

사용후핵연료 수송/저장시스템 설계시 연소도이득효과 적용을 위한 동위원소 함량 보정계수 도출

김경오, 김순영, 이우교, 박제호*, 김태만**, 윤정현**, 김중경***
(주)래드코어, 서울시 성동구 행당동 17

*(주)코네스코퍼레이션, 서울시 서초구 양재동 210-2

**방사성폐기물관리공단, 경기도 용인시 기흥구 중동 848-2

***한양대학교, 서울특별시 성동구 행당동 17

svkim@radcore.co.kr

1. 서론

국내에서 운영 중인 20기의 원자력발전소에서는 매년 700톤 정도의 사용후핵연료가 발생되며 현재까지 발생한 사용후핵연료는 대략 9420톤(2007년 12월 기준)에 이른다. 이로 인해, 장기적으로 운영된 일부 원전에서는 소내 저장고의 용량이 포화 상태에 이르러 여분의 저장능력을 보유한 인근 발전소의 저장고로 핵연료를 이동시켜야 하는 문제가 발생되고 있다. 따라서 대량의 사용후핵연료를 저장할 수 있는 별도의 저장고나 처분장 건설이 필수적이며, 동시에, 핵연료를 안전하게 운반할 수 있는 대용량 수송/저장시스템의 설계와 제작 또한 필요한 상황이다.

최근에는 IAEA와 OECD/NEA에서도 이 같은 문제의 심각성을 인식하고 해결을 위한 방안연구를 추진 중에 있으며 특히, 수송/저장시스템의 장전용량 향상을 통해 방사선 위험도와 경제적인 부담을 감소시키기 위한 연구, 즉 연소도이득효과(Burnup Credit, BUC)에 대한 연구를 집중적으로 수행하고 있다. 연소도이득효과는, 핵연료가 연소되면서 발생하는 액티나이드 동위원소들과 핵분열생성물들을 핵연료 취급시설(수송/저장시스템 포함)의 임계도 분석과정에 포함시킴으로써 발생하는 중성자증배계수 이득을 의미하며 해당효과를 수송/저장시스템에 실적용 하기 위해서는 화학분석자료를 기준으로 연소계산의 정확성을 필수적으로 검증해야 한다. 이에, 본 연구에서는 5개 원전에서 확보된 37개 화학분석자료를 바탕으로 동위원소 함량 계산의 정확성 검증과 임계안전성 확보를 위한 동위원소별 보정계수를 도출하였다.

2. 실험자료 및 방법

사용후핵연료에는 대략 1300개 핵종들이 존재하고 있으나 임계도 분석과정에서 이 원소들을 모두 고려하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 대부분의 연구들에서는 임계도에 미치는 영향이 상대적으로 큰 액티나이드 원소들만을 고려하고 있으며 특히, U^{234} , U^{235} , U^{238} , Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} , Pu^{242} , Am^{241} 핵종들을 대상으로 하고 있다. 미국 에너지국

(Department of Energy)과 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission)에서도 연소도이득효과가 적용된 수송/저장시스템의 인허가 신청시 해당 원소들을 고려하도록 하고 있으며 본 연구에서 수행한 다양한 분석/검증들 역시 이들을 대상으로 진행되었다^[1]. 그리고 동위원소 검증을 위한 실험 자료는 Calvert Cliffs, H. B. Robinson, Obrigheim, Mihama, Takahama-3 원전에서 확보된 37개 화학분석자료들을 사용하였다.

동위원소 함량을 예측하기 위해 수행된 연소계산의 정확성은 실험결과와의 비교를 통해 분석되었으며 측정 자료를 계산 결과로 나눈 값을 “편향(Bias)”으로 정의하였다. 일반적으로, 계산결과의 편향은 비출력, 초기농축도, 연소도 등의 다양한 인자들과 관련되어 임의의 경향성을 가지고 있다고 알려져 있다. 하지만, 현재까지 수행된 연구들을 분석한 결과, 편향은 연소도의 타 인자들과는 관련성이 적은 것으로 확인되었으며 연소도와의 경향성은 식 (1)과 (2)를 통해 분석되었다^[1].

$$x_{fit} = 1 + b_1 \times B \dots\dots\dots (1)$$

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

- n = 데이터 개수
- x_{fit} = 특정 인자에 따른 편향
- x_i = i번째 데이터의 편향
- b_1 = 연소도에 따른 기울기
- B_i = i번째 데이터의 연소도

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

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

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 사용되었다. 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 $n-1$ 데이터 개수와 95% 신뢰구간에 대한 Student-t value를 나타내고 있으며 정반응도가를 나타내는 원소들에 대해서는 식 증간의 부호를 (+)로 부반응도가를 나타내는 원소들에 대해서는 (-)로 적용시켜 보수적인 임계값이 도출될 수 있도록 하였다.

