2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

수소동위원소 운반용기의 낙하충돌 모사연구

Impact analysis of a Hydrogen Isotopes container

이민수, 황창숙, 정흥석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

수소동위원소 저장용기를 장거리 운반하기 위한 운반 용기에 대한 9M 자유낙하 시 충돌 해석을 수행하였다. 본 연구는 실제 충돌 시험은 현실적으로 비경제적이고 시간이 많이 소요되므로 개념설계 단계에서 전산해석으로 운반용기의 효율적인 구조를 완성하는 데 목적이 있다. 운반용기를 모사한 해석모델을 개발하고, 운반과정에서 있을 수 있는 가상사고를 가정하여 9m 자유 낙하 모사를 수행하였다. 본 연구에서는 특히 30°로 기울어진 상태에서의 충격모델에 대한 해석을 주로 수행하였다.

Abstract

The container used for the radioactive materials, containing hydrogen isotopes is evaluated in a view of hypothetical accident. The computational analysis is a cost effective tool to minimize testing and streamline the regulatory procedures, and supports experimental programs to qualify the container for the safe transport of radioactive materials. The numerical analysis of 9m free-drop onto a flat unyielding, horizontal surface has been performed using the explicit finite element computer program ABAQUS. Especially free-drop simulations for 30° tilted condition are precisely estimated.

1. 서 론

수소동위원소를 저장하고 있는 500kCi 급 저장용기를 운반하기 위해서는 사고안전성을 고려한 특수한 운반용기가 필요하다. 이 때 사용되는 운반 용기는 법적으로 B 형 운반용기에 해당되어 시험조건이 엄격하다. 사고발생에 대비하여 9m 낙하시험, 1m 봉침 낙하시험, 800℃ 내열 시험 등 강도 높은 시험항목이 있으며, 언급한 시험항목을 통과해야만 운반용기로서 사용이 가능하게 된다.

이러한 시험에 대비하기 위해 개발초기단계부터 충돌 특성을 평가하고, 내열 특성들을 평가하는데 있어서 실용기의 테스트에만 의존한다는 것은 매우 비효율적이다. 또한 용기의 개발개념을 설정하는 단계에서는 용기의 구성이 구체적이지 않으므로 현실적으로 시험이 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 운반용기의 충돌 시뮬레이션 기법을 적용하여 개념단계에서부터 용기의 충돌특성을 파악하고, 보완하는 방법을 모색하고자 트리튬 운반용기에 대해 전산해석을 수행하였다.

지난 연구에서는 얻어진 해석모델을 개선하여 새로운 형태의 운반용기를 설계하였으 [1], 다시 새로 개선된 형태의 운반용기의 수직 낙하에 따른 충돌모사를 해석하였으며, 본 논문에서는 기울어진 형태로 자유 낙하된 경우, 운반용기가 받는 기계적 충격에 대해 주로 모사 연구하였다.

2. 수소 동위원소 운반용기의 구조

운반용기의 구조는 그림 1 과 같이 3 중 구조로 되어 있다. 먼저 방사성 물질인 트리튬 흡장 금속이 내장되어 있는 원통형의 압력 용기인 1 차 수소운반용기가 중앙에 내장되어 있으며, 트리튬의 누설에 대비하여 밀봉역할을 할 수 있는 원통형 압력 용기인 2 차 저장 용기가 있다. 그리고 3 차 용기는 충돌 시 에너지를 흡수하는 구조를 가지도록 하고, 또한 화재 시 단열의 효과를 얻을 수 있도록 설계되어 있다.

3. 유한요소 모델링

그림 1 의 3 중 구조로 된 운반용기를 유한요소법으로 모델링하여 그림 2 와 같이 해석하고자 하였다. 그림 2 는 9m 낙하 모사에 사용된 유한요소 모델의 단면을 잘라 펼쳐놓은 것이다. 용기의 구조는 완전히 좌우 대칭이나 밑면의 보강재와 3 차 용기의 Spot weld point 는 충돌 시 가장 먼저 접촉하는 부위가 보강재 부위로서 비대칭 조건으로 해석하였다. 1 차 용기는 2 차 용기 내에 위치한 고무판에 의해 떨어져 있으나 충돌 시 변형에 의해 접촉이 되는지의 여부를 판단하기 위해 Rigid body 로 모델링 하였고, 중심점으로부터 가속도를 측정하여, 1 차 용기의 거동을 판단하고자 하였다.

2 차 용기의 Cylinder 부분과 Cap 부분은 Shell 로 모델링 되었고, 그 외의 2 차용기 part 는 Solid 로 모델링하였다. 3 차 용기는 Shell 로 모델링되어 있으며, 보강

재는 Spot weld 로 모델링 되었다. 이 Spot weld 는 일정하중이 가해지면 분리되는 조건을 이용하였다. 이 외에 충돌을 흡수하는 구조인 완충재 A 역시 Solid 로 모델링 하였으며, 충돌 해석 시 충격의 완화에 거의 영향을 미치지 못하는 단열재 A 와 완충재 B 는 모델링에서 제외하였으며, 이 공간은 완충재 A 로 대치되었다. 각 요소간에 충돌로 인한 접촉이 발생하는 것에 대해서 20 개의 접촉조건을 부여하였다. 유한요소모델은 39,908 개의 node, 14 개의 component 및 4 개의 material 로 구성하였다.

