2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

수송용기 분류형태에 따른 충격완충체 형상의 충격흡수거동 영향

Influence of the Impact Limiter Shape on the Impact Absorbing Behavior According to the Cask Type

구정회, 서기석, 이주찬, 방경식, 박성원

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

방사성물질 운반용기는 자유낙하 충돌사고 등의 가상사고에 대한 구조적 안전성을 유지하도록 원자력 법규에서 규정하고 있다. 충격완충체는 대부분 박판의 철제 케이스 내부에 폴리우레탄 폼 등의 충격흡수재를 삽입한 구조를 사용하고 있으며, 박판 구조물의 좌굴변형과 다공성 소재의 소성압축변형 등을 이용하고 있다. 박판 철제 구조물의 좌굴변형은 같은 크기와 두께를 갖더라도 경계조건에 따라 압축 거동이 크게 달라진다. 운반용기는 내부에 담을 방사성물질의 방사능량에 따라 A형과 B형 운반용기로 나뉘어진다. 본 연구에서는 방사성물질 운반용기가 분류기준이 달라짐에 따라 충격완충체의 형상변화가 충격흡수거동에 미치는 변화를 비교하여 효과적인 설계방안을 제시하였다.

Abstract

All radioactive material transportation packages are required to maintain their structural safety under the hypothetical accident conditions such as free drop impact prescribed as a regulation in atomic law. Impact limiters which attached at the outer ends of the packages use a foam-filled steel shell structures, in which the buckling of thin walled structure and the crush deformation behavior are used together for energy absorbing mechanism. For the thin walled structures, in spite of the same dimensions and thicknesses, the buckling behaviors are changed quite differently according to the boundary conditions. The packages are classified into A or B-type according to the contents of the radioactive material. In this study, the variation of impact absorbing behaviors according to the change of corner shape variation of impact limiters for the same package if it is classified differently, and some comments for effective impact limiter design are suggested.

1. 서 론

사용후핵연료나 고준위 방사성폐기물 등 방사성물질 운반용기는 국내 원자력법은 물론 국제원자력기구의 법규[1]에서 정하고 있는 자유낙하 충돌사고 등의 모든 가상사고조건에 대해 안전성을 유지하여야 한다. 따라서 운반용기의 외곽에는 충돌사고 및 화재사고에 대비해 충격완충체를 부착하여 충격을 완화하고, 운반용기가 화염에 직접 노출되는 것을 방지한다. 충격완충체는 형상과 중량 면에서 효율이 높은 박판 구조물의 좌굴변형과 충격흡수 성능이 우수한 다공성 재질의 소성압축변형을 이용하는 방법이 널리 사용되고 있다[2]. 방사성물질 운반용기에 사용되는 충격완충체는 대부분 철제 케이스 내부에 발사나무나 폴리우레탄 폼 등의 충격흡수재를 삽입한 구조를 사용하고 있다[3].

Fig. 1은 이상적인 충격완충체의 하중-변위 선도를 나타내고 있는데, 최초 충격완충체가 소성영역에 이른 후에 일정한 응력값을 유지하면서 변형이 계속 된 후, 변형이 약 60% 이상 진행되면 비압축성 거동을 보이며 잠김(lock-up) 현상이 발생하며 응력이 급격히 증가한다. 따라서 충격완충체의 설계시에는 변형이 잠김에 이르기 전에서 충돌거동이 끝나도록 해야 한다. Fig. 2는 폴리우레탄 폼의 두 가지 밀도에 대한 하중-변위 선도를 나타내고 있다. 폴리우레탄 폼은 밀도가 높아질수록 항복응력이 증가하며 에너지 흡수량이 증가하지만, 낮은 변형량에서 잠김현상이 발생하는 고밀화영역(densification region)에 이르기 때문에 밀도를 너무 높일 수가 없다. Fig. 3은 원통형 박판 구조물의 축방향 압축시에 하중-변위 선도를 나타낸다. 이와 같이 박판 원통구조물의 경우에는 초기 좌굴 발생 후 튜브가 접힘에 따라 압축하중이 계속 증감하는 현상이 발생한다. 폴리우레탄 폼의 경우에는 압괴(crush)하중 값이 작은 문제점이 있으며, 박판구조물의 좌굴은 초기 좌굴하중 값은 크지만 일단 좌굴이 발생하면 압괴하중이 급격히 감소하는 문제점을 갖고 있다. 또한 박판 구조물의 좌굴변형은 같은 크기와 두께 및 형상을 갖더라도 그 경계조건에 따라 압축거동이 크게 달라진다[4]. 축방향의 압축하중을 받는 같은 사각형 평판 구조물의 경우 형상비(a/b)와 측면의 경계조건에 따라 좌굴계수(buckling coefficient)가 크게 변화한다. 그러므로 충격흡수재를 삽입한 박판 구조물 형태의 충격완충체는 이들 두 가지 특성을 잘 이용하여, 상호 보완기능을 갖도록 할 경우에 충격을 효과적으로 흡수할 수 있을 것이다.

