

ORIGEN-ARP의 동위원소 함량 보정계수 도출시 대상 실험샘플 변화가 보정계수에 미치는 영향 분석

차길용, 김순영, 이우교, 김아름*, 김태만*, 김경오**

(주)래드코어, 대전광역시 유성구 테크노중앙로 65 남정빌딩 2차 503호

*한국방사성폐기물관리공단, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

**한양대학교, 서울특별시 성동구 행당동 17

svkim@radcore.co.kr

1. 서론

국내 사용후핵연료 소내 저장시설이 2016년에 포화상태에 이를 것으로 예상되어, 대량의 사용후핵연료를 저장할 수 있는 별도의 저장고나 처분장 건설이 요구되고 있다. 동시에 수송·저장 시스템을 대용량화 하여 경제성을 향상시키는 방안으로써 국내외에서 연소도이득효과(Burnup Credit, BUC)에 관한 연구가 진행 중이다.

연소도이득효과를 적용하기 위해서는 사용후핵연료내 핵종의 함량을 정확히 예측할 전산코드가 필요하고, 이를 위해 핵종별 함량에 대한 연소벤치마크계산을 통하여 SCALE 내 ORIGEN-ARP^[1]를 동위원소 함량 계산 코드로 선정하였다.

선정된 코드가 갖는 bias 및 uncertainty는 사용후핵연료의 동위원소 함량 결정에 있어 임계에 대해 보수적이지 않은 결과를 도출할 수 있으므로, 임계에 영향을 미치는 핵종에 대한 동위원소 함량을 보정하는 작업이 필요하다.

이와 관련하여 이미 2010년 춘계 본 학회에 ORIGEN-ARP의 bias 및 uncertainty를 고려한 보정계수를 도출한 내용을 발표하였다^[2]. 본 연구에서는, 보정계수도출시 화학분석에 사용한 실험샘플의 선정이 연소도에 대한 경향성 및 핵종별 보정계수에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 본론

미국 에너지성(Department of Energy)과 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission)에서는 연소도이득효과가 적용된 수송/저장시스템의 인허가 신청시 액티나이드 원소들만을 고려하도록 하고 있으며 본 연구에서 수행한 다양한 분석/검증은 U²³⁴, U²³⁵, U²³⁸, Pu²³⁸, Pu²³⁹, Pu²⁴⁰, Pu²⁴¹, Pu²⁴², Am²⁴¹ 핵종들을 대상으로 진행되었다^[3]. 동위원소 검증을 위한 실험자료는 Calvert

Cliffs, H. B. Robinson, Obrigheim, Mihama, Takahama, TMI, Calvert Cliff 원전^[3,4]에서 확보된 52개 화학분석자료들을 사용하였다.

동위원소 함량을 예측하기 위해 수행된 연소계산의 정확성은 실험결과와의 비교를 통해 분석되었으며 측정 자료를 계산결과로 나눈 값을 “편향(Bias)”으로 정의하였다. 현재까지 수행된 연구들을 분석한 결과, 편향은 연소도의 타 인자들과는 관련성이 적은 것으로 확인되었으며^[3] 연소도와 의 경향성은 식 (1)과 (2)를 통해 분석되었다.

$$x_{fit} - 1 + b_1 \times B \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n B_i \times x_i - \sum_{i=1}^n B_i}{\sum_{i=1}^n B_i^2} \quad \text{-----} \quad (2)$$

n = 데이터 개수

x_{fit} = 특정 인자에 따른 편향

x_i = i 번째 데이터의 편향

b_1 = 연소도에 따른 기울기

B_i = i 번째 데이터의 연소도

또한, 계산결과와 편향이 특정 인자에 대해 분명한 경향성을 가지고 있는지를 식 (3)을 통해 정량적으로 평가해보았다.

$$v = |b_1| \sqrt{\frac{(n-1) \sum_{i=1}^n B_i^2}{SS_R}} \quad \text{-----} \quad (3)$$

