

가압경수로 사용후 핵연료봉의 핵분열기체포집장치 개발 및 모의핵연료봉을 이용한 시험평가

Development of Fission Gas Sampling System for PWR Spent Nuclear Fuel Rods and Test Evaluation Using Dummy Nuclear Fuel Rods

이형권, 박광준, 서기석, 박성원, 민덕기, 황용화, 조일제

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

사용후 PWR 핵연료봉내의 핵분열기체량과 봉내압을 측정하기 위한 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 핵연료봉에서 천공용기와 표준용기에 핵분열기체를 팽창시켰을 때 용기내의 평형압력을 정압(positive pressure)으로 유지시킴으로써 기존의 시스템에 비해 기체의 평형압력 도달시간을 단축하고, 또한 압력측정 정밀도를 향상시킨 것이 특징이다. 모의핵연료봉을 이용한 비방사능구역 성능시험결과 시스템은 정밀도는 $\pm 5\%$ 이내로 나타났다.

Abstract

Fission gas sampling system for measuring the fission gas quantity and internal pressure of PWR spent nuclear fuel rods was developed in KAERI. This system has the advantages of reducing the time required in equilibrium pressure by using as positive pressure in the chamber when the fission gas is expanded from the fuel rod to the puncturing and standard chamber, also improving the accuracy in measuring the fuel rod internal pressure. As a results of performance evaluation test using several dummy fuel rods in the inactive region, the accuracy of measuring system appeared to be good agreement within $\pm 5\%$ error range.

1. 서론

사용후핵연료봉의 봉내압, 공간체적 및 핵분열기체량 측정은 핵연료의 건전성 및 저장·관리를 위해 매우 중요한 실험 중의 하나이며, 특히 봉내압은 핵연료봉의 잔여수명을 파악하는데 중요한 인자가 된다.

핵분열기체의 측정기술은 비파괴시험과 파괴시험으로 나눌 수 있다. 비파괴시험은 파괴시험에 비하여 정밀도는 다소 감소하나 현장에서 직접 측정할 수 있는 장점이 있다.

파괴시험에 의한 핵분열기체 측정기술은 연료봉의 종류, 천공방법에 따라 약간씩 다르나 진공장치를 이용한 원리는 같다. 일반적으로 실험연료봉이나 CANDU형 연료봉은 핵분열기체량이 적으므로 고진공도가 요구되나 가압경수로형 연료봉은 핵분열기체량이 비교적 많으므로 진공도가

0.1 Pa 정도가 요구된다.

기존장치는 천공용기의 체적을 핵분열기체량보다 크게 만들어 핵연료봉에서 천공용기에 핵분열기체를 팽창시켰을 때 기체의 평형압력이 진공상태로 유지하게 된다. 이 경우 핵분열기체의 유동성 저하로 인하여 평형압력 도달 시간이 늦어진다. 특히 고연소핵연료봉의 경우는 팽윤으로 인한 소결체와 피복관의 결합현상으로 유동성이 더욱 감소하며, 압력측정도 진공압력을 측정하므로 정밀도가 저하된다.^[1-3]

새로이 개발된 장치는 이러한 단점을 보완하고 정밀도를 개선시키기 위하여 천공용기의 체적을 핵분열기체량보다 작게 만들고, 천공용기, 표준용기 및 진공부품의 사용압력을 진공에서부터 대기압 이상까지 사용할 수 있도록 설계하였다.

2. 장치 설명

가. 주요 장치의 구성

핵분열기체포집장치는 유압식 천공장치, 천공용기, 표준용기, 진공장치, 시료포집장치 및 글로브박스 등으로 구성되어있으며, 실험정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 천공장치, 계측기, 천공용기 및 표준용기 등의 주요 사양은 다음과 같다.

