

PWR 사용후 핵연료봉의 핵분열기체 평가

Evaluation of Released Fission Gas for PWR Spent Nuclear Fuel Rods

이형권, 홍권표, 전용범, 민덕기, 김은가, 박광준, 이은표,
양송열, 손영준, 황용화, 서항석, 엄성호, 김길수, 권형문.

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

PWR 14x14형 핵연료봉에 대한 천공시험 및 핵분열기체에 대한 성분분석을 수행하였다. 시험결과 핵연료봉 내압은 연소도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 또한 공간체적은 연소도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 핵분열기체 Xe과 Kr 비는 2.2 ~ 11.5로 나타났으며, 누출율은 0.42~1.87% 이다. 이러한 자료는 앞으로 핵연료 설계에 필요한 자료를 제공하게 될 것이다.

Abstract

Fission gas puncturing test and mass spectrometric analysis were performed in KAERI. As a result of test, the internal pressure of fuel rod increased according to the burn-up increase, and also the void volume of fuel rod decreased with the burn-up increase. Xe/Kr ratio appeared to be 2.2~11.5 and fission gas release rate was calculated to be 0.42~1.87%. These data will be supplied to the nuclear fuel designers.

1. 서론

사용후핵연료의 핵분열기체 누출시험 자료는 핵연료 설계에서 열적·기계적특성을 분석하는데 필요하다. 특히 핵연료의 경제성을 확보하기 위하여 수명을 연장하는 고연소 핵연료에서는 더욱 더 중요하다. 핵분열기체는 연소도 증가에 따라 생성량이 증가되며, 이로 인하여 연료봉내의 압력을 증가시키고, 한계점에 도달하면 피복관이 파손되어 핵연료의 기능이 상실된다. 또한 핵분열기체의 누출은 원자로 안전성에도 영향을 미치게 된다. 그러므로 핵연료의 수명을 연장시키고 안전성을 확보하기 위해서는 핵분열기체 누출 시험평가 자료가 필요하게 된다. 그리고 조사된 핵연료의 건전성 평가와 저장·관리를 위해서도 필요하게 된다.

핵분열기체 누출에 있어서 연소도, 피복관과 펠렛사이의 갭, U^{235} 농축도가 영향을 주

는 인자로 알려져 왔으며, 표준형 경수로 핵연료 누출율은 5%를 초과하지 않는다. 본 시험에서 수행한 핵연료봉은 ^{235}U 의 농축도가 3.21%인 핵연료이며, 일차적으로 사용후 핵연료의 건전성 평가에 목적을 두고 있다.

2. 실험

가. 핵연료봉의 이력

시험 연료봉은 '90년 5월에 고리 1호기 발전소로부터 수송한 G23 집합체에서 인출한 연료봉이며 핵연료봉과 소결체의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. The specification of PWR 14 x14 type fuel rods

핵연료봉		소결체	
Outside diameter	10.72 mm	Material	UO ₂ sintered
Inside diameter	9.48 mm	Pellet height	15.24 mm
Diametric gap	0.1905 mm	Outside Diameter	9.29 mm
Clad material	Zircaloy-4	Dishing radius	3.38 mm
Rod length	3,857 mm	Dishing volume	12.3 mm ³
Plenum volume	10.1 cm ³	Stack length	3,657.6 mm

나. 실험방법

실험방법은 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. 천공용기 체적 측정이 완료된 후에서 실험에 적합한 진공도까지 도달하면 핵연료봉을 유압식편치로 천공한다. 이때 천공된 핵연료봉에서는 핵분열기체가 천공용기로 방출되어 팽창하게 되며, 어느 정도의 시간이 경과되면 천공용기내의 압력이 평형을 이룬다. 그리고 다음단계로 표준용기에 핵분열기체를 팽창시키며 어느 정도의 시간이 경과되었을 때 표준용기내의 핵분열기체 압력은 안정화를 이루게 된다. 이러한 과정에서 측정된 데이터로부터 사용후핵연료봉의 봉내압, 공간체적 및 핵분열기체량을 결정할 수 있다.^[1]

