

의료용 동위원소 운반용기의 자유낙하 충격거동에 관한 연구

**A Study of Free Drop Impact Analysis
for Medical Radioisotope Transportation Cask**

박홍윤, 이주찬, 방경식, 서기석, *홍성인

한국원자력연구소, *충남대학교
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

방사성 동위원소가 사용되어지는 분야가 발전뿐만 아니라 산업 전반에 걸쳐 그 사용처 및 사용량이 점차 증가하고 있다. 이에 따라 운반 및 사용에 대한 안전성 검증에 대한 필요성이 요구되고 있다. 본 연구에서는 한국원자력연구소의 연구용 원자로인 하나로(HANARO)에서 생산되는 의료용 동위원소(Ir-192)를 의료기관까지 안전하게 운반하기 위한 운반용기의 기본 설계를 수행하고 그에 대한 안전성을 평가하였다. 안전성 평가의 기준은 방사선원의 방사능량으로 분류되는 운반용기 기준인 국내 과기처 고시 제96-38호 및 IAEA Safety Standard Series ST-1의 규정에 의거하여 A형 기술기준을 적용하였다. 또한 유한요소 Code인 ABAQUS/Explicit를 사용하여 자유낙하시의 충격거동에 대하여 3차원 유한요소 해석을 수행함으로써 용기의 변형을 예측하고 운반용기의 건전성을 평가하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 의료용 방사성 물질 운반용기의 최적설계를 위한 기본 자료로 활용될 것이다.

Abstract

The demand for the radioisotopes material has been increased. Then, KAERI designed the transport cask to ensure the safe transportation, which contains the radioisotopes material needs to be inspected about structural safety to withstand the hypothetical accident conditions as well as normal transport conditions according to IAEA and domestic regulations. In this paper, 1.2m free drop impact was performed for RI transport cask by using the finite element methods. Furthermore, verified the safety of RI transport cask. The results obtained this study will be applied to a basic data for design of RI transport cask.

1. 서론

방사성 동위원소는 발전뿐만 아니라 산업, 의료, 유전공학 등에서 다양하게 사용되어지며 그 양 또한 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 동위원소의 국내 및 국외 운반이 급격히 증가하는 추세에 있다. 국내에서 의료용으로 널리 쓰이는 동위원소를 운반하기 위한 운반용기는 전량 수입에 의존하고 있고, 그 기술 또한 선진국에 의존하고 있는 실정이다. 그러므로 점차 증가하는 동위원소의 수요에 맞춰 운반용기에 대한 독자적인 기술 개발은 매우 중요하다.

본 연구에서는 한국원자력연구소의 연구용 원자로인 하나로(HANARO)에서 생산되는 동위원소(Ir-192)를 수요처까지 안전하게 운반하기 위한 용기의 기본 설계를 수행하였다. 이 동위원소의 운반용기는 방사선원의 세기가 비교적 낮은 20Ci의 동위원소를 운반할 수 있도록 설계하였다.

방사선원의 방사능량으로 분류되는 운반용기의 기준인 과학기술부고시 제 96-23호 및 IAEA Safety Standard ST-1의 규정에 의거하여 A형 용기로 분류하였으며, 그에 따른 기술 기준을 적용하고 상용 Code인 ABAQUS/Explicit를 사용하여 용기의 구조적 안전성을 평가하였다.

운반용기에 대한 구조적 안전성 검증에 대한 기준은 위 규정에 의거하여 가상사고 시험으로 낙하조건으로 해석을 수행하였다. 낙하조건은 1.2 m 높이로부터 운반용기에서 최대 손상이 예측되는 부분이 변형이 일어나지 않는 강판에 자유 낙하하는 경우로 고려하였다.

2. 이론

2.1 운동방정식(Equation of Motion)

기하학적 공간에서 유한한 공간을 차지하는 물체V에 대하여, 체적력(Body force)과 표면 마찰(Surface traction)이 주어진 운동은

$$x^i \equiv \chi^i(X^a, t) \tag{1}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 X^a 는 물질 좌표계(Material coordinates)로서 시간에 의해 변하지 않고 물체의 한 요소를 나타내는 값으로, 함수 χ^i 에 의해 시간에 대한 공간상의 좌표 x^i 로 변환할 수 있다. 시간 $t=0$ 인 경우 식(2)는 물체의 응력과 변형율이 없는 초기 상태이다.

