

2001 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

핫셀용기의 운전사고충돌 평가

Operational Impact Evaluation of Hot-Cell Cask

구정희, 정원명, 이은표, 유길성, 박성원

한국원자력연구소

대전시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력연구소 조사후시험시설의 핫셀에서 사용하는 핫셀용기는 핫셀과 차폐형 글로브박스 사이에서 사용후핵연료 조사시편등 고준위 방사성물질을 반입, 반출하는 데 사용된다. 이 용기는 시설 내부에서 사용되며 운반거리가 짧기 때문에 이동 및 취급작업이 용이하도록 설계한다. 일반적인 운반용기와는 달리 핫셀용기는 핫셀이나 차폐 글로브박스의 핫셀용기 접속부와 결합된 상태에서 차폐뚜껑을 개폐하기 때문에 작업자의 취급성과 차폐 안전성을 우선적으로 고려하게 된다. 그렇기 때문에 핫셀용기는 고준위 방사성물질 운반용기임에도 불구하고 시설 내에서 충격완충체를 부착하지 않고 운반하게 된다. 그러나 방사성물질 운반용기란 취급상의 편리성과 함께 구조적 건전성을 유지해야만 한다. 본 연구에서는 핫셀용기의 취급상 발생할 수 있는 낙하사고에 대한 충돌 거동을 평가하여 핫셀용기가 취급 중 사고에도 구조적 건전성을 유지함을 입증하였다.

Abstract

Hot-cell cask is used to transfer high level radioactive specimens such as spent fuel or irradiated material between hot-cell and shielded glove box. This cask is mainly used in the facility and the moving distance is so short that designed to be convenient for specimen handling and cask transfer with shielding safety. However, the cask should be satisfied the structural integrity as a high level radioactive material transport package while the operational convenience is emphasized. In this paper, the impact behaviors of hot-cell cask were evaluated under accident conditions which can be happened in normal operation, and it was showed that the cask maintains structural integrity for the handling accident.

1. 서 론

원자력시설의 핫셀에서 사용후핵연료나 조사시편 등 고준위 방사성물질 시편을 운반하는데 사용하기 위해 개발된 핫셀용기는 시설 내부에서 핫셀과 차폐형 글로브박스 사이에서 방사성물질을 이송, 반입 및 반출한다. 이 핫셀용기는 B(U)형 수송용기로서, 방사성물질 운반용기에 대한 IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1[1]과 과기부 고시 제96-38호[2]의 B(U)형 운반용기에 대한 기술기준에 따른 안전설계를 하기 때문에, 핫셀용기는 Fig. 1에 보인 바와 같이 9m 자유낙하 충돌사고와 같은 사고에 대비하여 충격완충체(impact limiter)를 부착하도록 설계되었다. 핫셀용기는 Fig. 2와 같이 핫셀용기 접속부와 결합된 상태에서 차폐뚜껑을 열고, 내부의 바스켓을 인출하여 내부에 운반물을 담거나, 내부의 운반물을 인출한다. 핫셀용기의 운반물이 고준위 방사성물질이지만 주로 마운팅 처리된 고체시편이기 때문에 차폐의 안전성과 함께 시설 내에서 취급 및 이동이 자유롭도록 그림 3과 같이 운반시에는 충격완충체를 부착하지 않고 운반용 받침대에 안착된 상태로 운반하게 된다.

핫셀용기는 Fig. 1과 같이 원통형 구조로 크게 용기 본체와 충격완충체로 나누어진다. 용기 본체는 스테인리스강 케이스 내부에 납을 주조한 구조이며, 내부에는 방사성 시편을 담을 수 있는 바스켓이 있다. 본체의 상부에는 미끄럼 방식으로 개폐되는 차폐뚜껑(shielding lid)과 차폐뚜껑 부분을 덮고 상부의 밀봉을 유지하는 밀봉뚜껑(sealing lid) 및 바닥부분의 밀봉을 유지하기 위한 밀봉마개(sealing cap), 운반용기의 인양 및 결속 등의 취급작업을 위한 트러니온(trunnion) 등으로 구성된다. 용기의 외부를 감싸고 있는 충격완충체는 2 mm 두께의 스테인리스강 케이스 내부에 충격흡수성능이 우수한 폴리우레탄 폼(foam)을 채워 구조로 충돌사고나 화재사고로부터 용기를 보호한다[3]. 충격완충체를 포함한 용기 전체 크기는 직경이 490 mm, 총 길이가 620 mm이며, 총 중량은 390 kg이다.

