

‘95 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

경사낙하 충돌조건하의 사용후핵연료 수송용기의 충돌거동

구정희*, 서기석*, 정성환*, 도재범*, 김영진**

* : 한국원자력연구소

** : 성균관대학교

요 약

사용후핵연료 수송용기는 충돌사고에 대한 구조적 건전성을 입증하기 위하여 9 m 자유낙하조건에 대하여 수송용기의 충돌거동을 평가해야 한다. 본 연구의 목적은 수송용기가 9 m 높이에서 충돌면과 경사각을 갖고 충돌할 때의 동적거동을 파악하기 위한 것이다. 수송용기가 충돌과 함께 회전하며 연속충돌을 일으키는 45° 이하의 작은 경사각을 갖고 충돌할 때 수송용기에 발생하는 응력, 가속도, 충돌력등을 분석하여 동적거동을 파악하였다. 또한, 수송용기의 경사각도를 변화시키며, 경사각도의 변화가 수송용기의 동적거동에 미치는 영향을 파악하였다.

1. 서 론

원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료는 강한 방사선과 높은 열이 방출되므로, 사용후핵연료 수송용기는 방사선 차폐와 격납을 비롯하여 예상되는 각종 사고조건에 대해서도 구조적 건전성을 충분히 유지하여야 한다. 원자력법과 IAEA Safety Series No.6⁽¹⁾ 등의 자유낙하의 규정에는 수송용기가 9 m 높이에서 최대손상이 예측되는 부분으로 변형되지 않는 강체 수평면에 충돌할 때 내부에 있는 방사성물질이 누출되지 않도록 구조적 건전성을 유지할 것을 요구하고 있다. 납등의 차폐재와 스테인리스강 구조재 등으로 구성된 복합구조의 수송용기에 대하여 최대손상이 예측되는 충돌방향을 알기가 쉽지 않으므로 지금까지는 해석의 복잡성 및 비용등의 문제로 단순화한 해석에 한정되었으나,⁽²⁻⁵⁾ 유한요소 프로그램과 컴퓨터의 발달로 3차원 요소 및 접촉요소를 사용하여 수송

용기의 충돌거동을 상세하게 파악할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 경사낙하충돌(oblique drop impact)중에서 1차충돌에 이어 2차충돌이 연속하여 발생하는 45° 이하의 경사각도를 갖고 충돌하는 연속충돌(slapdown impact) 경우에 대하여 유한요소해석을 통하여 수송용기의 충돌거동을 분석하였다.

2. 경사낙하 해석

2.1 해석모델

본 연구에서는 7개의 PWR 사용후핵연료를 운반하는 용기를 대상으로 하였는데, 이 수송용기는 납과 실리콘 혼합재를 차폐재로 사용한 스테인리스강 구조체인 다층셀의 원통형 구조이다. 충격완충체로는 balsa wood와 red wood 등의 충격흡수 능력이 우수한 나무를 사용하였다. 총중량은 약 70톤에 이르며, 전체길이는 약 5.9 m에 이른다.

원통형 수송용기의 대칭성을 이용해 수송용기의 1/2 단면을 총 12,471개의 점점에 6,830개의 solid 요소, 2,780개의 shell 요소를 이용해 모델링하였다. 유한요소해석 프로그램으로는 충돌해석 및 접촉요소 기능이 우수한 LS-DYNA3D 코드를 사용하였다.

수송용기 구성요소인 스테인리스강, 납차폐체, 실리콘혼합재 등을 각각의 재료별로 모델을 구성하였고, 서로 다른 재료들 간에는 단일면접촉요소(single surface contact element)를 사용하여 서로 단순히 접촉되어 있는 것으로 모델링하였다. 용기의 뚜껑은 강체절점 구속(rigid body nodal constraints)조건을 사용하여 본체와 뚜껑의 볼트 체결 부위를 구속하였으며,⁽⁶⁾ 충격완충체 케이스는 접촉요소를 사용하여 본체에 구속시켰다⁽⁷⁾.

재료의 물성치는 모두 변형률경화를 고려한 탄소성으로 가정하였으며, 특히 나무는 결방향을 고려하여 이방성 압축성재료로 모델링하였다. 또한, 충격완충체는 탄소강판의 케이스와 보강격막판을 함께 고려하여 충돌시 나무의 변형과 철제 케이스 및 보강격막판의 좌굴로 충돌에너지가 흡수되는 것을 고려하였다.

