

## 이중냉각 UO<sub>2</sub> 환형소결체 연소 거동

망제건, 양용식, 김대호, 구양현, 서항석, 권형문  
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045  
 igbang@kaeri.re.kr

### 1. 서론

한국원자력연구원에서 원자력기술개발사업의 일환으로 추진중인 “초고연소도 고성능 핵연료 기술 과제”에서 개발중인 이중냉각 핵연료 환형소결체의 초기 연소성능을 검증하기 위하여 하나로 연구소에서 연소시험을 수행하였다.

연소시험은 하나로 조사공 OR-4에서 수행되었으며, 연소후 하나로 수조에서 약 1개월간의 냉각기간을 거쳐 IMEF로 이송되어 캡슐을 해체한 후 시험연료봉의 감마스캐닝을 수행하여 이중냉각 환형소결체의 노내 안정성을 확인하였으며 시험연료봉 직경을 측정하였다. 이후 조사후시험시설로 이송하여 비파괴시험 및 파괴시험을 수행하였다. 감마스캐닝 결과를 참조하여 파괴시험을 위한 시편 절단계획을 수립하여 시편을 절단하였다. 절단된 시편중 일부는 각 밀도별로 연소후 밀도를 측정하였으며, 측정된 밀도로부터 팽윤을 계산하였다. 또한 광학현미경 및 전자현미경으로 거시조직 및 미세조직을 관찰하였으며, 광학현미경으로 400배율로 촬영한 조직사진으로부터 결정립크기를 측정하였다. 또한 환형소결체의 변형량을 측정하기 위해 전자현미경을 사용하여 연소후 소결체의 내외부 변형량을 측정하였다.

### 2. 하나로 연소시험[1,2]

이중냉각 구조 핵연료의 특성을 고려하여 기존의 무계장리그 및 시험핵연료집합체를 설계·변경하여 연소시험용 리그를 제작하였다. 무계장리그는 상·하단으로 구성되었고 각각 3개의 시험연료봉이 장전되었으며, 상단 시험연료봉은 각각 90%, 93%, 96% 밀도의 소결체로 구성되었고, 하단의 3개 시험연료봉은 98% 밀도 소결체, 소결체와 피복관의 간격을 줄이기 위해 외경이 다소 증가한 98% 밀도 소결체 (98%L)와 96%, 98% 밀도의 소결체가 혼합된 연료봉으로 구성되었다.

하나로 조사공 OR-4에서 수행된 연소시험은 2008년 11월 13일 착수하여 2009년 5월 1일 종료

하였으며 유효조사일은 약 94일 이었다. 연소도는 상단 시험연료봉은 8,120MWD/MTU, 하단 시험연료봉은 10,900 MWD/MTU에 도달하였다.

### 3. 조사후시험

#### 3.1 비파괴 조사후시험

하나로에서 연소후 1개월간의 냉각기간을 거친 후 IMEF에서 캡슐해체 및 시험연료봉에 대한 측방향 감마스캐닝을 수행하였다. 감마스캐닝결과 소결체 사이의 간극이 뚜렷하게 확인되어 측방향 핵물질 이동 등의 현상은 없는 것으로 확인되었다. 또한 감마스캐닝 결과는 파괴시험을 위한 시편의 절단위치 선정에 사용되었다.

#### 3.2 환형소결체 결정립크기 변화

광학현미경으로 400배율로 촬영한 조직사진으로부터 5종의 소결체(90, 93, 96, 98L, 98%)의 외/내/중앙 부위의 결정립 크기를 측정하였다.(Table 1) 연소 동안 온도 분포가 외부와 중심부가 다르므로, in-reactor grain growth는 중심부가 클 것으로 예상했지만, 외부/중심부가 비슷하거나 도리어 외부영역이 더 큰 경향을 보였다.

Table 1. Measurement of average grain size.

No.	연소전 평균 GS	연소후 평균 GS	내측 grain size	중간 grain size	외측 grain size
R1 (90%)	2.70	3.315	2.937	3.224	3.931
R3 (93%)	2.90	2.254 (주1)	2.344	2.094	2.344
R10 (96%)	8.60	10.602	11.231	9.955	12.313
R2 (98%L)	8.70	11.406	12.775	10.429	13.811
R8 (98%)	8.70	12.494	14.195	11.884	12.937

주1 :파괴정되어 결정립크기 측정 어려움

#### 3.3 환형소결체 밀도 변화

이중냉각 환형소결체의 조사후 밀도를 측정하였다. 환형소결체의 조사전 밀도는 환형소결체 제조시 측정하였으며, 조사후 환형소결체의 밀도는

ASTM B311-93 시험 방법으로 핫셀에서 측정하였다. 연소전 및 연소후 밀도 변화를 Fig. 1에 나타냈으며, 이 그림에서 90% 및 93% 밀도 측정 결과가 차이가 많이 나는데 이는 실험실 및 핫셀에서의 측정방법 차이에 의해 발생하였다.

