

'99 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

핫셀 조사시편 운반용기의 구조건전성 평가

Structural Integrity Evaluation of Hot-Cell Specimen Cask

구정희, 서기석, 구대서, 민덕기, 박성원

한국원자력연구소

대전시 유성구 덕진동 150

요 약

핫셀에서 사용하는 조사시편 운반용기는 핫셀과 차폐형 글로브박스 사이에서 사용후핵연료 조사시편을 인출하고, 투입하기 때문에 이동 및 취급작업이 용이하도록 설계한다. 그것은 일반적인 운반용기와는 달리 시편용기는 핫셀이나 차폐 글로브박스의 시편용기 접속부와 결합된 상태에서 차폐뚜껑을 개폐하기 때문에 작업자의 취급성과 차폐 안전성을 우선적으로 고려하는 것이다. 그러나 조사시편은 고준위 방사성물질로서 운반용기는 취급상의 편리성과 함께 구조적 건전성을 유지할 수 있어야만 한다. 본 연구에서는 핫셀 조사시편 운반용기의 규정에 제시된 제반 하중조건에 대한 구조적 거동을 평가하여 조사시편 운반용기가 구조적 건전성을 유지함을 입증하였다.

Abstract

Hot-cell specimen cask, which transfers irradiated specimen between hot-cell and shielded glove box, is designed to be convenient for specimen handling and cask transfer. Because the shield lid should be opened under the combined condition with the counter lid in cask adaptor of hot-cell or shielded glove box. However, the cask should be satisfied not only the operational convenience but also the structural integrity as a high level radioactive material transport package. In this paper, the structural behaviors of hot-cell specimen cask were evaluated under various load conditions specified as requirements, and therefore it was proved that the cask maintains structural integrity.

1. 서 론

사용후핵연료의 연소이력에 따른 특성의 변화 등을 연구하기 위하여 필요 부분에 차폐장치를 하고 부분적으로 개조된 주사전자현미경을 확보하고, 고준위 방사성물질을 취급하기에 적합하도록 차폐 글로브박스과 핫셀 조사시편 운반용기를 설계하였다. 핫셀 조사시편 운반용기는 핫셀에서 마운팅 처리된 사용후핵연료 시편을 운반하기 위한 것으로 조사후시험시설 내부에서 핫셀과 주사전자현미경이 설치된 차폐 글로브박스 사이에서 이동하기 위해 개발된 것이므로 기체나 액체의 유출을 염려할 필요가 없이 차폐를 유지하는 것이 가장 중요하다. 그러나 조사시편을 시설 외부로 반출하거나 다른 방사성물질을 외부에서 반입할 경우 밀봉을 유지하고 운반 중에 발생할 수 있을지 모르는 충돌사고나 화재사고 등에 대한 안전성을 고려해야 한다.

핫셀 조사시편 운반용기는 Fig. 1과 같이 원통형 구조로 크게 용기본체(cask body)와 충격완충체(impact limiters)로 나누어진다. 용기본체는 방사선조사시편을 담을 수 있는 바스켓(basket), 바스켓을 감싸고 있는 내부셀(shell), 외부의 외부셀 및 납 차폐체 등의 몸체부분과 상부에 미끄럼 방식으로 개폐되는 미끄럼차폐뚜껑(sliding shield lid) 부분과 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, 총길이 620 mm이며, 총 중량은 390 kg이다.

이러한 조사시편 운반용기는 핫셀이 있는 시설 내부에서만 사용하는 것이지만 조사시편이 고준위 방사성물질이기 때문에 관련규정에 따른 구조적 건전성을 유지하여야 하며, 필요시 시설 외부로 반출할 경우 일반적인 방사성물질 운반용기와 같이 취급될 수 있어야만 한다. 따라서 본 연구에서는 유한요소 해석코드를 사용하여 핫셀 조사시편 운반용기의 각종 하중조건에 대한 구조해석을 수행하여 구조적 건전성을 평가하였다.

