

# LS-DYNA3D 및 ABAQUS/Explicit Code를 이용한 사용후 핵연료 운반용기의 자유낙하 충격특성연구

## A Study on the Free Drop Impact Characteristics of Spent Nuclear Fuel Shipping Casks by LS-DYNA3D and ABAQUS/Explicit Code

이 영 신\*      최 영 진\*      김 승 중\*      김 용 재\*\*      이 재 형\*\*\*  
Lee, Young-Shin    Choi, Young-Jin    Kim, Seung-Joong    Kim, Yong-Jae    Lee, Jae-Hyung  
(논문접수일 : 2004년 6월 30일 ; 심사종료일 : 2005년 3월 4일)

### 요 지

방사선물질을 수송하기 위한 용기는 가상 사고조건에서도 안전해야만 한다. 운반용기 설계요구조건은 실험 및 유한요소 해석을 통해 구조적 건전성을 확보하여야 한다. 최근에는 실험보다 유한요소해석을 이용한 방법이 상대적으로 비용이 적기 때문에 주로 사용된다. 그러나 기계적인 반응이 복잡하기 때문에 프로그램을 적용하는 사용자의 방법에 의해 결과가 결정되고 해석하는 동안 여러가지 문제를 발생시킬 수 있다. 본 논문에서, 유한요소해석은 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit을 이용하여 운반용기의 9m 자유낙하충격실험에 대한 해석기술과 여러가지 손상을 갖는 경우를 발견하기 위해 연구하였다. 운반용기의 각각의 경우를 비교하고 사용후 핵연료 운반용기의 낙하 실험에 대해서 신뢰할 수 있는 비교적 간단한 해석 기술을 제안하였다.

**핵심용어** : LS-DYNA3D, ABAQUS/Explicit, 핵연료, 운반용기, 충격, 자유낙하

### Abstract

The package used to transport radioactive materials, which is called by the shipping cask, must be safe under normal and hypothetical accident conditions. These requirements for the cask design must be verified through test or finite element analysis. Since the cost for FE analysis is less than the one for test, the verification by FE analysis is mainly used. But due to the complexity of mechanical behaviors, the results depend on how users apply the codes and can cause severe errors during analysis. In this paper, finite element analysis is carried out for the 9 meters free drop condition of the hypothetical accident conditions using LS-DYNA3D and ABAQUS/Explicit. We have investigated the analyzing technique for the free drop impact test of the cask and investigated several vulnerable cases. The analyzed results were compared with each other. We have suggested a reliable and relatively simple analysis technique for the drop test of spent nuclear fuel casks.

**keywords** : LS-DYNA3D, ABAQUS/Explicit, nuclear fuel, shipping cask, impact, free drop

### 1. 서 론

사용후 핵연료 수송하는데 사용되는 운반용기는 미국 10CFR 71과 IAEA No. ST-1<sup>1)</sup>에 규정되어 있는 정상 사고조건과 가상사고조건에 대하여 안전성을 확보하여야

한다. 정상사고조건은 운반용기가 고온, 저온, 외부압력, 피로, 자유낙하조건이며, 가상사고조건은 9m 자유낙하 충격, 1m 타격충격, 화재조건, 200m 침수조건이다. 이와 같은 사고조건에 대하여 운반용기의 건전성 해석을 위하여 축소모델시험방법<sup>2)</sup> 및 상용유한요소해석코드를 이용한 방

† 책임저자. 정회원 · 충남대학교 기계설계공학과 교수  
전화: 042-825-6531 ; Fax: 042-822-7366  
E-mail: leeys@cnu.ac.kr

\* 충남대학교 대학원

\*\* 한국원자력안전기술원 책임연구원

\*\*\* 기초과학지원연구소 연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

법<sup>3)~8)</sup>이 사용된다. 그러나 시간과 비용절감을 위해서 실제 실험보다는 상용유한요소해석코드를 이용한 방법이 점차 늘어나고 있다.

본 연구에서 가상사고조건인 사용후 핵연료 운반용기가 9m 높이에서 자유낙하조건에 대해 Reg. Guide 7.6<sup>9)</sup>의 규제조건에 따라 충격해석방법을 연구하였다. 해석에 사용된 유한요소프로그램은 ABAQUS/Explicit<sup>10)</sup>와 LS-DYNA3D<sup>11)</sup>를 사용하였다. 본 연구의 목적은 원자력안전 규정에서 사용후 핵연료 운반용기의 가상사고조건으로 제시되는 자유낙하충격특성에 대한 유용한 해석방법을 제안하는 것이다.

