

'99 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

**방사성물질 운반용기 충격완충체 형상 변화에 따른 충격흡수거동 평가**  
**Evaluation of the Cask Impact Absorbing Behavior According to**  
**the Impact Limiter Shape Variation**

구정희, 서기석, 김종훈, 이주찬, 박성원

한국원자력연구소

대전시 유성구 덕진동 150

**요 약**

방사성물질 운반용기는 원자력 법규에서 규정하고 있는 자유낙하 사고조건 등의 충돌사고에 대비해 운반용기의 외곽에 충격완충체를 부착한다. 방사성물질 운반용기에 사용되는 충격완충체는 대부분 철제 케이스 내부에 폴리우레탄 폼 등의 충격흡수재를 삽입한 구조를 사용하여, 박판 구조물의 좌굴변형과 다공성 소재의 소성압축변형을 이용하는 방법 등이 널리 사용되고 있다. 박판 철제 구조물의 좌굴변형은 같은 크기와 두께를 갖더라도 그 형상과 경계조건에 따라 압축 거동이 크게 달라진다. 본 연구에서는 방사성물질 운반용기 충격완충체의 형상변화에 따른 충격흡수거동의 변화를 비교하여 충격흡수효과의 향상방안을 제시하였다.

**Abstract**

Radioactive material transportation packages attach impact limiters at the outer ends of them to protect themselves from the impact accident which described by the atomic laws and regulations. Most impact limiters which used to the packages have foam-filled steel shell structures, in which the buckling of thin walled structure and the crush deformation behavior are used for energy absorbing mechanism. For the thin walled structures, though the dimensions and thicknesses are same, the buckling deformation behaviors are changed quite differently according to the shapes and boundary conditions. In this study, the variation of impact absorbing behaviors according to the shape variation of impact limiters were examined and some improvements of impact absorbing effect are suggested.

## 1. 서 론

사용후핵연료나 고준위 방사성폐기물 등 방사성물질 운반용기는 국내 원자력법은 물론 국제원자력기구의 법규[1]에서 정하고 있는 모든 하중조건에 대해 안전성을 유지하여야 한다. 따라서 가상사고조건 등에서 규정하고 있는 자유낙하 사고조건 등의 충돌사고에 대비해 운반용기의 외곽에는 충격완충체를 부착하게 된다. 충격완충체는 차량 등에서 널리 사용하는 박판 구조물의 좌굴변형을 이용한 방법이나 충격흡수 성능이 우수한 다공성 재질의 소성압축변형을 이용하는 방법 등이 널리 사용되고 있다[2]. 방사성물질 운반용기에 사용되는 충격완충체는 대부분 철판 케이스 내부에 폴리우레탄 폼 등의 충격흡수재를 삽입한 구조를 사용하고 있다[3]. 박판 구조물의 좌굴변형은 같은 크기와 두께를 갖더라도 그 형상과 경계조건에 따라 압축 거동이 크게 달라진다[4].

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. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 방사성물질 운반용기 충격완충체에서 충격흡수재를 보호하고 충격완충체의 적정강도를 유지시켜 주는 충격완충체의 케이스의 형상이 충격력 흡수에 미치는 영향을 분석하고 충격흡수효과의 향상 방안을 제시하였다. 충격완충체의 성능은 충돌면에 작용하는 충격력의 이력 및 최대 충격력의 크기, 충격완충체의 압축량, 그리고 충격에너지의 흡수량 등으로 평가하였다. 이 연구에서는 수송용기의 충돌시 충돌면에 발생하는 충격력의 변화 등 전체적인 충돌거동에 대해서만 평가하였으며, 국부적인 최대손상은 고려하지 않았다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 원통형 구조를 갖는 방사성폐기물 운반용기를 대상으로 하였으며, 충격완충체는 2 mm 두께의 스테인리스강 케이스 내부에 충격흡수성능이 우수한 폴리우레탄 폼(polyurethane foam)을 채운 구조로 가정하였다. 이 운반용기는 A형 운반용기로서 중량이 비교적 작고, 낙하 높이도 1.2 m로 낮기 때문에 환형(annular shape) 구조를 갖고 운반용기의 모서리 부분의 충돌손상을 방지한다.

## 2. 운반용기의 유한요소 충돌해석

### 2.1 해석모델

본 연구에서는 길이 650 mm, 외경 600 mm, 중량 410 kg의 원통형 구조를 갖는 방사성폐기물 운반용기를 대상으로 하였다. 이 운반용기의 상부에는 탄소강판으로 된 케이스에 폴리우레탄 폼을 삽입한 충격완충체가 부착되는 구조를 갖고 있다. 충격완충체의 단면 형상은 사각형, 원형 및

사각형 단면에 모서리가 둥근 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. 1과 같이 해석조건에 따라 원통형 운반용기의 대칭성을 이용해 1/4 또는 1/2 단면을 3차원 요소로 모델링하였다. 사각형 단면을 갖는 충격완충체를 고려한 모델의 경우 9,342개의 결점과 5,820개의 솔리드 요소와 1,584개의 셸 요소로 각각의 재료별로 모델을 구성하였다.