물성치는 Elastic-Plastic material 모델을 10 스테인리스 강과 완충재의 물리적 특성은 앞서 발표된 연구에 언급한 바 있다[2].

4. 안전해석 결과

운반 전산 해석은 ABAQUS/Explicit 모듈을 이용하여 수행하였다. 해석조건은 9m free drop test 조건을 수행하였다. 떨어지는 각도는 30 도 기울어진 방향이며, 9m drop 시 Rigid wall 에 접촉하는 순간의 속도는 자유낙하속도 식인 식 (1)에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{2gh} \\ &= \sqrt{2\times 9.81\times 9} \\ &= 13.2883 m/s \end{aligned} \qquad (1)$$

본 해석에서는 앞에서 계산된 속도를 초기조건으로 적용하여 충돌해석을 수행하였다. 또한 해석 시 접촉조건에 의한 변형의 영향을 최소화하여 초기 안정화를 기하기 위해 모의시험은 충돌시작 전 1msec 정도부터 시작되도록 하였다. 해석에 사용된 용기의 질량은 113.29 kg으로 실제용기와 거의 동일하게 모델링 되었으며, 총 에너지는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} E_{Total} &= \frac{1}{2} mv^2 \\ &= 10.002 \ kJ \end{aligned} \qquad (2)$$

일반적인 부재에서 외력에 의해 발생된 변형에 의한 내부에너지의 일반식은 식 (3)과 같다.

$$E_{Internal} = \int\int\int \frac{1}{2}(\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \sigma_{xy} \varepsilon_{xy} + \sigma_{yz} \varepsilon_{yz} + \sigma_{xz} \varepsilon_{xz}) dV \qquad (3)$$

충돌 시 용기의 변형에 따른 충돌에너지의 흡수에 의한 해석이 중요한데 이는 어느 부재에서 에너지의 흡수가 이루어지는가를 파악하는데 있어서 필요하며, 부재의 보강이 필요한 경우 1 차적인 고려의 대상이 되기 때문이다. 내부에너지의 계산은 각각의 재질에 따른 내부에너지를 계산함으로써 가능하다. 일반적으로 내부에너지는 앞의 그림에서와 같이 소성 변형에너지와 탄성변형에너지의 합으로 표현되며, 충돌 시에는 운동에너지와 내부에너지의 교환이 이루어지게 된다. 또한 운동에너지는 식 (4)로 계산된다.

$$E_{Kinetic} = \frac{1}{2} mv^2 \qquad (4)$$

물체의 총에너지는 에너지 보존법칙에 의해 일정하게 유지되어야 한다. 물체의 총 에너지는 다음과 같이 식 (5)로 표현된다.

$$E_{Total} = E_{kinetic} + E_{Internal} + \cdots = constant \qquad (5)$$

충돌현상에 있어서 마찰에너지등과 같은 에너지들은 운동에너지와 내부에너지에 비해 상대적으로 작으므로 무시할 수 있다. 따라서 위의 수식은 식 (6)과 같이 간략화 된다.

$$E_{Total} \approx E_{kinetic} + E_{Internal} = constant \qquad (6)$$

따라서 충돌시 운동에너지는 감소하는 반면 충돌에 의한 내부에너지는 증가한다. 즉, 일반적으로 그림 3 과 같은 형태의 그래프가 생성된다.

그림 4 는 30 도 기울어진 자유 낙하모사에 있어서 총에너지와 운동에너지, 그리고 내부에너지 사이의 에너지 교환을 보여준다. 앞서 발표된 수직으로 Drop 시켰을 때에 비해 상당히 긴 시간동안 에너지의 교환이 이루어진다. 이는 국부 소성변형으로 인해 3 차 용기와 아래쪽의 보강재에서 1 차 소성변형이 발생하기 시작하면서 항복응력에 일찍 도달함으로서 4 5 msec 정도의 시간적인 Delay 를 가진 후 우레탄 폼 및 2 차 용기에서 변형을 시작함으로서 1 차 용기의 운동에너지를 내부에너지로 변환되는 형태로 에너지의 교환이 일어나는 것이다.

그림 5 는 Rigid Body 로 모델링 된 1 차 용기의 Reference Node 에서의 가속도를 측정한 것이다. 3 차 용기가 바닥면에 접촉한 1msec 에서 4.5msec 정도까지는 가속도의 변화가 없다가 이후 가속도가 발생하게 된다. 이후 3 차 용기의 변형이 끝나는 10msec 이후에도 약간의 가속도 성분을 가지고, 이후 20msec 전후에 가속도가 발생한다.