$$\chi^i(X^a, 0) \equiv X^a \tag{2}$$

이러한 물체의 운동을 가상일의 원리(Principle of virtual work)를 사용하여 나타내면 식(3)과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \rho \ddot{x}^k \delta x_k dv + \int_V t^{km} \delta x_{k,m} dv - \int_V \rho f^k \delta x_k dv - \oint_{S^1} s^k \delta x_k da \quad (3)$$

위 식은 S^2 의 변위 경계 조건을 만족하는 모든 δx_k 의 운동에 대하여 밀도 ρ 와 가속도 \ddot{x}^k , 체적력 f^k 와 표면 S^1 에서의 표면 마찰력이 작용하는 Cauch Stress t^{km} 의 상태에 대하여 적분이 되어지는 형태이다. 발산의 정리(Divergence theorem)을 적용하여 정리하면 식(4)로서 운동방정식을 나타낼 수 있다.

$$t_{,m}^{km} + \rho f^k = \rho \ddot{x}^k \quad (4)$$

이 때 표면 S^1 에서의 마찰 경계조건은 식(5)으로 표현할 수 있다.

$$t^{km} n_m = s^k(t) \quad (5)$$

2.2 에너지 보존의 법칙

임의의 질량 또는 체적으로 한계가 구성되는 에너지 보존 법칙은 아래 식(6)으로 표현된다.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \left(e + \frac{1}{2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} \right) dV = \int_S \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} dS + \int_V \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{f} dV - \int \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS \quad (6)$$

여기서, e 와 $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{v})/2$ 는 각각 단위 질량당 작용하는 내부 에너지 및 운동에너지를 나타내며, \mathbf{q} 는 전도열 플럭스(conductive heat flux)를 나타낸다.

2.3 유한 요소 동적 지배방정식

Explicit 동적 해석 방법은 매우 많은 작은 시간의 증분을 효과적으로 수행하는 것에 그 개념을 두고 있으며, 이러한 Explicit 적분으로 이루어진다.

물체의 동적 평형 방정식은 식 (7)의 형태로 표현할 수 있다.

$$M \ddot{u} = F - I \quad (7)$$

여기서 M 은 대각 집중 질량 행렬(Diagonal lumped mass matrix)이고, F 는 하중 벡터, I 는 내부 힘 벡터를 나타낸다.

이때, 물체의 운동 방정식은 Explicit 중앙 차분 적분법(Explicit central difference integration)을 이용하여 표현된다.

$$\dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} = \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \ddot{u}^{(i)} \quad (8)$$

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} \quad (9)$$

위 식 (8),(9)에서 \dot{u} 는 속도를, \ddot{u} 는 가속도를 나타낸다. 또한 첨자 (i) 는 증분과 관계되는 값으로, $i-\frac{1}{2}$ 와 $i+\frac{1}{2}$ 는 중간증분에 해당되는 값이다. 중앙 차분 적분법

은 이전 단계의 증분으로부터 알고 있는 값 $\dot{u}^{(i-\frac{1}{2})}$ 와 $\ddot{u}^{(i)}$ 을 사용하여 운동 상태의 진전을 나타낸다. 이러한 Explicit 적분법은 매우 간단하지만 그 자체적으로는 효율적이지 못하다. 계산의 효율성을 위해 대각 요소 질량 행렬(Diagonal lumped mass matrix)을 사용한다. 대각 집중 질량 행렬을 이용하면 증분의 시작점에서의 가속도는 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1}(F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (10)$$

여기서 첨자 i 는 시간의 증분을 나타낸다.

또한 $\dot{u}^{(i+\frac{1}{2})}$ 이나 $\dot{u}^{(i-\frac{1}{2})}$ 과 같은 평균 속도의 선형 보간의 형태로서 속도 $\dot{u}^{(i+1)}$ 을 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{u}^{(i+1)} = \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} + \frac{1}{2} \Delta t^{(i+1)} \ddot{u}^{(i+1)} \quad (11)$$

중앙 차분법의 초기 조건은 식(12)과 (13)으로써 부여할 수 있다.

$$\dot{u}^{(+\frac{1}{2})} = \dot{u}^{(0)} + \frac{1}{2} \Delta t^{(1)} \ddot{u}^{(0)} \quad (12)$$

$$\dot{u}^{(-\frac{1}{2})} = \dot{u}^{(0)} - \frac{1}{2} \Delta t^{(1)} \ddot{u}^{(0)} \quad (13)$$

Explicit 유한 요소 해석법은 작은 시간 증분을 이용하여 전체 시간에 대해 적분되는데, 이는 중앙 차분 연산자기 조건적으로 안정해야 한다. 이러한 연산자의 안정성(Stability)의 한계는 감쇠(Damping)가 없는 경우 가장 높은 고유치(Eigenvalue)의 향으로 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t \leq \frac{2}{w_{\max}} \quad (14)$$

