

연소도이득효과 적용 사용후핵연료 수송/저장시스템에 대한 임계안전성 평가방법 비교분석

김순영, 김경오, 이우교, 박제호*, 김태만**, 조천형**, 윤정현**, 정승영***, 김종경****

(주)래드코어, 대전광역시 유성구 관평동 784

*(주)코네스코퍼레이션, 서울특별시 서초구 양재동 210-2

**한국방사선폐기물관리공단 방폐물기술개발센터, 대전광역시 유성구 덕진동 150-1

***한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 과학로 34

****한양대학교, 서울특별시 성동구 행당동 17

svkim@radcore.co.kr

1. 서론

방사성물질을 이용하는 분야가 다양해짐에 따라 국내외를 막론하고 이 물질들의 사용량과 운반량이 증가하고 있으며 원자력에서 방출된 사용후핵연료의 양 또한 급격하게 증가하는 추세에 있다. 최근에는 IAEA와 OECD/NEA에서도 문제의 중요성을 인식하고 해결을 위한 방안연구를 추진 중에 있으며 특히, 수송/저장시스템의 장전용량 향상을 통해 방사선 위험도와 경제적인 부담을 감소시키기 위한 연구(Burnup Credit, BUC)를 집중적으로 수행하고 있다. 반면, 국내에서는 원전내 습식저장조의 조밀랙 설계에만 BUC가 적용되었으며 향후 중간저장 시설에 사용될 수송/저장시스템의 BUC적용에 관한 연구는 매우 미미한 실정이다. 이에, 본 연구에서는 미국 NRC에서 권고 중인 임계도 분석방법을 가상용기에 적용하여 임계안전성을 평가해보았으며 추가적으로 국내 습식저장조의 조밀랙 설계에 적용된 방법도 동시에 고려하여 임계결과를 비교/분석해보았다.

2. 실험재료 및 방법

사용후핵연료가 정상조건에서 수송/저장시스템에 장전될 경우, 매우 낮은 유효증배계수를 나타내므로 본 연구에서는 운반용기가 순수에 의해 100% 침수되었다는 사고조건을 적용하여 임계도를 분석하였다. 또한, 사용후핵연료에는 1300개 이상의 핵종들이 존재하고 있으나 임계도 분석과정에서 이 원소들을 모두 고려하는 것은 현실적으로 불가능하므로, 임계도에 미치는 영향이 상대적으로 큰 U^{234} , U^{235} , U^{238} , Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} , Pu^{242} , Am^{241} 핵종들을 대상으로 하였다. 그리고 사용후핵연료내 주요핵종들의 재고량은 SCALE 6.0 전산코드의 Triton 모듈에 44Groupndf5 자료를 적용하여 분석하였으며 해당결과는 MCNPX 코드로 모델링된 가상 운반용기에 반영되어 유효증배계수를 예측하는데 사용되었다.

임계안전성 평가를 위해서는 핵입계 실험 자료를 바탕으로 벤치마크 계산이 수행되어야 하며 이로부터 도출된 편향(Bias)과 불확실도 등이 유효증배계수 도출과정에 반영되어야 한다. 또한 해석대상의 설계변수와 기제적 오차에 따른 불확실도 등도 추가적으로 고려되어야 하는데 여러 인자들이 고려된

최종 유효증배계수를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$k_{eff} = k_{cal} + k_{bias} + k_{uncert} \text{ ----- (1)}$$

k_{cal} = 정상조건에서 계산된 유효증배계수

k_{bias} = 임계도 해석방법의 편향

k_{uncert} = 임계도 평가과정에 포함될 수 있는 모든 불확실도

미국 NRC의 경우, 연소와 임계계산들로부터 도출된 결과물 실험결과와 비교/검증하도록 권고하고 있으며 벤치마크 계산을 통해 도출된 임계값들이 특정인자에 대하여 경향성이 확인될 경우에는 식 (2)를 이용하여 임계계산 불확실도를 산출하고 있다. 하지만, 화학분석자료에 대한 벤치마크 계산결과를 이용하여 핵종별 보정계수를 도출한 후, 임계계산에 반영할 경우에는 연소계산에 포함된 불확실도를 제외할 수 있도록 하고 있다 [1].