그림 6 은 낙하 시 시간에 따른 3 차용기의 응력분포를 나타낸다. 그리고 그림 7 은 충격이 가해지는 밑면의 응력구조를 확대한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 밑면의 접촉면에서 국부 소성변형이 발생함을 알 수 있다. 대부분의 충돌 에너지 흡수는 3 차용기의 변형으로부터 이루어지며, 지면과 맞닿는 3 차 용기의 하단부 모서리를 중심으로 하는 최대응력은 368 MPa으로 계산되었다. 이는 항복응력을 지나 소성변형의 영역으로 변형이 진행되며 이때 대부분의 충돌에너지를 흡수한다. 따라서 실제 용기의 변형도 그림 6 에서와 같이 하단부 모서리에서 발생하리라는 것을 쉽게 예측할 수 있다. 그림 7 에서 보면 국부 소성변형이 발생하고 있는 3 차 용기 및 보강재의 시간에 따른 변형양상과 응력의 변화를 보여준다. 보강재에서 1 차 변형이 발생하면서 내부에너지로의 변환이 이루어진다.

그림 8 과 9 는 2 차 용기의 시간에 따른 응력의 변화를 보여주는 그림이다.

7.5㎳ec 정도에서 2 차 용기의 밑면에 비교적 큰 응력이 발생하는데 이는 1 차 용기의 가속도가 최대점인 곳으로 1 차 용기와의 충돌로 인해 2 차 용기에 응력이 발생되는 것으로, 시뮬레이션 결과 2 차 용기의 변형은 0.1 0.5 ㎜정도로 미소한 양이었다. 그림 8 에서 보면 3 차 용기와는 달리 6㎳ec 이후에서 응력이 발생함을 알 수 있다. 이는 1 차 충돌에너지는 3 차 용기에서 흡수하고, 이후 완충재 A 에서 완충역할을 하여 충돌에너지의 전달을 지연시키기 때문이다.

5. 결 론

중수로형 원자로에서 생성되는 트리튬을 안전하게 운반하기 위한 운반용기는 엄격한 안전성이 요구된다. 이에 개념설계 단계인 초기 개발단계부터 충돌특성을 평가하기 위하여 전산모델을 개발하고 충돌모사를 수행하였다. 개발된 전산해석모델은 운반용기의 기초설계자료로 활용함이 가능하뿐 아니라, 실용기의 시험을 줄일 수 있다. 또한 개발된 전산모델을 1㎞ 봉침낙하 해석등과 같은 다른 충돌 해석에 적용할 수 있다.

본 연구에서는 30 도로 기울어진 형태로 자유낙하된 경우, 운반용기의 물리적 파손이 어떻게 진행되는지 살펴보았다. 해석결과 1 차 충격 에너지는 3 차용기의 변형으로부터 흡수되었다. 지면과 맞닿는 3 차용기의 모서리 부분에서 큰 변형이 유도되는 것을 확인하였으나, 2 차 용기는 거의 변형하지 않음을 확인할 수 있었다. 세러 개선된 운반용기 구조의 안정성을 확인할 수 있었으며, 사용된 완충재가 충분히 외부 충격을 흡수하는 것으로 결론내렸다.

6. 참고 문헌

1. 이민수, 홍창섭, 백승우, 안도희, 김광락, 이성호, 임성팔, 정흥석, “Free-drop Analysis of the Transport Container for Hydrogen Isotopes”, 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집 (2002).
2. 이민수, 홍창섭, 염기언, 정흥석, “Safety Analysis of the Transport Container for Hydrogen Isotopes”, 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집 (2002).