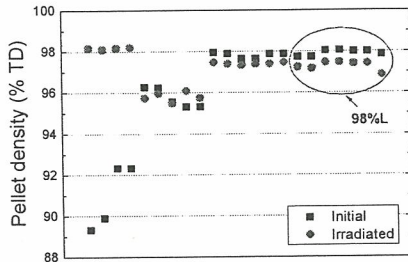


Fig. 1. Density change of annular pellet after irradiation.

### 3.4 환형소결체 팽윤 계산

이중냉각 환형소결체의 swelling rate는 98%의 고밀도 소결체에 대하여 계산하였다. Swelling rate는 위에서 측정한 조사후 밀도로부터 계산하였으며 계산결과는 Table 2에 정리하였고, Fig. 2에 기존 상용핵연료의 저온에서의 swelling rate[3]와 함께 나타내었다. Fig. 2에서 98% 고밀도 환형소결체의 swelling rate는 0.261 vol%에서 0.591vol% 범위안에 있으며 기존 상용핵연료의 저온에서의 swelling rate 범위 안에 있음을 알 수 있었다.

Table 2. Density and swelling rate of irradiated annular pellets. (Burnup: 10,900MWD/MTU)

Specimen No.	As fabricated density (%TD)	Post irradiation density (%TD)	Calculated swelling rate
R2-SP2	98.086	97.457	0.591
R2-SP3	98.053	97.476	0.588
R2-SP4-1	97.995	97.409	0.598
R2-SP4-2	97.995	97.422	0.585
R8-SP2	97.953	97.470	0.493
R8-SP3	97.889	97.391	0.509
R8-SP4-1	97.645	97.333	0.320
R8-SP4-2	97.645	97.391	0.260
R14-SP4-1	97.885	97.398	0.498
R14-SP4-2	97.885	97.466	0.428
R14-SP6-1	97.728	97.235	0.504

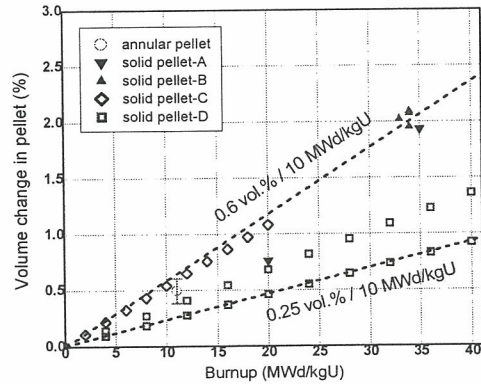


Fig. 2. Swelling rates of annular pellet and solid fuel irradiated at low temperature.

### 4. 결론

이중냉각 UO<sub>2</sub> 환형소결체의 하나로 연소시험은 OR4 조사공에서 2009년 11월 13일 착수되어 2010년 5월 1일 종료되었다. 유효연소기간은 94일이었으며, 도달한 연소도는 하단 시험봉은 10,900 MWD/kgU, 상단시험봉은 8,120 MWD/kgU 이었다. 환형소결체의 조사후시험을 수행하여 환형 UO<sub>2</sub> 소결체의 초기 연소에 따른 결정립 크기 변화, 밀도 변화 및 팽윤 등의 노내거동을 평가하였다.

### 5. 참고문헌

- [1] Y. S. Yang, D. H. Kim, J. G. Bang, H. K. Kim, K. S. Kim, and G. W. Song, "Irradiation Test of Dual-Cooled Annular Fuel Pellets," Proceedings of TOP Fuel 2009, Paris, France, Sep. 6-10, 2009.
- [2] J. G. Bang, D. H. Kim, I. S. Lim, Y. S. Tang, Y. H. Koo, H. M. Kwon, H. S. Seo, "Irradiation Test of Annular UO<sub>2</sub> Pellet in the HANARO," Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Jeju, Korea, October 21-22, 2010.
- [3] Y. S. Yang, D. H. Kim, J. G. Bang, H. M. Kwon, D. S. Kim, Y. H. Koo "Swelling Behavior of Irradiated Dual Cooled Annular Fuel Pellet," Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Gyeongju, Korea, October 27-28, 2011 (will be published).