

## 건식저장을 위한 사용후핵연료 구조건전성 평가 수행체계 정립에 관한 연구

이성기, 남윤석, 김용환, 전상윤, 최기성, 조창석  
 한전원자력연료, 대전광역시 유성구 대덕대로 1047  
[skilee@knfc.co.kr](mailto:skilee@knfc.co.kr)

### 1. 서론

사용후핵연료 건전성 평가 분야는 크게 핵분열 물질인 우라늄 펠릿을 함유하고 있는 핵연료봉과 이를 제외한 핵연료 구조부품들로 구성된 집합체 구조물에 대한 평가로 구분될 수 있다. 이 중 집합체 구조건전성 분야의 경우는 현재 국내에서 평가 및 연구의 방법론, 방향성 등이 정립되지 않음에 따라 본 연구에서는 국외 선형 연구 사례 및 규제현황, 핵연료집합체의 거동분석 등을 통한 사용후핵연료 건식저장을 위한 구조건전성 기본 평가 수행체계에 대한 방향성을 정립하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 사용후핵연료 구조 건전성 평가 국외 사례

핵연료집합체 구조물의 건전성은 저장용기와외 구조적 양립성, 용기 개발시 제한 핵연료 선형, 건식 저장후 사용후핵연료를 최종 목적에 맞게 처리하기 위한 회수시의 건전성 유지 측면, 임계 및 열전달에 관한 냉각 가능 구조 유지 여부, 손상 분류 체계에 대한 근거 제공 등 사용후핵연료 건식저장 관련 건전성평가를 위한 여러 가지 필수 기술 요소로 자리매김하고 있는 것으로 파악되었으며 관련 사항은 다음과 같다.

##### 2.1.1 구조변형 평가 규제 요건[1], [2]

사용후핵연료의 구조건전성 평가 근거로 미국 규제 기관의 사례를 조사 및 분석하여 다음과 같이 관련 항목들을 도출하였다. 즉, 사용후핵연료는 반드시 회수가가능(10CFR72. 122[i]) 해야 하고, 총체적 파손으로부터 보호되어야 하며(10CFR72. 122[h]), 관련 시스템과 양립성(10CFR72. 236[h]) 유지되어야 한다고 기술되어 있다. 아울러 정상 및 가상사고 조건에서 사용후핵연료의 구조건전성, 형상에 관한 사항(10CFR71.55[d]) 및 사용후핵연료 관련 용기 내부구조물에 대한 기하학적 형상은 심하게 변형 되서는 안 된다고 명시되어

있다 (10CFR71.71). 사용후핵연료 용기 개발시, 이 사항들을 평가 및 검증하기 위하여 핵연료집합체 구조적 골격을 이루는 안내관과 지지격자에 대한 구조 건전성 평가 등을 수행한다.

##### 2.1.2 사용후핵연료 손상 범주 정의[1]

사용후핵연료의 손상에 관한 정의는 관련공정 에 대한 정상적 또는 지속적 수행 가능성에 대한 주요 판단기준이 되며, 비정상적 수단을 강구할시 기본 정보가 되는 중요한 사항이다. 따라서 세계 원자력관련 주요국들은 자국의 사용후핵연료 처리 정책 및 관련 인프라에 따라 사용후핵연료 손상에 대한 정의를 달리하고 있다. 미국의 경우는 운송이나 수송과 같은 사용후핵연료 사업목적 및 인허가 규제사항 요건을 충족시키면 정상 핵연료로 간주될 수 있다고 유권해석을 내리고 있으므로 구조건전성 평가측면에서 손상 체계 분류는 관련 시스템, 규제 요건, 여러 시나리오 또는 시스템 요건에 따라 가변적일 수 있다.

##### 2.1.3 사용후핵연료 구조건전성 평가 적용 사례[2]

사용후핵연료 구조건전성 평가 적용 주요 사례로는 용기 개발시 시간과 비용 저감뿐만 아니라 보수적 평가를 위하여 사용후핵연료 기계적 특성 평가를 통한 제한 핵연료를 선정하여 관련 해석 및 시험 등을 수행한다. 또한 핵연료집합체의 뒤틀림, 휨, 연료봉 휨 등의 핵연료 형상적 열화 상태 정보 들도 사용후핵연료 건식저장 관련 임계, 열, 차폐, 기타 구조 평가 분야에 모사되어 용기와 일체화된 평가 및 상호 피드백을 통한 최적 설계를 수행하는 데 활용된다.

