

사용후 핵연료봉 천공시험 평가

이형권, 김도식, 서항석, 황용화, 권형문, 장정남
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
nhkleel@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후 핵연료봉에 대한 천공시험은 연료봉의 내압 및 기체량을 측정하고, 그 연료봉 내부에 충전되어 있는 핵분열기체의 성분을 분석하기 위하여 기체를 포집하는 시험이다. 시험자료는 핵연료 설계에서 열적·기계적 특성을 분석하는데 필요하다. 특히 핵연료의 수명을 연장하여 경제성을 확보하기 위한 고연소도의 핵연료에서는 더욱 중요하게 사용된다. 사용후핵연료봉의 내압은 연소도가 증가할수록 핵분열기체의 누출량이 증가하여 압력의 상승한다. 그러나 공간체적의 경우는 연소 초기에 소결체(pellet)의 고밀화(dencification)으로 증가하다가 다시 팽윤으로 인하여 감소 하는 것으로 알려져 있다. 이번 시험대상 연료는 연소도가 약 40.5 ~ 55.7 GWd/tU인 고연소도 연료봉으로 연소도 변화에 따른 연료봉 내압과 공간체적의 변화에 중점을 두어 시험을 수행하였다.

2. 본론

2.1 실험

실험방법은 Fig. 1에서와 같이 연료봉을 천공용기에 장전한 후 연료봉의 공간체적을 결정하기 위한 선행조건으로 질소가스를 이용하여 천공용기체적을 측정하였다. 그 이유는 연료봉의 공간체적은 천공전과 천공후의 천공용기체적의 차로 구하기 때문이다. 천공용기 체적측정을 완료하고, 실험에 적합한 진공도까지 도달하면 핵연료봉을 유압식편치로 천공한다. 이때 천공된 핵연료봉에서는 핵분열기체가 천공용기로 방출되어 팽창하게 된다. 어느 정도의 시간이 경과되면 천공용기 내의 압력이 평형되며, 이때 압력과 온도를 측정한다. 그리고 다음단계로 천공용기의 핵분열기체를 표준용기로 팽창시켜 압력과 온도를 재측정한다. 이러한 과정에서 측정된 데이터로부터 사용후 핵연료봉의 내압과 공간체적을 결정한다.

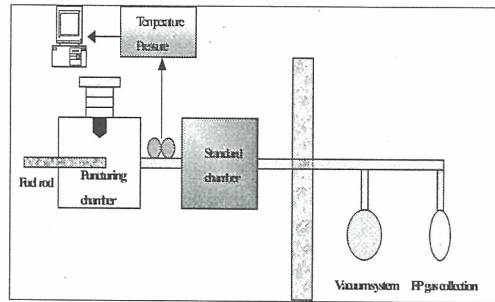


Fig. 1. Schematic diagram of fission gas puncturing device.

2.2 실험결과 및 고찰

사용후 핵연료봉에 대한 내압 및 공간체적측정 시험과 핵분열기체의 성분분석시험을 수행하였다. Table 1은 시험 연료봉에 대한 봉내압, 기체량 및 공간체적 등을 나타낸다.

Table 1. Results of puncturing test.

연료봉 No.	봉내압 (kPa)	공간체적 (cm ³)	기체량 (cm ³)	Xe/Kr	FFGR (%)	연소도 (GWd/tU)
1	3,750	10.03	376.1	6.6	1.86	51.6
2	3,635	10.21	371.1	6.7	-	48.6
3	3,792	10.10	383.0	10.2	1.51	55.7
4	3,763	10.81	406.8	6.4	1.4	55.3
5	3,365	10.65	358.3	11.3	0.6	40.5
6	3,767	10.73	404.0	9.5	1.57	53.5
7	3,767	10.45	393.5	-	-	54.3

Fig. 2는 연소도 증가에 따른 사용후 핵연료봉 내압 변화를 나타내었다. 시험결과 핵연료봉의 내압은 연소도가 증가할수록 거의 직선적으로 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 연료봉의 내압은 연소도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타낸다. 시험대상 연료봉의 헬륨가스 초기 충전압력은 2168 kPa로 연소도가 40.5 ~ 55.7 GWd/tU로

변화할 때 연료봉의 내압변화는 3365 ~ 3792 kPa로 나타났다.

