

## 사용후핵연료-운송/저장 시스템 연동 응답 및 건전성 평가 체계에 관한 연구

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

### 1. 서론

국내 사용후핵연료 처리와 관련해서는 정부 정책이 현재 유보 상태이지만 사용후핵연료 중간저장이 여러 처리 옵션과 결부되어 유력한 시나리오로 논의되고 있다. 따라서 중간 저장과 관련하여 일반적이고 공통 핵심 요소 기술 개발에 대한 연구가 요구되고 있으며, 이 중 하나가 사용후핵연료 건전성 평가 기술이다. 그러나 현재까지 사용후핵연료 건전성 자체에 대한 심도 있고 체계적인 연구수행 사례가 국내에는 없었으며, 이에 대한 기술개발이 시급한 실정에 있다.

따라서 본 연구에서는 사용후핵연료 구조 건전성 평가관련 해외 방법론 등을 분석하여 이 분야 연구의 수행 당위성 및 근거 등을 파악하고, 아울러 국내 장전된 사용후핵연료에 설계 및 연소 특성에 관한 고찰을 통하여 장기 건식저장 측면에서 사용후핵연료 구조 건전성 평가 수행체계를 제안하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 사용후핵연료 구조건전성 국외 평가 체계

해외 여러 유수의 사용후핵연료 저장 및 운송 시스템 관련 사업자 및 국책 연구기관들은 고유 건전성 평가 체계를 구축, 사용후핵연료 건전성 및 용기 최적 설계에 활용하고 있다. 여기서 평가의 수행 근거로 수송 규제 요건(10CFR71)에서는 정상운전조건에서 사용후핵연료 건전성이, 저장 규제 요건(10CFR72)에서는 저장후 회수성이 반드시 보장되어야 한다는 것이다. 이외 여러 세부 요건에서는 사용후핵연료 구조 건전성을 직간접적으로 요구한 것을 평가의 수행 근거로 삼고 있다.

먼저 미전력연구원에서는 통상 한 용기에 여러 종류의 사용후핵연료가 수용됨을 고려하여, 시간과 비용 저감 차원에서 대표핵연료선정을 위한 여러 가지 구조 응답 특성 평가를 수행한다. 그리

고 최종 선정된 대표 사용후핵연료와 캐스크 시스템에 대한 상세 모델링을 통하여 상호 응답 특성을 파악하고, 최종적으로 피복관 건전성 여부를 평가한다. 특히, 정상 및 가상 조건 아래 캐스크 및 이 내부구조물과 사용후핵연료와 상호작용 등을 고려하여 연계 평가의 중요성을 강조하고 있다. 또한 사용후핵연료가 원자로에서 조사 등 여러 가지 운전 이력을 겪으면서 발생한 재질 특성의 열화와 연료봉 및 핵연료 구조 변형(휨 및 비틀림)과 같은 사용후연료 초기조건도 반영하여 보수적인 평가를 내놓고 있다. 최종적으로 연료봉 건전성이 유지되는 임계 낙하 높이를 산출하여 캐스크 시스템 자체의 성능평가를 수행하고 있다.

한편 미 샌디아 국립연구소에서는 앞서 언급한 방법론과 유사한 평가 방법론을 사용 있는데, 먼저 사용후핵연료-캐스크, 연료봉에 상세 모델링을 통하여 결정론적으로 피복관 응력을 평가하고, 아울러 이 응력대비 연료봉 손상 기준을 통계 처리하여 확률론적 방법으로 건전성평가를 수행하고 있다. 특히, 손상 연료 수용성 등을 포함하여 평가를 수행한 것이 특징이다. 미국 인허가 규제기관인 NRC 경우도 사업자들이 신청한 인허가 내용에 대한 검증 및 기술적 배경 제공 차원에서 최근 이슈화 되고 있는 고연소연도 사용후핵연료에 대한 운송중 낙하조건에서 구조건전성 및 연료봉 응답 거동을 평가하였다. 그림 1에서 보듯이 사용후핵연료 재료 및 구조 특성 등을 고려한 세부적인 모사를 통하여 최종 연료봉 건전성을 평가하였다[1].

