

# 사용후핵연료 실제 연소·냉각 이력을 반영한 원자력시설 설계 타당성 연구

조동건\*, 김정우, 정종태, 백민훈

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*dkcho@kaeri.re.kr

## 1. 서론

가압경수로에서 발생하는 사용후핵연료는 방출연소도 및 냉각기간이 다르므로 방사선원항 또한 집합체별로 다르다. 따라서 효율적인 사용후핵연료 관리시설을 설계하기 위해서는 다양한 이력을 갖는 사용후핵연료 집합체의 방사선원항을 각각 고려하여 설계에 반영해야 하나, 이는 지금까지 사실상 불가능하였다. 따라서 이의 대안으로 모든 사용후핵연료를 대표할 수 있는 기준 사용후핵연료를 보수적으로 선정하고, 이를 기준으로 설계안을 도출하였다. 일례로서 2006년에 제시된 한국형 사용후핵연료 기준 처분시스템 (Korean Reference Disposal System, KRS)은 이와 같은 접근방법으로 도출된 것이다.

최근, 한국원자력연구원에서 선진핵주기 방사선원항 평가코드인 ASOURCE를 개발하였으며, 이 코드의 독특한 특징은 원자로 연소조건, 초기농축도, 방출연소도, 냉각기간이 다양한 여러 개의 사용후핵연료에 대해 각각의 연소특성 및 냉각이력을 고려하여 방사선원항을 도출할 수 있다는 것이다. 즉, 국내 발생 모든 사용후핵연료에 대하여 각각의 방사선원항을 도출할 수 있으며, 이는 각각의 사용후핵연료에 대한 방사선원항을 적용하지 못함으로 인해 적용되고 있는 보수성을 줄일 수 있음을 의미한다.

따라서 본 연구에서는 ASOURCE 코드를 활용하여 각 사용후핵연료의 연소 및 냉각이력을 적용하여 원자력시설을 설계할 경우 이에 대한 타당성을 검토하였다.

## 2. 방사선원항 평가 방법

### 2.1 기존 코드 적용 방법

현재 널리 사용되고 있는 방사선원항 평가코드로는 해석하고자 하는 사용후핵연료에 가장 적합한 핵반응단면적으로 이용함으로써 연소되는 원자로의 중성자조건을 반영하는 ORIGEN2, ORIGEN-S 등이 있으며, 로물리 변수를 적용하여 격자계산을 수행함으로써 원자로 연소특성을 좀 더 상세히 적용할

수 있는 SAS2, TRITON 등이 있다.

이들 코드가 제공하는 값은 단일의 연소이력 및 냉각이력에 대한 방사선원항이며, 따라서 저장시설이나 처분시설과 같이, 여러 다발의 사용후핵연료를 대상으로 하는 시설설계에는 각 핵연료 다발의 연소이력을 고려할 수 없으므로 보수적인 연소이력 및 냉각이력을 대상으로 방사선원항을 도출하고 이를 이용하여 시설설계를 수행하고 있다[1].

### 2.2 ASOURCE 적용 방안

제3차 원자력연구개발사업을 통해 개발된 ASOURCE 코드의 가장 두드러진 장점은 다양한 연소이력 및 냉각이력을 그대로 반영하여 방사선원항을 도출할 수 있다는 것이다. 즉, 사용후핵연료 한다발에 대한 방사선원항을 도출할 때, 축방향 영역별로 비출력 및 방출연소도를 각각 적용하여 방사선원항을 도출하고 이를 평균하여 집합체의 방사선원항을 도출할 수 있다. 또한, 여러 다발의 사용후핵연료를 대상으로 하는 시설설계에도 각 사용후핵연료 집합체의 연소이력을 고려하여 방사선원항을 도출할 수 있으므로 기존에 적용되던 보수성을 줄여서 시설을 설계할 수 있는 특징이 있다[3].

## 3. ASOURCE를 이용한 원자력시설 설계 최적화

### 3.1 한국형처분시스템 개선 가능성

한국형처분시스템(KRS)은 한국원자력연구원에서 제1차 원자력연구개발사업을 통해 개발한 사용후핵연료 직접처분 시스템이다. 가압경수로에서 발생한 사용후핵연료 처분용기 개발시 모든 사용후핵연료의 방사선원항을 고려할 수 없어 기준사용후핵연료로 17×17 집합체, 농축도 4.0wt.%, 방출연소도 45 GWd/tU, 냉각기간 40 년을 가정하고, 보수적으로 설계안을 도출하였다.

앞서의 설계안에 대해 각각의 사용후핵연료의 방사선원항을 고려하여 보수성을 줄였을 경우, 완충재 최대 온도 100°C를 유지하면서 얼마만큼의 처분장의 크기(footprint)를 감소시킬 수 있는지를 평가하였다.