2. 조사시편 운반용기의 하중조건

핫셀 조사시편 운반용기는 소형 운반용기로서 최대 방사능 양이 112 Ci 이하인 조사시편을 운반할 수 있으며, 과기처고시 제96-38호[1]와 IAEA Safety Standards Series No. ST-1[2]의 규정에 따라 B형 운반용기로 분류된다. 따라서 운반용기에 대한 일반규정(포장기준), 정상운반조건(일반시험조건) 및 가상사고조건(특별시험조건)에 대한 하중조건을 만족하도록 제반 하중조건을 적용하였다.

정상수송조건에서는 내부 압력조건, 자유낙하 및 누적조건 등에 대하여 평가하였다. 관련법규에 따라 정상수송조건에서의 자유낙하에 대해서는 중량이 5,000 kg 미만의 용기에 대한 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 밀봉뚜껑에 작용할 때의 하중인 224 kPa의 압력이 작용하는 조건으로 적용하였다. 정상수송조건에서의 자유낙하에서는 하부수직낙하와 수평낙하의 두 가지 조건에 대하여만 평가하였다. 가상사고조건에서는 상하부 방향의 수직낙하, 수평낙하 및 경사낙하 등의 모든 충돌조건에 대하여 평가하였고, 파열조건 또한 몸통의 외부셀로의 충돌과 상부의 밀봉뚜껑으로의 충돌, 그리고 하부의 밀봉마개로의 충돌에 대하여도

평가하였다. 침수조건에 대해서는 수심 200 m의 침수조건을 적용하여 보수적인 평가를 하였다.

3. 조사시편 운반용기의 구조해석

3.1 해석모델

항셧 조사시편 운반용기에 대한 유한요소 해석에서 압력조건, 침수조건 및 누적조건 등의 정적 하중조건 및 파열(puncture)조건에 대하여는 운반용기 자체가 직접 하중을 받는 것으로 가정하였으며, 자유낙하조건에 대해서는 충격완충체가 부착된 상태로 충돌하는 것으로 가정하였다. 운반용기는 스테인리스강 셸(shell)에 납이 주조된 본체와 차폐뚜껑으로 구성되어 있으므로 솔리드(solid) 요소를 사용하였고, 충격완충체는 스테인리스강 박판으로 된 케이스와 내부에 폴리우레탄 폼이 충격흡수재로 삽입된 구조를 가지므로 스테인리스강 케이스는 셸 요소를 사용하여 모델링하였으며, 폴리우레탄 폼은 솔리드 요소로 모델링하였다.

해석코드로는 LS-DYNA [4]를 사용하였으며, 해석모델은 운반용기의 대칭성을 이용해 1/2 단면을 3차원 모델을 구성하였다. 충돌조건에 대한 해석에서는 충돌 각도에 따라 응력집중 부위가 달라지므로 충격을 받는 부분의 요소를 조밀하게 나누었다. 충격완충체와 운반용기 본체 등 소재간의 접촉부분은 단일면접촉(single surface contact) 요소를 사용하여 운반용기 본체와 충격완충체가 자유로이 충돌-접촉하도록 하였다. 상하부 충격완충체간의 클램프 고정부위는 강체절점구속조건(rigid nodal constraint)을 사용하여 고정부분이 함께 움직이도록 하였다. 운반용기 내부의 바스켓 또한 운반용기 본체의 내부 셸과 단순 접촉하는 것으로 고려하였다.

압력조건에 대해서는 하중이력을 이용하여 하중 작용 표면에 압력하중이 가해지도록 하였으며, 충돌해석에서 용기의 충돌면은 강체 수평면으로 가정하였고, 하중조건으로는 운반용기의 모든 절점이 자유낙하로 인해 충돌직전에 갖는 초기속도를 갖도록 하였다. Fig. 2는 운반용기의 하부수직 자유낙하 해석모델을 나타내고 있는데 27,574개의 절점과 22,496개의 solid 요소, 4,900개의 셸 요소로 구성되어 있다.

