

## 강풍과 비산물에 대한 사용후핵연료 건식저장 캐스크의 안전성 예비 검증모델

정재학, 송민철, 육대식, 정해용, 안상면, 이윤근  
 한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 과학로 34  
 radwaste@kins.re.kr

### 1. 서론

캐스크 방식의 사용후핵연료 건식저장시스템의 안전성은 핵임계 방지, 붕괴열 제거, 방사선차폐, 수명기간 동안 격납성능 유지 등 다양한 안전사태에 대한 종합적인 평가를 통해 입증되어야 한다. 이 논문에서는 건식저장시스템의 안전성능에 영향을 미칠 수 있는 강풍과 비산물의 충돌에 의한 캐스크의 밀립과 전도에 대한 안전성을 검증할 수 있는 단순화된 평가모델을 제시하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 강풍에 의한 영향평가 모델

콘크리트 패드(Pad) 위에 수직 적치된 원기둥형 캐스크가 강한 바람을 받게 되면, 캐스크의 밀립(Sliding) 또는 전도(Overturning) 사건이 발생할 수 있다. 캐스크가 바람에 의해 받는 풍력(N)은 항력방정식(Drag Equation)을 이용해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{Wind} = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot A_{Cask} \cdot v_{wind}^2, \quad (1)$$

여기서,  $\rho$  = 공기 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $v_{wind}$  = 풍속(m/s),  $A_{Cask}$  = 캐스크 단면적(m<sup>2</sup>),  $C_d$  = 항력계수(-).

캐스크 바닥면과 패드 사이의 마찰력(N)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{Friction} = M_{cask} \cdot g \cdot \mu_{static}, \quad (2)$$

여기서,  $M_{cask}$  = 캐스크의 질량(kg),  $g$  = 중력가속도(9.81 m/s<sup>2</sup>),  $\mu_{static}$  = 정적마찰계수(-).

풍하중에 의한 전도모멘트는 캐스크의 중량에 의해 저항을 받으므로, 전도모멘트(N·m)와 복원모멘트는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M_{Tipping} = F_{Wind} \cdot h_{CM}, \quad (3)$$

$$M_{restoring} = M_{Cask} \cdot g \cdot r_{Cask}, \quad (4)$$

여기서,  $h_{CM}$  = 캐스크 질량중심의 높이(m),  $r_{Cask}$  = 캐스크 수평단면의 반지름(m).

수식 (1)내지 (4)로부터, 풍하중으로부터 캐스크의 밀립현상 및 전도가 발생되지 않기 위한 최소한의 조건은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{Friction}/F_{Wind} > 1, \quad (5)$$

$$M_{restoring}/M_{Tipping} > 1. \quad (6)$$

#### 2.2 비산물에 의한 영향평가 모델

중량 비산물(Missile)이 적치된 캐스크의 하부를 고속으로 충격하면 밀립이 일어날 수 있으며, 캐스크의 상부를 충격하면 전도가 일어날 수 있다. 비산물이 캐스크를 측면에서 충격한 직후 캐스크가 움직이는 최고속도(m/s)는 운동량 보존법칙에 따라 다음과 같이 계산할 수 있다(단, 캐스크의 회전운동이나 마찰은 무시).

$$V_{Cask} = \frac{m \cdot v_m}{M_{cask} + m}, \quad (7)$$

여기서,  $m$  = 비산물 질량(kg),  $v_m$  = 비산물 초기속도(m/s).

충격 후 캐스크의 초기 운동에너지가 마찰에 의해 모두 소진될 때 까지 캐스크가 움직이는 거리(m)는 초기 운동에너지를 동적마찰력으로 나누어 줌으로써 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L_{sliding} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{Cask}^2}{g \cdot \mu_{dynamic}}, \quad (8)$$

여기서,  $\mu_{dynamic}$  = 동적마찰계수(-).

