

2003추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

콘크리트 저장용기의 자유낙하 충격 거동에 관한 연구 A Study on the Free Drop Impact Analysis for Concrete Storage Cask

강경훈, 서기석, 신동필, 박홍윤
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

우호길
충남대학교 기계공학과

정성환, 최병일
한국수력원자력(주) 환경기술연구원

요 약

콘크리트 저장용기의 길이방향 회전을 고려한 수평 자유낙하 충격 시 구조물에 발생하는 응력을 유한요소해석을 수행하여 구조물에 미치는 영향을 분석하였다. 해석에 사용한 초기조건은 저장용기 구조물 전체에 대해 충격 시 3000mm/s의 속도와 중력가속도 및 구조물 상호간에 접촉 마찰이 없는 것으로 고려하였다. 해석의 모델은 길이방향에 대해 0°, 15°, 30°, 45°의 회전을 고려한 네 가지 모델을 해석하였다. 각 구조물의 최대응력이 허용응력의 범위에 존재하여 구조적 안전성을 확보하는 것이 해석의 초점이다.

ABSTRACT

In the paper, a horizontal free drop impact analysis was performed for a concrete storage cask by considering rotation in the length direction. Four models were analyzed with angles of 0°, 15°, 30°, 45°. An initial velocity for the concrete storage cask 3 m/s was chosen for the impact analysis. Frictionless contact was used among the structures. The results of the impact analysis was fully satisfied with the structural acceptance criteria of the ASME.

1. 서론

원자력 발전을 시작한 이래 해마다 사용후연료의 방출량이 점진적으로 증가하여 현재, 국내 뿐만 아니라 미국을 비롯하여 유럽 및 일본 등 그 저장시설에 대한 요구가 증가하고 있다. 국내 사용후연료 발생 누적량도 발전소 내 저장조의 저장용량을 초과함에 따라 발전소 이외에 별도의 저장시설이 필요로 하게 되었다. 중수로 사용후연료는 건식저장 사일로를 건설하여 저장되고

있으나, 경수로 사용후연료의 경우 발전소 내의 저장시설이 2008년이면 한계용량에 도달할 것으로 예측되어 발전소 외의 저장시설의 건설이 시급하다. 경수로 사용후연료의 저장방식은 발전소 저장조와 같이 습식저장과 발전소 외 별도의 저장시설로서 건식 저장으로 구분될 수 있다. 건식 저장 방식에서는 사용후연료가 핵연료 장전소에서 캐니스터에 장전되고 캐니스터는 콘크리트 저장용기로 적재되며, 콘크리트 저장용기는 저장부지로 운반되어 저장되거나 또는, 캐니스터를 별도의 운반 Cask에 적재하여 저장부지로 운반한 후, 저장부지에 있는 콘크리트 저장용기에 저장하게 된다. 이러한 이동할 수 있는 구조물이라는 점에서 다른 저장 시스템에 비해 콘크리트 저장용기 자체가 가지고 있는 본래의 유연성 때문에 미국을 비롯하여 재처리를 수행하는 유럽 및 일본에서 저장방법으로 많이 채택되어지고 있다.

현재, 발전효율로 인해 고연소도 사용후연료가 발생되는데 이는 방사능 및 고 발열성을 가지고 있으므로 저장안전성에 대한 평가는 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 건식저장 시스템의 개념 설계단계에서 임의의 높이에 대해 콘크리트 저장용기의 수평낙하 시 길이방향 회전을 고려한 네 가지 모델에 대해 각 구조물의 안전성을 평가하고자 한다.

