

금속검용용기의 고속충돌 해석 및 시험평가

이상훈, 방경식, 최우석, 김기영, 전재언, 서기석
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
 *shleel222@kaeri.re.kr

1. 서론

원전을 비롯하여 유해한 물질을 다량 보유하고 있는 위험시설에 대한 항공기 충돌 안전성 평가의 필요성은 1960년대부터 인식되어 왔으나 9.11 테러사건 이후 항공기 운항 중에 발생하는 사고 외에 테러 목적의 항공기 납치에 의한 충돌의 위험성이 대두되면서 보다 엄격한 안전성 평가 및 설계 기준의 필요성이 제기되어 왔다. 미국, 독일, 일본 등 선진국들은 원전건물 뿐 아니라 사용후 핵연료의 수송/저장시스템에도 항공기 충돌에 대비한 설계기준을 적용하고 안전성을 해석적, 시험적으로 검증하는 노력을 지속적으로 해오고 있다.[1,2]

국내에서는 원전의 방호건물 등의 항공기충돌 안전성 평가를 해석적으로 수행해오고 있으나 이를 시험적으로 검증한 사례는 보고된 바 없다. 본 논문에서는 현재 방사성폐기물관리기술개발사업의 일환으로 개발 중인 금속수송저장검용용기를 대상으로 하여 항공기 충돌에 대한 안전성 해석 평가를 수행하고 이를 시험적으로 검증한 연구 결과에 관하여 기술하고자 한다. 금속수송저장검용용기는 현재 개발 중인 모델이기 때문에 본 연구에서는 상기 시스템의 안전여부의 평가보다는 전산해석을 통한 안전성 평가체계를 구축하고 이를 시험적으로 검증하고자 하는 노력을 기울였다. 2장에서는 연구대상이 된 시스템 및 고려된 항공기충돌 시나리오에 대하여 기술하고 3장에서는 전산해석을 통한 평가결과를, 4장에서는 시험평가를 수행한 내용을 기술한다.

2. 대상 시스템 및 충돌조건

2.1 금속수송저장검용용기

본 연구에서 고려한 시스템은 현재 (주)코네스 코퍼레이션에서 개발 중인 금속수송저장검용용기로서 사용후핵연료 바스켓이 장입된 후 용접으로 밀봉되는 캐니스터와 외부 캐스크로 구성되는 시스템이다. 해석 및 시험평가를 위하여 상기 시

템의 1/3 스케일 모델이 설계, 제작되었고 제작의 용이성을 위하여 사용후핵연료 바스켓 등 일부 설계는 아래 그림과 같이 단순화되었다.

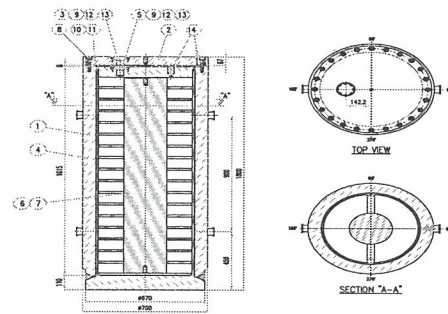


Fig. 1. 1/3 scale model of dual purpose metal cask.

상기 모델의 캐스크 및 더미하중은 탄소강 재질이며 캐니스터는 스테인리스강으로 만들어진다. 모델의 총 무게는 3578 kg이다.

2.2 충돌조건 선정

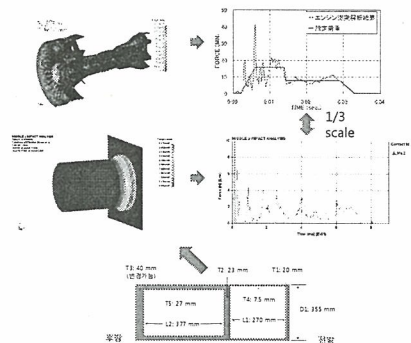


Fig. 2. Design of simplified missile.

본 연구에서는 민항기 Boeing 747이 별도의 방호건물 없이 콘크리트패드 위에 직립해 있는 금속검용용기의 뚜껑을 수직으로 타격하는 충돌시나리오를 선정하였다. 충돌속도는 150 m/s[1]로 선정되었으며 항공기 구조에서 가장 강성이 큰 엔진이 직격하는 가혹한 조건을 선정하였다. Boeing 747의 엔진 GE CF6-80C2를 모사하기 위하여 CRIEPI에서 제시한 의 충돌하중 시간이력곡

선[2] 및 상사성 이론을 바탕으로 유사한 충돌특성을 가지는 단순화된 발사체를 설계하였다. 이 발사체는 무게 167 kg, 직경 355 mm의 원통형 구조를 가지며 탄소강 재질로 만들어졌다.