이 핫셀용기는 위와 같은 안전설계에도 불구하고 시설 내부에서만 이동할 때에는 Fig. 3과 같이 운반하기 때문에 관련규정에 따른 구조적 건전성을 유지도 중요하지만, 일상적인 운전시의 취급사고에 대한 안전성도 함께 보장하여야 하여야만 한다. 따라서 본 연구에서는 유한요소 해석코드를 사용하여 핫셀 조사시편 운반용기의 취급시 발생 가능한 낙하사고조건에 대한 구조해석을 수행하여 구조적 건전성을 평가하였다.

2. 핫셀용기의 하중조건

핫셀용기는 소형 운반용기로서 최대 방사능 양이 112 Ci 이하인 방사성 시편을 운반할 수 있는 B(U)형 운반용기로서, IAEA Safety Standards Series No. TS-R-1[1]과 과기부고시 제96-38호[2]의 규정에 따라 운반용기에 대한 포장기준인 일반규정, 정상운반조건인 일반시험조건, 그리고 및 특별시험조건인 가상사고조건에 대한 하중조건을 만족하도록 설계하였다.

정상수송조건에서는 내부 압력조건, 자유낙하 및 누적조건 등에 대하여 평가하였다. 용기의 총 중량이 390 kg이므로 정상수송조건인 자유낙하에 대해서는 5,000 kg 미만인 용기에 대한 법규에 따라 낙하높이 1.2 m를 적용하였고, 누적조건(stacking)에서는 실제 용기 무게의 5 배에 해당하는 등가의 하중이 더 보수적이므로 운반용기 자중 390 kg의 5배의 하중이 운반용기의 상부에 밀봉

뚜껑에 작용할 때의 하중이 압력하중 형태로 작용하는 조건으로 적용하였다. 가상사고조건에서는 9m 높이에서의 자유낙하 충돌을 상하부 방향의 수직낙하, 수평낙하 및 경사낙하 등의 모든 충돌 조건에 대하여 평가하였다. 파열조건은 몸통의 외부셀로의 충돌과 상부의 밀봉뚜껑으로의 충돌, 그리고 하부의 밀봉마개로의 충돌에 대하여도 평가하였다. 침수조건에 대해서는 수심 200 m의 침수조건을 적용하여 보수적인 평가를 하였다.

정상수송조건 및 가상사고조건에서의 자유낙하 해석에서는 수송용기의 낙하높이가 정상수송조건에서는 1.2 m이고, 사고조건에서는 9m 이지만 모두 핫셀용기의 외부에 충격완충체가 부착된 상태로 강제 평면에 충돌하는 것으로 해석을 하기 때문에, 충격력의 대부분을 충격완충체에서 흡수하여 핫셀용기 본체에 미치는 손상을 크게 완화하게 된다. 또한 핫셀용기가 대부분 핫셀 시설 내에서만 사용되기 때문에 9 m 높이에서의 낙하사고는 발생 가능성이 매우 희박하다고 할 수 있다. 그러나 파열조건에서는 비록 핫셀용기의 낙하높이는 1.0 m의 높이에서 강철봉 위에 떨어지는 상태를 가정하여 안전성을 평가하는 것이기 때문에 Fig. 3과 같이 정상적인 취급 중에 발생할 수 있는 사고 높이와 유사하다고 할 수 있다. 또한, 충돌 바닥도 직경이 15cm인 강철봉 위에 떨어지는 것으로 가정하기 때문에 실제 핫셀 시설의 콘크리트 바닥면 위에 충돌하는 것으로 가정하는 것보다 보수적이다. 따라서 본 연구에서는 파열(puncture)조건을 핫셀용기가 충격완충체 등의 아무런 보호장치의 부착 없이 용기 본체가 여러 방향으로 충돌하는 운전사고충돌로 가정하고 이에 대하여 평가하고자 한다.

