

〈논 문〉

사용후핵연료 수송용기의 수평낙하충격에 관한 연구

정성환* · 이영신**

(1996년 7월 10일 접수)

A Study on the Side Drop Impact of a Nuclear Spent Fuel Shipping Cask

Sung-Hwan Chung and Young-Shin Lee

Key Words : Shipping Cask(수송용기), Side Drop(수평낙하), Drop Impact(낙하충격), Dynamic Behavior(동적거동), Stress Intensity(응력강도)

Abstract

A nuclear spent fuel shipping cask is required by IAEA and domestic regulations to withstand a 9 m free drop condition. In this paper, the structural analysis under the 9 m side drop condition was performed to understand the dynamic impact behavior and to evaluate the safety of the cask for 7 PWR nuclear spent fuel assemblies. The analysis result was compared with the measured value of the 9 m side drop test for the 1/3 scaled-down model and the accuracy of the 3D analysis was confirmed. Analyses in accordance with the diameter of impact limiters for the proto-type cask were performed. Through the analyses, the impact behaviors due to the side drop and the effects dependent on the diameter of impact limiters were grasped. Maximum stress intensities on each part of the cask were respectively calculated by using the stress evaluation program and the structural safety of the cask was finally evaluated in accordance with the regulations.

기 호 설 명

- I : 내력벡터 (internal force vector)
- M : 질량행렬식 (mass matrix)
- N_n : 형상함수 (shape function)
- P : 외력벡터 (external force vector)
- P_b : 일차굽힘응력 (primary bending stress)
- P_m : 일차막응력 (primary membrane stress)
- S_m : 설계응력강도 (design stress intensity)
- Δt : 시간증분 (time increment)
- u : 변위 (displacement)
- \ddot{u} : 가속도 (acceleration)

할 수 있는 수송용기는 아주 강한 방사선과 높은 열이 방출되는 고준위 방사성물질의 위협으로부터 인간과 환경을 보호하기 위하여 안전성이 철저하게 보장되어야만 한다. 국제원자력기구의 안전규정,⁽¹⁾ 국내의 원자력법⁽²⁾ 및 미국 원자력규제위원회의 규정⁽³⁾ 등 국내외의 관련법규에 따라 정상수송 및 가상사고에서도 수송용기는 안전성을 유지하여야 한다. 법규에서 수송용기는 9 m 자유낙하조건, 800°C 화재조건, 1 m 파열조건 및 200 m 침수조건 등의 가상사고조건에 대하여 구조적인 기술기준의 허용치를 만족하여야 하는데, 구조적으로 가장 큰 충격을 야기시키는 9 m 자유낙하조건에 대한 안전성 평가가 중요하게 고려되고 있다. 따라서, 자유낙하로 인한 충돌현상에 대한 동적거동을 파악하여 수송용기에 미치는 충격력의 완화와 최적화에 관한 연구는 매우 의미있다고 할 수 있다.

1. 서 론

원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료를 운반

*회원, 한국원자력연구소

**회원, 충남대학교 기계설계공학과

수송용기가 9 m의 높이에서 최대손상이 예측되는 부분으로 단단한 바닥면에 충돌하는 자유낙하조

건은 충돌방향을 정의하기가 쉽지 않기 때문에 수직, 수평 및 경사낙하 등으로 분류하여 구조적 건전성을 평가하고 있다. 이러한 낙하조건에 대한 구조평가는 수송용기의 실측 및 축소모델을 제작하여 직접 시험하는 방법과 전산코드를 이용하는 해석적 방법에 의하여 이루어지고 있다. 최근에는 컴퓨터의 급속한 발달과 전산코드의 계속적인 개발로 인하여 해석에 의한 평가방법이 널리 활용되고 있다. 수송용기의 낙하충격에 관하여 동적거동을 분석하고 그 영향을 평가하는 연구는 원자력산업이 발달된 세계각국에서 활발하게 이루어지고 있고, (4~21) 국내에서도 각종 수송용기에 대한 연구개발이 수행되고 있다. (22~24)

수송용기의 낙하충격에 대한 동적거동은 본질적으로 비선형 동적응답문제로서 엄밀해의 유도가 어렵다. 시험에 의한 동적거동의 평가는 실제 낙하조건과 동일하게 할 수 있다는 장점은 있으나, 실측 또는 축소모델의 제작과 시험설비에 비용이 많이 들고 시험준비 및 자료처리 등에 시간이 많이 걸리기 때문에 최근에는 보다 경제적인 유한요소 전산해석코드를 이용하고 있다. 물론, 유한요소법의 근사적 수식화와 충격해석이 포함하고 있는 접촉문제 등으로 인하여 전산코드를 이용한 해석결과에 대한 신뢰성이 반드시 높은 것은 아니지만 효율적인 해석기법을 확립하여 해석에 대한 정확도를 높이고 있다.

본 연구는 경수로형 사용후핵연료 7다발을 운반할 수 있는 수송용기의 9 m 수평낙하조건에 대한 구조해석을 수행하였다. 여러 연구결과들을 살펴보면 각 낙하조건에 대하여 수평낙하로 인한 충돌시에 수송용기에 전달되는 충격력이 가장 큰 것으로 평가되고 있기에 낙하충격을 흡수하는 충격완충체 외경의 크기는 수평낙하에 의해 결정된다. 자유낙

하로 인한 충격해석에서 수직낙하는 충돌면의 면적 변화가 일정하므로 최대칭요소에 의한 2차원 해석이 가능하지만, 수평낙하의 경우는 변형에 따라 충돌면의 면적이 점차로 증가하는 기하학적인 특성으로 인하여 3차원 해석을 수행하여야 한다.

축소모델에 대한 시험과 해석을 동시에 수행하고, 그 결과를 비교평가하여 해석의 정확도와 보수성을 확인한 후 실제 수송용기의 해석에 적용하였는데, 충격완충체의 크기를 변화시키며, 9 m 수평낙하해석을 수행하였다. 이 해석을 통하여 수평낙하로 인한 충격거동 및 충격완충체의 크기변화에 따른 충격영향을 살펴보고있으며, 그리고 자체적으로 개발한 응력평가프로그램을 이용하여 수송용기의 각 부위에 발생하는 최대응력강도를 계산하여 법규에 따른 구조적 안전성을 평가하였다.

2. 수송용기

수송용기는 Fig. 1에 나타낸 것처럼, 사용후핵연료 7다발을 운반할 수 있는 용량이고, 본체와 양단의 충격완충체 (impact limiter)로 구분된다. 본체

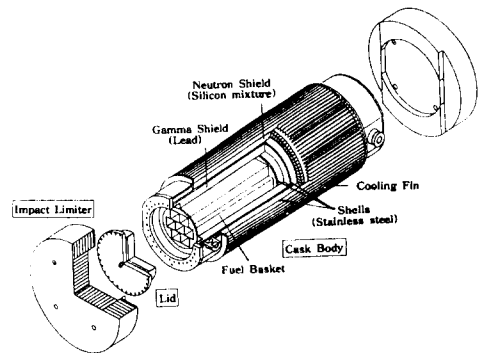


Fig. 1 Overview of KSC-7 cask

Table 1 Mechanical properties of material

	Stainless steel	Lead	Silicon mixture	Balsa wood	Red wood
Density, kg/m ³	7913	11070	1480	160	314
Young's modulus, GPa	186.8	98.55	0.012	0.678	1.563
Poisson's ratio	0.3	0.4	0.45	0.3	0.3
Yield strength, MPa	258.5	6.893	6.11	13.63	45.01
Hardening modulus, GPa	1.895	0.19	—	0.0	0.0

의 외경은 1.8 m이고, 길이는 5.2 m로서, 전체중량은 약 70톤이다. 본체는 구조재인 내부셀(inner shell), 중간셀(intermediate shell) 및 외부셀(outer shell)로 구성되어 상하부의 판재에 용접 고정되고, 각 셀의 중간층에는 감마선차폐체와 중성자차폐체가 각각 구조되어 채워지는 다층원통형 구조이다. 본체의 양단에는 충돌사고 등에 대비하여 본체에 전해지는 충격력을 완화시키기 위하여 충격완충체를 설치한다.

