

(論 文)

# 낙하충격하중을 받는 방사성물질 수송용기의 동적거동에 관한 연구

이영신\* · 김용재\*\*

(1993년 9월 3일 접수)

## A Study on the Dynamic Behaviors of a Shipping Container Under Drop Impact Loading

Young-Shin Lee and Yong-Jae Kim

**Key Words :** Cask(방사성물질 수송용기), Shipping Container(수송용기), Dynamic Impact Analysis(동충격해석), Contact Impact(접촉충격), Finite Element Method(유한요소법)

### Abstract

This paper describes dynamic finite element analyses performed to study the dynamic behaviors of a shipping container under the impact onto rigid target due to the accidental fall from the height of 9 m. Using two and three dimensional techniques, the shipping container which gave the maximum damage, ten different drop orientations are considered ; at intervals of 5° from 45° to 90°. According to the present results, the orientation of the shipping container which gave the maximum damage is 85° from horizontal for oblique drop in the primary impact. In the optimal design of the shipping container, the impact limiter material must be considered importantly because it's proper selection affects the weight and the manufacturing cost of the shipping container. The analysis of the shipping container in this paper demonstrated that the shipping container is structurally sound relative to the regulatory drop test requirements.

### 기 호 설 명

$E$ : 탄성계수	$u$ : 절점변위
$F$ : 외력벡터	$\dot{u}$ : 절점속도
$g$ : 중력가속도	$\ddot{u}$ : 절점가속도
$H$ : 자유낙하높이	$v$ : 자유낙하속도
$I$ : 내력벡터	$\epsilon$ : 감쇠비
$L$ : 수송용기 본체의 길이	$\mu$ : 쿨롱마찰계수
$M$ : 집중질량 대각선행렬	$\alpha$ : 낙하각도
$t$ : 시간	$\omega_{max}$ : 최고차 고유진동수
$\Delta t$ : 시간증분	$\sigma_c$ : 크러싱(crushing) 강도
	$\sigma_y$ : 항복강도
	$\sigma_t$ : 인장강도
	$\rho$ : 밀도

\*정회원, 충남대학교 기계설계공학과

\*\*정회원, 한국원자력안전기술원

ν : 푸아송비

## 1. 서 론

방사성물질(예; 핵분열물질, 방사성 동위원소 등)을 수송하는데 사용되는 용기를 방사성물질 수송용기(이하 "수송용기"라 칭한다.)라 한다. 우리나라의 원자력법<sup>(1)</sup>에서는 수송되는 방사성물질의 종류와 수량에 따라 L형, A형 및 B형 운반물, 그리고 핵분열성 운반물로 분류하고 있으며, 운반물의 종류에 따라서 준수되어야 하는 기술기준들이 규정되어 있다. 또한, 국제원자력기구(IAEA)의 수송규정<sup>(2)</sup>에서도 국가간 운송의 경우에 수송용기의 안정성에 관하여 해당설계 발원국가의 승인을 받아야 할 뿐만 아니라 경유지 해당국가 및 도착지 해당국가의 승인을 받도록하여 다변승인을 규정하고 있다.

이들 규정에는 방사성물질의 정상적인 수송시에 수송용기의 건전성을 평가하는데 기준이 되는 정상 수송 시험조건과 수송중에 발생 가능한 사고를 가정한 가상사고 시험조건이 명시되어 있는데, 수송용기는 이들 조건에 만족되도록 설계되고 제작되어야 한다.

방사성물질의 수송중에 발생 가능한 사고로부터 공중의 보건과 안전을 확보하기 위해서 가상사고 시험조건중의 하나인 수송용기가 9m 높이에서 단단한 표면(unyielding surface) 위에 떨어지는 낙하충격에 대한 평가가 반드시 이루어져야 한다.

낙하충격에 대한 연구동향을 살펴보면, Robinson 등<sup>(3)</sup>은 1976년 수송용기에 공통적으로 사용되고 있는 여러가지 재료에 대한 변형률 속도영향(strain-rate effect)를 조사하였다. Robinson 등<sup>(4)</sup>은 1978년 납차폐된 수송용기의 동적충격 응답을 조사하고자 모형(1/2모형, 1/4모형, 1/8모형) 시험을 통한 연구를 수행하였는데, 충격완충재가 있을 경우와 없을 경우 및 여러가지 낙하각(0°, 10°, 30°, 60°, 85° 및 90° 수직낙하)에 대한 시험을 수행하였다. Aizawa 등<sup>(5)</sup>은 1984년 수송용기의 충격하중을 해석하는데 사용될 수 있는 유한요소해석용 프로그램을 검토하고(11종류), 그 특징을 조사하였으며, 이들 프로그램을 사용하여 간단한 모델에 대한 수직낙하 충격해석을 수행하여 그 결과를 비교해 보았다. Kulak<sup>(6)</sup>은 1987년 큰 미끄럼이 일어나는

3차원 contact/impact 문제에서의 유한요소해석방법을 제안하였다. Pfeiffer 등<sup>(7)</sup>은 1989년 WHAMS-2D, WHAMS-3D 유한요소해석 프로그램을 사용하여 60°~90°의 낙하각에 대한 해석을 수행하였으며, 준정적방법(quasi-static)을 이용한 수계산방법을 제안하였다. 또한, 국내의 경우 강희영 등<sup>(8)</sup>이 1989년 경수로형 사용후 핵연료 집합체 4다발을 수송하는데 사용가능한 수송용기의 안전성 분석보고서에서는 ADINA를 이용하여 수직낙하와 수평낙하에 대한 2차원 해석을 수행하였다.

앞에서 살펴본 바와 같이 지금까지 수송용기의 낙하충격해석에 대한 이론적 연구 및 실험적 연구가 수행되어 왔으나 실험적 연구는 비용이 많이 소요되기 때문에 현재는 주로 해석적 방법을 이용하고 있다. 낙하충격을 해석하는 방법에는 일반적으로 준정적법(quasi-static method), 집중질량 매개변수법(lumped mass parameter method) 그리고, 유한요소법(finite element method)이 쓰이고 있다. 이들 방법중에서도 유한요소 해석법은 비선형이 포함된 어려운 문제, 실제적 경계조건이 적용되는 문제에 대하여 다른 방법과 비교하여 정확한 해를 제공하기 때문에 널리 사용되고 있다. 따라서 수송용기의 상세한 응력계산, 납의 슬럼프특성 그리고 비선형거동 등을 규명하기 위해서는 유한요소법이 사용되어야 한다.