3. 핫셀용기의 낙하사고해석

3.1 해석모델

핫셀용기에 대한 운전사고충돌 해석에서는 LS-DYNA[4] 코드를 사용한 유한요소 해석을 수행하였으며, 충돌방향에 따라 운반용기와 강철봉의 좌표계와 요소의 크기를 조절하였다. 핫셀용기 본체는 스테인리스강 케이스에 납이 주조된 본체와 차폐뚜껑으로 구성되어 있으므로 모두 솔리드(solid) 요소를 사용하여 모델링하였고, 용기 본체의 전체 길이가 460 mm로 비교적 작기 때문에 소재간의 접촉부위는 서로 접촉되어 있는 상태로 가정하였다.

핫셀용기의 운전사고 해석모델은 핫셀용기의 대칭성을 이용해 Fig. 4와 같이 각 충돌방향 별로 1/2 단면을 3차원 모델로 구성하였고, 대칭면에는 대칭 경계조건을 주어 실제 완전한 3차원 모델이 충돌하는 것으로 하였다. 충돌 각도에 따라 응력집중 부위가 달라지므로 충격을 받는 부분의 요소를 조밀하게 나누었다. 운반용기 본체와 강철봉 사이의 접촉부분은 단일면접촉(single surface contact) 요소를 사용하여 운반용기 본체와 강철봉이 자유로이 충돌-접촉하도록 하였다. 운반용기 내부의 바스켓 또한 운반용기 본체의 내부 셀과 단순 접촉하는 것으로 고려하였다. 하중조건으로는 핫셀용기 본체의 모든 절점이 1m 높이에서의 자유낙하로 인해 충돌직전에 갖는 4.43 m/s의 초기속도를 갖도록 하였다. 강철봉의 바닥면은 완전히 고정된 것으로 경계조건을 주었으며, 강철봉의 모든 절점들은 초기속도가 영(0)인 것으로 가정하여 바닥면에 고정된 상태로 정지하여 있는 것으로 가정하였다. Fig. 3(a)는 운반용기의 몸통부 파열사고 해석모델을 나타내고 있는데 7,018개의 절점과 3,760개의 솔리드 요소로 구성되어 있다.

3.2 수평 충돌

핫셀용기가 수평상태로 낙하하여 원통형 셸(shell) 부분이 강철봉에 충돌하는 파열조건에 대한 해석결과는 Table 1에 나타난 바와 같이 격납경계인 플랜지면에서의 최대응력은 211.9 MPa이며, 바스켓에서의 최대응력은 82.2 MPa의 낮은 값으로 건전성을 유지하였다. Fig. 5는 핫셀용기의 수평 충돌에서의 변형된 모습 및 응력의 분포를 나타내고 있는데 충돌부분의 외부 셸에 큰 응력이 발생하고 셸을 지지하는 플랜지면에 까지 큰 응력이 발생한다. Fig. 6은 수평 충돌시 운반용기의 외부셸(A), 내부셸(B) 및 바스켓(C)에서 발생하는 응력-시간 이력을 나타내는데 외부셸에 최대하중이 242.7 MPa의 큰 응력이 발생하고 내부셸과 바스켓은 모두 탄성한계 이내로 안전함을 알 수 있다. 그러나 해석결과 강철 봉의 모서리에 접촉하는 부분 근처에서는 국부적으로 583 MPa의 큰 응력이 발생하였다. Fig. 7는 외부셸(A)과 내부셸(B)의 변형-시간의 이력으로 두 값의 차는 외부셸의 변형량을 나타내는 것으로 외부셸은 충돌 후 2.28 ms에서서 최대 약 4.5 mm가 변형되는 것을 알 수 있다. 이것은 차폐체인 납의 두께가 약 4.5 mm 줄어드는 것을 말한다. 그러나 격납경계의 손상이 없이 차폐손실이 크지 않으므로 수평 충돌에서도 핫셀용기가 건전성을 유지함을 알 수 있다.

