

자유낙하충격조건에 있는 사용후핵연료 운반용기의 충격해석방법 연구

°이재형*, 이영신**, 류충현*, 나재연*

Analysis Method on the Free Drop Impact Condition of Spent Nuclear Fuel Shipping Casks

°Jae-Hyung Lee*, Young-Shin Lee**, Chung-Hyun Ryu*, Jae-Yeon Ra*

ABSTRACT

The package used to transport radioactive materials, which is called by 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 one for test, the verification by FE analysis is mainly used. But due to the complexity of mechanical behaviors, the results depends on how users apply the codes and it can cause severe errors during analysis. In this paper, finite element analysis is carried out for the 9 meters free drop and the puncture 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 found several vulnerable cases to errors. 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.

1. 서 론

방사성물질을 수송하는 데 사용되는 운반용기는 10 CFR 71과 IAEA No. ST-1⁽¹⁾에서 규정하고 있는 정상사고조건 및 가상사고조건에 대해서 안전성이 확보돼야 한다. 정상사고조건은 운반용기가 고온, 저온, 외부압력, 피로, 자유낙하조건에 있을 경우이고 가상사고조건은 9m 높이에서 자유낙하, 타격조건, 화재조건에 있을 경우이다. 이와 같은 사고조건에 대하여 운반용기의 건전성 해석을 위해 일반적으로 축소모델시험방법⁽²⁾과 상용유한요소 해석코드를 이용한 방법^(3,4)이 사용된다. 시간과 비용의 문제로 인해 실제 실험보다는 상용유한요소 해석코드를 이용한 방법이 점차 늘고 있다. 본 연구에서는 사용후핵연료 운반용기가 9m 높이에서

자유낙하하는 가상사고조건에 있을 경우에 대해 Reg. guide 7.6⁽⁵⁾의 규제요건에 따라 충격해석방법을 연구하였다. 해석에 사용된 유한요소프로그램은 비선형 문제에 적합한 ABAQUS/Explicit⁽⁶⁾과 LS-DYNA3D⁽⁷⁾를 사용하였고, 해석모델은 Figure 1과 같은 KSC-4 운반용기를 채택하였다. KSC-4 운반용기는 4개의 PWR 사용후핵연료 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 이루어져있고 방사선 차폐체로는 레진과 납이 사용된다. 충격완충체는 Figure 2와 같이 중앙에 발사우드가 있고 그 주변에는 레드우드로 이루어져 있다. 빈 운반용기의 중량은 약 34톤이고 핵연료집합체 4개가 장전된 운반용기의 중량은 37톤이다. 또한 전체 길이는 5.6m, 운반용기본체의 길이는 4.8m, 폭은 1.2m 이다. 운반용기 본체에 대한 치수 및 중량을 Table

* 충남대학교 기계설계공학과 대학원

** 정희원, 충남대학교 기계설계공학과 교수

1에 정리하였다.

2. 유한요소 모델과 경계조건

KSC-4 운반용기의 대칭성을 이용해 Figure 3과 같이 half model을 하였다. 간략화를 위하여 충격완충체를 둘러싼 쉘은 모델링에서 제외하였고, 운반용기의 상부와 하부가 동일하도록 모델링하여 뚜껑부분을 간략화 하였다. 볼트결합부분은 완전결합으로 가정하였고, 충격완충체는 등방성인 재료로 고려하였다. 접촉면의 마찰계수는 최대손상을 예측하기 위하여 무시하였다. 또한 3톤 가량의 핵연료 집합체는 해석에 큰 영향을 주지 않는다고 가정하여 무시하였다. 운반용기의 유한요소는 모두 8개의 노드를 갖는 solid 요소가 되도록 하였으며 운반용기가 떨어지는 바닥면은 강체 shell 요소로 모델링하여 변형이 일어나지 않도록 하였다. 외부셸, 내부셸의 재질인 SA 240 type 304 stainless steel과 방사성 자폐체들은 선형 탄성-소성(linear elastic-plastic)인 재료특성을 갖도록 하였으며 충격완충체로 사용되는 발사우드와 레드우드는 탄성-완전소성