충격완충체의 크기 및 형상은 운반용기의 형태에 따라 달라지지만 운반용기가 일반적으로 원통형 형상을 가지고, 충격완충체는 이 원통형 운반용기의 양 끝단에 부착되게 된다. 이러한 운반용기는 두께가 얇은 강판을 절단 및 절곡한 후 용접하여 형상을 만드는데 충돌각도에 따라 충격흡수 성능이 다르게 된다. 대형 수송용기의 경우에는 충격완충체의 철제 케이스의 두께를 비교적 쉽게 조절할 수 있지만 소형운반용기의 경우에는 용접을 위해서는 철판의 두께가 2 mm이하로

얇아질 수 없게 되므로, 전체적인 충돌거동에 있어서 박판구조물의 영향이 커지게 된다. 특히 소형용기의 경우 분류기준에 따라 A형 또는 B형 운반용기로 나뉘어질 경우 낙하높이가 1.2m에서 9m로 바뀌게 된다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 A형 방사성물질 운반용기와 B형 운반용기에 대하여 충격완충체의 케이스의 형상이 충격력 흡수에 미치는 영향을 분석하고 충격완충체의 효과적인 설계 방안을 제시하였다. 충격완충체의 성능은 충돌면에서 발생하는 최대 충격력의 크기 및 충격력의 이력, 충격완충체의 압축량 등으로 평가하였다. 이 연구에서는 전체적인 충돌거동에 대해서만 평가하였으며, 국부적인 최대손상은 고려하지 않았다.

2. 운반용기의 유한요소 충돌해석

2.1 해석모델

본 연구에서는 길이 430 mm, 외경 320 mm, 중량 380 kg의 원통형 구조를 갖는 핫셀 조사시편 운반용기를 대상으로 하였다. 이 운반용기의 외곽에는 스테인리스 강판으로 된 케이스에 폴리우레탄 폼을 삽입한 충격완충체가 부착되는 구조를 갖고 있다. 충격완충체의 형상은 일반적인 원통형 구조, 원통의 모서리 부분을 약간 절곡하여 둥글게 만든 형태, 그리고 원통형 부분에 곡률(curvature)를 주어 축 방향의 좌굴변형이 쉽게 발생할 수 있는 세 가지 형상에 대하여 비교하였다. 충격완충체의 크기는 직경 및 두께 등 외곽치수를 갖게 하였다. 이 운반용기의 충돌해석에는 충돌해석 기능과 접촉요소 기능이 우수한 LS-DYNA 코드[5]를 사용하였으며, 해석모델은 Fig. 4 및 Fig. 5와 같이 원통형 운반용기의 대칭성을 이용해 1/2 단면 또는 1/4단면을 3차원 요소로 모델링하였다. 곡률을 갖는 충격완충체를 가진 1/2 단면 모델의 경우 19,680개의 절점과 13,920개의 솔리드 요소와 2,688개의 셸 요소로 각각의 재료별로 모델을 구성하였다.

운반용기의 모든 재료의 물성치는 탄소성으로 가정하였다. 운반용기 본체와 충격완충체 등 소재간의 접촉부분은 단일면접촉(single surface contact) 요소를 사용하여 모두 단순 접촉된 상태로 모델링하여 충돌시 폴리우레탄 폼의 변형과 케이스의 좌굴(buckling)로 충돌에너지가 흡수되는 것을 고려하였다. 운반용기의 충돌면은 무한히 평평한 강체평면으로 가정하여 운반용기의 모든 충돌 가능한 위치가 접촉하는 것을 가능하도록 모델링하였다. 하중조건으로는 1.2m 및 9 m의 높이에서의 자유낙하로 인한 초기 충돌속도 4.85 m/s와 13.3 m/s를 고려하였다. 수송용기의 충돌각도는 수직낙하와 수평낙하의 두 가지 경우에 대해서만 고려하였으며, 충돌 방향에 따라 모델의 좌표축을 전환하고, 충돌면(impact target surface)의 위치를 충돌위치에 맞도록 수정하였다.