2. 본론

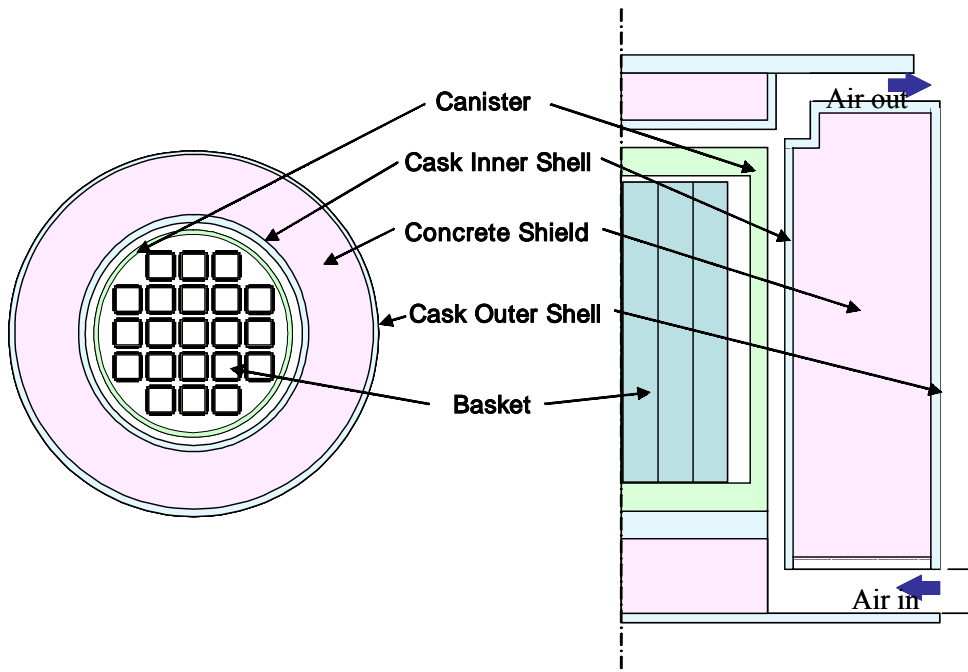


그림 1. 콘크리트 Cask(저장용기) 단면 개념도

콘크리트 저장용기는 그림 1에서 보는 바와 같은 단면을 가지고 있으며 각 구조물에 대한 구성 재료와 제원은 아래 표 1과 같고, 저장용기의 전체 길이는 5885mm이며 각 각 부분에 대한 무게는 캐니스터 33.4 Ton, 콘크리트 저장용기 134.9 Ton으로 총 168.3 Ton이다.

표 1. 콘크리트 저장용기 구성표

Components	Materials	Dimension
1. 캐니스터	SA240 type 304	O · D 1,680 mm, 25t
2. Basket	SA240 type 304	239 × 239 mm
3. Concrete 저장용기		
• Inner Shell	SA516 Gr70	O · D 1,910 mm, 50t
• Outer Shell	SA516 Gr70	O · D 3,550 mm, 20t
• Shield	Concrete	800t

2.1. 콘크리트 저장용기의 2차원 평면 변형율(Plane Strain) 해석에 대한 검증

콘크리트 저장용기의 2차원 평면변형율(Plane Strain) 유한요소 해석을 하기에 앞서 간단한 모델의 2차원 해석과 3차원 해석을 비교하였다. 검증의 모델은 단순 중공관(Hollowed Shaft)이며 3000mm/s의 충격속도를 가산하여 해석하였다. 이의 해석으로 그림 2와 같이 접촉면에서의 반력을 구하였다. 반력의 발생은 초기 시간부터 약 0.005초 사이에 종료되었으며 반력의 곡선 그래프는 2차원과 3차원 모두 유사한 경향을 보였다. 최대유효응력은 2차원의 경우 147.1 MPa, 3차원의 경우 148.6 MPa로서 1%의 오차를 나타낸다. 이는 복잡한 형상의 3차원 모델을 2차원 평면변형율(Plane Strain)로 단순화하여 해석하는 방법이 적용가능한 것으로 판단된다.

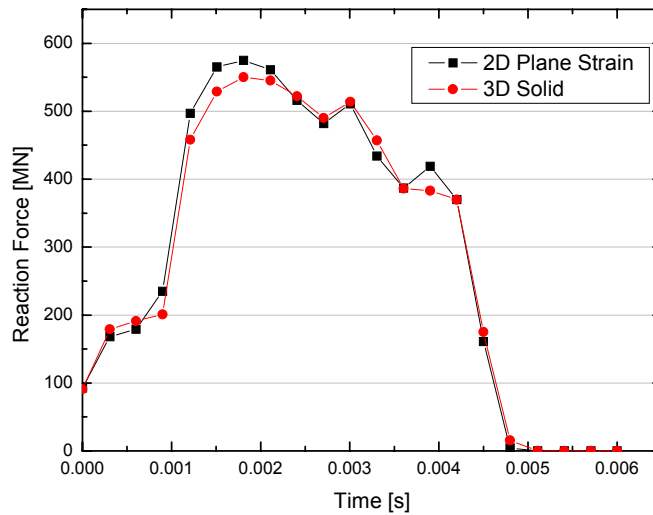


그림 2. Reaction Force at Rigid Surface

2.2. 유한요소 해석

콘크리트 저장용기의 자유낙하 충격에 대한 안전성 검증을 위한 유한요소해석을 위해 상용유한요소 프로그램인 ABAQUS/Explicit를 사용하였다. ABAQUS/Explicit는 외연 시간적분법(Explicit time integration)을 이용한 모듈로, 고체 및 구조물의 비선형 과도 응답의 동적해석을 수행할 수 있다.