(elastic-perfectly plastic)인 재료특성을 갖도록 모델링하였다. 각각의 물성값을 Table 2에 정리하였다. 특히, 자유낙하충격과 같은 동적인 하중을 받을 때 stainless steel과 lead는 변형률이 증가함에 따라 강도가 증가하기 때문에 동적인 재료물성값을 이용하였다.⁽⁸⁾

하중조건으로는 IAEA Safety Standards Series No. ST-1과 Regulatory Guide 7.8에 규정되어있는 가상상태 사고조건인 9m낙하에 대해서 해석을 수행하였다. 효율적인 해석시간 단축을 위해서 운반용기를 9m에서 떨어뜨리는 것 대신에 초기속도를 13.3m/s ($v = \sqrt{2gH}$)로 수송용기의 모든 부위에 적용하였다. 운반용기의 수직낙하와 수평낙하에 대해서 해석을 수행하였으며 두 경우 모두 납과 운반용기 본체에 접촉조건이 있을 경우와 완전결합되었을 경우에 대해서 해석을 수행하였다.

납과 본체가 완전결합되었을 경우의 요소개수는 13254였고, 납과 본체에 접촉조건이 있을 경우의 요소개수는 25064개로 하였다. 해석시간은 수평낙하와 수직낙하 모두 0.04초 주었다.

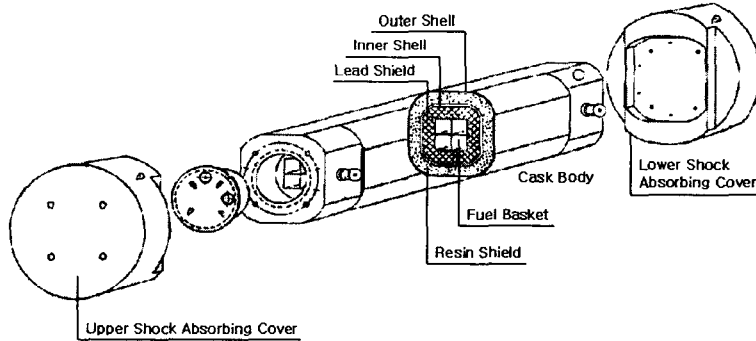


Figure 1 Configuration of the KSC-4 shipping cask

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

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

Table 2 Material properties for the component of cask

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

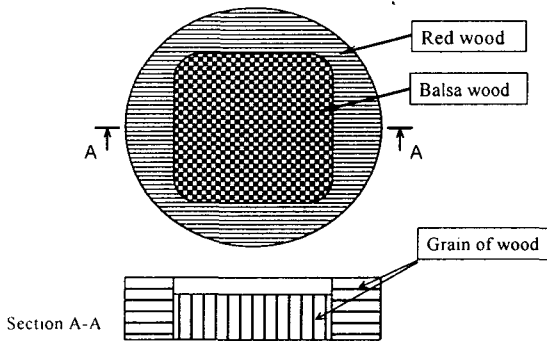


Figure 2 Schematic diagram of the shock absorbing cover

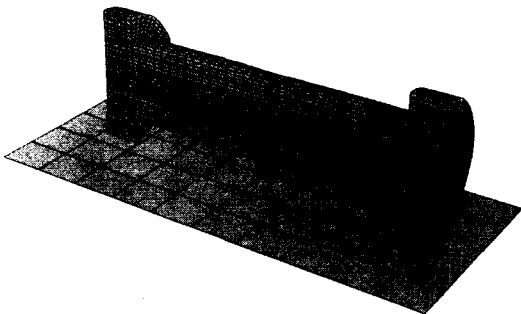


Figure 3 Half symmetric finite element model of the cask

3. 해석결과의 신뢰성

Figure 6,7은 9m 수평낙하와 수직낙하 해석에 대한 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit의 에너지 시간 이력이다. 두 그림 모두에서 충격전의 운동에너지가 충격후 내부에너지로 변환되는 것을 볼 수 있다. 두 차트를 비교하면 LS-DYNA3D에