감사의 글 : 본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

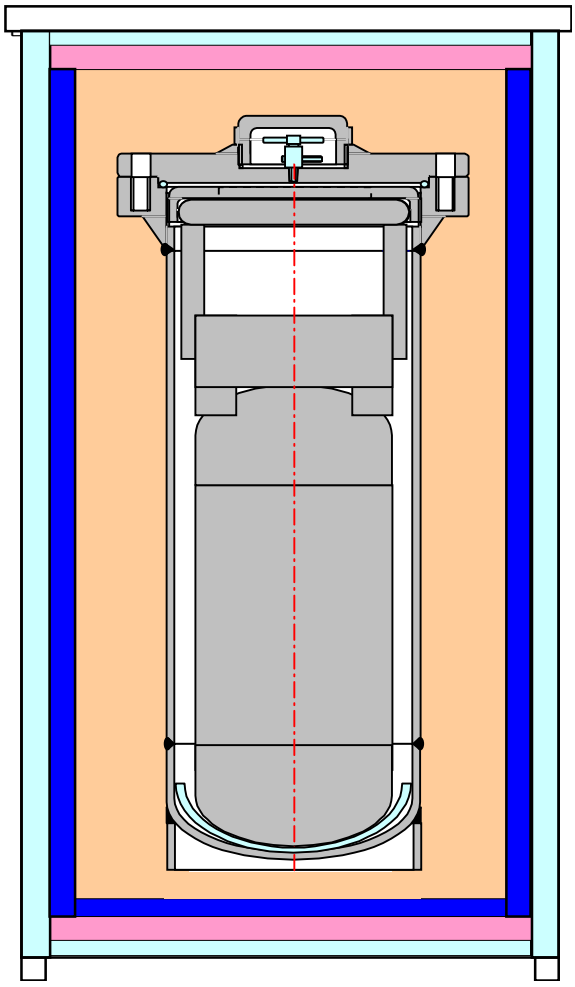


그림 1. 운반용기 구조도

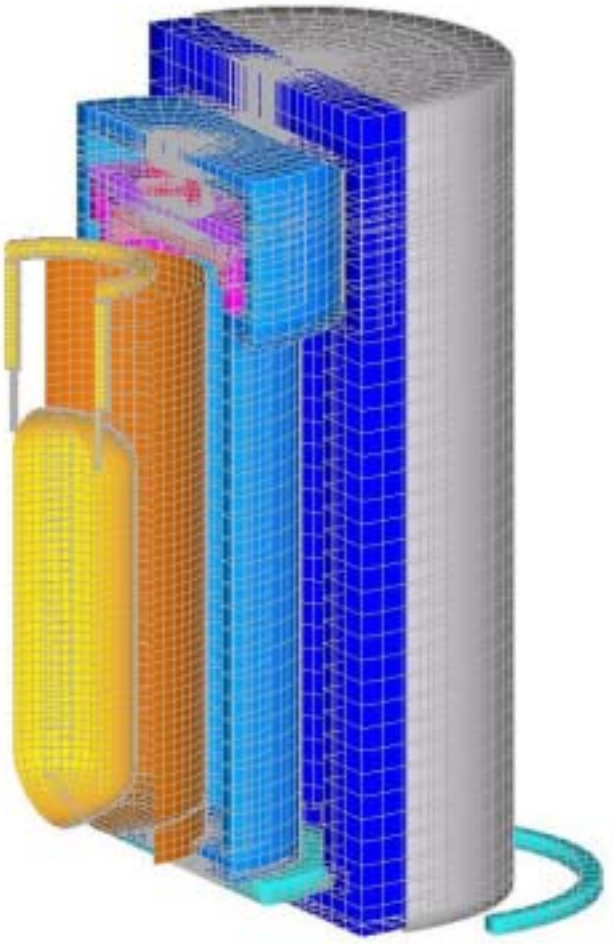