(1) 모델링

해석을 위한 모델의 요소는 ABAQUS에서 2차원 Plane Strain 요소인 CPE4R을 사용하였으며, 구조물을 일체의 모델로 형상화하여 접촉은 바닥 접촉면과 저장용기, 저장용기와 캐니스터, 캐니스터와 바스켓의 세가지의 경우가 발생된다. 또한 모델의 단면에서 캐니스터와 바스켓의 경우 45° 축 대칭의 형상으로 0°~45°를 15°씩 축 대칭 회전하여 아래 그림 3과 같이 총 네 가지 모델을 해석하였다. 초기 접촉을 위해 바닥면과 Cask는 0.1mm의 간격으로 설정하였고 Cask와 Canister는 5mm의 간격, Canister와 Basket은 1mm의 간격으로 설정하였다.

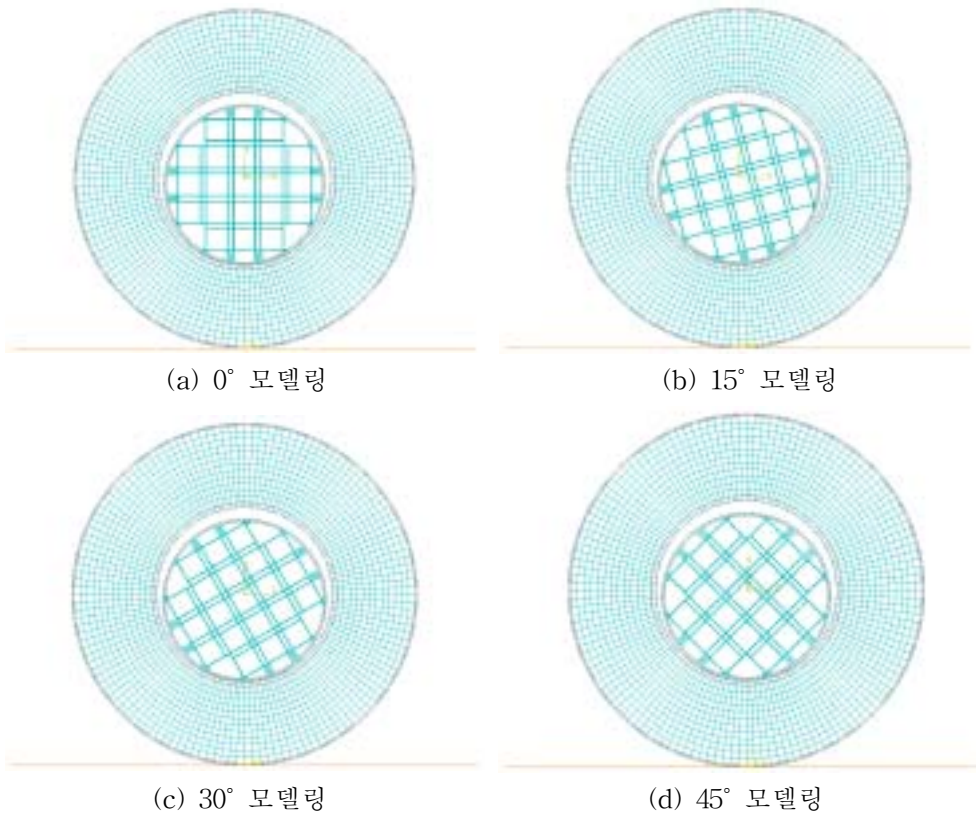


그림 3. 콘크리트 저장용기 모델링

(2) 해석조건

400mm 높이의 자유낙하 충격 해석을 위해 충돌 직전인 경우로 가정하여 에너지 보존 법칙에 의해 보수적으로 약 3000mm/s의 초기 속도와 중력가속도, 질량을 고려하여 동적 해석을 수행하였다. 이때 콘크리트 용기와 캐니스터, 바스켓 사이에는 단순접촉으로 마찰이 없는 것으로 가정하였다. 충격에 의한 해석 과정시간은 100ms로 설정하였고 일반적으로 Explicit 해석에서는 시