수송용기의 충돌면은 무한히 평편한 강체평면으로 가정하여 수송용기의 모든 충돌가능한 위치가 접촉하는 것을 가능하도록 모델링하였다. 하중조건으로는 9m의 높이에서의 자유낙하로 인한 13.3 m/sec의 초기 충돌속도를 고려하였다.

2.2 수송용기의 경사낙하충돌거동

Fig.1은 20° 경사각을 갖는 경사낙하 충돌시 수송용기가 1차충돌 후 반발과 함께 회전운동을 일으켜 반대쪽 끝으로 2차충돌을 일으키는 과정중 1차충돌과 2차충돌에서 최대응력이 발생하는 시간에서 충격완충체의 변형된 모습과 본체의 Von Mises 등응력을 나타내고 있다. 여기서, 1차충돌 부분인 좌측보다 2차충돌부인 우측에서 변형량이 더 크고, 대부분의 응력이 충돌부분인 하단과 상단의 구조재인 스테인리스강에 집중되는 것을 알 수 있다.

Fig.2는 20° 경사낙하 충돌시간 변화에 따른 속도이력으로 수송용기가 -13.3 m/sec의 초기속도를 갖고 충돌한 후 하부는 속도가 감소하다가 반전되어 +4.6 m/sec의 속도로 위로 튀어오르나, 수송용기의 중심부는 -6.1 m/sec, 상부는 -16.5 m/sec의 속도로 2차충돌을 일으킨 후 수송용기의 상하부의 속도가 다시 반전되는 과정을 나타낸다. Fig.2에서 2차충돌속도가 1차충돌속도인 13.3 m/sec 보다 약 24% 큰 16.5 m/sec로 2차충격량이 더욱 커질 것을 예측할 수 있다.

Fig.3은 20° 경사낙하 충돌시 충돌면(rigid wall)에서의 수직반력의 크기를 나타내고 있다. 이 반력의 크기는 수송용기에 가해지는 충격력으로 평가될 수 있으며, 2차충돌력인 12,868 kN으로 1차충격력 9,235 kN보다 약 39% 큰 값을 보였다. 이것은 2차충돌시의 충격량이 훨씬 크다는 것을 나타낸다. 1차충돌시의 최대응력은 하부의 요소에서 87 MPa, 2차충돌시 최대응력은 상부의 요소에서 117 MPa로 나타나 1차시 최대값 보다 약 34% 큰 값을 보였다. 충돌초기의 수송용기가 자유낙하로 인해 갖는 전체에너지는 2,488 kJ로 운동에너지값과 같으며, 1차충돌 후 2,225 kJ로 10.6%, 2차충돌 후에는 1,800 kJ로 27.7% 감소하였다. 이는 자유낙하 충돌시 대부분의 에너지는 운동에너지에서 변형에너지로 변화하지만 일부는 감쇠(damping) 등으로 소산됨을 나타낸다.

2.3 수송용기의 경사각도와 충격량

수송용기가 충돌면과 경사각을 갖고 충돌할 때 경사각도가 수송용기의 충격량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수송용기의 경사각도를 5° 에서 부터 45° 까지 각도를 변화시키며 충돌거동의 변화를 파악하였다.

경사각이 증가할수록 수송용기의 1차충돌과 2차충돌이 끝나는 시간, 즉 충돌소요시간

이 길어지는 경향을 보였다. 이것은 경사각이 커질수록 1차충돌에서의 충격흡수량이 증가하고, 2차충돌지점인 상부가 충돌면에 부딪힐 때 까지 회전하는 소요시간이 길어지기 때문이다.

Fig.4는 수송용기의 충돌각도 변화에 따른 충돌면에서의 최대반력, 즉, 최대충격력의 변화를 나타내고 있다. 경사각이 증가하면 1차충돌시의 충돌력은 약간씩 증가하며, 2차충돌시의 충돌력은 20° 부근에서 최대에 이른 후 급격히 감소하였다.