2.2 수직낙하 충돌거동

운반용기 충격완충체의 원통부분이 축방향으로 압축-좌굴변형을 일으키는 수직자유낙하조건에 대하여 충돌거동의 변화를 검토하였다. Fig. 6은 수직낙하시의 운반용기에 발생하는 변형 및 응력의 분포를 나타내고 있는데, 하부 충격완충체의 바닥부분에서 큰 변형이 발생하고 응력이 집중됨을 알 수 있다. Fig. 7은 A형 운반용기와 B형 운반용기의 수직 자유낙하 충돌시 충돌이력을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 보듯이 A형 운반용기의 경우 모서리가 각진 충격완충체의 경우에는 충격력이 충돌 직후 급격히 증가했다가 바로 감소하는 경향을 보이는데 비해 모서리가 곡면처리된 것이나 원형의 경우에는 충격력의 이력이 완만해지는 것을 알 수 있다. 한편 B형 운반용기의 경우 Fig. 7(b)와 같이 충돌초기의 조기 증감에 있어서만 약간의 차이를 보이기는 하지만 전체적인 충돌거동은 거의 같은 것을 알 수 있다. A형 운반용기와 B형 운반용기에 대한 최대 충격력과 충격완충체의 변형량 등 해석 결과는 Table 1과 2에 제시하였다.

2.2 수평낙하 충돌거동

운반용기가 수평상태로 자유낙하하여 충격완충체의 원통부분이 접선형태로 충돌면에 충돌하여 변형을 일으키는 수평자유낙하조건에 대하여 충돌거동의 변화를 검토하였다. Fig. 8은 수평낙하시의 운반용기에 발생하는 변형 및 응력의 분포를 나타내고 있는데, 충격완충체의 바닥부분에서 큰 변형이 발생하고 응력이 집중됨을 알 수 있다. Fig. 9는 A형 운반용기와 B형 운반용기의 수평 자유낙하 충돌시 충돌이력을 나타낸 것이다. Fig. 9(a)에서 보듯이 A형 운반용기의 경우 모서리가 각진 충격완충체의 경우에는 충격력이 충돌 직후 급격히 증가했다가 바로 감소하는 경향을 보이는데 비해 모서리가 곡면 처리된 것이나 원형의 경우에는 충격력의 이력이 점점 더 완만해지는 것을 알 수 있다. 한편 B형 운반용기의 경우 Fig. 7(b)와 같이 충격완충체가 각이진 경우에는 충돌초기의 조기 증감이 있은 후에 충격력이 다시 증가하지만 모서리가 곡면 처리된 것이나 원형의 경우에는 있어서는 충격력의 이력이 달라짐을 알 수 있다. 하지만 모서리가 곡면 처리된 경우와 원형 단면으로 처리된 경우 모두 비록 충돌 초기의 충격력의 증가율은 감소하지만 최대 충격력의 크기는 오히려 증가함을 알 수 있다. 수평낙하에 대한 A형 운반용기와 B형 운반용기에 대한 최대 충격력과 충격완충체의 변형량 등 해석 결과는 Table 1과 2에 제시하였다.

3. 해석결과 고찰

운반용기가 자유낙하하여 강체 평면에 충돌하면 충돌 초기에는 충격완충체의 철제 케이스에 좌굴이 발생하기 전까지 초기충격력을 흡수하고, 충돌이 진행됨에 따라 철제 케이스가 좌굴변형을

일으키면서 동시에 내부에 삽입된 충격흡수재의 소성변형이 함께 일어나며 충격을 흡수하게 된다. 그러므로 운반용기가 받는 충격력은 충격완충체의 변형거동에 직접적으로 영향을 받게 된다. 따라서 충격완충체의 충격흡수특성은 충격완충체의 구조에 따라 밀접하게 영향을 받으며, 충격완충체의 구조는 충돌 방향에 따라 그 특성이 함께 변화한다.

Table 1과 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 A형 운반용기의 수직방향의 자유낙하 충돌에 있어서는 충격완충체의 단면형상이 달라짐에 따라 충격력의 이력이 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 모서리가 둥근 형태나 원형 단면을 갖는 경우에 비해 훨씬 큰 충격력을 발생시키고, 충돌 소요시간도 6.4 ms로 다른 형태의 단면에 비해 매우 짧아진다. 한편 원통형 단면을 가진 경우에는 모서리가 둥근 경우가 원형 단면의 경우에 비해서는 충격력이 약 18% 크게 발생하지만, 모서리가 각이 진 사각형 단면의 경우의 약 42%로 작게 나타났고 충돌 소요시간도 약 50% 길어지는 것으로 나타났다. 한편 Table 2와 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 B형 운반용기의 경우 충격완충체의 변형량이나 최대 충격력의 크기 및 충격력의 이력등이 거의 비슷하여 충격완충체의 단면형상의 변화가 충격력의 이력에 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 따라서 어떤 특정한 단면형상이 모든 충돌방향에 대해서 우수한 충격흡수효과를 가진다고 할 수는 없을 것이다.

