

A Finite Element Modeling for the Puncture Drop Test of a Cask with the Failure of Impact Limiter

충격완충체의 효과를 고려할 수 있는 운반용기의 파열낙하시험 유한요소해석 방법

Kie-Chan Kwon¹⁾, Ki-Seog Seo and Gil-Sung You

Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

권기찬¹⁾, 서기석, 유길성

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

(Received December 15, 2008 / Revised January 02, 2009 / Approved January 05, 2009)

Abstract

Transport package for radioactive material should be structurally safe under puncture drop condition and its safety should be verified by test and numerical analysis. Most finite element analyses for puncture drop have been performed without modeling the impact limiter since failure is occurred in the materials of the impact limiter. This paper presents a new modeling methodology, where an element is eroded in case that the material's failure criteria are reached at the element's integration point, to investigate the effect of the impact limiter in the puncture process. The effectiveness of the proposed scheme is shown through the puncture drop analysis of hotcell transport cask, which is under design in KAERI. The results show that about 80 percent of the total impact energy is absorbed due to the deformation of impact limiter. Using the present method the puncture drop can be analyzed more accurately, but it would give conservative results compared to the actual test condition.

Key words : Puncture drop, Transport cask, Hypothetical accident condition, Impact limiter, Radioactive material.

요약

방사성물질 운반용기는 가상 사고조건에서 구조적 건전성이 유지됨을 실험 및 수치해석을 통해 입증하여야 한다. 가상 사고조건에 포함되는 파열낙하 조건에 대한 기존 유한요소해석의 경우 충격완충체에서 재료의 파손이 발생하기 때문에 일반적으로 유한요소모델에서 이 부분을 무시하고 해석한다. 본 논문에서는 파열낙하 해석에서 충격완충체의 변형으로 인한 낙하에너지 흡수의 효과를 고려하기 위해 요소의 적분점에서 응력이나 변형율이 재료의 파손 기준치에 도달하면 그 요소를 제거하는 방법을 제안한다. 본 해석방법의 효용성을 보이기 위해 한국원자력연구원에서 설계중인 핫셀 운반용기에 대해 파열낙하 해석을 수행하였으며, 요소제거 기법의 적용을 통해 낙하 에너지의 80% 정도가 충격완충체에서 흡수되는 것으로 계산되었다. 본 해석방법은 시험조건에 비해 보수성을 가지는 평가방법이며, 기존의 해석방법과 비교해 파열낙하 조건을

1) Corresponding Author. E-mail : kc_kwon@hanmail.net

보다 근사적으로 해석할 수 있는 방법이다.

중심단어 : 파열낙하, 운반용기, 가상 사고조건, 충격완충체, 방사성물질

I. 서론

방사성 물질을 수송하기 위한 운반용기는 미국 10 CFR Part 71[1]과 IAEA Safety Standards Series No. TS-R-1[2]에 제시되어 있는 정상사고조건 및 가상사고조건에 대해 안전성을 확보하여야 한다. 가상사고조건에는 파열낙하(puncture drop) 조건이 포함되는데, 이는 운반용기의 가장 취약한 부위를 1 m 높이에서 연강 재료의 봉(bar)에 낙하시키는 조건이다. 여기서 봉은 지름이 15 cm이어야 하며, 길이는 20 cm 이상이어야 한다. 이와 같은 파열낙하 조건을 시험하는 경우 충격완충체와 같은 운반용기 외곽 부위에서 재료의 파손(failure)이 발생할 수 있다. 그러나 가상사고조건에서는 차폐 성능을 고려한 내부용기의 구조적 건전성 상실 여부가 중요한 요소이므로, 용기의 충격완충체(impact limiter)에서 파손될 정도의 대변형이 발생하면서 충돌에너지를 가능한 많이 흡수하는 것은 구조적 측면에서 바람직하다.

용기의 설계단계에서 파열낙하시험에 대한 건전성을 검토하기 위해 초기에는 실험식 또는 실험자료들을 많이 사용하였으며[3-7], 이후 단순화한 가정들에 기초한 해석해에 대한 연구가 이루어졌다[8-11]. 그러나 이와 같은 실험식이나 근사적 해석해의 경우 적용범위 및 조건, 도입된 가정들로 인해 효용성에 제한을 가진다. 이런 이유로 용기의 파열낙하 조건을 해석하기 위해 일반적으로 유한요소법이 사용되고 있다[12-16]. 그러나 파열낙하 조건에서 충격완충체의 기능을 고려한 해석은 용이하지 않다. 완충체는 재료의 기계적 특성상 파열낙하 조건에서 국부적으로 대변형이 발생하면서 재료의 파손이 일어날 수 있다. 재료의 파손을 무시하고 해석을 수행할 수 있으나, 이를 통해 용기본체의 구조적 건전성을 검증하기에는 신뢰성이 떨어지게 된다. 그리고 경우에 따라서는 유한요소해석에서 요소의 심한 일그러짐(distortion) 현상이 일어나 해석상의 문제를 야기시킨다. 이를 해결하기 위해서는 해석 중간에 요소 재구성(remeshing)을 수행할 수 있으나 해석자에게는 매우 번거롭고 어려운 작업이다. 따라서 파열낙하의 유한요소해석에서는 일반적으로 완충체 전체를 무시하거나[13], 봉이 완충체와 접촉(contact)할 부분만을 모델링에서 제외시키고[14] 봉이 직접 용기 본체와 충돌하는 것으로 모델링하여 해석한다. 이는 파열낙하에서 완충체가 흡수하는 에너지를 무시하고 해석하는 것으로

이로 인해 기초한 용기의 설계는 시험조건에 비해 지나치게 보수적으로 될 가능성이 있다.