3.2 정상수송조건 해석결과 및 고찰

정상수송조건에 대한 해석결과는 각 부분에서 계산된 최대응력은 Table 1에 나타난 바와 같이 큰 응력이 발생하지 않았으며, 특히 내부의 바스켓은 응력이 거의 발생하지 않음을 알 수 있었다. 운반용기의 내부압력으로 인해 발생하는 응력은 전 하중조건에 대하여 중첩하여야 한다[5]. 그러나 조사시편 운반용기는 대기압상태로 운반하며, 운반 내용물인 조사시편이 압력을 발생치 않지만 보수적인 설계를 위해 용기 본체의 내부셸, 차폐뚜껑의 내외부 및 바스켓의 내외부, 밀봉뚜껑 및 밀봉마개 내부 등 모든 내부 공간에 3기압의 압력이 작용한다고 가정하고 해석하였다.

내부압력조건에서는 밀봉뚜껑의 가장자리에 응력이 집중되나 다른 부분에는 응력이 거의 발생하지 않았다. 압력조건에서 바스켓에서의 최대응력은 20.6 MPa이며, 최대응력은 외부의 밀봉뚜껑에서 155.0 MPa로 나타났으나 탄성한계 이내이므로 충분히 안전함을 알 수 있다. 1.2m 자유낙하 조건에서는 수직낙하와 수평낙하시 모두 외부의 충격완충체만 일부 변형되고 안전성을 유지하였다. 수직낙하에서 최대응력은 외부 셸에서 74.8 MPa이 발생하였고, 수평낙하는 외부 셸에서 72.5 MPa이 발생하였다. 한편 누적조건에서는 하중이 직접 작용하는 밀봉뚜껑의 상부 가장자리에

응력이 집중되었는데 최대 응력이 밀봉뚜껑의 상부에서 100.2 MPa로 나타났으며, 바스켓에서는 2.3 MPa로 충분히 안전성을 유지하였다.

Table 1. Calculated maximum stresses under normal transport conditions

Load condition		Component	Maximum stress (MPa)	Allowable stress(MPa)	Remark
Internal pressure		Inner shell	3.9	138	
		Basket	20.6	138	
		Sealing cover	155.0	138	
1.2 m free drop	Bottom-end on	Inner shell	59.3	138	
		Outer shell	74.8	138	
		Basket	68.3	138	
	Side	Inner shell	14.2	138	
		Outer shell	72.5	138	
		Basket	8.3	138	
Stacking		Outer shell	6.1	138	
		Basket	2.3	138	
		Sealing cover	100.2	138	

3.3 가상사고조건 해석결과 및 고찰

가상사고조건인 하중조건인 9 m 자유낙하조건과, 1 m 파열조건 및 200 m 침수조건으로 이루어진 가상사고조건에 대한 해석결과는 Table 2에 나타낸 바와 같다. Fig. 3은 하부 수직낙하시 최대응력이 발생할 때 운반용기의 응력분포 및 변형된 모습을 나타내고 있는데 하부 충격완충체의 바닥부분이 많이 변형되고, 상부 충격완충체는 본체에서 벗어나 틈이 벌어진다. Fig. 4는 하부 수직낙하시 충돌면에 발생하는 충격력의 이력으로 충돌 직후 충격력이 급격히 증가하며, 충돌 후 2.7 ms에서 충격력이 2,107 kN에 이른 후 충격력이 급격히 감소하며 충돌이 끝난다. Fig. 5는 운반용기의 외부셀, 내부셀 및 바스켓에서 발생하는 응력-시간 이력을 나타내는데 외부셀에서만 응력이 크게 발생하고 내부셀과 바스켓에서는 응력이 거의 발생하지 않았다.

