

가압경수로형 사용후 핵연료봉 내압 및 핵분열기체량 측정

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

1. 서론

사용후핵연료봉 내압 및 핵분열기체량시험 자료는 핵연료 설계에서 열적·기계적특성을 분석하는데 기본적으로 필요한 자료이다. 특히 핵연료의 봉내압은 수명과 직결되며 요인이며, 원자력 발전의 경제성과 안전성을 확보하기 위한 고연소 핵연료에서는 더욱 중요하다. 핵연료는 연소도가 증가함에 따라 핵분열기체 누출량이 증가되며, 이로 인하여 연료봉내의 압력을 증가시키며, 원자로 안전성에 영향을 미치게 된다. 그러므로 핵연료의 수명을 연장시키고 안전성을 확보하기 위해서는 연료 설계 및 제조시 봉내압 및 기체량측정시험 자료가 필요하게 된다.

2. 실험 및 결과

가. 실험

실험은 Fig. 1에서와 같이 연료봉을 천공용기에 장전한 후 연료봉의 공간체적을 결정하기 위한 선행조건으로 질소가스를 이용하여 천공용기체적을 측정하여야 한다. 그 이유는 연료봉의 공간체적은 천공전과 천공후의 천공용기체적의 차로 구하기 때문이다. 천공용기체적 측정 후 장치내에 적절한 진공도까지 도달하면 편치로 핵연료봉을 천공한다. 이때 천공된 핵연료봉에서는 핵분열기체가 방출되어 천공용기내로 팽창하게 되며, 어느 정도의 시간이 경과되면 천공용기내의 압력과 온도가 평형을 이룬다. 그리고 다음단계로 표준용기에 핵분열기체를 팽창시켜 어느정도 시간이 지나면 압력과 온도가 안정화된다. 이러한 과정에서 측정된 데이터로부터 사용후핵연료봉의 봉내압, 공간체적 및 핵분열기체량을 결정할 수 있다.^[1]

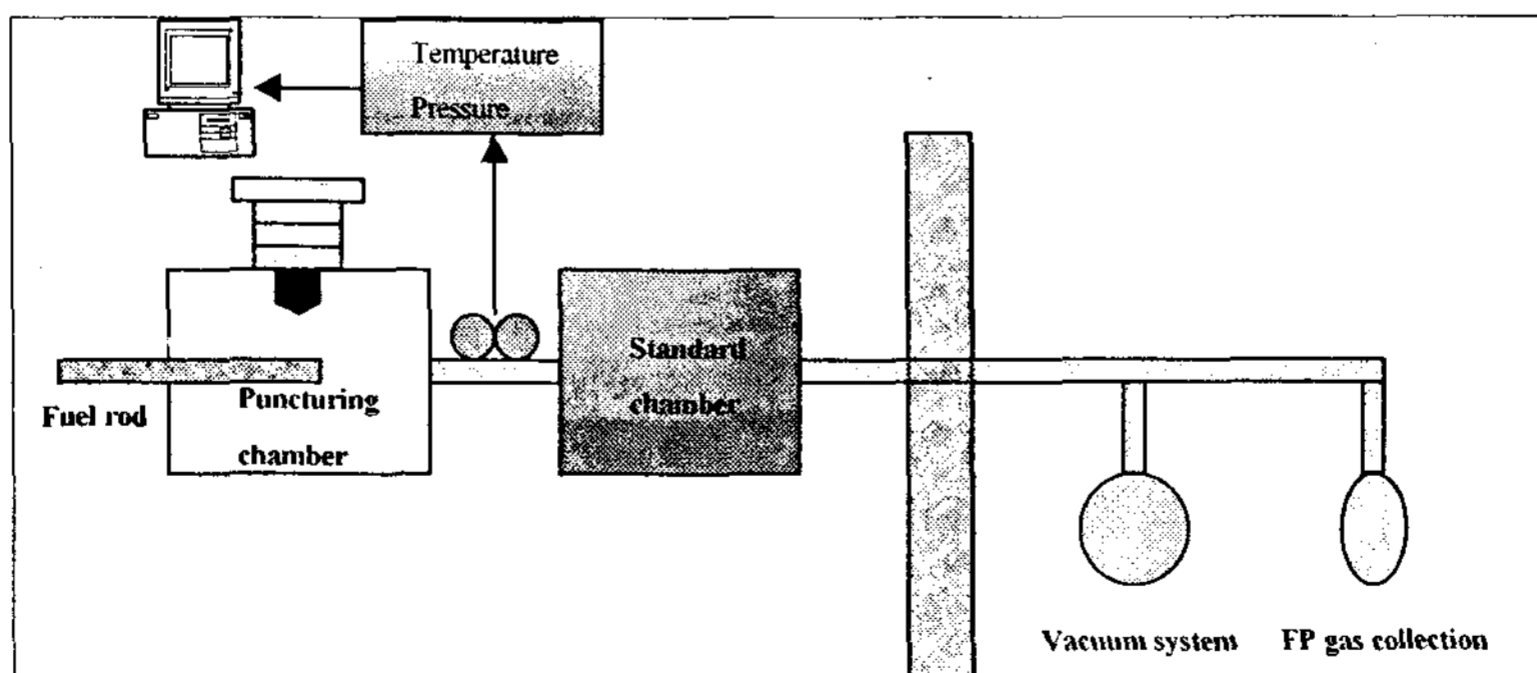


Fig. 1. Schematic diagram of fission gas puncturing device.