3.3 상부 충돌

핫셀용기가 상부에 있는 밀봉뚜껑이 바닥으로 향한 수직상태로 낙하하여 강철 봉에 충돌하는 조건에 대한 해석결과 Table 1에 나타난 바와 같이 격납경계인 밀봉덮개에서의 최대응력은 285.5 MPa이며, 바스켓에서의 최대응력은 73.3 MPa의 낮은 값으로 건전성을 유지하였다. Fig. 8은 핫셀용기의 뚜껑부로의 수직낙하 충돌에서의 변형된 모습 및 응력의 분포를 나타내고 있는데 충돌부분인 밀봉덮개에 큰 응력이 발생하고 셸을 지지하는 플랜지면에 가까운 외부셸에 큰 응력이 발생한다. Fig. 9는 뚜껑부 수직낙하 충돌시 핫셀용기의 외부셸(A), 내부셸(B) 및 바스켓(C)에서 발생하는 응력-시간 이력을 나타내는데, 충돌 후 약 1.7 ms까지 응력이 발생하지 않는 것은 강철 봉과 핫셀용기 밀봉뚜껑의 표면과의 틈새로 인해 충돌이 시작되기 전의 자유낙하 시간을 의미하는 것이다. 외부셸에 최대하중이 212.3 MPa의 큰 응력이 발생하고 내부셸도 외부 셸과 비슷한 크기의 응력이 발생하나 바스켓은 탄성한계 이내로 안전함을 알 수 있다. 이때 비록 격납경계에 해당되지 않지만 충돌면 바로 위의 차폐뚜껑 부분에서는 국부적으로 265.6 MPa의 큰 응력이 발생하지만 허용한계 이내로 유지된다. 따라서 뚜껑으로의 상부수직낙하 충돌에서도 핫셀용기가 건전성을 유지함을 알 수 있다.

3.4 하부 충돌

핫셀용기의 하부에 있는 밀봉마개가 바닥으로 향한 수직상태로 낙하하여 강철 봉에 충돌하는 조건에 대한 해석결과 격납경계인 최대응력은 내부 셸의 하부에서 발생하였으며, 내부 셸에서의 최대응력은 207.2 MPa이며, 바스켓에서의 최대응력은 63.8 MPa의 낮은 값으로 건전성을 유지하였다. Fig. 10은 핫셀용기의 하부 수직낙하 충돌에서의 변형된 모습 및 응력의 분포를 나타내고 있는데 충돌부분인 밀봉마개에 큰 응력과 변형이 발생하고 밀봉마개를 지지하는 바닥 면과 내부 셸의 하부에 큰 응력이 발생한다. Fig. 11은 하부 수직낙하 충돌시 핫셀용기의 내부셸(A), 바스켓(B) 및 바닥판(C)에서 발생하는 응력-시간 이력을 나타내는데, 내부 셸에서는 비교적 큰 응력이

발생하지만 허용한계 이내이며, 바스켓과 밀봉마개를 지지하는 바닥판 부분의 발생 응력이 작으므로 핫셀용기는 안전하다. 비록 밀봉마개의 누설시험 연결꼭지를 보호하는 원통은 국부적으로 1,099.4 MPa의 큰 응력이 발생하나 격납경계를 형성하는 바닥판 부분이 허용응력 한계 이내로 유지되므로 원통부분이 누설시험 연결꼭지를 효과적으로 보호함을 알 수 있다. 따라서 하부 수직낙하 충돌에서도 핫셀용기가 건전성을 유지함을 알 수 있다.

