

고연소 PWR 사용후 핵연료봉의 내압 및 핵분열기체량 측정장치 개발

Development of the Internal Pressure and Fission Gas Quantity Measuring System for High Burn-up PWR Spent Nuclear Fuel Rods

이형권, 박광준, 서기석, 박성원, 민덕기, 황용화, 조일제

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고연소 사용후 PWR 핵연료봉의 봉내압, 공간체적 및 핵분열기체량을 측정하기 위한 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 기존의 시스템에 비해 천공용기와 표준용기의 체적을 작게 함으로서 연료봉에서 천공용기로 핵분열기체를 팽창시켰을 때 평형압력 도달시간이 단축되었다. 또한 시스템내의 기체압력을 정압(positive pressure)으로 측정함으로써 시스템의 측정 정밀도를 향상시켰다. 이러한 측정시스템의 개선결과 정밀도는 모의핵연료봉을 이용한 검증시험에서 $\pm 2\%$ 이내로 나타났다.

Abstract

Fission gas measuring system for the internal pressure, void volume and gas quantity of high burn-up PWR spent nuclear fuel rods was developed in KAERI. This system has the advantage of saving the time which is reached in the equilibrium pressure by reducing the volume of the puncturing and standard chamber as compared with the existing system when the fission gas is expanded from the fuel rod to the chambers. Also the accuracy was improved by using the positive pressure in measuring the gas pressure of the system. As a result of improving the system, the system accuracy appeared to be good agreement within $\pm 2\%$ error range in the performance evaluation test using dummy fuel rods.

1. 서론

사용후핵연료봉의 봉내압, 공간체적 및 핵분열기체량 측정은 핵연료의 건전성 및 저장·관리를 위해 수행되는 매우 중요한 실험 중의 하나이며, 특히 봉내압은 핵연료봉의 잔여수명을 파악하는데 중요한 인자로 핵연료의 경제성에도 영향을 끼친다.

파괴시험에 의한 핵분열기체량 및 봉내압 측정기술은 연료봉의 종류, 천공방법 및 시스템내의 사용압력에 따라 측정방법과 정밀도가 다르다. 기존 측정장치는 장치내의 사용압력을 진공에서부터 대기압 이하의 실험을 수행하게되므로 연료봉을 천공하였을 때 천공용기에 핵분열기체가 팽창되어 평형압력 도달시간이 늦어진다. 이러한 이유는 사용후핵연료봉의 소결체 팽윤으로 인한

피복관과의 결합으로 기체의 유동성을 감소시키기 때문이다.^[1-3] 그리고 압력측정에서도 진공압력을 측정하므로 압력측정정밀도가 낮아 장치의 정밀도가 낮은 것이 일반적이다.

새로이 개발된 장치는 시스템내의 사용압력을 정압으로 유지하여 핵분열기체의 유동성감소로 인한 압력평형시간 단축, 압력측정정밀도 개선 및 실험방법 단순화 등 기존장치의 단점을 보완하고 개선시켰을 뿐만 아니라 고연소 핵연료봉 실험에 적합하게 개발하였다. 고연소 사용후핵연료봉 실험에 적합하게 하기 위해서 천공용기와 표준용기의 체적을 기존용기의 체적보다 약 1/4로 축소하였다. 또한 측정장치의 측정정밀도를 향상시키기 위해서 천공용기내의 압력변화에 따른 천공용기의 체적 검·교정을 수행하였다. 이와 같이 기존 장치의 단점을 보완하고 개선시킨 고연소 사용후핵연료봉의 내압 및 핵분열기체량측정장치의 개발은 앞으로 핵연료 설계 및 신형핵연료 개발에 필요한 기본자료생산에 기여할 것으로 예상된다.

2. 장치 설명

가. 장치의 구성

사용후핵연료봉의 내압 및 핵분열기체량측정장치의 구성은 핵분열기체를 팽창시키는 천공용기와 표준용기, 핵연료봉을 천공하는 유압식천공장치, 온도, 압력 및 진공도를 측정하는 계측장치, 시료포집장치 및 진공장치 등으로 되어있으며 주요사양은 다음과 같다.

1) 천공용기

연료봉홀더, 벨로우즈 및 연결배관 등으로 구성된 내부공간을 갖는 용기이다. 천공용기의 체적은 약 175cm³ 이며 핵연료봉에서 핵분열기체를 1차로 팽창시키는 역할을 한다. 천공용기의 벨로우즈는 압력에 따라 체적이 변화하여 천공용기의 체적도 변화하므로 압력변화에 따른 천공용기의 체적을 확인하여야 한다.