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

한편, 다른 임계안전성 평가방법에서는, 연소계산에 대한 불확실도를 연소로 인한 총 반응도 감소분의 5%를 적용하여 산출하고 있으며 타 불확실도와와의 통계적인 조합에 의해 반영되는 것이 아니라 편향의 형태로 합산하고 있다. 또한, 노심 연소 조건에 따른 임계도 변화를 분석하여 추가적인 불확실도를 반영해주고 있으며 30 GWd/MTU 이상의 연소도를 갖는 핵연료에 대해서는 1% Δk / 10 GWd/MTU를 적용하여 축방향 연소도 분포로 인한 영향을 고려하고 있다.

본 연구에서는 Calvert Cliffs 1호기에서 37.12 GWd/MTU로 연소된 CE14x14 핵연료를 대상으로 하였으며 2가지의 다른 임계안전성 평가방법을 4다발의 핵연료집합체를 수송/저장할 수 있는 가상 운반용기에 적용하여 비교/분석하였다 [2].

3. 결과 및 고찰

가상 운반용기는 그림 1과 같이 4다발의 핵연료집합체가 장전될 수 있는 공간을 가지고 있으며 재질은 두께 10cm의 Stainless Steel 304로 구성하였다. 또한 운반용기가 순수에 의

해 100% 침수되었다는 사고조건을 적용하여 임계안전성을 평가하였다.

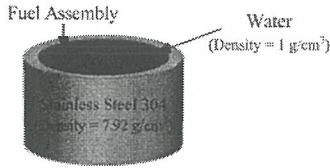


Fig. 1. Overview of Imaginary Cask Model

표 1에서는, 미국 NRC에서 권고하는 임계안전성 평가방법을 가상 운반용기에 적용함으로써 도출된 불확실도, 편향, 최종 유효증배계수를 나타내고 있다. 기계적 공차 혹은 설계변수에 의한 불확실도를 보수적인 가정치인 0.05로 적용하였으며 이전 연구로부터 도출된 핵종별 보정계수를 임계도 평가과정에 적용하여 연소계산에 대한 불확실도가 제외될 수 있도록 하였다^[3]. 통계적인 불확실도와 편향의 합이 0.081652로 분석되었으며 가상 운반용기의 유효증배계수 0.70043과 합산되어 최종 유효증배계수가 0.782082로 평가되었다.

Table 1. Various Uncertainties and Bias derived by using US. NRC Method

고려 사항	(Δk) ²
1. 임계도 평가과정에 포함될 수 있는 불확실도	
- 연소계산에 대한 불확실도 (Δk_{CORE})	-
- 기계적 공차 혹은 설계변수에 의한 불확실도 (Δk_{CAL})	2.50E-03
- 몬테카를로 방법에 의한 계산 불확실도 (Δk_{STAT})	1.3689E-06
- 임계계산과 실험비교에 의한 불확실도 (Δk_C)	4.819E-05
$\sqrt{\sum (\Delta k)^2}$ (통계적 합계)	0.050433
2. 임계도 해석방법의 편향 (k_{BIAS})	0.031159
3. 가상 운반용기의 유효증배계수 (k_{CAL})	0.70043
최종 유효증배계수	0.782082

Table 2. Uncertainties from Core Condition and Manufacture

1. 노심 운전조건에 따른 불확실도	k_{inf}	Δk	(Δk) ²
- 초기조건	0.90392	-	-
- 노심내 출력준위 (+20% 가정)	0.85862	0.0453	2.052E-03
- 노심내 붕소농도 (최대값 가정)	0.88042	0.0235	5.52E-04
- 노심내 냉각수 온도 (최대값 가정)	0.90056	0.00336	1.13E-05
합계			2.616E-03
2. 기계적 공차 및 설계변수에 의한 불확실도	k_{inf}	Δk	(Δk) ²
- 초기조건	0.89147	-	-
- 핵연료 초기농축도 (+0.05 w%)	0.90211	0.01064	1.1321E-04
- 핵연료 밀도 (+2%)	0.89717	0.0057	3.249E-05
- 펠릿 직경 (+0.0005")	0.89576	0.00429	1.8404E-05
- 피복재 직경 (-0.0015")	0.89704	0.00657	3.1025E-05
- 핵연료 피치 (-0.005")	0.88676	0.00471	2.2184E-05
합계			2.173E-04