## 2. 해석모델 및 유한요소모델링

### 2.1 해석모델

해석모델은 그림 1과 같은 KSC-4 운반용기를 채택하였다. KSC-4 운반용기는 4개의 PWR 사용후 핵연료 집합체를 운반할 수 있는 운반용량을 갖는 용기로서, 뚜껑을 포함한 본체(Cask body)와 충격완충체(Impact limiter) 및 결속장치(Tie-down device)로 구성된다. 본체는 내부셸과 외부셸로 이루어져 있고, 방사선 차폐체로는 레진(Resin)과 납(Lead)이 사용된다. 충격완충체는 그림 2와 같이 중앙에 발사우드(Balsa wood)가 있고, 그 주변에는 레드우드(Red wood)로 이루어져 있다. 빈 운반용기의 중량은 약 34톤이고 핵연료집합체 4개가 장전된 운반용기의 중량은 37톤이다. 전체 길이는 5.6m, 운반용기길이는 4.8m, 폭은 1.2m이다. 운반용기에 대한 치수, 중량 및 재료는 표 1에 나타내었다. KSC-4 운반용기의 9m 자유낙하 해석을 위해 LS-DYNA3D와 ABAQUS /Explicit를 사용하였으며, 각각의 해석을 위한 모델링에는 eta/FEMB

와 IDEAS가 사용되었다. 유한요소모델링은 LS-DYNA3D를 위해 eta/FEMB, ABAQUS/Explicit을 위해 IDEAS를 각각 모델러로 사용하였다.

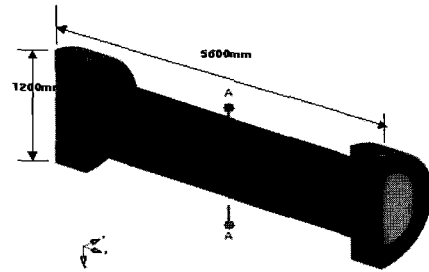


그림 1 Configuration of the KSC-4 shipping cask

유한요소해석에서 사용된 재료의 물성값은 표 2에 나타내었다. 특히, 자유낙하충격과 같은 동적하중을 받을 때 stainless steel과 lead는 변형률이 증가함에 따라 강도가 증가하기 때문에 동적인 재료물성값을 이용하였다.<sup>12)</sup>

표 1 Materials and dimensions of the KSC-4 shipping cask

Components		Inner shell	Outer shell	Resin	Lead shield
Materials		SA 240 Type 304	SA 240 Type 304	NS-4-FR	ASME B29 ch. Gr. 99.9% Pb. Casting
Dimensions	Thickness (mm)	25.4	10.0	150.0	Side 160.0 Bottom 175.0
	Height (mm)	4,750	4,810	4,750	4,705
	Weight (Ton)	2.82	1.51	4.00	20.80

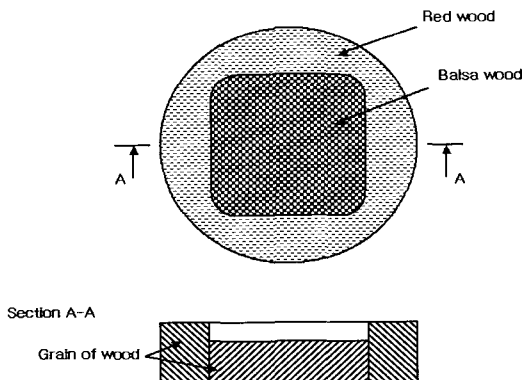


그림 2 Schematic diagram of the shock absorbing cover

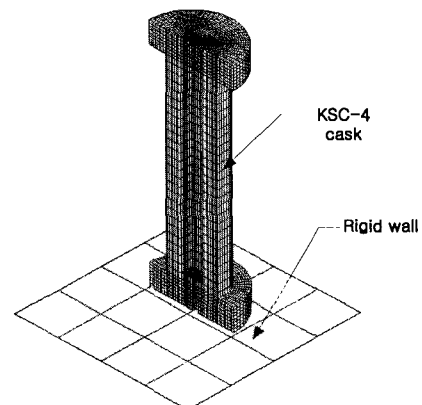


그림 3 Half symmetric finite element model of the cask

표 2 Material properties for the component of cask

Material	304 stainless steel	Resin	Lead	Red wood	Balsa wood
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7913	1710	11070	376	160
Young's modulus (GPa)	186.69	3.86	98.98	1.56	0.67
Poisson's ratio	0.32	0.35	0.40	0.49	0.49
Yield strength (MPa)	258	60	6	45	13
Hardening modulus (MPa)	1894	450	183	0	0