운반용기 본체는 탄성으로 가정하였으며, 충격흡수재인 폴리우레탄 폼과 탄소강 케이스등 소성 변형을 일으키는 부분은 탄소성으로 가정하였다. 운반용기 본체와 충격완충체 등 소재간의 접촉 부분은 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 1.2 m의 높이에서의 자유낙하로 인한 초기 충돌속도 4.3 m/s를 고려하였다.

## 2.2 충격완충체 단면의 형상변화에 따른 충돌거동의 변화

충격완충체 철제 케이스의 형상이 운반용기의 충돌거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 운반용기가 수평, 수직상태 및 모서리 부분으로 자유낙하 하여 강체 수평면 위에 충돌하는 세 가지 자유낙하조건에 대하여 충돌거동의 변화를 검토하였다. 충격완충체에 대해서는 철제 케이스 내부에 충격흡수재가 삽입된 경우를 고려하였다. Fig. 2~7은 운반용기 충격완충체의 형상에 따른 자유낙하 충돌시 각 방향의 충돌 각도에 대해 운반용기가 변형된 형상과 충격완충체의 형상에 따른 충돌이력의 변화를 비교한 것이다. 각각의 충돌 방향에 대해 충격완충체의 형상에 따른 해석결과는 Table 1에 제시하였다.

Fig. 3은 수직낙하시 충돌면에 발생하는 충격력의 이력을 나타내는데 수직낙하시 사각단면을 갖는 충격완충체의 경우에는 최대 충격력이 충돌 후 0.2 ms에서 599.9 kN으로 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.

Fig. 5는 수평낙하시 충돌면에 발생하는 충격력의 이력을 나타내는데 충돌 소요시간은 세 가지 형태 모두 비슷하게 나타났으며, 사각형 단면을 갖는 충격완충체의 경우가 최대 충격력이 충돌 후 7.4 ms에서 258.3 kN으로 가장 적게 나타났다. 사각형 단면을 갖는 경우 충돌 직후 0.8 ms까

지 충격력이 급격히 증가하여 충격력이 약 246 kN에 이른 후 3.2 ms까지 다시 급격히 감소한 후 다시 증가하는 경향을 보였다. 이것은 충돌 초반에 충격완충체의 환형(annular shape)의 평판이 최초 좌굴을 일으키기 전에 큰 압축저항을 가지며, 좌굴이 시작된 이후에 압축력이 급격히 감소하다가 좌굴변형이 계속되면서 내부에 삽입된 폴리우레탄 폼과 함께 압축되기 때문이다. 원통형 단면을 가진 경우에는 충격력이 291.3 kN으로 모서리가 각이 진 사각형 단면의 경우보다 약 13%로 크게 나타났지만, 최대 충격력이 발생하는 시간은 10.6 ms로 충돌의 후반에 최대충격력이 발생하였다. 한편 모서리가 둥근 단면을 갖는 충격완충체의 경우에는 최대 충격력이 271.4 kN으로 사각단면에 비해 충격력이 약 5% 증가하고, 최대충격력이 발생하는 시간이 충돌 후 7.8 ms로 비슷하지만 사각 단면을 갖는 경우처럼 충돌초기의 급격한 충격력의 증가나 감소 등이 없이 충격력을 잘 흡수하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 모서리낙하시 충돌면에 발생하는 충격력의 이력을 나타내는데 충격력의 이력과 충돌 소요시간이 세 가지 형태 모두가 비슷하게 나타났으며, 충돌 소요시간이 수직낙하나 수평낙하에 비해 상당히 길어짐을 알 수 있다. 모서리낙하에서는 사각형 단면을 갖는 충격완충체의 경우가 최대 충격력이 충돌 후 17.8 ms에서 160.0 kN으로 가장 적게 나타났고, 모서리가 둥근 단면을 갖는 경우가 최대 충격력이 196.3 kN으로 가장 큰 충격력이 발생하였다. 원형 단면을 갖는 경우는 다른 경우보다 최대 충격력이 발생하는 시간이 빨라지고, 충돌 소요시간도 단축되었다.

이상과 같이 충돌 방향에 따라 최대 충격력은 사각형 단면, 원형 단면, 모서리가 둥근 단면 등 각각 다르게 나타났지만, 최대 충격력은 사각형 단면을 가진 충격완충체의 수직낙하에서 훨씬 크게 나타나 사각형 단면의 충격완충체의 경우에는 수직낙하시의 충격력의 완화방안을 추가로 고려해야만 할 것으로 판단된다.