#### 2.2 사용후핵연료-캐스크 연동 응답 메카니즘

통상 사용후핵연료는 운송 또는 저장 캐스크 내에서 체류 기간 동안 여러 정상 및 가상 사고 환경에 놓이게 된다. 이 중 대표 항목 중 하나가 운송용기 낙하이며, 캐스크-사용후핵연료 응답 거동을 설명하기 위해서 강성도가 다른 스프링(가변 스프링 피치)을 이용하여 개념적으로 그림 2와 같

이 나타내었다. 여러 낙하 모드(횡방향, 축방향, 경사방향)에서 최초 충격 전달부분은 충격 완충기 영역이며, 이 부분이 완전 붕괴시 스폰지 현상에 의해 강성이 급격히 증가하여 캐스크와 내부구조물(캐니스터)로 충격력이 순차적으로 전달된다. 이 때 캐스크와 내부구조물은 자체 강성이 커서 강체 거동을 하며, 변형이 있더라도 미량이다. 한편 사용후핵연료는 캐스크 내부와 약 1 cm 정도의 간극을 유지하고 있는데, 내부구조물 변형에 의한 형상 간섭 영향과 충격 응답으로 인한 반작용 거동으로 인해 내부 구조물과 2차, 3차 충격모드가 형성 된다. 모드별 다소 차이가 있겠지만, 하중 경로는 사용후핵연료 최외곽에 위치하고 있는 지지격자로 전달되어 지지격자 스프링 및 연료봉과 비선형 상호작용 결과 또는 지지격자에 의해 지지되지 않는 부분에 대한 굽힘 변형량 등에 따라 피복관 건전성 유지여부가 결정된다. 이러한 시스템 구조 응답시 사용후핵연료 변형(휨, 뒤틀림 등), 재료열화 등이 반영됨으로서 평가 결과의 보수성을 보장 하면서, 정밀한 응답 결과를 얻을 수 있다.

2.3 캐스크-연료 연계 건전성평가 체계 수립

현재 국내 운전중인 17개 경수로 원전에는 그동안 다양한 설계특성을 갖는 사용후핵연료가 장전되어 왔으며, 동일 사용후핵연료라도 운전이력 및 적용된 재료 특성에 따라 그림3에서 보는 여러 구조변형 인자로 인해 다양한 물리적 상태를 유지하고 있다. 따라서 국내 역시 비용과 시간저감 차원에서 용기시스템 개발시 우선 대표 사용후핵연료를 선정하는 평가가 필요하며, 이 대표 사용후핵연료에 대한 세부평가를 통하여 건전성에 영향을 주는 캐스크 시스템의 중요 변수들에 대한 최적설계를 수행하여야 한다. 또한 피복관에 대한 열화특성 및 사용후핵연료 주요 구조부품인 지지격자, 골격체의 등에 조사후 특성을 확인하기 위해 시험 및 해석 방법론을 정립할 필요가 있다.

3. 결론

현재까지 국내에서는 사용후핵연료 건전성 평가 관련한 체계적 평가 기술이 없으며, 이에 해외 사례와 국내 사용후핵연료 특성 등을 고려하여 관련 평가 수행에 대한 정성적이고 개념적 체계를 제시하였다. 향후 이에 대한 기술개발 및 규제요건이 정립될 필요가 있다.

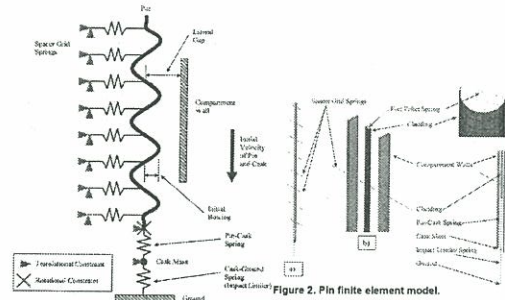


Fig. 1. Structural Integrity Modeling of SNF[2]

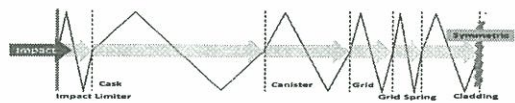


Fig. 2. Response Concept of Cask-SNF

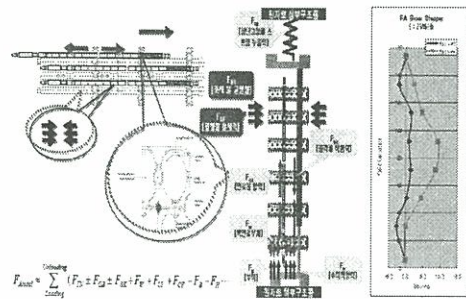


Fig. 3. Free Body Diagram of Fuel Behavior

4. 감사의 글

본 연구는 지식경제부 방폐물관리기술개발 사업비 후원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

[1] S. K. Lee et al, “건식저장의 사용후핵연료 구조변형평가”, KAERI/CM-1399/2010, KEPCO NF, 2011.  
 [2] D. T. Tang et al, “High Burn-up SNF Structural Response When Subjected to a Hypothetical Impact Accident”, PATRAM 2004.