Fig. 6은 상부 수직낙하시 최대응력이 발생할 때 운반용기의 응력분포 및 변형된 모습을 나타내고 있는데 하부 수직낙하시와 비슷한 경향을 보였다. Fig. 7은 수평낙하시의 충격력의 이력으로 최대 하중은 충돌 후 3.9 ms에서 1,853 kN으로 나타났으며, 충돌 후 8.0 ms에서 충돌이 끝났는데, 이와 같이 수평낙하에서는 수직낙하에서 보다 충격력이 작고 충돌시간이 길어지는 것은 원통형 충격완충체의 측면이 최초에 접선형태로 충돌하여 초기 충격력이 작고, 충격완충체의 변형량도 증가하기 때문이다. Fig. 8은 수평낙하시 최대응력이 발생할 때 운반용기의 응력분포 및 변형된 모습을 나타내고 있고, Fig. 9는 운반용기의 외부셀, 내부셀 및 바스켓에서 발생하는 응력-시간 이력을 나타내는데 모두 탄성한계 이내이며, 외부셀에서 응력이 159.6 MPa까지 발생하나 내부셀과 바스켓에서는 응력이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

운반용기의 하부 모서리가 운반용기의 무게중심과 수직선을 이루며 충돌하는 55° 경사낙하 해석결과는 Fig. 10~12에 나타내었다. 경사낙하는 충돌시간이 15.0 ms로 가장 길었고, 충격완충체의 최대 변형량도 8.4 cm로 가장 컸으며, 충격력은 931 kN으로 자유낙하 조건중 가장 작은 충격력이 발생하였다. Fig. 12에 제시된 바와 같이 경사낙하시 운반용기의 외부셀에는 응력이 102.5 MPa까지 발생하나 내부셀과 바스켓에서는 응력이 거의 발생하지 않았다.

파열조건에 대한 해석에서는 충격완충체가 없고 운반용기 몸체만이 강철봉 위로 충돌하는 것으로 하였으며, 원통형의 측면으로 충돌하는 경우와 상부인 밀봉뚜껑이 충돌하는 경우, 그리고 바닥의 밀봉마개로 충돌하는 세 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였는데 모두 건전성을 유지하였다. 용기의 셸(shell) 부분이 충돌하는 경우 격납경계인 플랜지면에서의 최대응력이 211.9 MPa이며, 바스켓에서의 최대응력은 82.2 MPa의 낮은 값으로 건전성을 유지하였다. 수심 200 m 침수조건에 대한 조건에서는 최대 응력이 밀봉뚜껑에서 발생하지만 그 값이 120.6 MPa로 탄성한계 이내이므로 침수조건에서 운반용기가 건전성을 충분히 유지함을 알 수 있다.

이상과 같이 핫셀 조사시편 운반용기는 자유낙하충돌시 충격완충체가 변형되며 운반용기 본체에 발생하는 손상을 방지하며, 파열조건에서는 강철 봉과의 충돌 부분에 국부적으로는 큰 변형이 발생하지만 용기의 내부셀 및 격납경계인 바스켓은 건전성을 충분히 유지하는 것으로 평가되었다.

4. 결 론

핫셀 조사시편 운반용기의 구조건전성 평가를 위한 해석을 수행하고, 응력분포 및 변형, 충격력의 이력 및 응력의 이력 등을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 핫셀 조사시편 운반용기는 정상수송조건 및 가상사고조건인 모든 정적 하중조건에서 용기 본체의 모든 부분의 응력이 탄성한계 이내에 있으며, 충돌하중조건에서는 최대 발생응력이 허용응력 범위 이내를 유지한다. 또한 핫셀 조사시편 운반용기의 충격완충체는 자유낙하충돌 하중조건에서 외부 케이스의 좌굴변형과 내부에 삽입된 충격흡수재의 소성변형을 통하여 용기 본체에 미치는 충격력을 크게 완화시켜 운반용기에 손상이 방지하는 역할을 발휘한다. 이와 같은 구조해석을 통하여 핫셀 조사시편 운반용기가 B형 운반용기로서 법규에서 요구하는 제반 하중조건에 대하여 충분한 구조적 건전성을 가짐이 입증되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 과기처고시 제96-38호, “방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정,” 1996.
- [2] IAEA Safety Standards Series No. ST-1, “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material,” IAEA, 1996.

