

# 핵연료 소결체의 밀도실험에 대한 정밀도 평가

이형권\*, 김도식, 서항석, 권형문, 장정남, 김성근, 권인찬, 정상희

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길111

\*nhklee1@kaeri.re.kr

## 1. 서론

핵연료 소결체의 밀도실험은 핵연료의 거동을 파악하기 위한 조사후시험 중의 하나이다.

원자로내에서 연소중인 핵연료 소결체의 밀도값은 연소도가 증가 또는 변화함에 따라 그 값이 변화한다. 연소 초기에는 소결체가 고밀화 되었다가 연소도가 증가하면서 소결체는 다시 팽윤이 되면서 밀도값이 변화하게 된다.

핵연료 소결체의 밀도실험은 핫셀에서 실험을 수행하게 된다. 그러므로 실험환경이 많은 제약을 받게 되며 시험조건이 까다롭다. 실험환경 또는 실험조건이 까다로운 실험은 실험 데이터의 신뢰성을 확보하기 위하여 실험에 대한 정밀도 평가가 필요하다. 특히, 일반적인 실험보다 훨씬 더 안전성이 요구되는 핵연료에 대한 조사후시험은 신뢰성과 정확성이 보장되는 실험데이터를 생산하는 것이 가장 중요하다. 실험에 대한 신뢰성과 정확성이 확보하기 위해서는 소급성이 확보된 실험장비로 유효화된 실험방법에 의해서 숙련된 시험자가 실험을 수행하는 것은 물론이며 주기적으로 그 실험에 대한 정밀도를 평가할 필요성이 있다.

## 2. 본론

### 2.1 실험 방법 및 장비

밀도 실험방법은 KS A 0602(5항) 또는 ASTM B-311의 규격에 의해서 실험을 수행하고 있다. 핵연료 소결체 밀도실험에 사용되는 주요 장비는 전기식 지시저울, 유체온도계, 온.습도계, 분동 등으로 구성되어 있다. 실험장비의 소급성을 유지하기 위해서는 유체온도계와 온.습도계를 매년 새로 구매하고 국가공인 교정기관에서 교정하여 사용하고 있다. 전기식지시저울의 경우는 장비가 고가이고 핫셀에서 교체가 곤란하다. 그러므로 표준교정 절차를 자체적으로 수립하여 장비에 대한 소급성을 유지하고 있다[1]. 전기식지시저울의 주요 교정항목은 표준분동을 사용한 감도시험, 진직성시험 및 정밀도 시험 등이 있다.

### 2.2 실험

핵연료 소결체의 밀도실험을 수행하기 위해서는 핵연료 피복관과 소결체를 분리하여 시편을 준비하여야 한다. 핵연료 피복관과 소결체의 분리는 연소도가 낮은 핵연료의 경우는 피복관과 소결체 사이의 갭(Gap)이 존재하여 분리가 용이하지만 고연소도 핵연료의 경우는 피복관과 소결체가 접착되어 잘 분리가 되지 않는다. 그러므로 시편을 채취하기 위해서는 피복관을 길이 방향으로 절단하여 시편을 채취한다. 이러한 방법으로 채취한 고연소도 소결체의 시편은 소결체에 균열이 많아 시료로 채취할 수 있는 양이 적어 시료의 대표성이 부족한 경우도 간혹 있다. 채취된 밀도시편은 바스켓에 담아 그 무게를 측정하고, 다시 톨루엔속에서 무게를 측정하여 밀도 시험값을 산출하게 된다.

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

$D_s$  : 시료의 밀도(g/cm<sup>3</sup>)

$w_1$  : 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/cm<sup>3</sup>)

### 2.3 불확도 산출

밀도실험값에 대한 오차가 얼마인지 확인하고 실험값에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 실험값에 대한 불확도 산출을 수행하였다. 밀도실험에 대한 불확도 요인은 시험장비, 시험자, 환경, 대기압, 중력 등 여러 가지 요인이 있으나 불확도 산출에 미미하게 영향을 미치는 항목은 제외하고 반복측정, 장비교정, 유체 및 유체의 온도 등에 한하여 불확도를 추정하였다[2].

