

# 모드중첩기법을 이용한 CASK의 동적충격응답해석

## A Study on the Dynamic Impact Response Analysis of Cask by Modal Superposition Method

이 영 신†      김 용 재\*      최 영 진\*\*      김 월 태\*\*\*  
Lee, Young-Shin      Kim, Yong-Jae      Choi, Young-Jin      Kim Wol-Tae  
(논문접수일 : 2004년 9월 2일 ; 심사종료일 : 2005년 8월 10일)

### 요 지

다양한 분야에서 방사성물질을 수송하기 위해 사용되고 있는 수송용기(cask)는 국내 원자력안전규정 및 IAEA 운반규정에서 정한 9m 자유낙하충격의 가상사고조건을 만족시켜야 된다. 현재까지 수송용기의 낙하충격력은 주로 복잡한 계산과정을 갖는 유한요소해석에 의해 수행되어 왔다.

본 논문에서는 수송용기 본체의 동적충격응답에 대해 모드중첩기법을 이용하여 해석하고 그 해법방법을 제시하였다. 해석결과는 이전에 실시되었던 시험결과와 유한요소해석과 비교를 통하여 그 타당성을 입증하였다. 본 해석방법은 유한요소해석과 비교하여 간단한 방법으로서 수송용기에 대한 대체적인 동적응답을 예측할 수 있다.

**핵심용어** : 모드중첩기법, 수송용기, 낙하충격, 동적응답

### Abstract

The cask is used to transfer the radioactive material in various fields required to withstand hypothetical accident condition such as 9m drop impact in accordance with the requirement of the domestic regulations and IAEA.

So far the impact force has been obtained by the finite element method with complex computational procedure. In this study, the dynamic impact response of the cask body is analyzed using the mode superposition method, and the analysis method is proposed. The results are also validated by comparing with previous experimental results and finite element analysis results. The present method is simpler than finite element method and can be used to predict the global impact response of cask

**keywords** : mode superposition method, cask, drop impact, dynamic response

## 1. 서 론

방사성물질의 수송은 잠재된 사고 가능성 때문에 교통사고가 빈번한 요즈음 관심의 대상이 되고 있다. 수송 중 사고로 인하여 방사성물질이 누출될 경우 인간과 환경에 심각한 영향을 초래할 수 있기 때문에 수송용기의 설계, 제작, 포장 그리고 수송과정 등 공정의 제 단계마다 안전요건의 철저한 확인을 통하여 수송이 안전하게 이루어지도록 하는 것이 무엇보다 중요하다.

방사성물질 수송에서 가장 중요한 안전확보 수단은 수송

용기이다. 수송용기는 일반적으로 원통형인데 방사선을 차폐시키는 차폐재료 및 이를 구조적으로 지탱하는 구조재료로 이루어져 있으며, 내부셀과 외부셀로 이루어진 구조재 사이에 방사선차폐 재료가 들어있는 형태이다. 수송용기의 안전요건에 관하여는 국내 원자력법 관련 방사성물질 운반규정(과학기술부, 2001), 국제원자력기구(IAEA)의 방사성물질 운반안전규정 및 미국 10CFR71(IAEA, 1996) 등 국내·외의 방사성물질 수송관련 규정에서 정하고 있다. 이들 규정에서 수송용기에 부여되는 시험조건은 적재 및 하역 과정에서 발생할 수 있는 사고를 가정한 정상수송조건(normal trans-

† 책임저자, 정회원 · 충남대학교 공과대학 기계설계공학과 교수  
전화: 042-825-6531 ; Fax: 042-822-7366

E-mail: leeys@cnu.ac.kr

\* 한국원자력안전기술원 책임연구원

\*\* 충남대학교 대학원

\*\*\* 한국원자력안전기술원 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2006년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2006년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

port conditions) 및 수송 중에 발생할 수 있는 사고를 가정한 가상사고조건(hypothetical accident conditions)에 대한 시험으로 나누고 각 시험조건에서 제시된 시험을 실시한 후에 수송용기는 방사성물질의 누출 없이 건전성을 유지하여야 한다고 규정하고 있다. 정상수송조건에 대한 시험은 5 cm/h 강우량에 해당하는 물을 수송용기에 1시간 동안 뿌리는 살수시험(water spray test), 견고한 바닥 위 최대 1.2m 높이에서 수송용기를 떨어뜨리는 낙하시험(free drop test), 수송용기 중량의 5배에 해당하는 중량을 수송용기 위에 적층하여 24시간 가압하는 적층시험(stacking test) 그리고 직경 3.2cm 중량 6kg인 봉을 시험물 1m 높이에서 수송용기에 낙하시켜 타격을 가하는 관통시험(penetration test)으로 이루어져 있다. 또한, 가상사고조건에 대한 시험은 견고한 바닥 위의 9m 높이에서 수송용기를 떨어뜨리는 자유낙하시험(9m free drop test), 직경 15cm, 길이 20cm인 연강봉을 견고하게 고정시켜 놓고, 수송용기를 1m 높이에서 연강봉 위에 낙하시키는 타격시험(puncture test), 800°C 화재 환경 속에 수송용기를 30분간 방치시키는 열시험(thermal test) 그리고 물 15m 깊이에 수송용기를 8시간 동안 놓아두는 침수시험(water immersion test)으로 이루어져 있으며, 사용후 핵연료를 운반하는 수송용기의 경우에 침수시험은 물 깊이가 200m에서 1시간 이상 침수시키는 강화침수시험(enhanced water immersion test), 중량이 500kg이하이고, 외부재원을 기준으로 전체 밀도가 1,000kg/cm<sup>3</sup>이하인 수송용기인 경우 한 변의 길이가 1m이고, 중량이 500kg인 정사각 연강판을 9m 높이에서 수송용기에 낙하시켜 타격을 가하는 강판낙하시험(steel plate drop test)이 부가된다.

가상사고조건에 대한 시험 중에서도 9m 자유낙하시험은 수송용기의 구조적 건전성에 가장 큰 영향을 미칠 수 있으므로 중요한 시험조건이 된다(NRC Regulatory Guide 7.6, 1978). 이 시험에서 수송용기를 낙하시킬 때 수송용기에 최대의 손상을 가져오는 방향으로 낙하시키도록 하고 있으나 최대의 손상을 가져올 수 있는 방향을 찾기가 용이하지 않기 때문에 주로 수송용기를 견고한 바닥(unyielding surface)에 수직으로 낙하시키는 수직낙하(vertical drop), 견고한 바닥에 평행하게 낙하시키는 수평낙하(side drop) 그리고 수송용기의 무게 중심과 충격점이 연결된 일직선이 견고한 바닥과 수직이 되어 경사지게 낙하시키는 모서리낙하(corner drop)로 구분하여 실시한다.