그림 2. 유한요소법에 의한 운반용기 모델

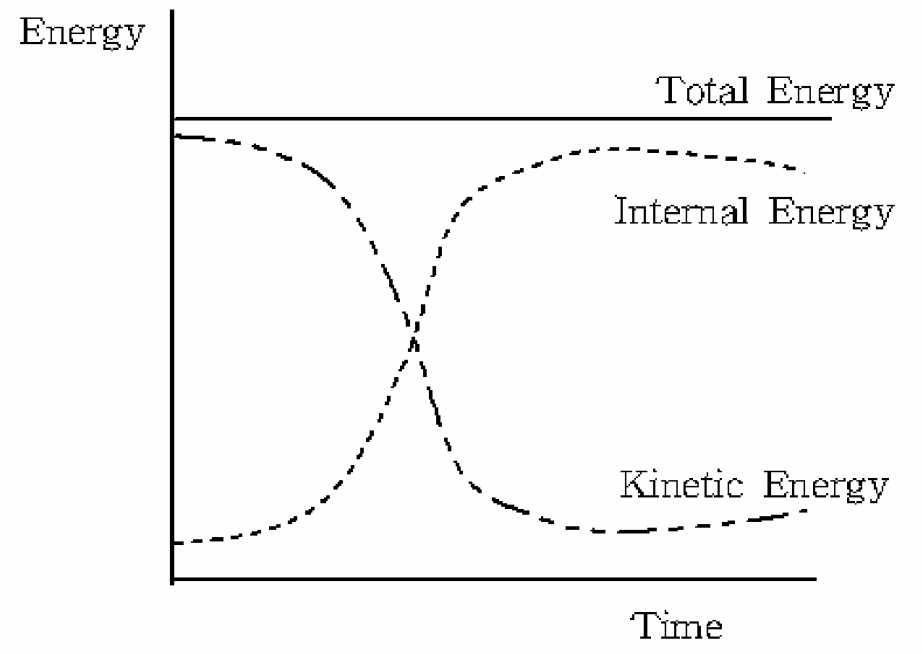


그림 3. 충돌에 의한 운동에너지와 내부에너지 관계 곡선

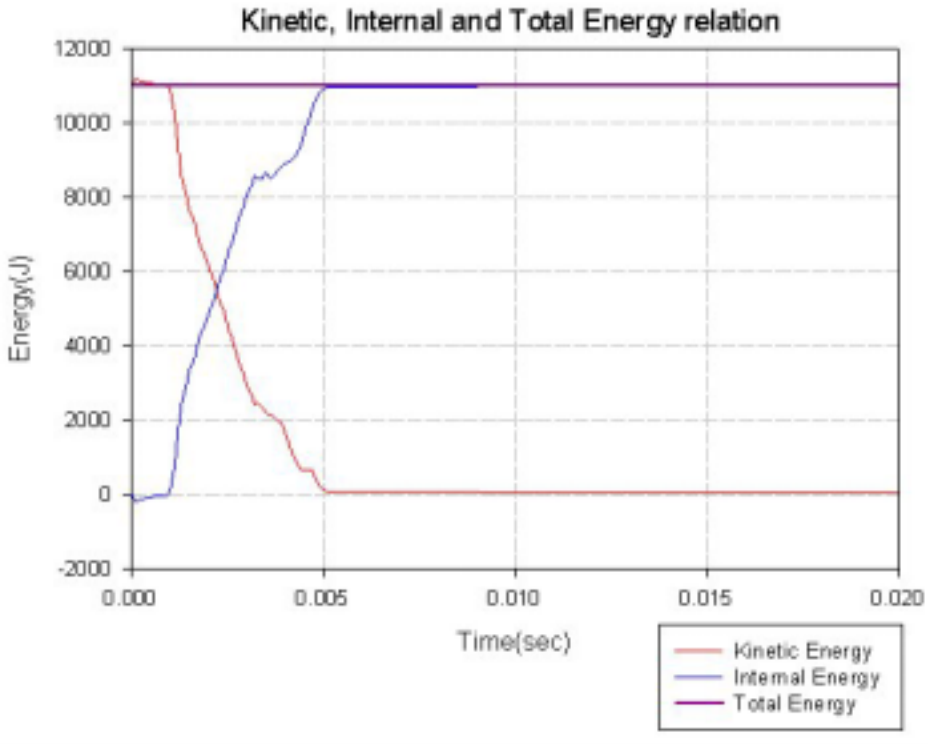