Table 1과 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 사각단면의 충격완충체를 갖는 A형 운반용기의 수직낙하에서는 모서리가 둥근 단면이나 원형 단면의 충격완충체를 부착한 경우보다 두 배 이상의 큰 충격력이 발생하며, 특히 충돌 초기에 충격력이 급격히 증가하며 최대 충격력이 발생하는데 이것은 충격완충체가 충격흡수기능을 제대로 발휘하지 못하고 오히려 충돌면으로부터 전달되는 충격력을 운반용기 본체로 거의 그대로 전달시킴을 나타내는 것이다. 이것은 사각단면의 수직낙하의 경우에 충격완충체의 바닥면 전체가 충돌면에 충돌하고, 충격완충체 케이스의 원통부가 동시에 균일한 축방향 하중을 받기 때문에 큰 저항력을 갖기 때문이다. 이에 반해 모서리가 둥근 경우나 원형 단면의 경우는 훨씬 작은 충격력이 발생하는데, 이것은 원통부가 직선형 구조가 아니라 구부러져 있기 때문에 충돌이 시작되면서 철제 케이스가 쉽게 좌굴변형을 일으키기 때문이다. 그러나 B형 운반용기의 경우에는 단면의 형상이 큰 영향을 미치지 않는다는 것은 충격완충체 외곽의 박판 철제 케이스가 거의 영향을 미치지 못하고, 내부에 삽입된 충격흡수재의 압축변형에 의한 충격흡수가 주요 충격흡수기능을 함을 나타내는 것이다. 이는 낙하높이가 A형인 경우에는 1.2m로 충돌속도가 4.85 m/s인데 비해 B형 운반용기는 낙하높이가 9m로 충돌속도가 13.3 m/s로 매우 크기 때문이다.

한편 수평낙하나에선 비록 A형 운반용기에 있어서 충격력의 이력이 조금 다르지만 수직낙하의 경우와 같이 크게 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 최대 충격력이 충격완충체의 단면형상의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것은 수직낙하와는 달리 이들 충돌방향에서는 충돌 초기

에 충격완충체의 일부가 충돌면에 접촉하면서 충돌이 점차 진행되며 충격완충체의 소성변형을 일으키는 부분이 점차 확산되기 시작하기 때문에 충격완충체 단면 형상의 영향이 크게 영향을 미치지 못하는 것이다.

한편 B형 운반용기의 경우에는 충격완충체의 모서리가 둥글거나 원통형으로 처리된 경우가 오히려 충격력이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있는데 이것은 큰 충격흡수용량이 필요한 B형 운반용기에 있어서는 충격완충체의 철제 케이스가 어느 정도 좌굴저항력을 가져야만 자유낙하 충격을 효과적으로 흡수할 수 있음을 나타내는 것이다.

Table 1. Max. Impact Forces of A-Type Package

Drop Orientation	Impact Limiter Shape	Max. Impact Force (kN)	Time at Max. Impact Force Occurs (ms)	Impact Duration(ms)
Vertical	Rectangular	599.9	0.2	6.4
	Round corner	251.5	2.8	9.6
	Circular	212.7	8.0	12.0
Horizontal	Rectangular	258.3	7.4	19.8
	Round corner	271.4	7.8	20.2
	Circular	291.3	10.6	20.2

Table 2. Max. Impact Forces and Displacements of B-Type Package

Drop Orientation	Impact Limiter Shape	Max. Impact Force (kN)	Max. Disp.(mm)	Max. g-value
Vertical	Rectangular	2,029(2.9)	22.9(3.0)	554(2.5)
	Round corner	2,113(3.1)	23.7(3.0)	578(3.0)
	Torus	2,146(2.8)	23.8(3.0)	582(2.6)
Horizontal	Rectangular	1,257(4.6)	39.8(5.0)	343(4.5)
	Round corner	1,518(4.6)	40.2(5.0)	413(4.5)
	Torus	1,458(5.2)	45.7(5.5)	389(4.6)

4. 결 론

충격완충체의 충격흡수거동은 충격완충체 내부에 채워지는 충격흡수재의 소성 압축변형 뿐만 아니라 이를 감싸고 있는 박판 구조물인 철제 케이스의 좌굴변형 특성에 큰 영향을 받는다. 똑같

은 소재와 같은 외형 크기를 갖는 충격완충체에 있어서도 충격완충체의 단면의 형상은 이들 박판 구조물인 철제 케이스의 좌굴변형 모드를 직접적으로 변화시키게 되어 충격력을 크게 완화시킬 수 있다.