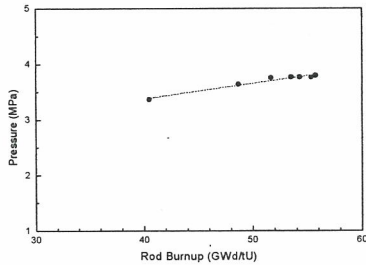


Fig. 2. Internal pressure of fuel rods as a function of rod burn-up.

연료봉의 내압 변화는 핵분열기체 누출율과 관계되며, 핵분열기체 누출율은 연소도, 펠렛의 중심온도, 피복관과 펠렛 사이의 갭 및 U^{235} 의 농축도 등에 따라서 변화한다. R. Manzel 등은 U^{235} 의 가압경수로형 핵연료의 농축도와 초기갭(initial gap)의 크기에 따라서 핵분열기체의 누출에 관한 실험을 수행하였다. U^{235} 농축도가 3.8 ~ 4.2%인 가압경수로형 핵연료봉의 갭이 215 ~ 220 μm , 180 ~ 190 μm 및 163 ~ 175 μm 일 때 핵분열기체 누출율은 갭이 가장 큰 연료봉에서 누출이 컸으며, 일반적으로 고농축 연료봉이 저농축 연료봉보다 누출율이 많았다. 그리고 U^{235} 의 농축도가 3.2%이고 갭의 크기가 190 μm 인 경우는 누출율 저연소도에서 누출율이 가장 크고 중간 연소도에서는 감소하다가 연소도가 증가할수록 다시 증가한다고 했다.^[1]

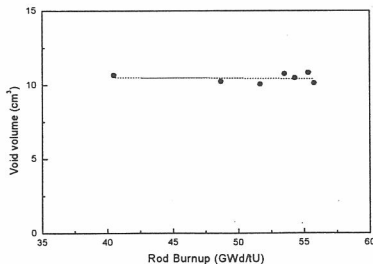


Fig. 3. Void volume of fuel rods as a function of rod burn-up.

Fig. 3은 연소도 증가에 따른 연료봉의 공간체적(void volume) 변화를 나타내었다. 일반적으로

연료봉의 공간체적은 연소 초기에는 소결체의 고밀화로 증가하다가 다시 감소하는 것으로 알려져 있다. 실제 연소도가 약 30 ~ 40 GWd/tU인 가압 경수로형 핵연료봉의 실험결과에서도 공간체적은 연소도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다.^[2] 그러나 이번 시험대상의 연료봉(40.5 ~ 55.7 GWd/tU)에서는 공간체적은 10.03 ~ 10.81 cm^3 로 거의 변화하지 않고 비슷한 값을 나타내었다 그리고 천공시험에서 포집한 핵분열기체의 성분분석결과 Xe과 Kr의 비는 6.6 ~ 11.3배로 나타났으며, 핵분열기체 누출율은 0.60~1.86 %로 나타났다.

3. 결론

가압경수로형 핵연료봉에 천공시험을 수행하였다. 시험결과 연소도가 약 40.5 ~ 55.7 GWd/tU인 연료봉에서 내압은 연소도가 증가할수록 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 그리고 공간체적은 연소도에 따라 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 핵분열기체 성분분석결과 Xe과 Kr의 비는 6.6 ~ 11.3배로 나타났으며, 핵분열기체 누출율은 0.60 ~ 1.86 %로 나타났다.

4. 참고문헌

- [1] R. MANZEL, et al., " Fission Gas Release of High Burnup Fuel", Internal Atomic Energy Agency, p63-67, 1993.
- [2] 이형권 외, " PWR 사용후 핵연료봉의 핵분열기체 평가", 한국원자력학회 추계학술 발표회 논문집, 2003.