3. 운반용기의 구조

의료용 운반용기는 그림 1 과 같이 크게 DU차폐체와 외부의 충격완충체, 케이스(Case)으로 구분된다. 충격완충체인 폴리우레탄폼(Polyurethane form)을 포함한 운반용기의 전체 크기는 직경이 97 mm, 길이 310 mm 이며, 총 중량은 21 kg이다. DU차폐체 외부를 둘러싸고 있는 충격완충체는 3mm 두께의 스테인리스 강판(SA304) 케이스 내부에 밀도가 220kg/m³ 인 폴리우레탄으로 이루어져 있다.

차폐체는 중심에 2개의 동위원소를 장전 시 외곽에서의 최소 차폐 두께가 40mm 를 유지할 수 있도록 최적의 차폐 형상계산을 통하여 중량을 최소화하였다. 차폐체의 중량은 11.45kg이며 내부에는 동위원소의 장전 위치를 일정하게 유지하고 삽입 및 인출을 용이하게 하기위한 외경 10mm, 두께 1mm의 티타늄 튜브가 설치되어 있

다.

외부케이스의 구조는 적재 및 충격등의 외부의 하중을 견뎌낼 수 있도록 내부에 격판이 존재하는 구조로 되어있다. 용기의 내부는 반지름 방향의 하중을 분산시키기 위한 격판과 케이스의 변형이 발생할 경우 동위원소의 장전위치를 유지하기 위한 파이프(Pipe)의 조합으로 이루어진다. 또한 운반용기의 상단부의 격판에는 잠금장치(Locking mechanism)가 설치되어 운반도중 동위원소의 이탈을 방지하게 된다.

4. 유한요소해석

조사시편 운반용기에 대한 유한요소해석은 국내 과기부 고시 제96-38호 및 IAEA Safety Standard ST-1을 적용하여 구조적인 건전성을 평가하였다. 그 외에도 미국 NRC 10 CFR Part 71의 운반용기에 대한 일반기준(General standard for all packages)을 참고하였다.

4.1 모델링(Modeling)

의료용 운반용기의 자유낙하 해석은 대칭성을 이용해 그림2와 같이 1/2의 대칭형상으로 가정하였다. DU차폐체는 보다 정확한 현상을 예측하기 위해 자유곡면의 형상을 고려하여 ABAQUS에서 사면체 요소인 C3D4를 사용하였고, 폴리우레탄폼 및 외부 케이스에 대해서는 3차원 Solid 요소인 C3D8R를 적용하였다. 대칭면에 대해서는 절점에 대칭경계조건을 부여하였다. 용기가 충돌하는 면은 변형이 없는 강체(Rigid)요소인 R3D4를 사용하여 평면을 구성하였다.

4.2 해석 방법

자유낙하 충격의 해석을 위해 충돌 직전인 경우로 가정하여 에너지 보존 법칙에 의해 4.8497m/s의 초기 속도와 중력가속도, 질량을 고려하여 동적 해석을 수행하였다. 이 때 DU차폐체 및 완충체, 케이스, 강체 사이에는 단순 접촉으로 마찰이 없는 것으로 가정하였다. 두 물체가 접촉할 때 공통의 접촉면을 따라 수직 접촉응력이 전달되고, 마찰이 존재할 경우 어느 정도의 전단응력도 전달된다. 이러한 접촉 문제는 불연속적인 비선형성을 야기하고 여러 가지의 기하학 및 운동학적 상황을 포함하고 있기 때문에 본 해석에서는 접촉면을 통하여 단지 수직응력만이 전달되는 것으로 고려하였다. 또한 일반적으로 Explicit 해석에서는 시간 증분의 크기가 작을수록 해의 정확도는 높아지는 경향이 있으나, 충격으로 발생하는 노이즈(Noise)를 방지하고 비선형 충격 거동임을 고려하여 전체 해석 시간에 걸쳐 증분을 자동적으로 수행하는 자동 시간 증분 방식을 사용하였다.

4.3 운반용기 재질의 특성

4.3.1 DU차폐체(Depleted uranium)

DU차폐체의 물성치는 Westing House 사의 운반용기 안전성 분석 보고서의 자료를 참고하였다. 그 내용은 다음과 같다.

