

소체적 연료의 봉내압 측정실험에 대한 불확도 추정

이형권*, 김도식, 전용범, 서항석, 권형문, 장정남, 김성근, 정상희

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*nhklee1@kaeri.re.kr

1. 서론

핵연료의 봉내압 측정실험은 핵연료의 안전성 및 저장관리를 위해 필요한 실험 자료를 생산하기 위한 실험이다. 특히 봉내압은 핵연료의 수명과 직결되는 요인이며, 원자력발전의 경제성을 확보하기 위한 기본 자료로도 이용된다. 그러므로 실험에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는 장비의 소급성 유지는 물론 실험값이 어느 정도 오차 범위 안에 속하지는 확인하기 위하여 실험데이터에 대한 불확도 추정이 필요하다.

사용후 핵연료의 봉내압 측정에 대한 불확도를 추정하기 위한 선행조건으로 사용되는 실험장비의 소급성이 유지되어야 한다. 그러나 핵연료에 대한 실험은 핫셀에서 수행하므로 장비의 교정에 많은 어려움이 따른다. 그 이유는 계측장비가 핫셀 내부에 설치되어 접근이 어렵고 방사선 오염 때문에 계측장비를 외부로 이동을 할 수 없기 때문이다. 그렇다고 중요한 실험을 수행하면서 실험장비의 정밀도와 소급성을 고려하지 않을 수는 없다. 그러므로 최대한 실험장비의 계측기 정밀도를 확인하고 검증하기 위하여 간접교정 방법을 사용하고 있다. 따라서 핫셀이라는 특수 환경에서 실험장비에 대한 소급성을 최대한 유지하고 실험에 대한 신뢰성 확보하기 위하여 불확도를 추정하였다.

2. 본론

2.1 실험 방법

조사후연료시험시설에서 사용 중인 사용후 핵연료의 봉내압 측정실험장비는 가압 경수로형 사용후 핵연료만을 대상으로 하는 전용실험 장비이다. 그러므로 소체적을 갖는 실험연료봉을 실험하기 위해서는 가압경수로 핵연료의 기체량과 비슷한 양이 되도록 실험 전에 일정량의 기체를 미리 충전해야 한다. 즉, 실험연료봉을 천공하였을 때 천공용기내부에 있는 기체량이 가압경수로형 핵연료의 기체량

과 비슷하도록 시험환경을 조성하는 것이다. 이러한 과정을 수행한 후에는 기존의 실험방법과 동일한 방법으로 시험을 진행한다.^[1]

2.2 연료의 봉내압 측정실험

소체적을 갖는 연료봉의 봉내압 측정실험에 대한 평가를 수행하기 위하여 총 6개의 모의 표준연료봉을 시험하였다. 각 연료봉의 기체충진압력 범위는 304 ~ 490 kPa 이며, 공간체적은 4.5 mL이다. Table 1은 모의연료봉 내압 및 공간체적측정 시험 결과를 나타낸다.

Table 1. Results of puncturing test for dummy rods

No.	Calculated Void volume (mL)	Measured Void volume (mL)	Error (%)	Inserted gas pressure (kPa)	Measured gas pressure (kPa)	Error (%)
1	4.5	4.84	7.6	304	256	15.8
2	4.5	4.43	-1.6	343	357	4.1
3	4.5	4.86	8.0	392	402	2.6
4	4.5	4.51	0.2	441	437	0.9
5	4.5	4.31	-4.2	490	513	4.7
6	4.5	4.59	2.0	490	495	1.0

Table 1의 시험결과에서 나타났듯이 실험연료봉에 대한 봉내압 측정오차는 전체적으로 1 ~ 15.8%로 나타났다. 각각의 압력별로 연료봉의 봉내압 측정오차를 평가하면 충전압력이 다소 낮은 304kPa의 연료봉에서 측정오차는 15.8%로 매우 크게 나타났다. 그리고 충전압력이 343 ~ 490 kPa 범위에서의 측정오차는 1.0 ~ 4.7%범위로 양호하게 나타났다.

2.3 불확도 추정

2.3.1 불확도 추정요인

봉내압 측정실험에 대한 불확도 추정요인으로는 시험장비, 시험환경, 시험자 등을 고려할 수 있다.^[2] 본 실험에서 측정 장비에 관련된 불확도 요인은 압

력계, 온도계 및 표준용기 등이 있다. 그러나 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 수학적 모델

$$P_f = \frac{(V_t + V_s)P_1 - P_c V_c}{V_f} \dots(1)$$

- P_f : 연료봉 내압(kPa)
- V_c : 연료봉 천공전 천공용기의 체적(cm^3)
- V_t : 연료봉 천공후 천공용기의 체적(cm^3)
- P_1 : 천공용기에 충전된 가스압력 (kPa)
- P_c : 연료봉 천공후 천공용기에서 압력(kPa)
- P_2 : 연료봉 천공후 표준용기에서 압력(kPa)
- V_f : 연료봉 천공전 천공용기의 체적(cm^3)

2.3.3 실험값의 불확도 추정

2.3.3.1 반복측정에 대한 불확도

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

2.3.3.2 압력계 교정에 대한 표준불확도

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

2.3.3.3 압력계 분해능에 대한 불확도

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

2.3.3.4 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.

2.3.3.5 합성불확도

합성불확도 추정은 반복측정, 분해능 및 교정불확도 등을 합성한다.

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

2.3.3.6 유효자유도

포함인자 k 값을 구하기 위하여 합성불확도에 대

하여 각각의 불확도 구성요소와 자유도를 결합시켜 유효자유도를 구하였다.

$$\nu_{eff} = \frac{(0.307)^4}{\frac{(0.03)^4}{4} + \frac{(0.3)^4}{200} + \frac{(0.03)^4}{200} + \frac{(0.045)^4}{200}} \approx 2717$$

2.3.3.7 확장불확도

6개의 표준연료봉에 대한 확장불확도는 신뢰 수준 95%에서 $k=2$ 일 때 각각 256, 357, 402, 437, 513, 495 ± 0.6 kPa이다.

3. 결론

소체적을 갖는 연료의 봉내압 측정실험에서의 측정 오차의 확인과 실험 결과에 대한 불확도 추정을 수행하였다. 모의 표준 연료봉 실험에서 측정값과 기준값을 비교하였을 때 측정오차는 0.9 ~ 15.8% 범위로 나타났다.

6개의 연료봉에 대한 불확도 추정에 대한 결과는 신뢰수준 95%에서 $k=2$ 일 때 확장불확도는 256 ~ 531 kPa ± 0.6 kPa 범위로 나타났다. 따라서 소체적을 갖는 연료봉의 측정정밀도확인과 불확도 추정을 수행함으로써 시험장비의 건전성과 실험에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다.

4. 참고문헌

- [1] 이형권 외, "소체적 연료의 봉 내압 측정시험에 대한 평가", 한국원자력학회 춘계학술 발표회 논문집, 2014.
- [2] "측정결과의 불확도추정 및 표현을 위한지침" KOLAS, 2002. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.