간 증분의 크기가 작을수록 해의 정확도는 높아지는 경향이 있으나 충격으로 발생하는 노이즈 (Noise)를 방지하고 비선형 충격거동임을 고려하여 전체해석 시간에 걸쳐 시간 증분을 자동적으로 수행하는 자동 시간 증분 방식을 사용하였다. 콘크리트 용기의 경우 구조물의 재질을 SA516 Gr70이며, 차폐체로 Concrete가 사용되었다. 캐니스터와 바스켓의 재질을 SA240 type 304이며 재료의 물성치는 아래 표 2와 같다. 허용응력은 ASME의 규정을 적용하였다. 따라서 SA516 Gr70의 낙하 사고 시 허용응력 규정은 ASME NF로 재료의 항복응력의 1.2배 혹은 응력강도의 1.5배 중에서 큰 값을 평가하여 314.4 MPa로, SA240 type304의 경우는 ASME NG를 적용하여 항복 응력에 대한 평가 기준을 2.4배의 응력강도(S_m) 값인 289.6 MPa를 적용하였다. 콘크리트의 경우는 구조재가 아니므로 재료의 허용응력인 25.9 MPa를 따랐다.

표 2. 재료 물성치

	SA516 Gr70	Concrete	SA240 type304
Young's Modulus [GPa]	202.29	3000	195.12
Yield Strength [MPa]	262	25.9	206.8
Ultimate Strength [MPa]	482.63	27.5	517.1
Density [Ton/mm ³]	7.97E-9	2.4E-9	7.97E-9
Poisson's Ratio	0.3	0.2	0.3

(3) 해석 결과

그림 4는 von Mises 응력의 분포도이며 바스켓 구조물에서 상대적으로 높은 응력이 발생하였다. 이는 네 가지 모델 모두에서 공통적으로 발생하는 것으로, 특히 그림 5에서 보듯이 모서리 부분에서 최대응력이 발생하였다. 캐니스터의 경우에서도 바스켓과 마찬가지로 바스켓 지지부의 모서리 부분에서 최대응력이 발생하였으며 저장용기 외부인 Cask의 구조재(SA516 Gr70) 경우에는 외부 쉘에서 최대응력이 발생하였다. 충돌하는 바닥면에서 충격력에 대한 해석결과를 보면 그림 6과 같다. 네 가지 모델 모두 충격해석 시간동안 세 번의 충격이 발생하였으며, 이는 세 구조물이 차례대로 충격이 가해졌음을 예측할 수 있다. 따라서 상대적으로 질량이 큰 저장용기 Cask부분의 충격인 1차 충격에서 높은 충격력을 보이고 2차, 3차에서는 1차 충격에 비해 낮은 수치를 보인다. 그림 7에서 그림 10까지는 콘크리트 저장용기 각 구조물에 대한 최대 응력을 충돌 시간에 대해 나타낸 것이다. Cask의 콘크리트 부분의 최대응력 곡선인 그림 7을 보면 각 모델에 대해 최대응력 곡선의 초기 형상은 유사하다. 특히 초기 충격 시의 값은 네 모델 모두 유사하며 1차 충격 후 시간에 대한 응력 값도 유사하다. 또한 그림 6의 충격력 그래프의 1,2,3차 충격시간과 비교해 보면 그림 7에서 응력 값의 피크값도 유사함을 보이고 있다. 그림 8은 Cask의 구조재(SA516 Gr70) 부분의 응력곡선으로 앞에서 서술한 바와 같이 최대응력이 발생하는 요소(element)가 2차, 3차 충격과의 영향이 적은 곳으로 1차 충격에 의한 응력의 발생에만 영향을 받으므로 네 모델 모두 응력곡선이 매우 유사하다. 캐니스터와 바스켓의 경우는 각 모델에 대해 최대응력이 발생한 부분과 시간에 대한 그 수치가 유사성이 없다. 0° 모델의 그래프를 살펴보면 캐니스터와 바스켓 모두에서 충격에 대한 최대응력 수치가 다른 모델에 비해 높지 않고 충격 후의 응력곡선이 안정적으로 진행된다. 그러나 15°, 30°, 45° 모델의 그래프는 초기 충격에 의한 최대응력 값도 크며 충격 이후의 응력도 불안정 하다. 바스켓의 경우는 다른 구조물과 비교하여 높은 최대 응력 값을 보이고 있고 특히, 30° 모델의 경우는 최대응력 값이 220MPa를 초과하였다. 또한 다른 구조물의 그래프와 달리 최대응력이 발생하고 그 응력 값이 시간에 대해 유지됨을 보이고 있다. 그러나 모

든 구조물에서 최대응력은 허용응력의 범위에 존재하므로 구조적으로 안전함을 알 수 있다. 표 3 은 각 구조물과 모델에 대한 최대 응력이다.