9m 자유낙하시험에서 수송용기가 낙하여 견고한 바닥에 충돌하는 과정을 살펴보면 수송용기가 낙하여 충격을 받는 1차 충격(primary impact)과 1차 충격 직후에 충격점을 기준으로 회전관성이 생기게 되고 이로 인하여 불안정해져서 견고한 바닥에 완전히 넘어지면서 수송용기에 충격을 주는

2차 충격(secondary impact)이 있게 된다. 1차 충격과정은 수직낙하와 수평낙하에만 발생하나 임의의 각도를 가지고 비스듬히 낙하하는 경사낙하(oblique drop)는 1차 충격과 2차 충격과정이 있게 된다. 경사낙하에서 가늘고 긴 수송용기인 경우 1차 충격보다 2차 충격으로 인한 충격력 때문에 수송용기에 더 많은 손상을 발생시킬 수 있다.

수송용기에는 충격력 흡수능력이 우수한 재료로 제작된 충격완충체(impact limiter)를 수송용기의 상부와 하부에 부착하는데 이는 자유낙하에서 발생하는 충격력을 충격완충체의 압착(crushing) 과정을 통하여 흡수하고 수송용기에 전달되는 충격력을 감소시키는 역할을 하게된다. 따라서, 충격완충체에 사용되는 재료들에 대한 충격에너지 흡수특성이 파악되어야 한다.

자유낙하 충격하중을 받는 수송용기의 동적거동을 평가하는 방법에는 주로 해석적인 방법과 시험적인 방법이 있다. 해석적인 방법에는 주로 간편계산법과 유한요소법이 이용되고 있다(이영신 등, 1994; 정성환 등, 1997; Lee 등, 2004; Ryu 등, 2001; Chung 등, 2001). 최근에 이영신 등은 CASK의 방사선조사특성을 고려한 충격해석을 수행하였다(이영신 등, 2001). 또한 LS-DYNA3D 및 ABAQUS/Explicit Program을 상호비교한 충격해석과 차원해석을 이용한 실험식공식화 연구도 수행하였다(이영신 등, 2004; 2005).

현재 수송용기의 낙하충격에 대한 동적응답해석을 상용 유한요소해석 프로그램에 의하여 주로 수행하고 있다. 이 방법은 수송용기 설계 후 안전성평가 등 상세한 해석에 필요한 부분에 대한 해석도구가 될 수 있으나 모델링에 시간이 많이 소요되고 비용이 소요된다는 단점도 있다. 이러한 단점을 해결하는 방안으로 이전에 시도되지 않은 모드중첩기법을 이용하여 동적응답에 대한 방정식을 유도하고 그 해를 제시하였다(강희영 등, 1989; 김용재, 2001). 본 논문에서는 이 방법을 이용하여 사용후핵연료 수송용기 해석모델에 대한 동적응답을 해석하였다. 또한 이론적 해석방법으로서 대체적인 동적응답을 알고자 할 경우에 유용하게 사용될 수 있는 가능성을 확인하였다.

## 2. 동적충격응답해석

Fig.1과 같은 원통형 수송용기의 충격모델에 대한 동적충격응답해석을 수행하였다.

### 2.1 수평낙하해석

#### (가) 정규좌표 응답방정식

수평낙하에서 기하학적 변위좌표를 모드진폭 또는 정규좌표로 변환시킨다. 1차원 연속체에서 이러한 변환은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

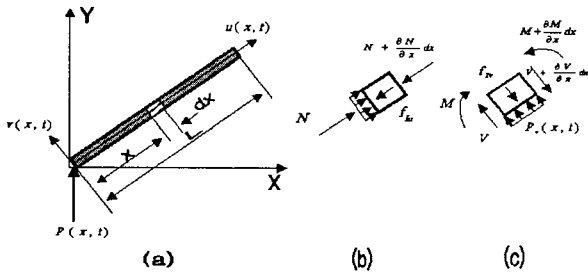


Fig.1 Impact model of cylindrical rigid body

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{\Psi}_i(x) Y_i(t) \quad (1)$$

윗 식은 단순히 물리적으로 수용할 만한 변위 패턴이 구조물의 진동 모드 형상의 적당한 진폭을 중첩함으로써 얻어질 수 있음을 나타낸다. 어떤 주어진 형상에 포함된 모드 성분은 직교조건(orthogonality)을 적용함으로써 계산될 수 있다.

질량분포에 대한 축방향 모드형상의 직교는 Betti법칙을 사용하여 유도될 수 있다. 보는 그것의 길이를 따라 임의로 변하는 강성과 질량을 가질 수 있고, 비록 그림의 경우는 단순지지이지만 임의의 경계조건을 갖을 수 있다.

이들 두 개의 변형패턴에 적용된 Betti법칙은 모드 m의 변형에 작용한 모드 n의 관성력에 의한 일은 모드 n의 변형에 작용한 모드 m의 관성력에 의한 일과 같다. 즉,

$$\int_0^L v_m(x) f_{In}(x) dx = \int_0^L v_n(x) f_{Im}(x) dx \quad (2)$$

여기서,  $f_{In}(x) = \omega_n^2 m(x) \bar{\Psi}_n(x) Y_n$ ,  $f_{Im}(x) = \omega_m^2 m(x) \bar{\Psi}_m(x) Y_m$ 이므로 이들을 식 (2)에 대입하여 모드 형상함수로 나타내면 다음 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} & Y_m Y_n \omega_n^2 \int_0^L \bar{\Psi}_m(x) m(x) \bar{\Psi}_n(x) dx \\ &= Y_m Y_n \omega_m^2 \int_0^L \bar{\Psi}_n(x) m(x) \bar{\Psi}_m(x) dx \end{aligned} \quad (3)$$

이것을 다시 쓰면,

$$(\omega_m^2 - \omega_n^2) \int_0^L \bar{\Psi}_m(x) \bar{\Psi}_n(x) m(x) dx = 0 \quad (4)$$

마지막으로 두 모드의 진동수가 다르다면 그들의 모드형상은 직교조건을 만족해야 한다.

$$\int_0^L \bar{\Psi}_m(x) \bar{\Psi}_n(x) m(x) dx = 0 \quad (5)$$

만약 두 모드의 진동수가 같다면 직교조건은 작용되지 않는다. 그러나 이 조건은 보통 구조 문제에서는 자주 발생되

지 않는다.

강성을 포함한 두번째 직교조건이 분포파라미터계(distributed coordinate system)에 대하여 유도될 수 있다. 비균질보의 경우, 자유진동에서 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI(x) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + m(x) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

n번째 모드에서 운동을 다음과 같이 쓸 수 있고,

$$v_n(x,t) = \bar{\Psi}_n(x) Y_n \sin \omega_n t \quad (7)$$

식 (6)에서 두번째 항은 다음과 같이 된다.

$$m(x) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = -m(x) \omega_n^2 \bar{\Psi}_n(x) Y_n \sin \omega_n t \quad (8)$$

여기서  $\sin \omega_n t$ 를 소거하면 식 (6)는 다음과 같다.

$$Y_n \frac{d^2}{dx^2} \left( EI(x) \frac{d^2 \bar{\Psi}_n}{dx^2} \right) = Y_n \omega_n^2 m(x) \bar{\Psi}_n \quad (9)$$

따라서, 직교관계 식 (9)에서 관성력의 항인  $m(x) \bar{\Psi}_n$ 은 횡하중을 굽힘강성(flexural rigidity)항으로 나타내어 대치될 수 있다.