본 논문에서는 운반용기의 파열낙하시험을 유한요소해석할 때 완충체 재료의 충격흡수 효과 및 파손을 고려할 수 있는 유한요소해석 모델링 방법을 제안하고자 한다. 재료의 파손을 고려하기 위해 동적 유한요소해석의 경우 파손이 발생한 요소를 제거하면서 해석을 수행하는 방법으로 근사적 해석이 가능할 수 있다. 충돌해석에 많이 사용되는 구조해석코드인 LS-DYNA는 요소의 적분점에서 응력이나 변형율이 특정값 이상이 되면 그 요소를 제거할 수 있도록 하는 기능이 구현되어 있다[17]. 이와 같은 요소제거 기능을 운반용기 파열낙하시험의 해석에 적용하면 보다 정확한 모사가 가능해지며, 대변형으로 인한 요소의 심한 일그러짐으로 발생할 해석상의 문제들을 피할 수 있다.

II. 유한요소해석 방법

본 논문에서는 운반용기의 파열낙하에 대한 해석예제로 현재 한국원자력연구원에서 설계중인 핫셀(hotcell) 운반용기를 사용하였다. 이 용기는 사용후핵연료 20 kg을 운반할 수 있는 용기로 설계 개념도는 Fig. 1과 같다. 용기는 내부 바스켓, 차폐체, 차폐용기, 충격완충체 등으로 구성된다. 차폐용기의 높이와 직경은 각각 1.14 m와 0.84 m이며, 충격완충체의 직경은 1.24 m이고, 충격완충체를 포함한 전체 용기의 높이는 1.54 m이다. 그리고 운반용기의 총 무게는 4.3 ton이다. 내부 바스켓과 용기본체의 재질은 스테인레스강인 SA240 type 304이며, 차폐체는 감마선 차폐를 위한 납 차폐체와 중성자 차폐체로 나누어지는데 중성자 차폐물질은 폴리우레탄으로 가정하였다. 특히 충돌에너지의 많은 양을 흡수하면서 파열이 발생하는 완충체 부분은 발사목재(balsa wood)로 되어 있으며, 이를 두께 3 mm인 스테인레스강 판재가 둘러싸고 있다. 그리고 충격완충체와 차폐용기는 나사로 조립되어 있다.

핫셀 운반용기의 파열낙하시험을 해석하기 위한 유한요소 모델은 Fig. 2와 같다. 여기서는 대칭성을 고려하여 전체 용기의 1/2만을 모델링하였다. 충격완충체의 스테인레스강 판재는 쉘요소로 모델링하고, 다른 부분은 모두 3차원 연속체요소로 모델링하였다. 내부 바스켓, 감마선 차폐체, 중성자 차폐체, 용기본체 사이의 서로 접하는 부분은 접촉조건을 적용하

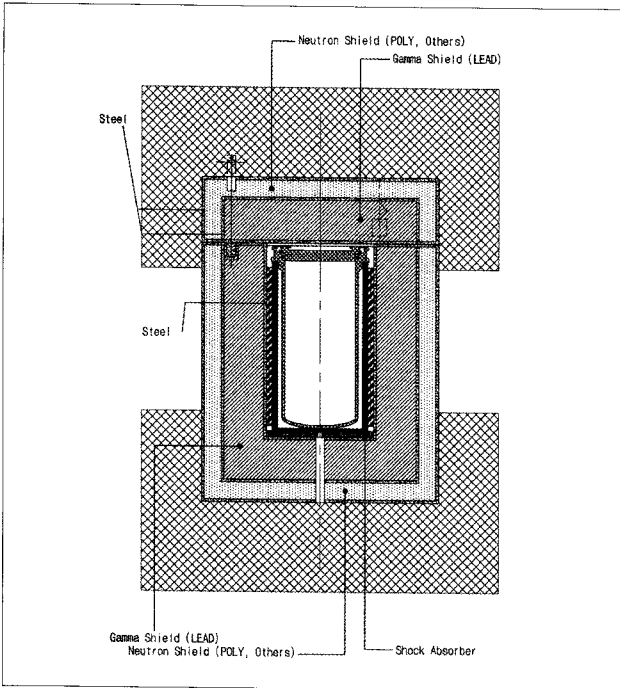


Fig. 1. Conceptual design of hotcell cask.

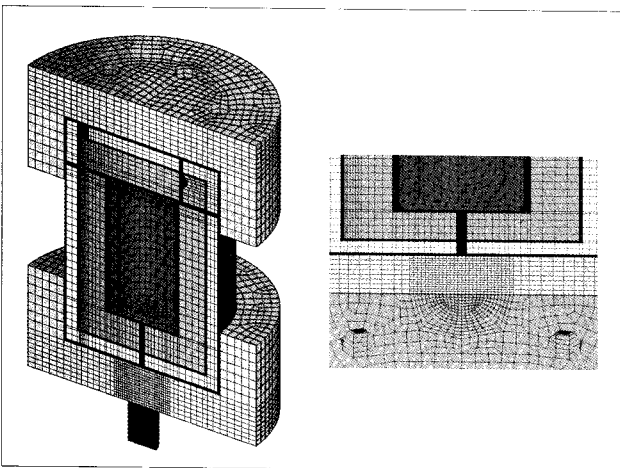


Fig. 2. Finite element model for bottom down puncture drop analysis.

