

# PSA를 위한 사용후핵연료 저장캐스크의 충돌 해석 및 평가

이상훈<sup>1\*</sup>, Belal Almomani<sup>2</sup>, 강현국<sup>2</sup>

<sup>1</sup>계명대학교, 대구광역시 달서구 달구벌대로 1095

<sup>2</sup>한국과학기술원, 대전광역시 유성구 대학로 291

\*shlee1222@kmu.ac.kr

## 1. 서론

2024년 한빛원전부터 시작되는 사용후핵연료 저장조의 포화에 대비하여 국내 원자력계는 사용후핵연료의 건식저장을 준비하고 있다. 건식저장시설의 도입에 앞서 해당 시설의 입지 및 운영으로 인한 주변 환경의 방사선적 위해도를 정량적으로 평가하는 것은 매우 중요한 작업이다. 이를 위해서는 적합한 사건수목을 도출하고 각각의 사건의 영향을 평가하는 작업이 필요하다. 본 논문에서는 사용후핵연료 저장시설에 발생할 수 있는 가장 가혹한 사건의 하나인 대형 항공기의 의도적 충돌을 고려한 확률론적 안전성 평가(PSA)를 수행하기 위하여 저장캐스크에 항공기 엔진이 다양한 각도와 속도로 충돌하였을 때의 구조 거동을 평가하는 방법 및 절차에 대하여 다룬다.

## 2. 참조 저장시설 및 용기

본 연구에서 고려된 참조 저장시설은 아래 그림과 같이 단일 벽체의 건물 내에 한 개의 저장캐스크가 배치되어 있는 시설이다.

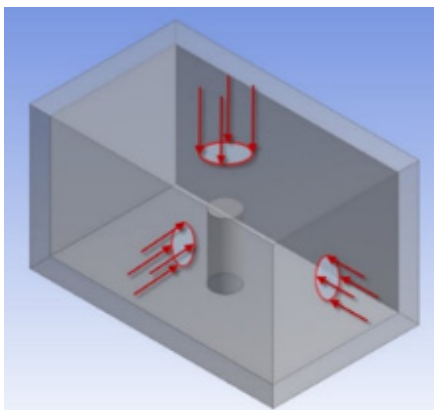


Fig. 1. Reference storage facility.

연구에 활용한 참조 저장캐스크는 21다발의 PWR 연료를 저장할 수 있는 단일 볼트체결 격납구조를 가지는 용기이다. 항공기 충돌로 인한 방사성물질 누출을 평가하기 위해서는 건물의 관통여부 및 캐스크의 구조적 거동을 모두 평가해야 한다.

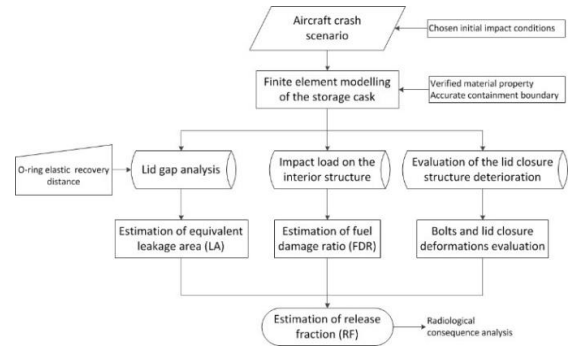


Fig. 2. Estimation of release fraction in aircraft crash.

Fig. 2는 상기 참조저장시설에 항공기가 충돌하였을 때 방사선 유출을 평가하기 위한 절차이다.

## 3. 항공기충돌 시나리오 및 조건

### 3.1 항공기 충돌 시나리오

본 연구에서 고려한 항공기 충돌시나리오는 대형 민항기의 의도된 충돌로서 Fig. 1에 제시된 참조 저장시설의 벽체를 항공기의 엔진이 관통한 후 잔류속도를 가지고 저장 캐스크를 타격하는 시나리오를 고려하였다. 구체적으로 보잉사의 B747기의 충돌을 고려하였고, 가장 강성이 큰 부품인 엔진에 의한 타격이 주 평가대상이다. 항공기 엔진의 제원 등은 Shirai 등[1]이 발표한 논문에 제시된 내용을 따랐다.

### 3.2 항공기 충돌 속도 및 위치

PSA를 위하여 다양한 충돌속도 및 충돌위치를 고려한 평가가 필요하다. 저장건물의 벽체를 관통한 항공기 엔진이 아래 그림과 같이 총 5가지 위치에 충돌할 수 있다고 보고 각각의 경우에 대하여 평가를 수행하였다.

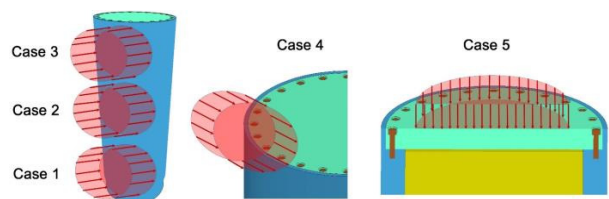


Fig. 3. Locations of aircraft engine impact.

캐스크에 항공기가 충돌하는 속도는 보수적으로 40 m/s에서 160 m/s로 설정하였다. 이 속도는 항공기의 엔진이 두께 70 cm인 건물의 벽체를 관통한 후의 잔류속도로써 벽체 관통 전 속도로 환산하면 100 m/s에서 275 m/s가 된다. 각각의 속도로 충돌하는 항공기 엔진은 실제로 모델링하지 않고 Riera 공식과 Shirai 등[1]이 제시한 B747 엔진의 충돌하중이력선도를 활용하여 아래와 같이 등가의 충돌하중이력선도로 대체하였다.