서 약간의 에너지 손실이 발생되는데, 이것은 LS-DYNA3D 에서 계산되는 동안 Internal energy 이외에도 Hourglass energy, Sliding interface energy로 변환되기 때문에 이와 같은 현상이 발생된다. LS-DYNA3D에서 이렇게 계산되어지는 양이 전체에너지의 10%미만이기 때문에 해석에 신뢰성이 있다고 판단할 수 있다. 또한 모든 경우에 대해 KSC-4 운반용기의 격납경계인 내부셀에서의 응력이 0.7Su인 330Mpa를 넘지 않았다(Figure 9). 수직낙하시 운반용기와 납의 경계부분에 접촉조건이 있을 경우에는 납의 슬럼프현상으로 Figure 6과 같이 에너지의 변화가 느리게 발생하는 것을 알 수 있다. 이에 반해 수평낙하시에는 납의 슬럼프현상이 수직낙하에 비해서 크지 않아 Figure 7와 같이 접촉조건에 따른 에너지의 차이가 거의 발생하지 않았다.

4. 충격 특성

Figure 8은 운반용기의 수직낙하에 대한 충격력 특성을 보여준다. 운반용기의 수직낙하시 납의 경계면에 접촉조건이 없을 경우에는 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit에서 유사한 충격특성을 볼 수 있지만 접촉조건이 있을 경우에는 충격특성이 약간 다르게 나타난다. 납의 경계면에 접촉조건이 있을 경우에 ABAQUS/Explicit는 충격이 짧은 시간에 발생하는 것에 비해 LS-DYNA3D에선 충격의 지속시간이 약간 길게 나타났고, 이에 따른 격납경계인 내부셀의 stress 시간이력도 Figure 9와 같이 다르게 나타났다. 이것은 납의 슬럼프 현상에 따른 해석을 두 해석코드에서 약간 다르게 수행하고 있음을 알 수 있다. Figure 4는 LS-DYNA3D 해석결과 납의 경계면에 접촉조건이 있을 경우 납의 슬럼프현상을 stress contour와 함께 보여준다.

납의 슬럼프현상이 내부의 fuel-basket에 영향을 미칠 수 있다는 것을 Figure 4를 통해 알 수 있다.

Figure 10은 운반용기의 수평낙하에 대한 충격력 특성을 보여준다. 납의 경계면에 접촉조건을 준 경우와 그렇지 않은 경우가 큰 차이를 보이지 않았고 이에 따라 Figure 11과 같이 격납경계인 내부셀의 stress 시간이력 또한 큰 차이가 나지 않았다. 특이한 것은 Figure 11의 수평낙하 stress 선도에서 stress hardening 효과의 영향으로 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit 모두에서 격납경계인 내부셀의 응력이 더 높게 평가되었다. Figure 5는 납의 경계면에 접촉조건이 없는 경우 수평낙하후의 변형형상과 stress contour를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 수평낙하시에는 납의 처짐현상이 격납경계인 내부셀에 굽힘을 발생시킨다는 것을 예측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에선 상용유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit를 사용하여 KSC-4 운반용기의 충격해석방법에 대해 연구하였다. 가상 상태 사고조건인 9m 수직낙하와 수평낙하에 대해 각각 납의 경계면에 접촉조건이 있을 경우와 없을 경우에 대해서 해석을 수행하였다.

위의 연구로부터 우리는 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 납의 경계면에 접촉이 없는 경우의 수직낙하와 수평낙하의 거동은 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit에서 유사한 결과를 얻었다.
2. 납의 경계면에 접촉조건이 있을 경우 수직낙하에서 2차 충격현상이 발생하였다. 납의 슬럼프현상에 따라 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit의 충격력이 다르게 나타났으며, 두 코드에 따라 충격지속시간이 다르게 나타났다. 따라서 수직낙하시에는 납의 경계면 접촉조건과 슬럼프현상을 고려한 해석이 필요하다.
3. 납의 경계면에 접촉조건을 주었을 경우에 발생하는 슬럼프현상은 수직낙하시 fuel-basket에 심각한 손상을 줄 수 있다는 것이 예측되었다.
4. 납의 경계면에 접촉조건이 있는 수평낙하에선 2차 충격현상이 발생하지 않았고, 충격력의 시간이력은 접촉조건이 없을 경우와 유사하게 나타났다. 따라서, 수평낙하를 위한 유한요소해석에

선 시간과 비용을 위해 접촉조건과 슬럼프현상을 무시하여도 결과에는 큰 차이가 없다.

