

# 보론함유 UO<sub>2</sub> 소결체 및 미소셀 UO<sub>2</sub> 소결체 연소시험

김대호\*, 양용식, 김효찬, 인왕기, 구양현, 양성우, 박승재, 조만순

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*kdh@kaeri.re.kr

## 1. 서 론

경수로 원전용 핵연료의 초고연소도 및 고성능의 기술적 욕구를 확보하기 위한 다양성 연구가 진행되고 있다. 후쿠시마 원전사고이후 경제성 보다는 안전성이 우선하는 핵연료의 연구개발 패러다임으로 전환되었다.

한국원자력연구원에서 개발되고 있는 비희토류 중성자 흡수봉 소결체인 Boron-bearing UO<sub>2</sub> 소결체는 희토류 자원전쟁으로 인하여 희토류 중성자 흡수물질의 공급이 원활하지 못할 경우를 대비하여 원전의 비상노심을 유지하고 국가전력기반을 안정적으로 유지하고자 하는 선도적 기술이다. 현재 가동중 원전의 가연성 중성자 흡수물질로 사용되고 있는 가돌리니아의 경우 100% 수입에 의존하고 있는 실정이다. 중국 등의 자원 강대국에서 희토류 자원전쟁이 본격화되면서 자원빈국인 우리나라의 경우 자칫 원전가동이 불가능한 상태가 될 수 있는 상황이 도래할 수 있다. 국책연구기관으로써 원전의 안정적 가동을 목적으로 가돌리니아를 대체할 수 있는 기술기반을 확보하는 것이 본 연구의 주목적이다.

후쿠시마 원전사고이후 세계적인 관심으로 연구개발이 진행되고 있는 사고저항성 핵연료의 일환으로 개발된 미소셀 UO<sub>2</sub> 소결체의 연소시험이다. 후쿠시마 사고로 원전의 사고로 인한 핵연료용융 등이 발생하지 않는 완전피동형 시스템이 요구되어지고 있으며, 핵연료 또한 원전의 이상상태에서 사고로 전환되는 과정을 지연시킴으로써 피동형 원전의 기능을 보조하는 중요한 역할이 필요하게 되었다. 사고 저항성핵연료 (Accident Tolerant Fuel)의 일환으로 개발된 미소셀 UO<sub>2</sub> 소결체는 기지 밖으로 핵분열생성물 방출을 억제하는 기능을 한다. 미소셀 내에 Cesium 등의 핵분열생성물을 포획하여 소결체의 변형을 최소화하고 봉내압 감소 및 피복관과 소결체의 반응을 최소화하는 기능을 기대하고 있다. 이는 하나로의 연소시험을 통하여 미소셀 UO<sub>2</sub> 소결체의 건전성을 확인할 계획이다.

## 2. 본 론

### 2.1 연소시험 개요

두 종류의 소결체는 시험목적이 서로 상이하하나 하나로 조사공의 이용률을 높이고 과제 수행 목적을 적

절히 만족시키기 위한 복합시험으로 수행한다. 목표 연소도에 유사한 시험연료봉의 축방향 배치를 통해 효과적인 연소시험을 수행하는 것이 기본적인 목표이나, 목표연소도의 차이가 발생함으로 중성자 제어기술을 이용하여 연소시험을 수행할 계획이다. Boron-bearing UO<sub>2</sub> 소결체의 목표연소도는 20,000 MWd/MTU이며, 미소셀 UO<sub>2</sub> 소결체의 목표연소도는 30,000 MWd/MTU로 계획하고 있다. 큰결정립 UO<sub>2</sub> 소결체 연소시험 및 가스성 소결체의 출력제어를 위해 허프늄을 이용한 중성자 제어기술이 적용되었다. 노심 핵설계를 통하여 Boron-bearing UO<sub>2</sub> 소결체는 두께 1.0 mm의 STS-304 튜브를 적용하였으며, 미소셀 소결체는 0.3 mm 두께의 하프늄 튜브를 적용하여 중성자제어를 통한 출력조절이 반영되었다.