그림 4. 30° 기울어진 9m 자유 낙하 후, 운반용기의 에너지 교환그래프

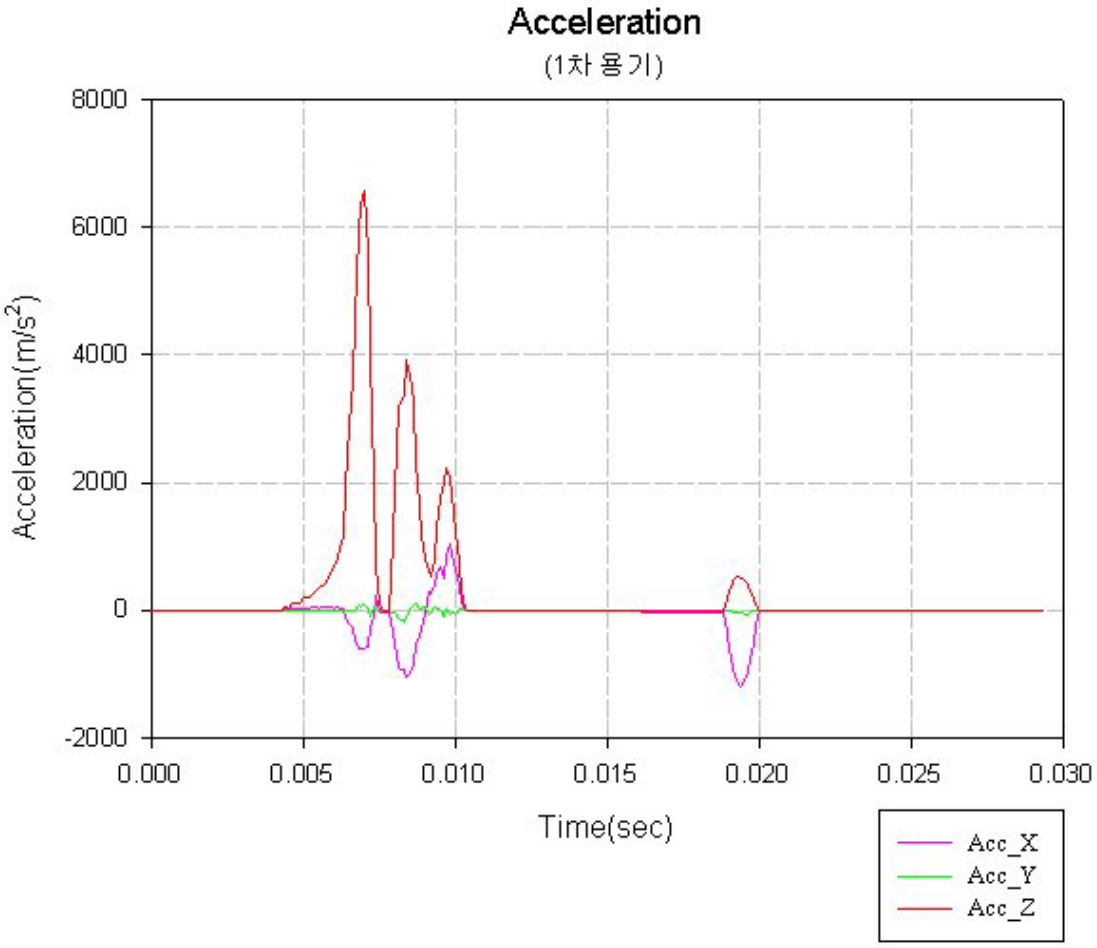
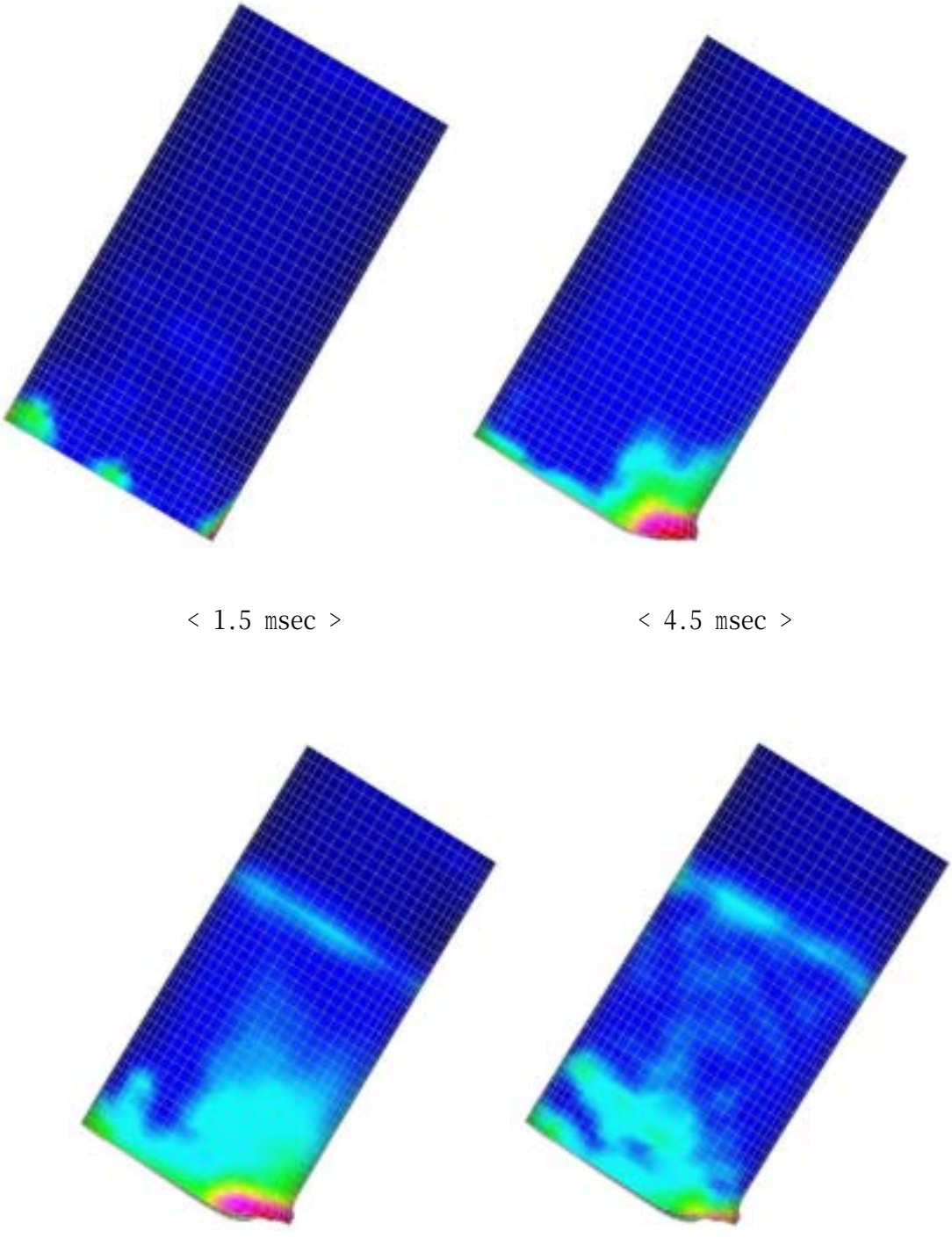