충격력이 비교적 작은 A형 운반용기에 있어서는 철제 케이스의 영향이 매우 크므로 케이스의 형상에 있어서 좌굴변형이 쉽게 발생할 수 있도록 제작되어야 한다. 그러나 큰 충격력을 흡수해야 하는 B형 운반용기의 경우에는 철제 케이스의 영향이 크지 않으므로 제작이 용이한 구조로 설계함이 바람직하다. 실제로 충격완충체 제작시 원통셸과 평판을 절단한 후 용접하는 게 가장 제작이 쉽고 비용도 적게 들며, 원통형 단면의 경우에는 제작이 어려운 문제점이 있다. 그러나 원통형 셸의 끝단 일부를 원형으로 할 경우에는 제작비의 큰 증가 없이도 충격흡수 기능을 크게 향상시킬 수 있을 것이다. 따라서 철제 케이스의 영향이 크게 작용하는 A형 소형 운반용기의 경우에 형상의 특성을 이용하여 철제 케이스의 좌굴저항력을 줄이는 것이 용접이 어려운 박판을 사용하는 경우보다 더 제작이 용이할 수 있게 된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

[1] IAEA Safety Standards Series No. ST-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material,", IAEA, 1996.

[2] Lampinen, B. E. and Jeryan, R. A., “Effectiveness of Polyurethane Foam in Energy Absorbing Structures,” *Trans. SAE 91*, pp. 2059 2076 (1982).

[3] Wellman, G. W., Transportation System Impact Limiter Design using Rigid Polyurethane Foam, SAND84-2271 DE85 015088, Sandia National Laboratories, 1984.

[4] Johnston, J. E., "Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures," Structural Stability Research Council, John Wiley and Sons Inc., 3rd. ed., 1976.

[5] Hallquist, J. O., 1991, "LS-DYNA3D Theoretical Manual," LSTC Report 1018, Livermore Software Technology Corporation, USA.

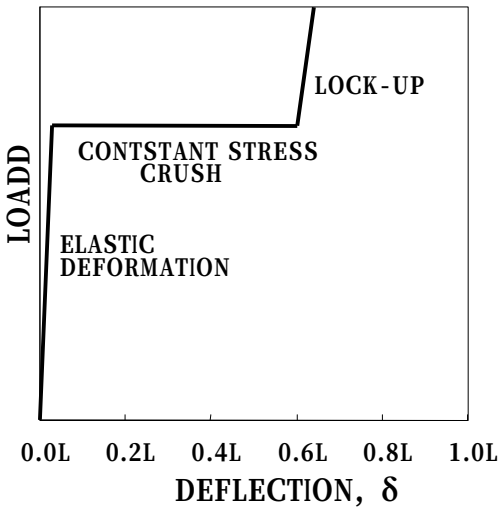


Fig. 1 Idealized crush load-deflection curve of the impact limiter.

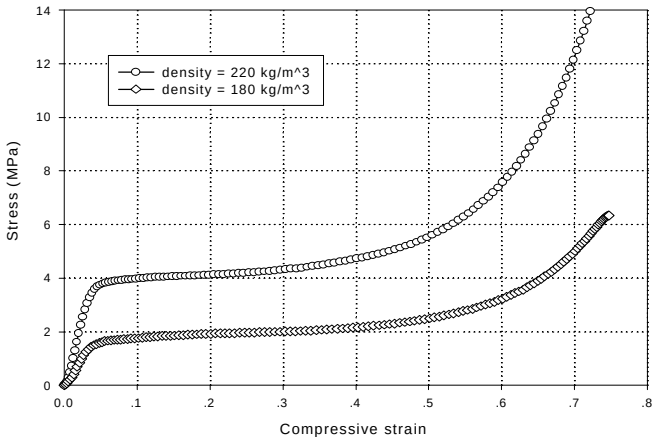
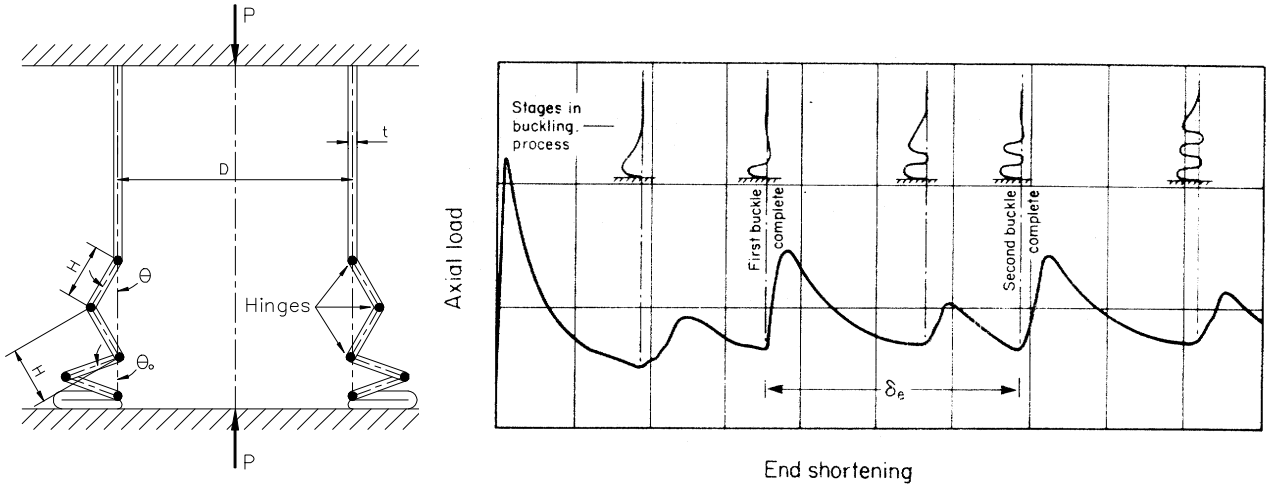