Table 1. Max. Impact Forces according to the Impact Orientation

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
Corner	Rectangular	160.0	17.8	38.4
	Round corner	196.3	15.0	38.0
	Circular	182.5	12.8	33.0

### 2.3 충격완충체 내부의 격막판 유무에 따른 충돌거동의 변화

충격완충체의 크기가 큰 경우에는 충격흡수재를 일체형으로 제작하기가 어렵고 충돌방향에 따른 충격흡수재의 적절한 변형과 구속을 위해 철제 케이스 내부에 격막판(gusset plate)을 설치하여 케이스의 형상을 유지하고 충격흡수재를 보호하게 된다. 일반적으로 수직자유낙하 충돌시 충격완충체의 격막판 모두가 충격흡수거동에 관여하기 때문에 본 연구에서는 수직자유낙하조건에 대하여 충격완충체의 철제 케이스 내부에 격막판을 설치했을 경우의 충돌거동의 변화를 비교하였다. 격막판의 개수는 충격완충체의 크기 및 운반용기의 중량에 따라 결정되는데 본 연구에서는 방사상 방향으로 45° 간격으로 총 6개의 격막판이 설치된 경우를 고려하였다.

Fig. 8과 Fig. 9 및 Table 2는 철제 케이스에 격막판이 설치된 충격완충체 내부가 빈 경우와 폴리우레탄 폼이 삽입된 경우의 해석결과를 나타내고 있다. Fig. 10은 충격완충체가 철제 케이스와 격막판으로만 구성된 경우와 철제 케이스와 격막판 사이에 폴리우레탄 폼이 삽입된 경우에 충격력의 이력을 비교한 것으로, 사각형 단면을 갖는 경우에는 내부에 격막판이 있으면 내부에 충격흡수재의 유무에 관계없이 1,000 kN 전후의 큰 충격력이 발생함을 알 수 있다. 모서리가 둥근 단면을 갖는 경우에는 사각형 단면의 경우에 비해 충격력이 50% 이하로 나타났고, 원형 단면의 경우가 충격력이 가장 적게 나타났다. Table 1의 수직낙하의 경우와 Table 2의 Foam-filled의 경우의 최대충격력을 비교하면 내부에 격막판이 설치된 경우가 사각단면의 경우는 72%, 모서리가 둥근 단면의 경우는 100%, 그리고 원형 단면의 경우는 37% 증가하였다.

Table 2. Max. Impact Forces in Vertical Drop according to the Gusset Insertion

Impact Limiter	Impact Limiter Shape	Max. Impact Force (kN)	Time at Max. Impact Force Occurs (ms)	Impact Duration(ms)
Foam-filled	Rectangular	1034.2	0.3	2.6
	Round corner	504.9	0.7	5.0
	Circular	388.5	1.1	7.0
No-foam	Rectangular	957.9	0.3	2.7
	Round corner	403.8	2.5	5.7
	Circular	397.6	1.1	7.0

### 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. 3, 5, 7에서 볼 수 있듯이 각각의 충돌방향에 대한 최대 충격력이 최소가 되는 충격완충체의 단면형상이 달라짐을 알 수 있다. 따라서 어떤 특정한 단면형상이 모든 충돌방향에 대해서 우수한 충격흡수효과를 가진다고 할 수는 없을 것이다. 그러나 Table 1과 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 사각단면의 충격완충체를 갖는 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.

한편 수평낙하나 경사낙하에선 최대 충격력이 충격완충체의 단면형상의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것은 수직낙하와는 달리 이들 충돌방향에서는 충돌 초기에 충격완충체의 일부가 충돌면에 접촉하면서 충돌이 점차 진행되며 충격완충체의 소성변형을 일으키는 부분이 점차 확산되기 시작하기 때문에 충격완충체 단면 형상의 영향이 크게 영향을 미치지 못하는 것이다.

수직낙하 조건에 대한 충격완충체 내부의 격막판 유무에 대한 해석결과인 Table 2와 Fig. 9 및 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 충격완충체의 철제 케이스의 내부에 격막판이 설치되면 내부에 충격흡수재의 삽입 여부에 관계없이 충격력이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 철제 케이스 내부의 격막판은 격막판 자체가 갖는 좌굴변형 저항력 외에 케이스의 좌굴변형에 대한 경계조건을 변화시켜 압축저항력을 크게 증가시키기 때문이다. 그러므로 충격완충체 케이스 내부에의 격막판의 설치는 소형 충격완충체의 경우에는 오히려 충격흡수기능을 손상시키는 역효과를 발생시킴을 주의해야 함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

충격완충체의 충격흡수거동은 충격완충체 내부에 채워지는 충격흡수재 뿐만 아니라 이를 감싸고 있는 박판 구조물인 철제 케이스와 내부 격막판에 큰 영향을 받는다. 똑같은 소재와 같은 외형 크기를 갖는 충격완충체에 있어서도 충격완충체의 단면의 형상은 이들 박판구조물인 철제 케이스의 좌굴변형 모드를 직접적으로 변화시키게 되어 충격력을 크게 완화시킬 수 있다. 또한 내부에 설치되는 격막판은 철제 케이스의 좌굴저항력을 크게 증가시키므로 충격흡수기능을 저하시키는 역기능이 발생하지 않도록 주의해야만 한다.

