

가압 경수로형 핵연료 봉내압 측정장치의 정밀도 평가

이형권*, 김도식, 서항석, 권형문, 장정남

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*nhklee1@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료의 봉내압 측정시험에서 생산된 시험 자료는 원자로의 핵연료 안전과 사용후핵연료의 저장을 위한 중요한 자료로 활용된다. 핫셀에서 수행되는 여러 가지 조사후시험 중에서 특히 봉내압 시험은 핵연료의 수명과 안전성을 결정하는데 가장 비중이 큰 중요한 시험자료이다. 그러므로 시험에 앞서 장비의 소급성 유지는 물론 시험값이 어느 정도 오차 범위 안에 속하지는 확인하기 위하여 시험 장치에 대한 정밀도 평가가 필요하다. 대부분의 사용후핵연료를 시험하는 장치들은 시험정밀도를 평가하는데 많은 제약이 따른다. 시험장비들이 방사선 구역에 설치되어 있기 때문이다. 장비를 교정하기 위하여 외부로 반출이 곤란하다. 그러므로 대부분의 조사후시험장비의 교정은 자체적으로 수행된다. 핵연료 봉내압 측정장치의 계측기 교정은 외부 교정을 수행한 계측기와 핫셀 내에 설치되어 있는 계측기와 서로 비교하여 간접교정을 수행하고 있다. 그리고 시험장치의 소급성을 확보하더라도 시험에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는 그 장치의 측정 정밀도가 얼마인가를 확인 또는 검증할 필요성이 있다. 핵연료 봉내압장치 측정장치의 정밀도를 확인하기 위해서는 그 값을 알고 있는 표준봉을 제작하여 시험값과 비교하여 장치의 오차를 확인하고, 시험값에 불확도를 추정하여야 한다.

2. 본론

2.1 시험 방법

시험 대상 핵연료의 봉내압 및 기체량과 유사한 모의표준연료봉을 제작한다. 이번 정밀도시험을 위한 모의표준연료봉의 제작조건은 가압 경수로형 핵연료 연료봉과(PWR 14 x 14 형식) 비슷한 기체량과 압력을 충전하였다[1].

장치의 정밀도 측정을 위한 시험방법은 일반 시험방법과 동일하다. 우선 시험 전에 정확한 천공용 기체적을 파악하기 위하여 각 압력별 천공용기 체적을 측정하게 된다. 그 이유는 천공용기체적을 구

성하는 부품에 벨로우즈가 포함되어 있어 기체의 압력변화에 따라 천공용기의 체적이 변화하기 때문이다. 천공용기의 체적측정이 완료되면 장치의 내부를 시험조건에 적합한 진공도를 유지시키고 표준봉을 천공하게 된다. 그러면 천공용기에 표준연료봉 내부에 충전되어 있던 기체가 방출되어 천공용기에 인입되며 어느 정도 시간이 지나면 표준용기와 천공용기의 압력이 평형을 이루게 된다. 이때 압력과 온도를 측정한다. 그 다음으로 표준용기의 밸브를 개방하면 표준연료봉과 천공용기 속에 들어 있던 기체가 표준용기로 방출되어 다시 압력 평형을 이루게 된다. 여기서 다시 압력과 온도를 측정한다. 그리고 계산식에 의하여 표준연료봉의 내압, 공간체적 및 기체량을 도출한다.

2.2 연료의 봉내압 측정실험

사용후핵연료봉 내압측정장치의 측정정밀도를 평가하기 위하여 가압 경수로형 모의 핵연료표준봉 6개를 시험하였다. 각 연료봉에 충전된 기체의 압력은 약 1,950 kPa 정도이며 공간체적은 29.2~35.4 mL이다. Table 1은 모의연료봉 내압 및 공간체적 측정 시험결과를 나타낸다.

Table 1. Results of puncturing test for dummy rods

No.	Calculated	Measured	Error (%)	Inserted	Measured	Error (%)
	Void volume (mL)	Void volume (mL)		gas pressure (kPa)	gas pressure (kPa)	
1	29.2	29.1	-0.3	1,932	1,960	1.4
2	29.6	28.8	-2.7	1,932	1,994	3.2
3	29.6	28.8	-2.7	1,961	2,014	2.7
4	35.7	34.7	-2.8	1,932	1,986	2.8
5	35.3	34.6	-2.0	1,932	1,986	2.8
6	35.4	34.4	-2.8	1,942	1,989	2.4

Table 1의 시험결과에서 나타났듯이 모의연료봉의 내압에 대한 측정오차는 1.4~3.2%이며, 공간체적의 오차 0.3~2.8%로 나타났다. 공간체적의 크기를 약 5 mL 정도 변화를 주어 기체량을 변화시킨

모의 연료봉에서도 측정오차는 변화 없이 거의 비슷하게 나타났다.