Table 1. Calculated maximum stress intensities under accident conditions

Impact Location	Component	Maximum stress(MPa)	Allowable stress(MPa)	Remark
Side	Outer shell	242.7	331	$D_{\max} = 4.5 \text{ mm}$ (outer shell deformation)
	Basket	82.2		
	Flange	211.9		
Top end	Outer shell	212.3	331	
	Basket	73.3		
	Sealing cover	285.5		
Bottom end	Inner shell	207.2	331	
	Basket	63.8		
	Bottom PL	82.8		

4. 해석결과 고찰

가상사고조건 중의 하나인 1 m 파열조건에 대하여 실제 운전중 발생하기 쉬운 사고로 가정하여 충격완충체가 없고 운반용기 몸체만이 강철봉 위로 충돌하는 것으로 하고, 원통형의 측면으로 충돌하는 경우와 상부인 밀봉뚜껑이 충돌하는 경우, 그리고 바닥의 밀봉마개로 충돌하는 세 가지 경우에 대하여 해석을 수행한 결과 Table 1에 나타난 바와 같이 최대응력이 모두 허용한계 이내로 나타났다. Table 1에 제시된 응력값들은 하중조합(load combination) 기준[5]에 따라 용기 내부에 3기압의 내부압력이 작용할 때 발생하는 최대응력값을 합산하여 나타낸 값이다.

핫셀용기의 셸(shell) 부분이 충돌하는 경우 격납경계인 플랜지면에서의 최대응력이 211.9 MPa이며, 바스켓에서의 최대응력은 82.2 MPa의 낮은 값으로 건전성을 유지하였다. 또한 모든 경우에 국부적인 최대응력에 비해 방사성물질을 직접 담고 있는 바스켓에 발생하는 응력값이 훨씬 작은 것은 핫셀용기의 구조가 외부 몸통부와 내부의 바스켓이 서로 분리되어 단순 접촉하고 있으며, 내부 셸과 바스켓 사이의 틈새(clearance)가 외부로부터의 충격변형을 격리시키는 역할을 하기 때문인 것으로 판단된다.

이상과 같이 핫셀용기는 직경이 15cm인 강철봉 위에 충돌하는 조건에서는 강철 봉과의 충돌 부분에 국부적으로는 큰 변형이 발생하지만 용기의 내부 셸 및 격납경계인 바스켓이 건전성을 충분히 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 운전중의 취급부주의로 인한 사고시에도 충분히 건전성

을 유지하는 것으로 평가되었다. 한편, 실제 운전중에는 Fig. 3과 같이 핫셀용기가 항상 이송용 테이블 위에 안착된 상태에서 취급되며, 이송중에는 이송테이블의 높이를 낮춘 상태로 운반하기 때문에 실제 사고 가능한 낙하 높이는 이보다 더 적으며, 충돌 가능한 면도 모두 콘크리트 바닥이기 때문에 취급중 사고로 인한 충돌시의 손상은 이보다 훨씬 적으리라 판단된다.

5. 결 론

핫셀용기의 취급사고로 인한 충돌사고시 건전성 평가를 위한 해석을 수행하고, 응력분포 및 변형, 충격력의 이력 및 응력의 이력 등을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 핫셀용기는 정상적인 취급 중에 발생할 수 있는 가상적인 낙하사고에 대해서도 충분히 안전성을 유지하는 것으로 평가되었다. 특히, 운반용기에 아무런 보호장치 없이 자유낙하하여 강철면 위에 충돌한다 해도 용기 본체 외부의 충돌부분의 국부적 응력발생을 제외하면 격납경계의 모든 부분의 응력이 탄성한계 이내에 있으며, 최대 발생응력이 허용응력 범위 이내를 유지한다. 또한 핫셀용기는 외부 수송시 충격완충체를 부착함으로써 자유낙하충돌 사고에서의 안전성을 더욱 높일 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] IAEA Safety Standards Series No. TS-R-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material," IAEA, 1996 Edition (Revised).
- [2] 과기부고시 제96-38호, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정," 1996.
- [3] Lampinen, B. E. and Jeryan, R. A., "Effectiveness of Polyurethane Foam in Energy Absorbing Structures," *Trans. SAE 91*, pp. 2059~2076 (1982).
- [4] Hallquist, J. O., 1995, "LS-DYNA Theoretical Manual," LSTC Report 1018, Livermore Software Technology Corporation, USA.
- [5] U. S. NRC. Regulatory Guide 7.8, Load Combinations for the Structural Analysis of Shipping Casks, 1977.