5. 격납경계인 내부셀에서 발생하는 응력은 충격력의 시간이력에 따라 규칙성을 갖고 나타나는 것을 볼 수 있으며, 모든 경우에 대해서 NRC Regulatory Guides 7.6 에서 규정하고 있는 응력한계값인 $0.7 \cdot S_u$ ($=330\text{MPa}$)를 만족하였다. 특이한 것은 수평낙하와 수직낙하의 충격력선도를 비교해 보면 수직낙하에서 짧은 시간에 더 많은 충격하중을 전달하고 있지만 충격의 지속시간은 수평낙하가 더 길게 나타났다. 그리고 수평낙하에서 LS-DYNA3D와 ABAQUS/Explicit 모두에서 stress hardening 효과의 발생으로 격납경계인 내부셀의 응력이 좀더 높게 평가되었다.

6. 참고문헌

- [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 방사성 물질 수송용기의 동적거동에 관한 연구" 대한기계학회논문집, 제18권, 제11호, pp.2805-2816, 1994
- [4] 정성환, 이영신, "사용 후 핵연료 수송용기의 수평낙하충격에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제21권, 제3호, pp.457-469, 1997
- [5] NRC Regulatory Guide 7.6, "Design Criteria for the Structural Analysis of Shipping Cask Containment Vessels", USNRC, 1978
- [6] H.K.S. Inc., "ABAQUS/Explicit User's Manual Ver.5.8", 1998
- [7] LSTC, "LS-DYNA3D User's Manual Ver. 950", 1999
- [8] H. J. Rack, and G. A. Knorovsky, "An Assessment of Stress Strain Data Suitable for Finite Element Elastic-Plastic Analysis of Shipping Containers", NUREG/CR-0481, Sand77-1872, Sandia Lab., 1978

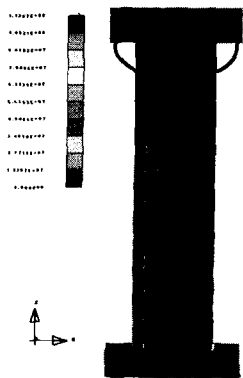


Figure 4 Slump of the lead at contact condition

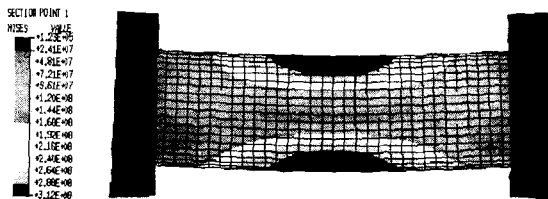
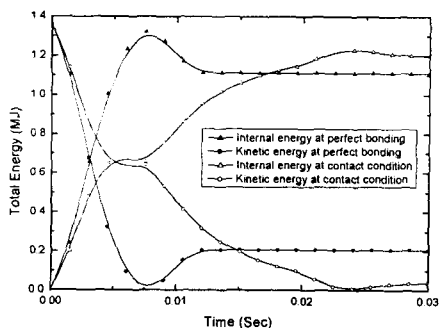
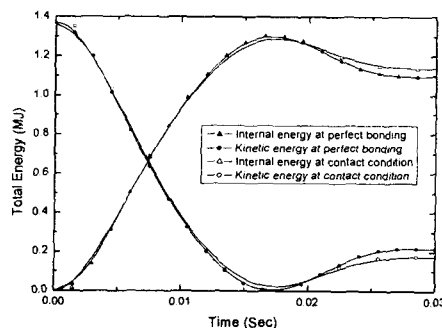


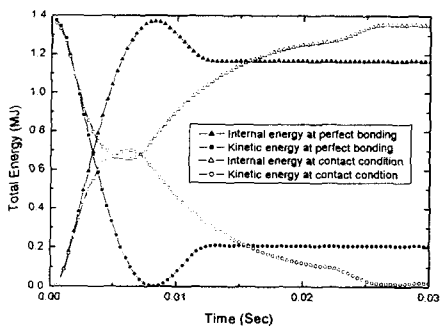
Figure 5 Deformation at the horizontal drop (ABAQUS/Explicit)