- Depleted uranium alloy containing 0.2% Mo
- Shear modulus : 82.7 GPa
- Elastic modulus : 165.5 GPa
- Yielding Strength : 275.8~413.7MPa
- Ultimate Strength : 482.6~689.5 MPa
- Elongation (in 2 inches) : 3~7%
- Poisson's ratio : 0.21
- Density : 18,700 kg/m³

4.3.2 폴리우레탄폼(Polyurethane form)

- Elastic modulus : 129.5 MPa
- Yielding Strength : 8.7 MPa
- Poisson's ratio : 0.2
- Density : 275 kg/m³

4.3.3 스테인리스 강판(SS304)

- Elastic modulus : 191.1 GPa
- Yielding Strength : 172.5 MPa
- Poisson's ratio : 0.3
- Density : 7,198 kg/m³

5. 결과 및 고찰

그림3은 수평낙하시 운반용기에 발생하는 변형 및 응력 분포를 나타낸 것이다. 운반용기의 외부 케이스의 충돌부분과 내부격판에서 국부적으로 항복점에 가까운 응력이 발생하지만 용기의 변형은 거의 발생하지 않는다. 하지만 파이프와 격판의 조합으로 이루어진 내부 구조가 응력의 집중을 방지하고 구조적인 형상을 유지하는데 좀 더 효과적임을 알 수 있다. 충돌에 의한 폴리우레탄의 변형은 그림7에서 충돌방향에 대해 최대 압축을 받는 경우 약 2.5 mm의 압축 변형을 보이지만 항복응력을 초과하지 않는 응력상태로서 거동이 끝난 후에는 0.5 mm 압축 변형량을 보이는데 이는 구조적 안전성 측면에서 무시할 수 있을 정도의 값으로 판단된다.

von Mises 응력을 기준으로 하였을 때 케이스의 응력 분포는 파이프를 포함하는 내부구조에서 항복응력에 근접하는 응력의 분포가 격판으로만 이루어진 경우보다

넓게 나타남을 알 수 있다. 이는 파이프 구조물이 운반용기 상단부의 변형을 구속함으로써 일어나는 현상으로 상단 격판이 DU차폐체의 변위와 유사한 변형을 나타내게 된다.

이러한 현상은 격판만으로 이루어진 내부 구조의 경우 변형이 크게 나타는 그림6에서도 알 수 있다. 그림 6은 DU차폐체에 장전되는 동위원소의 위치 변위를 예상하기 위해 잠금장치(Locking mechanism)의 위치를 기준으로 차폐체와 접촉하는 중간 격판에 대한 낙하 방향의 상대 변위이다. 즉 격판 구조 케이스의 경우, 밀도가 높은 DU차폐체의 충돌 변위에 비해 잠금장치 부분은 상대적으로 적은 변형이 발생되어 운반용기의 구조가 틀어지는 현상이 나타난다. 이러한 현상은 용기 상단부의 잠금장치에 의해 고정되어 있는 동위원소의 장전 위치가 변하게 되는 결과를 초래하게 된다. 하지만 격판과 파이프의 조합 구조를 갖는 케이스의 경우 충돌이 끝난 후 동위원소가 본래의 장전 형태로 복원됨을 알 수 있다.

그림5에서는 수평낙하시 충격력의 변화를 나타낸다. 파이프를 포함하고 있는 케이스의 경우 충돌이 시작되면서 충격력은 급격한 증가를 보여 73kN의 충격력이 발생한 후 감소해 약 2 ms에서 충격 거동이 끝남을 알 수 있다. 이 때 내부구조에서 격판만 존재하는 경우의 최대 충격력은 파이프가 있는 경우에 비해 약 4 kN 정도 작게 나타나며 충돌 시간은 0.1 ms 정도 길어진다. 이는 내부의 파이프가 운반용기의 강성을 증가시켜 나타나는 현상으로 보여진다.

운반용기의 외부 형상의 변형 관점에서는 두 가지 경우 모두 무시할 수 있을 만큼의 변형을 나타내지만, 격판과 파이프의 구조로 이루어진 케이스의 경우가 내부 장전 구조의 변형 관점에서는 보다 안전함을 알 수 있다.