Table 2. Calculated maximum stress intensities under accident conditions

Load condition		Component	Maximum stress(MPa)	Allowable stress(MPa)	Remark
9 m free drop	Bot. end	Outer shell	202,9	331	$F_{max} = 2,107 \text{ kN}$ $D_{max} = 2,0 \text{ cm}$ $g_{max} = 562 \text{ g}$
		Basket	64,0		
		Sealing cover	199,5		
	Top end	Outer shell	68,7	331	$F_{max} = 2,419 \text{ kN}$ $D_{max} = 2,2 \text{ cm}$ $g_{max} = 643 \text{ g}$
		Basket	30,7		
		Sealing cover	203,3		
	Side	Outer shell	159,6	331	$F_{max} = 1,853 \text{ kN}$ $D_{max} = 3,3 \text{ cm}$ $g_{max} = 494 \text{ g}$
		Basket	12,7		
		Sealing cover	218,2		
	55° Corner	Outer shell	102,5	331	$F_{max} = 931 \text{ kN}$ $D_{max} = 8,4 \text{ cm}$ $g_{max} = 251 \text{ g}$
		Basket	14,1		
		Sealing cover	215,9		
Puncture	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		
	Bot. end	Inner shell	207,2	331	
		Basket	63,8		
		Bottom PL	82,8		
Water immersion	Outer shell	11,3	331	2,0 MPa external pressure	
	Basket	9,1			
	Sealing cover	120,6			

- [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., 1991, "LS-DYNA3D 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.

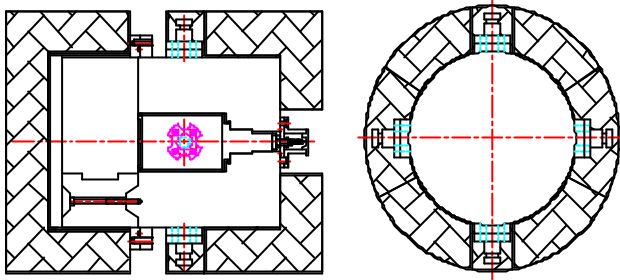


Fig. 1 Configuration of HCS cask.

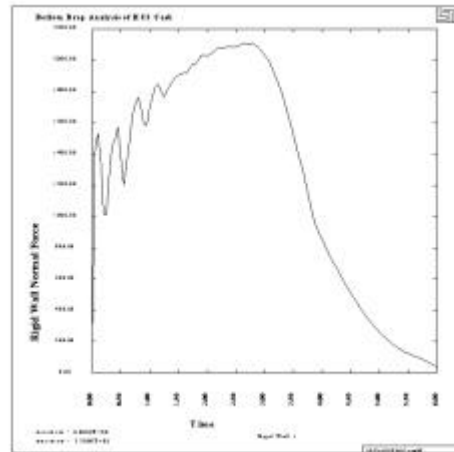


Fig. 4 Impact force-time history of HCS cask under 9m bottom-end on drop.

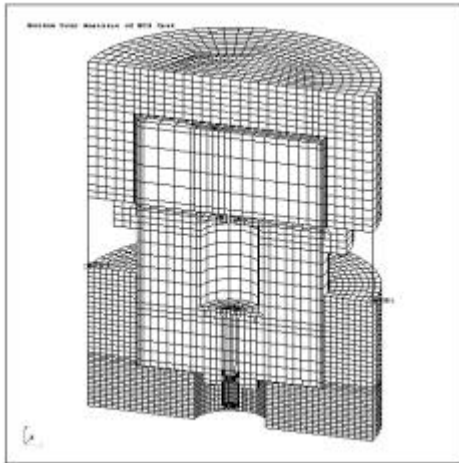


Fig. 2 Bottom-end on drop analysis model of HCS cask.

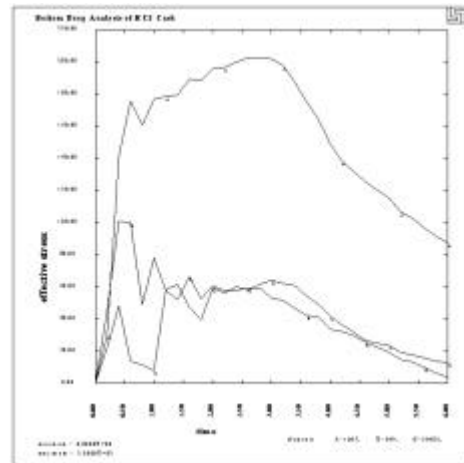


Fig. 5 Stress-time histories of HCS cask under 9m bottom-end on drop.