였다. 또한 충격완충체와 차폐용기 사이의 충격완충체에서 방사목재와 외부판재 사이에도 접촉조건을 적용하였다. 충격완충체와 차폐용기를 결합하는 나사는 차폐용기에만 구속되고 나머지 부분에서는 접촉이 가능하도록 모델링하였다. 봉은 직경 15 cm, 길이 20 cm로 모델링하였으며 강체로 가정하였다. 운반용기와 봉은 초기에 서로 접하고 있으며, 1 m 높이에서의 자유낙하 속도인 4.43 m/s를 운반용기의 모든 절점에 초기속도로 주었다.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 유한요소모델에서 충격완충체와

봉이 충돌하는 영역은 다른 부분보다 세밀하게 모델링하였다. 이는 충격완충체와 봉이 접촉하는 영역에서 국부적으로 큰 변형 및 응력이 발생하기 때문이며, 특히 재료의 파손에 따라 요소를 제거시키는 기법을 적용할 때 요소가 조밀하지 않으면 너무 큰 영역이 제거되기 때문이다. 방사목재 부분은 수직방향으로도 세밀하게 요소를 나누고 주변의 요소들과는 결합(tie) 구속조건을 적용하였다. 그리고 요소제거 기법을 적용하기 위해 충격완충체와 봉 사이에는 접촉조건으로 LS-DYNA에서 제공하는 "CONTACT_ERODING" 입력 명령어를 사용하였는데, 이 명령어는 접촉 문제에서 요소제거 기능을 구현해준다.

재료의 거동에 대해서는 모든 재질에 대해 선형탄성 이론과 J2-유동법칙(flow rule)에 기초한 탄소성 구성방정식을 사용하였으며, 스테인레스강과 납에 대해서는 선형 등방성 경화(linear isotropic hardening)를 가정하였다. 스테인레스강의 재료 물성치는 밀도 7,913 kg/m³, 탄성계수 186.7 GPa, 포와송의 비 0.32, 항복응력 285 MPa, 소성경화계수(strain hardening modulus) 1.894 GPa이다[13]. 납의 경우는 밀도 11,070 kg/m³, 탄성계수 99 GPa, 포와송의 비 0.4, 항복응력 6 MPa, 소성경화계수 183 MPa이다[13]. 완충체의 재료인 방사목재에 대해서는 한국원자력연구원에서 수행한 동특성 재질시험 결과를 이용하였다. 시험 결과 방사목재의 밀도는 106 MPa, 탄성계수 87.4 MPa, 포와송의 비 0.1, 항복응력 5 MPa 이었으며, 압축응력과 소성변형율과의 관계는 Fig. 3과 같다. 따라서 방사목재의 소성경화 거동에 대해서는 Fig. 3의 값을 이용하여 조각적(piecewise) 선형 등방성 경화 모델을 적용하였다.

해석중 요소제거를 위해서는 재료의 파손을 판단할 수 있는 기준이 필요하다. LS-DYNA에서는 몇 가지 기준을 선택사항으로 제공하고 있는데, 본 연구에서는 등가 소성변형율을 기준으로 하였다. 스테인레스강의 경우 등가 소성변형율이 0.2에 도달하면 파손이 발생하여 요소가 제거되도록 하였다. 이때 재료 물성치를 이용해 계산한 von-Mises 응력은 640 MPa이며, 이는 응력 관점에서의 파손기준에 해당한다. 방사목재의 경우 Fig. 3을 보면 소성변형율이 0.75 부근에 도달하면 압축응력이 급격히 증가함을 관찰할 수 있다. 이 상태가 되면 완충체는 상대적으로 강체거동을 하게되어 힘만 전달할 뿐 추가적인 변형으로 인한 충격에너지의 흡수는 크게 줄어든다. 또한 파손 발생기준을 크게 할 경우 요소가 제거되기 전에 요소가 심하게 일그러져 해석상의 문제를 야기할 수 있다. 본 연구에서는 방사목재의 파손 발생기준을 등가 소성변형율이 0.6에 도달할 때로 가정하였다.

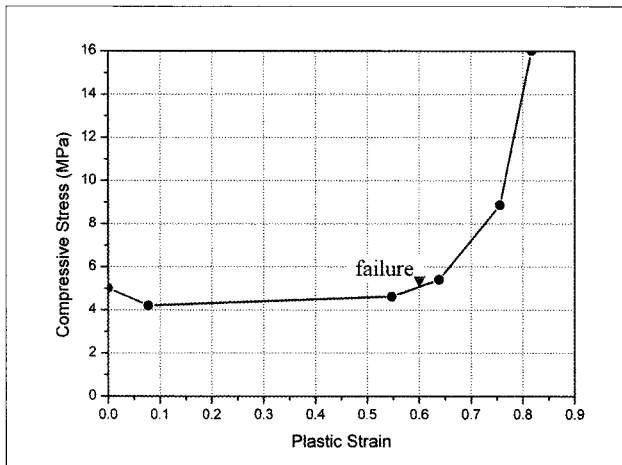


Fig. 3. Compressive stress vs. plastic strain for balsa wood.