고려대상 사용후핵연료는 고리 1호기에서 2007

년까지 발생한 사용후핵연료만을 대상으로 하였으며, 고리 1호기를 선택한 이유는 기존 KRS 설계시 고려된 전체 사용후핵연료의 연소특성이 고리 1호기에서 발생한 사용후핵연료와 유사하기 때문이다. ABAQUS6-10을 사용하여 열해석을 수행하였으며, 터널간격 및 처분공간격을 변화시켜가면서 완충재에서의 최대온도를 계산하였다.

계산 결과, 터널간격 30 m, 처분공 간격 4 m를 갖는 설계안은 최대온도 94.5°C로서 기존 설계안 최대온도보다 낮게 유지되는 것으로 나타났다. 이는 사용후핵연료를 조합하여 처분용기에 적재할 경우 처분장 면적으로 50%까지 줄일 수 있음을 의미한다.

### 3.2 건식저장시설 개선 가능성

미국 미시간주의 Fermi 2 사이트에는 비등경수로에서 발생한 사용후핵연료를 위한 여섯 개의 건식저장시설이 설치되어 있다. 저장시설 설계 시 대상 사용후핵연료 각각의 방사선원향을 고려할 수 없으므로 설계기준 사용후핵연료로 GE7×7 설계안, 방출연소도 40GWd/tU, 냉각기간 3 년을 가정하였다. 건식저장시설에서의 설계제한치로는 측면 및 하부 에어덕트(air duct)에서 135 mRem/hr, 상부에서 60 mRem/hr를 적용하였다.

두 개의 건식저장 캐스크를 대상으로 실제 장전되어있는 사용후핵연료의 연소 및 냉각이력을 기반으로 ASOURCE를 이용하여 각 사용후핵연료의 개별 방사선원향을 도출하고 이를 건식저장시설 내 선원분포를 적용한 후, 차폐계산을 수행한 후 해석값과 실측치와의 차이를 비교하였다. Table 1은 Campaign 1 Cask 3에 대한 위치별 표면선량을 해석 결과를 나타내고 있다.

Table 1. Calculated Surface Dose Rate

		Adjacent		30 cm		1 m	
		Dose (mrem/hr)	fsd	Dose (mrem/hr)	fsd	Dose (mrem/hr)	fsd
Side	Neutron	0.081	(0.02)	0.058	(0.02)	0.037	(0.02)
	Photon	0.525	(0.04)	0.406	(0.04)	0.285	(0.03)
Air Duct	Neutron	0.133	(0.04)	0.042	(0.05)	0.016	(0.08)
	Photon	0.808	(0.04)	0.493	(0.06)	0.365	(0.09)

해석결과, 캐스크 표면에서의 방사선량률은 측면에서 약 0.6 mRem/hr, 에어덕트에서 약 0.9 mRem/hr를 나타내었다. 에어덕트에서의 실측값은 실측치의 경우에는 감마의 경우, 0.4 mRem/hr를 나타내 실측값에 근접한 값을 나타내 ASOURCE

를 이용하여 각 사용후핵연료의 연소이력을 반영할 경우에도 실측치에 매우 근접함을 확인하였다.

앞서 언급한 것처럼 측면에서의 방사선량률 설계제한치는 135 mRem/hr이다. 그러나 해석 값의 경우 0.6 mRem/hr 정도를 나타내고 있다. 이렇듯, 설계제한치와 실제 장전된후의 선량률이 차이를 보이는 이유는 사용후핵연료 각각의 방사선원향을 적용할 수 없어 설계기준 사용후핵연료 선정시 보수성을 지나치게 많이 적용했기 때문이다. 따라서 ASOURCE와 같은 코드를 적용하여 실제 방사선원향을 좀 더 현실적인 값을 적용한다면 지나친 보수성을 줄일 수 있고 이는 저장시설의 경제성 향상으로 직결될 수 있다. 개략적인 평가결과, ASOURCE를 이용하여 최적화를 수행할 경우 캐스크 무게를 현 무게의 60% 정도로 줄일 수 있음을 확인하였다.

## 4. 결론

본 논문에서는 사용후핵연료 각각의 방사선원향을 실제 적용할 경우 해석값의 신뢰도와 어느 정도의 이득을 얻을 수 있는지에 대해 개략적으로 분석하였다. 분석결과, 사용후핵연료 한국형 처분시스템에 대해서는 처분면적을 약 50% 정도 줄일 수 있음을 확인하였으며, Fermi 2 사이트에 설치된 건식저장시설에 대해서는 약 40% 정도 무게를 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

따라서 현재 방사선원향에 지나치게 적용되고 있는 보수성을 줄이기 위한 노력을 심도 있게 진행해야 할 것이다.

## 5. 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 산하 한국연구재단의 지원(No. 2012M2A8A2025589) 하에 수행되었음을 알려드립니다.

## 6. 참고문헌

- [1] 최종원 외, "고준위폐기물 처분기술개발-처분시스템개발," 한국원자력연구원, KAERI/RR-2765/2006 (2006).
- [2] D.K. Cho et. al., "Advanced hybrid analysis system for nuclear facility design with best estimate source terms," Nuclear Engineering and Design, 256: 274-284 (2013).