따라서,

$$\int_0^L \bar{\Psi}_m(x) \frac{d^2}{dx^2} \left( EI(x) \frac{d^2 \bar{\Psi}_n}{dx^2} \right) dx = 0 \quad (10)$$

식 (10)을 두번 적분하면 이 직교조건의 더 편리한 대칭 형태가 얻어진다. 즉,

$$\bar{\Psi}_m V_n \Big|_0^L - \bar{\Psi}_m M_n \Big|_0^L + \int_0^L \bar{\Psi}_m \bar{\Psi}_n'' EI(x) dx = 0 \quad \omega_m \neq \omega_n \quad (11)$$

식 (11)에서 처음 두항은 모드 m의 끝단 변위(end displacement)에 작용한 모드 n의 경계 전단력에 의한 일과 모드 m의 회전에 작용한 모드 n의 단 모멘트에 의한 일을 나타낸다. 단순지지, 힌지 또는 자유단 조건인 경우 이들 항은 사라질 것이다. 그러나 그들은 보가 탄성 지지되거나 그것의 끝에 집중질량이 있을 경우 직교관계를 제공한다.

식 (5)과 (10) 또는 식 (11)에서 유도된 직교조건이 비균질 특성치를 가진 일반적인 보에 적용될 수 있다.

식 (5)과 식 (10)에 나타낸 두 직교관계를 처음 두 항에 적용하면 n차 항을 제외한 급수의 모든 항이 소거되며 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \dot{Y}_n(t) \int m(x) \bar{\Psi}_n^2(x) dx \\ & + Y_n(t) \int_0^L \bar{\Psi}_n(x) \frac{d^2}{dx^2} \left( EF \frac{d^2 \bar{\Psi}_n}{dx^2} \right) dx \\ & = \int_0^L \bar{\Psi}_n(x) P_n(x, t) dx \end{aligned} \quad (12)$$

식 (11)의 처음 두 적분항의 관계는 식 (9)의 양변에  $\bar{\Psi}_n(x)$  를 곱하고 적분함으로써 다음과 같이 얻어진다.

$$\int_0^L \bar{\Psi}_n(x) \frac{d^2}{dx^2} \left( EF \frac{d^2 \bar{\Psi}_n}{dx^2} \right) dx = \omega_n^2 \int_0^L \bar{\Psi}_n^2 m(x) dx \quad (13)$$

윗 식에서 우변의 적분항은 모드형상 우변  $\bar{\Psi}_n(x)$ 와 관련된 일반질량(generalized mass)이다. 따라서, 일반질량( $M_n$ )과 일반하중( $P_n$ )에 대한 표준식(standard expression)을 도입하면 다음과 같이 된다.

$$M_n = \int_0^L m(x) \bar{\Psi}_n^2(x) dx \quad (14)$$

$$P_n(t) = \int_0^L \bar{\Psi}_n(x) P_n(x, t) dx \quad (15)$$

마지막으로 비연성 수평낙하에 대한 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$M_n \ddot{Y}(t) + \omega_n^2 M_n Y_n(t) = P_n(t) \quad (16)$$

윗 식에서  $P_n(t)$ 는 모드형상  $\bar{\Psi}_n(x)$ 와 관련된 일반하중이다.

(나) 동적응답해석

수평낙하 충격하중에 대한 균질 강체빔의 동적응답은 식 (14)과 식 (15)에서 일반질량과 일반하중을 구하면 다음과 같이 된다.

$$M_n = \int_0^L m(x) \bar{\Psi}_n^2(x) dx = \bar{m} \int_0^L \sin^2 \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{\bar{m}L}{2} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P_n &= \int_0^L P(x, t) \bar{\Psi}_n(x) dx = P_0 \bar{\Psi}_n(x = p_1 L, p_2 L) \\ &= P_0 \left( \sin \frac{n\pi p_1 L}{L} + \sin \frac{n\pi p_2 L}{L} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서,  $p_1, p_2$  는 수평낙하시에 수송용기에 작용하는 충격하중 작용위치이다.

식 (16)의 정규좌표 운동방정식을 Duhamel적분식을 이용하여 풀면 다음과 같이 된다.

$$Y_n(t) = \frac{1}{M_n \omega_n} \int_0^L P(\tau) \sin \omega_n(t - \tau) d\tau \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Y_n(t) &= \frac{2P_0}{mL\omega_n} \int_0^t \left( \sin \frac{n\pi p_1 L}{L} + \sin \frac{n\pi p_2 L}{L} \right) \sin \omega_n(t - \tau) d\tau \\ &= \frac{2P_0}{mL\omega_n^2} P_0 \left( \sin \frac{n\pi p_1 L}{L} + \sin \frac{n\pi p_2 L}{L} \right) (1 - \cos \omega_n t) \end{aligned} \quad (20)$$

다음 변위응답을 정규좌표식 식 (1)로부터 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \bar{\Psi}_n(x) Y_n(t) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2P_0}{mL\omega_n^2} \left( \sin \frac{n\pi p_1 L}{L} + \sin \frac{n\pi p_2 L}{L} \right) \\ &\quad \times (1 - \cos \omega_n t) \sin \frac{n\pi x}{L} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,  $\omega_n^2 = n^4 \pi^4 EI / mL^4$ 이다.

어느 시간에서 구조물의 동적변위가 구해지면 그 시점에서 구조물의 내력(internal force)은 구조물의 힘-변위 관계를 적용하여 구할 수 있다. 보요소에 대해, 내부 모멘트는 곡률에 비례한다. 따라서, 변위식의 2차 도함수는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} M(x, t) &= EF \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \\ &= EF \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2P_0}{mL\omega_n^4} \left( \sin \frac{n\pi p_1 L}{L} + \sin \frac{n\pi p_2 L}{L} \right) \\ &\quad \times (1 - \cos \omega_n t) \left( -\frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

2.2 수직낙하해석

(가) 정규좌표 응답방정식

모드중첩해석의 필수적인 작업은 기하학적 변위좌표를 모드진폭 또는 정규좌표로 변환시키는 것이다. 1차원 연속체에서 이러한 변환은 다음 식으로 나타낸다.

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Psi_i(x) Y_i(t) \quad (23)$$

윗 식은 수평낙하에서와 마찬가지로 단순히 물리적으로 수용할 만한 변위패턴이 구조물의 진동 모드형상의 적당한 진폭을 중첩함으로써 얻어질 수 있음을 나타낸다. 어떤 주어진 형상에 포함된 모드 성분은 직교조건(orthogonality)을 적용함으로써 계산될 수 있다.