III. 해석결과 및 논의

본 장에서는 앞장에서 기술한 충격원충체의 특성을 고려할 수 있는 유한요소해석 모델링 방법을 이용해 핫셀 운반용기의 파열낙하시험 조건에 대한 해석을 수행하고, 그 결과를 고찰한다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 용기본체의 상부와 하부의 구조가 다르다. 따라서 하부 낙하의 경우와 상부 낙하의 경우를 각각 해석하였다.

가. 용기하부 파열낙하 해석

핫셀 운반용기의 하부 파열낙하 해석에는 Fig. 2의 유한요소모델을 사용하였다. 해석중 특정 요소에서 등가 소성변형율이 그 재료의 가정된 기준값에 도달하면 재료에서 파손이 일어나는 것으로 판단하고 그 요소가 제거될 수 있도록 하였다. Fig. 4는 파열낙하 해석에 따른 용기의 변형형상과 등가 소성변형율의 분포를 순차적으로 보여준다. 용기와 봉이 초기에 충돌한 후 접촉하면서 변형하는 총 시간은 8.88 ms이며, 이후 반동으로 인해 용기와 봉은 분리되어 반대방향으로 운동한다. 충돌 초기에는 충격원충체의 스테인레스강 금속판재와 완충재인 발사목재가 접촉하면서 변형하며, 봉의 가장자리와 접촉하는 부분에서 큰 변형율이 발생하는 것을 볼 수 있다. 초기충돌 후 1.47 ms가 되면 금속판재에서 소성변형율이 0.2에 도달하는 부분이 국부적으로 발생하고, 이 부분의 셀요소들이 제거된다. Fig. 4(b)를 보면 봉의 가장자리와 접촉하는 금속판재의 셀요소들이 제거된 것을 관찰할 수 있다. 이때부터 금속판재의 변형에 의한 추가적인 충돌에너지의 흡수는 거의 없다고 할 수 있다. 이후 완충재는 봉과 접촉하면서 변형을 하게 되고, 완충재가 파손될 때까지 완충재가 대부분의 에

너지를 흡수하게 된다. 완충재의 변형이 증가하여 소성변형율이 0.6에 도달하게 되면 그 부분의 요소들이 제거되는데,

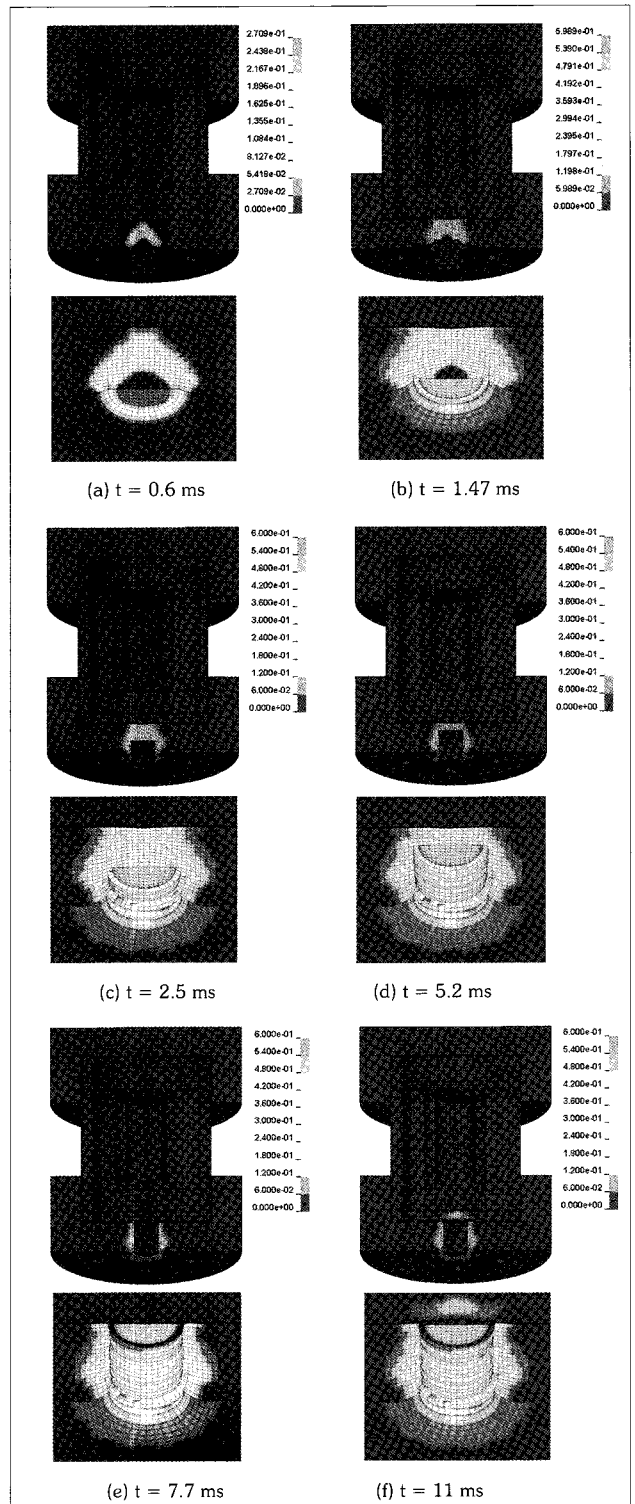


Fig. 4. Deformed shape and equivalent plastic strain during bottom down puncture drop.