천공장치

- 벨로우즈 : 두께 0.12 mm, 용접식
- 실린더 : 크기 50 mm, stroke 75 mm
- 최대유압력 : 70 Mpa
- 편치 : 초경합금, 중심각 40 °

천공용기

- 체적 : 약 270 cm³
- 보조용기 체적 : 약 100 cm³

표준용기(검 · 교정)

- 체적 : 101.27 cm³

계측기

- 온도계 : T type
- 압력계 : 0 ~ 0.6 Mpa_{abs}

진공시스템

- 로타리기계식 펌프, 터보펌프
- 진공밸브: 고진공용(1x10⁻⁹ Pa~600,000 Pa), 전자식(1x10⁻⁷~0.1 Mpa_{abs})

핫셀 외부장치로는 글로브박스과 진공장치가 있다. 글로브박스 내부에는 시료포집장치 인 다이아후램펌프, 시료포집병 및 압력스위치가 설치되어 있으며, 핵분열기체시료를 포집하거나 유지보수를 수행할 때 방사선오염이 작업구역에 확산되지 않는 역할을 한다. 또한 핵분열기체를 포집할 때 다이아후램펌프의 과도한 압력으로 인한 핵분열기체의 누출을 방지하기 위하여 다이아후램펌프 출구측에 압력스위치를 설치하여 압력스위치의 설정압력에 따라서 작동하도록 되어있다.

나. 연료봉의 천공

핵연료봉의 천공방법에는 드릴링, 유압식 또는 기계식에 의한 편칭 및 레이저에 의한 방법 등이 있다. 드릴링에 의한 천공은 드릴축이 회전 또는 하강하면서 연료봉을 천공하게 되므로 장시간 사용할 경우 축 부분의 기밀을 유지하기가 곤란하며, 밀폐체가 자성유(magnetic oil)를 사용하므로 대기압 이하의 압력에서 사용하는 것이 바람직하다. 레이저에 의한 방법은 드릴링 또는 편칭에 의해 천공할 때와 같이 동적 밀폐(dynamic seal)가 필요 없고, 천공홀을 다시 용접할 수 있으며, 연료봉을 운반 또는 저장할 때 오염이 확산되지 않는 이점 있으나 매우 고가이다.^[1,4] 그

러므로 본 연구에서는 가격이 비교적 저렴하면서도 동적밀폐가 요구되지 않아 밀폐성능이 완전한 유압식 펀치에 의한 천공방법을 이용하였으며, 천공장치는 그림 1과 같다.

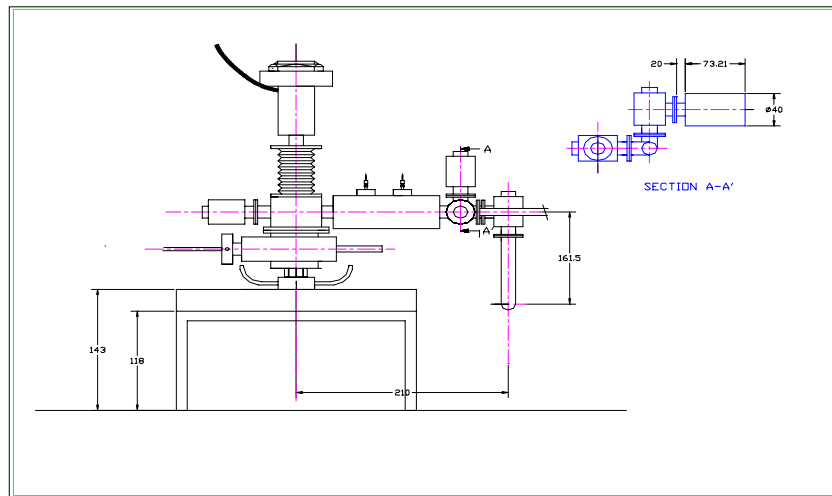


Fig. 1. 천공장치의 조립도

유압식 천공장치는 동적밀폐가 요구되는 단점을 보완하기 위하여 유압실린더 로드하부에 고진공용 후렌지를 부착하고, 그 하단에 펀치와 펀치홀더가 내장된 벨로우즈를 부착함으로써 완전한 밀폐를 이루도록 하였다. 또한 기존의 천공장치에서는 연료봉을 연료봉홀더에 삽입하였을 때 연료봉홀더 내경과 연료봉에 간극이 존재하므로 천공하였을 때 천공력이 연료봉 패키지에 전달되어 변형으로 인한 누설가능성이 크다. 그러므로 이러한 단점을 보완하기 위하여 홀더 내경을 연료봉과 접선이 되도록 "V"로 설계하여 충격력이 연료봉홀더 본체에 흡수되도록 하였다.