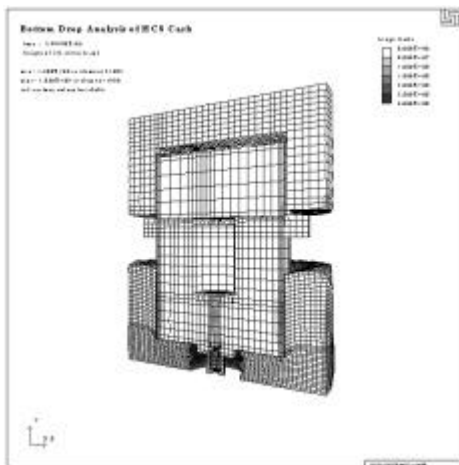


Fig. 3 Stress contour and deformed shape of HCS cask under 9m bottom-end on drop.

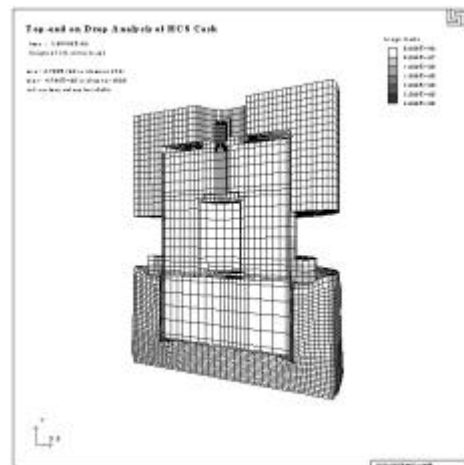


Fig. 6 Stress contour and deformed shape of HCS cask under 9m top-end on drop.

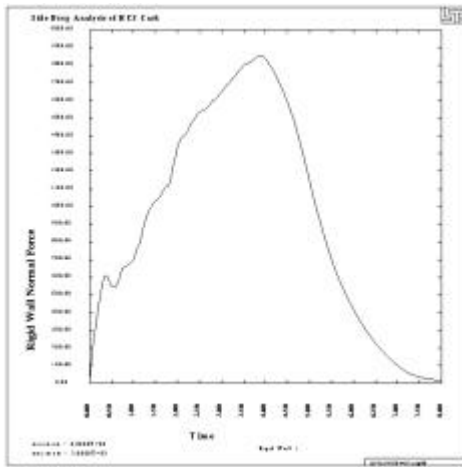


Fig. 7 Impact force-time history of HCS cask under 9m side drop.

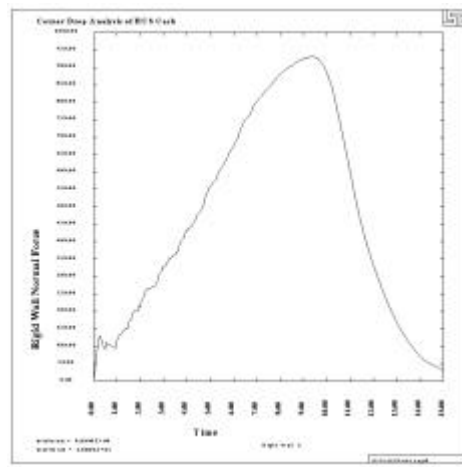


Fig. 10 Impact force-time history of HCS cask under 9m corner drop.

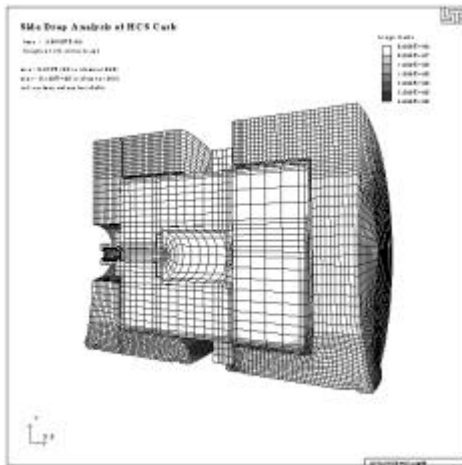


Fig. 8 Stress contour and deformed shape of HCS cask under 9m side drop.