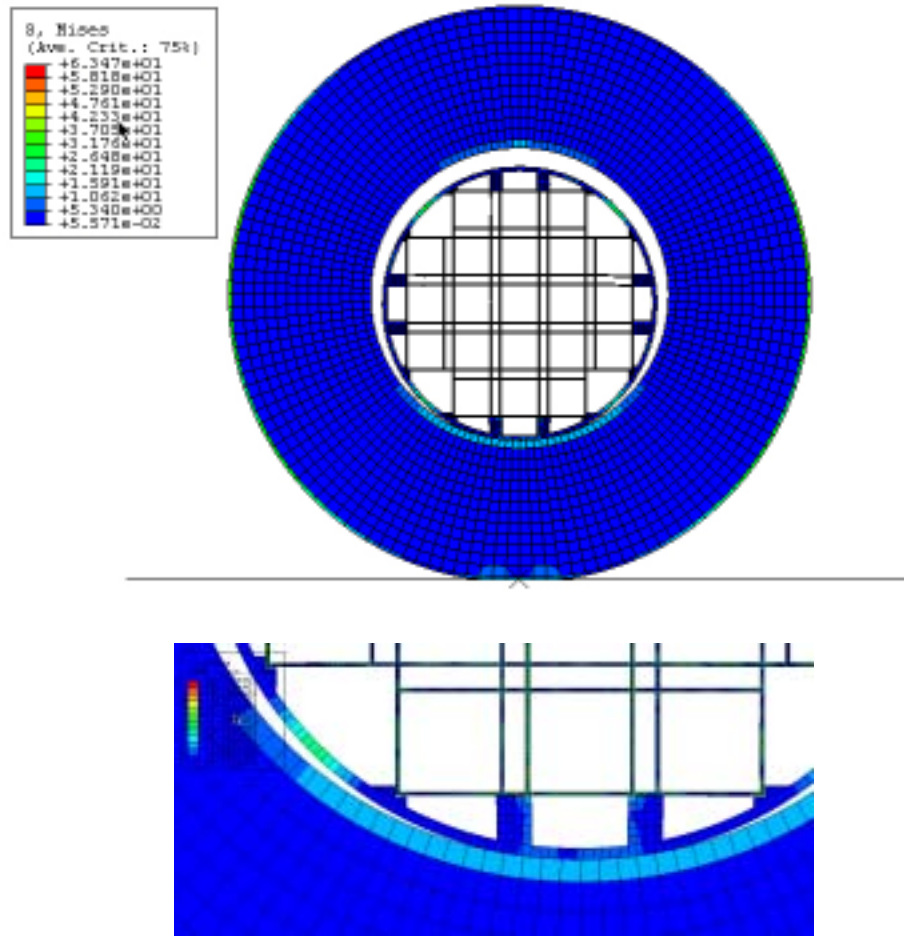


그림 4. A Contour of von Mises stress



그림 5. 30°회전모델의 바스켓 구조물 von Mises 응력분포

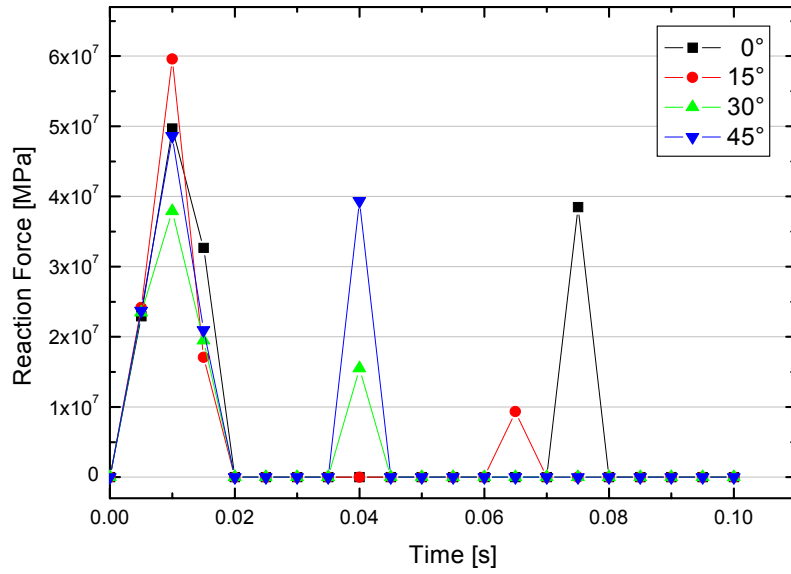


그림 6. Reaction Force