Fig. 4(c)에서 Fig. 4(e)는 이 과정을 보여주고 있다. 여기서 완충재의 아래부분 요소층부터 요소들이 붕의 형상을 따라 사라지고 있음을 볼 수 있다. Fig. 4(e)는 붕과 접촉할 수 있는 완충재의 영역이 모두 제거되고, 붕이 용기본체와 접촉하는 순간을 보여준다. 이때부터는 지금까지 소진되지 못한 충돌 에너지를 용기본체와 내부 구조물의 변형으로 흡수하게 된다. 운반용기에서 충돌에너지를 모두 내부 변형에너지로 흡수한 후 탄성복원(elastic recovery)에 의해 일부는 다시 운반용기의 운동에너지로 변환된다. Fig. 4(f)는 충돌이 끝나고 용기가 어느 정도 상승하였을 때의 모습을 보여준다.

Fig. 5와 Fig. 6은 용기본체에서 발생하는 등가 소성변형률

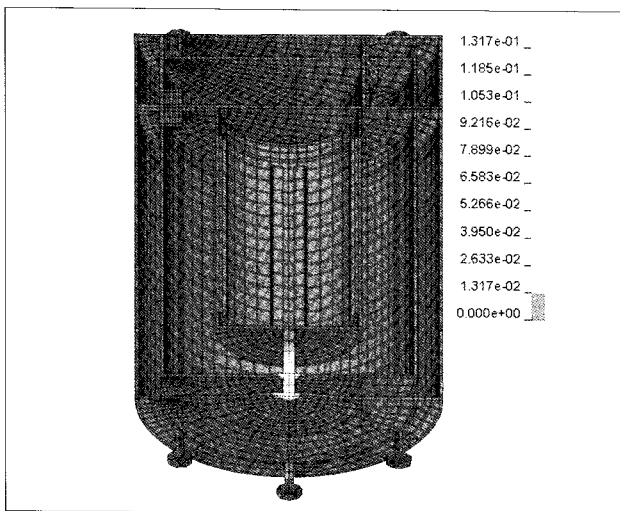


Fig. 5. Equivalent plastic strain of cask structure for bottom down puncture drop.

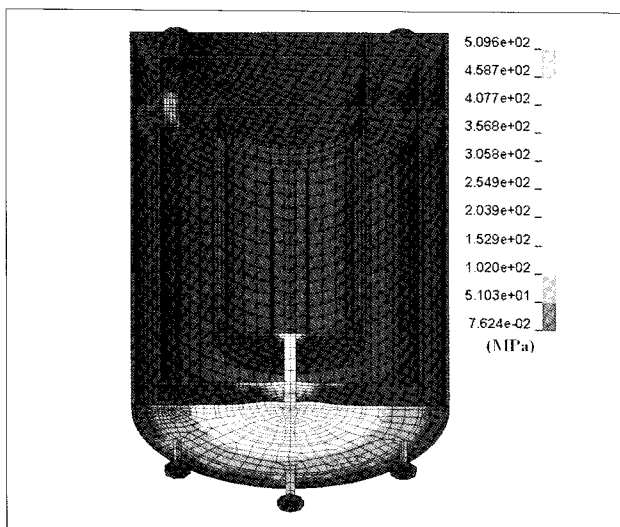


Fig. 6. von-Mises stress of cask structure for bottom down puncture drop.

과 von-Mises 응력이 최대가 되는 순간에서의 각각 그 분포를 보여준다. 붕과 만나는 아래 중심부분에서 많은 변형과 응력이 발생하였으며, 최대 소성변형률은 0.13, 최대 응력은 510 MPa로 나타났다. 용기본체의 재질인 스테인레스강의 기계적 물성치를 고려할 때, 용기본체는 파열낙하 조건에서 구조적 건전성을 유지할 수 있다고 판단된다.

Fig. 7은 운동에너지, 내부에너지, 총 에너지의 시간에 따른 변화를 보여준다. 여기서 총 에너지는 운동에너지와 내부에너지의 합을 의미한다. 운동에너지는 초기 21.1 kJ에서 출발하여 감소하다가 8.88 ms에서 영이 된다. 반대로 내부에너지는 점차 증가하여 최대 18.6 kJ에 도달한다. 이후 탄성복원에 의해 내부에너지는 일정부분 감소하고 운동에너지는 다시 그만큼 증가함을 볼 수 있다. 이론적으로 총 에너지는 일정해야 하는데, Fig. 7을 보면 총 에너지가 점차 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 요소 제거 및 접촉조건 처리, 모래시계 모드(hourglass mode)의 발생 등에서 기인한 수치적 문제로 생각된다. 운동에너지 또는 내부에너지의 변화를 보면 1.5 ms 근처에서 요동(oscillation)을 보인 후 변화하는 속도가 완화되는데, 여기는 금속판재의 쉘요소가 제거되는 순간에 해당한다. 두 에너지의 변화속도가 줄어든 원인은 판재의 요소가 사라짐으로 인해 충돌이 일어나는 부위에서의 강성(stiffness)이 작아졌기 때문인 것으로 생각된다. 8.9 ms 이후 변화속도가 다시 증가함을 볼 수 있다. 이는 충돌부위에서 완충재의 요소가 모두 제거되고 붕이 다시 스테인레스강 재질로서 강성이 큰 용기본체와 충돌하기 때문이다. 두 에너지 변화에서 보이는 요동은 해석중 요소가 제거될 때 생기는 수치적 현상에 기인한다.