실제로 충격완충체 제작시 원통셀과 평판을 절단한 후 용접하는 게 가장 제작이 쉽고 비용도 적게 들며, 원통형 단면의 경우에는 제작이 어려운 문제점이 있다. 그러나 원통형 셀의 끝단 일부를 원형으로 할 경우에는 제작비의 큰 증가 없이도 충격흡수 기능을 크게 향상시킬 수 있을 것이다. 따라서 철제 케이스의 영향이 크게 작용하는 소형 운반용기의 경우에 철제 케이스의 좌굴저항력을 줄이려 용접이 어려운 박판을 사용하는 경우보다 더 제작이 용이할 수도 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 Jerzyan, 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.

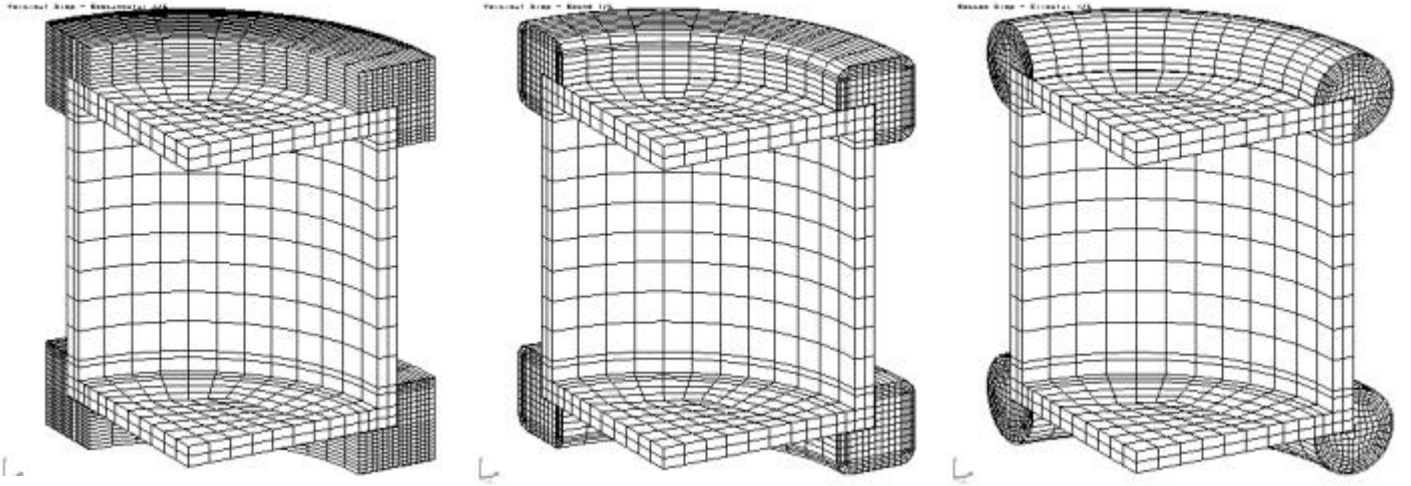


Fig. 1. Impact analysis models of cask for vertical drop for each impact limiter shape.

