

사용후핵연료 기계적 건전성 평가를 위한 전산모사 모델개발 및 검증

권오철*, 박남규, 김소영, 이성기, 유종성

한전원자력연료, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 242

*ockwon@knfc.co.kr

1. 서론

사용후핵연료는 안전한 건식저장을 위해 필수공정인 운반/취급에 관한 건전성 평가가 선행되어야 한다. 그러나 많은 종류의 사용후핵연료를 대상으로 시험적 평가를 수행하는 것은 국내 시험시설 등 연구 인프라를 고려할 때 상당히 어려운 상황이므로, 해석적 평가를 수행하는 것이 보다 효율적인 대안이 된다. 해석적 평가를 위한 모델을 구축하기 위해 우선 구조적으로 가장 취약한 대표 사용후핵연료를 선정하고 선정된 사용후핵연료를 기반으로 정밀한 건전성 평가를 수행하는 것이 최적의 수행체계이며, 선행 연구사례에서도 이와 유사한 방법으로 평가를 수행하였다[1,2].

대표 사용후핵연료 선정을 위한 평가는 상용코드를 이용하여 사용후핵연료 부품 및 집합체 구조적 특성을 나타내는 전산모사 모델을 개발하여 시험에 준하는 해석을 수행하여야 한다. 그리고 전산모사 모델 개발을 위해서는 사용후핵연료 치수 및 재료 물성치의 불확실성과 구조적 비선형성 때문에 반드시 시험결과를 바탕으로 모델의 유효성을 검증하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 대표 사용후핵연료 선정을 위해 한국표준형원전용 특정 사용후핵연료를 대상으로 구조 건전성 평가를 위한 전산모사모델을 개발하여 횡방향 진동시험(Lateral Vibration Test), 횡방향 충격시험(Lateral Impact Test), 수직낙하시험(Axial Drop Test)을 기반으로 모델의 유효성을 검증하였다.

2. 본론

2.1 전산모사모델 개발

본 논문에서 대상으로한 한국표준형 사용후핵연료는 상/하단고정체, 상/하부지지격자, 9개의 중간지지격자, 4개의 안내관, 1개의 계측관, 그리고 236개의 연료봉으로 구성되어 있다. 모든 부품의 동적 거동을 모사 할 수 있는 전산모사 모델을 Fig. 1과 같은 형상을 갖도록 개발하였다. 하단고정체 하부

에서 상단고정체 상부까지 동일한 단면속성을 갖는 오일러 보(BEAM) 요소로 모델링하였고, 집중질량 요소를 이용하여 최 상단 및 최 하단 절점에 상/하단고정체의 질량을 추가하였으며, 지지격자 높이에 는 지지격자, 피복관, 펠렛, 안내관, 그리고 계측관의 질량을 스펜(Span) 길이에 따라 계산하여 추가 하였다.

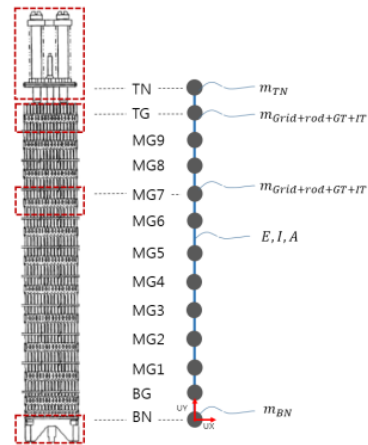


Fig. 1. FEM Model of Spent Nuclear Fuel.

2.2 전산모사모델 유효성 검증

사용후핵연료 전산모사 모델을 횡방향 진동시험(Lateral Vibration Test), 횡방향 충격시험(Lateral Impact Test), 수직낙하시험(Axial Drop Test) 결과를 기반으로 비교하여 유효성을 검증하였다.

횡방향 진동시험 결과를 이용한 고유진동수 유효성 평가를 위하여 상/하단고정체 절점에 대한 모든 자유도를 구속하고 모드해석을 수행하였다. Fig. 2에서 보는바와 같이 1차 고유진동수는 정확히 일치하고 고차모드 또한 유사함을 확인할 수 있었고, Fig. 3은 모드형상을 보여준다. 따라서 동역학적 관점에서 전산모사 모델은 유효함을 알 수 있다.

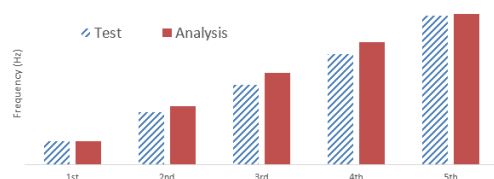


Fig. 2. Modal Analysis & Test Results Comparison.