질량분포에 대한 축방향 모드형상의 직교는 Betti법칙을 사용하여 유도될 수 있다.

$$\int_0^L \Psi_m(x) \Psi_n(x) m(x) dx = 0 \quad (24)$$

축방향 강성특성치에 대한 직교관계는 자유진동의 조화적 시간변화가 대입된 운동방정식에서 유도될 수 있다. 다시 말해서, n차 모드변위를 다음과 같이 나타냈을 때,  $u_n(x,t) = \Psi_n(x) \sin \omega_n t$  이 되고 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_n^2 m(x) \Psi_n = - \frac{d}{dx} \left[ EA(x) \frac{d\Psi_n}{dx} \right] = 0 \quad (25)$$

따라서, 식 (25)의 직교관계에서 관성력 항은 등가축방향 탄성력 항으로 대치될 수 있다. 그 결과,

$$\int_0^L \Psi_m(x) \frac{d}{dx} \left[ EA(x) \frac{d\Psi_n}{dx} \right] dx = 0 \quad (26)$$

식 (26)을 부분 적분하면 더 편리한 대칭형태 직교관계가 유도된다.

$$\Psi_m N_n \Big|_0^L - \int_0^L \Psi_m \Psi_n EA(x) dx = 0, \omega_m \neq \omega_n \quad (27)$$

윗 식에서 첫 번째 항은 모드 m의 끝단 변위(end displacement)에 작용하는 모드 n의 경계축력(boundary axial force)에 의하여 행해진 일을 나타낸다. 즉, 이항은 봉이 자유단 또는 고정단 조건을 갖는 경우 없어질 것이다.

모드형상 좌표변환은 임의의 동적계의 비연성 운동방정식에 적용된다. 그러므로 1차원 요소의 축방향에도 적용할 수 있다. 식 (23)를 축방향 운동방정식을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\sum_{i=1}^{\infty} m(x) \Psi_i(x) \ddot{Y}_i(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{d}{dx} \left[ AE(x) \frac{d\Psi_i}{dx} \right] Y_i(t) = P_u(x,t) \quad (28)$$

식 (28)에  $\Psi_n(x)$  항을 곱하고, 식 (24)과 식 (26)에 나타난 직교관계를 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \ddot{Y}_n(t) \int m(x) \Psi_n^2(x) dx \\ & + Y_n(t) \int_0^L \Psi_n(x) \frac{d}{dx} \left[ AE(x) \frac{d\Psi_n}{dx} \right] dx \\ & = \int_0^L \Psi_n(x) P_u(x,t) dx \end{aligned} \quad (29)$$

식 (25)의 탄성력 항을 관성력으로 치환하고 일반질량( $M_n$ )과 일반하중( $P_n$ )에 대한 표준식을 도입하면 다음과 같이 된다.

$$M_n \ddot{Y}_n(t) = \int_0^L m(x) \Psi_n^2(x) dx \quad (30)$$

$$P_n(t) = \int_0^L \Psi_n(x) P_u(x,t) dx \quad (31)$$

마지막으로 비연성 축방향 정규좌표 운동방정식이 다음과 같이 된다.

$$M_n \ddot{Y}_n(t) + \omega_n^2 M_n Y_n(t) = P_n(t) \quad (32)$$

윗 식에서  $P_n(t)$ 는 모드형상  $\Psi_n(x)$ 와 관련된 일반하중이다. 이상에서 서술한 바와 같이 진동형상이 결정되면 정규좌표 형태에 대한 축소는 모든 구조물에서 같은 형태의 기능을 갖는다.

(나) 동적응답해석

수직낙하 충격하중에 대한 균질 강체법의 동적응답은 일반질량과 일반하중을 구하는 것으로부터 시작된다. 모드형상 및 진동수를 대입하여 일반질량과 일반하중을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} M_n &= \int_0^L m(x) \Psi_n^2(x) dx \\ &= \bar{m} \int_0^L \sin^2 \left( \frac{2n-1}{2} \frac{\pi x}{L} \right) dx = \frac{\bar{m}L}{2} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} P_n &= \int_0^L P_u(x,t) \Psi_n(x) dx \\ &= P_0 \Psi_n(x=p_1 L) \\ &= P_0 \sin \left( \frac{2n-1}{2} \frac{\pi}{L} p_1 L \right) \end{aligned} \quad (34)$$

식 (32)의 정규좌표 운동방정식을 Duhamel적분식을 이용하여 풀면 다음과 같이 된다.

$$Y_n(t) = \frac{1}{M_n \omega_n} \int_0^L P_u(\tau) \sin \omega_n(t-\tau) d\tau \quad (35)$$

$$Y_n(t) = \frac{2P_0}{mL\omega_n^2} \sin \left( \frac{2n-1}{2} \frac{\pi}{L} p_1 L \right) (1 - \cos \omega_n t) \quad (36)$$

다음 변위응답을 식 (23)로부터 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(x,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \Psi_n(x) Y_n t \\ &= \frac{8P_0}{\pi^2} \frac{L}{AE} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \sin \left( \frac{2n-1}{2} \frac{\pi}{L} p_1 L \right) \times \frac{1 - \cos \omega_n t}{(2n-1)^2} \sin \frac{2n-1}{2} \frac{\pi x}{L} \right] \end{aligned} \quad (37)$$

마지막으로 축력응답은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 N(x,t) &= EA \frac{\partial u}{\partial x} \\
 &= \frac{4P_0 L}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \sin\left(\frac{2n-1}{2} \frac{\pi}{L} p_1 L\right) \times \frac{1-\cos\omega_n t}{2n-1} \cos\frac{2n-1}{2} \frac{\pi x}{L} \right]
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

### 2.3 2차 충격해석

수평면과 일정한 각도로 낙하하는 경사낙하에서는 1차 충격 후 곧이어 수평면에 놓이게 되면서 2차 충격을 받게 되는데, 1차 이때 충격점과 반대되는 끝단 부분이 충격을 받게 된다. 이러한 2차 충격에 대한 동적응답을 구한다. 1차 연속체에서 이러한 변환은 다음 식으로 나타낸다.

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{\Psi}_i(x) Y_i(t)
 \tag{39}$$

윗 식은 수평낙하 및 수직낙하에서와 마찬가지로 단순히 물리적으로 수용할 만한 변위패턴이 구조물의 진동 모드 형상의 적당한 진폭을 중첩함으로써 얻어질 수 있음을 나타낸다. 어떤 주어진 형상에 포함된 모드성분은 직교조건을 적용함으로써 계산될 수 있는데 일반적으로 질량가중치 파라미터 (mass weighting parameter)를 포함한 형태(식 (5))에 이용하는 것이 편리하다. 즉, 식 (5)으로부터

$$\int_0^L \bar{\Psi}_n(x) \bar{\Psi}_n(x) m(x) dx = 0
 \tag{40}$$

임의의 형상  $v(x,t)$ 에 있어서 모드  $n$ 의 기여도를 계산하기 위해서 식 (39)의 양변에  $\bar{\Psi}_n(x) m(x)$ 를 곱하고 적분하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 &\int_0^L \bar{\Psi}_n(x) m(x) v(x,t) dx \\
 &= \sum_{i=1}^{\infty} Y_i(t) \int_0^L \bar{\Psi}_n(x) m(x) \bar{\Psi}_i(x) dx \\
 &= Y_n(t) \int_0^L [\bar{\Psi}_n(x)]^2 m(x) dx
 \end{aligned}
 \tag{41}$$

윗 식은 직교조건에 의하여 우변에는 오직 하나의 항이 무한급수로 남게되고 이 식은 남아있는 하나의 진폭 항에 의해서 쉽게 해결된다.

이상에서 보인 바와 같이 진동형상이 결정되면 정규좌표 형태에 대한 축소는 모든 구조물에서 같은 형태의 기능을 갖는다.