수식 (7)과 (8)을 정리하면 다음과 같다.

$$L_{sliding} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\left( \frac{m \cdot v_m}{m + M_{Cask}} \right)^2}{g \cdot \mu_{dynamic}}. \quad (9)$$

비산물이 캐스크의 질량중심 최상부를 측면에서 충격하여 캐스크가 바닥면의 한 점 P를 중심으로 기울어질 경우 비산물의 충격전 각운동량과 캐스크의 충격후 각운동량은 동일하므로, 캐스크의 각속도(rad/s)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_{Cask} = \frac{m \cdot v_m \cdot h}{I_{Cask}}, \quad (10)$$

여기서, h = 캐스크의 높이(m),  $I_{Cask}$  = 점 P에 대한 캐스크의 각운동량( $kg \cdot m^2$ ).

한편, 캐스크의 각운동량은 평행축 정리에 따라 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I_{Cask} = I_{CM} + M_{Cask} \cdot d^2 = M_{Cask} \cdot \left( \frac{(3 \cdot r_{Cask}^2 + h^2)}{12} + d^2 \right), \quad (11)$$

여기서,  $I_{CM}$  = 질량중심에 대한 각운동량( $kg \cdot m^2$ ), d = 질량중심과 점 P 사이의 거리(m).

충격 후 점 P를 중심으로 캐스크의 회전운동 에너지( $N \cdot m$ )는 질량중심의 상승에 따른 위치에너지로 전환되므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot I_{Cask} \cdot \omega_{Cask}^2 = \Delta h_{CM} \cdot M_{Cask} \cdot g, \quad (12)$$

여기서,  $\Delta h_{CM}$  = 질량중심의 상승 높이(m).

수식 (10)~(12)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta h_{CM} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m^2 \cdot v_m^2 \cdot h^2}{M_{Cask}^2 \cdot g \cdot \left( \frac{(3 \cdot r_{Cask}^2 + h^2)}{12} + d^2 \right)}. \quad (13)$$

수식 (9)에서 특정 캐스크가 움직일 수 있는 가장 거리가 이웃한 최근접 캐스크 벽체와의 이격 거리 보다 충분한 여유도를 확보할 경우, 비산물 충격에 의한 캐스크 밀립현상으로부터 안전성이 확보되었다고 말할 수 있다. 한편, 캐스크의 전복은 질량중심이 캐스크 회전중심점 P 직상부에 도달할 때 일어날 수 있으므로, 전복으로부터 안전성을 확보하기 위한 조건은 수식 (13)으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta h_{CM} < d - h_{CM}. \quad (14)$$

### 2.3 가상 저장시스템에 대한 시산결과

Fig. 1은 가상적인 건식저장 캐스크의 설계값에 근거하여 초속 100 m인 비산물이 질량이 100 톤인 캐스크의 최상부를 충격하는 경우, 캐스크를 전도시킬 수 있는 비산물의 질량을 수식 (13)을 이용해 추정한 결과이다. 시산결과에 따르면 질량이 약 2684 kg을 초과하는 비산물이 충격할 경우 캐스크의 전도가능성이 있음을 알 수 있다.

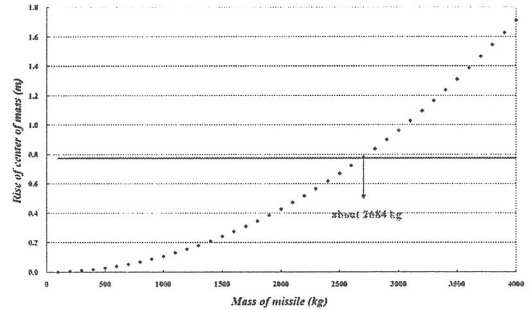


Fig. 1. Missile velocity for overturning of cask.

### 3. 결론

간단한 고전역학 이론에 근거하여, 강풍과 비산물의 충돌에 따른 사용후핵연료 건식저장 캐스크의 밀립과 전도에 대한 안전성을 검증할 수 있는 단순화된 예비모델을 도출하였으며, 가상적인 사례연구를 통해 그 적용성을 확인하였다. 제시된 예비검증 모델은 건식저장 시스템의 안전성에 대한 직관을 확보하고, 향후 본격적인 안전성 검증 체계 구축을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

### 4. 감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

### 5. 참고문헌

- [1] Holtec International, Final Safety Analysis Report for the HI-STORM 100 Cask System, Rev. 5, 2007.
- [2] ANSI/ANS-57.9, Design Criteria for an Independent Spent Fuel Storage Installation (Dry Type), 2000.