

## SFR 핵연료 하나로 조사시험 캡슐 제조 공차에 따른 영향 평가

천진식, 이병운, 양용식, 서철교, 김준환, 이종탁, 이찬복  
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 덕진동 대덕대로 1045  
[ischeon@kaeri.re.kr](mailto:ischeon@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

한국원자력연구원에서는 2007년부터 소듐 냉각 고속로 (SFR) 노심에 사용할 U-Pu-Zr 핵연료를 개발 중이다. 현재는 U와 Zr으로 이루어진 U-Zr 금속 합금 제조 기술을 개발하고 있으며, 2010년에 하나로에서 연소 시험을 시작할 예정이다.

금속 핵연료봉은 핵연료와 피복관 사이에 소듐이 충전되어 있으므로 하나로 안전성에 유념하여 설계해야만 한다. 또한 SFR 핵연료의 연소특성을 하나로 시험에서 실현하기 위해서는 표면온도를 높여서 핵연료봉 온도를 SFR 핵연료와 유사하게 유지하는 것이 필수적이다. 이를 위하여 핵연료봉을 밀봉튜브에 넣어 연료심을 이중으로 밀봉하였으며 온도도 높였다.

그러나 연료봉과 밀봉튜브의 간극이 작으므로 제조 가공 공차에 따른 온도 변화를 평가하여 캡슐의 안전성에 미치는 영향을 확인하여야만 한다. 본 논문에서는 캡슐 부품의 제조 현황과 제조 공차에 따른 온도 변화 평가 결과를 기술하였다.

### 2. SFR 금속연료 하나로 조사시험

#### 2.1 조사시험 개요

U-Zr 금속 핵연료의 하나로 조사시험은 OR5 조사 시험공에서 수행할 예정이다. 상세한 하나로 조사 조건은 다음과 같다.

- 시험 핵연료봉 선출력
  - 보수적 예상 최대 국부 선출력 : 352 W/cm
- 냉각수 유량 : 6.2 kg/sec at ΔP=209 kPa
- 냉각수 압력 : 0.4 MPa
- 목표 연소도 : 약 3 at%

피복관 재질로는 페라이트/마르텐사이트 강 환봉을 관으로 가공하여 사용하였다. 하나로는 열중성자속이 높아 LEU를 핵연료에 사용할 경우 출력력이 매우 높아지므로 Hf 열중성자 차폐체를 사

용하여 핵연료봉의 선출력을 조절한다.

#### 2.2 캡슐 구조

조사시험 캡슐의 구조는 참고문헌 [1]에서 확인할 수 있으며, 상단 및 하단에 각각 6 개씩 연료봉이 위치한다. 연료심의 직경은 3.7 mm이고 길이는 50 mm 이다. 피복관과 밀봉 튜브의 치수는 표 1과 같다. 피복관과 밀봉 튜브 사이의 갭은 60 μm 정도이다. 또한 밀봉 튜브를 냉각하는 냉각수 채널의 직경은 12 mm이다. Hf 차폐체의 길이는 120 mm이고, 두께는 상단이 1.4 mm, 하단이 1.6 mm이다.

Table 1. Dimensions of cladding and sealing tubes

피복관		밀봉 튜브	
외경	내경	외경	내경
5.5	4.6	8.62	5.62

### 3. 밀봉튜브-피복관의 편심도 영향 평가

#### 3.1 평가 방법

밀봉튜브-피복관의 편심도가 온도에 미치는 영향은 경수로 핵연료의 소결체와 피복관 편심도가 온도에 미치는 영향 분석 자료[2]에 기반하여 평가할 수 있다. 그림 1에 편심도 평가를 위한 개략도를 나타내었다. 여기서 소결체 대신에 밀봉튜브로 대체하여 참고문헌[2]에서 유도된 식을 사용한다. 편심도  $\epsilon$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = e / (R_i - R) \quad \text{..... (1)}$$

여기서  $e$ 는 밀봉튜브와 피복관의 중심의 벗어난 정도이며,  $R_i$ 는 밀봉튜브의 내경,  $R$ 은 피복관의 외경이다.

참고문헌[2]에 주어진 특성방정식에서 고유값을 4번째 항까지 구하여 밀봉튜브 내면 온도와 평균 출력에 대한 상대 선출력을 계산하였다.