운반용기의 충격특성을 연구하기 위해 사용된 ABAQUS/Explicit와 LS-DYNA3D의 알고리즘은 많은 작은 시간증분을 이용하여 시간전체를 통하여 적분되며, 안정한 해를 보증하기 위한 시간증분은 프로그램내에서 자동으로 설정되도록 하였다. 유한요소해석에서 하중조건은 IAEA Safety Standards Series No. ST-1과 Regulator Guide 7.8에 규정되어 있는 가상사고조건인 9m 자유낙하조건을 적용하였다. 운반용기의 수직낙하와 수평낙하에 대해서 해석을 수행하였으며, 두 경우 모두 납과 운반용기 본체에 완전결합된 경우에 대해서 해석을 수행하였다.

## 2.2 LS-DYNA3D 유한요소 모델링

유한요소모델생성에서 Fuel basket과 바닥면인 강체(Rigid body)를 셸로 모델링한 것을 제외하고 운반용기의 모든 부분을 Solid 요소로 모델링하였다. LS-DYNA3D에서 사용된 솔리드 요소는 8개의 노드를 갖고, 셸 요소는 4개의 노드를 갖는다.

운반용기 본체와 충격완충체사이의 볼트결합은 완전결합이라고 가정하고 볼트를 모델링에서 제외한 대신에 완전결합으로 처리하였다. 운반용기의 초기조건인 내부압력으로 인한 운반용기의 각 부분에서 발생하는 정적응력의 분포, 핵연료 무게(3t), 충격완충체의 외부를 감싸고 있는 Steel 셸, Resin과 Outer 셸 사이의 열전달을 위한 핀들은 9m 자유낙하와 파열조건에 큰 영향을 미치지 않으므로 배제하였다. 구조재인 중간 셸과 외부 셸은 탄·소성으로 가정하였다. 자유낙하(Free drop)시 운반용기와 강체표면 사이에는 마찰이 없는 단순접촉으로 가정하였다.

운반용기가 9m 높이에서 단단한 수평면 위에 최대손상이 예측되는 곳으로 자유낙하시켰을 때 운반용기가 받는 충격의 영향을 평가하였다. 운반용기가 수직상태로 바닥부분으로 충격하는 수직낙하(Top or bottom end-on drop), 수평상태로 충격하는 수평낙하(Horizontal drop)해석을 수행하였다. 1/2모델만을 생성하여 대칭경계조건을 주었고, 하중조건으로는 9m 높이에서 자유낙하로 인한 초기속도  $13.28\text{m/s}(v = \sqrt{2gH})$ 를 적용하였다.

## 2.3 ABAQUS/Explicit 유한요소 모델링

사용후핵연료 운반용기 KSC-4의 자유 낙하시의 충격해석을 수행하기 위하여 해석모델은 실제 크기와 동일하게 대칭경계조건(Symmetric)을 적용하여서 중심축을 기준으로 하여 1/2만을 3차원 요소를 적용하였다. 본 연구에서 사용되어진 상용 유한요소코드인 ABAQUS/Explicit에서는 두께가 10mm인 외부셸의 경우에는 2차원 셸 요소인 S4R을 사용하였으며, 이를 제외한 충격체, 차폐체, 그리고 내부셸은 3차원 솔리드 요소인 C3D8R을 사용하였으며 단단한 강체면(Rigid surface)은 요소 R3D4를 사용하였다. 해석에 적용한 유한요소는 비선형접촉문제에 대한 해의 정확도를 높이기 위하여 저차의 선형요소를 사용하였으며, 운반용기에 사용되어진 총 절점수는 13,887개이며 총요소의 개수는 12,530개이다.