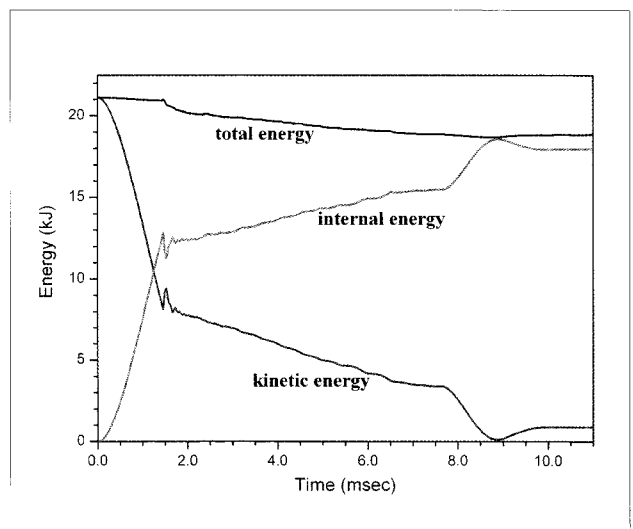


Fig. 7. Energy history for bottom down puncture drop.

운동에너지가 영일 때 각 부분에서의 내부 변형에너지량을 Table 1에 정리하였다. 전체 내부에너지 중 하부 충격완충체의 금속판재와 발사목재의 변형에너지가 각각 32%와 52%를 차지하고 있다. 그리고 차폐용기를 포함한 나머지 부분에서는 총 변형에너지 중 16%만을 차지한다. 이를 통해 운반용기의 파열낙하 해석에서 충격완충체를 무시하고 유한요소 모델링하여 해석하는 경우 충격완충체에서 흡수할 수 있는 에너지를 무시하게 되어 차폐용기에 대해서는 지나치게 보수적이 해석조건이 됨을 알 수 있다. 또한 본 논문에서 제안하는 요소 제거 기법을 이용한 파열낙하 해석이 충격완충체에서 흡수할 수 있는 에너지를 상당부분 고려할 수 있음을 알 수 있다.

나. 용기상부 파열낙하 해석

핫셀 운반용기의 상부가 붕에 떨어지는 조건을 해석하기 위한 유한요소모델은 Fig. 8과 같으며, 여기에서도 충격완충체에서 붕과 충돌하는 부분은 주변보다 세밀하게 요소를 나누었다. Fig. 9는 충돌이 끝난 후 운반용기의 변형형상 및 등가

Table. 1. Internal energy in each part for bottom down puncture analysis

	Internal energy (kJ)	Percent of total energy (%)
Fuel basket	0.013	0.1
Gamma shield	0.213	1.1
Neutron shield	1,065	5.8
Cask structure	1,659	8.9
Top impact limiter	0.002	0.0
Bottom impact limiter (shell part)	5,918	31.9
Bottom impact limiter (absorber part)	9,697	52.2
Total	18,567	100

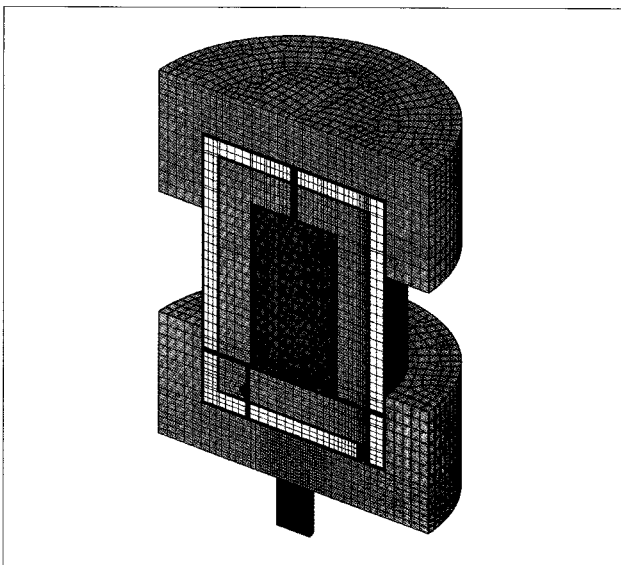


Fig. 8. Finite element model for top down puncture drop analysis.