수송용기의 주요재료는 구조재로서 연성이고 내부식성이 강한 스테인리스강을 사용하며, 감마선차폐체는 순도가 99%이상인 납을, 그리고 중성자차폐체는 국내에서 개발한 실리콘복합재를 사용한다. 충격완충체의 재질은 충격흡수능력이 뛰어난 발사나무 및 캘리포니아산 레드우드를 사용한다.⁽⁴⁾ 각 재료의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었으며, 이는 해석의 기본자료로 활용되었다.

3. 수평낙하해석

3.1 이론적 배경

수송용기의 낙하충격에 대한 해석은 유한요소법을 적용하여 자유낙하로 인한 충격하중의 이력에 대하여 변형 및 응력에 관한 근사해를 구하는 것이다. 엄밀히는 임의의 체적에서 힘과 모멘트의 평형을 항상 유지하여야 하는 것을 요구하는데, 근사해를 구하는 유한요소법은 유한개로 분할된 체적에서 이들 평형조건이 평균적으로 유지되는 조건으로 대체하여 근사시킨다. 즉, 평형에 관한 엄밀조건을 가상일의 법칙으로 전개하여 근사적인 평형조건으로 적용한다.

임의의 체적을 V , 이 체적의 경계표면을 S 라 두고, S 상에 있는 임의의 점에서 단위면적당 표면력을 t , 그리고 V 내에 있는 임의의 점에서 단위체적당 체력을 f 라 두자.

임의의 체적에 대한 하중평형식은 다음과 같다.

$$\int_S t dS + \int_V f dV = 0 \quad (1)$$

Cauchy 응력 σ 의 정의와 면적분에 Gauss 정리를 적용하면, 하중평형에 대한 미분방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \sigma + f = 0 \quad (2)$$

이를 수식화(weak formulation)시켜 가상일의 정리를 적용하면, 가상일의 방정식은 다음과 같다.

$$\int_V \sigma : \delta D dV = \int_S t \cdot \delta v dS + \int_V f \cdot \delta v dV \quad (3)$$

여기서, δD 는 가상변형률변분이고, δv 는 가상속도변분이다.

이 식은 임의의 가상속도를 갖는 외력이 한 일은 동일한 가상속도의 변형으로 인한 등가응력이 한 일과 같다는 것을 의미한다.

유한요소해석에서 변위에 관한 형상함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$u = N_n u^n \quad (4)$$

여기서, u 는 전체변위, u^n 은 절점변위, N_n 은 형상함수로서, 아래첨자는 총합을 의미하고, 윗첨자는 절점을 의미한다.

즉, N_n 은 절점변위 u^n 의 향으로 전체변위 u 를 나타내는 형상함수이다.

그리고 한 점에서의 체력 f 는 외력 F 와 d'Alembert 하중으로 나타낼 수 있다.

$$f = F - \rho \ddot{u} = F - \rho N_n \ddot{u}^n \quad (5)$$

여기서, \ddot{u} 는 가속도이다.

따라서, 평형방정식에 대한 유한요소 근사식은 다음과 같다.

$$\int_V \rho N_n \cdot N_m dV \ddot{u}^n + \int_V \beta_n : \sigma dV - \int_S N_n \cdot t dS - \int_V N_n \cdot F dV = 0 \quad (6)$$

여기서, β_n 은 변형률변분을 정의하는 행렬식이다.

이 식은 다음과 같은 비선형 지배방정식으로 나타낼 수 있다.

$$M \ddot{u}^n + I - P = 0 \quad (7)$$

여기서,

$$M = \int_V \rho N_n \cdot N_m dV : \text{질량행렬식}$$

$$I = \int_V \beta_n : \sigma dV : \text{내력벡터}$$

$$P = \int_S N_n \cdot t dS + \int_V N_n \cdot F dV : \text{외력벡터}$$

이다.

비선형 동적응답은 유한요소모델의 모든 자유도

에 대하여 직접시간적분방식으로 구하는데, 여기서는 내연적 기법의 시간적분방식을 적용하여 해를 구한다. 내연적 기법은 평형방정식을 각 시간증분의 끝에서 d'Alembert 하중의 평형과 시간증분의 처음과 끝에서 정하중의 가중평균으로 대체시킨다. 즉,

$$M[\ddot{u}^n]_{t+\Delta t} + (1+\alpha)[I-P]_{t+\Delta t} - \alpha[I-P]_t = 0 \quad (9)$$

시간 $(t+\Delta t)$ 에서의 해를 구하기 위해서 시간 $(t+\Delta t)$ 에서의 평형을 고려하는 내연적 기법은 다음과 같은 변위와 속도에 대한 Newmark 공식에 의하여 수행된다.

$$\begin{aligned} u^n_{t+\Delta t} &= u^n_t + \Delta t \dot{u}^n_t + \Delta t^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{u}^n_t + \beta \ddot{u}^n_{t+\Delta t} \right] \\ \dot{u}^n_{t+\Delta t} &= \dot{u}^n_t + \Delta t [(1-\gamma) \ddot{u}^n_t + \gamma \ddot{u}^n_{t+\Delta t}] \end{aligned} \quad (10)$$

이때,

$$\beta = \frac{1}{4}(1-\alpha)^2, \quad \gamma = \frac{1}{2} - \alpha, \quad -\frac{1}{3} \leq \alpha \leq 0 \quad (11)$$

이다.

이를 평형상태에 이를 때까지 수치적 기법에 의하여 반복계산한다.

충격해석에서는 충격시 일어나는 충돌과 분리현상을 조절하고 있다. 먼저, 충돌을 무시하고 시간증분을 구한 후, 그 시간내에서 변하는 모든 점들의 충돌 또는 분리에 대한 평균시간을 계산하여, 그 평균시간에 대한 증분을 다시 구한다. 모든 충돌접촉면의 변화는 계산된 시간에서 일어나는 것으로 가정한다. 충격해석은 충돌순간의 충돌접촉면들이 순간적으로 동일한 속도를 갖는다는 가정하에 수행되는데, 충돌직후 동일한 속도를 갖는 점이 분리되는 것을 위하여 동접촉연산방식을 적용한다. 국부적인 소성충돌의 개념을 도입하여 충돌시 에너지는 소산된다고 가정한다. 그리고 시간증분단계에서 분리되는 것으로 충격거동을 파악하여, 순간시간에 해가 전파되는 것을 허용하고 다음순간의 거동이 연속적으로 되도록 한다.⁽²⁵⁾

3.2 수평낙하해석

수송용기의 구조해석은 주어진 하중조건에서 발생하는 최대응력의 크기를 최소화하여 안전성을 높여야 하기 때문에 각각의 하중조건이 수송용기에 미치는 영향들을 정확하게 파악하는 것이 중요하다.