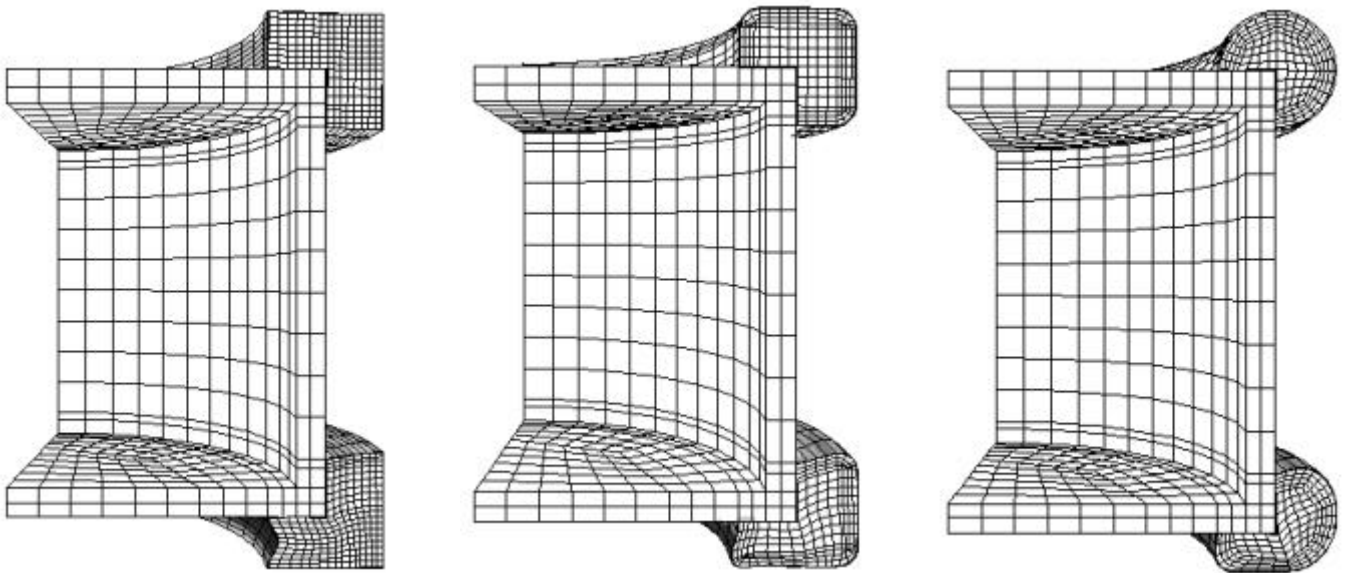


Fig. 2. Stress contours and deformed shapes of cask for vertical drop for each impact limiter shape.



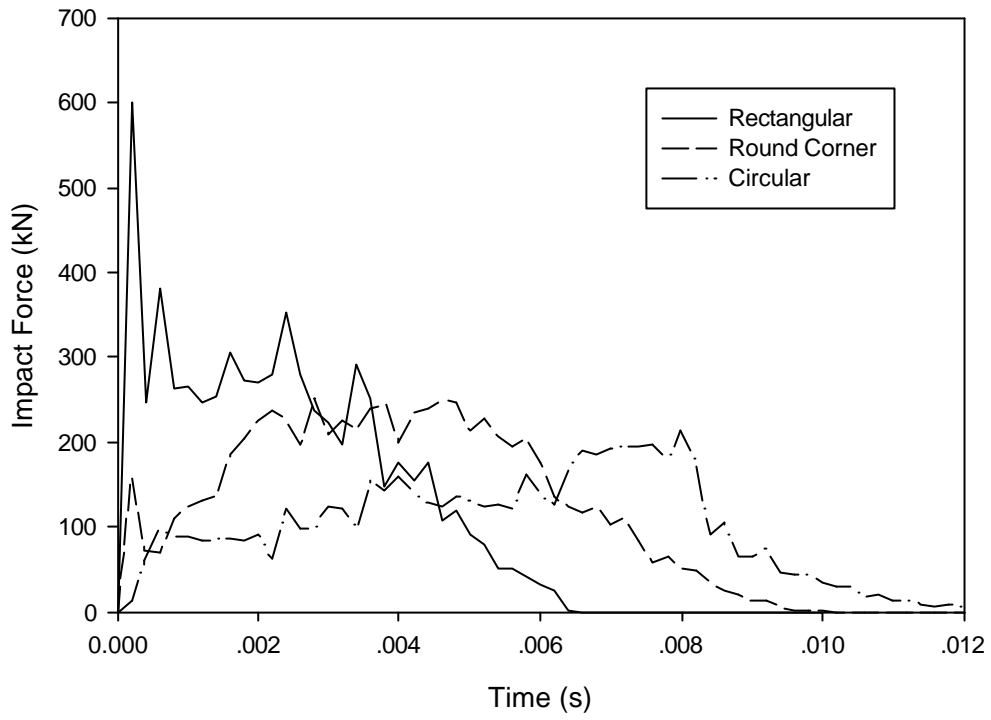


Fig. 3. Comparison of impact force-time histories of cask for vertical drop for impact limiter shape variation.