2) 표준용기

천공용기에 들어있는 핵분열기체를 2차로 팽창시키고 체적의 기준이 될 수 있도록 정밀하게 검·교정된 용기이다.

3) 천공장치

천공장치는 약 70 MPa의 압력을 갖는 유압펌프, 펀치 및 유압실린더로 구성된 핵연료봉을 천공하는 장치를 말하며 최대 천공력은 5 x 10⁴ Newton 이다.

4) 계측기

계측기에는 장치의 내부를 진공도를 표시하는 진공계가 글로브박스 내부에 있는 터보펌프 진단에 설치되어 있으며, 천공용기 내부에 핵분열기체의 온도와 압력을 측정하는 T-type의 온도계와 절대압력계가 설치되어 있다.

5) 시료포집장치

핵분열기체의 화학성분을 분석하기 위해 핵분열기체의 시료를 채취하는 장치로 약 20cm³의 체적을 갖는 두 개의 포집병과 다이아후렘프로 구성되어 있다.

6) 진공장치

진공장치는 1차 진공장치와 2차 진공장치로 구분되어 지며 1차 진공장치에는 기계식 로타리펌프, 2차 진공장치에는 터보펌프로 구성되어있다.

7) 글로브박스

글로브박스 내부에는 핵분열기체의 시료 포집 및 장치 유지보수를 실시할 때 핵분열기체 또는 방사능 오염물질의 누설로 인한 방사선오염을 방지하기 위하여 터보펌프, 다이아후렘프로, 시료포집장치 등의 구성품이 설치되어 있다.

그밖에도 천공용기의 체적 검·교정과 핵분열기체포집장치의 내부를 퍼지시키는 질소가스 공급장치가 있다. 안전장치로는 터보펌프를 보호하기 위한 인터록장치와 핵분열기체의 시료를 포집할 때 과도한 압력을 방지하기 위한 진공용압력스위치가 있으며 장치의 개념도는 그림 1과 같다.

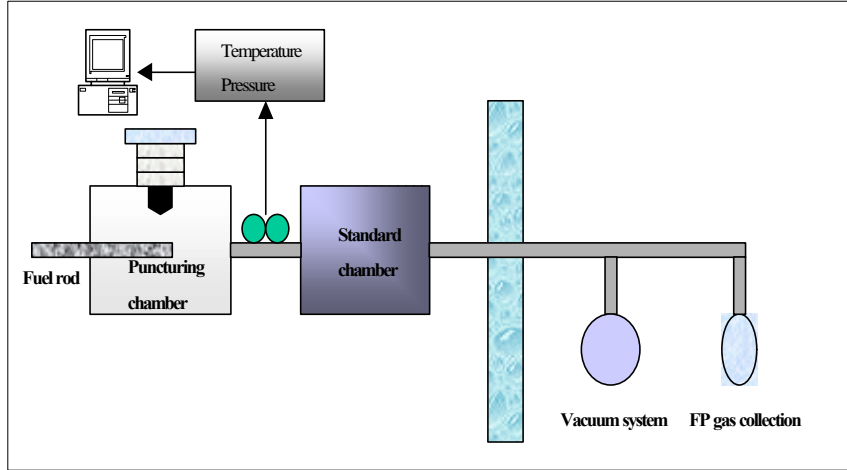


그림 1. 핵분열기체포집장치의 개념도

나. 실험 방법

실험방법은 그림 1에서 연료봉을 천공용기에 장전한 후 진공장치를 이용하여 장치의 내부를 진공시키며, 사용후핵연료봉을 천공하기 전에 정밀한 실험의 선행조건으로 천공용기의 체적을 검·교정하여야 한다. 천공용기는 연료봉홀더 배관 벨로우즈 및 각종 부품으로 구성되어 있어 정확한 체적을 알 수가 없다. 또한 벨로우즈가 부착되어 있으므로 천공용기내의 압력에 따라 천공용기의 체적이 변화하게 된다. 그러므로 정밀한 천공용기의 체적을 알기 위해서는 핵연료봉이 장전된 상태에서 질소가스를 이용하여 압력변화에 따른 천공용기의 체적변화를 확인하여야 한다.