### 2.2 국내 사용후 핵연료 설계 특성

국내 가압경수로형 원전에 사용되어 온 핵연료는 원전의 형태(예: 웨스팅하우스형 14x14, 16x16, 17x17 및 한국표준형 16x16), 공급사(예: Westinghouse, Framatome, ABB-CE, KNFC), 핵연료 모델(예: OFA, V5H, RFA, ACE7, KSFA,

Guardian, PLUS7 등) 및 핵심부품인 피복재의 재질에 따라 다양한 특성 분석 및 평가를 통하여 건식저장을 위한 평가범위, 방법론 개발 등에 활용 할 수 있다. 한편, 국내 경수로 원전에서 발생한 손상 현상은 한전원자력연료가 손상 원인분석을 포함하여 별도 관리하고 있다. 이러한 핵연료의 유형 및 설계특성 분석 결과는 제한 핵연료 및 손상 분류체계 정립 등에 적용될 수 있다.

2.3 핵연료집합체 구조변형 메카니즘

사용후핵연료는 제조, 이동, 취급 및 장전, 노심내 연소중 상단고정체 누름력, 연소 또는 노심 냉각수 흐름 등의 불균일 성 등 일련의 여러 외력들의 결합하여 구조변형이 내재 되어있다. 이 변형은 공정 및 시간에 따라 특정 외력이 지배적이며, 이에 따른 인장, 압축, 굽힘 모멘트 등 여러 하중 모드들이 발생할 수 있으나 구조변형을 지배하는 것은 압축하중 모드이며, 단지 여러 상황에 따라 응력 강도에 다소 변화가 있을 수 있다. 이에 대한 사항은 다음과 같이 응력 개념식과 자유물체도로 표현할 수 있으며, 각 요소들에 대한 상세 분석을 통하여 사용후핵연료에 대한 유사 거동 출현시 각각에 세부거동에 대한 평가 방법론을 정립할 수 있다.

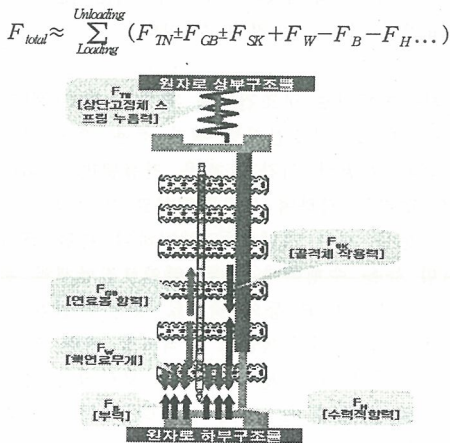


Fig. 1. Free body diagram of fuel behavior

2.4 구조건전성 평가 요건

사용후핵연료의 구조건전성에 대하여 체계적인 평가를 수행하기 위하여 장기건식저장에 대한 평가 기준, 방법 등과 같은 기본적인 평가 요건을 정립하였다. 이는 크게 응력, 기하형상, 재료 열화 분야로 분류하였으며, 각 평가 요건은 다음과 같

다. 사용후핵연료 응력에 대한 평가 기준은 ASME 코드 NB, NG 등을 적용할 수 있으며, 기타 등가 변위 또는 가속도 수준으로 설정 평가를 수행할 수 있다. 한편 기하 변형은 사용후핵연료의 기본 외곽 치수 정보를 타 평가항목으로 제공 목적으로 이용되며, 특히 용기와 양립성 평가 등에 필요한 주요 정보가 된다. 이에 대한 평가는 핫셀 시험 및 기존 핵연료집합체 평가기술을 이용할 수 있으나, 세부사항은 건식저장 시스템에 종속적이다. 보수적인 구조강도 평가 결과를 산출하기 위해서는 재료 열화정보가 관련 해석의 초기조건으로 반영되어야 하며, 건식저장 전후의 회수성 등과 같은 여러 평가항목을 하기 위한 부식 제한치 등의 기준 설정이 필요하다.

3. 결론

사용후핵연료 집합체 건전성평가 수행체계 정립을 위하여 미 규제요건 등 다양한 사항을 검토, 분석하여 관련 기본 수행체계를 정립하였으며, Fig.2와 같이 수행 흐름도로 나타내었다.

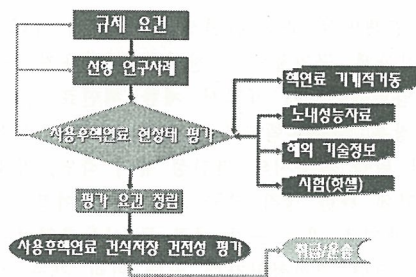


Fig. 2. Work flow of SNF evaluation procedure

4. 감사의 글

본 연구는 지식경제부 방폐물관리기술개발 사업비 후원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

[1] Spent fuel performance assessment and research, IAEA-TECDOC-1343, IAEA, 2003.  
 [2] Fuel-Assembly Behavior under Dynamic Impact Loads Due to Dry-Storage Cask Mishandling, 2008.