수평낙하는 변형이 진행됨에 따라 충돌면의 면적이 점차로 증가하는 기하학적인 특성으로 인하여 3차원 해석을 하여야 하므로,⁽¹⁷⁾ 수송용기가 9 m의 높이에서 수평으로 자유낙하하여 단단한 바닥면에 충돌하는 수평낙하조건에 대하여 충격완충체의 크기를 변화시키면서 3차원 동적해석을 수행하였다. 그리고 해석에 적용한 기법은 축소모델의 낙하시험을 통한 검증을 거쳐 해석에 적용하였다.

해석은 HP-755 워크스테이션에 설치되어 있는 ABAQUS/Standard 버전 5.3⁽²⁶⁾ 코드를 이용하였는데, 구조해석에 광범위하게 사용되는 유한요소 전산해석 프로그램으로 내연적 시간적분방식을 채택하고 있다. 외연적 시간적분방식을 적용하는 코드는 특성상 3차원 요소의 적분점을 주로 한개만 사용하므로 법규의 두께에 따른 응력강도를 구하여 응력을 평가하기가 어렵기 때문에, 계산시간이 더 걸리어도 내연적 시간적분방식을 적용하는 코드를 이용하였다.

3.2.1 해석 모델링

해석모델은 수송용기를 기준하여 ABAQUS 코드를 사용한 충격해석에 적용되도록 하였다. 수송용기는 중심축을 기준으로 대칭인 원통형이고, 상하부가 동일한 구조를 나타내고 있으며, 그리고 수평낙하시 양단의 충격완충체가 바닥면에 동시에 떨어진다고 가정하여, Fig. 2와 같이 1/4 원통형에 대하여 3차원 8절점 솔리드(solid)요소로써 모델링하였다. 수송용기의 외각전열핀은 충격흡수효과가 작기 때문에 전체 충격거동에 크게 영향을 미치지 않으므로 모델링에서 제외하였다. 사용요소는 비선형 동접촉문제에 대한 해의 정확도를 높이기 위하여 저차의 선형요소를 적용하였다. 그리고 HP-755 워크스테이션의 계산용량을 효율적으로 활용하는 범

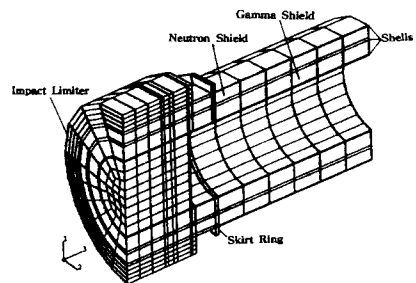


Fig. 2 Side drop analysis model

위에서 유한요소 분할을 하였으며, 직접 충격되어 응력구배가 크게 나타나는 충격원충체 부분은 보다 세밀하게 분할을 하였다.

'소성이 없는 평탄한 면'으로 규정한 바닥면은 강체면 (rigid surface) 모드를 적용하여 마찰이 없다고 가정하였다.⁽¹²⁾ 두 물체가 접촉할 때 공통의 접촉면을 따라 수직접촉응력이 전달되고, 마찰이 있으면 어느 정도의 전단응력도 전달된다. 이러한 접촉문제는 불연속적인 비선형성을 야기하고 여러가지의 기하학 및 운동학적 상황을 포함하고 있기 때문에 접촉면을 통하여 단지 수직응력만이 전달되는 것으로 하였다. 또, 접촉면에서의 과도한 불연속접촉을 방지하고 국부적 단면변형에 따른 충돌시의 에너지손실이 쉽게 흡수되도록 경화면접촉을 고려하였다.

수송용기가 9 m의 높이에서의 자유낙하로 인한 13.3 m/sec의 초기속도로써 단단한 바닥면에 충돌하는 문제로 구성하였고,⁽¹⁵⁾ 수송용기의 기하학적 대칭성을 고려한 1/4 원통형 모델에 대하여 각 중심축을 따라 형성된 단면들은 낙하방향 이외의 방향으로는 고정된 것으로 하였다.

수송용기의 격납경계를 형성하는 내부셀의 재료인 스테인리스강은 구조적 건전성에 크게 영향을

미치기 때문에 법규에 따라 탄성거동을 가정하여 보수적인 해석이 되도록 하였고, 다른 구조재의 스테인리스강은 탄소성거동으로 선형의 변형경화 (strain hardening)를 가정하였다. 감마선차폐체인 납과 중성자차폐체인 실리콘복합재, 충격원충체의 발사나무와 레드우드는 탄소성거동으로 가정하여 해석을 수행하였다. 탄소성거동은 변형률속도가 탄성과 소성으로 분리되는 중분모드를 적용하였다. 낙하충격과 같은 동하중이 작용하면 스테인리스강과 납은 변형률속도가 증가함에 따라 강도가 증가하기 때문에 동적특성치를 적용하였다.⁽²²⁾ 그리고, 나무는 정적특성치로써, 중앙부의 발사나무에 대해서는 축방향, 측면부의 레드우드는 반경방향으로 국부적 재질좌표를 지정하여 결방향에 평행한 방향을 기준하는 직교이방성으로 고려하였다.

내연적 시간적분방식을 적용하는 본 해석에서는 매 시간증분마다 해의 수렴성이 문제가 되기 때문에 전체해석시간에 걸쳐 시간증분을 자동적으로 수행하는 자동시간증분방식을 채택하였다. 이는 충격으로 야기되는 고주파노이즈를 방지할 수 있고, 에너지 소산이 크게 야기되는 비선형 충격해석 등에서는 해의 정확도를 높이는 데 보다 유리하다. 일반적으로 시간증분의 크기가 작으면 작을수록 해의

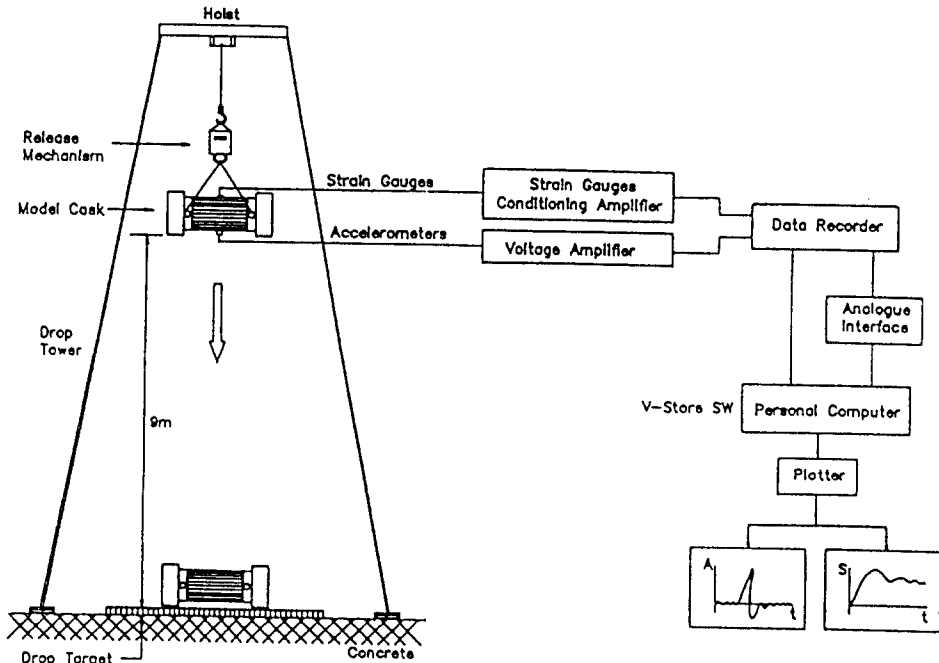


Fig. 3 Data acquisition system for free drop test

정확도는 높아지는 경향이므로, 보다 정확한 해를 구하기 위하여 절점력을 기준하여 하중공차를 적절히 조절하였다.

