

고건전성 용기의 A형 운반용기 조건 낙하해석평가

이상훈*, 최효준

계명대학교, 대구광역시 달서구 달구벌대로 1095

*shlee1222@kmu.ac.kr

1. 서론

원자력발전소에서 발생하는 폐기물의 처분을 위하여 사용하는 처분용기는 다양한 성능요건을 만족시켜야 한다. 이러한 요건들은 [1]의 문서에서 정리한 바와 같이 일반요건, 재질요건, 용기요건, 관리요건, 품질보증요건 등으로 분류될 수 있으며 관리요건에서는 처분용기가 인양/운반에 있어서 A형 방사성물질 운반용기의 기술기준을 만족시켜야 한다고 적시하고 있다. A형 방사성물질 운반용기가 갖추어야 할 기계적 저항성은 정상운반조건을 고려한 낙하, 관통, 적층시험에서 방사선 차폐성능 20% 이상 감소, 내용물의 유출 및 비산을 야기할 구조적 손상의 발생 여부로 평가하는데 본 연구에서는 처분용기로 개발된 폴리머콘크리트 고건전성용기(HIC)의 A형 운반용기 낙하조건을 고려한 해석 평가를 수행하였다.

2. 폴리머 콘크리트 고건전성용기

고건전성용기는 300년 이상의 장기간 동안 구조적 안전성과 건전성이 입증된 처분용기를 말하며 본 연구에서 고려된 용기는 폴리머 콘크리트를 주재료로 하는 용기이다. 폴리머 콘크리트는 유기재료인 폴리머를 결합재로 사용하는 콘크리트로서 일반 콘크리트에 비하여 높은 인장, 휨, 압축강도를 가지며 내약품성, 내마모성, 방수성, 동결융해에 대한 저항성, 절연성 등 처분용기로서 우수한 특성을 지니고 있다. 본 연구에서 다루어진 용기는 Poly-Ethylene (이하 PE) 재질의 내부 용기가 내용물인 액체폐액 건조분말 혹은 폐수지 고화체를 1차 포장하고 폴리머 콘크리트가 1차 용기의 외부를 완전히 감싸 구조적 지지 및 방사선 차폐성능을 제공하는 개념이다. 콘크리트 구조의 보호를 위하여 철제 외부 쉘이 콘크리트 전체를 감싸고 있으며 용기의 뚜껑에는 콘크리트 차폐체 및 빗물 차단용 뚜껑이 별도로 설치된다. 용기 전체 무게는 농축폐액 건조분말의 경우 약 2.1 톤인데, 이 중 내용물의 무게가 대략 800 kg 이다. 그림 1은 용기의 개념도이다.



Fig. 1. Concept of polymer concrete HIC.

3. A형 운반용기 낙하시험 조건

정상운반조건 시 방사성물질 운반용기의 낙하시험 조건은 IAEA의 방사성물질의 안전운반에 관한 규정 그리고 국내 원자력안전위원회고시 제2014-050 제 45조에 기술되어 있다. 이 시험들은 살수시험, 자유낙하시험, 적층시험, 그리고 관통시험으로 구성되며 여기서 자유낙하시험은 용기를 충분히 단단한 바닥면에 법규상에 지정된 높이에서 용기가 가장 큰 손상을 입을 수 있는 자세로 낙하시키도록 되어 있다. 용기의 무게에 따라 낙하높이는 달라지며 무게 5톤 미만의 용기는 용기의 가장 낮은 부분에서 바닥면까지의 거리가 1.2 m가 되도록 하여 낙하를 하도록 적시되어 있다.

이 때 이 용기가 만족시켜야 할 기준은 차폐성능 감소가 초기 20%미만, 방사성물질의 비산 및 유출이 없어야 한다는 것이다.

4. 자유낙하 구조해석평가

4.1 구조평가의 척도

앞 장에서 설명한 A형 용기 낙하시험 조건을 고려한 구조평가를 수행하였다. 고건전성용기의 구조요건이 앞 장에서 기술한 바와 같이 방사선 차폐능 및 격납성능으로 기술되어 있기 때문에 구조해석을 통한 결과를 상기 두 가지 성능으로 해석하는 과정이 필요하다.

방사선 차폐능의 감소와 관련하여서는 차폐 기능을 담당하는 콘크리트 차폐벽에 유의한 손상의 유무로 판단할 수 있다. 즉 콘크리트의 탈락 혹은 벽면을 관통하는 균열이 발생하면 이로 인한 차폐능의 감소를 예측할 수 있을 것이다. 다만, 연속체 역학에 입각한 동역학적 구조해석을 통하여 얻어지는 척도로는 상기 물리량들을 정확히 예측하는 것은 불가하며 이에 본 연구에서는 취성재료인 콘크리트 내부에 발생하는 최대 주응력의 크기로 균열 및 파손 발생가능성을 평가하고 최종적인 차폐능의 감소는 추후 시험적인 방법으로 평가하도록 하였다. 일반적으로 콘크리트는 압축강도가 인장강도의 10배가 넘고 취성이 강한 재료이므로 최대 주응력으로 재료의 건전성을 평가하는 것이 타당하다고 알려져 있다.