2.4 해석결과 고찰

수송용기를 단순강체보요소로 가정하고 무게중심에서 y성분 가속도 $\ddot{y}_{C.G.}$ 를 갖고 강체면에 θ 의 경사각으로 충돌할 때 강체의 무게중심(C.G.)으로 부터 l 만큼 떨어진 임의 지점 P에서 수평면과 충돌하는데 영향을 미치는 y축 방향의 가속도는 다음과 같다⁽⁶⁾.

$$\ddot{y} = \ddot{y}_{C.G.} + a l \cos \theta - \omega^2 l \sin \theta \quad (1)$$

위식에서 θ 가 작을 경우 마지막항이 무시될 수 있고, 2차충돌에서의 손상의 크기는 무게중심으로 부터 충돌지점까지의 거리(l)와 경사각(θ)에 영향을 받으며, 1차충돌 보다 $a l \cos \theta$ 만큼 큰 가속도가 발생하고, θ 가 증가할 수록 $\omega^2 l \sin \theta$ 의 영향이 점차 커지고, 어느 각도 이상의 θ 부터는 2차충격량이 감소할 것을 알 수 있다.

5° 경사와 같이 경사각이 아주 작은 경우는 1차와 2차 충돌이 거의 동시에 일어나면서 수송용기에 회전력이 미쳐 발생하지 못한 상태에서 2차충돌이 발생하기 때문에 2차충격량이 1차충격량과 큰 차이가 없으나, 경사각이 15°, 20°로 커질 경우 2차충격량이 1차충격량 보다 더욱 커진다는 것을 알 수 있었다. 그러나, Fig.4에서 경사각이 계속 증가하여 약 38° 이상이 되면 오히려 2차충격량이 감소하게 된다. 또한, Fig.4에서 경사각도가 15°와 20°사이일때 수송용기에 최대손상이 발생할 것으로 예측된다.

3. 결론

수송용기의 9m 경사낙하시의 충돌해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수송용기가 45° 이하의 경사각을 갖고 9m의 높이에서 자유낙하하여 수평면 위에 충

돌할 경우, 1차충돌부위와 무게중심간의 차이로 인한 회전력이 발생하여, 1차 충돌보다 더 큰 속도로 2차충돌이 연속하여 발생하며, 2차충돌 부위인 수송용기의 상부에 큰 충격력을 발생시킨다.

- 2) 연속충돌이 발생하는 경사낙하에서 수송용기의 충돌각도가 증가하면 1차충돌에서 소모되는 운동에너지의 양이 증가하며, 1차충돌 이후 2차충돌이 발생하는 시간이 늦어진다.
- 3) 자유낙하 충돌에서 수송용기의 경사각이 약 38° 이하가 될 경우, 1차충돌 보다 2차충돌이 더 큰 충격력을 발생시키는 것으로 나타났는데, 수송용기의 최대손상은 경사각이 15° 와 20° 사이일때 발생할 것으로 예측되었다.
- 4) 경사각이 약 38° 보다 커질 경우 1차 충격력이 증가하고 2차충격력이 감소하여 1차 충돌시 받는 충격력 보다 작아진다.

참 고 문 헌

- (1) IAEA Safety Standards, Safety Series No.6, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 1985 Edition, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1990, pp.75-82.
- (2) Nelson,T.A. and Chun,R.C., 1987, "Methods for Impact Analysis of Shipping Containers,"NUREG/CR-3966, UCID-20639, Lawrence Livermore National Lab., pp.16-31.
- (3) Yaksh, M.D. and Jones,G.L., 1989, "Dynamic Analysis of a Cask Drop to Investigate Slap Down Effect," ANSYS Conference Proceedings, pp5.55-5.63.
- (4) Pfeiffer,P.A. and Kennedy, J.M., 1989, "Free Drop Impact Analysis of Shipping Cask," Nuclear Engineering and Design 114, pp.33-52.
- (5) Bergmann,V.L. and Ammerman,D.J., 1990, "An Analysis of Parameters Affecting Slapdown of Transportation Packages," SAND-90-2187, TTC-1012, Sandia National Laboratories, USA.
- (6) Hallquist,J.O., 1991, "LS-DYNA3D Theoretical Manual," LSTC Report 1018, Livermore Software Technology Corporation, USA.
- (7) Hill,T.K. and Joseph, W.W., 1974, " Energy Absorbing Characteristics of Materials," SLA-74-0159, Sandia National Laboratories, USA.