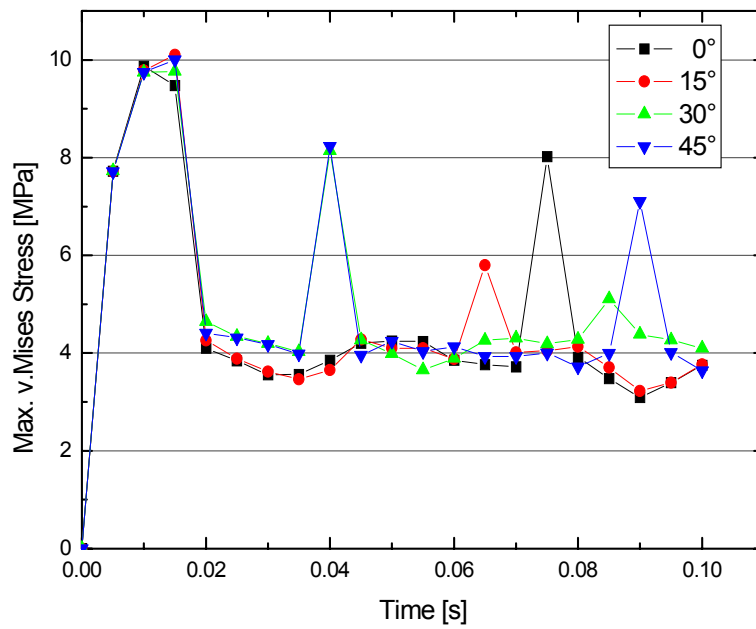


그림 7. Max. von Mises Stress at Cask (Concrete)

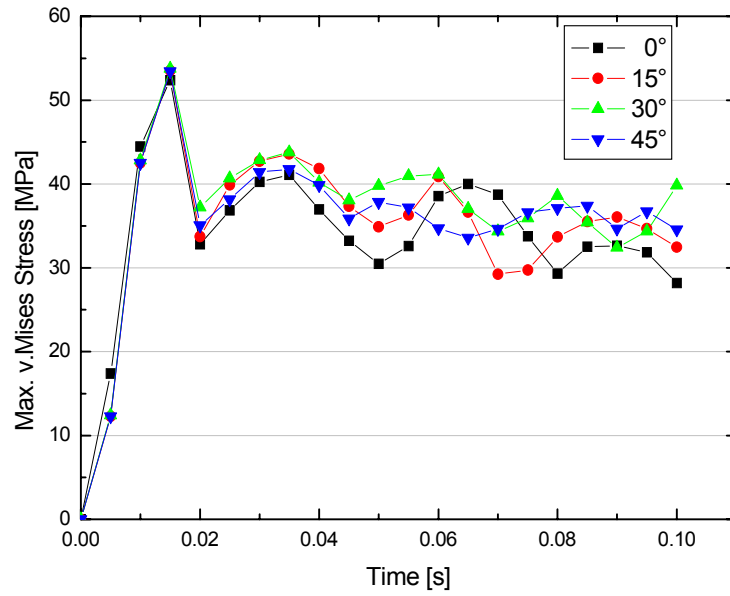


그림 8. Max. von Mises Stress at Cask (SA516 Gr70)