연소시험에 사용될 리그 및 시험집합체는 하나로 OR 조사공 내부구조물과의 양립성이 유지되고 하나로 안전조건과 장기간의 조사기간 동안 기계적 건전성이 확인된 기존의 경수로용 신형소결체 조사시험용 무게장 캡슐 및 하이브리드 무게장리그를 적용하여 Fig. 1과 같이 Hybrid Rig-II가 설계·제작 되었다.

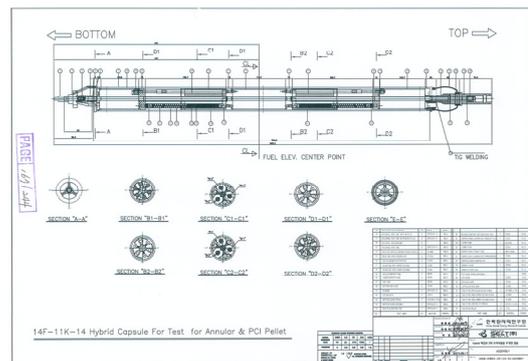


Fig. 1. Drawing of Hybrid Rig-II.

### 2.2 연소시험 조건

Boron-bearing UO<sub>2</sub> 소결체와 미소셀 UO<sub>2</sub> 소결체의 하나로 연소시험은 정상 가동 조건에서 OR-4 시험공을 이용하여 연소시험을 수행할 예정이다. 상세한 하나로 연소 조건은 다음과 같다.

- 조사공 : 하나로 OR-4 조사공
- Boron-bearing UO<sub>2</sub> 소결체 시험 핵연료봉 선출력

- 정상 운전시의 평균선출력 : 372.7 W/cm, at CAR 450 mm
- 가능한 최대 국부 선출력(Hot Spot) : 526.4 W/cm
- 시험연료봉의 위치는 하나로 노심 축방향 +12.5 cm 위치
- 최대 목표 연소도 : ~ 20 MWD/kgU

○ 미소셀 UO<sub>2</sub> 시험 핵연료봉 선출력

- 정상 운전시의 평균선출력 : 454.0 W/cm, at CAR 450 mm
- 가능한 최대 국부 선출력(Hot Spot) : 518.8 W/cm
- 시험연료봉의 위치는 하나로 노심 축방향 - 12.5 cm 위치
- 최대 목표 연소도 : ~ 30 MWD/kgU

○ 냉각수 유량 : 8.47 kg/s (at 209 kPa)

○ 냉각수 압력 : 0.4 MPa

### 2.3 연소시험 시편

Boron-bearing UO<sub>2</sub> 소결체의 목표연소도는 소결체 내 함유되어있는 보론의 연소가 완료되는 시점인 20,000 MWd/MTU까지이며, 1개의 시험연료봉에 5개의 상용크기 소결체를 장입한다. Boron 함유량에 따른 특성을 관찰하기 위하여 Boron 함유량을 달리한 3개의 시험연료봉을 연소시험하여 Boron-bearing UO<sub>2</sub> 소결체의 연소거동을 평가한다. 주요 시험내용은 비희토류 중성자 흡수 소결체의 외형변화, 미세조직변화, 보론 화합물 형상변화 및 봉내압변화 등을 확인하게 된다. 순수 UO<sub>2</sub> 소결체 5개를 장입한 시험연료봉 1개와 서로 다른 Boron이 함유된 시험연료봉 2개로 구성하였다. 연소 후 일련의 조사후시험과 He 생성량, Boron 잔류량 및 미세조직 등의 기술적 검증이 수행된다.