그림 4는 상부 수직 낙하시의 최대 충격력이 발생할 때의 응력의 분포이다. 운반용기의 상단부는 완충체가 존재하지 않고 스테인리스 강판 구조로만 되어 있어 충격력에 대한 흡수가 강판의 변형으로 이루어져 수평낙하시 보다 전체적인 응력이 크게 발생하게 되고 용기 상단부의 변형이 발생한다. 응력의 분포가 항복응력을 초과하지 않고 상단부의 변형은 운반용기의 안전성에 크게 영향을 미치지 않는 부분이지만, 용기의 질량에서 가장 큰 비중을 차지하는 DU차폐체가 충격면에 비해 상단에 위치하게 되어 내부 격판에 많은 변형이 발생한다. 이 때 가장 중요한 것은 외부 케이스의 형상 유지뿐만 아니라 잠금장치의 변위에 따른 동위원소의 장전위치가 변하는 것이다. 이러한 장전위치의 변화는 격판으로만 이루어진 경우의 충격거동에서 잠금장치와 차폐체의 상대 변위를 보여 주는 그림 9에서 알 수 있다. 이 경우 약 4mm의 범위로 충돌 방향에 대해 진동하는 형태로 나타난다. 이러한 변형은 차폐성능을 저하시켜 운반용기의 구조적 안전성을 보장할 수 없게 된다. 하지만 내부의 구조가 격판과 파이프의 조합으로 이루어진 경우에는 이러한 상대 변위가 최대 약 0.5mm이고 진동의 폭이 점차 감소하여 충격거동이 끝난 후에는 초기의 장전

위치를 회복함을 알 수 있다. 충격력의 경우는 그림 8과 같이 두 경우 모두 충격력이 충돌 순간 급격히 증가한 후 감소되고 약 0.8ms에서 다시 증가하게 되는 거동을 보이고 있다. 이러한 현상은 무게 중심이 충돌면에 비해 용기의 상단부에 위치하게 되고 이를 지지하는 내부 격판의 대부분이 탄성영역 내에서 변형을 하게 되고 충격력을 흡수할 수 있는 완충체가 존재하지 않아 진동하게 되는 것으로 판단된다. 또한 최대 충격력 및 충돌시간에 큰 차이를 보이지 않지만 파이프 구조를 갖는 경우가 충격력의 감소가 더 빠른 것을 알 수 있다. 이를 수평 낙하시의 충격력과 비교해 보면 상부 수직낙하의 경우가 약 2배의 최대 충격력을 나타내는 데, 이는 수평 낙하의 경우는 외부의 케이스가 접선의 형태로 충돌하는 데 비해 수직낙하시에는 원통형의 운반용기 상단부 전체가 충돌하기 때문에 충격력이 급격히 증가하게 된다. 상부 수직낙하의 경우 또한 격판과 파이프의 조합으로 내부 구조 형상을 이루었을 경우가 충격 거동시 운반용기의 안전성을 만족하는 것으로 판단된다.

6. 결 론

의료용 동위원소 Ir-192(20 Ci)를 운반하기 위한 A형 용기에 대해 구조적 안전성 평가 규정의 의한 수평낙하와 수직낙하에 대한 충격거동의 유한요소 해석을 통하여 내부 구조의 변화에 대한 영향을 평가하였다.

본 연구를 통하여 운반용기의 완충체의 두께가 가장 얇은 반지름 방향에 대한 수평 낙하의 경우 내부 격판이 충격력의 흡수에 가장 중요한 요소이며, 그 구조적 형상을 유지하는 최적의 위치로 판단되었다. 또한 완충체가 존재하지 않는 운반용기의 상부가 바닥 면에 충돌하는 상부 수직 낙하의 경우 내부의 파이프 구조가 충격에 의한 동위원소의 장전위치 변화 및 차폐체의 진동을 방지할 수 있는 구조적 요소임을 알 수 있었다.

운반용기의 내부 구조가 반지름 방향의 격판과 파이프의 조합구조인 케이스의 경우 수평낙하 및 수직낙하 충격에 대해 안전성을 유지하는 것으로 확인되었다.

본 연구 결과를 토대로 운반용기의 차폐성능 및 구조적 안전성을 유지하며 운반용기를 경량화할 수 있는 형상의 최적화 연구가 수행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

5. 참고문헌

- [1] 과학기술부, “방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정”, 과학기술부고시 제 96-38호, 1996.
- [2] IAEA, “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material”, Safety Standards Series No. TS-R-1, 2000.
- [3] US NRC, “Packaging and Transportation of Radiocative Material” ,10 CFR Part 71, 1989.
- [4] P.G.Bergan, K.J.Bathe, W.wunderlich, “Finite Element Methods for Nonlinear Problems”, Springer-Verlag, 1985.
- [5] M.A Meyers, “Dynamic Behavior of Materials” , John Willey, 1994.
- [6] H.K.S. Inc, “ABAQUS Theory Manual ver. 5.8” , H.K.S. Inc, 1998.