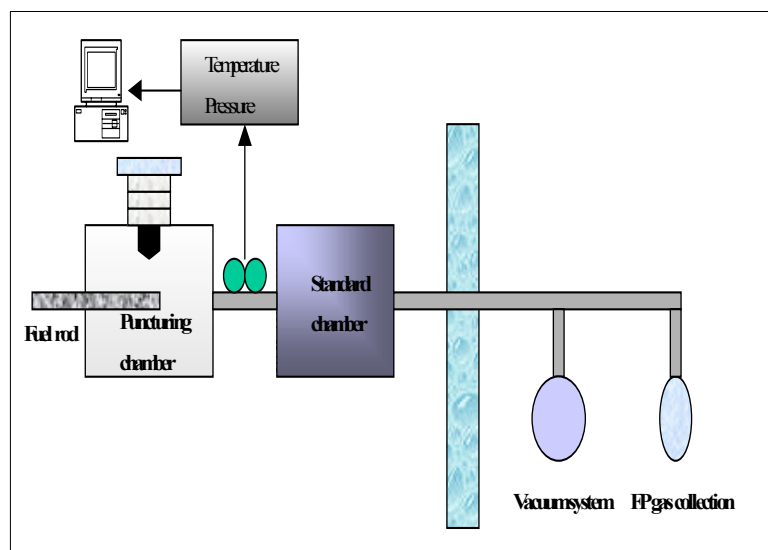


Fig. 1. Schematic diagram of fission gas puncturing device.

다. 실험결과 및 고찰

PWR 14 x14형 사용후핵연료봉에대한 천공실험과 질량분석기로 기체의 성분분석 시험을 수행하였다. Table 2는 G23 집합체에서 인출한 연료봉에 대한 봉내압, 공간체적 및 기체량과 핵분열기체의 성분을 나타낸다.

Table 2 Results of puncturing test and mass spectromeric analysis.

연료봉 No.	봉내압(kPa)	공간체적(cm^3)	기체량(cc)	Xe(cc)	Kr(cc)	FFGR(%)
G23M04	3,582	17.62	581.4	7.84	3.19	0.42
G23J11	3,544	20.17	657.3	11.47	5.15	0.70
G23B07	3,072	22.88	654.8	12.97	2.22	0.81
G23A01	3,174	22.55	658.2	-	-	-
G23C08	3,157	21.49	623.9	8.6	0.75	0.49
G23D09	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. Fig. 2는 연소도에 따른 사용후핵연료봉의 내압 변화를 나타내었다. 핵연료봉의 내압은 연소도가 비슷한 값을 갖는 연료봉에서 거의 비슷하였으며, 연소도가 증가하면 봉내압은 증가하나 연소도가 증가한 만큼 직선적으로 변화되지 않았다.

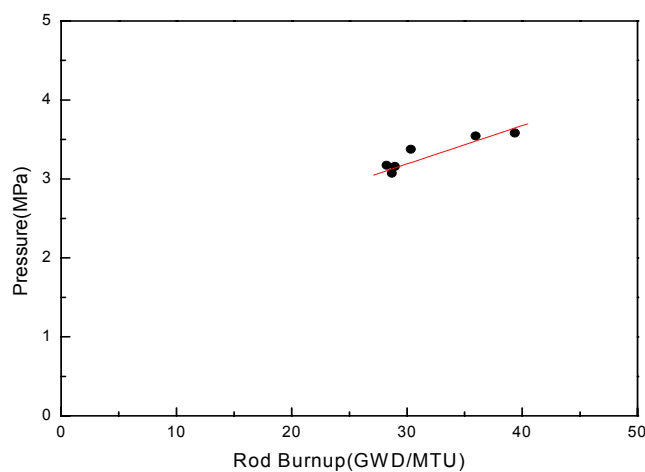


Fig. 2. Internal pressure of PWR fuel rods as a function of rod burn-up.

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. Fig. 3은 핵연료봉이 연소도에 따른 공간체적의 변화를 나타냈으며, 연소도가 증가함에 따라 공간체적의 변화는 거의 직선적으로 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 4는 Xe과 Kr의 관계를 나타낸 것으로 연소도 28 ~ 39 GWD/MTU 연료봉에서 2.2 ~ 11.5배로 나타났다.

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.

A. Smirnov 등은 연소도 증가에 따른 핵분열기체 누출율은 연소도가 43 GWD/MTU일 때 까지는 거의 변화가 없다가 이후부터는 직선적으로 증가한다고 했다.

Fig. 5는 G23 핵연료봉에 대한 핵분열기체의 누출율을 나타냈다. 연소도가 28 ~ 39 GWD/MTU일 때 누출율은 0.42 ~ 1.87%로 계산되었으며, NRC correlation 이내인 것으로 확인되었다.

