

운반·취급 기계적 건전성 평가 모델 개발용 사용후핵연료 선정을 위한 구조 특성 분석

김중진*, 엄경보, 박남규, 이성기, 유종성

한전원자력연료(주), 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 242

*joongjin@knfc.co.kr

1. 서론

국내에는 약 40년 동안 원전 운용으로 발생된 사용후핵연료가 현재 각 원전 임시저장시설에 저장 중에 있으며, 2020년대 중반 전후로 포화 상태에 이를 것으로 예견되고 있다. 이에 대한 대책으로 지속발전 가능한 원자력 산업을 보증하고, 사용후핵연료를 효율적으로 관리하기 위한 옵션으로 건식 중간저장이 유력한 대안으로 고려되고 있다. 현재 이를 위한 국민 안심 제고 차원의 기술개발을 국가적으로 추진하고 있다. 기술개발 핵심사항 중 하나가 사용후핵연료 운반/취급 및 장기저장 열화 건전성 평가이며, 이를 위한 신뢰성 있는 모델이 필요하다.

국내에는 15종 이상의 다양한 사용후핵연료가 존재하며, 동종의 핵연료라도 적용된 소재, 원자로 조사이력 등 또한 매우 다양하다. 그리고 일반적으로 사용후핵연료는 원자로의 가혹한 환경을 경험하고 장기간 수중에 노출된 상태로 물리·화학적 특성이 신연료 대비 많은 변화로 인해 불확실성과 비선형성이 크다. 이 모든 요건을 감안하여 시험 및 평가모델 개발을 하는 것은 시간/비용 측면에서 불가하며, 상당히 비효율적이다. 따라서 시험 및 모델 개발을 위하여 보수적으로 대표 할 수 있는 사용후핵연료 선정이 우선적으로 수행되어야 한다. 여기서 핵심적으로 고려되어야 할 사항으로는 기계적 건전성, 시편제작성, 원전운영의 시급성(예: 고리 1호기 영구운전 정지) 등이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 해외 선행 연구사례[1, 2]를 고찰/분석하고, 앞서 언급한 여러 가지 요인을 고려하여 국내 사용후핵연료 건전성 평가체계 구축 및 평가를 위한 시험/모델링용 대표 저연소도(45 GWD/MTU 이하) 사용후핵연료를 제시 하고자 한다.

2. 해외 대표 사용후핵연료 선정 방법론

2.1 재료 특성 정의

EPRI(미, 전력연구원)는 핵연료 조사후 특성에 대해 구축된 DB 시스템(MATPRO[2])를 참조하여

모델의 재료 특성을 정의하였다. 즉, 조사로 인한 지르코늄의 기계적 물성 변화를 결정짓는 요소인 증성자 플루언스, 산화/수소화, 소재의 제조방법 및 기타 핵연료에 대한 여러 가지 구조 및 물리적 인자 등을 고려하여 재료 특성을 정의하였다. 다만 대표 사용후핵연료 선정 시에는 동일 재료 특성조건에서 상대 비교만으로 충분할 것으로 판단된다.

2.2 핵연료 선정을 위한 낙하해석

10CFR71 규제요건에 의해 1 m와 9 m 높이에서 단순 빔 모델을 사용하여 수직 및 수평방향 낙하해석을 실시하였다. 사용후핵연료 중 가장 손상이 심한 대표 사용후핵연료를 결정하기 위해 총 8종(WH사 15x15, 17x17, CE사 14x14, 16x16, B&W사 15x15, 17x17, GE사 7x7, 8x8)이 고려되었으며, 평가는 CESHOCK 코드를 사용하여 각 낙하조건별 평가 인자인 좌굴하중 및 굽힘응력을 평가 하였으며, WH사 17x17형 연료를 기준으로 정리한 결과를 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Axial and Side Drop Analysis Results

연료타입	수직낙하	수평낙하
	각 좌굴하중 / 좌굴하중*	각 굽힘응력 / 굽힘응력*
WH사 17x17*	1.00	1.00
CE사 14x14	3.71	0.95
B&W사 15x15	2.42	0.96

평가 결과 각 낙하 조건별 고려해야 할 핵심 인자인 좌굴하중과 굽힘응력이 WH사 17x17형 사용후핵연료가 가장 취약한 것으로 평가되어 대표 사용후핵연료로 선정되었다. 이 후 상세모델평가 및 연료봉 손상평가에는 WH사 17x17형 대표 사용후핵연료로 평가를 수행하였다.

