

# 사용후핵연료 피복관 낙하 충격해석

조상순\*, 최우석, 서기석, 양운영

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*sscho96@kaeri.re.kr

## 1. 서론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 사용후핵연료 피복관, 지지 그리드, 캐스크(cask), 충격완충체(impact limiter)를 등가적으로 모델링하고, 낙하 충격 해석을 수행하였다. 사용후핵연료 피복관의 유한요소는 보요소(beam element)와 셸요소(shell element)로 각각 모델링하여 그 결과를 비교하였다. 낙하 충격 해석은 ABAQUS를 이용하였으며, 2가지 요소에 대하여 ABAQUS/Explicit과 ABAQUS/Implicit 해석을 각각 수행하여, 사용후핵연료 피복관의 건전성 평가 방법론의 신뢰도와 정확도를 검증하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 연구 배경

고연소도(45-75 Gwd/MTU) 사용후핵연료의 수송 또는 저장시 발생할 수 있는 가상적 충격사고조건(hypothetical impact accident condition)에 대한 피복관(spent fuel cladding)의 건전성 평가는 최근에 점점 중요한 관심사로 떠오르고 있다. 사용후핵연료 피복관은 사고하중의 입력조건, 핵연료 형상 및 재료 물성치에 따라 파손모드가 변하게 된다. 고연소도 사용후핵연료 피복관의 물성치 시험 결과에 따르면 연신율은 1-2.5% 알려져 있으며, 하중이나 경계조건에 따라 최대 연신율이 변화한다고 알려져 있다[1]. 따라서 가상적인 충격사고하중에 대한 피복관의 건전성 및 파손모드 평가를 위해서는 피복관, 지지격자(spacer grid), 결합판(tie plate), 물성치 등의 영향을 모두 고려하여야 한다. SNL은 고연소도 단일 사용후핵연료 피복관과 사용후핵연료집합체에 대하여 낙하충격해석을 위한 유한요소 모델링과 해석방법론을 기술하였고, 사용후핵연료 피복관의 건전성 평가방법에 대하여 기술하였다[1]. USNRC와 PNNL은 참고문헌[1]을 기초로 하여 고연소도 단일 사용후핵연료 피복관의 낙하해석을 위하여 셸요소를 이용한 유한요소모델링 방법과 건전성 평가방법에 대하여 기술하였다[2,3]. 본 과제에서도 참고문헌[1-3]에서 제시한 유한요소모델링 방법과 해석방법을

이용하여 단일 사용후핵연료 피복관, 지지 그리드, 캐스크, 충격완충체를 등가적으로 모델링하였다. 그리고 사용후핵연료 피복관의 유한요소는 보요소와 셸요소로 각각 모델링하여 그 결과를 비교하였다. 충격해석은 2가지 요소에 대하여 각각 ABAQUS/Explicit과 ABAQUS/Implicit의 2가지 해석방법을 적용하고, 사용후핵연료 피복관의 건전성 평가에 있어서 신뢰도와 정확도가 높은 해석방법론을 찾고자 한다.

### 2.2 유한요소모델 및 해석조건

#### 2.2.1 유한요소모델

핵연료 피복관은 핵분열 시 발생하는 방사성 물질이 외부로 유출되는 것을 막고, 핵반응이 안정적으로 일어나도록 돕는 역할을 한다. 본 장에서 다루는 피복관의 제원은 외경  $\phi_o=9.7$  mm, 내경  $\phi_i=8.433$  mm, 길이  $L=4072$  mm 이다. 피복관은 각 지지격자 사이에서 각각 활모양(initial bowed geometry)으로 휘어져 있는 것으로 초기 모델링하였다[1-3]. 본 장에서 다루는 지지격자집합체는 피복관을 따라 총 8개로 구성되며, 각 지지격자는 압축만 작용하는 스프링(compression-only spring)으로 모델링하였다. 각 지지격자를 모사하는 스프링의 한 끝단은 피복관에, 다른 끝단은 바스켓의 한 절점에 고정하였다. 충격완충체는 변형량에 대하여 일정한 하중이 작용하는 비선형스프링요소로 모델링하였다.