3.2.2 모델시험에 의한 해석검증

해석을 검증하기 위하여 축소모델에 대하여 시험과 해석을 동시에 수행하고, 그 결과를 비교분석하였다.

수송용기의 외형치수를 모두 1/3로 선형축소시키고, 구조 및 재료를 동일하게 제작한 축소모델을 이용하여 9 m 수평낙하시험을 실시하였다. 축소모델 본체의 외경은 0.6 m이고, 길이는 1.73 m이다. 충격원충체의 외경은 0.83 m이고, 높이는 0.29 m이다.

시험은 축소모델의 본체뚜껑과 충격원충체의 체결상태를 확인한 후, 모델을 수평으로 유지시키며 9 m의 높이까지 들어올려서 순간낙하장치를 이용하여 바닥면으로 낙하시켰다. 그리고, 낙하충격에 대한 동적거동을 분석하는데 필요한 가속도 및 변형률을 효과적으로 측정하기 위하여 Fig. 3에 나타난 것처럼, 가속도계, 스트레인게이지, 증폭기 및 자료저장기록기(data recorder) 등으로 이루어진 측정계통을 구성하였다. 충격에 대한 응답신호는 실시간으로 처리하고, 가속도 및 변형률은 피크치를 구할 수 있도록 보정을 하였다. 또한, 충돌순간의 짧은 시간대에서 측정자료의 획득과 분석을 위하여 자료저장기록기로서 자료저장 및 개인용 컴퓨터로의 이송을 하였다.

축소모델로써 수평낙하시험을 실시하여 측정된 가속도 및 변형률을 자료처리하여 분석한 결과와 전산코드로써 축소모델에 대하여 해석을 수행하여 얻은 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 서로 비교하여 나타내었다. Fig. 4는 중간셀의 중앙부에 대한 가속도를 비교한 시간이력으로, 충돌직후 충격원충체의 변형에 따라 점점 증가하다가 충격원충체가 찌그러지면서 충격력을 흡수하기 때문에 급격히 감소하는 양상을 보이고 있다. Fig. 5는 중간셀의 중앙부에

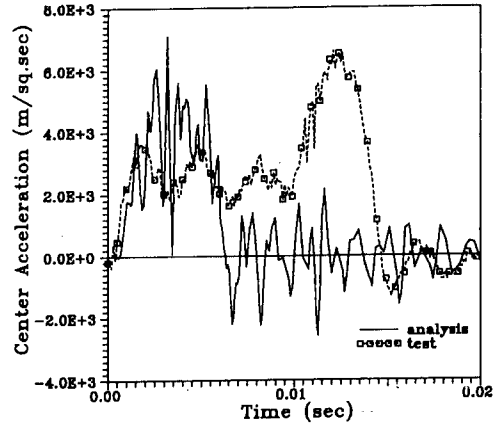


Fig. 4 Comparison of center acceleration between test and analysis

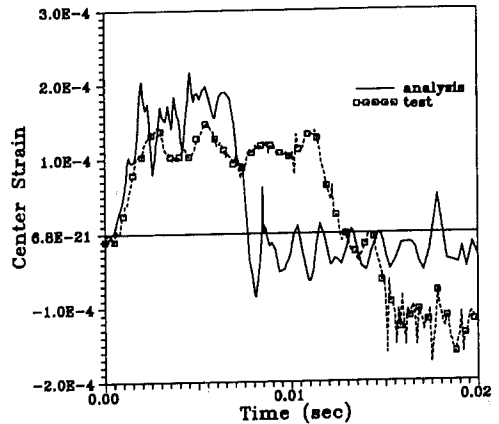


Fig. 5 Comparison of center strain between test and analysis

대한 전단변형률을 비교한 시간이력으로, 시험과 해석의 경향이 유사함을 알 수 있다. 변형률 역시 충돌초기에는 점점 증가하다가 충격원충체의 찌그러짐(crush)이 멈추는 시점을 고비로 급격히 감소한다. 여기서, 시험과 해석결과의 분포가 아주 짧은 시간이지만 차이를 보이는 것은, 실제시험의 경우 각 부재사이와 충돌접촉면에서 감쇠가 작용한

Table 2 Comparison of results between test and analysis for a 1/3 scaled-down model

	Test	Analysis
Acceleration on inter. shell center	675 g	723 g
Acceleration on inter. shell end	822 g	881 g
Shear strain on inter. shell center	147 $\mu\epsilon$	216 $\mu\epsilon$

것으로 여겨지기때문에 해석에 비하여 시험의 경우 충돌이력이 다소 길어진 것으로 분석된다. 그리고 자료측정계통에서 시험자료를 처리할 때 아날로그 신호를 디지털자료로 변환시키는 과정에서 아주 짧은 시간의 응답지연현상이 발생하기도 하는데, 이 영향도 고려되어야 한다.

Table 2는 중간셀의 중앙부와 양단에 발생한 가속도 및 중앙부의 전단변형률에 대하여 시험 및 해석의 최고치를 비교한 것으로, 그 값들이 차이를 별로 보이지 않았다. 특히, 충격력을 나타내는 가속도량의 경우는 약 7%의 차이만 보였다. 여기서, 시험보다 해석의 결과치가 높게 나타난 것은 변위법에 의한 상계 유한요소법의 특성이며, 또한 해석이 실제 충격조건과 물성치가 이상적으로 고려되어 보수적으로 수행되었기 때문이다.

이렇게 해석과 시험의 최고치는 물론 전체거동이 유사한 양상을 나타내었다. 또한, 해석이 시험에 비하여 보수적임을 잘 알 수 있다. 따라서, 이러한 시험에 의한 검증을 통하여 해석결과의 정확도에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다.

3.2.3 해석

수평낙하로 인한 충격에너지는 충격완충체의 찌그러짐과 본체의 변형에 의한 변형률에너지로 전환되어 흡수되는데, 대부분의 충격은 충돌후 충격완충체의 소성변형에 의하여 흡수된다.

충격흡수에너지는

$$E = \sigma_c V_c = f(D) \tag{12}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서, σ_c 는 찌그러짐 강도이고, V_c 는 찌그러진 체적이다.

충격에너지는 충격완충체의 찌그러진 체적과 밀접한 관계가 있는데, 이 체적은 충격완충체 외경 D 의 함수이다.