지금까지의 유한요소해석은 3차원 해석이 가능한 프로그램의 미비 또는 3차원 해석의 어려움 그리고 사용 가능한 컴퓨터의 용량부족 등의 이유로 인하여 주로 2차원 해석을 수행하고 있으며, 실제적 문제를 단순화하여 해석하고 있다. 그러나 수송용기의 낙하충격은 여러가지 낙하각을 갖기 때문에 3차원의 문제이며 낙하충격을 받는 복잡한 계의 가장 신뢰성 있는 상세해석 결과를 얻기 위해서는 3차원 해석을 수행하여야 한다. 또한, 충격시 납차폐 재료와 이를 둘러싸고 있는 내부와 외부 격납셀과의 상호접촉문제 그리고 사용재료들의 동특성 등 실제적 문제가 고려되어야 한다. 따라서, 실제적 문제가 고려된 3차원 해석을 수행하여 수송용기의 낙하충격하중에 대한 동적거동을 연구할 필요가 있다.

본 연구에서는 실제적 문제가 고려된 낙하충격하중을 받는 방사성물질 수송용기의 동적거동을 규명하기 위하여 유한요소 해석법을 사용하여 3차원해석을 수행하고, 이미 발표된 실험결과<sup>(4)</sup>와 비교하여 그 타당성과 해석방법을 제안하고자 한다. 그리

고 최종적으로 수송용기의 건전성을 평가하는 기준인 미국의 Regulatory guide 7.6<sup>(9)</sup>의 규칙에 따라 해석결과를 평가하고자 한다. 이 규정은 ASME code<sup>(10)</sup>의 기준에 바탕을 두고 있는데 파손의 허용 응력과 변형률을 규정하므로써 일반대중의 안전과 수송용기 제작자의 경제적인 면을 보호하기 위한 것이다.

## 2. 수송용기 낙하충격해석

### 2.1 해석모델

본 연구에서는 Fig. 1의 적층 원통셀 수송용기를 해석모델로 고려한다. 여기에서,  $L$ 은 수송용기 본체의 총 길이를 표시하고,  $H$ 는 낙하높이 그리고  $\alpha$ 는 낙하각을 표시한다.

선택한 해석모델은 가압 경수로형 사용후 핵연료 집합체 1다발을 수송하는데 사용가능한 수송용기<sup>(4)</sup>이다. Fig. 2는 수송용기 본체의 단면을 보이고 있다. 수송용기의 본체는 스테인레스강으로 만들어진 동심의 두 원통형셀로 구성되어 있다. 이들 원통셀 중 안쪽의 것이 내부셀이라고 하고 바깥쪽의 것을 외부셀이라고 한다. 내부셀의 중심은 내부공간(inner cavity)이라고 하며, 핵연료 바스켓이 장착 되도록 설계되어 있다. 내부셀과 외부셀의 사이에는 납이 완전히 채워져 있다. 내부셀과 외부셀은 방사성물질이 용기밖으로 누출되지 않도록 하는 격

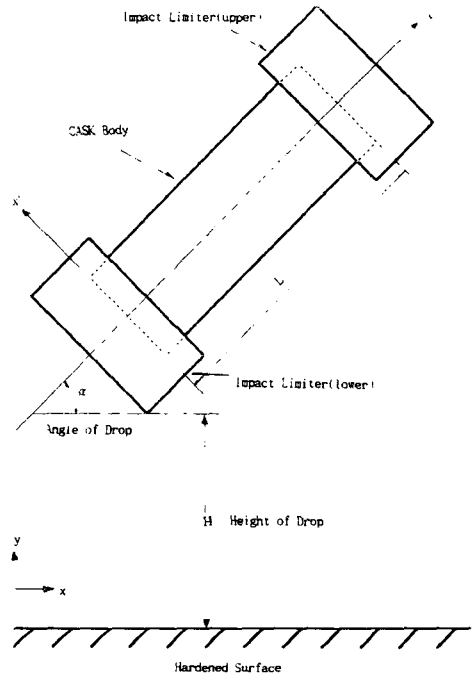


Fig. 1 Definition of the cask drop parameters

납의 역할과 원자력법에서 규정하고 있는 각종 시험조건하에서도 건전성을 유지하여야 하는 구조재의 역할을 한다. 납은 핵연료 집합체에서 방출되는 방사선을 차폐시키는 역할을 한다. 내부셀과 외부셀을 포함한 모든 구조재의 재료는 SUS304스텐레

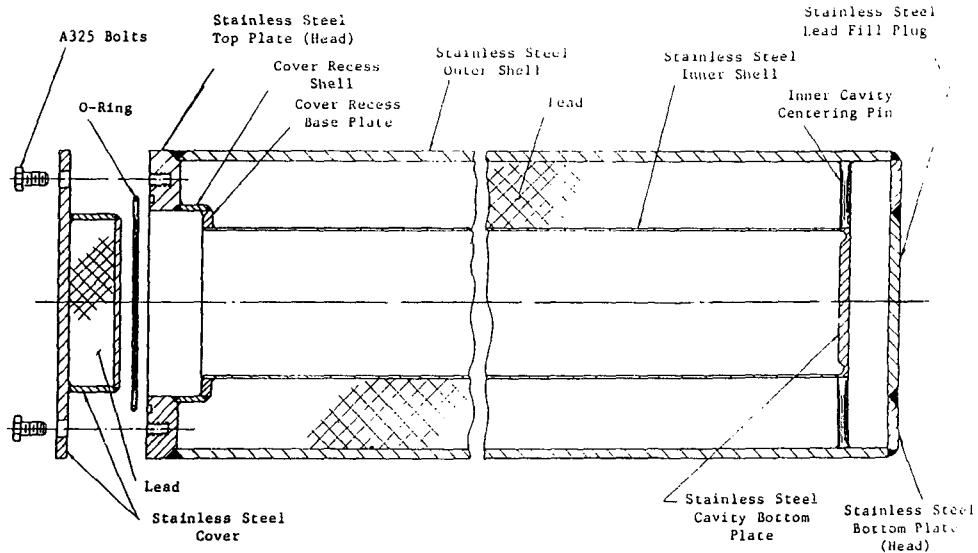


Fig. 2 Configuration of the lead shielded cask

Table 1 Description of the cask model

Feature	Dimension
General	
Outside diameter (cm)	75.59
Inside diameter (cm)	35.56
Outside length (cm)	469.90
Inside length (cm)	438.80
Structure	
Material	SUS 304
Outer shell thickness (mm)	25.40
Inner shell thickness (mm)	6.10
Side thickness (cm)	16.81
Bottom thickness (cm)	10.16
Cover thickness (cm)	11.43
Weight (kg)	17,763

스강으로 이루어져 있다. 수송용기의 총 길이는 469.9 cm, 외경은 75.59 cm 그리고 내경은 35.56 cm이다.