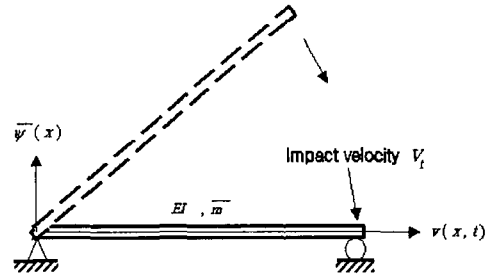


Fig.2 Secondary impact model of the cask rigid body

$$Y_n(t) = \frac{\int_0^L \bar{\Psi}_n(x) m(x) v(x,t) dx}{\int_0^L [\bar{\Psi}_n(x)]^2 m(x) dx}
 \tag{42}$$

식 (42)는 자유진동 문제의 초기조건을 나타내는 모드 진폭을 구하는데 사용될 수 있다. 시간  $t=0$ 일 때 보의 변위  $v(x,0)$ 와 속도  $\dot{v}(x,0)$ 가 주어지면 이에 상응하는 모드 진폭  $Y_n(0)$ 와  $\dot{Y}_n(0)$ 와 식 (42)으로부터 곧바로 구해진다.

Fig. 2에서와 같이 균일 단순보를 고려한다. 이 보의 자유진동은 한지로 지지된 좌측 끝을 회전축으로 하여 물리적으로 지지된 우측 끝을 향하여 낙하하여 2차 충격이 시작되는 것으로 가정한다. 만약 보를 강체로 가정한다면, 접촉시( $t=0$ )의 속도는  $\dot{v}$ 로 표시되는 끝단(tip)속도를 가지고 보의 길이에 따라 선형적으로 비례하게 된다. 따라서 진동이 시작될 때의 속도분포는 다음과 같이 된다.

$$\dot{v}(x,0) = \frac{x}{L} \dot{v}_i
 \tag{43}$$

또, 이때의 변위는  $v(x,0)=0$ 이 되며, 이것은 보가 강체로 회전한다는 사실과 부합된다. 이러한 단순보의  $n$ 차 진동 모드 형상은 다음과 같다.

$$\bar{\Psi}_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{L}
 \tag{44}$$

그래서, 식 (42)의 분모는 다음과 같이 된다.

$$\int_0^L \bar{\Psi}_n^2 m(x) dx = \bar{m} \int_0^L \sin^2 \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{\bar{m}L}{2}
 \tag{45}$$

위의 분자와 분모 항을 결합하면 초기 정규좌표 속도가 얻어진다.

$$\dot{Y}_n(0) = \pm \frac{2\dot{v}_i}{n\pi}
 \tag{46}$$

마지막으로 식 (39)를 이용하면 보의 자유진동 운동은 다음과 같다.

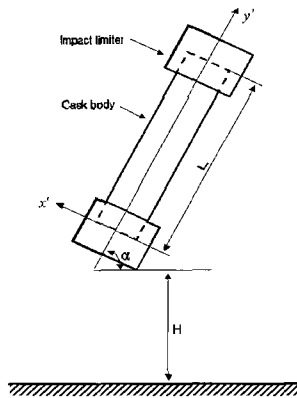


Fig. 3 Analysis model description of cask drop parameters

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{\psi}_n(x) \left( \pm \frac{2v_i}{\pi m \omega_n} \sin \omega_n t \right) \quad (47)$$

이상의 해석은 보의 우측 끝단이 초기 충격 후 롤러 지지점에 밀착되어 있는 것으로 가정하였다.

### 3. 해석결과

#### 3.1. 해석모델

본 연구에서는 Fig.3에서 제시한 적층 원통셀 수송용기의 낙하충격에 대한 해석을 고려한다. 여기서 L은 수송용기 본체의 길이, H는 낙하높이, 그리고 α는 낙하각을 표시한다.

해석대상 적층원통형 수송용기는 가압경수로형 사용후핵연료집합체 4다발을 수송하는데 사용 가능한 KSC-4 수송용기이다. Fig.4는 수송용기 본체의 형상을 보이고 있다. 이 수송용기는 뚜껑을 포함한 수송용기 본체(cask body)와 충격완충체(impact limiter)로 구성된다.

수송용기의 본체는 스테인레스강 재료인 동심의 3개 원통셀로 구성된다. 내부셀의 중심은 내부공간(inner cavity)이라고 하며 4개의 핵연료집합체를 장전하는데 필요한 장전통(fuel basket)이 설치된다. 셀과 셀 사이에는 방사선차폐재료가 셀 형태로 들어가는데 내부셀과 중간셀 사이에는 감마선 차폐재료인 납(lead)이 채워져 있으며 중간셀과 외부셀 사이에는 중성자 차폐재료인 레진(resin)이 채워져 있다. 내부, 중간 및 외부셀은 방사성물질이 수송용기 밖으로 누출되지 않도록 하는 격납(containment)의 역할 및 관련 수송관련규정에서 규정하고 있는 각종 시험조건하에서도 건전성을 유지하여야 하는 구조재의 역할을 한다. 내부, 중간 및 외부셀을 포함한 모든 구조재의 재료는 SUS304 스테인레스강으로 이루어져 있다.

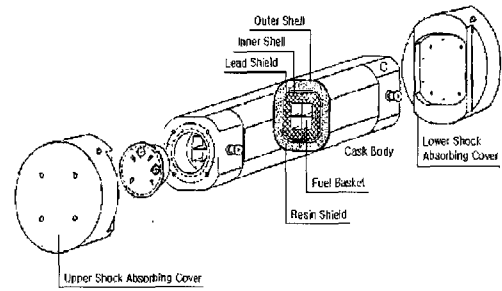


Fig. 4 Configuration of the cask model

충격완충체는 수송용기 본체의 상부와 하부에 부착되게 되는데 수송용기가 낙하하여 견고한 표면 위에 충돌할 시에 충격에너지를 흡수하여 수송용기 본체로 전달되는 충격력을 감소시켜 주는 역할을 한다. 여기서는 충격완충체의 재료로서 충격흡수 능력이 우수한 발사우드와 레드우드가 사용되었다. 이들 두 재료는 충격흡수능력이 우수하며, 특히 발사우드는 비중이 아주 낮고 다른 나무에 비해 강도가 아주 약하기 때문에 충격흡수를 위한 충격완충체로 많이 사용되고 있다.

수송용기의 재원을 살펴보면 외부셀의 내경은 1,194mm이고, 셀 두께는 10mm, 중간셀의 내경은 819mm이고, 셀 두께는 25.4mm 그리고 내부셀의 내경은 489mm이고, 셀 두께는 6mm이다. 셀과 셀 사이에 들어있는 감마방사선을 막는데 사용되는 차폐재료인 납의 두께는 160mm이고, 중성자 입자를 막는데 사용되는 차폐재료인 레진의 두께는 25.4mm이다. 수송용기 본체의 길이는 4,810mm, 충격완충체를 포함한 전체 길이는 5,600mm이다. 빈 수송용기의 중량은 약 34ton이고 핵연료집합체 4개가 장전된 수송용기의 중량은 37.2ton 이다. Table 1은 수송용기에 대한 치수, 중량 및 재료를 보이고 있다. 본 연구에서 해석대상 수송용기의 재료는 Table 2, Table 3에 제시하였다.