여기서는 본체의 외경이 1.8 m이고, 길이가 5.2 m인 실제 수송용기를 기준하여, 충격완충체의 외경을 2.5 m에서 2 m까지로 변화시키는 네가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 이때, 충격완충체의 높이는 모두 0.88 m로 하였다.

각 경우마다 전체 40 msec의 시간에 대하여 충격응답을 구하였는데, HP-755 워크스테이션의 CPU 시간을 기준으로 평균적으로 약 48,000 sec 정도 소요되었다. 하중공차는 2,000 N으로 지정하여 시간증분이 자동적으로 이루어지게 하였으며,

각 증분에서 수렴에 문제가 없도록 하였다. 초기시간증분은 2 μ sec이었고, 각 시간증분량은 0.1 μ sec에서 0.5 msec의 범위에서 자동조절되었다. 그리고, 수치감쇠(artificial damping) 값을 -0.05로 지정하여 고주파노이즈가 감쇠되는 응답을 구할 수 있도록 하였다.

3.3 응력평가

수송용기의 안전성을 평가하기 위해서는 관련법규의 기술기준에 따라 각 부분의 응력은 Tresca의 최대 전단응력이론에 따라 일차막응력(Pm) 및 일차굽힘응력(Pb)의 응력강도로 분류하여 응력제한치와 비교한다. 일차막응력은 단면의 두께를 따라 균일하게 분포한 응력의 평균치이고, 일차굽힘응력은 수직응력중에서 두께를 따라 변하는 응력성분인데, 일차응력은 외력과의 평형을 유지하기 위하여 발생하는 응력이다.

응력평가는 ASME sec. III⁽²⁷⁾에 따라 수송용기의 가상사고조건을 기준하였다. 일차막응력은 설계응력강도(Sm)의 2.4배, 일차막응력과 일차굽힘응력의 합은 설계응력강도의 3.6배를 넘지 않아야 하는데, 이러한 일차응력에 대한 제한은 연상파괴의 건전성을 고려한 것이다.

여기서는 응력평가프로그램을 작성하여 각 해석 경우마다 구조재의 모든 요소에 대하여 최대응력강도를 계산하여 구조적 안전성을 평가하였다. 응력평가프로그램은 3차원 8절점 요소내의 8개 적분점에서의 응력성분들을 내, 외표면으로 연장하여 선형화시키어, 그 표면에서 각각의 주응력성분을 구하고, 일차막응력 및 일차굽힘응력의 응력강도를 계산하여 허용치이내에 드는지를 판단하도록 하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 충격거동분석

충격완충체의 외경이 2.1 m인 case 3에 대한 해석결과를 기준으로 하여 수평낙하로 인한 충격거동을 분석하였는데, 다른 경우도 전체적인 충격거동은 동일하다.

수송용기가 자유낙하하여 바닥면에 떨어지는 순간, 가속도는 최대가 되며, 가속도로 인한 모든 운동에너지는 충격완충체의 찌그러짐과 본체의 변형에 의한 변형률에너지로 전환되어 충격이 흡수되는

데, Fig. 6의 에너지시간이력에서 충돌순간 운동에너지는 변형률에너지로 전환됨을 알 수 있다. 이때, 전체에너지량이 약간 감소하는 것은 충돌순간 운동에너지의 손실이 발생한 것을 의미하는데, 국부적 소성충돌의 가정에 의한 에너지소산으로 손실이 발생된 것으로 분석된다. 충격해석에서 서로 충돌하는 절점사이에서의 명확한 메커니즘을 파악하기는 어려우나, 국부적 소성응답을 통하여 충격에너지가 소산된 것은 분명하다. 이것은 유한요소분할, 마찰, 접촉현상 및 해석체계 등의 문제에서 기인한다.⁽²⁸⁾

수평낙하에서 가장 큰 영향은 충돌후 수송용기의 관성력으로 인하여 발생하는 중앙부의 굽힘현상으로, 양단에서 발생한 충격력이 중앙으로 전파되어 굽힘변형을 야기한다. Fig. 7은 시간에 따른 Tresca 응력의 분포양상을 나타낸 것으로, 충돌후 시간이 지남에 따라 수송용기의 양단에서 시작되는 충격에 의한 영향이 점점 중앙부로 전파되는 것을 알 수 있다. 그리고 외부셀의 양단에서 최대응력과 변형이 발생함을 쉽게 알 수 있다.

양단과 중앙부의 변위에 대한 시간이력을 나타내

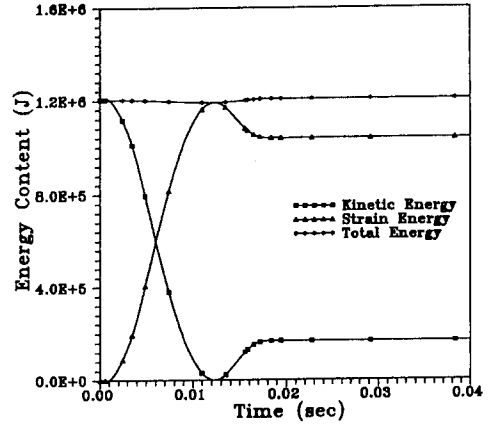


Fig. 6 Energy content time history

는 Fig. 8에서, 충돌이 시작되면 충격완충체의 찌그러짐에 의한 변형이 거의 선형적으로 증가하는 충격거동을 보이다가 찌그러짐이 멈추며 재반동하는 거동을 일으키는 것을 알 수 있다. 그리고 중앙부와 양단의 최대변위가 3 mm의 차이를 나타내는데, 이 차이가 굽힘변형량을 의미한다.

