

## 사용후연료 건식 저장용기의 구조평가

### Structural Evaluation of Spent Fuel Dry Storage Cask

서기석, 이재한, 강경훈, 박성원\*, 정성환\*\*  
한국원자력연구소\*, 한국수력원자력(주)\*\*

#### 요 약

사용후연료 저장과 관련된 규정 중 구조에 대한 예상운전사고 및 설계기준사고의 구조 안전성이 보장되도록 설계하여야 한다. 이러한 구조 평가항목으로서 낙하, 전복, 폭풍, 홍수 및 지진으로 인한 사고에 대하여 하중조건과 구조적 개념평가 방법을 제시하고, 콘크리트 저장시스템에 대한 예비 구조안전성 해석을 수행하였다.

#### Abstract

In a various regulations and standards related to the spent fuel storage, the storage casks should be designed to sustain the structural integrity under the accident conditions of predicted operation and design criteria. These conditions for the structural evaluation requires the drop, tip-over, wind like tornado and typhoon, flood and earthquake. This paper describes the load cases and conceptual evaluation method for the structural evaluation. Preliminary safety analysis of the concrete storage system were performed.

#### 1. 서 론

사용후연료의 중간저장시설에 대한 계획은 국가적 차원에서 2016년에 운영하도록 되어있다. 그러나 원자력 발전소의 일부는 2008년부터 저장시설이 포화되기 시작할 것으로 예상하고 있다. 따라서 원자력 발전소 부지에 사용후연료 저장시설을 마련하는 것은 불가피한 것으로 판단된다. 현재 사용후연료의 저장시스템에 대한 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 원자로 건물에 설치된 습식형 저장시설은 확장의 한계가 있으므로 독립적인 저장시설을 필요로 하고 있다. 독립적인 사용후연료 저장방식은 저장용기, 볼트, 모듈 등 종류가 있으며, 콘크리트 저장용기 방식을 일반적으로 경제적 이유로 많이 사용되고 있다. 본 논문은 콘크리트 저장용기의 구조 개념평가를 기술하였다.

#### 2. 사용후연료 건식 저장용기의 구조 설계요건

사용후연료 저장과 관련된 규정으로는 IAEA Safety Series No. 116[1], US 10 CFR Part

72[2] 등이 있으며, 표준규격으로는 ANSI/ANS-57.9[3] 등이 있다. IAEA Safety Series No. 116 “사용후연료 저장시설의 설계”는 일반사항, 미임계, 구조 및 배치, 방사선 방어, 격납, 열제거, 재질, 취급 등 8개 부분으로 구성되며, US 10 CFR Part 72 “사용후연료 및 고준위 방사성폐기물의 독립저장시설에 대한 인허가 요건”은 대부분 인허가 부분을 다루고 있으며, 12개의 Subpart로 구성된다. 사용후연료 건식저장시설의 구조설계에 적용할 항목으로 구조 및 배치, 격납, 재질, 예상운전사고 및 설계기준사고의 구조 안전성 등에 관련한 사항을 고려하여야 한다.

예상운전사고로서의 낙하해석과 설계기준사고의 지진, 폭풍, 홍수 등과 같은 조건에서 구조 건전성이 보장되도록 설계되어야 한다. 사고로 인하여 전복될 경우에도 안전성을 유지할 수 있어야 한다. 적재될 핵연료 바스켓 또는 용기의 중량(최대 저장 핵연료무게 포함)으로 인하여 취급상 문제점이 야기될 정도의 구조적 변형이 발생하지 않도록 설계하여야 하며, 아울러 정 하중, 충격하중 및 내진 하중도 고려하여야 한다. 지진설계기준은 10CFR Part 100에서 이전에 평가된 원자력발전소 부지의 safe-shutdown earthquake 기준보다 크거나 같아야 하며, 적절한 안전 여유도를 가지고 최소 20년 동안 수명이 보장되도록 하여야 하며, 강화 콘크리트 구조물은 차폐, 환기 및 날씨로부터의 보호 역할을 수행하여야 한다.

