파열조건에서 완충체의 요소 소멸을 적용한 동적 해석

서기석[1*], 조상순[1], 최우석[1], 임종민[2]
[1]한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
[2]한국항공우주연구원, 대전광역시 유성구 과학로 169-84
*nksseo@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료 운반용기는 IAEA SSR-6 및 원자력안전위원회 고시 제2014-50호[1, 2]에 따르면, 운반용기가 1 m 높이에서 15 cm 직경 및 20 cm 길이 이상의 고정된 수직 봉에 낙하하는 사고조건에서 구조적 건전성을 유지하도록 되어 있다. 이와 같은 파열(puncture) 조건에서 운반용기의 최대 손상은 수평 낙하 자세에서 용기 본체와 수직 자세에서 용기 뚜껑에 각각 가해진다. 본 논문은 완충체(impact limiter)를 장착한 운반 용기의 수직자세에서 파열조건의 유한요소 해석을 하는 경우에 전단 파손의 거동을 요소 소멸 방법으로 적용하여 파열 봉이 완충체를 뚫어 버리는 구조적 거동을 평가하였다.

2. 파열조건의 운반용기 모델

사용후핵연료 운반용기는 이중 뚜껑을 갖는 구조를 갖고 있으므로 수직 파열조건에서 격납경계유지를 위해 뚜껑 및 볼트의 응력평가가 중요하다. 수직자세의 운반용기 파열조건 구조 해석모델은 ABAQUS/EXPLICIT를 사용하여 1/2 크기로 만들어졌다. 완충체 포함여부에 따라 해석모델은 Fig. 1과 같으며, 중량은 56.8 및 47.1 ton이고 Hex 요소가 약 42만개 및 21만개, 절점은 총 54만개와 26만개로 각각 사용되었다. 완충체 포함 모델의 하중 속도는 1 m 자유낙하에서 파열 봉에 충돌하는 4.43 m/s이며, 완충체 제외 모델에서는 충격완충체 높이를 합친 낙하 높이와 등가 속도인 5.73 m/s로 용기를 파열 봉에 충돌시켰다. 파열 봉의 바닥면에 있는 절점의 자유도는 고정하였고, 운반용기는 대칭면의 수직방향 자유도만 고정하였다.

완충체 구조는 강판 쉘 구조물에 Balsa 나무로 채워져 있다. 일반적으로 완충체를 포함한 운반용기의 수직자세 파열조건 구조해석은 일반 탄소성 재질로 적용할 경우 국부적인 대변형으로 요소의 Hourglass 모드 발생 등 계산이 수렴하지 못한다.

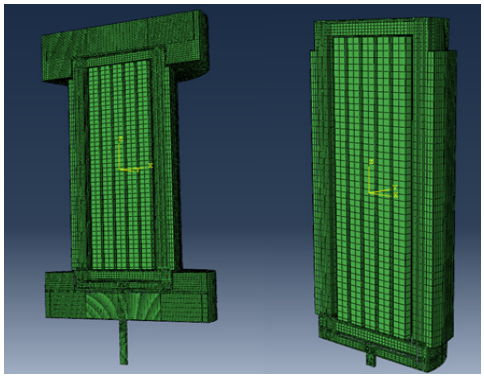

Fig. 1. Puncture Analysis Model According to the Existence of Impact Limiter.

따라서 완충체가 없는 용기 본체 모델이 보수적 조건의 가정과 해석평가의 용이성 때문에 적용된다. 실제 시험 결과에서 파열 봉은 완충체 강판과 Balsa 나무를 관통한다. 보수적 조건의 용기본체 모델의 파열 봉 낙하 해석결과와 완충체 포함 모델의 요소 소멸 조건으로 파열 해석결과를 비교할 필요가 있다.

3. 용기본체의 파열 봉 충돌 구조해석

보수적 해석인 용기본체의 파열 봉 충돌 해석은 Fig. 2와 같이 낙하 봉의 압축 변형과 용기 외부 뚜껑의 응력 분포 결과를 보이고 있다. 뚜껑 및 볼트 재질은 A182 F6NM 및 A193 B7이며, 각 항복응력은 620 MPa 및 655 MPa이다. 파열 봉은 일반 탄소강 A36을 적용하였으며, 항복응력 250 MPa을 갖고 있다. 뚜껑 및 볼트의 Von Mises 최대응력은 840 및 1984 MPa로 계산되어 파단강도를 초과하는 결과를 보이고 있다. 이 때에 파열 봉 하단의 반발력은 37.7 ms에서 5.07E7 Newton으로 계산되었다.

Table 1. Yield Stress and UTS of Lid and Bolt

재질	Yield Stress (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)
A182 F6NM	620	790
A193 B7	655	793

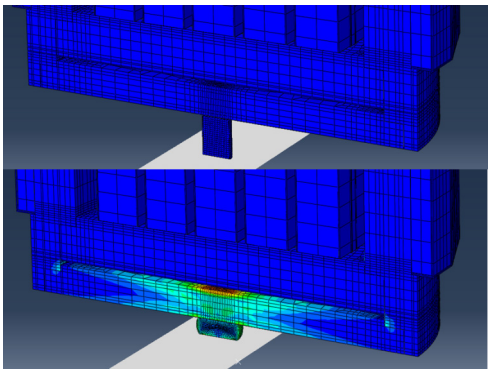

Fig. 2. Cask Body Only Model.