두 번째로, 내용물의 유실 관련해서는 용기의 격납경계를 형성하는 PE 용기와 뚜껑의 낙하 시 구조적 건전성 유지 여부로 평가가 가능하다. 내용물의 타격, 뚜껑 자체의 관성력이 용기와 뚜껑 사이의 결합이 유지되는 범위를 초과하거나, 용기에 설치된 오링을 적절히 눌러질 수 있는 압축력이 손실되는 한도를 초과하게 되면 내용물이 유실될 가능성이 있다고 볼 수 있다.

4.2 구조해석 모델

앞 절에 언급된 평가척도들을 계산하기 위해서는 외연적 시간적분을 이용한 동해석과 더불어 상세한 뚜껑부의 해석을 위한 정해석이 수반되어야 한다. 아래 그림은 고건전성용기의 동적해석을 위한 유한 요소모델이다.

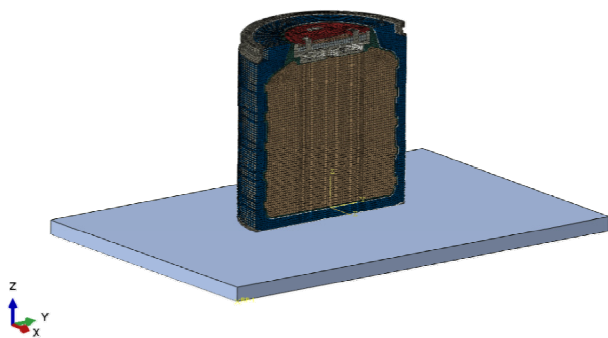


Fig. 2. Finite element model of HIC.

위 그림의 모델은 대칭면을 기준으로 절반만 실물을 모델링하고 대칭 경계조건을 부여하였으며 약 17만개의 요소로 구성되어 있다. 외부 철제 셸만 셸요소로 모델링 되었으며 나머지는 육면체 요소가 사용되었다. 바닥은 강체로 모델링되었다.

4.3 구조해석 결과

아래 그림은 바닥부 수직낙하자세로 1.2 m에서 용기를 강체면에 낙하시켰을 때 최대 변형에너지가 발생하는 순간의 응력분포이다.

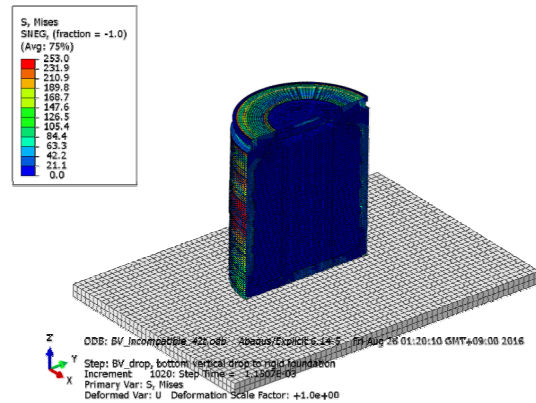


Fig. 3 Mises equivalent stress at time = 1.15 ms.

폴리머 콘크리트 내부에 발생하는 응력에 대한 분석은 현재 진행 중이며 외부 모서리 등 형상의 특이성이 존재하는 부분에 응력 집중으로 인한 높은 응력이 관찰되나 매우 국부적인 현상으로 보여지며 전체적 차폐능에 손실을 가져올 만한 파손에 대한 평가는 보다 정밀한 분석이 필요하다. 또한 뚜껑의 열림에 대한 평가 역시 상세한 뚜껑 모델 개발 후 결과가 도출될 예정이다.

가장 큰 응력이 발생하는 부위는 전체를 감싸고 있는 철제 셸이며 크기는 250 MPa 정도로 계산되었다.

5. 결론

폴리머 콘크리트 재질의 고건전성용기의 A형 운반용기조건을 고려한 낙하해석 평가를 진행 중이다. 대부분의 재질이 규격재질이 아닌 점, 구조해석의 결과를 바로 차폐능의 결과로 해석하는 것이 불가하다는 점, 그리고 내용물이 유동성이 강한 파우더 재질이라는 점 등이 구조해석 상 난맥이 되고 있다. 추후 상세하고 정밀한 결과 도출 후 시험결과와 비교 분석을 통하여 본 연구에서 제시하고 있는 해석 및 평가의 방법론을 검증할 예정이다.

6. 참고문헌

- [1] 정찬우 외 5, 방사성폐기물 처분용기 기술기준 개발 방향, 2007 한국방사성폐기물학회 춘계학술대회 논문요약집, 85-86, 2007.