### 3. 사용후연료 건식 저장용기의 구조평가

#### 3-1. 사용후연료 건식 저장용기의 구조

일반적인 사용후연료 건식 저장용기는 콘크리트 저장용기시스템으로 내부 캐니스터와 콘크리트 저장용기로 구성된다. 캐니스터(Canister)는 사용후연료를 적재하기 위한 용접된 원통형 구조물로써, 외부 구조물인 원통형 셸(shell), 뚜껑(lid), 바닥 판(baseplate), 마감 링(closure ring)과 바스켓 집합체(Basket assembly)로 구성된다. 콘크리트 저장용기는 사용후연료가 적재된 캐니스터를 저장하기 위한 단단하고 튼튼한 원통형 용기이며, 내부 셸과 외부 셸, 그리고 내부 셸과 외부 셸 사이의 차폐 기능 및 압축 강도를 제공하는 콘크리트 차폐체로 구성된다. 특히 저장용기의 상하부에 열 제거를 위한 공기 흡배기구가 있다.

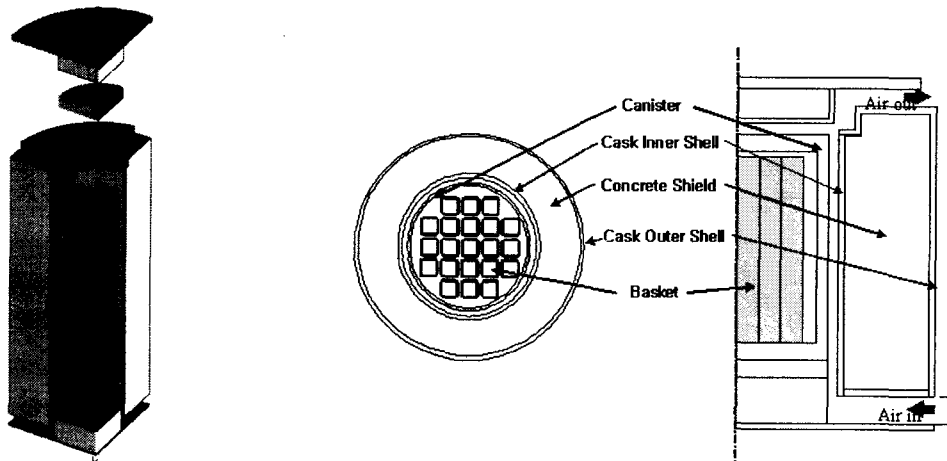


Fig 1. Configuration of Spent Fuel Storage Cask

#### 3-2 낙하해석

##### 1) 저장용기의 수직낙하해석

사고 조건에 의한 낙하 시 공기 흡입구에 발생하는 응력의 평가는 공기 흡입구를 구성하는 강

판 구조물에서 변형이 크게 발생한다. 이때 변형의 정도가 허용치를 넘지 않아야 한다. 콘크리트 저장용기의 하단부의 강판(steel plate)에 대한 유한 요소 모델링 및 준정적 해석은 구조 평가용 상용 프로그램인 ABAQUS/Standard를 사용한다.[1] 콘크리트 차폐체, 셸 구조물 및 캐니스터는 자체의 구조적 강성은 없는 것으로 단순하중으로 가정하여, 공기 흡입구의 강판 구조물에 대해 작용하는 분포하중으로 고려한다.

공기 흡입구의 강판 구조물의 응력강도 한계치는 탄성해석에서 ASME NF를 적용한다.[2] 공기 흡입구의 강판에서 발생하는 계산응력이 허용응력을 초과하는 하중 조건을 찾기 위해 각각의 하중조건에 대하여 최대 응력의 값을 가속도의 변화에 의한 분포하중의 증가에 따라 응력의 변화를 평가한다.