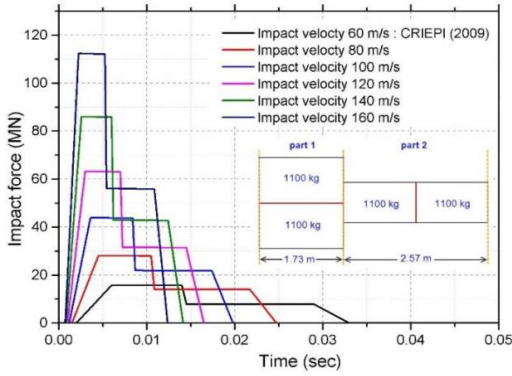


Fig. 4. Impact load-time function for various velocity.

### 3.3 방사성물질 누설경로 평가

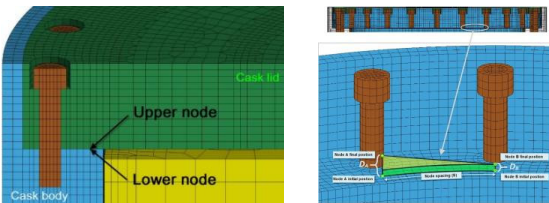


Fig. 5. Cask lid closure and lid gap analysis.

항공기 충돌로 인한 방사선적 위해도 평가의 핵심 내용 중 하나는 충돌로 인한 핵종의 누출량 평가이다. 본 연구에서는 Fig. 5에 제시된 바와 같이 충돌 시 캐스크 뚜껑과 본체 사이에 발생하는 틈새의 단면적을 계산하여 누설량 계산의 근거로 활용하였다. 뚜껑의 열림량이 격납경계에 사용된 금속 오링의 탄성회복거리보다 큰 경우 누설이 발생하는 것으로 간주하였으며, 볼트재료에 손상(failure)공식을 적용하여 특정 변형률 이상 변형되었을 볼트가 끊어지는 현상을 모사하였다. 실제로 누설량을 계산하기 위해서는 핵연료 손상비율(fuel damage ratio), 캐스크 내부압력 등을 알아야 하며 해당 내용은 본 논문에서 다루지 않는다.

### 4. 평가결과

아래 그림은 측면 충돌(case 1, 2, 3) 시 다양한 충돌속도 하에 누설경로 생성이력을 도시한 것이다.

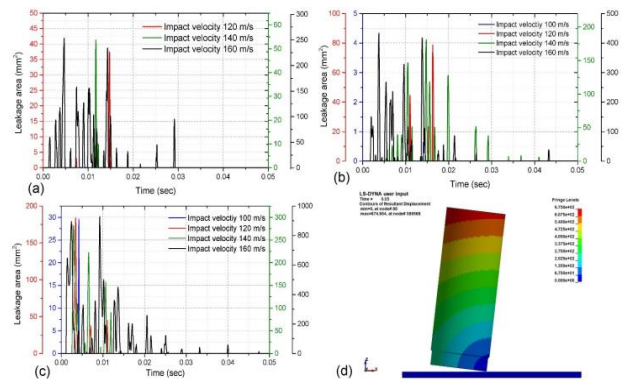


Fig. 6. Lid opening time history (case 1, 2, 3).

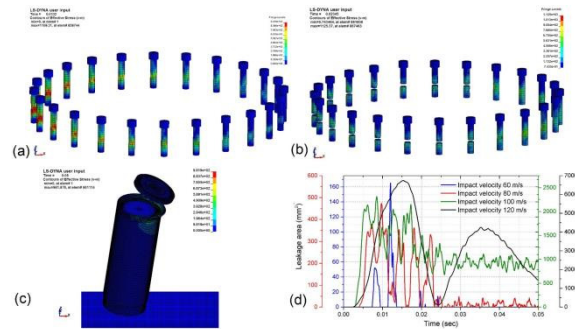


Fig. 7. Lid opening time history (case 5).

본 연구에서 고려한 총 5가지 충돌위치에 대하여 평가를 수행한 결과 캐스크 뚜껑을 수직으로 타격하는 조건이 가장 가혹함을 알 수 있었으며 측면 충돌의 경우 충돌에너지의 상당량이 캐스크의 동적 에너지로 전환되므로 저장시설 내 다른 캐스크 혹은 구조물과의 2차 충돌이 중요한 평가 대상이 되어야 한다는 결론을 도출하였다.

### 5. 결론

이상과 같이 단일벽체 저장건물과 금속 캐스크로 구성된 가상의 저장시설에 항공기가 다양한 각도와 속도로 충돌하는 경우 건물 및 캐스크의 구조응답을 평가하였다. 본 연구는 본격적인 PSA를 수행하기 위한 연구의 일부로서 용기 내부에 저장된 연료의 파손, 핵종 누출 및 이에 따른 영향평가는 별도의 연구로 진행될 예정이다.

### 6. 참고문헌

[1] K. Shirai, K. Namba, T. Saegusa, Safety analysis of dual purpose metal cask subject to impulsive load due to aircraft engine crash, J. Power Energy Systems 3 (2009) 72-82.