Table 1은 수송용기의 제원을 나타내고 있다. 또한, 수송용기의 상부와 하부에 충격시 수송용기의 본체에 가해지는 충격력을 감소시키기 위하여 목재로 만들어진 충격완충재가 부착되게 된다. 충격완충재는 수송용기가 낙하하여 견고한 표면에 충돌할시 충격에너지를 일부분 흡수하여 수송용기 본체에 가해지는 충격력을 감소시켜 주는 역할을 한다. 충격완충재는 목재 또는 고무 등 충격에너지 흡수능력이 좋은 재료를 선택하게 된다.

본 연구에서는 선택한 해석대상 수송용기의 실험 결과<sup>(4)</sup>와의 비교를 위하여 1/8 모형에 대한 해석을 수행한다. 9 m 자유낙하시 수송용기에 가해지는 외력은 낙하높이에 해당하는 속도  $v = \sqrt{2gH} = 13.34$  m/sec를 견고한 표면에 충돌시 충돌 초기속도로 규정하므로써 생기게 되고, 경계조건으로는 견고한 표면은 고정하게 되고 수송용기는 자유이다.

본 연구에서는 다음과 같은 가정하에 해석이 수행되었다.

(1) 여기서 논의하는 해석들은 수송용기가 낙하하여 최초로 충돌하게 되는 1차 충격에 대해서만

고려하며, 1차 충격후 뒤이어 일어나는 진복에 해당하는 2차 충격은 고려하지 않는다.

(2) 충격시 좌굴은 고려하지 않는다.

(3) 취성과파괴의 영향은 고려되지 않는다.

(4) 내부와 외부셀은 크랙이 존재하지 않는 균질 등방성 재료로 가정한다.

(5) 방사성물질 내용물은 하중에 포함하지 않는다.

## 2.2 해석방법

### 2.2.1 유한요소 해석법

본 연구를 수행하는데 사용한 익스플리시트 동해석 방법을 기술하고자 한다. 익스플리시트 동해석 방법은 매우 많은 작은 시간증분을 효과적으로 수행하는 개념에 기본을 두고 있다. 이것은 익스플리시트 중앙차분 적분방식을 사용함으로써 달성된다.

불연속모델에 대한 동적 평형방정식은 작용된 외력과 요소내 내력 그리고 절점가속도로 정의되며 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$M\ddot{u} = F - I \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 집중질량 대각선행렬,  $F$ 는 작용된 외력벡터,  $I$ 는 내력벡터, 그리고  $\ddot{u}$ 는 절점가속도이다. 익스플리시트법의 효율성은 집중질량 대각선행렬의 사용에 있다. 집중질량 대각선행렬을 이용하면 증분의 시작점에서의 가속도는 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1}(F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (2)$$

여기서, 첨자  $i$ 는 시간증분을 나타낸다. 물체의 운동방정식은 중앙차분법을 이용하여 적분된다. 즉,

$$\dot{u}^{(i+1/2)} = \dot{u}^{(i-1/2)} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \ddot{u}^{(i)} \quad (3)$$

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+1/2)} \quad (4)$$

물체의 운동상태는  $\dot{u}^{(i-1/2)}$ 와  $\ddot{u}^{(i)}$ 의 값을 알므로 운동상태가 진전하게 된다.

익스플리시트법은 많은 작은 시간증분을 이용하여 시간전체를 통하여 적분된다. 이것은 중앙차분 연산자가 단지 조건적으로 안정하기 때문이다. 그리고, 안정성의 제안치는 감쇠(damping)가 없는 경우에 계내에서의 가장 높은 고유치(eigenvalue)의 향으로 식(5)와 같이 주어진다.

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (5)$$

여기서,  $\omega_{max}$ 는 최고차 고유진동수이다.

ABAQUS/Explicit<sup>(11)</sup> 코드는 고유진동수에서의 진동을 제어하기 위하여 아주 작은 감쇠(damping)가 도입되는데 감쇠가 있는 경우는 식(6)과 같다.

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} (\sqrt{1 + \varepsilon^2} - \varepsilon) \quad (6)$$

여기서,  $\varepsilon$ 는 고차모드에서의 임계 감쇠비이다.

익스플리시트 동해석에서 대부분의 계산시간은 절점 내력들을 조합하여 각 요소내의 내력을 계산하는데 사용된다. 이들 내력들은 각 요소내의 응력으로부터 결정된다. 요소내의 응력의 결정을 요소 계산(element calculation)이라 말한다. 요소계산은 각 재료에서의 변형률 증가의 계산을 필요로 한다. 이들 변형률 증가로부터 새로운 응력들을 계산하게 된다. 익스플리시트 동해석은 극도로 불연속적인 내용을 해석하는데 효과적이다. 특히, 변형되는 물체 사이의 접촉조건들은 익스플리시트 알고리즘에서 아주 쉽게 공식화된다. 익스플리시트법은 반복계산과 강성행렬을 필요로 하지 않는다. 반복이 없기 때문에 절차와 관련한 공차(tolerance)도 없다.

이번 수송용기의 동적거동을 규명하기 위하여 사용된 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS/Explicit<sup>(11)</sup> 상용코드이다. 이 코드는 견고한 표면상에 낙하하여 충격을 받는 수송용기의 동적거동을 계산하는데 요구되는 특징들을 가지고 있다. 이 코드는 Hibbit, Karlsson & Sorensen사가 개발한 것으로 중앙차분 시간적분의 익스플리시트형 코드이다. 이 알고리즘은 앞에서 설명한 바와같이 단지 조건적으로 안정하기 때문에 안정한 해를 보증하기 위해서 시간증분(time increment)은 프로그램내에서 자동으로 계산되어 설정된다. 재료 라이브러리(material library)는 탄소성재료, 고무류재료 그리고 짓뭇개지는 형태(crushable form)의 재료를 포함하고 있으며, 또한 사용자가 사용재료 모델을 입력할 수 있는 부프로그램(서브루틴)의 추가가 가능하다. 이 코드가 수송용기의 해석에 적합한 가장 큰 특징은 충격접촉면(contact/impact)을 효과적으로 취급할 수 있다는데 있다.

