

연소도고려 임계해석을 적용한 사용후핵연료 운반용기 수용성 결정요소 분석

박덕진, 한영태, 이성희

한국전력기술(주), 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

djpark@kopec.co.kr

1. 서론

연소도를 고려하여 설계되는 사용후핵연료 운반용기에 장전 가능한 핵연료집합체 수는 임계 해석의 최종 결과인 수용곡선(loading curve)에 의해 결정된다. 임계해석에서 고려하는 설계인자에 의한 해석 불확실도를 줄이거나 운반용기의 설계특성(핵연료집합체 장전 간격, 중성자 독물질 농도 등)을 조절하여 수용곡선을 최적화할 수도 있다. 이러한 방법에 의한 운반용기의 핵연료집합체 수용성 증가 또는 연소도고려 임계해석의 적용성 확대 효과는 다양한 설계조건에 대한 임계해석 결과를 반영하는 수용곡선 분석을 통하여 평가된다.

임계해석 설계인자의 해석 불확실도 및 운반용기 설계특성이 수용곡선 산출에 미치는 영향을 파악하면 임계해석 설계인자의 효율적인 선정, 해석에 포함되는 여러 요소들의 중요도에 따른 고려순서 결정, 경제적인 수용곡선 산출 등이 가능하다. 본 분석에서는 임계해석 설계인자에 의한 해석 불확실도, 운반용기에 장전할 핵연료집합체 수, 중성자 독물질 농도, 핵연료 냉각기간 등에 의한 수용곡선의 변화 정도를 검토하고, 국내 운전 중인 WEC형 원전의 핵연료집합체 실제 연소도를 이용하여 분석에 고려된 운반용기의 핵연료집합체 수용성을 평가하였다.

2. 본론

사용후핵연료 장전기준인 수용곡선을 산출하기 위해서는 연소도고려 임계해석 결과에 영향을 미치는 여러 요소들에 의한 해석 불확실도 및 설계여유도 평가가 선행되어야 하는데, 주요 연소계산인자(핵연료 온도, 냉각재 온도, 냉각재 붕소 농도) 및 반응도 계산모델에 적용된 연소도 분포에 의한 불확실도와 핵종 재고량 예측에 수반되는 불확실도 및 바이어스는 별도로 계산된 자료를 이용하였다. 다양한 운반용기모델에 대한 반응도는 RFA(WEC형 17x17 핵연료) 핵연료를 대상으로 하여 SCALE5.1 전산프로그램[1]의 STARBUCS 모듈을 이용하여 계산하였다.

32개의 PWR 핵연료집합체를 장전하는 GBC-32 운반용기모델[2]을 대상으로 하여 산출한 기본적인 수용곡선에 해석과 설계에 관련된 모든 불확실도 및 바이어스를 포함시킬 경우에는 사용후핵연료의 장전 가능 최소 연소도가 U-235 농축도에 따라 40 ~ 60%(U-235 농축도 4.0 wt%인 경우 12 ~ 18 GWD/MTU) 증가한다(액티나이드 핵종만 고려하는 경우, 그림 1 참조). 반응도 계산모델에 적용된 축방향 연소도 분포와 관련해서는 3개 연소도 그룹으로 구분한 경우가 12개 그룹에 대한 것보다 더 높게 나타난다(연소도 30 GWD/MTU 이상에서). 이는 연소도고려 임계해석에서 더 세분화한 연소도 그룹의 축방향 분포 자료를 이용하면 해석에 포함되는 과도한 보수성을 줄일 수 있음을 보여준다. 그러나 연소도 30 GWD/MTU 이하인 경우에는 이러한 효과가 거의 나타나지 않았다. 액티나이드 핵종과 핵분열생성물을 함께 고려하는 경우의 장전 가능 최소 연소도는 기본적인 경우에 비하여 50 ~ 75% 정도 증가한다.

운반용기에 장전되는 핵연료집합체 수에 따른 수용곡선의 변화를 분석하기 위하여 장전용량 이외에는 GBC-32 운반용기와 동일한 설계특성을 가지는 24개 및 21개 핵연료집합체 장전용 운반용기를 가정하여 수용곡선을 산출하였다(그림 2 참조). GBC-32 운반용기 설계의 최적화에 따라 장전되는 핵연료집합체 수의 변경은 다른 결정요소보다 그 영향이 적은 것으로 나타났다. 액티나이드 핵종만을 고려한 경우에 핵연료집합체당 약 0.4 GWD/MTU(U-235 농축도 4.0 wt%), 핵분열생성물을 함께 고려한 경우에는 약 0.2 GWD/MTU의 연소도 변화가 있는 것으로 계산되었다.

동일한 설계조건에서 중성자 독물질로 이용되는 붕소 농도가 증가되면 운반용기에 장전 가능한 핵연료의 최소 연소도는 감소하게 된다. 일정한 붕소 농도에서 U-235 농축도가 증가하면 최소 연소도 감소 폭이 커지며, 붕소 농도가 높은 구간에서는 붕소 농도 증가(U-235 농축도 일정)에 따른 최소 연소도 감소 폭은 작아진다. 붕소 농도 증가에 따른 최소 연소도 감소 정도는 액티나이드 핵종만을 고려하는 경우가 핵분열생성물을 함께 고려하는 경우보다 더 크다. 중성자 독물질 농도를 증가시켜 운반용기의 수용성을 증가시키는 것은 다른 결정요소의 의한 것보다 효과적이지 않

으며 농도 증가에 대한 물리적 한계도 존재한다.