Fig. 9는 각 셀의 양단에서 발생한 가속도의 시

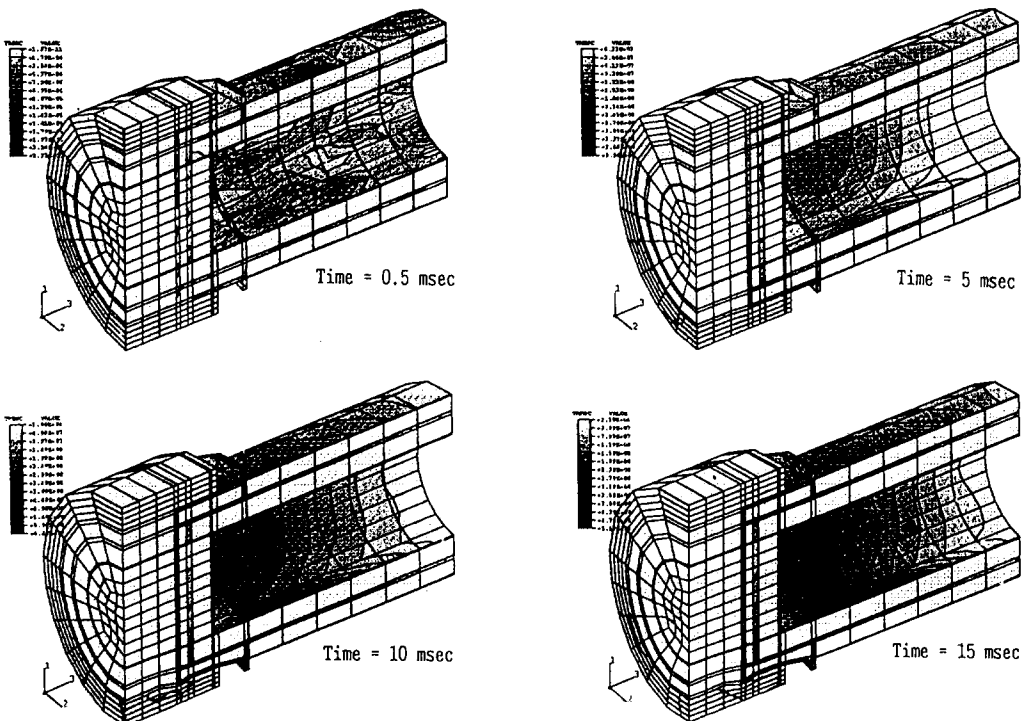


Fig. 7 Stress propagation contours during side drop impact

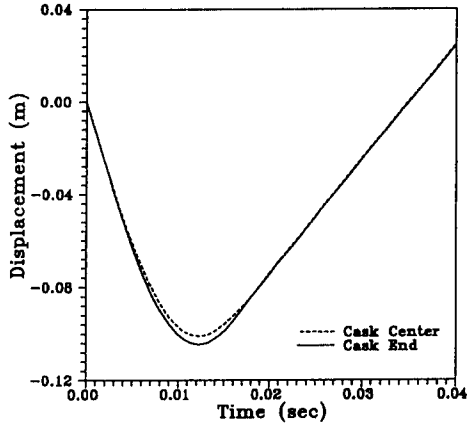


Fig. 8 Displacements time history on cask

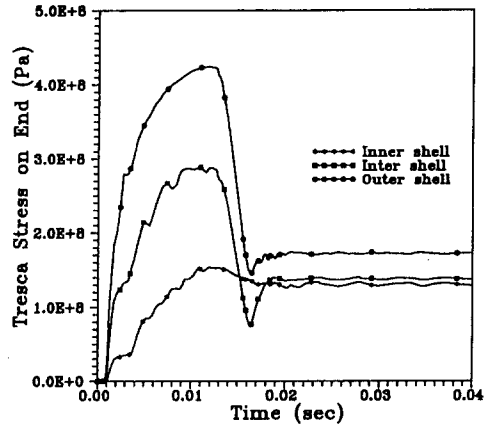


Fig. 10 Tresca stress time history on shell end

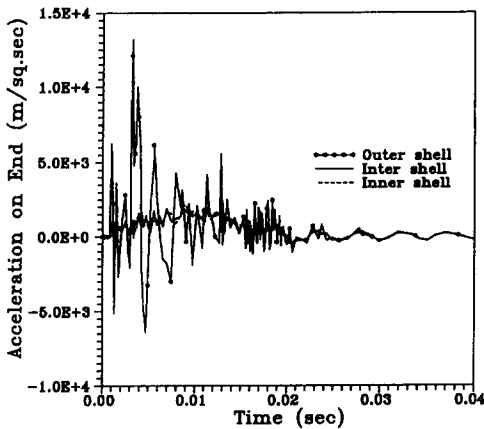


Fig. 9 Acceleration time history on shell end

간이력을 나타낸 것으로, 외부셸의 가속도가 가장 급증하는 것을 알 수 있다. 양단의 충격거동을 나타내는 가속도는 충격완충체의 변형에 따라 충돌면적이 증가하기 때문에 점점 증가하다가 급격히 감소하는데, 이것은 충격완충체가 찌그러지면서 충격력을 흡수한다는 것을 보여주고 있다. 외부셸에 발생한 최대 가속도량은 $1.36 \times 10^4 \text{ m/sec}^2$, 즉, 1,382 g이다. 수송용기의 낙하로 인하여 발생하는 응력은 가속도량으로 나타내는 중력하중(g-값)의 변화에 거의 비례하므로, 수송용기가 받는 충격량의 크기를 중력하중으로 평가하기도 한다.

각 셸에 발생하는 응력 역시 Fig. 10의 양단에 대한 Tresca 응력의 시간이력에서 알 수 있듯이, 충돌후 찌그러짐이 진행되면서 응력이 급증하다가 충격완충체의 찌그러짐이 멈추면서 재반동되는 시점을 고비로 급격히 감소한다. 최대응력 역시 외부

셸에서 충돌직후에 발생하였는데, 최대 425 MPa이다. 그러나, 내부셸의 경우는 응력의 감소가 급격하지 않아 밀도가 큰 납의 침체현상으로 인하여 잔류응력의 영향이 비교적 다른 셸보다 큰 것을 알 수 있다.

4.2 충격완충체의 변화에 따른 충격영향

충격완충체의 변화에 따른 충격영향을 살펴보기 위하여, 충격완충체의 외경을 2.5 m에서 2 m까지 변화시키면서 해석을 수행하여 양단에 발생하는 가속도 및 Tresca 응력의 변화와 변위를 비교하였으며, 그 결과를 Table 3에 정리하였다.

Fig. 11은 외부셸 양단의 가속도시간이력을 각 경우별로 나타낸 것이다. Fig. 12는 각 경우에 대한 중간셸의 Tresca 응력을 비교하여 나타낸 시간이력이다. 충격완충체의 외경이 줄어들면 수송용기에 발생하는 가속도 및 응력 등의 충격력은 증가하는 경향을 보인다. 충격완충체의 외경이 줄어들면 충격면에 수직인 면의 찌그러짐 면적이 감소하게 되고, 이에 비례하는 찌그러짐 하중이 줄어든다. 따라서, 충격흡수력인 찌그러짐 하중이 줄어들기 때문에 충격완충체의 외경이 작을수록 충격력은 증가하는 것을 쉽게 알 수 있다.

Fig. 13은 각 경우에 있어서 양단의 변위에 대한 시간이력을 비교하여 나타내는데, 충격완충체 외경의 감소이 감소함에 따라 변위 또한 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, Table 3에서 최대변위가 발생하는 시간은 줄어들었다. 즉, 충돌거동에 소요되는 시간이 짧을수록 충격의 영향이 커지는 것을 알 수 있다.

Table 3 Summary of acceleration, stress, displacement and impact time dependent on impact limiter

		Case 1 (2.5 m)	Case 2 (2.3 m)	Case 3 (2.1 m)	Case 4 (2.0 m)
Maximum Acceleration, g-value	inner shell	210	219	220	627
	inter. shell	221	261	274	653
	outer shell	814	1057	1382	1926
Maximum Tresca stress, MPa	inner shell	103	120	154	441
	inter. shell	219	237	265	993
	outer shell	373	392	425	1582
Maximum displacement, mm		99	100	101	102
Impact time, msec		12.2	11.9	11.5	11.3

