

이중냉각 및 원통형 핵연료 연구로 동시 조사시험 기술

김대호, 방제건, 김전기, 양용식, 구양현
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
kdh@kaeri.re.kr

1. 서론

경수로 핵연료의 초고연소도 및 고성능을 추구하는 연구개발이 세계적인 추세로 수행 중에 있다. 한국원자력연구원에서는 원자력연구개발 중장기계획사업의 일환으로 수행중인 초고연소도 고성능 핵연료과제에서 핵연료 원천기술 확보차원의 고출력 이중냉각 환형핵연료가 개발 중에 있으며, 이와 병행하여 기존의 원통형 UO_2 핵연료의 기능적 특성을 향상시키는 소결체 소재개발이 진행 중에 있다. 이중냉각 환형핵연료는 고출력의 원자로를 구성하는데 효과적인 저온의 핵연료로써 원자로 출력증강의 대안으로 주목받고 있다. 이러한 종류의 세라믹형태 핵연료 개발은 SFR, SCWR 등 GEN-IV 원자로 개발에 관심사항으로 대두되고 있으며 후쿠시마 원전사고이후 안전성 문제가 대두되면서 보다 안전한 핵연료로 주목받고 있다. 또한 정부의 원전수출전략으로 SMR을 대두시킴으로써 산업체 및 연구기관은 다양한 소형의 일체형 모듈 원자로에 관심이 집중되고 있다.

현재 개발 중인 이중냉각 환형 UO_2 핵연료는 경수로를 대상으로 연구가 진행 중에 있으며, 이중냉각의 구조특성을 반영한 소결체의 초기연소특성을 검증하기 위해 1차 연구로 조사시험이 완료되어 우수한 결과를 확인하였다. 고출력의 이중냉각 환형핵연료는 기존의 원통형 핵연료에 비해 넓은 열전달 면적과 얇은 소결체 두께의 형상으로 출력밀도 20%이상의 열출력 향상과 핵연료의 온도가 30% 이상 낮아지는 저온 핵연료이다. 이중냉각 환형핵연료의 특징으로 소결체의 변형을 최소화하고 핵분열기체를 현격하게 적게 방출하여 붕내압 등의 안전성이 확보되며, 핵연료의 안전성 기준이 되는 핵연료 용융온도의 충분한 여유를 확보함으로써 안전하고 경제성이 향상되는 고출력의 초고연소도 핵연료이다.

기존 상용 경수로원전에 사용되고 있는 원통형 핵연료의 PCMI(pellet-clad mechanical interaction)에 의한 손상에 대응하기 위해 기존 상용 소결체보다 30%이상의 creep 특성이 향상된 가소성 소결체를 개발하고 있다. 이는 기존의 고연소도 핵연료의 기계적 취약성을 보완하여 안전성과 경제성을 향상시킨 소결체이다. 현재 진행되고 있는 이중냉각 환형 UO_2 소결체와 가소성의 원통형 UO_2

소결체를 하나의 조사시험용 리그에 장착하여 하나로 OR-4 조사공에서 조사시험을 진행하고 있다.

2. 본론

2.1 동시 조사시험 기술

2.1.1 조사시험 개요

동시조사시험의 조건은 정상가동조건에서 두종류의 시편이 유사한 연소도를 목적으로 하고, 핵연료의 특성과 구조에 따라 출력위치를 결정하게 된다. 이중냉각 환형 UO_2 소결체와 가소성 원통형 UO_2 소결체는 하나의 무게장리그(하이브리드 핵연료 조사시험용 무게장리그)에 장전되어 하나로 OR-4 조사공에서 조사시험을 수행하게 된다.

이중냉각 환형 UO_2 소결체와 원통형 가소성 UO_2 소결체의 하나로 조사시험은 정상 가동 조건에서 OR-4 시험공을 이용하여 조사시험을 수행하며 하나로 조사 조건은 다음과 같다.

- 조사공 : 하나로 OR-4 조사공
- 이중냉각 환형 UO_2 시험 핵연료봉 선출력
 - 평균선출력 : 1007.5 W/cm, at CAR 450mm
 - 최대 국부 선출력(Hot Spot) : 1166.8 W/cm
- 원통형 가소성 UO_2 시험 핵연료봉 선출력
 - 평균선출력 : 505.0 W/cm, at CAR 450mm
 - 최대 국부 선출력(Hot Spot) : 577.3 W/cm
- 냉각수 유량 : 10.015 kg/s (at 209 kPa)
- 냉각수 압력 : 0.4 MPa
- 목표 연소도 : ~ 30 MWD/kgU(EFPD 530 Day)
- 조사 기간 : 2011. 9 ~ 2014. 7.

2.1.2 조사시험 시편 및 무게장 리그

조사시험용의 두 종류 UO_2 소결체 시편은 환형 형태와 원통형 형태의 소결체로 목표연소도 30 MWD/kgU을 위해 $2.67^{w/o}$ 의 농축도를 갖는다. 목표연소도 달성을 위해 대략 530 EFPD가 소요될 것으로 판단된다. Table 1.은 두 종류시편의 UO_2 소결체 제원이다. 참고로 원통형 UO_2 소결체는 출력제어를 위해 Hafnium Shield를 사용하였다.

두 종류의 시편은 각각 이중냉각 환형 시험봉과 원통형 시험봉에 장입하여 무게장리그에 장전하게 된다. 이때 시편의 시험목적에 부합하도록 하나로 출력위치를 결정하고 연소조건을 맞도록 Fig. 1.과 같이 배치하였다.

Table 1. 두 종류의 시험 소결체 재료 및 제원.