사용후핵연료의 냉각기간이 증가되면 운반용기에 장전 가능한 핵연료의 최소 연소도가 감소하게 되는데, 일정한 연소도에서 U-235 농축도가 증가하면 반응도 감소 정도가 작아진다(그림 3 참조). 따라서 운반용기 설계 시 사용후핵연료의 냉각기간을 실제 발전소내의 저장가능 기간 등을 고려하여 가능한 한 길게 설정하면 핵연료집합체 수용성을 증가시킬 수 있다.

국내 운전 중인 WEC형 원전의 핵연료집합체 방출연소도 자료에 근거해 GBC-32 운반용기의 수용성을 평가한 결과 액티나이드 핵종만을 고려할 경우에는 약 50%, 핵분열생성물을 함께 고려하는 경우에는 약 95%의 핵연료집합체를 수용할 수 있는 것으로 나타났다(그림 4 참조). 동일한 설계특성을 가지는 24개 핵연료집합체 장전용 운반용기에 대해서는 각 경우 약 70% 및 98%의 수용성을 나타내었다.

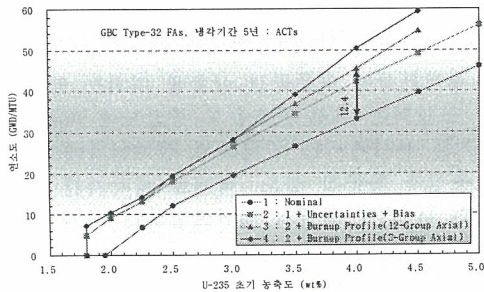


그림 1. 설계인자 불확실도를 반영한 수용곡선

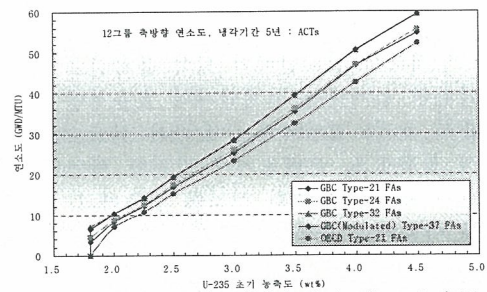


그림 2. 핵연료집합체 장전용량에 따른 수용곡선

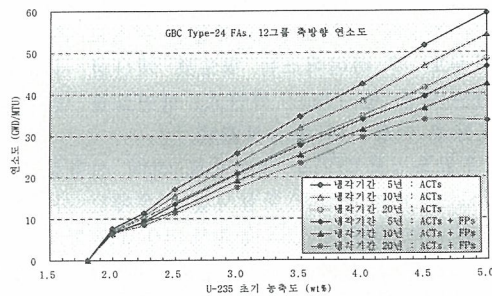


그림 3. 핵연료집합체 냉각기간에 따른 수용곡선

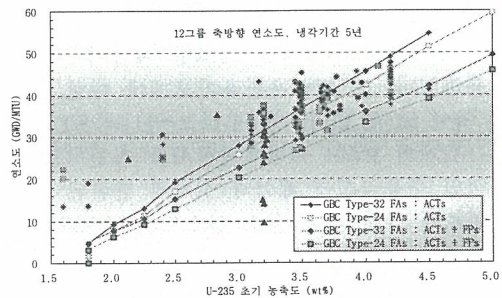


그림 4. 국내 WEC형 원전 핵연료집합체 수용성

3. 결론

본 분석에서는 연소도고려 임계해석을 적용한 사용후핵연료 운반용기 수용곡선에 대한 주요 설계인자의 영향을 검토하고 실제 핵연료의 연소도를 조사하여 운반용기의 핵연료집합체 수용성을 평가하였다. 운반용기 수용곡선 산출 시 가장 중요한 요소는 임계해석의 주요 설계인자들에 의한 해석 불확실도이며, 사용후핵연료 냉각기간, 중성자 독물질 농도 등의 순서로 임계여유도 확보에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. GBC 운반용기 형태의 24개 핵연료집합체 장전용 운반용기에 국내 운전 중인 WEC형 원전의 사용후핵연료를 장전하는 것을 가정하면 연소도고려 시 액티나이드 핵종만을 고려하면 방출된 핵연료집합체의 약 2/3, 핵분열생성물까지 함께 고려하면 대부분의 핵연료집합체를 수용할 수 있는 것으로 평가되었다.

참고문헌

- [1] SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, ORNL/TM-2005/39, Version 5.1, ORNL, (2006).
- [2] J. C. Wagner, Computational Benchmark for Estimation of Reactivity Margin from Fission Products and Minor Actinides in PWR Brunup Credit, NUREG/CR-6474, ORNL, (2001).