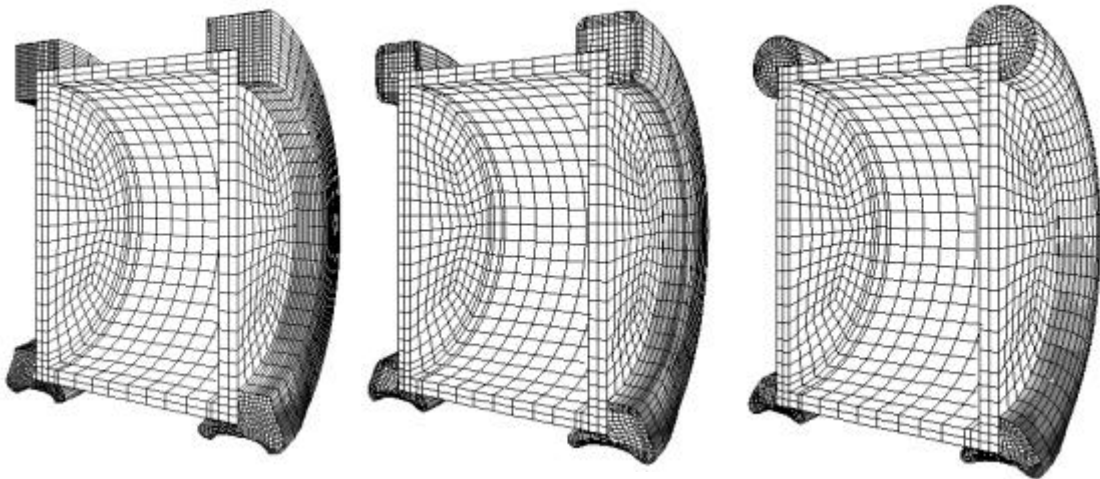


Fig. 4. Stress contours and deformed shapes of cask for side drop for each impact limiter shape.

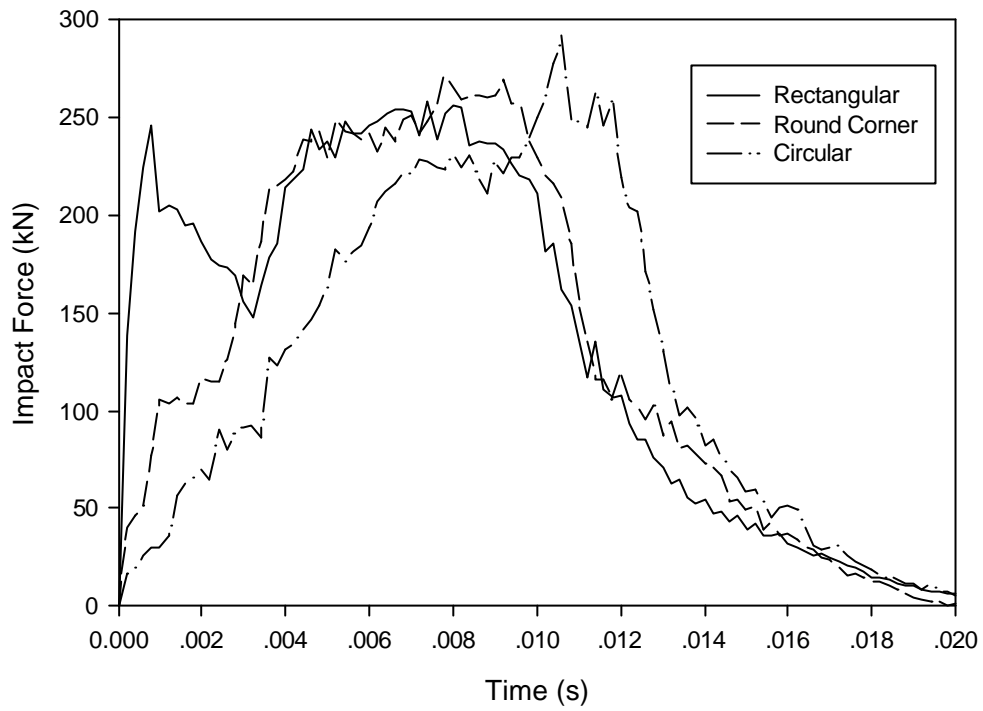


Fig. 5. Comparison of impact force-time histories of cask for side drop for impact limiter shape variation.