3. 시험용 사용후핵연료 선정 변수 설정

3.1 국내 사용후핵연료 현황

현재 국내에는 Fig. 1에 정리한 바와 같이 원자

로형태, 설계/제작 특성, 재질 노내 운전이력에 따라 25기의 원전에서 15종 이상의 매우 다양한 종류의 사용후핵연료가 존재한다. 국내 원전에서 임시 저장중인 사용후핵연료는 고리 원전을 시작으로 수년 내에 포화가 될 예정이며, 특히 고리 1호기 원전은 영구 운전정지가 예정 되어 사용후핵연료 처리가 필수적인 상황이다.

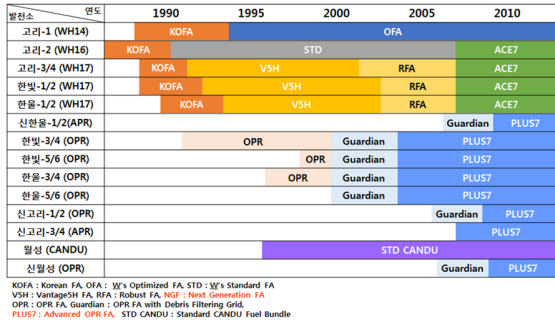


Fig. 1. Nuclear Fuel Loading History in Korea.

3.2 시험용 사용후핵연료 선정 요건 및 평가

2장의 해외에서 사용한 방법론을 참조하여 시험용 사용후핵연료 선정에 필요한 핵연료집합체 주요 부품 평가 및 기타요인 들을 통해 도출된 기술요건을 Table 2에 기술하였다.

Table 2. Evaluation Parameters of Spent Nuclear Fuel

Items	Priority	Fields of evaluation
Cladding	Most important	- Cladding thickness - Yield strength - Fracture toughness - Operation and inspection histories including the number of leaked rods - Hydride content - Corrosion
Top/bottom nozzles	Important	- Yield strength - Stress from self-weight etc.
Guide tube including TN joint	Important	- Tube thickness - Stress from self-weight etc. - Fracture toughness - Welding/mechanical joint status
Grid	Important	- Strap thickness - Impact strength
Other joints and connections	Less important	- Welding/mechanical joint status - Joint strength
Mock-up fuel manufacturability	Most important	- Material supply plan - Manufacturing line operability - Component manufacturability
Fuel service availability	Most important	- Handling tool and device - Reconstitution

기술 요건	Global Parameters	- Impact stress - Grid impact strength - Buckling strength - Impulse - Bending stress - Envelope difference between cask & fuel assembly
	Local Parameters	- Hoop stress in the cladding tube - Stress intensity factor - Rod to rod gap

시험용 사용후핵연료 선정을 위해 국내에서 발전기간이 제일 오래 되었으며, 영구 운전정지가 예정된 고리 1호기 핵연료집합체인 14OFA와 EPRI 평가에서 선정된 대표 사용후핵연료 중 하나인

17V5H에 대해 Table 2 기술요건에 따라 도출된 연료봉 건전성에 대한 평가인자들을 상대 비교하여 Table 3에 정리하여 보수성을 평가하였다.

Table 3. Evaluation of Key Parameters Effect on Cladding Tube Integrity

Parameters	14OFA	17V5H
무게		>
스팬길이		<
지지격자 폭		<
집합체 단면 2차모멘트		<
연료봉 좌굴 하중		>
지지격자 스프링 강성		유사
지지격자 좌굴강도		>

두 종류 사용후핵연료 평가결과 두 연료의 우수한 인자의 수는 유사하다. 하지만 낙하 충격시 연료봉에 미치는 핵심 인자는 집합체 단면 2차모멘트와 스펠길이 임을 감안할 때 14OFA 핵연료가 건전성에 더 취약할 것으로 판단되어 시험용 사용후핵연료로 제시하고자 한다.

4. 결론

해외 대표 사용후핵연료 선정 방법론 및 기타 여러 요건 등을 고려하여 14x14 OFA를 시험용 사용후핵연료로 선정(안)하였으나, 추가 평가 등을 수행하여 최종적으로 확정 할 예정이다. 이를 토대로 장기건식저장을 운반·취급 사용후핵연료 상세 모델 개발 및 기계적 건전성 평가를 수행할 예정이다.

5. 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2014171020166C)

6. 참고문헌

- [1] SAND90-2406, "A Method for Determining the Spent-Fuel Contribution to Transport Cask Containment Requirements." (November, 1992).
- [2] EPRI, NP-7419, "Fuel Assembly Behavior Under Dynamic Impact Loads Due to Dry-Storage Cask Mishandling" (July, 1991).