

사용후핵연료 밀도시험 및 평가

이형권, 김도식, 서항석, 황용화, 권형문, 장정남, 손영준

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

nhkleel@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료 소결체의 밀도시험은 핵연료의 거동을 파악하기 위한 조사후시험 중의 하나이다.

원자로내에서 연소중인 핵연료의 소결체는 연소도가 증가함에 따라 밀도값이 변화한다. 연소 초기에는 소결체가 고밀화(densification)되었다가 연소도가 증가하면서 소결체는 다시 팽윤(swelling)이 되면서 밀도가 변화하게 된다.

조사후시험은 핵연료를 대상으로 수행하기 때문에 핫셀(hot cell)이란 장소에서 시험을 수행하게 된다. 그러므로 시험데이터의 신뢰성을 확보하기 위해서는 일반실험실보다는 많은 제약이 따른다.

특히, 안전성이 요구되는 원자로 연소되는 핵연료에 대한 시험은 신뢰성과 정확성이 보장되는 시험데이터를 생산하는 것이 가장 중요하다. 신뢰성과 정확성이 확보된 시험을 수행하기 위해서는 숙련된 시험자뿐만 아니라 유효화된 시험규격에 의하여 소급성의 확보된 시험장비로 시험을 수행하여야 된다. 조사후시험시설에서는 핵연료 소결체 밀도시험에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 매년 자체적으로 시험장비에 현장교정을 수행하며, 각각의 시험마다 시험에 대한 불확도를 추정하고 있다.

2. 본론

2.1 시험

2.1.1 시험 장비

핵연료 소결체에 대한 밀도시험 장비는 전기식 지시저울, 유체온도계, 온·습도계, 분동 등이 있다. 조사후시험시설에서는 시험장비의 소급성을 확보하기 위해서 유체온도계와 온·습도계는 매년 새로 구매하고 국가공인 교정기관에서 교정하여 사용하고 있다. 전기식지시저울의 경우는 장비가 고가이고 핫셀에서 교체가 곤란하므로 “전기식 지시저울의 표준 교정 절차 (K A S T O 02-04-1030-075)”규격에 의하여 자체적으로 현장

교정 절차를 수립하여 장비의 교정을 수행하고 있다. 전기식지시저울의 주요 교정항목은 표준분동을 사용한 감도시험, 진직성시험 및 정밀도 시험 등이다.

2.1.2 시험

밀도시험은 KS A 0602 (5항) 및 ASTM B-311의 유효화된 규격에 의해서 자체 시험절차를 수립하여 수행하고 있다.

핵연료 소결체 밀도시험을 수행하기 위해서는 핵연료 피복관과 소결체를 분리하여 시험을 수행하게 된다. 핵연료 피복관과 소결체의 분리는 연소도가 높을 수록 잘 분리가 되지 않아 피복관을 길이 방향으로 절단하여 시편을 채취한다. 그러나 고연소도 시편은 소결체의 균열(crack)이 많아 밀도시료로 채취할 수 있는 양이 적어 시료의 대표성이 부족한 경우도 간혹 생기기도 한다.

채취된 밀도시편은 바스켓에 담아 그 무게를 측정하고, 다시 톨루엔속에서 무게를 측정하여 밀도시험값을 산출하게 된다.

$$D_s = \frac{m}{v_s} = \frac{(w_2 - w_1) \cdot d'}{(w_2 - w_1) - (w_4 - w_3)} \dots (1)$$

D_s : 시료의 밀도(g/cm³)

w_1 : 공기중 시료바스켓 무게(g)

w_2 : 공기중 시료바스켓 + 시료무게(g)

w_3 : 유체속에서 시료바스켓 무게(g)

w_4 : 유체속에서 시료바스켓 + 시료무게(g)

d' : 유체의 밀도(g/cm³)

2.1.3 밀도시험 불확도 추정

밀도시험의 불확도 추정은 시험장비, 시험자, 환경, 대기압, 중력 등 여러 가지 요인이 있으나 불확도 산출규정에 불확도의 영향이 미미한 요인의 제외하고 반복측정, 장비교정, 유체 및 유체의 온도 등에 한하여 불확도를 추정하였다.