소성변형율을 보여준다. 용기하부 파열낙하 해석에서와 같이 붕과 접촉한 부분의 금속판재와 완충체의 요소들이 제거되었다. Fig. 10과 Fig. 11은 용기본체에서 발생하는 등가 소성변형율과 von-Mises 응력이 최대가 되는 순간에서의 각각 그 분포를 나타낸다. 용기본체의 상부 개폐구조로 인해 구조적으

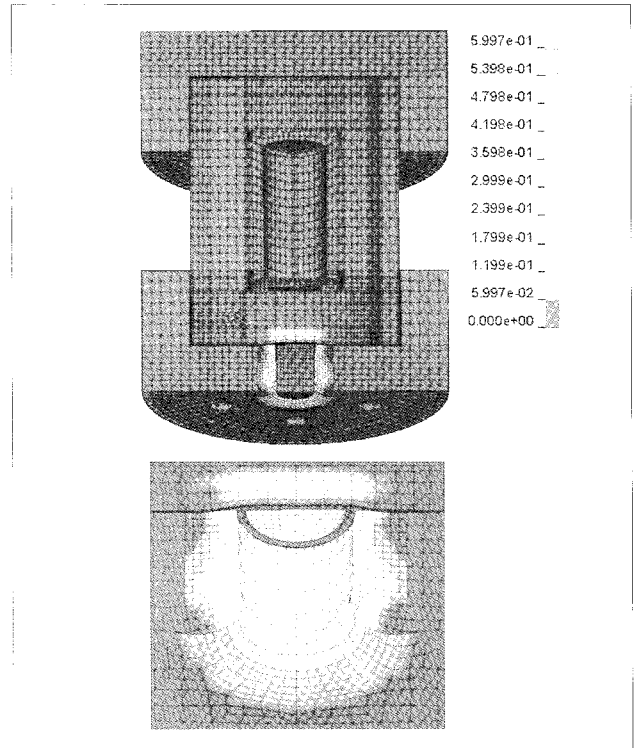


Fig. 9. Deformed shape and equivalent plastic strain for top down puncture drop.

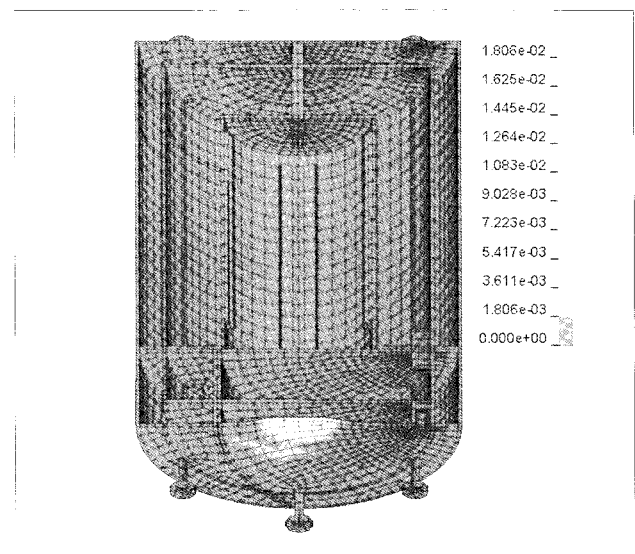


Fig. 10. Equivalent plastic strain of cask structure for top down puncture drop.

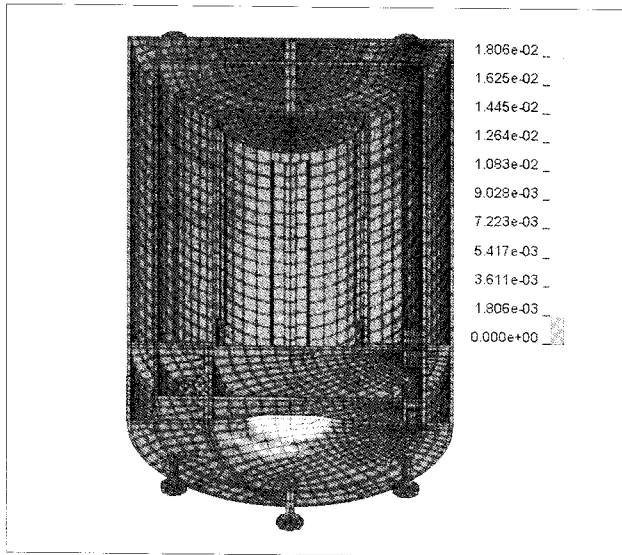


Fig. 11. von-Mises stress of cask structure for top down puncture drop.

로 취약한 영역에서 많은 변형과 응력이 발생하였으며, 최대 소성변형율은 0.018, 최대 응력은 293 MPa로 나타났다. 용기 본체의 재질인 스테인레스강의 기계적 물성치를 고려할 때, 용기본체는 파열낙하 조건에서 구조적 건전성을 유지할 수 있다고 판단된다. Table 2는 총 내부에너지가 최대일 때 각 부분에서의 내부 변형에너지량을 보여준다. 전체 내부에너지 중 상부 충격완충체의 금속판재와 방사목재의 변형에너지가 각각 34%와 51%를 차지한다. 따라서 본 논문에서 제안하는 요소제거법을 이용한 파열낙하 해석이 충격완충체에서 흡수할 수 있는 에너지를 추가적으로 분석하는데 효용성이 있음을 알 수 있다.