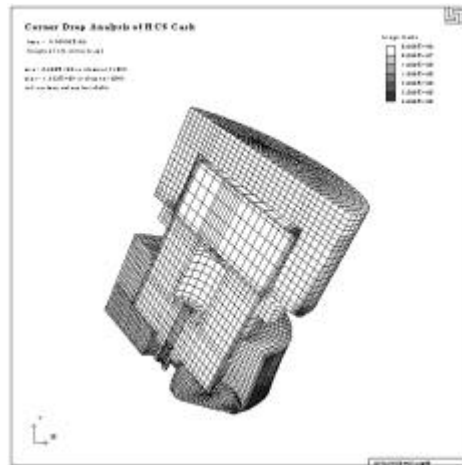


Fig. 11 Stress contour and deformed shape of HCS cask under 9m corner drop.

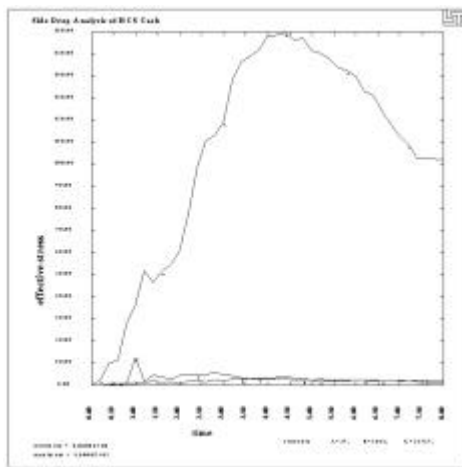


Fig. 9 Stress-time histories of HCS cask under 9m side drop.

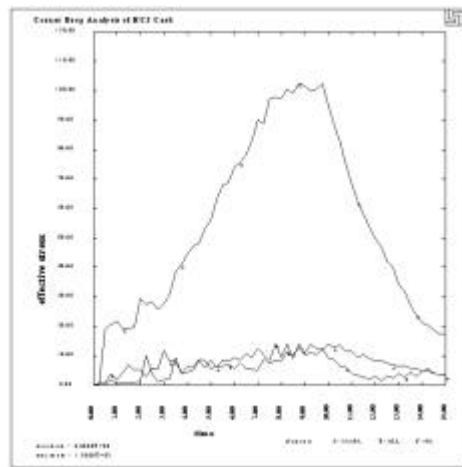


Fig. 12 Stress-time histories of HCS cask under 9m corner drop.

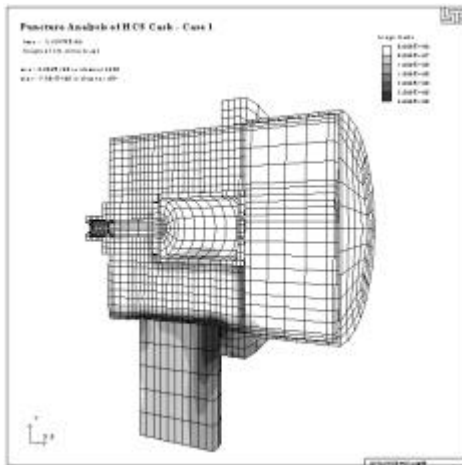


Fig. 13 Stress contour and deformed shape of HCS cask under side puncture.