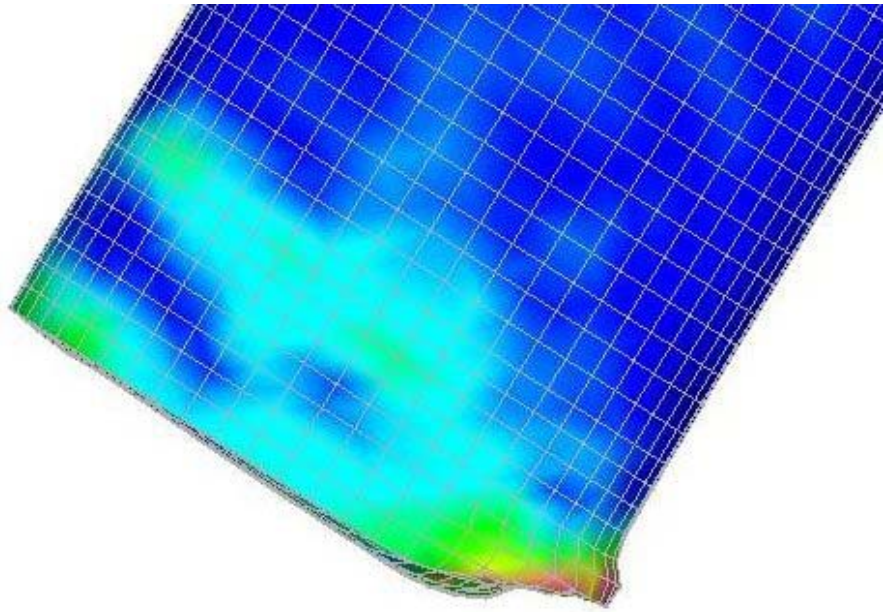
그림 5. 1 차 용기의 낙하 후, 가속도 그래프



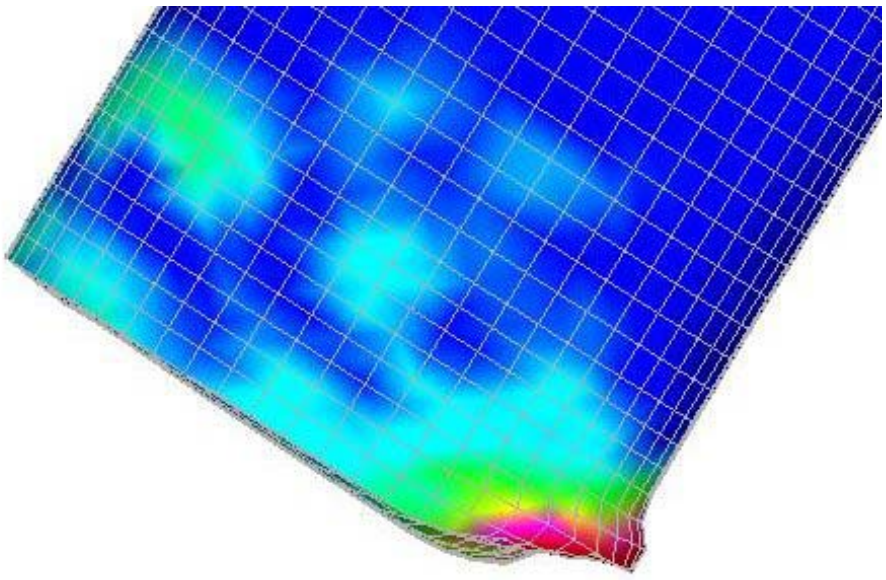
< 1.5 msec >　　< 4.5 msec >

< 7.5 msec >　　< 10.5 msec >

그림 6. 30 도 기울어진 9m 자유 낙하시 3 차 용기의 응력분포



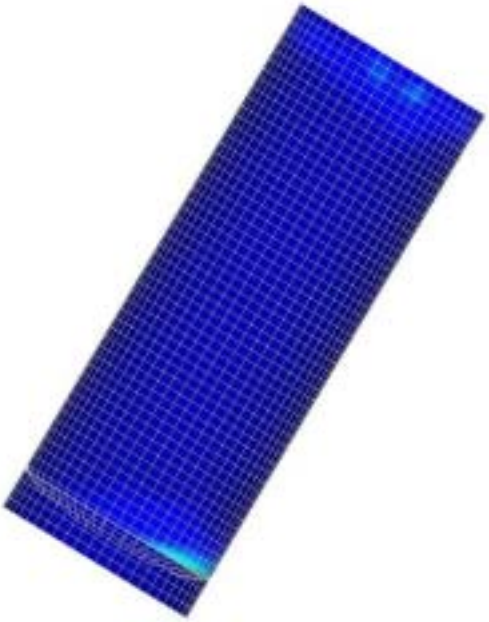
< 7.5 msec >



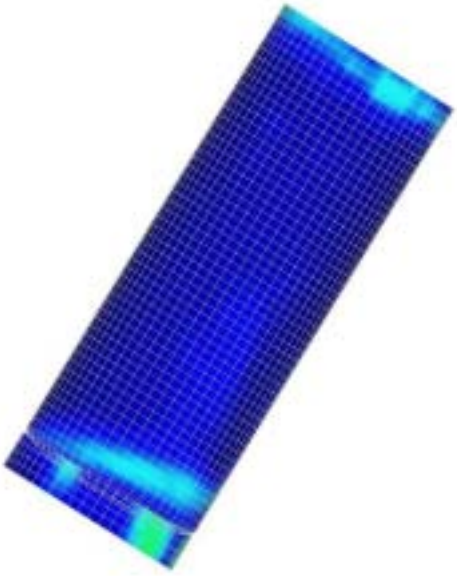
< 12 msec >