Fig. 2 Lload-deflection curves of polyurethane foams.



(a) idealized deformation for concertina mode of buckling

(b) relationship between deformed shape and shape of load-deflection curve

Fig. 3. An idealized model of axisymmetric concertina buckling of axially compressed cylindrical tube.

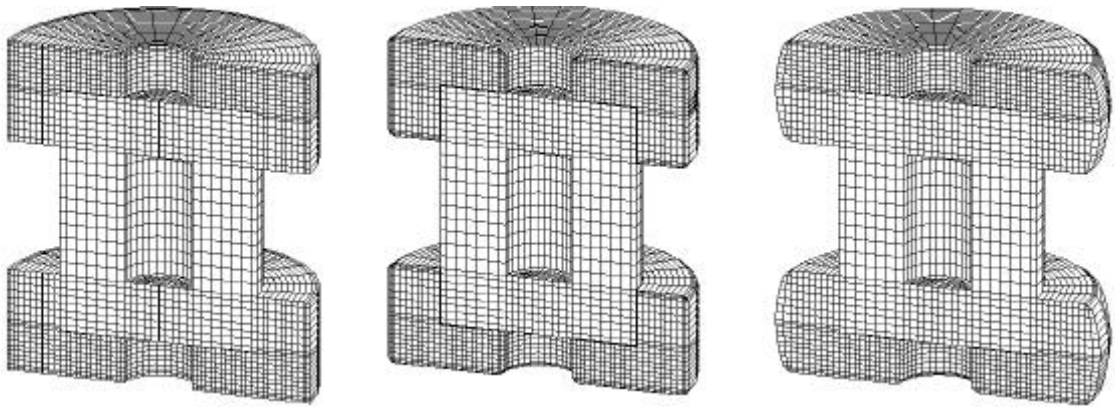


Fig. 4. Impact analysis models of cask for vertical drop for each impact limiter shape.

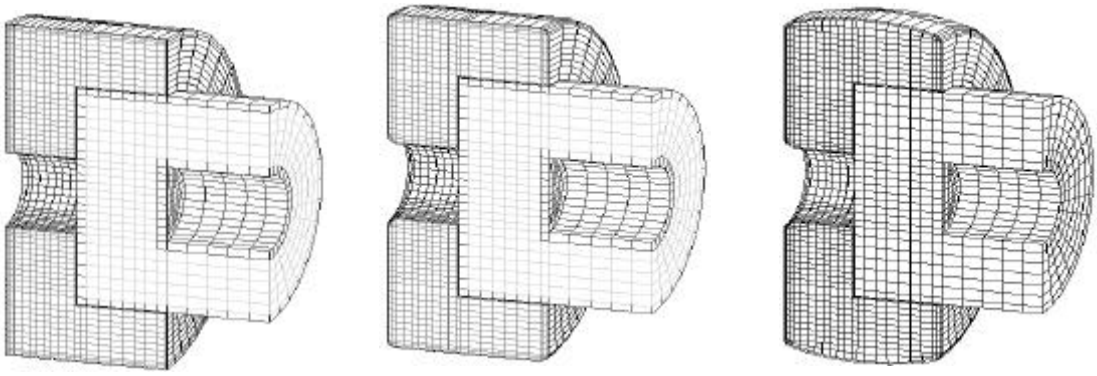


Fig. 5. Impact analysis models of cask for horizontal drop for each impact limiter shape.