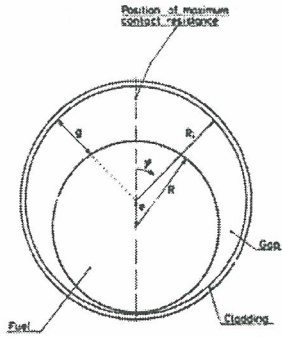


Fig. 1. Eccentricity of the fuel pellet with respect to the cladding[2]

3.2 밀봉튜브 내경 측정

밀봉튜브와 피복관은 KEPIC-QAP의 품질보증 요건에 따라 제조하였다. 제조한 피복관의 외경 공차는 5  $\mu\text{m}$  이내이었다. 밀봉튜브의 내경은 3차원 측정기로 측정하였으며 최대 반경 방향 제조 공차는 10.5  $\mu\text{m}$ 이었다.

3.3 평가 결과

보수적인 선출력 352 W/cm와 제조된 부품의 치수로부터 편심도  $e$ 로 0.15를 계산에 사용하였다. 여기서 부품의 열팽창은 무시하였다.

그림 2에 밀봉튜브와 피복관의 편심도가 연료봉 열속에 미치는 영향을 나타내었다. 그림과 같이 최소 간극인 60  $\mu\text{m}$  인 쪽에서 최대 열속이 최대 간극인 82  $\mu\text{m}$  인 쪽에서 최소 열속이 발생하며, 각각 평균값에 비하여 5 % 정도 차이가 난다.

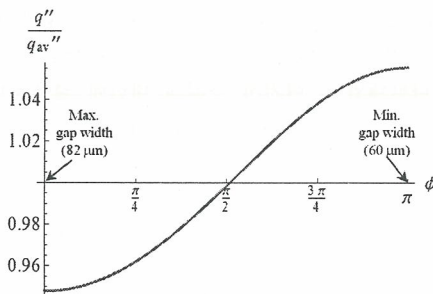


Fig. 2. Effect of eccentricity between cladding and sealing tubes on heat flux

그림 2에 밀봉튜브와 피복관의 편심도가 연료봉 온도에 미치는 영향을 나타내었다. 그림과 같이 최소 간극 부위에서 온도가 낮고 최대 간극 부위에서 온도가 높다. 온도 차이는 각각 평균값에 비

하여 -19  $^{\circ}\text{C}$ 에서 28  $^{\circ}\text{C}$  차이가 난다. 이러한 온도 차이가 피복관의 건전성에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가되었다.

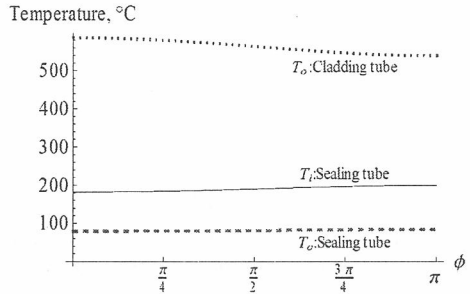


Fig. 3. Effect of eccentricity between cladding and sealing tubes on temperatures

4. 결론

SFR 노심용 U-Pu-Zr 핵연료를 개발 중이다. 2010년에 하나로에서 U-Zr 연소 시험을 시작할 예정이다. 조사 시험 캡슐은 핵연료봉이 밀봉튜브 들어 있는 구조이다. 본 논문에서는 캡슐 부품의 제조 현황과 제조 공차에 따른 온도 변화 평가 결과를 기술하였다. 밀봉튜브와 피복관의 제조 공차에 의하여 열속은 평균값에 비하여 5 % 정도 차이가 있었으며, 온도는 약 30 $^{\circ}\text{C}$  차이가 발생하였다.

5. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력중장기연구과제 중의 일부로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

6. 참고문헌

[1] 천진식, SFR 금속핵연료 1차 하나로 조사시험 캡슐 설계 보고서, SFR-FD340-WR-02-2009Rev.00, 2009.  
 [2] R. Nijsing, Nuclear Engineering and Design, Vol.4, 1-20, 1966  
 [3] 천진식 등, "U-Zr 금속 핵연료 하나로 시험을 위한 소듐-물 반응 평가 및 캡슐 설계" 한국방사성폐기물학회, 2009년 춘계학술발표회 논문요약집, pp.322-323, 2009