#### 3.2 수치결과

수송용기의 형태는 Fig.4에 보인바와 같이 방사선차폐 재료가 강셀의 사이사이에 들어 있고 상부와 하부에 엔드캡(end cap)이 있는 모양을 가정한다. 3차원 구조물을 범요소로 모델링하기 위해서는 다음과 같은 몇가지 가정이 필요하다. (1) 수송용기의 평단면은 수송용기의 중심축에 수직한 면으로 남아있다. (2) 방사선차폐용 재료는 이를 지지하고 있는 내·외부 셀과 동일한 처짐을 갖는다. (3) 방사선차폐용 재료와 내·외부 셀 사이는 완전히 결합되어 있다고 가정하였다.

수직낙하, 수평낙하 및 경사낙하 충격에 대한 해석을 수행하였다. 경사낙하에서는 1차 충격 직후에 곧이어 1차 충

Table 1 Description of the cask model

Features	Dimensions
General	
outside diameter	1,194 mm
inside diameter	489 mm
outside length	4,810 mm
inside length	4,280 mm
Structure shell	
material	SUS304
outer shell inside diameter	819 mm
outer shell thickness	25.4 mm
inner shell inside diameter	489 mm
inner shell thickness	6 mm
bottom thickness	250 mm
cover thickness	265 mm
Radiation shielding shell	
material	Lead
outside diameter	819 mm
shell thickness	160 mm
Impact limiter	
material	Balsa and Red wood
diameter	2,349 mm
thickness	402 mm
Cask total weight	34 tons

격점과 반대되는 부분이 견고한 바닥에 충격을 가져오는 2차 충격(secondary impact)이 있게 되는데 이에 대한 해석을 수행하였다. 경사낙하 및 수평낙하의 경우 전단변형 및 회전관성을 고려한 경우와 이들을 고려하지 않는 경우에 대하여 해석하였다.

자유낙하시에 수송용기가 받는 외부 충격하중을 적용하였다. 수직낙하의 경우 수송용기 본체의 구조재료에 작용하는 내부 축하중을 계산한 후 응력으로 산출되며, 수평낙하의 경우 빔으로 가정하여 빔에 작용하는 모멘트를 계산한 후에 응력으로 산출된다.

(가) 수평낙하

수평낙하에서 충격완충체의 중량은 수송용기의 전 길이에 걸쳐서 균등하게 배분되는 것으로 가정하였다. 해석결과 식 (22)에 의하여 산출되는 수송용기 본체에 발생하는 최대 굽힘모멘트는 수송용기 길이의 중앙에서 발생되고 그 값은  $1.5 \times 10^7$  (N·m)이다. Fig.5는 모드중첩기법에 의하여 해석된 수송용기 중앙에서의 모멘트를 보이고 있다.

Table 2 Material properties of SUS304 stainless steel

Elastic modulus	195.1 GPa
Yielding strength	206.4 MPa
Poisson's ratio	0.3
Ultimate strength	517.1 MPa
Density	7,913 kg/m <sup>3</sup>

(나) 수직낙하

수직낙하에서 수평낙하에서와 마찬가지로 또한 역시 충격완충체의 중량은 수송용기의 전 길이에 걸쳐서 균등하게 배분되는 것으로 가정하였다.

식 (38)에 의하여 산출되는 수송용기 본체에 발생하는 최대 축하중은  $5.7 \times 10^7$  (N)이다. Fig.6는 수송용기의 충격점으로 부터 1/10L지점에 발생하는 축하중을 보이고 있다.

(다) 2차 충격해석

경사낙하의 과정은 9m 높이에서 낙하하여 충격을 받는 1차 충격을 받은 직후 충격점을 기준으로 회전관성이 생겨 견고한 바닥에 들어 누우면서 충격을 받는 2차 충격을 해석하였다.

경사낙하에서 낙하각은 해석모델 수송용기의 무게중심과 충격완충체의 충격점이 낙하면과 수직을 이루는 68°경사낙하를 고려하였다. 이 경사낙하에서 1차 충격시 수송용기의 높이는 4.46m가 되고 이 높이에서 수송용기의 윗부분이 견고한 바닥에 떨어질 때 속도  $v = \sqrt{2gH} = 9.35$  m/s이다. 따라서, 충격시 변위식(47)에 적용하는 초기 속도는 9.35m/s를 적용하였다. 일단 2차 충격 후에는 수평낙하로 취급될 수 있으며 수평낙하에서의 식 (22)를 이용하여 굽힘모멘트를 계산할 수 있다.

수송용기 본체에 발생하는 최대 굽힘모멘트는  $3.7 \times 10^{10}$  (N·m)이었다. Fig.7은 모드중첩기법에 의하여 해석된 수송용기 길이에 따라 발생하는 모멘트를 보이고 있다.

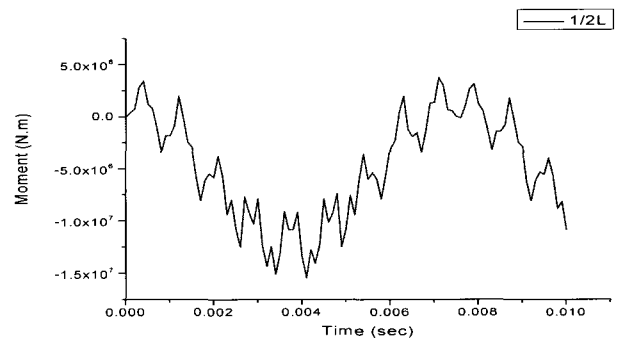


Fig. 5 Moments for side drop of the cask using mode superposition analysis

Table 3 Material properties of lead

Elastic modulus	15.72 GPa
Yielding strength	4.41 MPa
Poisson's ratio	0.42
Ultimate strength	16.97 MPa
Density	11,300 kg/m <sup>3</sup>



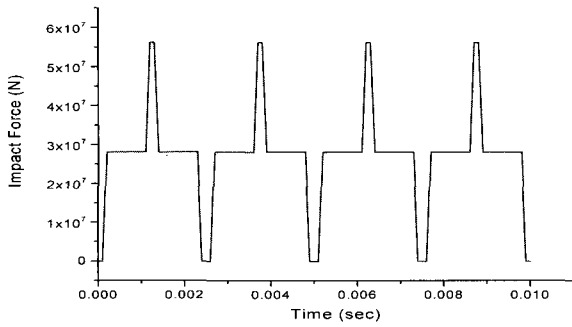


Fig. 6 Impact force for vertical drop of the cask using mode superposition analysis

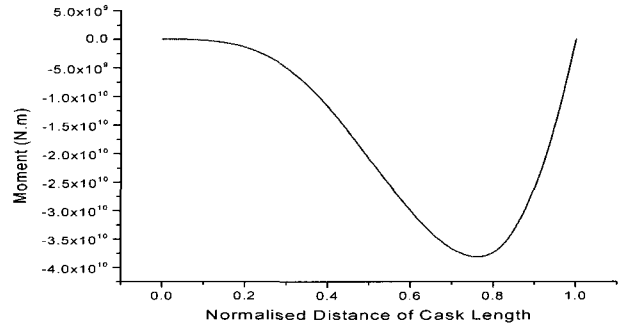


Fig. 7 Moments for secondary impact of the cask using mode superposition analysis

#### 4. 결과 및 고찰

사용후핵연료 수송용기 본체에 대한 동적거동을 파악하기 위하여 수송용기가 9m 높이에서 낙하하여 견고한 바닥에 충돌하는 충격에 대한 동적응답을 모드중첩해석에 의하여 동적응답을 해석하였다. 수평낙하, 수직낙하, 경사낙하 및 경사낙하에서 1차 충격후 곧이어 일어나는 2차 충격에 대한 해석을 수행하였다.