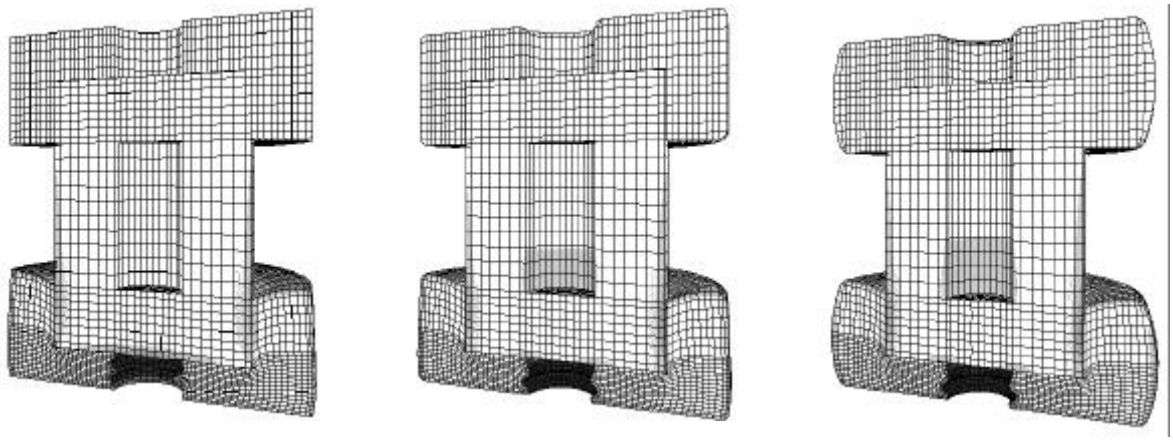
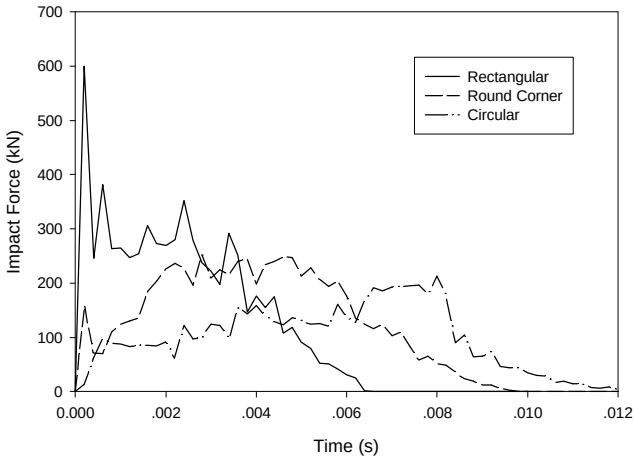
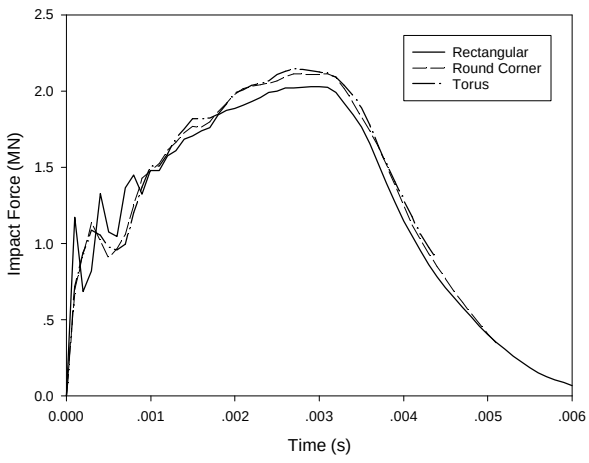


Fig. 6. Stress contours and deformed shapes of cask for vertical drop for each impact limiter shape.



(a) A-type cask



(b) B-type cask

Fig. 7. Comparison of impact force-time histories of under vertical drop for impact limiter shape variation.