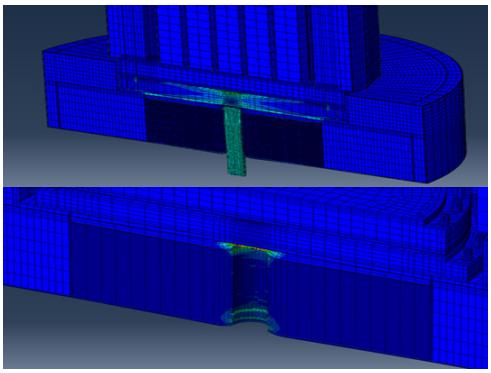

Fig. 3. Element Deletion Model of Impact Limiter.

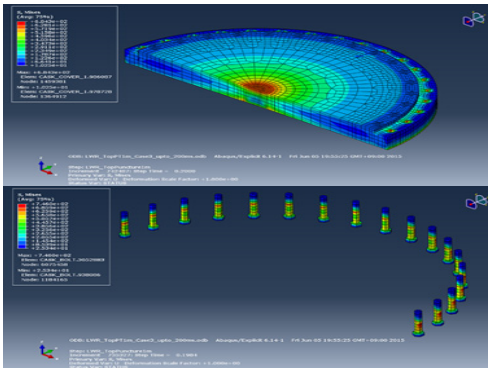

Fig. 4. Stress Contour of Lid and Bolt.

완충체를 포함한 운반용기의 파열조건 해석에서 요소소멸의 파단 변형율 기준값은 충격완충체의 발사 나무에서 0.74, 중성자차폐재 NS-4-FR에서 0.70, 충격완충체의 강판 쉘에서 0.40의 값을 각각 적용하였다. 이 해석결과에서 파열 봉은 Fig. 3과 같이 완충체의 강판, Balsa 나무, 중성자차폐체를 차례로 관통하며 용기 외부뚜껑에 도달하는 거동을 보이고 있다.

이와 같은 해석결과는 시험적 결과와 잘 일치하고 있음을 보이고 있다. 이 때에 뚜껑 및 볼트의 Von Mises 최대응력은 Fig. 4와 같이 684.3 및 746 MPa로 계산되어 항복응력을 초과하지만 파단강도 이하로 평가되었으며, 파열 봉 하단의 반발력은 199.2 ms에서 4.58E4 Newton으로 계산되었다.

4. 해석 결과 비교 및 검토

사용후핵연료 운반용기의 파열조건에서 완충체가 없이 용기본체 모델이 파열 봉과 충돌하는 해석과 완충체가 포함된 모델이 요소 소멸 거동을 적용한 해석의 결과는 최대 반발력, 외부 뚜껑 및 볼트의 최대응력에 대해 비교되었다. 최대 반발력은 Fig. 5와 같이 완충체가 없는 모델에서 직접 파열 봉이 외부 뚜껑과 충돌하므로 짧은 시간에 최대값에 도달하고 있으며, 완충체가 포함된 모델에서 요소 소멸을 적용한 해석에서 관통 시간이 소요되므로 최대 반발력의 도달하는 시간은 약 5 배 이상 길어지고 있다. 또한 용기본체 직접 충돌 계산결과에 대한 요소 소멸을 적용한 계산결과의 비율은 Table 2와 같이 뚜껑 응력에서 81.5%, 볼트 응력은 37.6%로 평가되었다.

결국, 용기 본체에 파열봉을 직접 충돌하는 해석은 상당히 보수적이며 볼트 파단과 같은 결과를 가질 수 있으나, 파열조건에서 요소 소멸 모델의 해석 방법이 타당성 있는 결과를 보이고 있다.

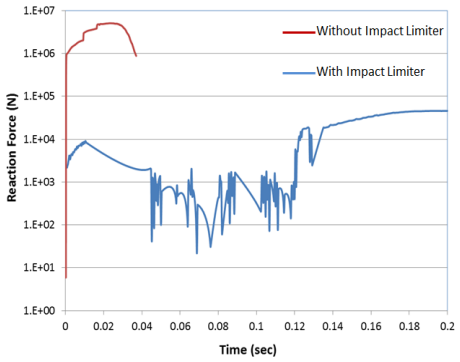

Fig. 5. Impact Force Comparison of Cask Only Model and Element Deletion Model of Impact Limiter.

Table 2. Impact Force Comparison According to the Existence of Impact Limiter

완충체 포함여부	용기본체/파열봉 모델 (A)	완충체 요소소멸 모델 (B)	B/A (%)
최대 충격시간(ms)	37.7	199.2	528.4
뚜껑 최대응력(MPa)	840	684.3	81.5
볼트 최대응력(MPa)	1984.0	746.0	37.6

5. 참고문헌

[1] IAEA Safety standard Series No. SSR-6, "Regulations for Packaging and Transportation of Radioactive Material", 2012 Ed.

[2] 원자력안전위원회 고시 제 2014-50, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정", 2014.