본 연구에서 수송용기를 빔요소(beam element) 또는 강체봉으로 가정하였으므로 모드중첩기법에 의한 해석결과는 빔요소에서의 모멘트, 전단하중 및 축하중의 향으로 나타난다. 그러므로 이들 값들은 수송용기에 사용된 재료의 성능을 평가하기 위하여 응력으로 변환되어야 한다. 응력계산은 수송용기 형태, 즉 단일형(solid)과 적층형(laminated)의 형태 여부에 따라 다르다. 양쪽 모두 주응력은 단면에서의 축하중에 의한 축응력과 단면 두께에 관한 평균 굽힘응력의 합으로 구성된다.

단일형태 수송용기인 경우에 최대응력은 다음과 같이 식에 의하여 구한다.

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I} \tag{48}$$

적층형태 수송용기인 경우에는 각 재료에 발생하는 축하

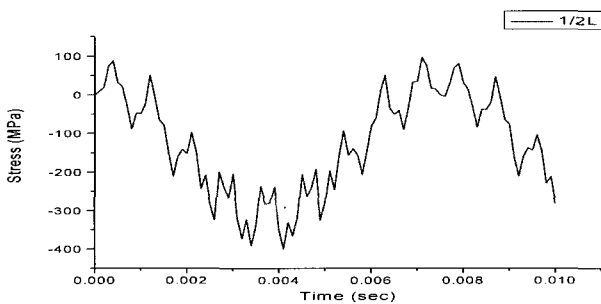


Fig. 8 Stresses for side drop of the cask using mode superposition analysis

중의 부분은 탄성계수에 의하여 결정되는 상대강성(relative stiffness)에 의하여 가중되어야 한다. 합성빔(composite beam) 특성을 이용하면 다음과 같다.

$$AE = A_1 E_1 + A_2 E_2 + A_3 E_3 + \dots + A_n E_n \tag{49}$$

$$EI = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 + \dots + E_n I_n \tag{50}$$

각 단면에서 전체하중에 대한 각 재료의 기여분을 계산할 수 있다. 단면(plane section)이 하중을 받은 후에도 단면을 유지한다고 가정하면, 재료 "i"에 대한 축하중 기여분은  $PE_i/AE$ 로 주어진다. 굽힘 기여분은  $Mc_i E_i/EI$ 로 주어진다. 결과적으로 각 재료에서의 최대응력은 다음식에 의하여 구한다.

$$\sigma_i = \frac{PE_i}{AE} \pm \frac{Mc_i E_i}{EI} \tag{51}$$

적층형태 수송용기의 각 셀의 두께가 작기 때문에 두께에 관한 굽힘응력의 변화는 무시한다. 회전전단응력은 모멘트 기여가 0(zero)인 단면의 중심에서 발생한다.

9m 수평낙하의 경우 최대굽힘모멘트는  $1.5 \times 10^7$  (N·m)이므로 이때의 응력을 산출하면 최대응력은 400MPa이다. Fig. 8은 수송용기 중앙에서의 계산된 응력을 보이고 있다.

9m 수직낙하의 경우 수송용기 본체에 발생하는 최대 축

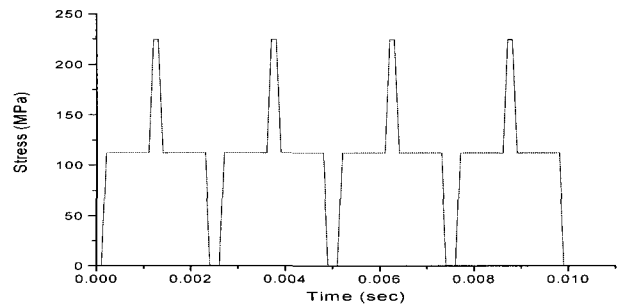


Fig. 9 Stresses for vertical drop of the cask using mode superposition analysis

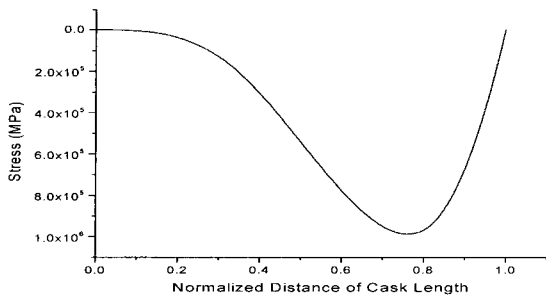


Fig. 10 Stresses for secondary impact of the cask using mode superposition analysis

하중은  $5.7 \times 10^7$ (N)이고, 이를 이용하여 응력을 계산하면 최대응력은 225MPa이다. Fig. 9는 최대응력이력을 보이고 있다.

2차 낙하충격의 경우 과정은 9m 높이에서 낙하하여 충격을 받는 1차 충격을 받은 직후 충격점을 기준으로 회전관성이 생겨 견고한 바닥에 들어 누우면서 충격을 받는 2차 충격을 해석하였다. 경사낙하에서 낙하각은 해석모델 수송용기의 무게중심과 충격원충체의 충격점이 낙하면과 수직을 이루는  $68^\circ$ 경사낙하를 고려되었다. 해석결과 수송용기 본체에 발생하는 최대 굽힘모멘트는  $3.7 \times 10^{10}$ (N·m)이고, 이를 이용하여 응력을 계산하면 최대응력은 98000 MPa이다. Fig.10은 수송용기 길이에 따라 변하는 응력을 보이고 있다. 여기서 최대응력은 충격지점이 아니고 수송용기 길이의 8/10지점에서 발생함을 알 수 있다. 2차 충격에 의한 영향은 수송용기의 길이가 긴 경우에 1차 충격에 의한 영향보다 2차 충격에 의한 영향이 더 클 수 있다.

모드중첩기법에 의한 해석의 타당성은 해석대상 수송용기 축소모델에 대한 시험결과와 비교하였다(김용재 등 2004). 시험을 통한 비교에서는 단지 수직낙하와 수평낙하에 대하여 비교할 수 있었고 경사낙하 및 2차 충격에 대한 시험결과가 없기 때문에 비교되지 못했다. 시험결과와의 비교평가는 직접적인 비교는 이루어지지 못했으나 시험결과와 유한요소해석 결과와의 비교 및 이를 통한 간접적인 비교방법으로 검토되었다.