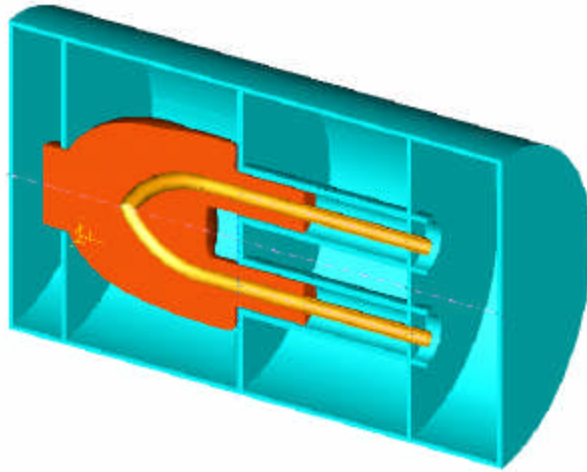
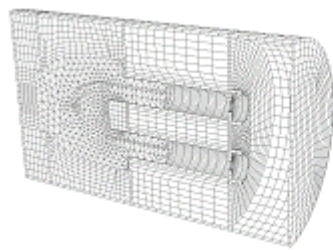
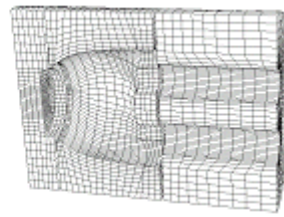


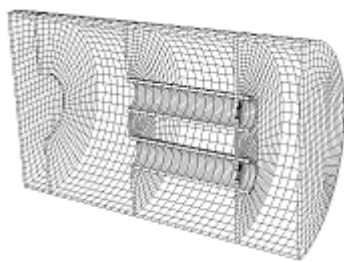
Fig. 1. Schematic diagram of medical source cask.



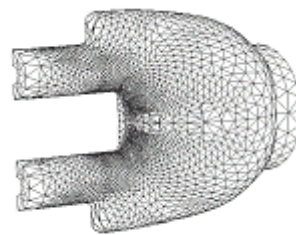
(a) Medical cask



(b) Polyurethane form

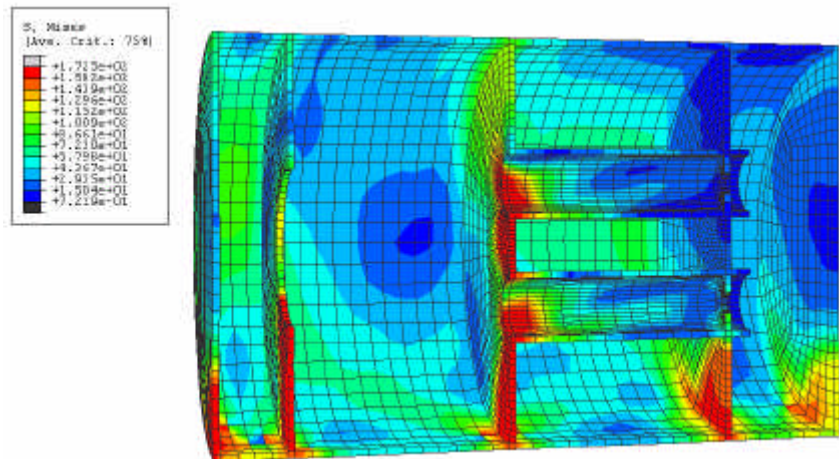


(c) Case

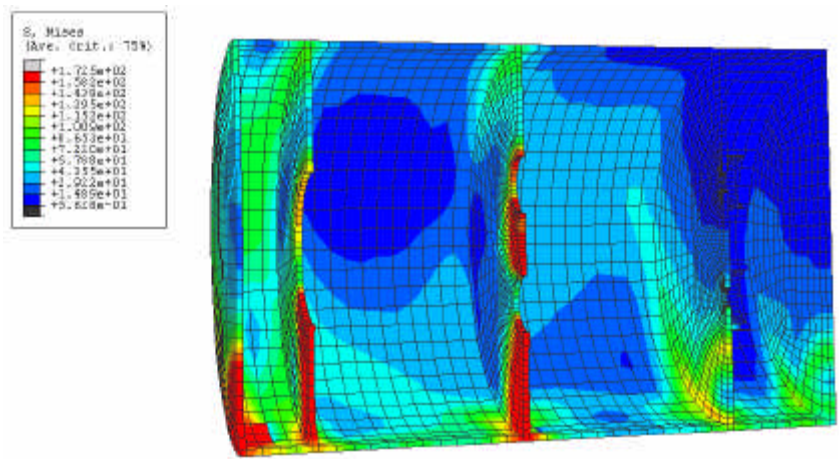


(d) Depleted uranium

Fig. 2. FEM Model of medical source cask.