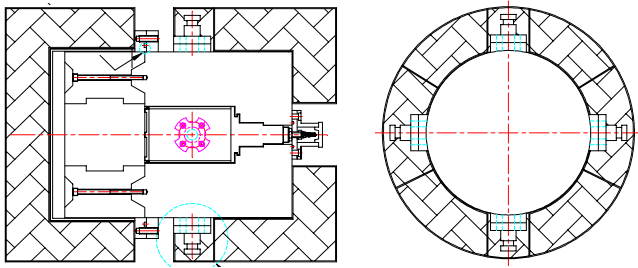


Fig. 1. Sectional drawing of the hot-cell cask.

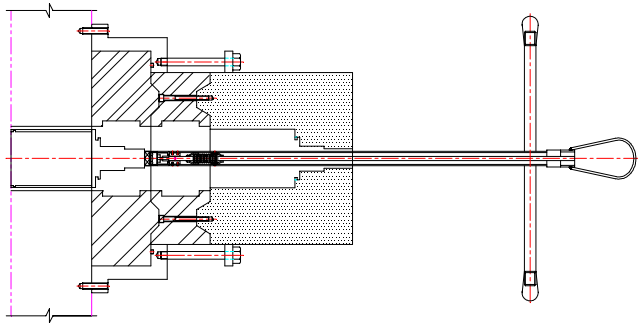
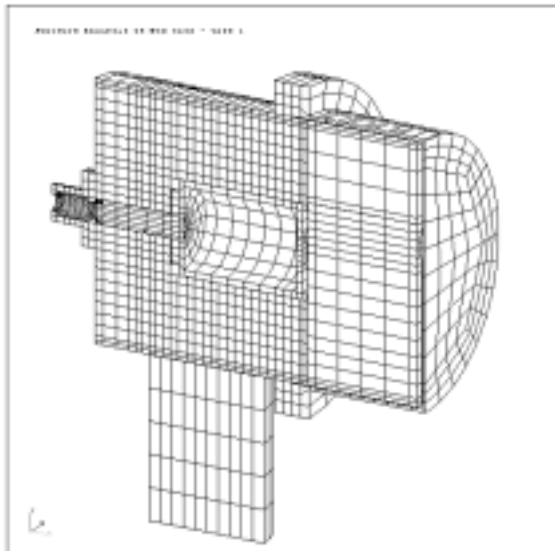


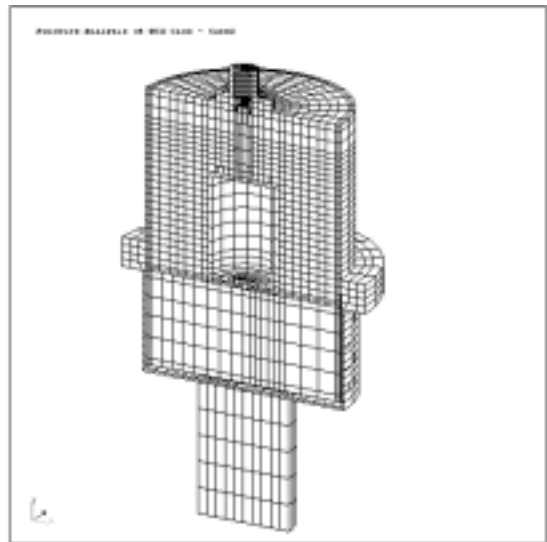
Fig. 2. Schematic drawing of the hot-cell cask operation.



Fig. 3. Hot-cell cask connection with hot-cell rear door.