장치개발과 동시에 핵연료봉의 천공조건을 수립하기 위하여 핵연료 피복관에 대한 천공거동에 대한 해석 및 시험을 수행하였다. 미조사 피복관에 대한 천공조건은 천공펀치의 중심각을 40° 하였을 때 천공깊이 2.5 mm 이상, 천공력 771 newton 이상의 힘이 필요하다.^[5]

다. 실험 방법

연료봉에 들어 있는 핵분열기체의 성분은 대부분 헬륨가스로 구성되어 있어 낮은 원자번호를 갖는 O₂, N₂ 및 공기 등과 같이 이상기체(ideal gas)로 취급할 수 있다. 그러므로 기체상태방정식을 이용하여 봉내압, 공간체적 및 핵분열기체량을 결정할 수 있다. 그림 2는 천공용기, 표준용기 및 진공시스템을 이용한 핵분열기체포집장치의 개략도를 도시하였다.

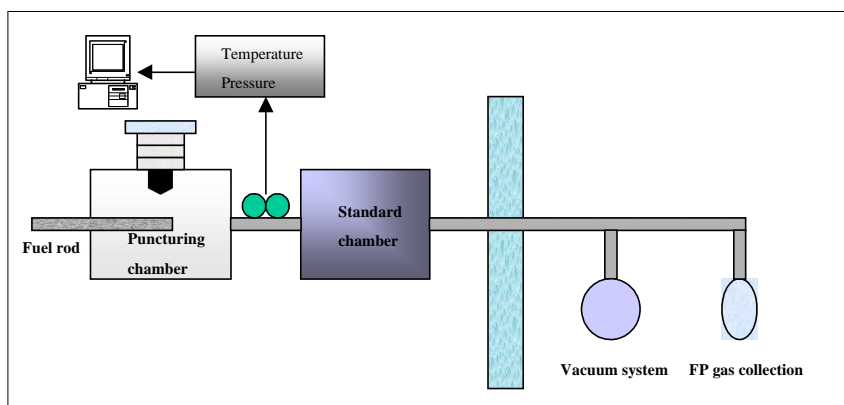


Fig. 2. 핵분열기체포집장치의 개념도

실험방법은 그림 2에서 연료봉을 천공하기 전에 질소가스를 이용하여 표준용기에 팽창시켜 천공용기의 체적을 결정한다. 이후 연료봉을 천공하여 핵분열기체를 천공용기에 팽창시키고, 다시 표준용기에 팽창시킴으로써 핵분열기체를 이용한 천공용기의 체적을 결정한다. 이때 핵분열기체의 천공체적은 질소가스를 이용한 천공용기의 체적과 연료봉의 공간체적의 합이 된다. 그리고 핵연료봉에서 천공용기로, 천공용기에서 표준용기로 핵분열기체를 팽창시키는 과정에서 측정된 평형온도와 압력에 의해서 봉내압과 핵분열기체량을 결정할 수 있으며, 관계식은 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 측정된 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. 성능시험 및 결과

시스템의 성능시험을 수행하기 앞서 천공용기 체적의 검·교정이 선행되어야 한다. 천공용기에는 벨로우즈가 포함되어 있으므로 기체의 압력이 증가함에 따라 천공용기의 체적이 변화하기 때문이다. 그림 3은 압력변화에 대한 천공용기의 체적변화 시험을 나타냈으며, 약 150 ~ 300 kPa 압력범위에서 10 kPa 단계씩 증가시켜 수행하였다. 압력변화에 따른 천공용기의 체적변화는 완만한 포물선형태이며, 150 kPa의 압력을 증가시켰을 때 약 44 cm^3 의 체적이 증가하였다.

새로 개발된 핵분열기체포집장치의 정밀도를 검증하기 위하여 약 380~520 cm^3 의 기체량을 갖는 10개의 모의연료봉을 제작하여 성능시험을 수행하였다. 실험결과는 기체량을 기준하였을 때 표 1

과 같이 측정값이 기준값 보다 대부분 약간 높게 나타났다.