구분	환형 UO ₂ 소결체	가소성 UO ₂ 소결체	비고
농축도(w/o)	2.67	2.67	IDR
Type	환형 (이중피복)	원통형 (단일피복)	
외경(mm)	14.10 ± 0.03	8.192 ± 0.013	
내경(mm)	9.64 ± 0.03	-	
두께(mm)	2.23 ± 0.05	-	
길이(mm)	8.5 ± 0.6	9.83 ± 0.64	
밀도(%TD)	97 ~ 98	96	
무게 (g)	7.8 ± 0.2	5.4 ± 0.2	
결정립(μm)	5 μm 이상		상용 기준
O/U 비	2.0±0.01		
불순물 농도	상용기준	2500ppm 이하	
수량(ea)	6	5	
Stack Length(mm)	51.0	49.15	오차 감안

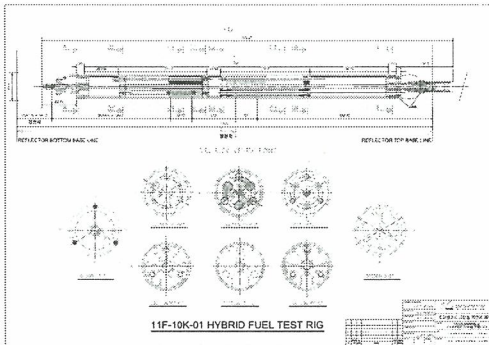


Fig. 1. 하이브리드 핵연료 조사시험용 무게장리그 및 배치.

2.2 조사시험 분석

2.2.1 출력 및 연소도 분석

예상되는 하나로 노심조건을 고려하여 안전성 평가를 위한 선출력을 계산하고, 안전성 평가에 적용될 한계선출력을 산출하였다. 아울러, 예상되는 조사시간중에 연소도를 분석하였다.

○ 선출력 분석결과

- 상단 환형 시험핵연료: 최대선출력 1167 W/cm
한계선출력 1207 W/cm
- 하단원통형시험핵연료: 최대선출력 577.3 W/cm
한계선출력 652.4 W/cm

○ 연소도 분석결과

- 계획된 연소도 30,000 MWd/MTU를 기준으로
 - 상단 이중냉각 환형 시험핵연료 : 429.4 EFPD
 - 하단 가소성 원통형 시험핵연료 : 529.4 EFPD

2.2.2 조사시험 리그 분석

본 하이브리드 핵연료 조사시험용 무게장리그 구조는 이중냉각 환형 UO₂ 핵연료의 특성에 따라 냉각수의 내.외부 유로공간이 확보되어야 하는 외형적 구조특성이 필요하고 조사시험용 리그 내에 연료봉

의 안전한 장착이 보장되어야 한다. 아울러 동시에 장착될 가소성 원통형 UO₂ 핵연료가 냉각수 유동의 간섭이 발생하지 않도록 두 개의 cooling block 유로가 정렬되어야 한다. 하나로의 선출력 조건을 만족시키기 위한 온도계산 결과를 반영하여 cooling block의 연료봉 수집면적이 계산되었으며 이를 시험봉집합체 설계에 반영하였다. 또한, 연료봉의 용접과 리그내의 냉각수 유로간섭이 발생하지 않도록 설계하는 것이 중요하고 각각의 구조에 따른 진동 등의 수력적 분석이 필요하다. 이중냉각의 내.외부 이중 유로채널과 원통형의 단일유로채널이 동시에 확보되도록 설계 제작된 무게장리그는 노의 수력적 특성시험을 통하여 하나로 양립성을 확인하였다.

2.2.3 조사시험 안전성 분석

하나로 조사시험을 위한 안전성 평가는 선출력 및 연소도 분석이 선행되고 이에 따른 열수력 해석과 시험연료봉의 안전성 확인을 위해 FRAPCON, DUOS, MATRA, AVAQUIS 등 성능평가가 수행되었다. 각각의 연료봉에 대해 정상상태/제어봉 인출/펌프축고착시에 대한 평가를 수행하였다. 분석결과 펌프축고착사고에서 최대온도가 하나로의 ONB 제한온도조건이 125℃인 118℃로 확인되었다.

3. 결론

하나로 OR 조사공 내부구조물과의 양립성이 유지되고 하나로 안전조건과 장기간의 조사기간 동안 기계적 건전성이 확인된 조사시험용 무게장리그를 적용하였다. 이중냉각의 내.외부 이중유로 채널과 원통형의 단일유로채널이 동시에 확보되도록 적용하였으며, 노의 수력적 특성시험을 통하여 하나로 양립성을 확인하였다. 이중냉각 환형 UO₂ 핵연료와 가소성 원통형 UO₂ 핵연료의 서로다른 형태의 이중 핵연료를 하나의 무게장 리그에 장착하여 동시에 조사시험을 실시함으로써 하나로의 조사공 이용률을 극대화하는 확장기술로 적용되었다. 핵연료개발에 있어 다양한 형태의 연구로 동시 조사시험의 가능성을 확인하는 기회가 될 것으로 판단된다. 이후 핵연료의 개발에 따른 하나로 조사시험에 있어 효과적인 조사시험이 가능하도록 참조기술로 활용되기를 기대한다.

4. 참고문헌

- [1] 김대호 외., 경수로용 이중냉각 환형핵연료 하나로 조사시험 기술, 2009년 하나로심포지움.
- [2] 김대호 외., 하나로 선출력 제어를 위한 하프늄 분석 및 가공기술 연구, 한국원자력학회, 2002 추계학술발표회 논문집.