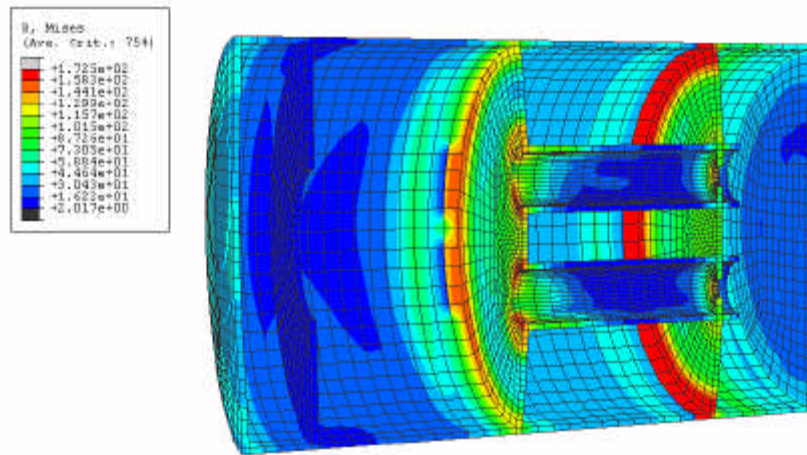


(a) with internal pipe

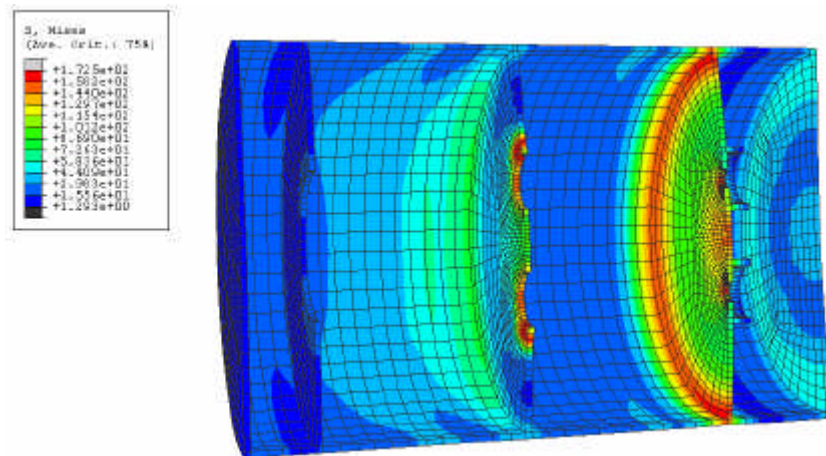


(b) without internal pipe

Fig. 3. von Mises stress contour of medical source cask under 1.2m side down drop



(a) with internal pipe



(b) without internal pipe

Fig. 4. von Mises stress contour of medical source cask under 1.2m top down drop

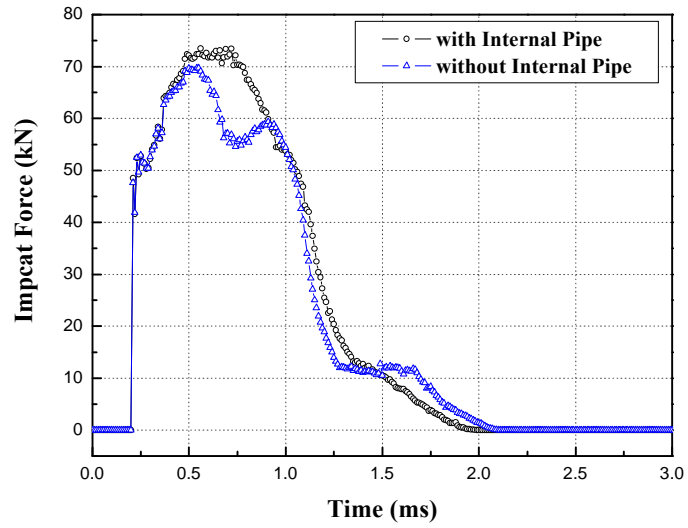


Fig. 5. Impact force–time history of medical source cask under 1.2m side down drop

