

1/3 축소모델시험을 통한 SNF 운반용기 파열조건 해석방법론 분석

김갑순, 이동규, 정인수, 김종수, 최규섭
 (주)코네스코퍼레이션, 서울시 서초구 양재동 210-2 합동빌딩 5, 6F
kskim@kones21.com

1. 서론

관련 기준에 따르면 사용후핵연료(SNF) 운반용기는 운반사고조건에 대한 구조적 안전성을 확보하기 위해 단단한 바닥면으로의 9m 자유낙하, 150mm 직경 연강봉 위로의 1m 자유낙하(파열조건) 등에 견딜 수 있어야 한다. 일반적으로 운반용기의 안전성은 유한요소해석에 의한 해석적방법과 검증시험에 의해 평가되는데, 용기외측에 레진이나 목재와 같은 파열조건에서 국부적인 파손이 예상되는 재료가 존재하는 경우엔 그 동적 충격특성이 매우 복잡하기 때문에 해석적으로 정확한 거동을 규명하기가 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 파열조건에 대한 합리적인 해석방법론을 제안하기 위해, 1/3 축소모델을 이용한 SNF 운반용기 파열시험을 수행하고 그 결과를 다양한 해석방법론에 의한 해석결과와 비교분석하였다.

2. 시험결과 및 유한요소해석방법

그림 1에는 본 연구에서 파열조건 해석방법론 분석을 위해 사용한 SNF 운반용기 개념도와 1/3 축소모델 파열조건 시험셋팅 및 시험결과를 나타내었다. 운반용기는 그림 1(a)와 같이 탄소강 재질의 용기본체, 스테인리스강 재질의 용기뚜껑, 그리고 용기내부의 더미 바스켓으로 구성되며, 용기본체 외면에는 중성자 차폐체로 사용되는 레진과 강제 케이싱이 설치된다. 운반용기 수평 파열조건 시험결과, 그림 1(c)에서와 같이 강제 케이싱은 강봉에 의해 뚫림이 발생했으며 강봉 직 상부의 레진은 국부적으로 완전히 분쇄되었고 최종적으로 강봉은 용기본체를 타격하는 복잡한 에너지 흡수거동을 보였다.

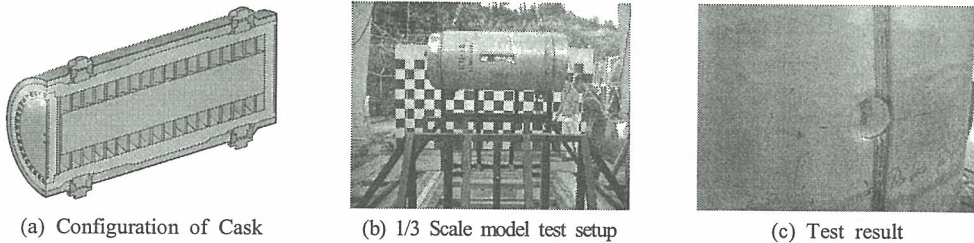


그림 1. 평가대상 운반용기 및 1/3축소모델 시험결과

일반적으로 위와 같은 파열조건에 대한 해석방법으로는 a) 강제케이싱과 레진을 모두 모델링에 포함시키지만 재료의 파손은 고려하지 않는 방법, b) 두 가지 모두 모델링에 포함시키고 재료의 파손을 고려하는 방법(즉, 재료의 파손을 고려하기 위해 요소 적분점에서의 응력이나 변형률이 특정값 이상이 되면 그 요소를 제거하도록 하는 방법), c) 강제케이싱과 레진의 전단파괴강성은 무시하여 강봉과 직접 접촉하는 부분의 케이싱과 레진만 모델링에 포함시키는 방법, d) 외부 강제케이싱과 레진 전체를 무시하여 모델링에 포함시키지 않고 강봉이 용기본체와 직접 충돌하게 하는 방법 등이 고려될 수 있으며, 본 연구에서는 지나치게 보수적인 결과를 나타낼 수 있는 d)방법은 제외하고 a), b), c)방법에 의한 파열조건 해석을 수행하고 결과를 비교분석 하였다. 유한요소해석은 범용코드인 LS-DYNA Explicit를 사용하여 외연적 시간적분방식을 적용한 3차원 비선형 동적해석으로 수행하였다. 해석조건으로는 볼트초기축력 및 1m 자유낙하에 대한 초기속도(4.43m/s) 등을 고려했으며, 대칭조건을 이용하여 운반용기의 1/2만 모델링에 포함시켰다. 각 방법에 사용된 해석모델은 그림 2에 나타내었으며, 그림에서와 같이 강봉 접촉면 요소망은 국부적인 변형거동을 고려하기 위해 보다 조밀하게 분할하였다. 모든 재질에 대해 재료모델은 탄소성 구성방정식을 갖는 모델을 적용하였고, 재료의 파손기준은 시험결과를 참조하여 레진은 소성변형률이 0.65, 강제케이싱은 0.55에 도달하면 요소가 제거되도록 설정하였으며, 봉과 충돌하는 부위의 접촉조건은 요소제거 기능을 고려해주는 "CONTACT_ERODING"조건을 사용했다.