미소셀 UO<sub>2</sub> 소결체의 목표연소도는 하나로 연소 조건에서 Gap Close가 발생하는 30,000 MWd/MTU 이상이며, 1개의 시험연료봉에 5개의 상용크기 소결체를 장입한다. 순수 UO<sub>2</sub> 소결체와 세라믹-미소셀 UO<sub>2</sub> 소결체를 장입한 시험연료봉, 순수 UO<sub>2</sub> 소결체와 메탈-미소셀 UO<sub>2</sub> 소결체를 장입한 총 3개의 시험연료봉 연소거동을 확인할 계획이다. 미소셀 UO<sub>2</sub> 소결체는 첨가제의 성분과 조성을 다양하게 구성하고 소결체내 첨가제의 양은 임의로 조절하여 제조되었다. 연소 후 주요시험내용으로는 소결체의 외형변화, Cs의 분포, 핵분열생성물의 기지내 분포, 미세조직변화, 미소셀의 건전성, 봉내압 변화 및 피복관과 소결체의 접촉면 반응 정도를 확인하게 된다.

### 2.4 시험봉 분석 및 안전해석

조사시험에 따른 선출력 및 온도해석이 진행되었다. 시험핵연료의 하나로 OR-4 조사공에서의 한계 선출력을 기준으로 핵연료 용융방지 온도(2837°C)와 ONB 온도(125°C) 및 냉각수 온도(40°C) 초과여부를 평가하였다. Fig. 1은 각 시험연료봉의 위치

별 선출력 크기이며, Table 1은 연소시험용 시험연료봉 안전성 성능분석 결과이다.

Table 1. Safety Analysis of Irradiation Test

출력	정상운전	제어봉 인출 사고	펌프축 고착사고
	579.0 W/cm (한계선 출력)	684.3 W/cm (최대선출력x130%)	579.0 W/cm (한계선 출력)
최대 연료봉 표면 온도	91°C	100°C	119°C
최대 핵연료 중심 온도	2130°C	2409°C	2153°C
최대 핵연료 hoop 변형률	0.23%	0.52%	0.26%

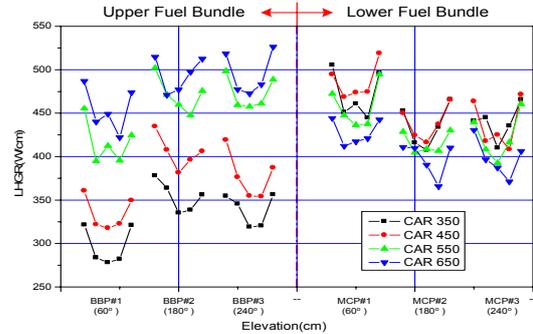


Fig. 1. LHGR of Test Fuel Rods.

### 3. 결론

하이브리드 리그-II 핵연료 연소시험은 두 가지의 목적달성을 위하여 수행된다. 첫 번째 연소시험은 정부의 희토류자원의 공급불가상황을 대비하여 비상노심 구성을 위해 비희토류 중성자 흡수 물질인 Boron을 이용한 Boron-bearing UO<sub>2</sub> 소결체의 연소거동을 확인하기 위함이고, 두 번째 연소시험은 후쿠시마 사고이후 이슈화된 사고저항성을 높인 미소셀 UO<sub>2</sub> 소결체의 연소거동을 확인하는 시험이다. KAERI가 개발한 두 가지의 핵연료 원천기술은 현재 성공적으로 진행 중인 다목적 하이브리드 핵연료 연소시험과 같이 하나로 조사공의 효율적 이용기술 증대의 목적을 추가한다.

### 4. 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 지원 아래 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었다. (NRF-2012-2012M2A8A5025824)

### 5. 참고문헌

- [1] 김대호 외, 이중냉각 환형핵연료 1차 조사시험 및 조사후시험, 한국방사성폐기물학회 2014 춘계학술발표회, 2014. 5.
- [2] 김대호 외, 이중냉각 및 원통형 핵연료 연구로 동시조사시험 기술 한국방사성폐기물학회 2011 추계학술발표회, 2011. 11.