그림 7. 그림 6 의 3 차 용기의 변형부위의 확대된 모습

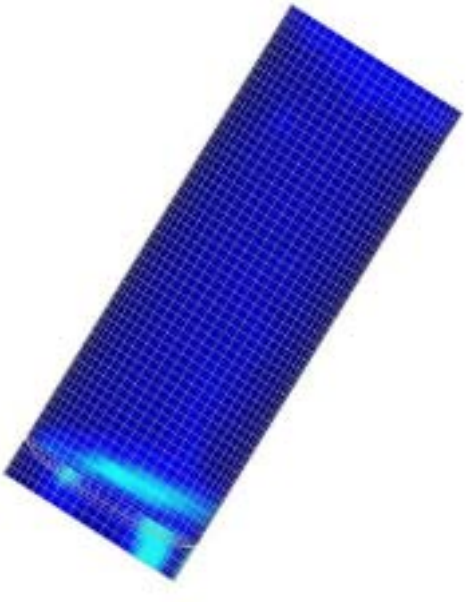
< 4.5 msec >



< 6.0 msec >

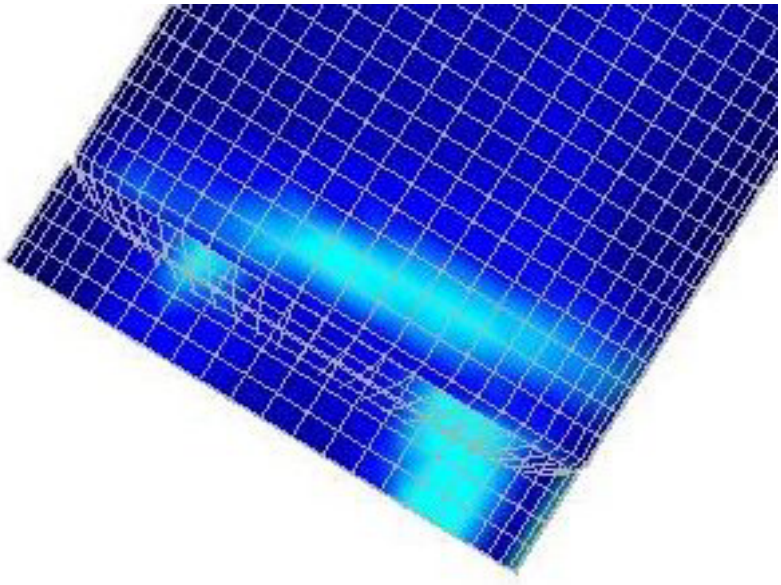


< 7.5 msec >

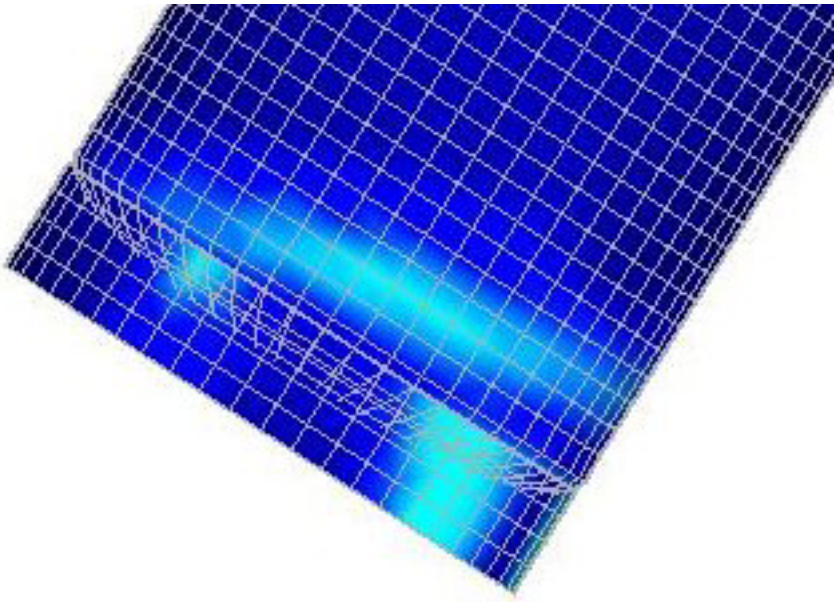


< 9.0 msec >

그림 8. 30 도 기울어진 9m 자유 낙하시 2 차 용기의 응력분포



< 7.5 msec >



< 10.5 msec >

그림 9. 그림 8 의 2 차 용기의 하부응력의 확대된 모습