이 코드는 물체의 접촉면을 따라서 미끄러짐이 가능하도록한 접촉 충격 알고리즘(contact/impact algorithm)을 가지고 있다. 또한, 견고한 표면(unyielding surface)을 해석적으로 취급할 수 있

는 강제표면 경계조건을 가지고 있는데 강제표면은 모델에서 지정된 절점들이 침투할 수 없는 평면이다.

유한요소 동해석은 매우 많은 양의 계산결과들을 산출해낸다. 그리고 일반적으로 이러한 계산결과들을 유용하게 이용하는 측면에서 그래픽 능력과 관계될 수 있다. ABAQUS/Explicit 코드는 미리 정하여준 계산 시간간격에서 화일을 생성하도록 규정된다. 이들 화일은 시간이력에 따른 에너지분포, 절점에서의 변위, 속도, 가속도 시간이력 그리고 요소내에서의 응력, 변형률 시간이력을 그림으로 그리는데 필요한 정보를 포함한다. 또한, 화일은 변형된 모양 및 윤곽선(contour)을 그리는데 필요한 정보도 포함하게 된다.

### 2.2.2 해석절차

Fig. 3은 본 연구에 사용된 컴퓨터 프로그램과 해석 흐름도를 나타낸다. 해석에는 ABAQUS/Explicit를 사용하였고, 전처리와 후처리는 ABAQUS/Explicit Post<sup>(12)</sup>와 PATRAN<sup>(13)</sup>을 사용하였

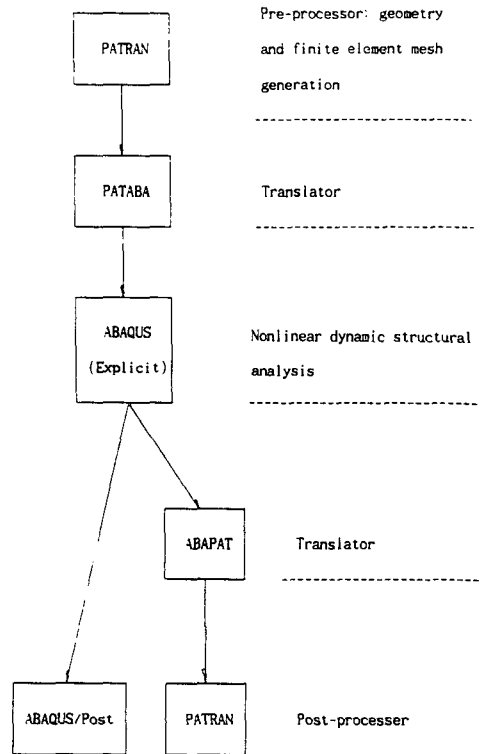


Fig. 3 Flowchart for the analysis procedures

다. ABAQUS/Explicit 코드는 시스템공학연구소의 CRAY-2S 슈퍼컴퓨터에 설치된 것을 사용하였고, 나머지의 모든 프로그램은 IRIS Workstation에 설치된 것을 사용하였다.

전처리와 후처리에 사용한 PATRAN은 대화형 프로그램이다. 이 프로그램은 모델링 과정이 두 단계로 나뉘어져 있는데, Phase-I은 기하학적 모델을 만드는 과정이며, Phase-II는 메쉬생성, 경계조건 적용 등 유한요소해석을 할 수 있도록 유한요소모델을 만드는 과정이 있다. Phase-I에서는 수송용기의 치수에 따라 정확하게 기하학적 모델을 만들며, Phase-II에서는 이미 만들어진 기하학적 모델에 대하여 메쉬를 생성하게 된다. 그 다음에는 요소형태 선택 및 이와 관련한 특성입력 그리고 재료특성 입력과 경계조건을 적용하게 된다. 끝으로 모델링이 정확하게 완료되었는지를 확인하는 작업과 모든 절점과 요소들의 번호를 순서대로 재배치하는 최적화를 하게 된다. 모델링이 완료되면 PATABA<sup>(14)</sup>에서 변환이 가능하도록 뉴트럴파일(neutral file)을 만들고 이 파일은 PATABA를 통하여 변환시킨다. ABAQUS/Explicit에서 수행가능한 파일이 완료되면 이 파일은 CRAY-2S 슈퍼컴퓨터에 보내어 지고 ABAQUS/Explicit post를 통하여 확인하고, 필요로 하는 결과는 그림이나 파일형태로 만들어 낸다. 또한, 해석된 결과 파일은 ABAPAT<sup>(14)</sup>를 이용하여 변환시킨 후 PATRAN을 통하여 해석결과를 분석한다.

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 2차원해석

수직 낙하충격( $\alpha=90^\circ$ )에 대한 2차원 해석을 수행하였다. 2차원 해석은 수송용기에 충격완충재가 없는 경우와 있는 경우의 두가지로 해석되었다.

##### 3.1.1 충격완충재가 없는 경우

Fig. 4는 충격완충재가 없는 경우의 축대칭 2차원 유한요소모델을 보이고 있다. 모델링에 사용된 유한요소 형태는 4개의 절점을 갖는 CAX4R 축대칭 2차원 평면변형요소이다. 총 요소수는 213개, 총 절점수는 316개이다. 내·외부셀 사이의 남은 용기가 충격시 어느정도 압축되게 되는데 이 압축량 또는 찌그러짐양을 남의 슬럼프라고 한다. 남의 슬럼프특성을 파악하기 위하여 남이 내부셀과 외부

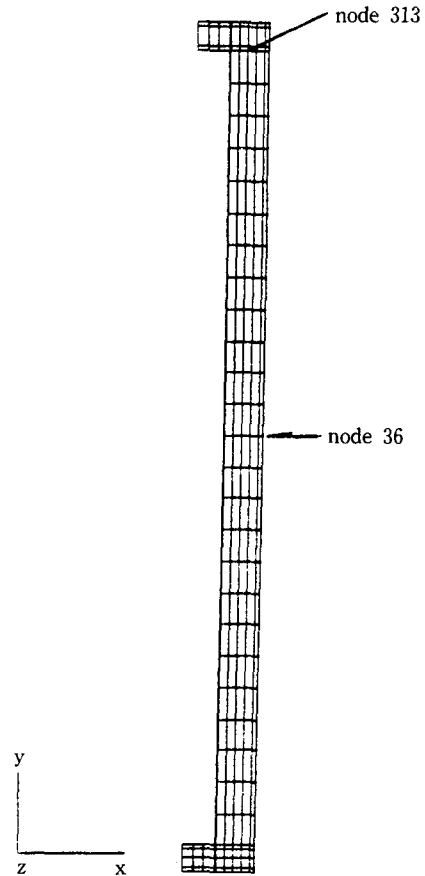


Fig. 4 Two dimensional finite element model for an end-on drop impact of the cask without limiter