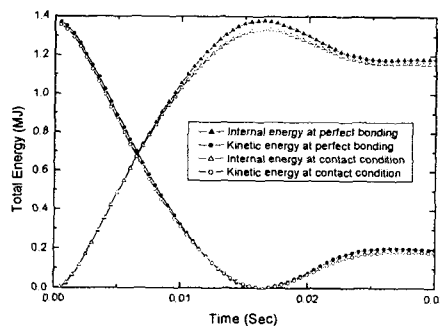
(a) LS-DYNA3D



(a) LS-DYNA3D



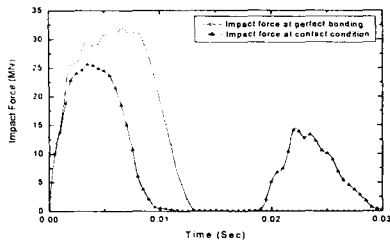
(b) ABAQUS/Explicit



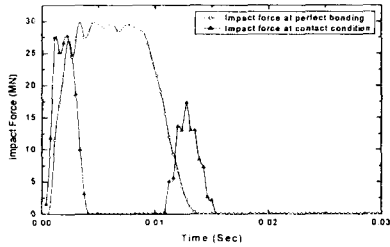
(b) ABAQUS/Explicit

Figure 6 Time history of the energy at the vertical drop

Figure 7 Time history of the energy at the horizontal drop

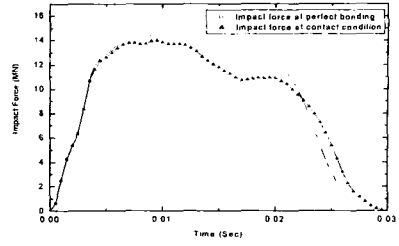


(a) LS-DYNA3D

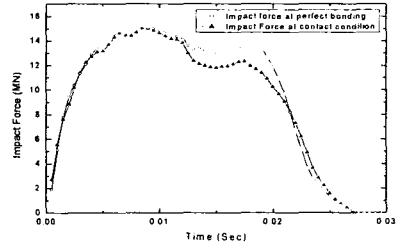


(b) ABAQUS/Explicit

Figure 8 Time history of the impact force at the vertical drop

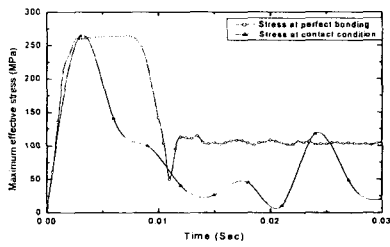


(a) LS-DYNA3D

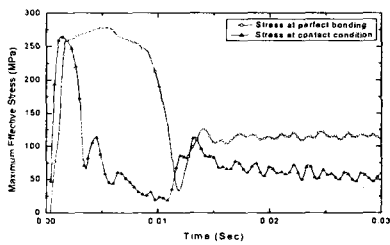


(b) ABAQUS/Explicit

Figure 10 Time history of the impact force at the horizontal drop

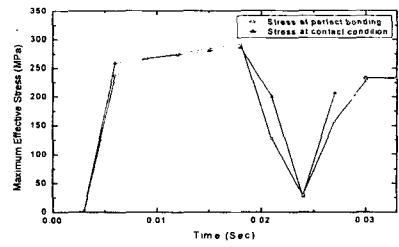


(a) LS-DYNA3D

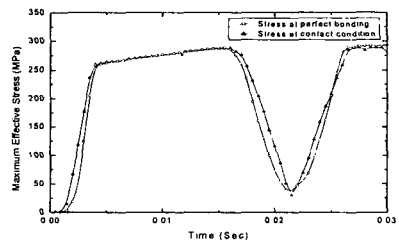


(b) ABAQUS/Explicit

Figure 9 Effective stress of the inner shell at the vertical drop



(a) LS-DYNA3D



(b) ABAQUS/Explicit

Figure 11 Effective stress of the inner shell at the horizontal drop