2) 바스켓의 수평낙하해석

콘크리트 저장용기의 수평 낙하 및 전복조건에 대해 사용후연료 미임계 안전성 유지를 위해 바스켓의 낙하 해석 평가가 필요하다. 저장용기의 내부 바스켓에 대하여 Plane Strain의 조건을 단면을 2차원으로 형상화하고, ABAQUS/Standard를 사용하여 모델링 및 해석을 수행한다. 재질의 기계적 특성은 순수하게 탄성변형만을 고려하고 바스켓 내부의 사용후연료는 단순히 하중으로만 작용하며, 바스켓을 고정하는 구조물과 캐니스터의 내벽은 변형이 없는 강체로 가정한다. 바스켓의 강판 구조물의 응력강도 한계치는 탄성해석에서 ASME NG를 적용한다.[3]

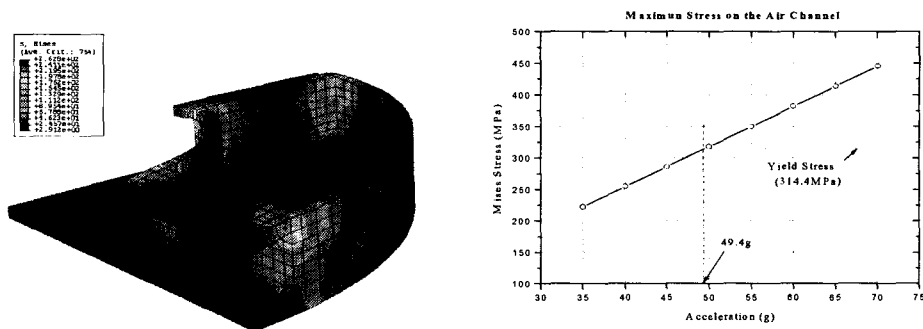


Fig. 2 Stress Contour and Maximum Stress on the Air Channel.

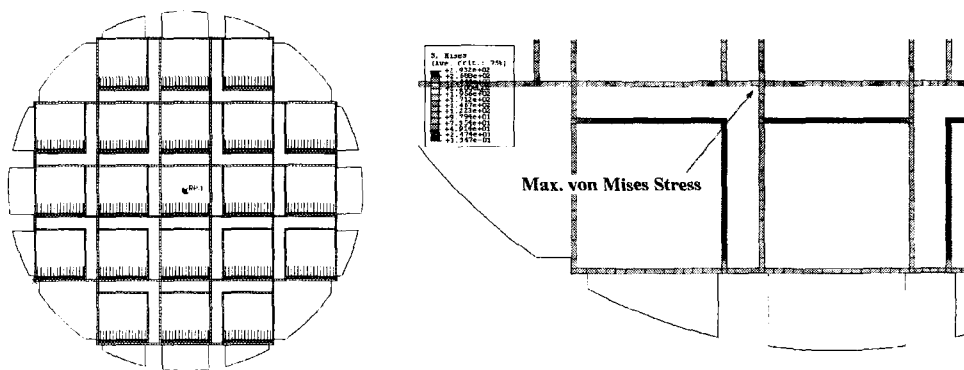


Fig. 3 Load Condition and Stress Contour of Basket.

### 3-3 전복평가

폭풍 및 홍수에 의한 풍속 및 유속은 압력으로 저장용기의 측면에 수평하중으로 작용한다. 이러한 힘은 저장용기의 미끄러짐 혹은 전복의 원인이 된다. 홍수 및 폭풍에 의해 저장용기는 저장용기 바닥 면의 외곽 점을 중심으로 회전하게 된다. 폭풍과 홍수 하중에 의한 모멘트가 저장용기의 자중에 의한 모멘트 보다 크다면 전복이 발생된다. 그리고 미끄럼 평가는 부력을 고려한 자중에 대한 마찰력과 폭풍 및 홍수에 의한 미끄러짐을 유발하는 힘을 비교함으로써 평가한다.[4]