셀의 사이에서 자유로이 이동 가능하도록 내·외부 셀면과 남셀면 사이에 contact-surface 옵션을 적용하였다. contact-surface는 규정된 면 사이에서 접촉은 허용하지만 서로 침투하지 않은 impact/contact 알고리즘이다. 또한, 견고한 표면에 해당하는 강체 표면요소는 Rigid 2 2차원 요소를 사용하였다. contact-surface는 용기의 바닥과 강체표면, 외부셀의 외부 원통면과 강체표면과의 사이에 적용하였다. contact-surface면에서의 상호간섭에 의한 쿨롱 마찰계수  $\mu=0.14$ <sup>(11)</sup>를 적용하였다.

해석에 사용된 재료특성은 Table 2와 Table 3이다. Table 2는 구조재로 사용된 SUS304 스테인레스강의 재료특성을 나타내고 있으며, Table 3은 남의 재료특성을 나타내고 있다. 이들 재료특성은 참고문헌(4)에서 발췌한 것이다. 그리고, 낙하시 충격점에서의 충격 초기속도는 9 m 낙하높이에 해

**Table 2** Material properties of SUS304 stainless steel

Elastic modulus	$E=200$ Gpa
Yield strength (0.2%)	$\sigma_s=237$ MPa
Tensile strength	$\sigma_t=550$ MPa
Density	$\rho=7913.0$ kg/m <sup>3</sup>
Poisson's ratio	$\nu=0.3$

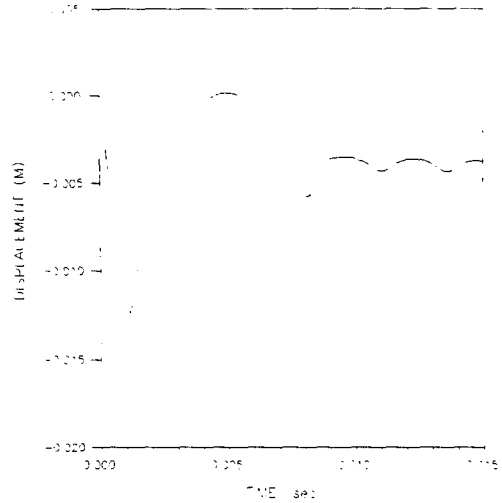
**Table 3** Material properties of lead

Elastic modulus	$E=1.45$ GPa
Yield strength (0.2%)	$\sigma_s=11.0$ MPa
Density	$\rho=11350$ kg m <sup>3</sup>
Poisson's ratio	$\nu=0.45$

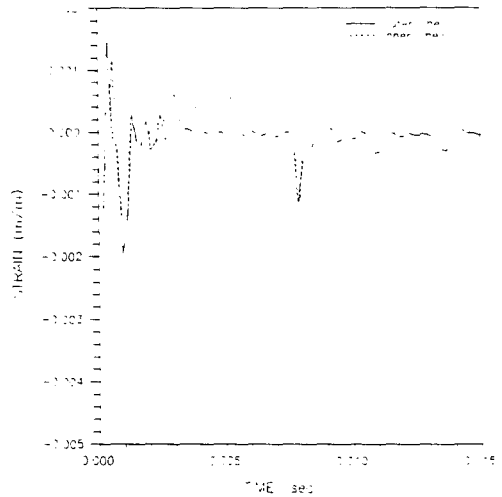
당하는  $t = \sqrt{2gH} = 13.34$  m sec를 적용하였다.

Fig. 5는 납의 슬럼프특성을 시간에 따라 보이고 있다. 납의 슬럼프량은 1 msec에서 12.4 mm를 나타내고 있으며 영구 슬럼프량은 3.8 mm로 수축비율은 0.7%로 나타났다. 여기서 내부셀의 응력이 외부셀보다 높은 것은 내부셀이 외부셀보다 셀의 두께가 더 얇기 때문인 것으로 판단된다. 내부셀의 경우 극한강도인 550 MPa를 초과하기 때문에 심히 손상을 입을 것으로 예상되나 외부셀은 항복강도는 초과하나 극한강도 미만이므로 선전성을 유지할 것으로 판단된다. Fig. 6은 수송용기 중앙에서의 내·외부셀의 축변형률을 보이고 있다. 내부셀의 최대 변형률은 1 msec에서  $-3.94$  mm/mm로 나타났으며, 외부셀의 최대 축변형률은  $1.96$  mm/mm로 나타났다.

해석결과와 실험결과와의 비교는 이 수직낙하의 경우에만 가능하였다.<sup>(4)</sup> 실험에서는 스트레인 게이지를 수송용기의 1/3L, 1/2L, 2/3L 등에 부착하여 변형률 및 납의 슬럼프량을 측정하였다. 따라



**Fig. 5** The lead slump-time history for the 2-D analysis of an end-on impact of the cask without limiter



**Fig. 6** The axial strains at the center(1/2L) on the cask without limiter for the 2-D analysis of an end-on impact

**Table 5** Comparison of the results of experiments and present FEM analysis for strains and lead slump

	Location	Results	
		Experiments <sup>(4)</sup>	Present(FEM)
Max. strain (m/m × 10 <sup>-6</sup> )	at 1/3 L	3280	2805
	at 1/2 L	1420	1966
Lead slump		0.8%	0.7%

서, 변형률 및 납의 슬럼프가 비교대상이다. 외부셀의  $1/3L$  지점에서 최대변형률은 실험결과는  $3280 \times 10^{-6} \text{ m/m}$ , 해석결과는  $2805 \times 10^{-6} \text{ m/m}$ , 해석결과는  $1966 \times 10^{-6} \text{ m/m}$ 로 나타났다. 또한, 납의 슬럼프의 경우 실험결과는 0.8%, 해석결과는 0.7%로 나타났다. 납의 슬럼프 경우 실험결과와 잘 일치하고 있으며, 변형률의 비교에 있어서는 약간의 차이가 있으나 비선형 충격문제의 관점에서 보면 이 정도는 비교적 잘 만족된다고 판단된다. Table 5는 실험결과와 해석결과를 비교해 보이고 있다. 해석시간은 충돌시점부터 15 msec까지 적용되었다. 충돌시점부터 15 msec까지 해석을 수행하는데 소요된 cray CPU 시간은 38분 4초가 소요되었다.