운반용기의 주 구조체인 스테인리스강과 차폐체의 재료인 Lead 및 Resin을 탄·소성으로 가정하였고, 충격완충체의 재료인 Red wood와 Balsa wood의 경우는 탄성·완전소성(Elastic-Perfectly plastic)으로 가정하였다. 운반용기의 좀 더 보수적인 해석을 위해서는 격납경계인 내부셸에 대하여 탄성으로 해석할 필요가 있다. 그러나 운반용기의 낙하충격해석시 비탄성해석의 경우에는 항복이 되고 더 낮게 하중을 받는 부위로 하중이 전달되지만, 탄성해석의 경우는 이 거동을 예측할 수 없기 때문에 정확한 해석수행을 위해 비탄성을 수행하였다.

충격완충체에서 Red wood와 Balsa wood를 감싸고 있는 Steel 셸을 제외하였으며, 운반용기 내에 핵연료는 장전되어 있지 않으며, 운반용기의 상하부가 동일한 구조를 가지도록 가정하였다. 자유 낙하 충격해석을 위해 낙하하고 있는 운반용기의 초기의 위치에너지와 단단한 강체표면(Rigid surface)과 만나기 직전의 운동에너지가 일치하는 에너지 보존 법칙을 이용하여 운반용기를 강체표면과 1mm의 거리를 둔 상태에서 초기속도 13.28m/sec를 주어서 해석을 수행하였다. 이때 강체 표면과 충격체 사이에

는 마찰이 없는 단순접촉으로 가정하였다. 전체해석시간은 납의 접촉조건을 주지 않았을 경우에 대해서 수직낙하는 30msec 그리고 수평낙하의 40msec을 적용하였으며, 전체해석시간에 걸쳐 시간증분을 자동적으로 수행하는 자동 시간증분방식을 채택하였다. 이는 충격으로 야기되는 고주파 노이즈(Noise)를 방지하고 또한 에너지 소산이 크게 야기되는 비선형 충격해석 등에서는 해의 정확도를 높이는 데 보다 유리하다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit를 이용하여 9m 자유낙하조건을 비교하였다. 구조재로 사용된 Stainless steel과 차폐체로 사용된 Resin, Lead는 탄소성으로 해석을 하였고, 충격 완충체인 Balsa wood와 Red wood는 탄성-완전소성으로 가정하여 해석하였다. ABAQUS/Explicit와 LS-DYNA3D 모두 재료특성을 위해 탄성-소성을 사용하였고, 충격완충체는 Hardening modulus값으로 0을 주어 탄성-완전소성이 되도록 하였다.

해석결과는 먼저 내부에너지(Internal energy)와 운동에너지(Kinetic energy)에 대해서 비교 및 고찰하였고, 충격시의 Rigid wall normal force를 비교하였으며, 또한 가장 손상을 많이 받는 부분의 Effective stress(Von-Mises stress)를 비교 및 고찰하였다.

#### 3.1 9m 하부수직낙하 해석결과

##### 3.1.1 LS-DYNA3D

그림 4는 부재 사이의 접촉조건이 없을 때, 9m 하부수

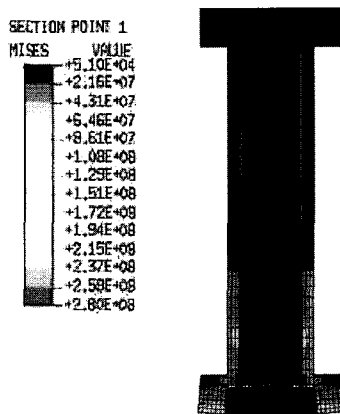


그림 5 Von-Mises stress contour of the cask at the vertical drop (ABAQUS/Explicit)

직낙하 LS-DYNA3D 해석결과 Von-Mises stress contour를 나타낸 것이다. 수직낙하 해석에서 외부셀의 최대 Von-Mises 응력은 268MPa, 내부셀의 최대 Von-Mises 응력은 264MPa이다. 이것은 응력한계값(0.7Su)인 330 MPa보다 낮은 응력이다. 그림 6은 수직낙하일 때 시간에 따른 에너지선도를 나타낸 것이다. 그림 7은 충격력 선도를 나타낸 것이다. 수직낙하일때 충격력은 5msec까지 급격히 증가한 후 10msec이후부터 충격이 거의 일어나지 않는다. 초기의 급격한 충격력의 증가는 충격 초기 충격완충체등이 찌그러지기 전에 탄성적으로 거동하는 구간에서 발생한다.