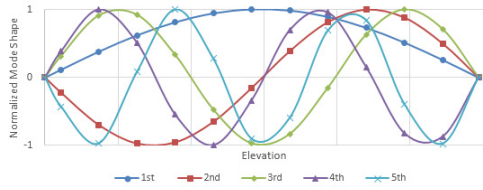


Fig. 3. Mode Shape of Analysis Model.

횡방향 충격시험 결과를 이용한 유효성 평가를 위하여 Fig. 4와 같이 지지격자 높이에 모든 자유도가 구속된 절점을 추가하였고 절점과 각 중간지지격자 절점을 스프링과 간격(Gap) 요소로 연결하였다. 사용후핵연료 중간부분의 지지격자에 시험조건과 동일한 초기 변형을 주며 횡방향 충격해석을 수행하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 중간지지격자 충격력은 유사한 경향을 보여 지지격자 충격관점에서 전산모사 모델이 유효함을 알 수 있었다.

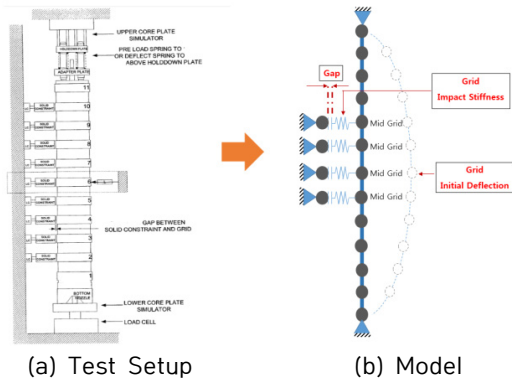


Fig. 4. Lateral Impact Analysis Model of Spent Fuel.

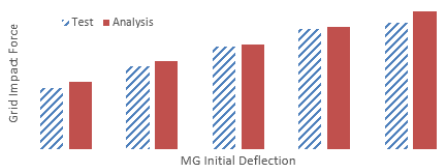


Fig. 5. Lateral Impact Analysis & Test Results Comparison.

수직낙하시험 결과를 이용한 유효성 평가를 위하여 Fig. 6와 같이 사용후핵연료 하단에 모든 자유도가 구속된 절점을 추가하고 자유낙하가 가능하도록 상/하단고정체의 경계조건을 자유단으로 설정하였다. 사용후핵연료 시험조건과 동일한 초기 높이를 주며 수직낙하해석을 수행하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 중간지지격자 충격력은 유사한 경향을 보였고 자유낙하 하단고정체 충격관점에서 전산모사 모델은 유효함을 알 수 있었다.

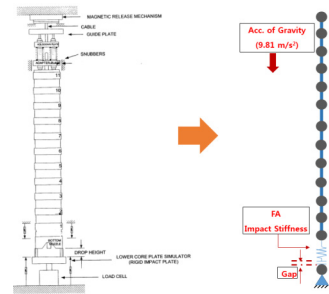


Fig. 6. Axial Drop Analysis Model of Spent Fuel.

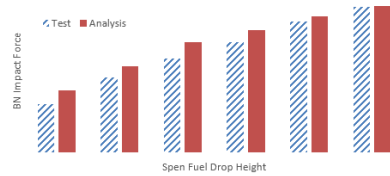


Fig. 7. Axial Drop Analysis & Test Results Comparison.

3. 결론

대표 사용후핵연료 선정을 위한 전산모사 모델을 개발하였고 집합체 단위 시험결과와의 비교를 통해 개발된 전산모사모델의 유효성을 검증하였다. 본 모델은 사용후핵연료 수직 및 수평방향 사고조건 평가에 적합함을 확인하였다. 향후 동일 방법론으로 WH형 사용후핵연료를 추가 개발하여 전산모사해석을 통하여 대표 사용후핵연료 선정에 활용할 예정이다.

4. 감사의 글

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

5. 참고문헌

- [1] EPRI, "Fuel-Assembly Behavior under Dynamic Impact Loads Due to Dry-Storage Cask Mishandling", 1991.
- [2] Sandia National Laboratories, "A Method for Determining the Spent-Fuel Contribution to Transport Cask Containment Requirements", 1992.
- [3] 김중진, 엄경보, 박남규, 이성기, 유종성, "운반·취급 기계적 건전성 평가 모델 개발용 사용후핵연료 선정을 위한 구조 특성 분석", 한국방사성폐기물학회 2016 춘계학술발표회 논문요약집, 14(1), 53-54, 5.25-27, 2016.