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

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

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

3. 결과 및 고찰

그림 1에서는, 각 원전별 운전이력을 바탕으로 도출된 동위원소별 함량의 편향을 나타내고 있다. 상당수 동위원소들의 편향은 1.0 ± 0.1 이내에서 실험결과와 일치하고 있었으나 U^{234} 와 Pu^{238} 원소는 1.0 ± 0.3 범위에서 편향이 넓게 분포하는 특성을 나타내고 있었다.

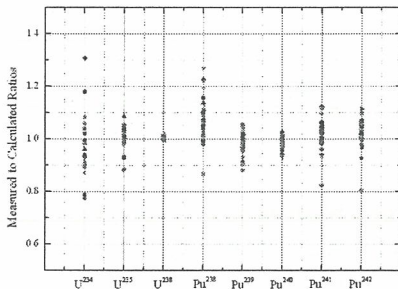


Fig. 1. Each Isotope Bias Produced by Using Origen-ARP Code

또한, Origen-ARP 코드로부터 도출된 편향이 연소도에 대해 임의의 경향성을 가지고 있는지를 평가한 결과, 표 1에서와 같이 U^{234} 를 제외하고는 모든 동위원소들이 경향성을 가지고 있는 것으로 확인되었다. 특히, Pu^{238} 원소에 대한 계산결과와 편향은 연소도에 대해 변화율이 매우 큰 것으로 확인된 반면, U^{238} 원소에 대한 계산결과는 상대적으로 매우 안정적인 것으로 평가되었다. 표 2에서는 각 동위원소별 평균 편향과 식 (4)와 (5)로부터 도출된 보정계수를 나타내고 있다. 부반응도가를 삽

입하는 원소들중에서 Pu^{238} 원소에 대한 보정율이 29%로 가장 높았으며 정반응도가를 삽입하는 원소들은 최대 8%의 보정이 필요한 것으로 확인되었다. 특히, Am^{241} 원소는 Pu^{241} 의 붕괴로부터 발생되기 때문에 연소에 대한 경향성 및 편향은 모원소와 동일하다고 가정하였으나 부반응도가를 삽입하는 원소이기 때문에 보정계수는 모원소와 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 1. Trend Analysis on the Bias of Calculation Results

	샘플수	b_1	SS_R	v	경향성
U^{234}	22	-1.13E-3	3.16E-1	1.49	×
U^{235}	37	3.73E-4	5.30E-2	1.85	O
U^{238}	31	8.00E-5	7.90E-4	2.77	O
Pu^{238}	37	1.56E-3	1.10	1.70	O
Pu^{239}	37	-5.94E-4	7.13E-2	2.54	O
Pu^{240}	37	-4.33E-4	1.49E-2	4.05	O
Pu^{241}	37	9.46E-4	1.08E-1	3.29	O
Pu^{242}	33	9.83E-4	9.02E-2	3.40	O

Table 2. Biases and Correction Factors for Each Isotope

	샘플수	평균 편향	불확실도	보정계수
U^{234}	22	0.97	0.13	0.78
U^{235}	37	1.01	0.04	1.08
U^{238}	31	1.00	0.01	1.00
Pu^{238}	37	1.07	0.18	0.71
Pu^{239}	37	0.98	0.05	1.02
Pu^{240}	37	0.99	0.02	0.97
Pu^{241}	37	1.03	0.06	1.08
Pu^{242}	33	1.02	0.06	0.95
Am^{241}	-	1.03	0.06	0.96

4. 결론

본 연구에서는 수송/저장시스템에 연소도이득효과를 적용하기 위해 필수적으로 수행되어야 하는 동위원소 검증 및 보정계수를 도출하였다. 실험자료는 5개 원전에서 확보된 37개의 화학분석자료를 이용하였으며 Origen-ARP 코드를 이용하여 동위원소들의 함량을 예측하였다. U^{234} 원소를 제외한 나머지 8개 원소들은 연소도에 대해 임의의 경향성을 가지고 있는 것으로 확인되었으며 임계안전성을 확보하기 위해서는 Pu^{238} 원소의 보정이 상대적으로 가장 높게 필요함을 확인할 수 있었다.

5. 감사의 글

이 연구는 지식경제부의 고급인력양성사업과 방사성폐기물관리 기술개발 사업의 지원에 의해 수행되었음.

6. 참고문헌

[1] DOE, "Topical Report on Actinide-Only Burnup Credit for PWR Spent Nuclear Fuel Packages," DOE/RW-0472