#### 2.3.1 반복시험 표준불확도

반복시험에 대한 불확도는 공기 중에서 시료 바스켓 무게와 시료 바스켓에 시료를 넣은 무게, 그

리고 유체속에서 시료 바스켓 무게와 유체속에서 시료를 넣은 상태로 각각 3회씩 반복 측정된 불확도( $u_{(A)}$ )와 전기식 지시저울의 교정불확도( $u_{(B)}$ )를 합성하여 각 항목에 대한 불확도를 산출하였다.

$$u(w) = \sqrt{u_{(A)}^2 + u_{(B)}^2} \dots\dots\dots(2)$$

### 2.3.2 유체 밀도 불확도

유체밀도의 불확도는 온도변화에 따른 유체 밀도의 불확도( $u_{(d')}$ )와 온도계의 교정불확도( $u_{(t)}$ )을 합성하여 산출한다.

$$u_c(d') = \sqrt{u_{(d')}^2 + u_{(t)}^2} \dots\dots\dots(3)$$

### 2.3.3 감도계수 산출

감도계수 산출은 식 (1)을 편미분하여 각각의 요인에 대하여 산출하였다.

$$C_{w_1} = \frac{d'(w_4 - w_3)}{\{(w_2 - w_1) - (w_4 - w_3)\}^2} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$C_{w_2} = \frac{-d'(w_4 - w_3)}{\{(w_2 - w_1) - (w_4 - w_3)\}^2} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$C_{w_3} = \frac{-d'(w_2 - w_1)}{\{(w_2 - w_1) - (w_4 - w_3)\}^2} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$C_{w_4} = \frac{d'(w_2 - w_1)}{\{(w_2 - w_1) - (w_4 - w_3)\}^2} \dots\dots\dots(4.4)$$

$$C_{d'} = \frac{(w_2 - w_1)}{(w_2 - w_1) - (w_4 - w_3)^2} \dots\dots\dots(4.5)$$

### 2.3.4 합성 불확도 산출

합성불확도는 오차전파법칙을 이용하여 산출하였다.

$$u_c^2(D_s) = \sum C_{w_i}^2 \cdot u(w_i)^2 + C_{d'}^2 \cdot u(d')^2 \dots\dots(5)$$

### 2.3.5 유효자유도 산출

유효자유도( $\nu_{eff}$ )는 Welch-Satterwaite 공식을 이용하여 산출하였다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(D_s)}{\sum_{i=1}^n \frac{C_{w_i}^4 \cdot u^4(w_i)}{\nu_{w_i}} + \frac{C_{d'}^4 \cdot u^4(d')}{\nu_{d'}}} \dots\dots(6)$$

### 2.3.6 확장 불확도 산출

확장불확도( $U$ )는 합성불확도에 포함인자를 곱하여 산출하였다.

$$U = u_c(D_s) \times k \dots\dots\dots(7)$$

Table 1은 각각의 집합체에서 1개씩 인출한 연료봉의 소결체 밀도실험 결과를 나타낸다. 5개 연료봉에 대한 각각의 실험값에 대한 불확도는 0.0207 g/cm<sup>3</sup>가 가장 크게 나타난 값이다. 이 값은 실험값의 크기에 비해 작은 값으로 실험오차가 매우 작음을 알 수 있다.

Table 1. Results of density test for the pellet of fuel rods

	밀도값 (g/cm <sup>3</sup> )	불확도 (g/cm <sup>3</sup> )	연소도 (MWD/MTU)
1	10.2204	0.0095	50,335
2	10.1966	0.0060	51,679
3	10.2903	0.0207	51,987
4	10.1489	0.0082	54,537
5	10.4550	0.0105	57,070

## 3. 결론

사용후 핵연료의 소결체에 대한 밀도실험을 수행하고 실험값에 대한 불확도를 산출하여 실험에 대한 정밀도를 확인하였다. 실험값에 대한 오차는 표준분동의 편차와 장비의 불확도를 합산하여 실험값에 반영된 결과로 그 값이 실험값에 비해 매우 미미하므로 실험값에 대한 정밀도는 매우 높다고 평가할 수 있다.

## 4. 참고문헌

- [1] 전기식지시저울의 표준교정절차(KASTO 02-04 -1030-075), 2002.
- [2] "측정결과의 불확도추정 및 표현을 위한지침" KOLAS, 2002.