### 3-4 지진평가

내진평가는 단순모델에 의한 수식평가와 ABAQUS 전산프로그램을 이용한 시간이력해석평가를 모두 수행한다. 저장용기를 보수적 평가를 위해 하단 고정된 외팔보 모델로 가정하여 고유진동수를 계산하며, 수직방향으로 지진가속도에 의한 반 중력 방향 하중을 가한 상태에서 수평방향으로 지진가속도와 동등한 정하중을 주어, 저장용기의 복원모멘트에 의한 전복 가능성을 평가 하였다.

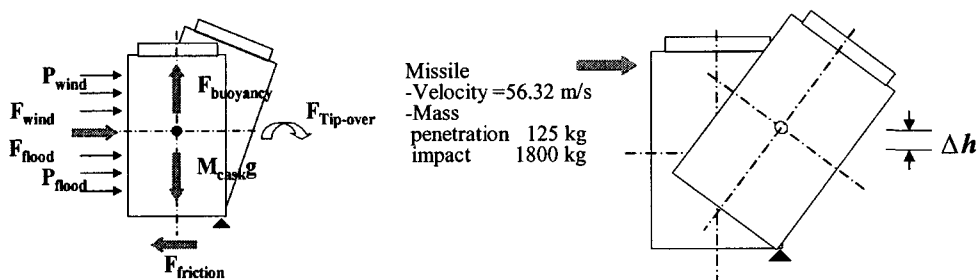


Fig. 4 Tip-over by Wind, Flood and Missile Impact Load.

시간이력해석에 의한 내진평가는 US NRC RG1.60에 제시한 가속도 스펙트럼을 근거로 작성한 수평 및 수직방향 가속도시간이력 설계지진에 대한 비선형 시간이력해석을 수행하며, 지진에 대한 시간이력해석은 개념설계 단계의 신속한 평가를 위하여 저장용기 내부구조물은 균일한 질량분포를 갖는 것으로 가정한다. 해석결과 미끄러짐과 들림 현상을 평가한다. 그러나 이들 값은 저장용기의 탄성 설치판과 저장용기의 유연성에 의한 국부 가속도의 영향으로 판단된다. 저장용기를 강체로 모델링한 경우에는 수평 미끄러짐이 발생하지 않는다. 저장용기 내의 저장용기 바닥의 미끄러짐과 들림은 설계지진에 대하여 매우 작은 정도로 발생하며 이를 통해 저장용기의 전복을 평가할 수 있다.

## 4. 결과 및 토의

사용후연료 저장과 관련된 규정 중 낙하, 전복, 폭풍과 홍수로 인한 가상사고 후에도 안전한 저장조건이 보장되도록 설계하여야 한다. 이에 대한 평가로 수직낙하 사고조건에서는 구조적으로 가장 취약할 것으로 예상되는 공기 흡입구에 대해 유한요소 구조해석 방법으로 구조적 건전성을 확보할 수 있는 충격 가속도를 평가하며 수평낙하에 대해서는 바스켓 구조물에 대해 수직낙하와 같은 방법으로 평가한다. 또한 전복에 대한 기준 조건을 정립하여 홍수 및 폭풍에 따른 전복 발생 유무를 평가할 수 있으며 지진 평가에 대해서 계산 모델 및 해석 모델에 대해 제시된 가정 및 조건으로 구조적 건전성을 평가하여 사용후연료 저장용기의 구조 평가에 대한 기본 자료로 활용할 수 있다.

## 5. 참고문헌

- 1 ABAQUS/Standard User Manual, V.6.3
- 2 ASME Boiler and Pressure Vessel code section III subsection NF
- 3 ASME Boiler and Pressure Vessel code section III subsection NB
- 4 Rothbart, H., Mechanical Design and Systems Handbook, McGraw-Hill, 1985