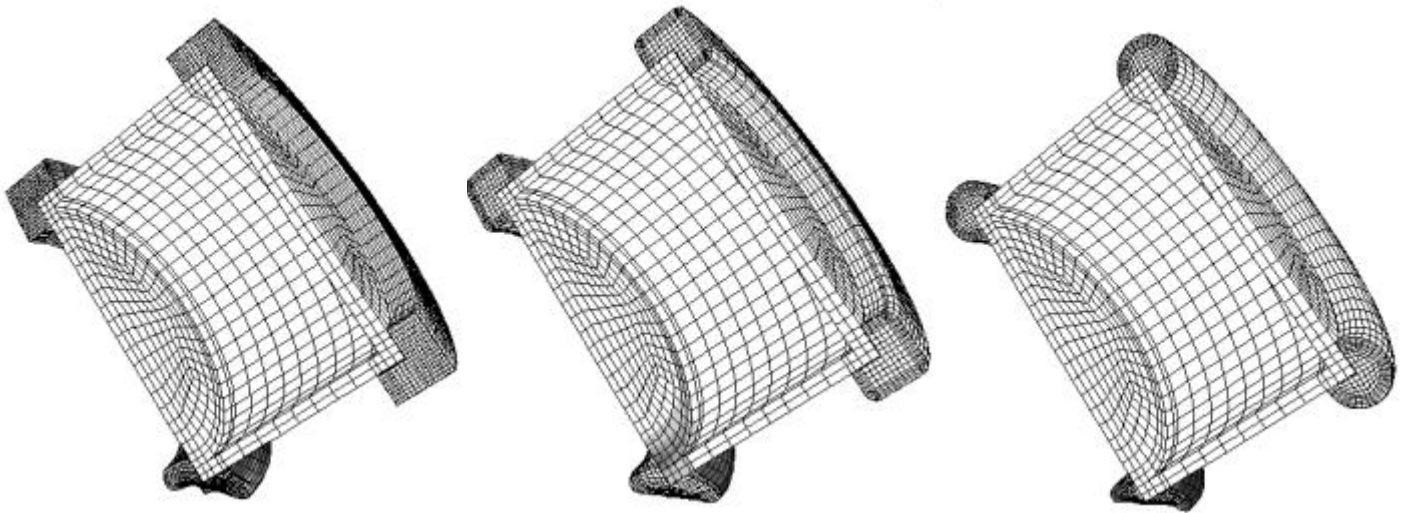


Fig. 6. Stress contours and deformed shapes of cask for corner drop for each impact limiter shape.

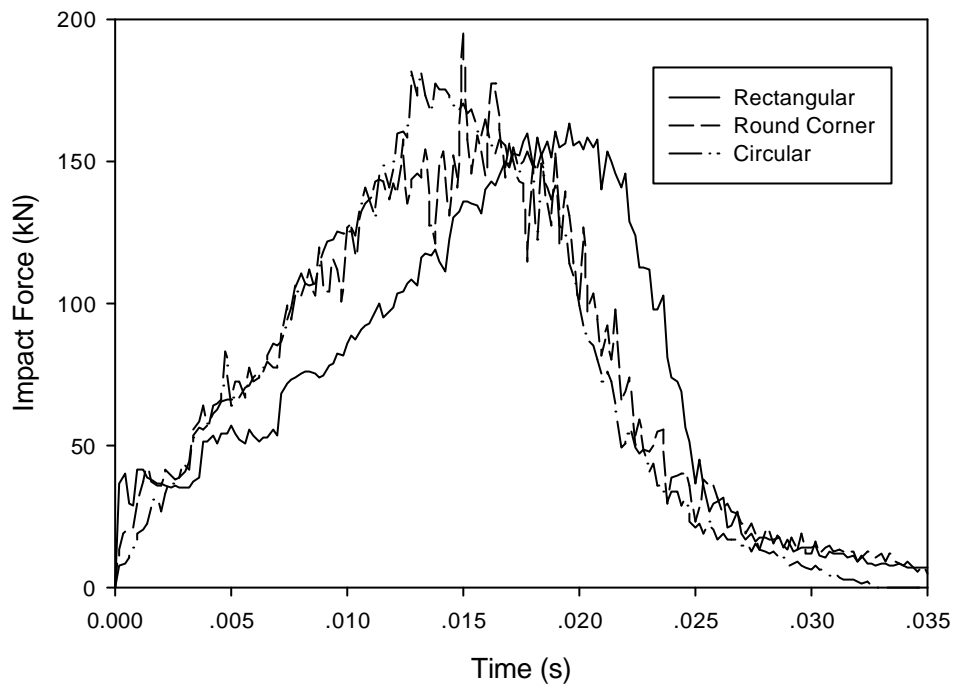


Fig. 7. Comparison of impact force-time histories of cask for corner drop for impact limiter shape variation.

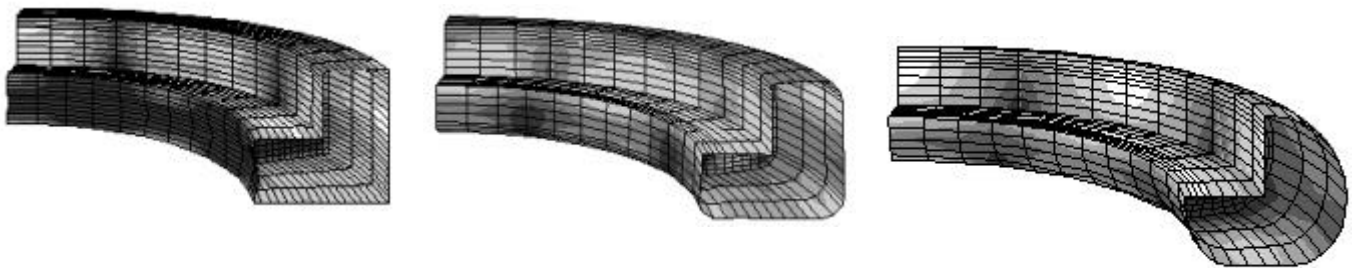


Fig. 8. Stress contours and deformed shapes of impact limiter case for vertical drop for each impact limiter shape.