#### 2.2.2 해석조건

사용후핵연료 피복관의 낙하충격해석을 위한 경계조건과 초기조건은 다음과 같다.

- 하단고정체 스프링과 충격완충체는 수직방향으로만 움직인다.
- 격벽의 모든 자유도는 고정된다.
- 지지격자 스프링은 격벽과 피복관에 고정된다.
- 피복관, 캐스크 질량의 초기속도는 9 m 낙하에 해당하는 13.41 m/s를 부가한다.

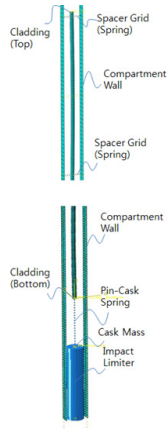


Fig. 1. Equivalent finite element model for spent fuel cladding and storage cask.

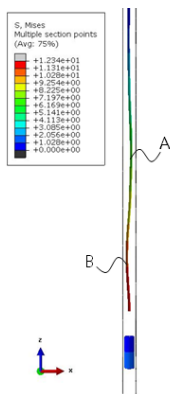


Fig. 2. von-Mises stress distribution along the spent fuel cladding in 9m drop.

### 3. 결론

사용후핵연료 연료봉의 손상 영향을 평가하기 위한 낙하충격해석 모델링과 해석 방법론을 개발하였다. 연료봉의 유한요소를 보요소와 쉘요소로 나누어 모델링하였고, 각각 ABAQUS/Explicit과 ABAQUS/Implicit의 2가지 해석방법을 적용하여 그 결과를 비교하였다. 연료봉을 쉘요소로 모델링하여 낙하충격해석을 수행하면 가속도와 변형률의 결과에 분산 오차와 응력파 분산에 의하여 진동현상이 매우 심하게 발생하였다. 반면, 연료봉에 보요소와 ABAQUS/Explicit을 적용하면 참고문헌과 가장 유사한 결과를 보여 모델링방법론과 해석방법론의 신뢰도와 정확도를 검증하였다. 따라서 핵연료집합체의 피복관은 보요소로 모델링하고, 해석방법은 ABAQUS/Explicit을 적용하여 충격해석을 수행하여야 효율적이고 정확한 결과를 얻을 수 있다는 결론을 얻었다.

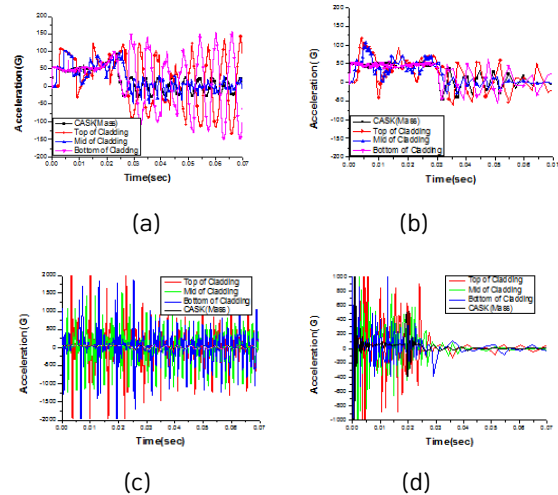


Fig. 3. Comparisons of the acceleration history with respect to the types of time integration and elements: (a) Explicit method, Beam element; (b) Implicit method and beam element; (c) Explicit method and shell element; (d) Implicit method and shell element.

### 4. 감사의 글

본 연구는 원자력안전연구사업(1503003-0115-SB120)의 지원으로 수행되었습니다.

### 5. 참고문헌

- [1] SAND90-2406, TTC-1019, "A Method for Determining the Spent-Fuel Contribution to Transport Cask containment Requirements", Sandia National Laboratory (1992).
- [2] D. T. Tang, J. Guttman, B. J. Koepfel and H. E. Adkins, "High Burn-up Spent Nuclear Fuel Structural Response when subjected to a Hypothetical Impact Accident" Proceedings of ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Division Conference (2004).
- [3] H. E. Adkins, B. J. Koepfel and D. T. Tang, "Spent Nuclear Fuel Structural Response when subjected to an End Impact Accident", Proceedings of ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Division Conference (2004).