2.3 불확도 추정

2.3.1 불확도 추정요인

본 시험에서 측정 장비에 관련된 불확도 요인은 압력계, 온도계 및 표준용기 등이 있다. 봉내압 측정 실험에 대한 불확도 추정요인으로는 시험장비, 시험 환경, 시험자 등을 고려할 수 있다.[2] 온도계와 표준용기는 방사선오염 때문에 최초 교정 이후 재교정이 불가능하다. 그러므로 온도계와 표준용기의 체적의 교정값은 최초 교정값으로 대체하거나 불확도 추정 5% 규칙에 의하여 제외 하였다.

2.3.2 시험값의 불확도 추정

2.3.2.1 반복측정에 대한 불확도

봉내압측정시험은 반복시험을 수행할 수 없는 시험이므로 압력계의 반복 읽음을 반복시험으로 가정하여 불확도를 추정하였으며 표준불확도의 추정값은 0.03 kPa이다.

2.3.2.2 압력계 교정에 대한 표준불확도

압력계의 교정값이 신뢰수준 95%에서 $k=2$ 일 때 확장불확도가 0.6 kPa 이므로 표준불확도는 0.3 kPa로 추정되었다.

2.3.2.3 압력계 분해능에 대한 불확도

압력계의 최소 눈금이 0.1 kPa 이므로 분해능에 대한 불확도는 0.03 kPa이다.

2.3.2.4 표준용기의 체적에 대한 불확도

용기의 체적에 대한 교정값은 신뢰수준 95%에서 $k=2$ 일 때 확장불확도는 0.09 cm^3 이므로 표준불확도는 0.045 cm^3 로 추정되었다.

2.3.2.5 합성불확도

합성불확도 추정은 반복측정, 분해능 및 교정불확도 등을 합성한다.

$$u_c = \sqrt{(0.03)^2 + (0.3)^2 + (0.03)^2 + (0.045)^2} = 0.306 \text{ kPa} \quad (1)$$

2.3.2.6 유효자유도

포함인자 k 값을 구하기 위하여 합성불확도에 대하여 각각의 불확도 구성요소와 자유도를 결합시켜 유효자유도를 구하였다.

$$\nu_{eff} = \frac{(0.307)^4}{\frac{(0.03)^4}{4} + \frac{(0.3)^4}{200} + \frac{(0.03)^4}{200} + \frac{(0.045)^4}{200}} \approx 2,717 \quad (2)$$

2.3.2.7 확장불확도

6개의 표준연료봉에 대한 확장불확도는 신뢰 수준 95%에서 $k=2$ 일 때 1,960-2,014 \pm 0.6 kPa 범위이다.

3. 결론

가압 경수로형 연료의 봉내압 측정장치의 정밀도를 평가하기 위하여 표준 모의 연료봉을 제작하여 측정오차 확인과 불확도 추정을 수행하였다.

시험결과 봉내압과 연료봉 내부 공간체적의 측정 오차는 각각 1.4-3.2% 와 0.3-2.8%로 나타났다. 시험결과 장치의 측정오차는 5% 미만으로 장치의 정밀도가 매우 양호한 것으로 판단된다. 또한 모의연료봉에 대한 불확도 추정값은 신뢰수준 95%에서 $k=2$ 일 때 확장불확도는 1,961-2,014 kPa \pm 0.6 kPa 범위로 나타났다. 따라서 장치의 측정정밀도확인과 측정값에 대한 불확도 추정함으로써 시험장비의 건전성과 시험에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다.

4. 참고문헌

- [1] 이형권 외, "가압경수로 사용후핵연료봉의 핵분열기체포집장치 개발 및 모의핵연료봉을 이용한 시험평가", 한국원자력학회 춘계학술 발표회 논문집, 2001.
- [2] "측정결과와 불확도추정 및 표현을 위한지침" KOLAS, 2002. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.