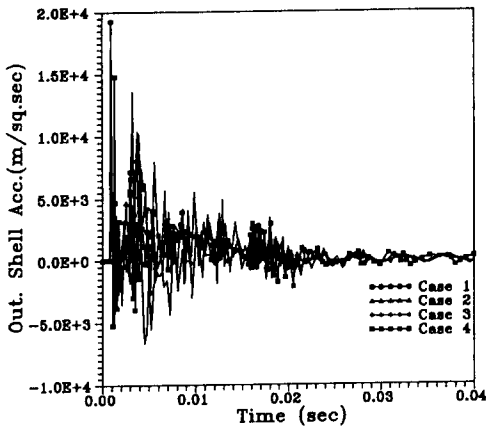


Fig. 11 Comparison of accelerations on outer shell end

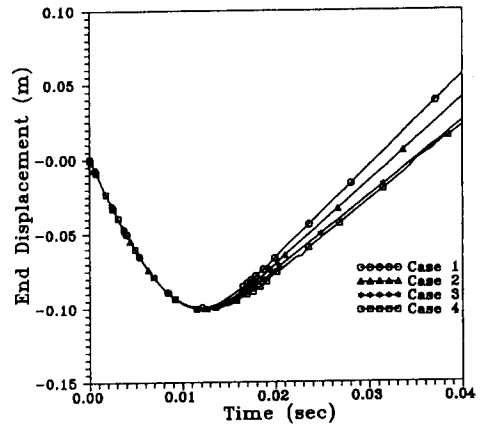


Fig. 13 Comparison of displacements on cask end

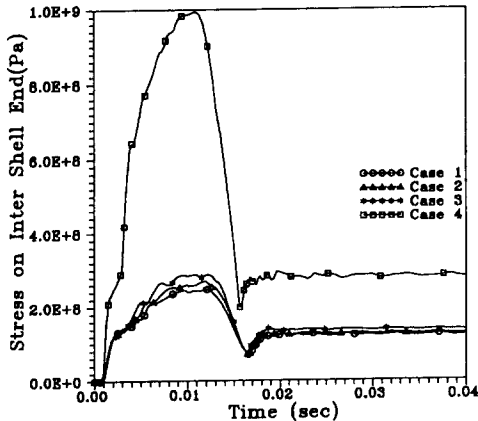


Fig. 12 Comparison of Tresca stresses on intermediate shell end

4.3 수송용기의 안전성평가

수송용기의 양단에 부착되는 충격완충체의 크기가 작을수록 취급이 용이할 뿐만 아니라 여러가지

의 장점을 지니고 있다. 그러나, 충격완충체는 자유낙하 및 외부충돌 등으로 인한 충격에너지를 충분히 흡수하여 수송용기의 본체로 전달되는 충격영향을 최대한 감소시키어 구조재에서 발생하는 최대응력강도가 법규의 허용치 이내에 들도록 하는 최적의 크기로 고려되어야 한다. 충격완충체 외경의 결정은 수평낙하의 하중조건에 따른 영향을 가장 많이 받는다. 따라서, 충격완충체의 크기를 줄여가며 수행한 수평낙하해석의 결과로써 각 셀의 응력강도를 평가하였다. 충격력의 영향이 가장 크게 나타난 수송용기의 양단에 대하여 각 셀의 최대응력강도를 계산하여 허용치와 비교하였다. 각 경우에 대한 각 셀의 최대응력강도를 Table 4에 정리하였다.

Fig. 14는 내부셀에 대한 일차막응력과 일차굽힘응력의 합을 각 경우별로 비교한 것이고, Fig. 15와 Fig. 16은 중간셀 및 외부셀에 대하여 각 경우

Table 4 Maximum stress intensity dependent on impact limiter

		Maximum stress intensity, MPa				Allowable*, MPa
		Case 1 (2.5 m)	Case 2 (2.3 m)	Case 3 (2.1 m)	Case 4 (2.0 m)	
Inner shell	Pm	46	52	67	172	413
	Pm+Pb	127	143	183	621	620
Inter. shell	Pm	81	86	97	420	413
	Pm+Pb	226	245	285	1158	620
Outer shell	Pm	184	191	201	725	413
	Pm+Pb	505	521	549	1892	620

* 1. Pm < 2.4 Sm 2. Pm+Pb < 3.6 Sm

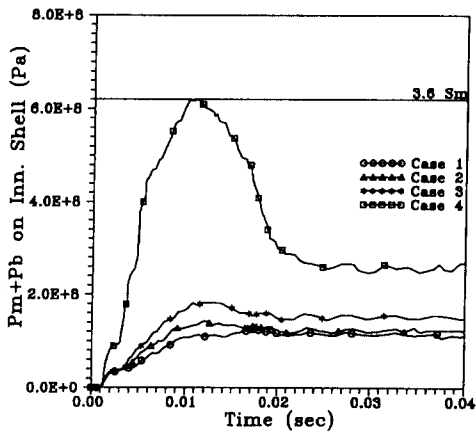


Fig. 14 Comparison of maximum stress intensities on inner shell

의 일차응력들의 합을 비교하여 각각 나타낸 것이다. 일차응력들의 합 또한 충격완충체 외경의 감소에 따라 증가하는 경향을 보였다. 충격완충체의 외경이 2 m인 case 4를 제외한 모든 경우에 격납경계인 내부셀은 물론, 중간셀 및 외부셀 역시 범규의 허용치를 기준으로 하여 일차막응력은 2.4 Sm, 일차막응력과 일차굽힘응력의 합은 3.6 Sm보다 훨씬 낮았다. 중간셀 및 외부셀은 탄소성거동을 가정하여 해석을 수행하였기 때문에 결과에 대한 보수성은 떨어지지만 구조적으로 안전하다고 볼 수 있다. 내부셀의 경우는 선형탄성거동을 가정하였기 때문에, 소성변형을 일으키지 않고 구조적으로 충분히 안전성을 유지한다. 그러나, case 4는 모든 셀의 최대 응력강도가 허용치를 훨씬 초과하였는데, 이는 충격완충체만으로 9 m 수평낙하로 인한 충격을

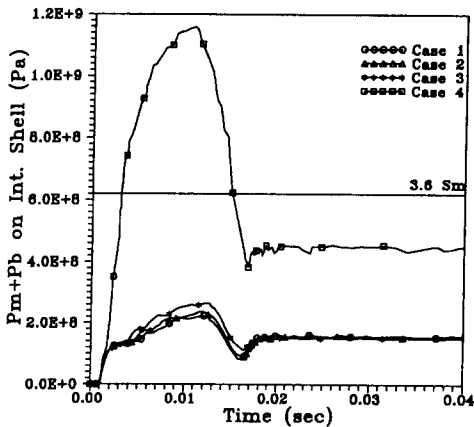


Fig. 15 Comparison of maximum stress intensities on intermediate shell end

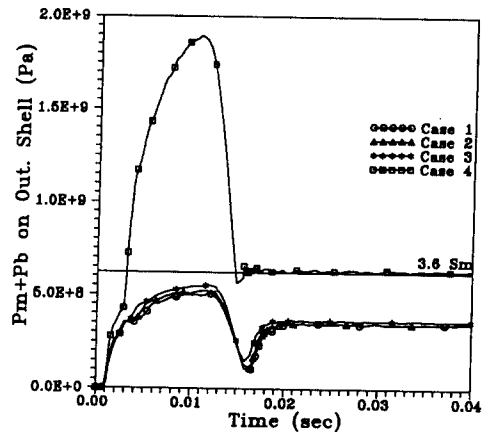


Fig. 16 Comparison of maximum stress intensities on outer shell end

충분히 흡수시키지 못하고, 수송용기의 본체면, 즉 스커트링(skirt ring)이 바닥면에 충돌하였기에 충격력이 직접 본체에 전달되어 응력이 급증한 것으로 판단된다.