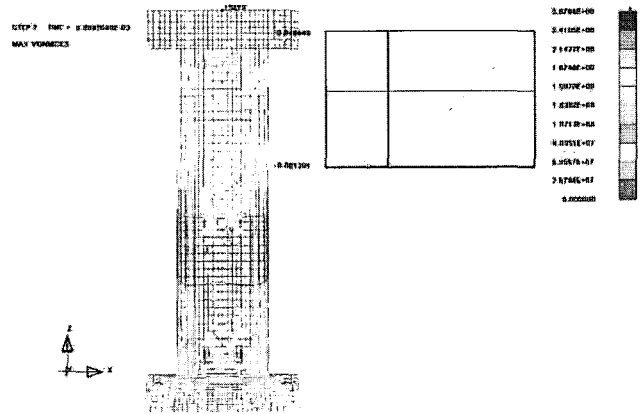


그림 4 Von-Mises stress contour of the cask at the vertical drop (LS-DYNA3D)

##### 3.1.2 ABAQUS/Explicit

그림 5는 ABAQUS/Explicit를 이용하여 9m 하부수직낙하 해석결과를 Von-Mises stress contour로 나타낸 것이다. 운반용기 내부셀의 최대 Von-Mises응력은 278

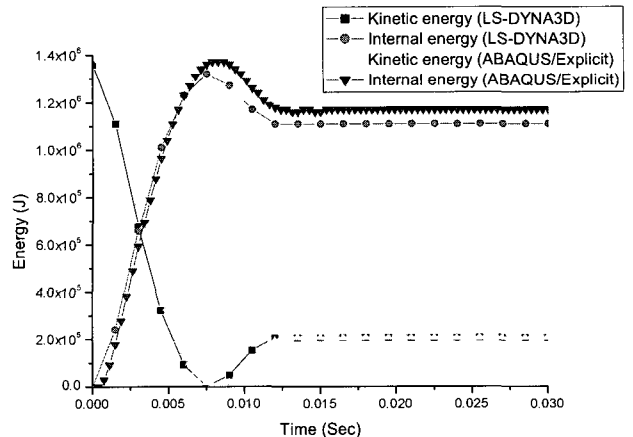


그림 6 Time history of energy force at the vertical drop

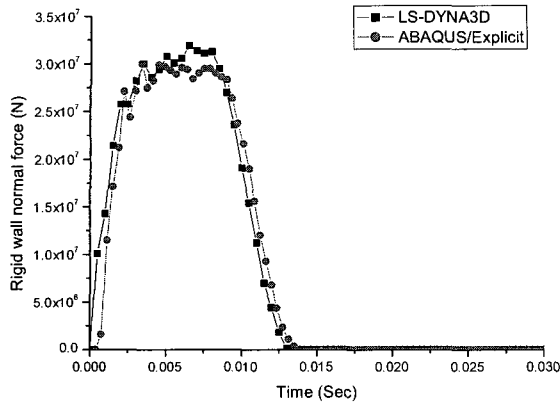


그림 7 Time history of the impact force at the vertical drop

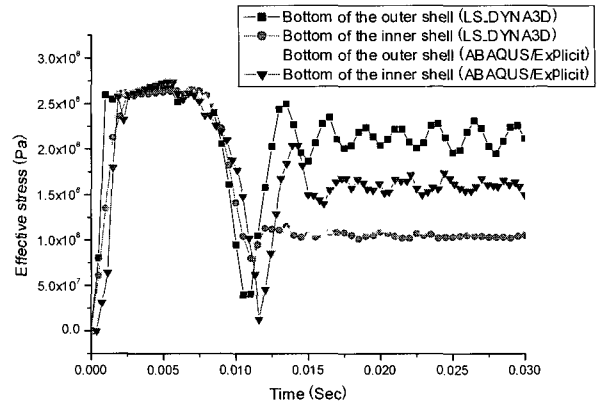


그림 8 Effective stress of the cask at the vertical drop

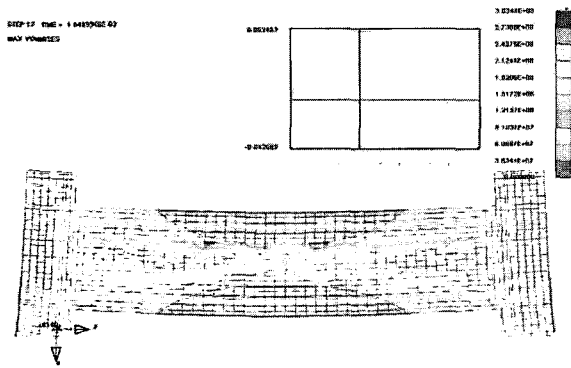


그림 9 Von-Mises stress contour of the cask at the horizontal drop (LS-DYNA3D)