2.1.3.1 불확도 산출

2.1.3.1.1 반복시험 표준불확도

공기 중에서 시료바스켓 무게와 시료바스켓에 시료를 넣은 무게 그리고 유체속에서 시료바스켓 무게와 유체속에서 시료를 넣은 상태로 각각 5회씩 반복측정하고 전기식지시저울 교정불확도와 합성하여 각 항목에 대한 불확도를 산출하였다.

- 공기중 접시무게에 대한 표준불확도

$$u(w_1) = \sqrt{0.024^2 + 0.059^2} = 0.064 \text{ mg}$$

- 공기중 시료와 접시무게에 대한 표준불확도

$$u(w_2) = \sqrt{0.037^2 + 0.059^2} = 0.007 \text{ mg}$$

- 유체내 접시무게에 대한 표준불확도

$$u(w_3) = \sqrt{0.020^2 + 0.059^2} = 0.062 \text{ mg}$$

- 유체내 시료와 접시무게에 대한 표준불확도

$$u(w_4) = \sqrt{0.045^2 + 0.059^2} = 0.074 \text{ mg}$$

2.1.3.1.2 유체의 밀도에 대한 불확도 산출

유체의 밀도에 대한 불확도는 온도 변화에 따른 식을 검정선으로 가정하고 최소자승법을 이용하여 기울기와 절편을 구하여 산출하였다.

$$u_c(d') = \sqrt{0.00150^2 + 0.03672^2} = 0.037 \text{ mg/cm}^3$$

2.1.3.1.3 감도계수 산출

불확도 각요인에 대한 감도계수는 식 (1)을 편미분하여 각각의 감도계수를 산출하였다.

$$- C_{w_1} = \frac{\partial D_s}{\partial w_1} = 25.614056 \text{ cm}^{-3}$$

$$- C_{w_2} = \frac{\partial D_s}{\partial w_2} = -25.614056 \text{ cm}^{-3}$$

$$- C_{w_3} = \frac{\partial D_s}{\partial w_3} = -27.995561 \text{ cm}^{-3}$$

$$- C_{w_4} = \frac{\partial D_s}{\partial w_4} = 27.995561 \text{ cm}^{-3}$$

$$- C_{d'} = \frac{\partial D_s}{\partial d'} = 11.755411$$

2.1.3.1.4 합성불확도 산출

시험에 대한 합성불확도는 오차전파법칙을 이용하여 산출하였다.

$$u_c^2(D_s) = \sum C_{w_i}^2 \cdot u(w_i)^2 + C_{d'}^2 \cdot u(d')^2 = 0.0037 \text{ /cm}^3$$

2.1.3.1.5 유효자유도 산출

유효자유도(ν_{eff})는 Welch-Satterwaite 공식을 이용하여 산출하였다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(D_s)}{\sum_{i=1}^n \frac{C_{w_i}^4 \cdot u^4(w_i)}{\nu_{w_i}} + \frac{C_{d'}^4 \cdot u^4(d')}{\nu_{d'}}} = 203$$

2.1.3.1.6 확장불확도 산출

$$U(D_s) = u_c(D_s) \times k = 0.0074 \text{ g/cm}^3$$

2.1.3.1.7 시험값 표기

$$-(10.1663 \pm 0.0074) \text{ g/cm}^3$$

3. 결론

사용후 핵연료에 대한 밀도시험을 수행하였다. 시험의 신뢰도를 제고하고 시험정밀도를 향상시키기 위하여 무게측정과 온도계측을 반복적으로 수행하였다. 또한 시험데이터에 대한 불확도를 추정함으로써 데이터를 제공하는 고객에게 신뢰성을 확보할 수 있었다.

균열이 많은 고연소도의 핵연료의 경우 간혹 대표시료의 채취가 어려워짐에 따라 향후 시료를 채취하는 방법을 개선하거나 시험방법을 변경하는 방안이 필요하다.