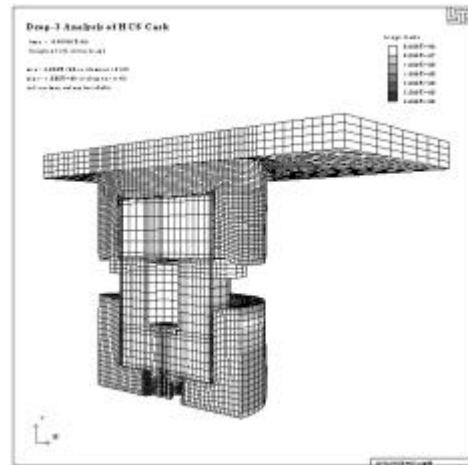


Fig. 16 Stress contour and deformed shape of HCS cask under drop-III.

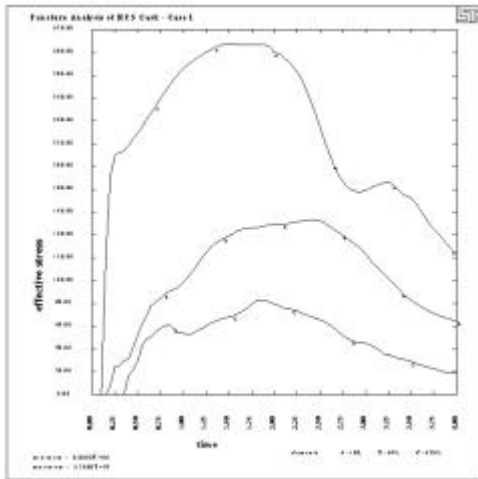


Fig. 14 Stress-time histories of HCS cask under side puncture.

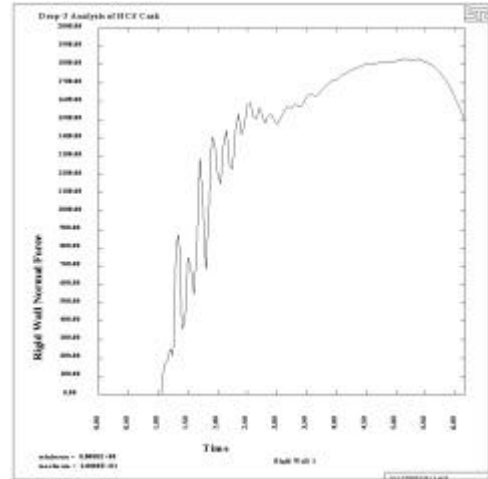


Fig. 17 Impact force-time history of HCS cask under drop-III impact.

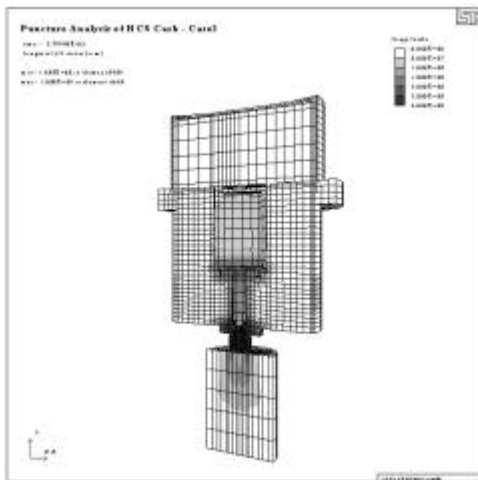


Fig. 15 Stress contour and deformed shape of HCS cask under bottom-end on puncture.

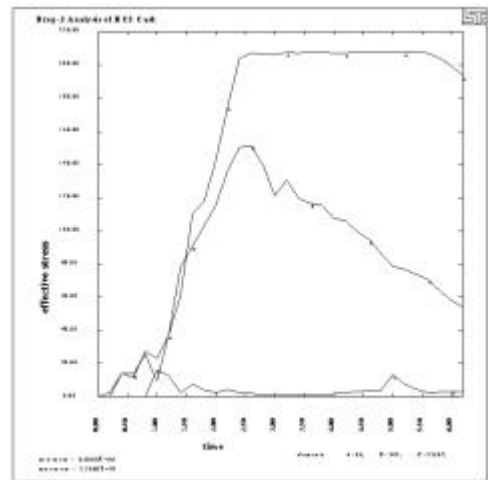


Fig. 18 Stress-time histories of HCS cask under drop-III impact.