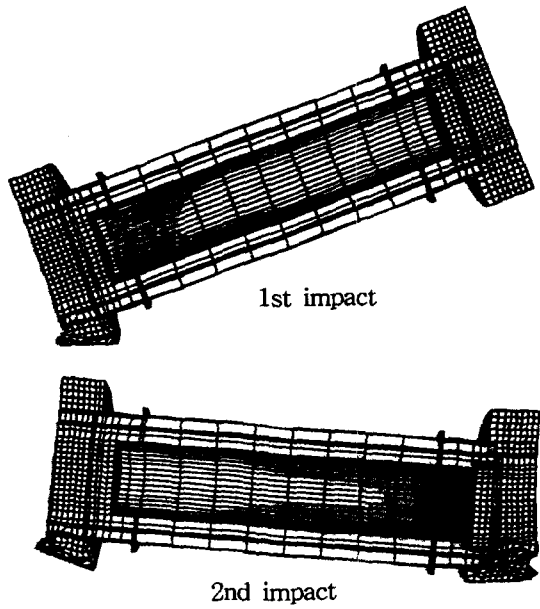


Fig.1 Deformed shape & stress contour of the cask under 20° oblique drop impact

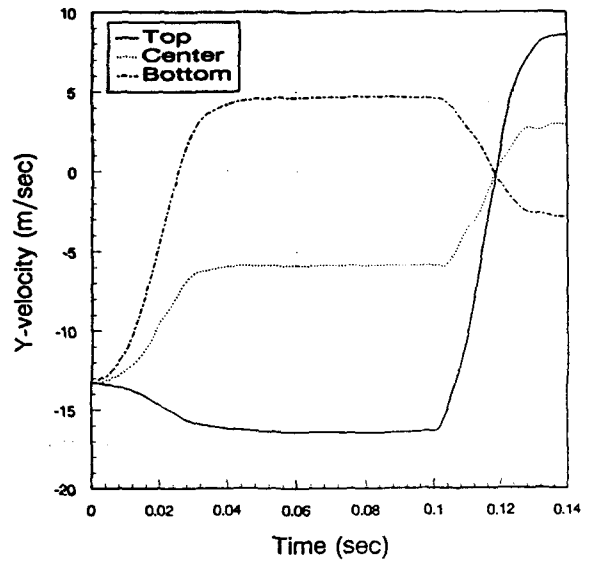


Fig.2 Velocity-time histories of the cask under 20° oblique drop impact

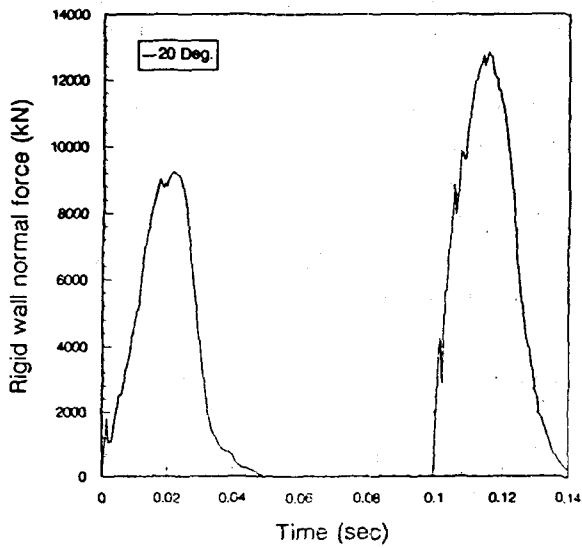


Fig.3 Rigid wall normal force-time history under 20° oblique drop impact

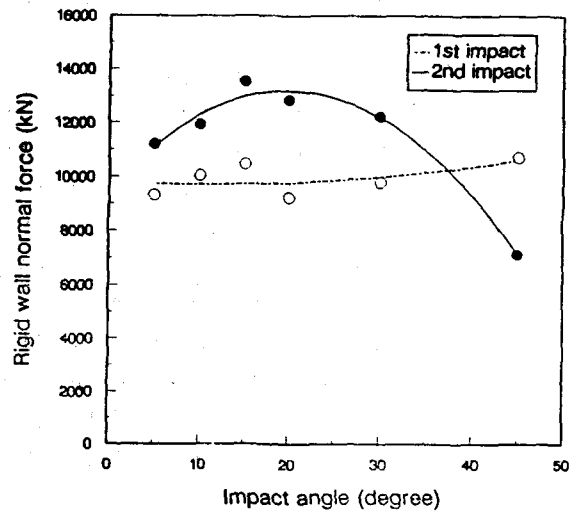


Fig.4 Variation of the max. reaction force according to the impact angle variation