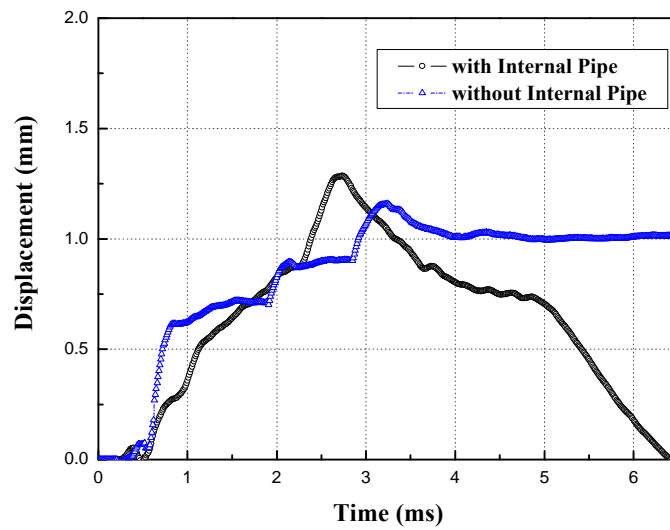


Fig. 6. Relative displacement–time history of gussets under 1.2m side down drop

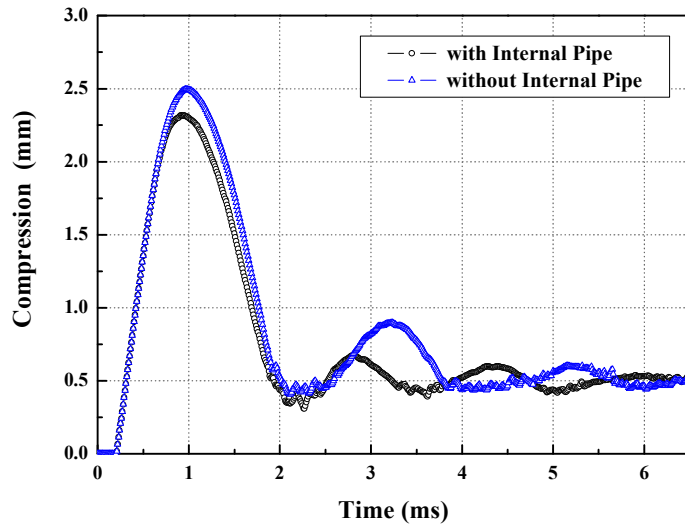


Fig. 7. Compression-time history of Polyurethane form under 1.2m side down drop

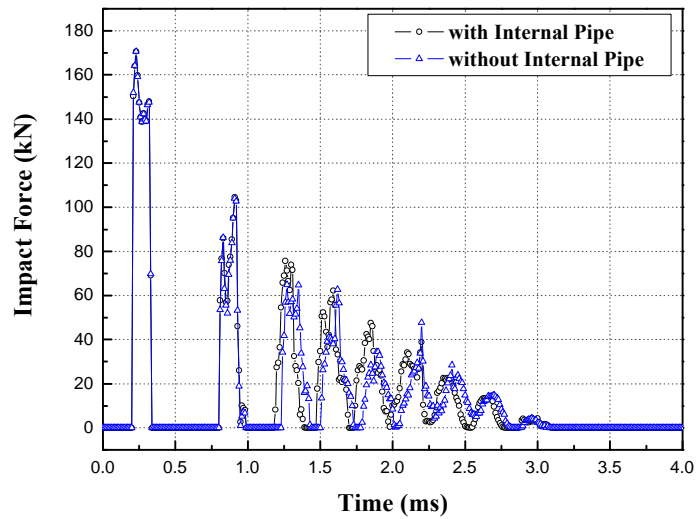


Fig. 8. Impact force-time history of medical source cask under 1.2m top down drop

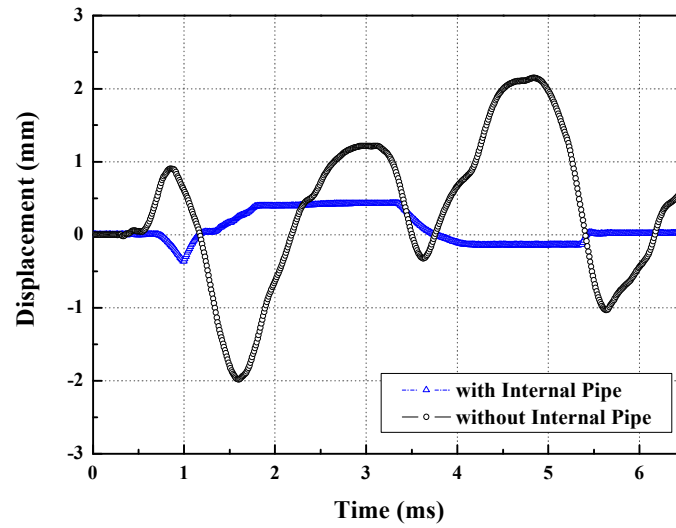


Fig. 9. Relative displacement-time history of gussets under 1.2m top down drop