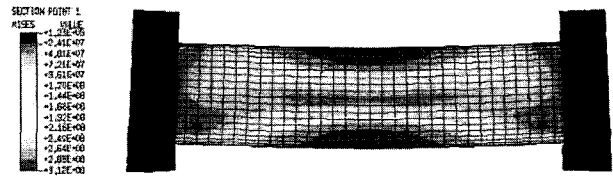


그림 10 Von-Mises stress contour of the cask at the horizontal drop (ABAQUS/Explicit)

MPa, 외부셸의 응력은 최대 273MPa이다. 이는 응력한계값보다 낮으며, 충격력 선도 또한 LS-DYNA3D와 비슷한 경향을 보인다. 그림 8은 수평낙하에서의 시간에 따른 Effective stress변화를 나타낸 것이다.

msec에서 최대에 이른 후 점차 감소하여 20msec이후부터는 충격이 급격히 감소한다. 수평낙하에서는 수직낙하와는 달리 충격초기의 충격력의 증가가 상대적으로 급격하지 않는 이유는 충격완충체의 등근 측면이 충격하기 때문에 초기에 작은 충격면에서 충격이 시작하여 충격이 진행함에 따라 충격면적이 점차 증가하기 때문에 초기 충격력이 크지 않다.

### 3.2. 9m 수평낙하 해석결과

#### 3.2.1 LS-DYNA3D

그림 9는 운반용기의 수평낙하 해석결과를 나타낸 것이다. 외부 셸의 중간부분에서 300MPa의 최대 Von-Mises 응력이 발생하였으며, 내부 셸의 중간부분에서 287MPa의 응력이 발생한다. 이것은 응력한계값(0.7Su)인 330MPa보다 낮기 때문에 구조적 건전성을 확보할 수 있다. 수평낙하에서 발생하는 응력보다 수직낙하에서 발생하는 응력이 더 큰 응력이 발생한 이유는 굽힘에 의한 영향을 받기 때문이다. 그림 6은 수직낙하할 때 시간에 따른 에너지선도를 나타낸 것이며, 그림 12에서 나타낸 것과 같이 수평낙하시 운반용기의 충격면에 작용하는 충격력의 변화는 10

#### 3.2.2 ABAQUS/Explicit

수직낙하와 같이 수평낙하 또한 LS-DYNA3D와 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 9는 ABAQUS/Explicit를 이용한 9m 하부수직낙하 해석결과를 Von-Mises stress contour로 나타낸 것이다. 외부셸에서 최대 Von-Mises응력이 300MPa이 발생하였으며, 내부셸에서는 최대 290MPa의 응력이 발생하였다. ABAQUS/Explicit를 이용한 해석결과 또한 LS-DYNA3D의 해석결과와 같이 굽힘에 의한 영향으로 수직낙하보다 약간 높은 응력범위를 보였다. 그림 13은 수평낙하에서의 시간에 따른 Effective stress변화를 나타낸 것이다