### 3.1.2 충격완충재가 있는 경우

충격완충재가 없는 경우와 동일하나 낙하충격시 충격력을 흡수하도록 수송용기의 상부와 하부에 Redwood목재로 만들어진 충격완충재가 부착된 경우이다. 충격완충재는 수송용기가 낙하하여 견고한 표면에 충돌할시 충격에너지를 일부분 흡수하여 용기본체에 가해지는 충격력을 감소시켜 주는 역할을 한다. 사용된 요소형태는 CAX4R 평면변형요소가 사용되었으며, 총 요소수는 241개, 총 절점수는 362개이다. 낙하각은  $\alpha=90^\circ$ 인 수직낙하이다.

충격완충재로 사용된 redwood 목재의 재료특성을 Table 4에 제시하였다. 충격완충재가 없는 경우와 마찬가지로 내부셀면 및 외부셀면과 납사이에는 contact-surface 옵션을 적용하여 납이 자유로이 이동 가능하도록 하였으며 견고한 표면에 해당하는 강체표면은 Rigid 2 요소를 사용하였고 이 요소면과 충돌시 접촉하게 되는 충격완충재 하부의 바닥면과 완충재 원통면에 contact-surface를 적용하였다. 강체표면이 적용되는 부분의 접촉면에는 쿨롱 마찰계수  $\mu=0.14$ 를 적용하였다.

납의 슬럼프량은 2.1 mm, 수축량은 0.4%로 충격완충재가 없는 경우보다 훨씬 작았다. 외부셀에 발생하는 최대 축응력은 -67 MPa, 내부셀의 최대 축응력은 -157 MPa로 나타났다. 내부셀과 외부셀 모두 SUS304의 항복응력인 237 MPa보다 작아서 안전성을 유지할 것으로 예상된다.

Fig. 7은 충격완충재가 있는 경우와 없는 경우에 대한 수송용기의 중앙에서의 외부셀의 축응력을 비교해 보이고 있다. 여기에서 충격완충재가 없는 경

Table 4 Material properties of redwood

Elastic modulus	$E=159.4 \text{ MPa}$
Crushing strength	$\sigma_c=4.59 \text{ MPa}$
Density	$\rho=350 \text{ kg/m}^3$

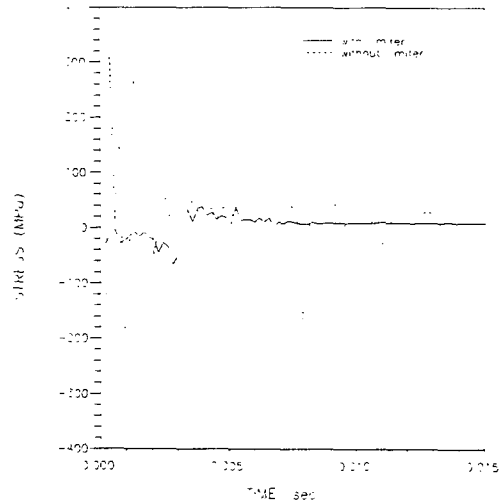


Fig. 7 The comparison of axial stresses at the center on the cask with limiter and without limiter for the 2-D analysis of an end-on impact

우 -250 MPa이나, 충격완충재가 있는 경우에는 -67 MPa로 나타나 충격완충재가 충격력을 상당부분 흡수함을 알 수 있다.

이상에서와 같이 충격완충재는 수송용기의 본체를 건전하게 유지시켜줄 수 있기 때문에 충격완충재의 선택이 중요하다. 충격완충재를 적절히 선택하므로써 설계자의 입장에서 볼 때 수송용기의 무게 및 제작비용을 절감할 수 있다고 판단된다.

해석시간은 충격시점부터 15 msec까지 적용되었다. 해석을 수행하는데 소요된 cray 컴퓨터 CPU 시간은 45분 48초가 소요되었다.

## 3.2 3차원 해석

### 3.2.1 경사낙하

방사성물질 수송의 관련규정<sup>(1,2)</sup>에서 제시하고 있는 시험조건에서 방사성 운반물이 최대의 파손을 일으키도록 낙하시킬 것을 요구하고 있다. 그러면, 여기서 최대의 파손을 일으키도록 낙하시킬 것을 요구하고 있다. 그러면, 여기서 최대의 파손을 일



오키는 낙하각이 문제가 된다. 지금까지의 통상적인 낙하충격해석은  $\alpha=90^\circ$ 인 수직낙하와  $\alpha=0^\circ$ 인 수평낙하 그리고 경사낙하인 경우 수송용기 하부 모서리와 수송용기 무게중심과의 일직선이 낙하면에 수직으로 낙하하는 모서리 낙하에 대한 것이다. 그러나, 경사낙하인 경우 가장 큰 응력을 유발하는 낙하각이 있을 것으로 판단되며, 따라서 이번 해석에서는 1차 충격시 수송용기가 최대의 파손을 일으키는 낙하각을 조사하고, 이 조사된 낙하각으로 자유낙하하는 해석대상 수송용기의 3차원 낙하충격해석을 수행하였다.

수송용기가 1차 충격시 최대응력을 받게 되는 낙하각을 조사하기 위하여  $45^\circ$  낙하각에서부터  $90^\circ$  수직낙하까지  $5^\circ$  간격으로 10번의 축소된 낙하해석을 수행하였다. 경사 낙하충격시 충격지점으로부터  $1/3L$  지점에서 최대 굽힘모멘트가 발생하며, 경사낙하에서는 1차 충격시점부터 2차 충격(slap down) 시까지 굽힘모멘트의 비중이 크기때문에 이 지점에 대하여 중점 조사하였다. 최대 굽힘모멘트가 발생할 것으로 예상되는 충격지점으로부터  $1/3L$  지점에서의 최대 주응력을 조사하였는데 수직( $\alpha=90^\circ$ )으로부터  $5^\circ$  벗어난  $85^\circ$  경사각에서 최대 응력이 발생하였다. Fig. 8은 10가지 낙하각에 대한 해석결과를  $85^\circ$ 일 경우에 대해 노멀라이즈하여 보이고 있다. 10번의 해석결과를 토대로  $85^\circ$  경사낙하에 대한 3차원해석을 수행하였다.