나. 결과 및 고찰

Table 1은 PWR 14 x14형 사용후핵연료봉에 대한 봉내압, 공간체적 및 기체량과 핵분열기체의 성분을 나타낸다.

Table 1 Results of puncturing test for PWR spent fuel rods.

연료봉 No.	연소도 (MWD/MTU)	봉내압(kPa)	공간체적(cm ³)	기체량(cm ³)	Xe(cc)	Kr(cc)	FFGR(%)
1	39,352	3,582	17.62	581.4	7.84	3.19	0.42
2	35,952	3,544	20.17	657.3	11.47	5.15	0.70
3	28,700	3,072	22.88	654.8	12.97	2.22	0.81
4	28,225	3,174	22.55	658.2		-	-
5	28,958	3,157	21.49	623.9	8.6	0.75	0.49
6	30,330	3,377	22.59	701.1	31.96	5.25	1.87

일반적으로 사용후핵연료봉의 내압은 연소도가 증가할수록 핵분열기체의 누출이 증가하여 압력이 상승하는 것으로 알려져 있다. 실험에서 연소도에 따른 연료봉내압은 연소도가 비슷한 값을 갖는 연료봉에서 거의 비슷하였으며, 연소도가 증가하면 봉내압은 증가하나 연소도가 증가한 만큼 직선적으로는 변화되지 않았다.

사용후핵연료봉의 공간체적은 연소가 진행됨에 따라 펠렛의 고밀화(densification)에 의해서 증가하다가 다시 팽윤(swelling)에 의해서 체적이 감소하게 된다. 또한 팽윤으로 인하여 핵연료봉의 피복관과 펠렛 사이의 직경방향 갭(gap)이 감소하게 된다. 공간체적의 변화는 연소도가 증가함에 따라 거의 직선적으로 감소하는 것으로 나타났다.

Xe과 Kr의 관계는 연소도가 28 ~ 39 GWD/MTU인 실험연료봉에서 2.2 ~ 11.5배로 나타났다. 핵분열기체 누출율은 연소도, 펠렛의 중심온도, 피복관과 펠렛 사이의 갭 및 U²³⁵의 농축도 등에 따라서 변화한다. R. Manzel 등은 U²³⁵의 가압경수로형 핵연료의 농축도와 초기갭(initial gap)의 크기에 따라서 핵분열기체의 누출에 관한 실험을 수행하였다. U²³⁵ 농축도가 3.8 ~ 4.2 %인 가압경수로형 핵연료봉의 갭이 215~220 μm, 180~190μm 및 163~175μm일 때 핵분열기체 누출율은 갭이 가장 큰 연료봉에서 누출이 컸으며, 일반적으로 고농축 연료봉이 저농축 연료봉보다 누출율이 많았다. 그리고 U²³⁵의 농축도가 3.2%이고 갭의 크기가 190μm인 경우는 누출을 저연소도에서 누출율이 가장 크고 중간 연소도에서는 감소하다가 연소도가 증가할수록 다시 증가한다고 했다.^[2] A. Smirnov 등은 연소도 증가에 따른 핵분열기체 누출율은 연소도가 43 GWD/MTU일 때 까지는 거의 변화가 없다가 이후부터는 직선적으로 증가한다고 했다. 이 실험에서도 핵분열기체 누출율은 이와 비슷한 경향을 보였다. 실험결과에서 누출율은 0.42 ~ 1.87 %로 계산되었으며, NRC correlation 이내인 것으로 확인되었다.

3. 결론

가압경수로형 핵연료봉을 핫셀내에서 천공하여 봉내압, 공간체적, 핵분열기체량 측정시험과 기체에 대한 성분분석시험을 수행하였다. 시험결과, 핵연료봉 내압은 연소도가 증가함에 따라 증가하였으며, 공간체적은 연소도가 증가할수록 직선적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이 실험에서 연료봉들의 핵분열기체 누출율은 0.42~1.87 %로 NRC correlation 이내로 확인되었다.

참고문헌

- [1] 이형권 외, "가압경수로 사용후핵연료봉의 핵분열기체포집장치 개발 및 모의핵연료봉을 이용한 시험평가", 한국원자력학회 춘계학술 발표회 논문집, 2000.
- [2] R. MANZEL, et al., " Fission Gas Release of High Burnup Fuel", Internal Atomic Energy Agency, p63-67, 1993.