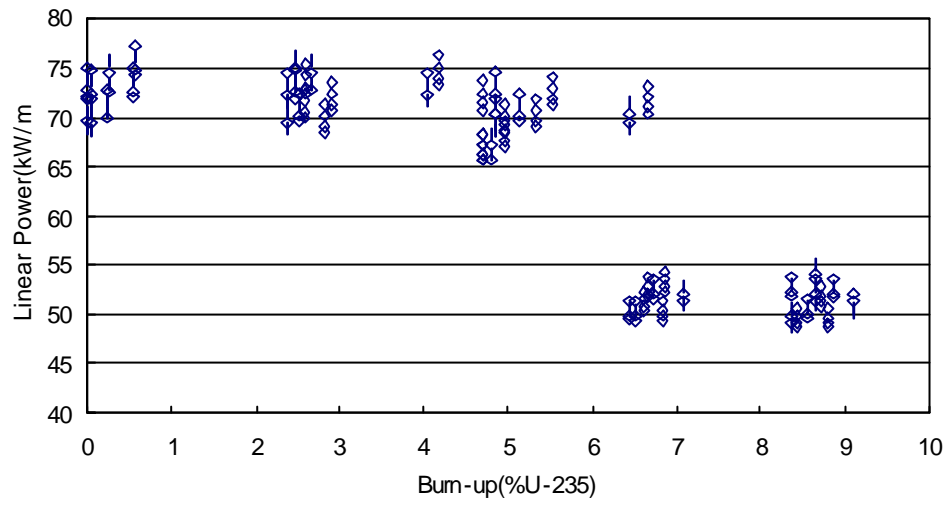


그림 10. HANARO OR6에서  $U_3Si_2$  Mini-plate 핵연료의 선출력 이력