국내 임계안전성 평가방법에서는 노심 운전조건과 기계적 공차 및 설계변수에 따른 불확실도를 산출하기 위해 다양한 인자들을 변화시켜가며 유효증배계수의 변화를 분석하고 있으며 구체적인 내용은 표 2에 나타내었다. 특히, 노심내 출력준위 변화로 인한 영향이 유효증배계수에 가장 큰 영향을 미치는 것으

로 확인되었으며 총 반응도 감소분의 5%를 적용하여 산출되는 연소계산의 불확실도는 0.013613으로 분석되었다(표 3 참조). 또한, 축방향 연소도에 따른 불확실도는 총 불확실도의 2%를 적용하여 보수적인 결과가 도출될 수 있도록 하였으며 가상 운반용기의 유효증배계수 0.68349와 합산된 최종 유효증배계수는 0.707473으로 평가되었다.

Table 3. Various Uncertainties and Bias derived by using Domestic Method

고려 사항	(Δk) ²
1. 임계도 평가과정에 포함될 수 있는 불확실도	
- 연소조건에 대한 불확실도 (Δk_{CORE})	2.616E-03
- 기계적 공차 혹은 설계변수에 의한 불확실도 (Δk_{CAL})	2.1731E-04
- 임계계산과 실험비교에 의한 불확실도 (Δk_C)	2.67624E-06
- 몬테카를로 방법에 의한 계산 불확실도 ($2\sigma, \Delta k_{STAT}$)	5.29E-06
$\sqrt{\sum (\Delta k)^2}$ (통계적 합계)	2.841276E-03
2. 연소계산에 대한 불확실도 (Δk_{CAL})	0.013613
3. 임계도 계산방법에 대한 편향 (k_{BIAS})	0.0072
4. 축방향 연소도에 따른 영향 (Δk_{ND})	3.29E-04
5. 가상 운반용기의 유효증배계수 (k_{CAL})	0.68349
최종 유효증배계수	0.707473

4. 결론

본 연구에서는, 연소도이득효과가 적용된 가상 운반용기의 임계안전성을 서로 다른 2가지 방법을 이용하여 비교/분석하였으며 해당용기가 순수로 100% 침수되었다는 사고조건을 가정하여 일련의 계산을 수행하였다. 미국 NRC에서 권고하는 방법을 적용한 경우, 최종 유효증배계수가 0.7802를 나타내었으나 다른 방법을 이용하여 도출된 유효증배계수는 0.7075로 대략 10% 정도 낮게 평가되고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 향후에 수립될 국내 BUC 적용 수송/저장시스템의 인허가 규정에 대해서는, 현재까지의 방법론들을 종합적으로 고려한 후에 표준화된 방법을 개발/적용될 수 있도록 해야 할 것이다.

5. 감사의 글

이 연구는 지식경제부의 고급인력양성사업과 방사성폐기물관리기술개발 사업 및 교육과학기술부의 원자력연구개발사업 지원에 의해 수행되었음.

6. 참고문헌

- [1] DOE, "Topical Report on Actinide-Only Burnup Credit for PWR Spent Nuclear Fuel Packages," DOE/RW-0472.
- [2] DOE, "Isotopic and Criticality Validation for PWR Actinide-Only Burnup Credit," DOE/RW-0497.
- [3] 김경오외 6인, "사용후핵연료 수송/저장시스템 설계시 BUC 적용을 위한 동위원소 함량 보정계수 도출," 2010년 한국방사성폐기물학회 춘계학술발표회 논문집, pp.333-334, 2010.