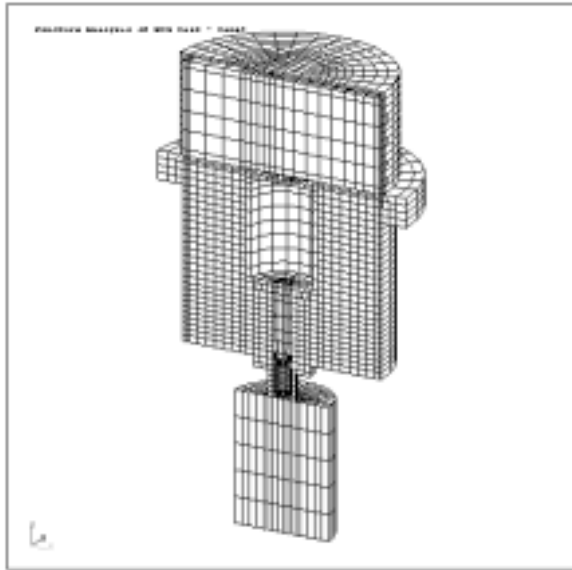


(a) body puncture



(b) lid on puncture

Fig. 4. Puncture analysis model of hot-cell cask.



(c) bottom-end on puncture

Fig. 4. Puncture analysis model of hot-cell cask.

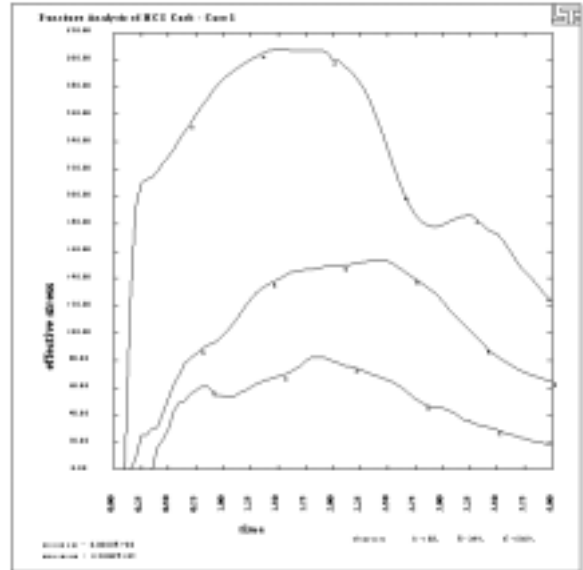


Fig. 6. Stress-time histories of the hot-cell cask under body puncture.

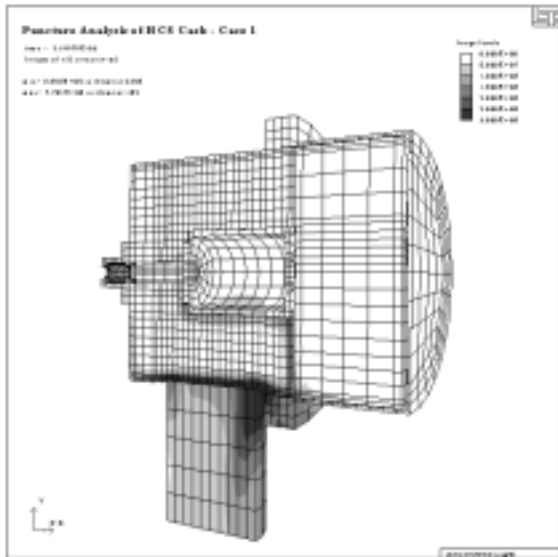


Fig. 5. Stress contour and deformed shape of the hot-cell cask under body puncture.

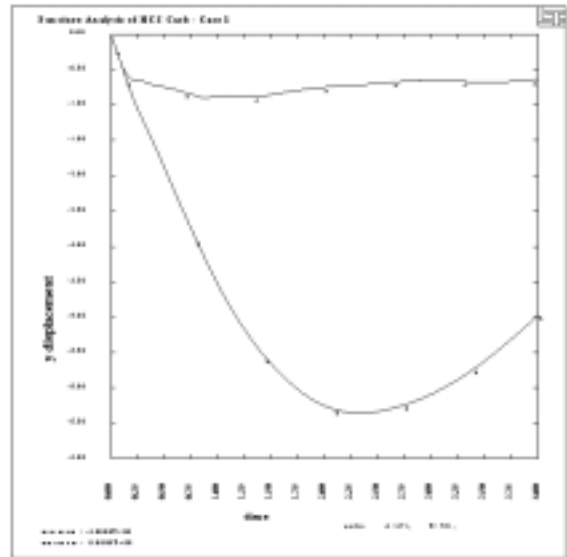


Fig. 7. Displacement-time histories of the hot-cell cask under body puncture.