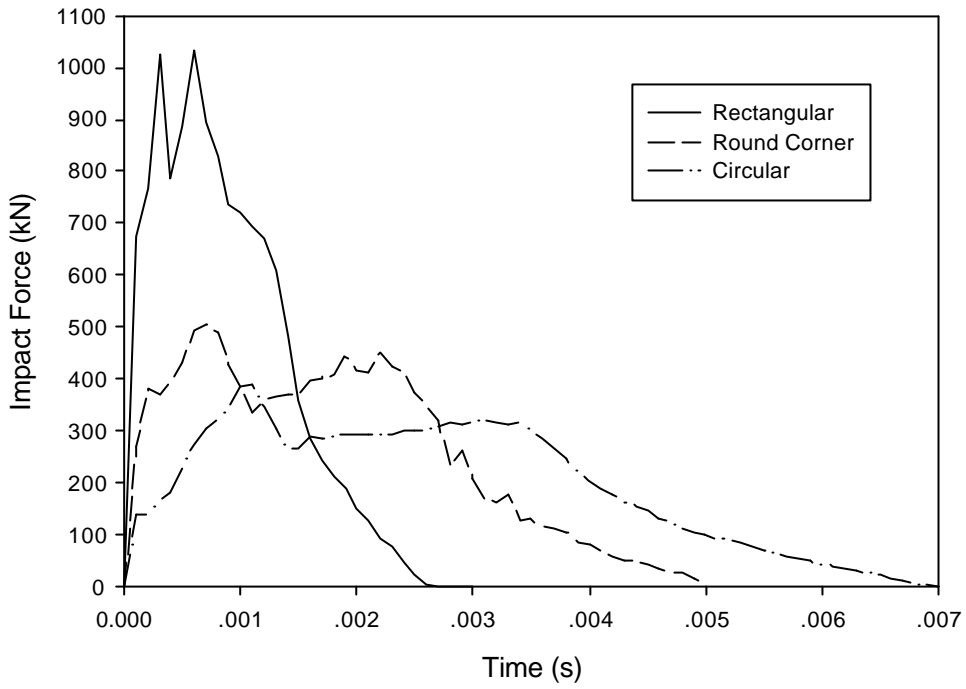


Fig. 9. Impact force-time histories of cask for vertical drop for foam-filled impact limiter with gusset.

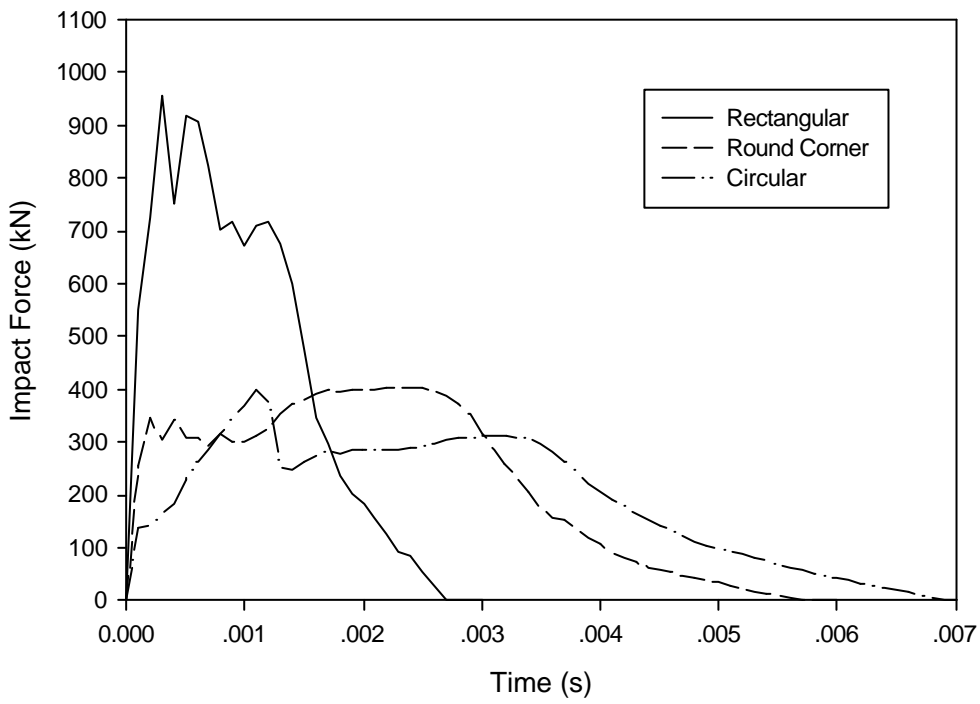


Fig. 10. Impact force-time histories of cask for vertical drop for empty impact limiter with gusset.