여기에서, $SS_R = \sum_{i=1}^n (x_i - 1 - b_1 \times B_i)^2$

다음에 나타낸 식들은 보다 높은 임계안전성을 확보할 수 있도록 연소계산으로부터 구해진 동위원소 함량의 보정계수를 도출하기 위해 사용되었

다. 식 (4)는 위에서 수행된 분석에서 편향이 특정 인자에 대해 경향성이 확인되지 않을 경우에 적용되었으며 식 (5)는 경향성이 분명한 경우에 사용되었다. 특히, $t_{95,n-1}$ 은 n-1개 데이터 개수와 95% 신뢰구간에 대한 Student-t value를 나타내고 있으며 정반응도를 나타내는 원소들에 대해서는 식 중간의 부호를 (+)로 부반응도를 나타내는 원소들에 대해서는 (-)로 적용시켜 보수적인 임계값이 도출될 수 있도록 하였다.

$$f - 1.0 \pm \sigma t_{95,n-1} \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2}$$

$$f = \text{Max or Min} \left[1.0 + b_1 \times B_i + t_{95,n-1} \sqrt{\left(1 + \frac{B_i^2}{\sum_{i=1}^n B_i^2}\right) \frac{SS_R}{n-1}}, 1.0 \right] \quad (5)$$

그림 1은 비교적 임계에 미치는 영향이 클 것이라 예측되는 U^{235} 의 연소도에 대한 경향성을 분석하기 위하여 계산값/측정값(C/E)과 연소도의 관계를 나타낸 그래프이다.

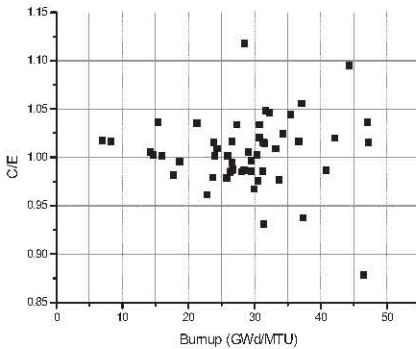


Fig. 1. U^{235} 의 연소도에 따른 C/E값.

다수 샘플에 대한 연소도의 평균기울기 b_1 은 연소도에 대한 경향성을 판별하는데 지배적인 요소이다. 그림 1에서 경향성에 영향을 줄 것이라 판단되는 샘플을 2개씩 제거하면서 계산을 수행하여 이에 대한 계산 결과를 표 1에 나타내었다.

Table 1. U^{235} 샘플 수의 변화와 보정계수의 관계.

샘플	b_1	SS_R	ν	경향성	보정계수
52	0.00025	0.07202	1.099	×	1.063
50	0.00035	0.04249	1.907	○	1.014
48	0.00028	0.02902	1.759	○	1.011
46	0.00031	0.02187	2.126	○	1.012

표 1에서 나타낸 결과를 살펴보면 전체 52개 중 2개 샘플의 변화로 인해 경향성이 변하고 이로 인해 보정계수 값이 1.063에서 1.014로 줄어들었다. 경향성이 바뀌지 않는 경우에는 보정계수 계산결과가 0.001~0.003정도의 변화가 나타나 경향성이 바뀌었을 때에 비해 변화가 적었다.

3. 결론

본 연구에서는 미 에너지성 및 원자력규제위원회에서 권장하고 있는 핵종별 함량 보정계수를 도출하는 방법론 적용 시 대상 샘플의 선택이 보정계수에 주는 영향을 분석하였다.

52개의 샘플 중 소수의 샘플 변화가 경향성의 유무를 뒤바꾸어 적용할 보정계수에 변화가 나타났다. 화학적 분석을 통해 측정된 실험 데이터가 많지 않아 소수의 샘플 변화에 대해 민감한 결과를 보였다. 차후 보정계수 적용에 있어 이러한 문제점에 대한 보완이 필요하다고 판단된다.

4. 감사의 글

본 연구는 지식경제부 방폐물관리기술개발 중장기 기획과제의 일환으로 수행되었음.

5. 참고문헌

1. ORNL, "ORIGEN-ARP: Automatic Rapid Processing For Spent Fuel Depletion, Decay, and Source Term Analysis." Us. ORNL/TM-2005/39, 2009.
2. K. O. Kim, et al., "사용후핵연료 수송/저장시스템 설계시 연소도이득효과 적용을 위한 동위 원소 함량 보정계수 도출," 2010년 춘계 한국방사성폐기물학회, 2010.
3. US Department of Energy, "Topical Report on Actinide Only BUC for PWR SF Packages, Rev.2" Us, DOE/RW-0472, 1998.
4. ORNL, "Analysis of Experimental Data for High Burnup PWR Spent Fuel Isotopic Validation - Calvert Cliffs, Takahama, and Three Miles Island Reactors," Us, NUREG/CR-6968, 2010.