따라서, 수송용기의 충격완충체를 변화시키며 수평낙하해석을 수행한 결과, 충격완충체의 외경이 2.1 m가 되어도 본체의 각 셀에 발생하는 최대응력강도가 법규에서 규정한 허용치보다 낮기 때문에 구조적으로 안전함을 알 수 있다.

5. 결 론

사용후핵연료 수송용기의 수평낙하충격에 관한 연구를 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 복잡한 재료와 구조로 구성된 수송용기의 수평낙하조건에 대한 효과적인 해석을 위하여 전산코드에 의한 3차원 동적해석을 수행하였는데, 축소모델에 대한 시험과 비교평가하여 해석의 정확도와 보수성을 확인하였다.

(2) 수평낙하로 인한 충격거동을 파악하였는데, 수평낙하로 인한 운동에너지는 충격완충체와 본체의 변형에 의한 변형률에너지로 전환되면서 충격이 흡수되고, 충돌직후 충격력은 점점 증가하다가 급격히 감소하는 기동을 나타내었다.

충격완충체의 외경이 2.1 m인 경우, 수평낙하로 발생한 외부셀의 최대가속도량은 1,382 g이고, 최대 Tresca 응력은 425 MPa이었다.

(3) 충격완충체의 외경을 2.5 m에서 2 m까지 변화시키면서 해석을 수행하여 수평낙하로 인한 영향을 살펴보았는데, 외경이 줄어들수록 충격력이 증가하고, 변위 또한 증가하는 경향을 보였다.

(4) 수송용기의 구조재에 대하여 법규에 따른 최대응력강도를 계산하고, 안전성을 평가하여서 9 m 수평낙하조건에 충분히 견디는 충격완충체 외경을 2.1 m까지 줄일 수 있었다.

참고문헌

- (1) IAEA, 1985, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials," *IAEA Safety Series*, No. 6.
- (2) 과학기술처, 1985, "방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정," 과학기술처 고시, 제85-8호.
- (3) US NRC, 1988, "Packaging of Radioactive

Material for Transportation of Radioactive Material under Certain Condition," *NRC, 10 CFR Part 71*.

- (4) Hill, T. S. and Joseph, W. W., 1974, "Energy-Absorbing Characteristics of Materials," *Sandia National Lab., SLA-74-0159*.
- (5) Rack, H. J. and Knorovsky, G. A., 1978, "An Assessment of Stress-Strain Data Suitable for Finite-Element Elastic-Plastic Analysis of Shipping Containers," *Sandia National Lab., SAND 77-1872*.
- (6) Robinson, R. A., Hadden, J. A. and Basham, S. J., 1978, "Experimental Studies of Dynamic Impact Response with Scale Models of Lead Shielded Radioactive Material Shipping Containers," *Battelle Columbus Lab., BMI-2001*.
- (7) Burian, R. J., Blark, W. E., Lawrence, A. A. and Balmert, M. E., 1979, "The Validity of Scale Modeling for Large Deformations in Shipping Containers," *Battelle Columbus Lab., BMI-2040*.
- (8) Yoshimura, H. R., Bronowski, D. R., Uncapher, W. L., Attaway, S. W., Bateman, V. I., Carne, T. G., Gregory, D. L. and Huerta, M., 1989, "Evaluation of Impact Limiter Performance During End-on and Slapdown Drop Tests of a One-Third Scale Model Storage/Transport Cask System," *Sandia National Lab., SAND 89-1343*.
- (9) Charman, C. M., Grenier, R. M. and Nickell, R. E., 1982, "Large Deformation Inelastic Analysis of Impact for Shipping Casks," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 759~784.
- (10) Sutherland, S. H., Yoshimura, H. R. and Huerta, M. 1982, "Finite-Element Analysis of Radioactive-Material Shipping Packages," *Sandia National Lab., SAND 82-1335*.
- (11) Miller, J. D., 1985, "Three Dimensional Finite Element Impact Analysis of Nuclear Waste Truck Cask," *Sandia National Lab., SAND 84-1899*.
- (12) Yagawa, G., Ohtsubo, H., Takeda, H., Toi, Y., Aizawa, T. and Ikushima, T., 1984, "A Round Robin on Numerical for Impact Problems,"

- Nuclear Engineering and Design*, Vol. 78, No. 3, pp. 377~387.
- (13) Friley, J. R., 1984, "Comparison of Structural Computer Programs Used for the Analysis of Spent Fuel Shipping Casks," *Battelle Pacific Northwest Lab., PNL-4161*.
- (14) Glass, R. E., Friley, J. R., Obata, H., Nakae, T., Itoh, M. and Rasmusson, P., 1984, "Structural Code Benchmarking: Impact Response Resulting from the Regulatory Nine-Meter Drop," *Sandia National Lab., SAND 84-2042C*.
- (15) Nelson, T. A. and Chun, R. C., 1987, "Methods for Impact Analysis of Shipping Containers," *Lawrence Livermore National Lab., NUREG/CR-3966*.
- (16) Pfeiffer, P. A. and Kennedy, J. M., 1989, "Free Drop Impact Analysis of Shipping Cask," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 114, No. 1, pp. 33~52.
- (17) Shirakura, T. and Fukuda, Y., 1989, "Drop Impact Analysis of Spent Fuel Transportation Packaging," *Kobe Steel Engineering Reports*, Vol. 39, No. 2, pp. 29~32.
- (18) Miller, G. K., 1993, "Calculation of Impact Loads for High Energy Drops of Cylindrical Containers," *Int. Jr. of Impact Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 511~526.
- (19) Cooper, C. A., Neilson, A. J., Butler, N. and Bazell, C. J., 1988, "Three-Dimensional Effects in Flask Impact Testing," *UK AEE Winfrith, AEEW-M2520*.
- (20) Altes, J., Geiser, H., Völzer, W., Frenk, A. and Deeken, G., 1993, "Finite Element Analysis for the Impact Behaviour of a Cask Interacting with a Rigid Pin," *Trans. of the 12th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Vol. J, pp. 77~82.
- (21) Borgesson, L., 1993, "Mechanical Interaction Between Rock, Buffer and Canister in Repositories," *Proc. of the 1993 Int. Conf. on Nuclear Waste Management and Environmental Remediation*, Vol. 1, pp. 29~37.
- (22) 강희영외 15인, 1989, "KSC-4 수송용기 안전 성분분석보고서," 한국원자력연구소 KAERI/TR-137/89.
- (23) 이영신, 김용재, 1994, "낙하충격을 받는 방사성물질 수송용기의 동적거동에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제18권, 제11호, pp. 2805~2816.
- (24) 구정희, 서기석, 강희영, 김영진, 1995, "경사낙하충돌조건하의 사용후핵연료 수송용기의 동적거동에 대한 유한요소해석," 대한기계학회논문집, 제19권, 제12호, pp. 3252~3259.
- (25) HKS Inc., 1993, *ABAQUS Theory Manual Ver. 5.3*.
- (26) HKS Inc., 1993, *ABAQUS/Standard User's Manual Ver. 5.3*.
- (27) ASME, 1994, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Component," *ASME*, Sec. III.
- (28) Zhong, Z. H., 1993, *Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems*, Oxford University Press.