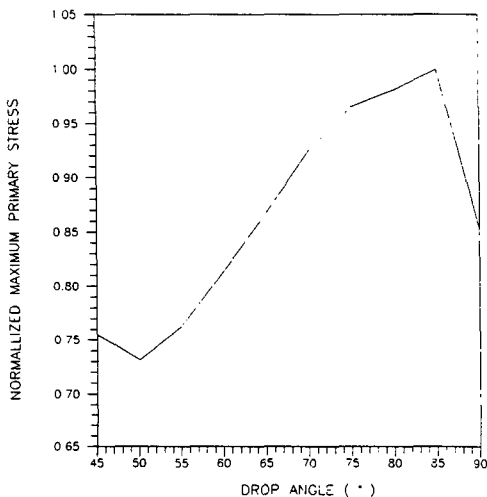


Fig. 8 Normalized maximum primary stresses at 1/3 L of the square rods for oblique drop angle of 3-D analysis

경사낙하에 대한 3차원 유한요소모델은 수평으로부터  $85^\circ$  만큼 경사지게 모델링되었다. Fig. 9는  $\alpha=85^\circ$  경사낙하에 대한 3차원 유한요소모델을 보이고 있다. 여기서 사용된 유한요소형태는 대부분이 8개의 절점을 갖는 C3D8R 3차원 육방체요소를 사용하였고, C3D8R요소가 사용되기 어려운 부분, 즉 수송용기 중심부는 6개의 절점을 갖는 C3D6 3차원 사면체요소가 사용되었다. 총 요소수는 924개가 사용되었고, 총 절점수는 1746개이다. 내·외부 쉘면과 납셀면과의 사이에는 contact-surface 옵션을 적용하였다. 또한, 견고한 면은 강체표면인 Rigid 4요소를 사용하였고, 강체표면과 충돌면인 충격완충재와의 접촉에는 contact-surface를 적용하였다. 접촉면에 대한 쿨롱 마찰계수  $\mu=0.14$ 가 적용되었다.

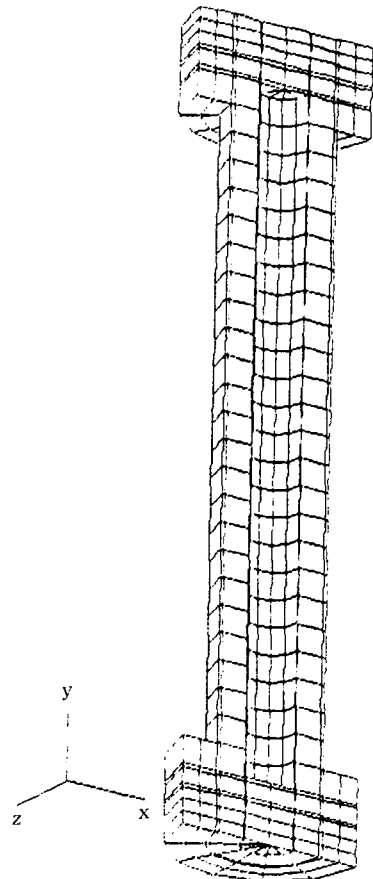


Fig. 9 Three dimensional finite element model for a 85° oblique drop impact of the cask with limiter

Fig. 10은 위치에너지가 최저점에 도달하는 2.75 msec에서의 납의 변형된 모양을 보이고 있다. 이 그림에서 납의 슬럼프된 모양을 확실히 보이고 있다.

Fig. 11은 내부셀과 외부셀의 중앙에서 Tresca응력을 나타낸다. 외부셀에서 174 MPa, 내부셀에서 149 MPa가 발생됨을 보이고 있다. Fig. 12는 외부셀의 1/3L, 1/2L에서의 Tresca응력을 보이고 있다. 수직낙하의 경우 외부셀에 비해 내부셀에서 더 큰 응력이 발생하였으나, 경사낙하에서는 외부셀의 모서리가 낙하시 직접 충격을 받게되기 때문인 것

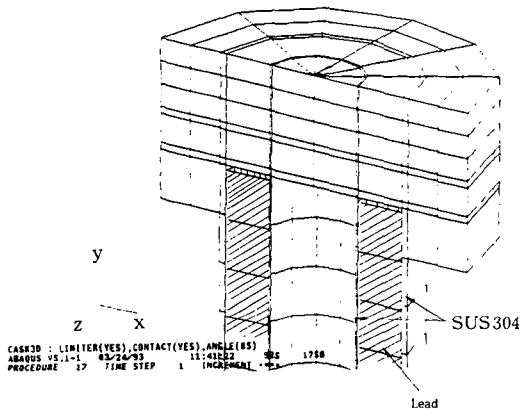


Fig. 10 The deformed shape of the lead for the 3-D analysis of a 85° oblique drop impact of the cask with limiter

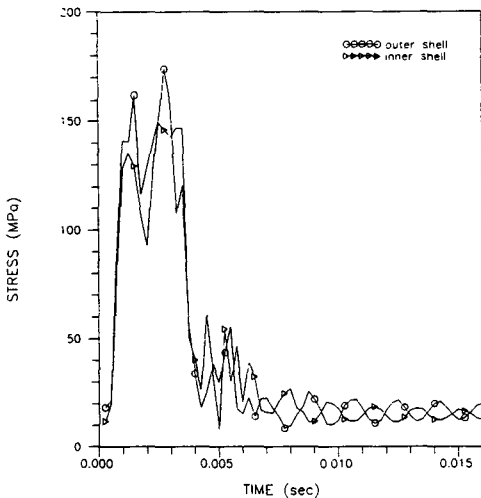


Fig. 11 The Tresca stresses at the center of the outer shell and inner shell on the cask with limiter for the 3-D analysis of a 85° oblique drop impact

으로 판단된다.

파괴 또는 파손의 조건을 정하는 기준에는 여러 가지가 있으나 수송용기 구조해석에 대한 건전성을 평가하는 기준 또는 설계기준은 국내 원자력법에는 규정되어 있지 않지만 통상 미국의 관련 기준을 준용하고 있다. 이 기준은 ASME code<sup>(10)</sup>의 Section III, NB3200에 포함된 원자력발전소 구성부품에 대한 설계요구조건을 채택한 미국 Regulatory guide 7.6<sup>(9)</sup>이다. ASME code의 기본적인 철학은 연성설 구조물에 대한 재료거동과 구조물의 탄성모델에 기초하고 있다. 여기에서 허용응력에 대한 기준은 최대 전단응력이론을 기본으로 하고 있다. 이 최대 전단응력이론은 Tresca가 제안한 것이다.