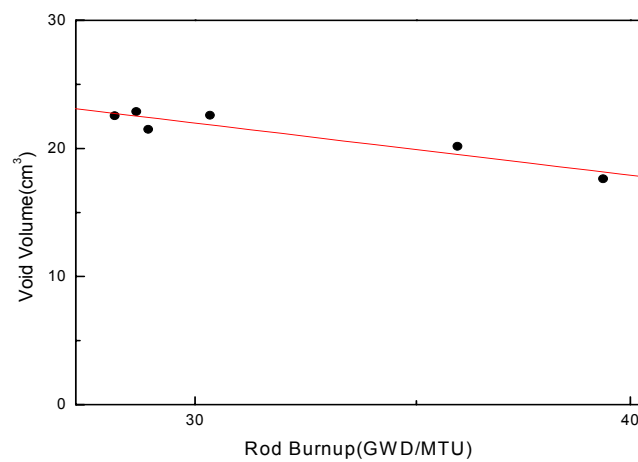


Fig. 3. Void volume change of fuel rods as a function of rod burn-up.

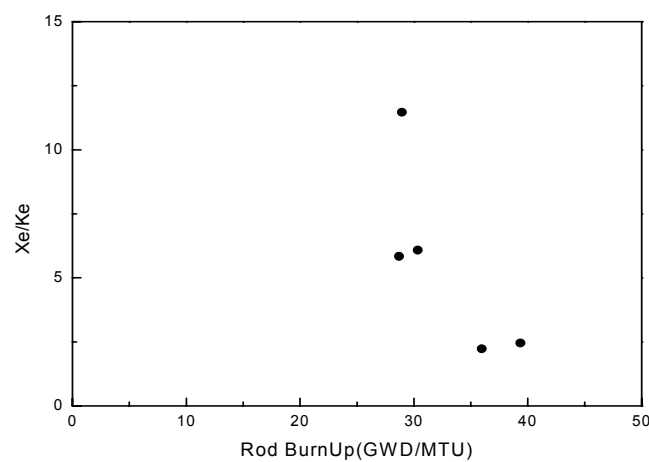


Fig. 4. Xe and Kr ratio as a function of rod burn-up.

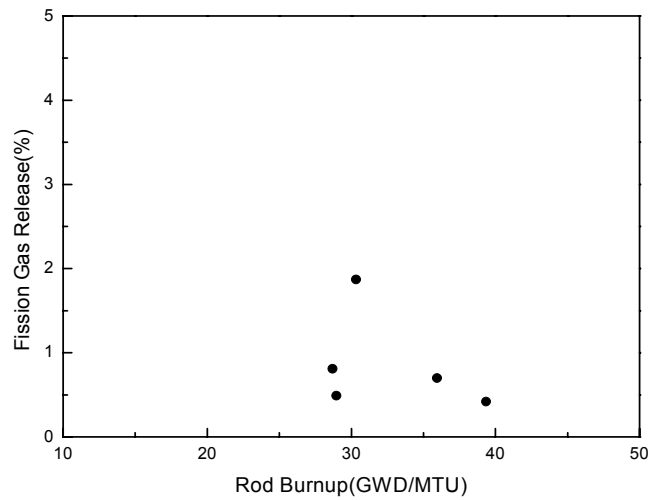


Fig. 5. Fraction fission gas release as a function of rod burn-up.

3. 결론

가압경수로형 핵연료봉을 핫셀내에서 0천공하여 봉내압, 공간체적, 핵분열기체량 측정시험과 기체에대한 성분분석시험을 수행하였다. 시험결과, 핵연료봉 내압은 연소도가 28 GWD/MTU일 때 보다 39 GWD/MTU로 증가하였을 때, 증가하는 것으로 나타났으며, 공간체적은 연소도가 증가할수록 직선적으로 감소하는 것으로 나타났다. 핵분열기체 성분분석결과 Xe과 Kr의 비가 2.2 ~11.5배로 나타났으며, 핵분열기체 누출율은 0.42~1.87%로 나타났다. 이러한 자료는 앞으로 핵연료 설계에 필요한 자료를 제공하게 될 것이다.

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.
- [3] A. SMIRNOV, et al., "Experimental Support of VVER-440 Reliability and Serviceability at High Burnup", International Seminar on WWER Reactor Fuel Performance Modeling and Experimental Support Varna(Bulgaria), p141-146, 1994.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 주관으로 추진중인 기관고유사업의 일환으로 추진하였으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.