

사용후핵연료 임시저장 시설의 항공기 충돌 안전성평가 기술개발 현황

이상훈, 방경식, 이주찬, 최우석, 서중석, 서기석, 김호동
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
shlee1222@kaeri.re.kr

1. 서론

911 테러사건 이후로 유해물질을 다량 보유하고 있는 시설의 항공기 충돌 대처 설계 및 안전성평가의 필요성이 크게 대두되고 있다. 방사성 물질을 다량 보유하고 있는 원자력발전소 및 핵연료 저장시설은 개종 안전에 대한 요구가 큰 시설들로서 원전 격납건물 등의 항공기 충돌 안전성 해석은 오래전부터 수행되어 왔다. [1]. 하지만 사용후핵연료의 임시저장 시설 및 저장용기 등의 항공기충돌 안전성 평가는 현재까지 수행된 사례가 많지 않으며 일본 및 독일 등에서 발표된 몇몇 사례가 알려져 있을 뿐이다. 또한, 항공기 충돌 대처 설계를 통하여 신규 원자력 관련 설비의 인허가를 받기 위한 공인된 절차 및 기술은 확립되어 있지 않은 상태인데, 최근 미국 NRC (Nuclear Regulatory Commission)에서 10CFR 50, 52를 개정하여 신규 원전의 인허가 요건에 항공기 충돌대처 설계를 포함시킴으로써 관련된 기술 개발의 필요성이 크게 증대되었다고 할 수 있다. 한국원자력연구원에서는 사용후핵연료 임시저장 시설과 용기의 항공기 충돌 안전성 해석평가를 수행하기 위한 기술개발을 올해부터 수행하고 있으며 해당 연구의 일환으로 관련된 기술 개발 동향을 파악하는 작업을 수행 중에 있다. 이 논문에서는 미국, 일본, 독일 등 원자력 선진국에서 지금까지 항공기 충돌 안전성 평가와 관련하여 개발한 절차 및 시험, 해석 방법에 대한 현황을 소개하며, 한국원자력연구원에서 향후 개발하려는 기술 개발의 방향을 제시하고자 한다.

2. 항공기 충돌 위험 평가 절차 (DOE Standard)

항공기 충돌사건이 잦은 빈도로 일어나는 사건은 아니지만 사고의 규모 및 영향이 클 수 있기 때문에 위험물질을 보유하고 있는 시설의 항공기 충돌 위험도를 체계적이고 정량적으로 분석해야 할 필요가 있다. 미국 DOE(Department of Energy)에서는 1996년 방사성 물질과 같은 유해물질을 보유한 시설이 항공기 충돌로 인하여 손상되어 유해물질이 유출될 위험을 평가하는 표준 절차를 수립하여 발간하였다. [2]. 이 표준은 실제 항공기 충돌사고가 발생할 수 있는 확률 평가로부터 시작하여 시설의 구조에 유효한 손상을 가져올 확률 및 이러한 손상으로 부터 유해물질이 유출되어 시설 경계에 있는 사람들에게 위해를 가할 위험도를 평가하는 포괄적이고 거시적인 절차를 제시하고 있다.

항공기 충돌 위험도 평가는 그림 1과 같이 총 3단계로 이루어진다. 1단계(Phase I)에서는 시설에 보유한 유해물질의 재고로부터 해당시설에 대한 항공기 충돌위험 평가가 필요한지 여부를 결정하게 된다. 2단계(Phase II)에서는 시설의 입지 및 근처 공항의 배치, 항공노선 등의 정보로부터 항공기 충돌 사고가

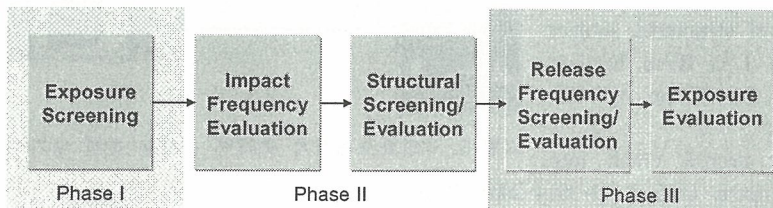


그림 1. 항공기 충돌사고 위험도 평가 절차

일어날 확률을 평가하고 각각의 충돌 사고로 발생하는 시설의 구조 손상 정도를 평가한다. 3단계에서는 시설의 구조손상으로부터 야기될 수 있는 유해물질 유출 가능성을 평가하고 시설 외로의 유출량을 평가한

다. 방사성 물질의 경우 시설 경계에 위치한 사람이 0.25 Sv의 선량에 노출되면 위험한 것으로 보며 시설의 항공기 충돌사고 빈도가 $10^{-6}/\text{yr}$ 이상이면 위험도가 유의한 것으로 판단한다.