3. 안전성 해석평가

해석에는 유한요소해석코드 LS-DYNA가 활용되었다. 고속충돌 시 재료의 변형률속도 의존성을 고려하기 위하여 각 재질에 대하여 수행한 동적 재료물성시험 데이터가 활용되었다. Fig. 3에 보이는 바와 같이 용기의 바닥면이 강체벽에 의해 지지되는 경계조건을 부여하였으며 dynamic relaxation을 이용하여 볼트에 예하중을 가하였다. 해석결과 용기의 뚜껑에 상당한 소성변형이 예측되었으며 이로 인하여 캐니스터의 상단 및 측면 용접부에도 강한 충격이 전달되고 있음을 확인하였다. 또한 뚜껑의 변형으로 인하여 볼트가 휘는 현상이 예측되었는데 휘는 각도가 최대 0.5도 정도로 예측되었다. 볼트의 소성변형과 더불어 뚜껑과 본체의 틈도 아래 Fig. 4와 같이 최대 0.8 mm 발생하는 것으로 예측되어 격납경계의 건전성을 유지하기 힘든 것으로 평가되었다.

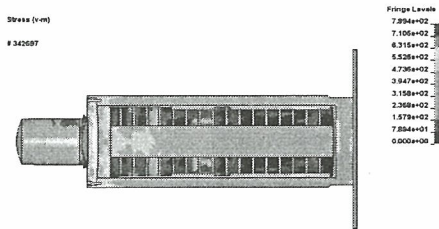


Fig. 3. Stress contour (2.5 ms after impact).

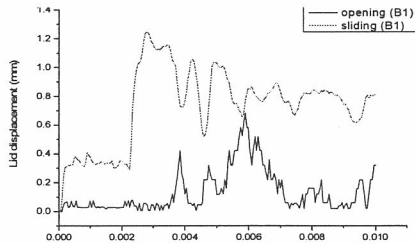


Fig. 4. Lid opening-sliding displacement (@B1).

4. 안전성 시험평가 및 해석검증

안전성 시험평가는 국방과학연구소 종합시험단에 서 수행되었다. 발사체는 Counter Mass Gun을 활용하여 발사되었고 측정된 충돌속도는 155 m/s였다.

Fig. 5에 충돌전후의 영상을 실었다. 각 계측지점에서의 가속도 및 변형률을 비교한 결과 전산 해석의 결과가 시험결과와 잘 일치였고 시험 후 수행한 캐스크와 캐니스터의 누설검사에서 모두 미량이지만 누설이 발생하여 해석으로 예측된 바와 같이 격납이 유지되지 않음을 확인하였다.

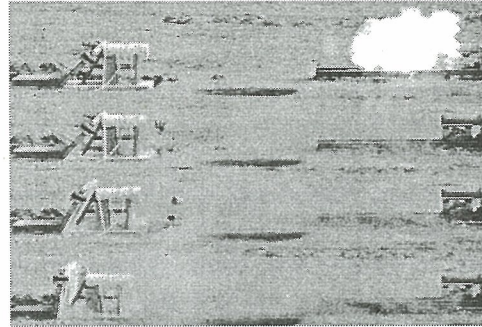


Fig. 5. Comparison of strain history (test-simulation).

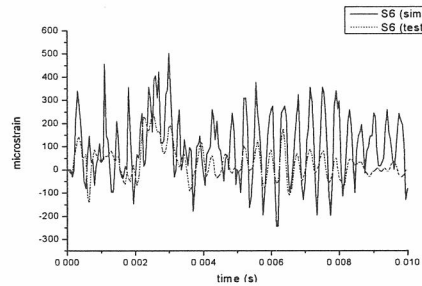


Fig. 6. Strain history (S6).

5. 결론

이상과 같이 금속검용기의 항공기충돌조건을 고려한 안전성 해석 및 시험평가를 수행하였다. 구현된 전산해석체계를 통하여 보수적이며 정확한 구조안전성평가를 수행할 수 있음을 보였으며 추후 실제 시스템의 평가에 활용하기 위한 기반을 마련하였다.

6. 참고문헌

- [1] NEI, "Deterring terrorism: Aircraft crash impact analyses demonstrate nuclear power plant's structural strength," NEI, 2002.
- [2] K Shirai et al. "Safety analysis of dual purpose metal cask subject to impulsive load due to aircraft engine crash," Journal of Power and Energy Systems, Vol. 3, pp. 72-82.