Table. 2. Internal energy in each part for top down puncture analysis

	Internal energy (kJ)	Percent of total energy (%)
Fuel basket	0,001	0,0
Gamma shield	0,040	1,2
Neutron shield	1,926	10,6
Cask structure	0,684	3,8
Bottom impact limiter	0,001	0,0
Top impact limiter (shell part)	6,186	34,1
Top impact limiter (absorber part)	9,308	51,3
Total	18,146	100

IV. 결 론

고방사성물질 운반용기의 파열낙하 조건에서 충격완충체의 변형에 의한 에너지 흡수 효과를 고려하기 위해 요소제거

기법을 이용한 유한요소해석 모델링 방법을 제안하였다. 본 방법의 해석예제로 핫셀 운반용기를 사용하였는데, 이 용기는 현재 한국원자력연구원에서 설계중이며 완충재로 방사목재를 사용한다. 해석은 상용코드인 LS-DYNA를 사용하였으며, 여기서 요소의 적분점에서 등가 소성변형율이 재료의 파손 기준값 이상이 되면 그 요소가 제거되도록 하였다. 이는 해석 중 재료의 파손이 발생하는 부분이 생기면 그 부분의 구조적 강성을 무시하는 개념이다. 해석결과 충격완충체는 붕괴 충돌하는 부분의 요소들이 모두 제거되었으며, 용기본체는 구조적 건전성을 유지하였다. 충격완충체에서 전체 낙하에너지의 80% 이상을 변형에너지로 흡수하였으며, 외부 스테인레스강 판재에서 약 30%, 내부 방사목재 완충체에서 약 50%를 흡수하는 것으로 나타났다. 이를 통해 본 해석예제에서는 충격완충체가 낙하에너지의 상당부분을 흡수할 수 있음을 알 수 있었으며, 본 해석방법이 파열낙하시험 조건을 보다 근사적으로 모사할 수 있는 방법이라 생각된다. 실제 파열낙하시험에서는 완충재 재료의 파손이 발생하면 본 해석에서처럼 완충재가 사라지지 않고 여전히 구조적으로 강성을 가지고 있을 것이므로, 본 해석방법도 보수성을 가진다고 할 수 있다.

참고문헌

- [1] US 10 CFR Part 71, "Packaging and Transportation of Radioactive Material," (1997).
- [2] IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material," (2005).
- [3] H.A. Nelms, "Structural Analysis of Shipping Casks - Effects of Jacket Physical Properties and Curvature on Puncture Resistance," Oak Ridge National Laboratory Report, ORNL/TM-1312, Vol. 3 (1968).
- [4] R.C. Shieh, "Empirical Equations for Puncture Analysis of Lead-Shielded Spent Fuel Shipping Casks," Proc. of the 5th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, Vol. 2, pp. 341-350, Las Vegas(1978).
- [5] R.S.J. Corran, P.J. Shadbolt and C. Ruiz, "Impact Loading of Plates-An Experimental Investigation," International Journal of Impact Engineering, Vol. 1, pp. 3-22 (1983).
- [6] A.I.O Zaid, A. El-Kalay and F.W. Travis, "An

- Examination of the Perforation of a Mild Steel Plate by a Flat-Ended Cylindrical Projectile," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 15, pp. 129-143 (1973).
- [7] N. Jones and S.B. Kim, "A Study on the Large Ductile Deformations and Perforation of Mild Steel Plates Struck by a Mass-Part II: Discussion," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 119, pp. 185-191 (1997).
- [8] E.T. Onat and R.M. Haythornthwaite, "The Load-carrying Capacity of Circular Plates at Large Deflection," *Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 23, pp. 49-55 (1956).
- [9] K. Asada, M. Yamamoto, M. Ohashi, S. Hode and A. Higashino, "Development of Simplified Analysis Code for 9-m drop and 1-m Puncture Tests for a Radioactive Material Transport Cask," *Waste Management '88*, pp. 135-144, Tuscon (1988).
- [10] H.M. Wen and N. Jones, "Low-velocity Perforation of Punch-impact-loaded Metal Plates," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 118, pp. 181-187 (1996).
- [11] T.R. Bump and Y.Y. Liu, "A Simplified Analysis of the Regulatory Puncture Test," *PATRAM '95*, pp. 407-414, Las Vegas (1995).
- [12] J. Altes, H. Geiser, W. Volzer, A. Frenk and G. Deeken, "Finite Element Analysis for the Impact Behaviour of a Cask Interacting with a Rigid Pin," *Proc. of the 12th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology*, pp. 77-82, Stuttgart (1993).
- [13] Y.S. Lee, C.H. Ryu, H.S. Kim and Y.J. Choi, "A Study on the Free Drop Impact of a Cask Using Commercial FEA Codes," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 235, pp. 2219-2226 (2005).
- [14] T.Y. Lo, "Puncture Evaluation of Shippingport Package," *Proc. of the 9th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, Vol. 3, pp. 1451-1459, Washington (1989).
- [15] 정성환, 김덕희, 정진세, 양계형, 이흥영, "HIC 운반용기의 사고조건에 대한 구조평가," *방사성폐기물학회지*, Vol. 3, pp. 231-236 (2005).
- [16] 이민수, 백승우, 김광락, 안도희, 임성팔, 정홍석, 최희주, 최종원, 손순환, 송규민, "B형 삼중수소 운반용기 안전성 평가," *방사성폐기물학회지*, Vol. 5, pp. 199-212 (2007).
- [17] LS-DYNA Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, (2005).