3. 구조손상 평가 기법

고속충돌로 야기되는 구조손상의 평가는 안전성평가 분야에서는 오랜 기간 동안 연구되어온 주제로서 현재까지는 경험식에 기반한 평가법이 주로 사용되고 있다. 항공기 충돌로 인한 구조손상은 일반적으로

엔진 등의 충돌로 인한 국부적 손상과 전반적 손상으로 나누어 평가하며 강화콘크리트 구조물의 국부적 손상평가를 위하여 다음 그림 2에 나열된 경험식들이 주로 사용되고 있다. [2]

그림에서 U는 기준속도(200 ft/sec), V는 충돌체의 속도, M은 충돌체의 질량, D는 충돌체의 유효직경, f'_c 은 콘크리트의 압축강도, K는 콘크리트의 관통인자(penetrability factor), N, W는 각각 충돌체의 형상 계수, 중량이다. 철 구조의 관통손상은 BRL 공식으로 주로 평가한다. [참고문헌] 최근에는 이러한 경험식을 보다 정확한 해석으로 대체하려는 연구가 활발히 이루어지고 있으며 유한요소법을 활용한 해석을




Damage Mode	Model	Formula	Design criteria
Penetration & Spalling 	Modified NDRC formula	$x = \sqrt{4KNWD \left(\frac{V}{1000D} \right)^{1.8}} \quad \text{for } \frac{x}{D} \leq 2.0$ $x = \left[KNW \left(\frac{V}{1000D} \right)^{1.8} \right] + D \quad \text{for } \frac{x}{D} \geq 2.0$	
Scabbing 	Chang	$t_s = 1.84 \left(\frac{U}{V} \right)^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{D^{0.2} (f'_c)^{0.4}}$	$t_d \geq 1.1t_s$
Perforation 	Chang	$t_p = \left(\frac{U}{V} \right)^{0.25} \left(\frac{MV^2}{Df'} \right)^{0.4}$	$t_d \geq 1.2t_p$

그림 2. 강화콘크리트 구조물의 국부손상 평가를 위한 경험식들

도입하려는 시도가 대표적이다. 사용후핵연료 저장시설의 손상 평가와 관련해서는 아직까지 발표된 사례가 많지 않으나, 비행기의 충돌로 야기되는 충격력을 먼저 근사한 후 이를 저장시설이나 저장용기의 유한요소해석 모델에 적용하는 기법들이 시도된 바 있다. 특히 저장용기의 경우에는 그 크기가 상대적으로 작기 때문에, 일반적으로 시설의 국부적 손상평가에 사용되는 기법만으로 충분한 손상평가가 가능하다. 이 경우 항공기의 엔진과 같은 밀도가 높은 질량체로 야기되는 국부손상이 평가의 주가 되며 일본의 CRIEPI, 독일의 BAM연구소 등에서 항공기 엔진의 충돌로 인해 야기되는 충격력을 근사한 바 있다. [3], [4] 이 평가 기법에서 가장 중요한 요소의 하나는 얼마나 정확히 항공기 충돌로 인한 충격력을 근사해 낼 수 있는가 하는 것인데, 1970년대 말 미국의 Sandia National Lab에서 실제 항공기를 콘크리트 격납벽에 충돌시켜 시험적으로 충격력을 계산하였고 CRIEPI에서는 이러한 시험을 유한요소해석으로 대체하여 항공기의 엔진의 충돌로 야기되는 충격력을 계산해 낸 바 있다[3]. 한국원자력연구원에서는 유한요소해석을 통한 항공기 충돌 안전성평가의 기술 개발을 위하여 유한요소해석을 활용한 구조 손상 평가의 시험적 검증, 보다 정확한 재료 모델링에 기반한 계산 정확도 향상, 평가의 보수성 확보를 위한 방안 개발을 추진하고 있다.

4. 참고문헌

- [1] On the stress analysis of structures subject to aircraft impact forces, J. D. Riera, Nuclear Engineering and Design, Vol. 8, pp. 415-426, 1968
- [2] Accident analysis for aircraft crash into hazardous facilities, US DOE, DOE-STD-3014-2006, 1996
- [3] Safety analysis of dual purpose metal cask subject to impulsive loads due to aircraft engine crash, K. Shirai, K. Namba, T. Saegusa, Journal of power and energy systems, Vol. 3, No. 1, 1999
- [4] Experimental tests and finite element analyses of the aircraft impact resistance of CASTOR transport and storage casks, G. Dreier, W. Volzer, R. Huggenberg, Proceedings of SMiRT 14, 1997

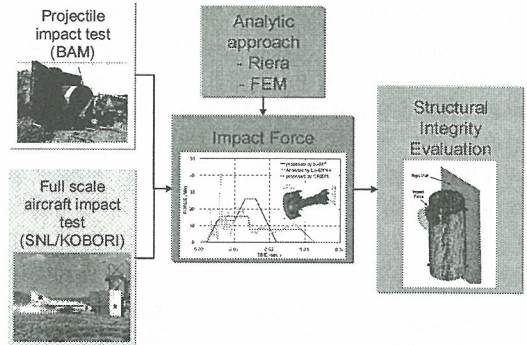


그림 3. 유한요소해석과 충격력 근사를 통한 평가