

연소도이득효과 적용 사용후핵연료 수송/저장시스템의 USL 경향성 분석 연구

김경오, 이우교, 김순영, 박제호*, 김태만**, 조천형**, 윤정현**, 김중경***

(주)레드코어, 대전광역시 유성구 관평동 784

*(주)코네스코퍼레이션, 서울특별시 서초구 양재동 210-2

**한국방사성폐기물관리공단 방폐물기술개발센터, 대전광역시 유성구 덕진동 150-1

***한양대학교, 서울특별시 성동구 행당동 17

cabin@radcore.co.kr

1. 서론

사용후핵연료내에는 중성자 흡수단면적이 큰 액티나이드와 다양한 핵분열생성물들이 포함되어 임계해석분야에서는 이를 신연료로 가정하여 안전성을 평가해왔다. 이러한 가정은 평가 결과의 불확실성에 대한 안전 여유도를 확보하기 위한 것이었으나 신연료로 가정함에 따라 불필요하게 과도한 안전 여유도를 확보한다는 점이 연구자들에 의해 지적되어 왔다. 또한, 많은 원전에서 초기 농축도가 높은 핵연료를 사용하고 고연소도 운전을 실시함에 따라 사용후핵연료를 신연료로 가정하여 안전 해석을 수행하는데 대한 비현실성이 제기되고 있다.

최근, IAEA와 OECD/NEA에서도 이 같은 문제의 불합리성을 인식하고 이에 대한 개선연구를 추진 중에 있으며 특히, 액티나이드 원소를 임계안전성 평가과정에 반영시키기 위한 연구(Burnup Credit, BUC)를 수행 중에 있다^[1]. 미국에서는, 연소와 임계실험에 대한 벤치마크 계산을 수행한 후에 특정인자에 대한 경향분석을 실시토록 하여 추가적인 안전 여유도를 확보할 수 있는 방법을 고안하였으며 이를 사용후핵연료 수송/저장시스템 인허가에 적용/실시하고 있다^[2]. 반면, 국내에서는 원전내 습식저장조의 조밀랙 설계에 BUC가 일부 적용된 수준이며 수송/저장시스템에 대한 평가방법론은 거의 연구가 진행되지 않은 상황이다. 본 연구는, 국내 수송/저장시스템의 BUC 적용에 관한 기초연구로서 수행되었으며 사용후핵연료 수송/저장시스템 임계해석시 USL(Upper Subcritical Limit)이 특정인자에 대해 갖게 되는 경향성 분석에 기반을 두고 있다.

2. 실험자료 및 방법

BUC 적용 수송/저장시스템이 어떠한 경우에도 미입계가 유지됨을 검증하기 위해서는 계산결과의 신뢰성 확보가 선행되어야 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 Los Alamos National Laboratory에서 개발한 MCNPX 2.5.0 전산코드를 이용하여 "The International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments"에 수록된 130개 실험 자료들의 벤치마크 계산을 수행하였다. 이를 통해, 사용된 코드와 데이터에 관련된 편향(Bias), 그리고 불확실도를 평가하였으며 도출된 결과는 미국 NRC에서 권고하고 있는 방법론에 적용하

여 수송/저장시스템의 USL을 도출하였다. 미국 NRC에서는 특정시스템을 대상으로 평가한 유효증배계수(k_s)가 벤치마크 계산과 불확실도를 기반으로 설정된 최대 허용 증성자 증배계수보다 작거나 같도록 규정하고 있으며 관련 식은 다음과 같다.

$$k_s + \Delta k_s + \Delta k_b \leq k_c - \Delta k_c - \Delta k_m \quad (1)$$

k_s = 수송/저장시스템에 대한 유효증배계수

Δk_s = 유효증배계수의 불확실도(수송/저장시스템)

Δk_b = 기계적 공차 혹은 설계변수에 의한 불확실도

k_c = 벤치마크 계산으로부터 도출된 유효증배계수

Δk_c = 도출된 유효증배계수의 불확실도(벤치마크 계산)

Δk_m = 임계계산에 대한 안전여유도

특히, 우변에 위치한 $k_c - \Delta k_c - \Delta k_m$ 을 USL이라고 정의하고 있으며 벤치마크 계산결과들이 특정인자에 대하여 경향성이 확인될 경우에는 식 (2-1), 다른 경우에는 식 (2-2)를 이용하여 USL을 분석하고 있다. 여기에서, b는 벤치마크 계산결과를 특정인자로 1차 회귀분석을 실시하여 도출한 기울기, a는 y 절편을 의미하고 있다. 회귀분석에 사용되는 인자들은, 핵연료 농축도, 피치, 핵분열 평균에너지 등과 같이 다양한 인자들이 존재하지만, 본 연구에서는 USL 분석을 위해 가장 널리 사용되는 핵연료 피치와 Average Neutron Lethargy Causing Fission(ALF)을 대상으로 분석을 수행하였다^[3].

$$USL(x) = \frac{a + bx - \Delta k_c(x) - \Delta k_m}{k_c - \Delta k_c - \Delta k_m} \quad (2-1)$$

$$\text{여기에서, } \Delta k_c(x) = t_{\alpha, n-2} \sqrt{\left[\frac{n+1}{n} + \frac{(x-\bar{x})^2}{S_{xx}} \right] S_p^2}$$

$$\Delta k_c = t_{\alpha, n-1} \sqrt{\left(\frac{n+1}{n} \right) S_p^2}$$

3. 결과 및 고찰

그림 1에서는, The International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments에 수록된 130개 임계실험 자료에 대한 벤치마크 계산결과를 나타내고 있다. 그

림에서 확인할 수 있듯이, 평균 임계도(k_c)와 불확실도(Δk_c)는 각각 0.9928과 0.0016 이었고, 따라서 벤치마크 계산에 사용된 전산코드의 편향은 0.0072로 분석되었다.