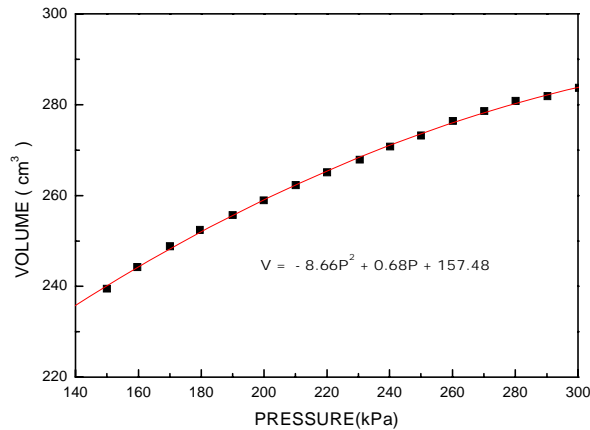


Fig. 3. 압력변화에 따른 천공용기의 체적

장치에 대한 측정정밀도는 기체량을 기준하였을 때 10개의 모의연료봉(PWR 16x16 type) 에 대한 실험 오차분포는 -0.01 ~ 4.3.% 이내로 최대 ± 5% 이내 이었으므로 측정오차가 ± 10% 이내인 기존장치보다 우수한 것으로 확인되었다.

Table 1. 모의연료봉을 이용한 장치의 성능실험 결과

No.	Calculated Void volume(cm³)	Measured Void volume (cm³)	Inserted gas pressure (kg/cm²)	Measured gas pressure (kg/cm²)	Inserted gas volume (cm³)STP	Measured gas volume (cm³)STP	Error (%)
1	15.43	16.75	27.17	24.91	384.13	395.51	+ 3.0
2	15.38	16.81	27.17	24.29	382.89	384.38	+ 0.4
3	15.41	16.54	27.17	24.72	383.63	383.57	-0.01
4	17.24	17.43	27.17	26.29	429.19	429.89	+ 0.2
5	17.31	18.45	27.17	25.32	430.94	441.29	+ 2.4
6	18.96	18.42	27.17	27.74	472.01	477.72	+ 1.2
7	19.28	20.28	27.17	25.71	479.98	485.81	+ 1.2
8	20.75	21.87	27.17	26.18	516.56	538.99	+ 4.3
9	20.71	22.13	27.17	25.58	515.58	524.84	+ 1.8
10	20.73	21.16	27.17	26.77	516.07	529.59	+ 2.6

4. 결론

새로이 개발된 핵분열기체포집장치의 성능검증시험을 수행하기 위한 선행조건으로 천공용기 체적을 검 · 교정하였다. 천공용기의 체적변화는 천공용기 내에서 기체의 압력을 150 kPa 에서부터 300 kPa 까지 증가시켰을 때 44 cm³ 가 증가됨을 확인하였다.

모의핵연료봉을 이용한 장치의 성능검증은 기체량을 기준하였을 때 정밀도가 ± 5% 이내로 나타났다. 이와 관련하여 사용후 핵연료봉의 조사후시험에 대한 건전성을 파악하는데 신뢰성을 한층 더 높일 수 있을 것이다. 또한 핵분열기체포집장치에 대한 국내 제조기술을 축적함으로써 기술지원 또는 수입대체 효과를 기대할 수 있다.

참고문헌

- [1] IAEA, "Guide Book on Non-destructive Examination of Water Reactor Fuel", Technical Report Series No. 322, p64, 1991.
- [2] 이형권 외, " 핵분열생성기체 측정기술", KAERI/TR-958/98, 한국원자력연구소, 1998.
- [3] YAMAHARA, T., et al, " Development of Post-Irradiation Examination Techniques at the Reactor Fuel Examination facility", Tokai Research Establishment, JAERI p43-45.
- [4] WISNER, R. S., " Hot Fuel Examination Facility North(HFEF/NORTH) Fuel Element Plenum Puncturing and Gas Sampling System", Proc. 36th Conference on Remote Control Systems Technology, Vol. 2, P69, 1988.
- [5] 서기석 외, " 핵연료 피복관의 천공거동에 대한 해석 및 실험 평가", 한국원자력학회 춘계학술 발표회 논문집, 2000.

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