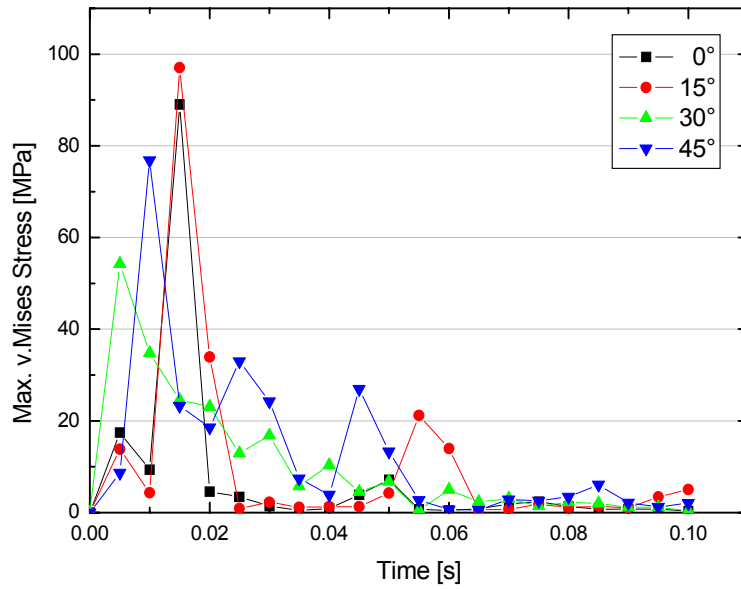


그림 9. Max. von Mises Stress at Canister

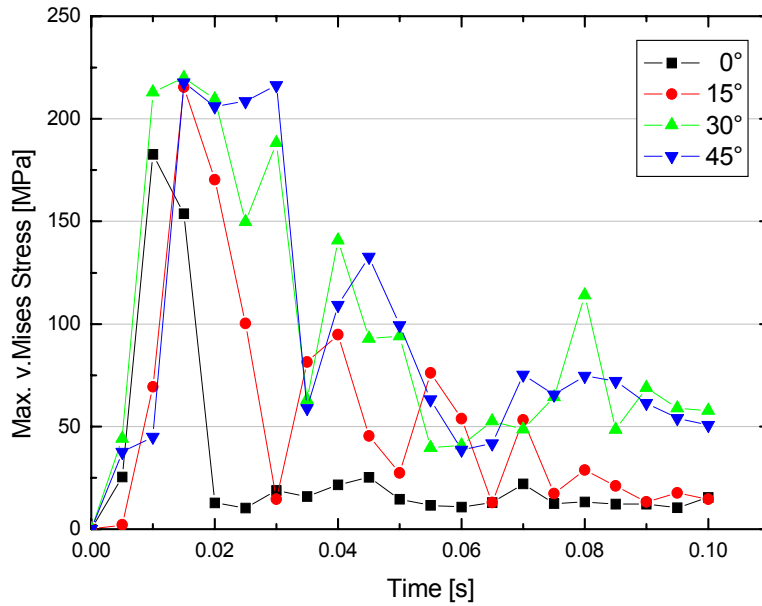


그림 10. Max. von Mises Stress at Basket

표 3. 각 모델 및 구조물의 최대 응력

[단위 : MPa]

모델 각도 구조물	0°	15°	30°	45°
Cask (Concrete)	9.87	10.10	9.76	10.00
Cask (SA516)	52.39	53.50	53.77	53.43
Canister	89.06	97.07	54.25	76.81
Basket	182.75	215.43	220.08	217.61

3. 결론

콘크리트 저장용기의 낙하 사고 시 안전성을 평가를 ABAQUS/Explicit를 사용하여 수행하였다. 임의의 낙하 높이 400mm에 대해 초기 속도 약 3000mm/s로 설정하여 해석한 결과 저장용기가 모든 각도에서의 최대 응력이 허용응력 범위에 존재한다. 축 방향 회전 각도에 대한 해석에서 0°의 낙하 시 보다 15°, 30°, 45°의 경우 더 취약하였고, 구조물 중에는 바스켓이 가장 취약한 것으로 해석되었다. 특히 30°에서 바스켓의 최대응력은 허용응력의 한계치에 대해 약 76%까지 도달하였다. 향후 구조설계에 있어서 여러 가지 각도에 대한 낙하 충격 해석이 고려되어야 하며, Basket 부분에 대한 설계 또한 조명되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. 서기석 외, 건식저장 시스템 구조/열해석 및 안전성시험 평가, 한국원자력연구소/원자력환경기술원, KAERI/CR-161/2003, 2003.1.
2. 박홍윤, 방사성물질 운반용기 완충체의 자유낙하 충격 거동에 관한 연구, 2002
3. ABAQUS User's Manual for Revision 6.3(1999), Hibbit, Karlson & Sorenson Inc.
4. HI-STORM-100 System T-SAR, Volume 2/6 Structural Analysis, Holtec Inc., 1997.