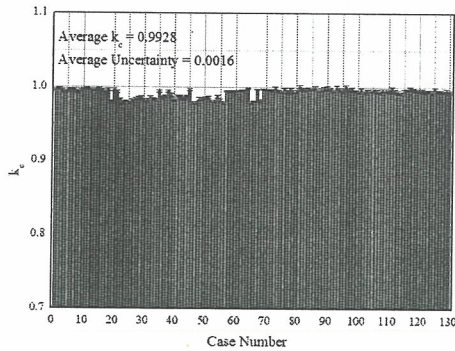


Fig. 1. Benchmark Results for Fresh UO₂ Experiments

Table 1. USL Determination for UO₂ Subset

Parameter	Pin pitch	ALF
Sample Number [n]	72	47
Variance of Fit [s_{kfs}^2]	5.8903E-06	2.73903E-06
Within-data Variance [s_{w}^2]	2.6944E-06	2.68506E-06
Pooled Standard Deviation [s_p^2]	8.5771E-06	5.4062E-06
$t_{n, x}$	1.99	1.68
S_{xx}	1.9764	4.2503E-05
Uncertainty [Δk_c]	$1.99 * [(1.0139 + (\text{pin pitch} - 1.9112)^2 / 1.9764) * 8.5771E-06]^{0.5}$	4.72296E-03
Safety Margin [Δk_m]	0.05	0.05
USL	$0.863 + 0.03787 * (\text{pin pitch})$	0.9411536

표 1에서는, 위에서 언급된 방법론을 이용하여 USL 함수를 도출하기 위해 필요한 다양한 수식과 인자들을 나타내고 있다. 특히, 상당수 벤치마크 자료들이 핵연료 농축도에 차이를 보임에 따라 동일한 농축도를 갖는 샘플들만을 선정하여 각 인자에 따른 USL 함수를 도출하였다. 또한, 벤치마크 자료들에 대한 경향분석을 수행한 결과, Pin Pitch에 대해서는 특정한 경향성이 확인되었으나 ALF에 대해서는 경향성이 확인되지 않아 식 (2-2)를 적용하여 분석을 수행하였다. 최종적으로 도출된 USL은, Pin Pitch에 대해 함수 $0.863 + 0.03787 * (\text{pin pitch})$ 로 도출된 반면 ALF에 따른 USL은 상수 0.9412로 확인되었다.

그림 2에서는, 본 연구에서 도출된 여러 결과들을 핵연료 피치와 Average Neutron Lethargy Causing Fission(ALF)에 따른 그래프로 나타내고 있다. 도출된 USL 함수에 따르면, 핵연료 피치가 대략 2.064가 되면 ALF로부터 도출된 USL과 동일한 값을 나타내었으며 2.3104cm보다 크지 않은 경우에는 항

상 미임계기준치가 0.95보다 작은 것으로 확인되었다.

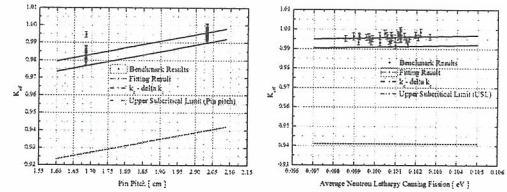


Fig. 2. Upper Subcritical Limit (USL) As a Function of Fuel Pin Pitch and Average Neutron Lethargy Causing Fission

4. 결론

본 연구는, 국내 수송/저장시스템의 BUC 적용에 관한 기초 연구로서 수행되었으며 미국 NRC에서 권고하고 있는 방법론을 이용하여 핵연료 피치와 ALF에 따른 USL을 도출하였다. 이를 위해, "The International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments"에 수록된 130개 실험 자료들의 벤치마크 계산을 수행하였으며 도출된 USL은 pin pitch에 따라 $0.863 + 0.03787 * (\text{pin pitch})$ 의 경향을, ALF에 대해서는 경향성 없이 0.9412로 확인되었다. 핵연료 피치가 약 2.064cm인 경우에는 ALF로부터 도출된 USL과 동일한 값을 나타내었으며 2.3104cm 보다 작을 경우에는 USL이 항상 0.95 미만인 것으로 확인되었다. 하지만, 해당방법론에서는 분석인자에 따라 도출되는 USL이 상당한 차이가 발생할 수 있으며 여러 인자에 대한 반복적인 계산이 불가피하고 도출된 USL 중에서 적합한 기준치를 선정하는데 어려움이 있는 것으로 판단되었다.

5. 감사의 글

이 연구는 지식경제부의 고급인력양성사업과 방사성폐기물관리기술개발 사업의 지원에 의해 수행되었음.

6. 참고문헌

- [1] IAEA, "Advances in Applications of Burnup Credit to Enhance Spent Fuel Transportation, Storage, Reprocessing and Disposition," IAEA-TECDOC-1547, 2007.
- [2] DOE, "Topical Report on Actinide-Only Burnup Credit for PWR Spent Nuclear Fuel Packages," DOE/RW-0472 Rev.2, 1998.
- [3] DOE, "Isotopic and Criticality Validation for PWR Actinide-Only Burnup Credit," DOE/RW-0497, 1997.