천공용기의 검·교정이 완료된 후에는 장치 내부를 실험에 적합한 진공도까지 진공을 완료한 후에 핵연료봉을 유압식펀치의 의해서 천공하게 된다. 이때 천공된 사용후핵연료봉에서는 핵분열기체가 천공용기로 방출되어 팽창하게 된다. 어느 정도의 시간이 경과되면 천공용기내의 압력이 평형을 이룬다. 그리고 다음단계로 표준용기의 밸브를 열어 핵분열기체를 팽창시키며 어느 정도의 시간이 지났을 때 표준용기내의 핵분열기체의 압력은 안정화를 이루게 된다. 이러한 과정에서 측정된 천공용기와 표준용기에서의 평형온도와 압력데이터로부터 사용후핵연료봉의 봉내압, 공간체적 및 핵분열기체량을 결정할 수 있다.^[4]

사용후핵연료봉의 공간체적은 핵연료봉을 천공하였을 때의 천공용기의 체적과 핵연료봉을 천공하기 전에 질소가스를 이용한 천공용기의 차이로 결정할 수 있으며 실험관계식은 다음과 같다.

$$V_n = \frac{V_s P_{n2} T_{n1}}{P_{n1} T_{n2} - P_{n2} T_{n1}} \quad (1)$$

$$V_t = \frac{V_s P_2 T_1}{P_1 T_2 - P_2 T_1} \quad (2)$$

$$V_f = V_t - V_n \quad (3)$$

$$P_f = \frac{V_T \times P_1 \times T_f}{V_f \times T_1} \quad (4)$$

$$V_a = \frac{(P_1 \times V_T) \times 273}{P_{STP} \times T_1} \quad (5)$$

V_n : 질소가스를 이용하여 측정된 천공용기 체적(cm^3)

- T_{n1} : 천공용기에서 질소가스의 평형온도(K)
- T_{n2} : 표준용기에 질소가스를 팽창시켰을 때 질소가스의 평형온도(K)
- P_{n1} : 천공용기에서 질소가스의 평형압력(kPa)
- P_{n2} : 표준용기에서 질소가스를 팽창시켰을 때 질소가스의 평형압력(kPa)
- V_t : 핵분열기체를 이용하여 측정한 천공용기의 체적(cm^3)
- V_f : 연료봉의 공간체적(cm^3)
- T_1 : 천공용기에서 핵분열기체의 온도(K)
- T_2 : 표준용기에 핵분열기체를 팽창시켰을 때 핵분열기체의 평형온도(K)
- T_f : 연료봉에서 핵분열기체의 온도(K)
- P_1 : 천공용기에서 핵분열기체의 압력(kPa)
- P_2 : 표준용기에서 핵분열기체를 팽창시켰을 때 핵분열기체의 평형압력(kPa)
- P_f : 연료봉의 내압(kPa)
- V_a : 핵분열기체량(cm^3)

3. 장치의 정밀도 검증시험 및 결과

장치의 정밀도를 확인하기 위하여 모의핵연료봉을 이용한 측정정밀도 검증시험을 수행하였다. 정밀도 검증시험에 앞서 보다 정밀한 시험을 수행하기 위한 선행조건으로 가압경수로형 모의핵연료봉(PWR 14x14, PWR 17x17)을 이용하여 천공용기 내에서 압력변화에 따른 천공용기의 체적변화시험을 수행하였다. 그림 2는 천공용기에서 압력변화에 따른 천공용기의 체적변화를 나타낸다. 천공용기내의 압력을 160 kPa에서부터 500 kPa까지 약 340 kPa의 압력변화를 주었을 때 천공용기의 체적은 약 5 cm^3 가 증가하여 압력변화에 따른 천공용기의 체적변형율은 약 1.5 % 이내 인 것으로 나타났다.

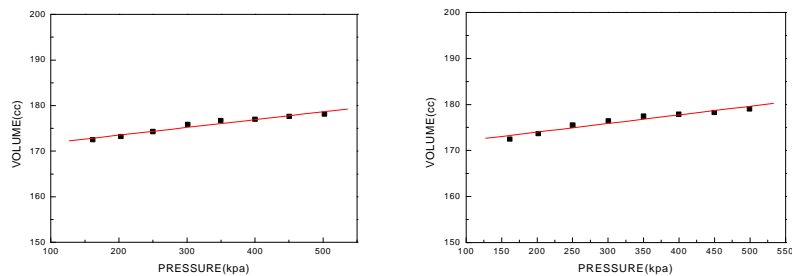


그림 2. 압력변화에 따른 천공용기의 체적변화[PWR 14x14(좌), PWR 17x17(우)]

새로이 개발된 고연소 핵연료봉의 내압 및 핵분열기체량측정장치의 측정정밀도를 검증하기 위하여 약 540~780 cm^3 의 기체량을 갖는 PWR 14x14형의 모의 연료봉 9개와 약 470~670 cm^3 의 기체량을 갖는 PWR 17x17형 모의연료봉 9개를 대상으로 측정정밀도 검증시험을 수행하였다. 그 결과 PWR 14x14형 모의연료봉에 대한 측정정밀도는 기체량을 기준하여 투입기체량과 측정기체량을 비교하였을 때 측정오차는 0.1~0.9 % 범위이며, PWR 17x17형은 0.1~1.4 % 이내로 나타났다. 장치의 측정정밀도는 총 18개의 모의연료봉시험을 수행하여 ± 2 % 이내로 확인되었으며 표 1과 2는 모의연료봉을 이용한 장치의 측정정밀도 검증시험결과를 나타냈다.