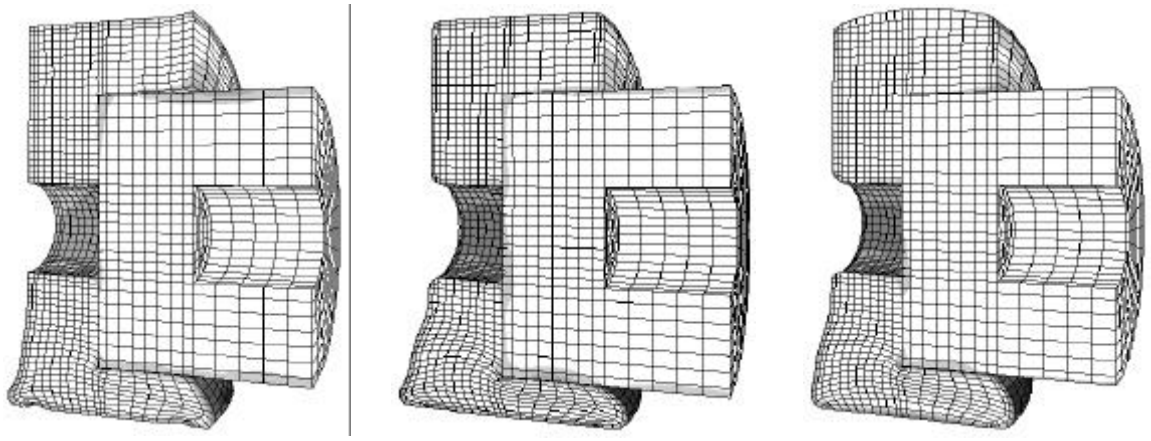
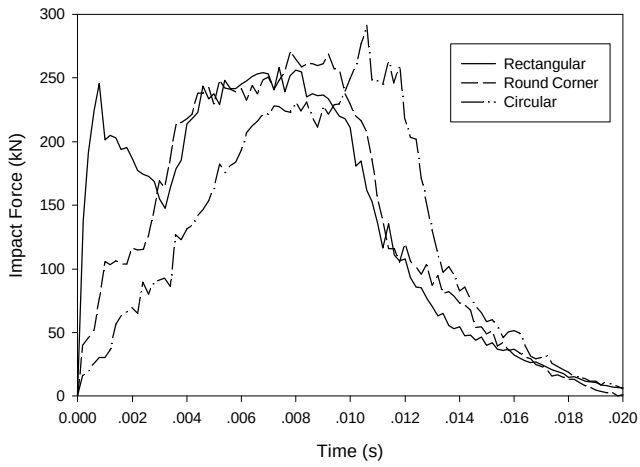
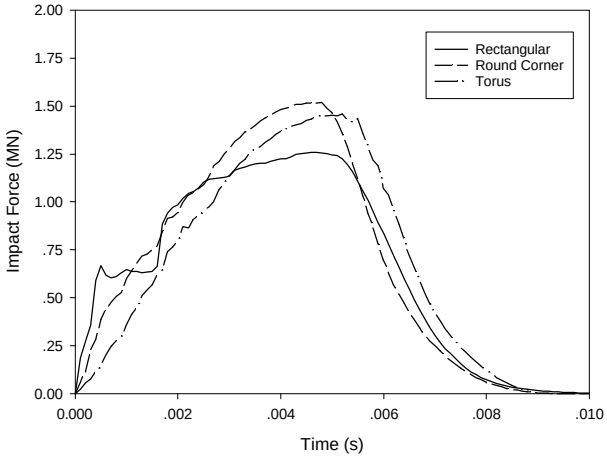


Fig. 8. Stress contours and deformed shapes of cask under horizontal drop for each impact limiter shape.

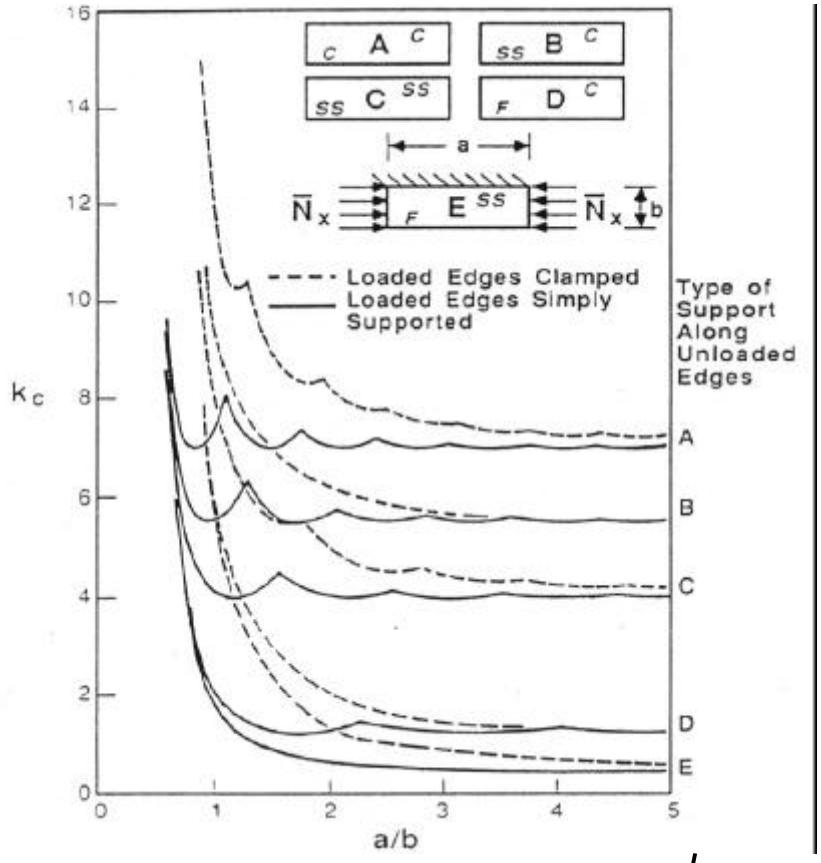


(a) A-type cask



(b) B-type cask

Fig. 9 Comparison of impact force-time histories of under vertical drop for impact limiter shape variation.



Compressive-buckling coefficients for flat rectangular plates