Table 4는 이들에 대한 비교를 보이고 있다. 여기서 보인 바와 같이 수평낙하인 경우 충격력에 있어서 모드중첩기법에 의한 결과는  $1.57 \times 10^7$ (N)이고, 유한요소해석 결과는  $1.48 \times 10^7$ (N)으로서 모드중첩기법은 유한요소해석과 6%이내에서 비교적 잘 일치하고 있으며, 발생하는 최대응력에 있어서는 모드중첩기법은 400MPa, 유한요소해석결과는 300MPa로서 25% 차이를 보이고 있다. 수직낙하인 경우 충격력에 있어서 모드중첩기법은  $5.7 \times 10^7$ 이고, 유한요소해석결과는  $3.2 \times 10^7$ 으로서 44%의 차이를 보이고 있으나, 응력산출에 있어서는 모드중첩기법의 경우 225MPa이고, 유한요소해석 결과는 278MPa

Table 4 Comparison of the results for impact behaviour of cask model

Drop orientation		Vertical drop	Side drop
Test <sup>14)</sup>	g' value	-118~115	-60~123
	Crush (mm)	138	282
FEM analysis <sup>13)</sup>	g' value	61	37
	Crush (mm)	61	152
	Impact force (N)	$3.2 \times 10^7$	$1.48 \times 10^7$
	Stress (MPa)	278	300
Mode superposition analysis	Impact force(N)	$5.7 \times 10^7$	$1.57 \times 10^7$
	Stress (MPa)	225	400

로서 23%의 차이를 보이고 있다. 비선형충격문제에 있어서 응력값 25%차이를 보였다. 따라서, 모드중첩기법에 의한 수송용기의 동적거동해석은 단순하면서도 가치 있는 이론해석방법이 될 수 있다.

또한, 모드중첩기법은 2차 충격에 대한 해석도 가능하였다. 해석결과는 너무 큰 값을 산출하여 더 검토되어야 할 것으로 생각된다. 모드중첩기법은 상용 유한요소프로그램에 의한 유한요소해석에 치중하고 있는 현재에 있어서 낙하충격하중을 받는 수송용기의 동적거동을 해석하는 이론적 토대를 마련하는 발전적 의미를 내포하는 가치가 있다고 생각된다. 그러나 수송용기는 보통 2중 또는 3중 셸 형태로서 셸 사이에는 방사선차폐재료가 들어가 있는데 이들 차폐재료의 충격 거동에 따른 셸에 미치는 영향 등 상세한 해석이 필요한 부분에는 적용하기 곤란한 단점이 있다고 생각된다.

### 5. 결 론

본 연구를 통하여 사용후핵연료를 운반하는 수송용기의 충격원충체 및 구조재로 사용되는 재료들에 대한 충격하중특성을 분석하였다. 이를 토대로 지금까지 유한요소해석이나 복잡한 계산방법에 의해서 산출하던 충격하중을 간단하고 손쉽게 산출할 수 있는 실험식을 고안하였다. 이 실험식을 이용하여 충격원충체에 대한 특성을 분석하였다. 그리고, 모드중첩기법을 이용하여 사용후핵연료를 운반하는 수송용기의 본체에 대한 동적응답을 해석하였고, 이의 해석방법을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 충격하중 실험식 고안 및 모드중첩기법은 이전에 시도되지 않았던 방법으로서 이들 해석결과는 이전에 실시되었던 시험결과 및 유한요소 해석결과와의 비교를 통하여 타당성을 입증하였다. 또한, 상용 유한요소해석코드를 이용한 해석도 수행하여 충격하중 실험식 및 모드중첩기법을 이용한 해석결과를 비교하고 부재간 접촉조건

에 대한 동적거동도 해석하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 모드중첩기법을 이용하여 수송용기 본체에 대한 해석 결과 이전에 실시되었던 시험결과 및 유한요소해석 결과와 비교하여 타당성을 분석하였는데 그 결과 최대 25% 차이를 보였다. 또한, 수송용기의 1차 충격 후 곧이어 일어나는 2차 충격에서 최대응력의 발생 위치는 1차 충격점으로부터 8/10L에서 일어남을 확인하였다.
- (2) 모드중첩기법은 수송용기 낙하충격에 대한 동적응답 해석방법으로 타당성이 있으나, 경사낙하에서 1차 충격 후 곧이어 일어나는 2차 충격에 대한 해석은 해석결과 예상한 값보다 너무 크게 산출되어 당장 적용하기에 부적합하다고 판단되며 더 검토가 필요하다.
- (3) 사용후핵연료 수송용기 해석모델에 대한 유한요소해석을 수행하여 수송용기 각 부재간 접촉조건에 대한 영향을 분석한 결과 부재간에 접촉조건이 있는 경우 충격에 대한 에너지 거동이 비교적 천천히 일어나며 응력에 있어서는 약 5% 그리고 충격하중에 있어서는 약 6%정도 낮게 나타났다.

## 참 고 문 헌

- 강희영 등 (1989) KSC-4 수송용기의 안전성분석보고서, KAERI/TR-137189, 한국에너지연구소.
- 김용재, 이영신, 최영진 (2005) 차원해석을 이용한 사용후 핵연료 수송용기의 충격력 실험식 공식화, 한국전산구조공학회논문집, 18(3), pp.245~254.
- 김용재 (2001) 사용후핵연료 원통형수송용기의 동적응답해석, 충남대학교 대학원 박사학위논문.
- 과학기술부 (2001) 방사성물질 포장 및 운반에 관한 규정, 과학기술부 고시(개정안).
- 이영신, 이호철, 정성환, 이홍영, 김용재 (2001) 컨테이너 형태의 방사성물질 A형 운반용기에 대한 구조해석, 한국전산구조공학회논문집, 14(2), pp.143~150.
- 이영신, 최영진, 김승중, 김용재, 이재형 (2004) LSDYNA3D 및 ABAQUS/Explicit Program를 이용한 사용후 핵연료 운반용기의 자유낙하 충격특성연구, 한국전산구조공학회논문집.
- 이영신, 김용재 (1994) 낙하추격하중을 받는 방사성물질 수송용기의 동적거동에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 18(11), pp.2805~2816.
- 정성환, 이영신 (1997) 사용후 핵연료 수송용기의 수평낙하 충격에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 21(3), pp. 457~469.
- Chung,S.H., Lee,H.Y., Lee,H.C., Lee,Y.S., (2001) 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), paper#1081.
- Clough, R.W., Penzien, J., (1985) Dynamics of Structures, McGraw-Hill, New York.
- IAEA Safety Standards Series No. ST-1 (1996) Regulation for the Safe Transport of Radioactive Material.
- Lee, Y. S., Kim, H. S., Kang, Y. H., Chung, S. H., Choi, Y. J., (2004) Effect of Irradiation on the Impact and Seismic Response of a Spent Fuel Storage and Transport Cask, Nuclear Engineering and Design, 232(2), pp.123~129.
- NRC Regulatory Guide 7.6.(1978) Design Criteria for the Structural Analysis of Shipping Cask Containment Vessels, USNRC.
- Ryu, C.H., Lee, Y.S., Kim, Y.J., Lee, J.H., Ra, J.Y., (2001) 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), paper #1561.