Table 1. PWR 14 x14형 모의연료봉을 이용한 장치의 정밀도 검증시험 결과

No.	Calculated Void volume (cm ³)	Measured Void volume (cm ³)	Inserted gas pressure (kg/cm ²)	Measured gas pressure (kg/cm ²)	Inserted gas volume (cm ³)STP	Measured gas volume (cm ³)STP	Error (%)
1	29.22	29.05	19.96	20.25	536.10	537.83	+0.3
2	29.64	28.82	19.96	20.60	543.81	542.43	-0.3
3	29.61	28.75	20.26	20.81	551.42	546.63	-0.9
4	35.71	34.68	19.96	20.52	655.17	653.03	-0.3
5	35.30	34.55	19.96	20.52	647.65	649.71	+0.3
6	35.35	34.39	20.06	20.55	651.82	645.91	-0.9
7	42.57	41.62	20.06	20.67	784.95	788.38	+0.4
8	42.65	42.65	19.96	20.07	782.50	783.12	+0.1
9	42.63	41.50	19.96	20.68	782.14	784.40	+0.3

Table 2. PWR 17 x17형 모의연료봉을 이용한 장치의 정밀도 검증시험 결과

No.	Calculated Void volume (cm ³)	Measured Void volume (cm ³)	Inserted gas pressure (kg/cm ²)	Measured gas pressure (kg/cm ²)	Inserted gas volume (cm ³)STP	Measured gas volume (cm ³)STP	Error (%)
1	25.84	25.75	20.26	20.24	481.21	478.42	-0.6
2	25.73	25.90	20.06	19.89	474.43	472.73	-0.4
3	25.73	25.79	19.96	19.98	472.07	472.69	+0.1
4	30.05	29.80	20.16	20.44	556.85	554.47	-0.4
5	30.26	29.50	20.16	20.60	560.75	553.00	-1.4
6	30.12	29.48	20.26	20.68	560.92	554.77	-1.1
7	36.38	35.96	20.06	20.41	670.81	676.90	+0.9
8	36.25	35.76	19.96	20.41	665.08	670.86	+0.9
9	36.31	35.85	20.06	20.48	669.52	674.38	+0.7

4. 결론

새로이 개발된 장치는 기존의 측정장치에 비해 천공용기 및 표준용기의 체적을 줄임으로서 평형압력 도달시간을 단축하였다.

장치의 정밀도를 검증하기 위한 선행조건으로 천공용기체적을 검·교정을 수행하였다. 그 결과 천공용기 내에서 기체의 압력을 160 kPa 에서부터 500 kPa 까지 약 340 kPa증가시켰을 때 5 cm³가 변화하여 천공용기의 체적변화율이 1.5% 이내인 것을 확인하였다.

장치의 측정정밀도 검증시험은 기체량을 기준하였을 때 정밀도가 ± 2% 이내 인 것이 확인되었다. 이 장치는 핵연료봉에 대한 건전성 평가 및 저장관리를 위해 보다 정확한 기본자료를 생산할 수 있는 실험기기로 활용될 것이며, 앞으로 핵연료 고연소에 따른 핵연료봉 안전성 및 건정성 검증실험에도 한층 더 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] YAMAHARA, T., et al, " Development of Post-Irradiation Examination Techniques at the Reactor Fuel Examination facility", Tokai Research Establishment, JAERI p43-45.
- [2] IAEA, "Guide Book on Non-destructive Examination of Water Reactor Fuel", Technical Rport Series No. 322, p64, 1991.
- [3] 이형권 외, " 핵분열생성기체 측정기술", KAERI/TR-958/98, 한국원자력연구소, 4p,1998.
- [4] 이형권 외, " 가압경수로 사용후핵연료봉의 핵분열기체포집장치 개발 및 모의핵연료봉을 이용한 시험평가", 한국원자력학회 춘계학술 발표회 논문집, 2000.

*** 본 연구가 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.**