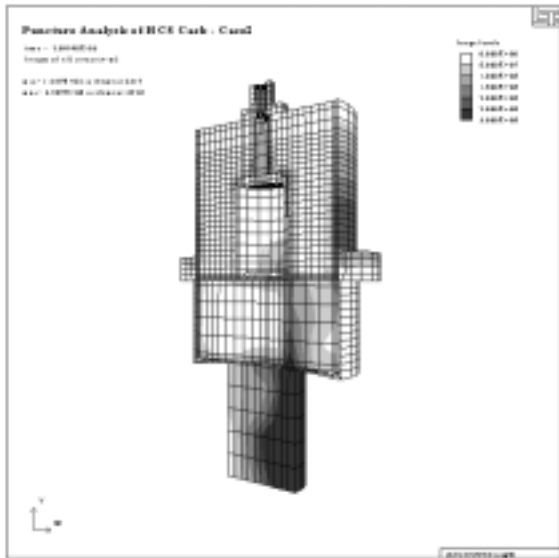


Fig. 8. Stress contour and deformed shape of the hot-cell cask under lid on puncture.

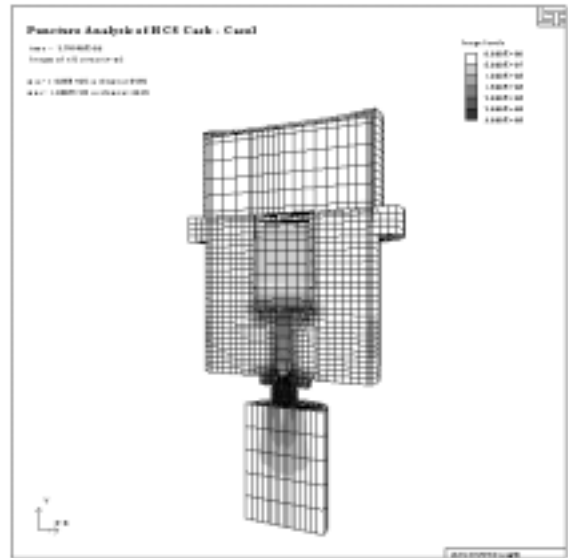


Fig. 10. Stress contour and deformed shape of the hot-cell cask under bottom-end on puncture.



Fig. 9. Stress-time histories of the hot-cell cask under lid on puncture.

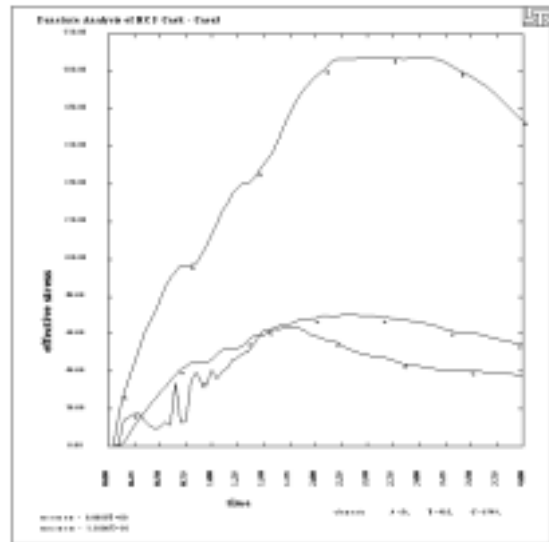


Fig. 11. Stress-time histories of the hot-cell cask under bottom-end on puncture.