3. 해석결과 분석

그림 2에는 해석방법에 따른 강봉타격부의 변형형상 및 용기본체의 응력분포를 나타내었으며, 그림 3에는 시험 및 해석결과로부터 구한 가속도 및 변형을 시간이력선도를 비교하여 나타내었다. 그림 1과 2에서 볼 수 있듯이 재료의 파손을 고려하는 (b)의 경우가 실제 시험에서의 변형거동을 가장 잘 구현하였고, (a)의 경우는 타 방법에 비해 용기본체에 발생하는 응력을 과소평가하고 있는 것으로 나타났다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 (a)의 경우는 시험결과에 비해 다소 비보수적인 결과를 나타내었고, (c)의 경우는 이력거동을 정확히 모사하지는 못했지만 전체적으로 시험치를 포괄하는 형태의 보수적인 결과를 보였으며, (b)의 경우는 두 번의 최대 정점을 갖는 파열조건 시험에서의 가속도 및 변형을 이력거동을 가장 잘 구현하고 있는 것으로 나타났다.

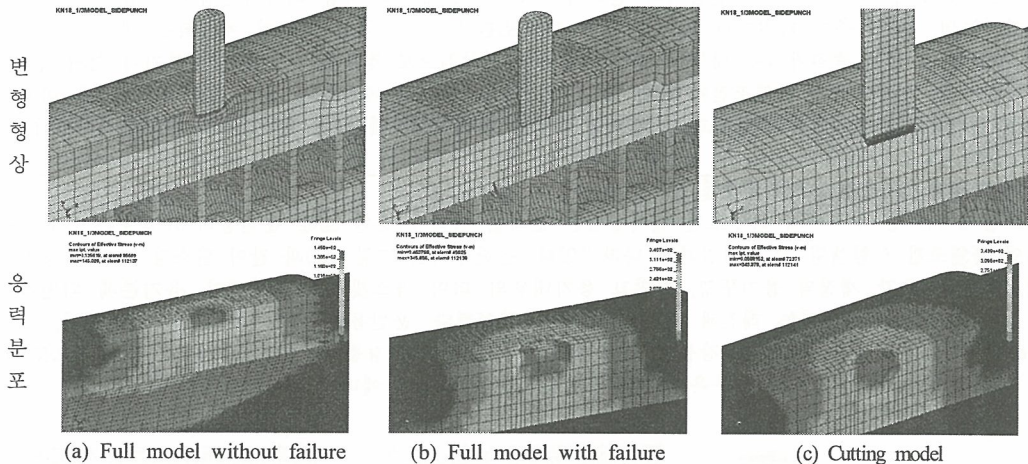


그림 2. 해석방법에 따른 변형형상 및 용기본체 응력분포

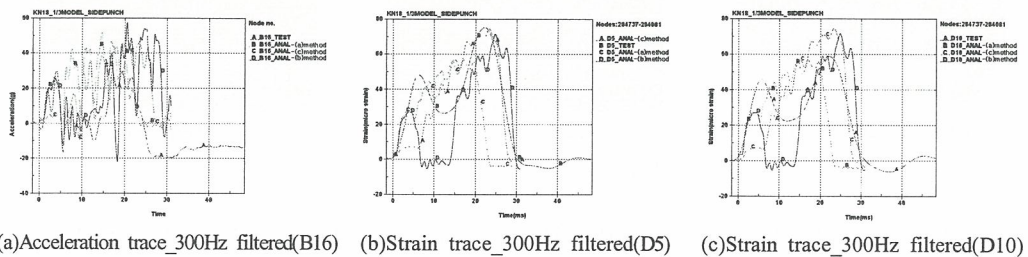


그림 3. 시험 및 해석결과 비교

4. 결론

파열조건 해석방법론에 대한 분석결과, 재료의 파손을 고려하여 요소제거기법을 적용하는 해석방법이 대체적으로 축소모델 시험에서의 결과를 가장 근접하게 구현하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 정확한 재료특성 값이 입력될 수 있다면, 재료파손을 고려하는 (b)방법이 대변형 및 재료파단이 발생하는 파열조건에서의 복잡한 에너지 흡수거동을 보다 근사적으로 구현할 수 있는 가장 합리적인 대안임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Jaksic, N., Nilsson, K.F. (2008): Finite element modeling of the one meter drop test on a steel bar for the CASTOR cask, Nuclear Engineering and Design 239, 201-213.
2. 권기찬, 서기석, 유길성 (2009): 충격완충체의 효과를 고려할 수 있는 운반용기의 파열낙하시험 유한 요소해석방법, 한국방사성폐기물학회지 Vol.07, No.01
3. Livermore Software Technology Corp. (2007): LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 971.