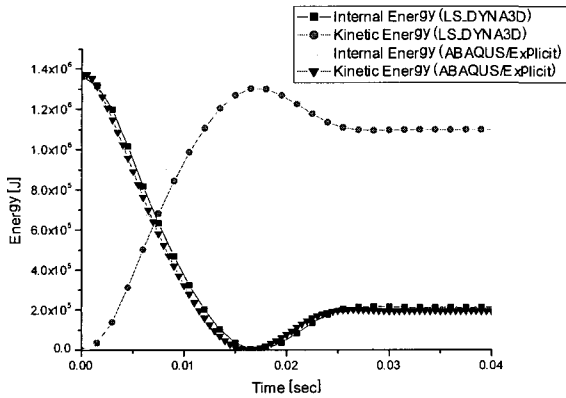


그림 11 Time history of the energy force at the horizontal drop

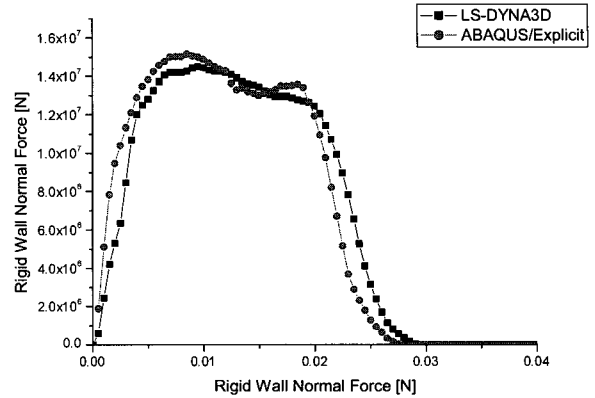


그림 12 Time history of the impact force at the horizontal drop

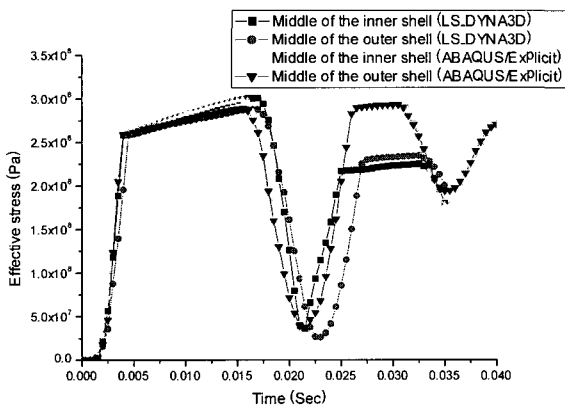


그림 13 Effective stress of the cask at the horizontal drop

#### 4. 결 론

본 연구에서 상용유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit를 사용하여 KSC-4 운반용기의 충격해석방법에 대해 연구하였다. 가상상태 사고조건인 9m 수직낙하와 수평낙하에 대해 해석을 수행하였다.

위의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 수직낙하 및 수평낙하의 거동은 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit에서 유사한 결과를 보이며, 외부셸 및 내부셸의 수직낙하에 의한 응력은 응력한계값 330MPa보다 낮게 발생한다.
2. 격납경계인 내부셸에서 발생하는 응력은 충격력의 시간 이력에 따라 규칙성을 가지며, 모든 경우에 응력한계값보다 낮다.
3. 수직낙하에서 수평낙하보다 짧은 시간에 더 큰 충격하중을 전달하지만, 충격의 지속시간은 수평낙하보다 더 짧다.

#### 참 고 문 헌

1. IAEA Safety Standards Series No. ST-1, "Regulation for the Safe Transport of Radioactive Material", 1996
2. 한국에너지연구소, "KSC-4 운송용기 안전성 분석보고서", 1989
3. 이영신, 김용재, "낙하충격하중을 받는 방사성물질 수송용기의 동적거동에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제18권, 제11호, 1994, pp.2805~2816
4. 정성환, 이영신, "사용후 핵연료 수송용기의 수평낙하충격에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제21권, 제3호, 1997, pp.457~469
5. Lee, Y. S., Kim, H. S., Kang, Y. H., Chung, S. H., Choi, Y. J., "Effect of Irradiation on the Impact and Seismic Response of a Spent Fuel Storage and Transport Cask", Nuclear Engineering and Design, Vol.232, No.2, pp.123~129, 2004
6. 이영신, 이호철, 정성환, 이홍영, 김용재, "컨테이너형태의 방사성물질 A형 운반용기에 대한 구조해석", 한국전산구조공학학회논문집, 제14권 제2호, 2001, pp.143~150
7. Ryu, C.H., Lee, Y.S., Kim, Y.J., Lee, J.H., Ra, J.Y., "A Study on the Modelling Technique for Cask in Free Drop Impact Conditions", Trans. of the 16th International Conference on the Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT-16), 2001, paper #1561
8. Chung, S.H., Lee, H.Y., Lee, H.C., Lee, Y.S., "Structural Analysis of the Container-Shaped Package of Radioactive Material", Trans. of the 16th International Conference on the Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT-16), 2001, paper #1081
9. NRC Regulatory Guide 7.6, "Design Criteria for

- the Structural Analysis of Shipping Cask Containment Vessels", USNRC, 1978
10. H.K.S. Inc., "ABAQUS/Explicit User's Manual Ver.5.8", 1998
  11. LSTC, "LS-DYNA3D User's Manual Ver.950", 1999
  12. Rack, H. J., Knorovsky, G. A., "An Assessment of Stress Strain Data Suitable for Finite Element Elastic-Plastic Analysis of Shipping Containers", NUREG/CR-0481, Sand 771872, Sandia Lab, 1978