Regulatory guide 7.6의 Regulatory position 6에는 가상사고 시험조건에 대한 평가기준은 각종 하중조건에 대한 1차 막응력(primary membrane stress)과 1차 굽힘응력(primary bending stress)과의 합이 재료설계응력의 3.6배 또는 극한강도를 초과하지 않아야 한다는 것이다. 9m 낙하충격해석은 이 가상 사고조건에 해당하므로 극한강도와의 비교를 통하여 건전성을 평가할 수 있다. 여기서, 비교의 평가는 ASME code가 파손의 기준으로 최대 전단응력설을 따르고 있으므로 Tresca응력과 비교가 가능하다. 이 Tresca응력은 최대 전단응력설에 기초한 대응동가응력이다. 최대 응력이 발생하는 부분은 충격을 직접 받는 충격지점과 가까운

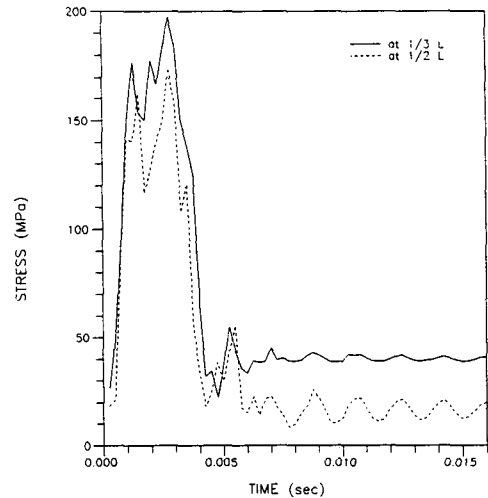


Fig. 12 The Tresca stresses at 1/3 L, 1/2 L of the outer shell for the 3-D analysis of a 85° oblique drop impact of the cask with limiter

부분일 것이다. 그러나, 본 연구에서는 주로 내부와 외부셀의 1/3L, 1/2L 그리고 2/3L 지점에 대한 동적거동을 규명하는 것이므로 이들 지점에서의 해석결과와 앞에서 설명한 평가기준과 비교하였다. 본 해석에서 내부셀과 외부셀의 중앙지점에서 발생된 Tresca등가응력은 149 MPa와 174 MPa이고, 외부셀의 1/3L 지점에서는 197 MPa로 나타나 SUS304 스테인레스강의 극한강도인 550 MPa 이하이므로 경사낙하에서 내·외부셀은 건전성을 유지할 것으로 판단된다.

해석시간을 충돌시점으로부터 16 msec까지 적용되었다. 해석을 수행하는데 소요된 cray CPU 시간은 8시간 20분 29초가 소요되었다.

### 3.2.2 수평낙하

수송용기의 수평낙하는 수송용기가 덤벨모양의 형태로 견고한 표면에 낙하하여 충돌하는 것이다. 사용된 유한요소형태는 경사낙하와 마찬가지로 C3D8R요소와 C3D6요소이다. 총 요소수는 924개, 총 절점수는 1382개이다. 수평낙하에서는 납의 슬러프는 거의 없을 것으로 판단되므로 내·외부셀과 납셀과의 접촉면에는 contact-surface 옵션을 적용하지 않았다. 수송용기 양 끝단에 부착되는 충격원충재의 원통면과 강체표면인 Rigid 4 요소와의 접촉면에 Contact-surface를 적용하였다. 또한, 충격원충재가 완전히 붕괴되어 강체표면에 접촉할 것으로

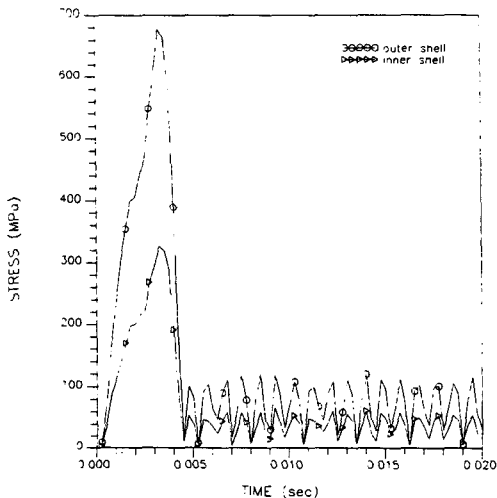


Fig. 13 The Tresca stresses at the center on the cask with limiter for the 3-D analysis of a side drop impact

로 예측되어 외부셀에도 contact-surface를 적용하였다.

Fig. 13은 수송용기 본체의 중앙에서의 내부셀과 외부셀의 Tresca응력을 나타낸다. 외부셀에서 670 MPa, 내부셀에서 320 MPa가 발생되었다. 수평낙하인 경우 수직낙하와 경사낙하 보다 더 많은 응력을 발생하는 것으로 예측되었다. 또한, Regulatory guide 7.6의 기준과 비교하여 보면 외부셀의 경우 극한강도인 550 MPa를 초과하여 크게 손상을 입을 것으로 예측되었으나, 내부셀의 경우는 항복강도인 237 MPa를 초과하여 소성이 일어날 것으로 판단되지만 극한강도 미만이므로 기준에는 만족된다고 생각된다.

해석시간은 충돌시점부터 20 msec까지 적용하였고, 해석을 수행하는데 소요된 cray CPU 시간은 5시간 44분 13초가 소요되었다.

## 4. 결 론

낙하충격하중을 받는 방사성물질 수송용기의 실제적 경제조건을 고려한 동적거동을 ABAQUS/Explicit 유한요소해석 프로그램을 이용하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 경사낙하에서 1차 충격시 수송용기에 최대응력을 발생시키는 낙하각은 수직에서 5° 벗어난 85° 이다.

(2) 수송용기가 수평낙하시 가장 큰 손상을 입을 것으로 예측되었으며, 85° 경사낙하, 수직낙하 순으로 감소된다.

(3) 충격원충재의 적절한 선택은 무게 및 제작비용 측면에서 효과가 크므로 충격원충재는 수송용기 설계 최적화에서 중요하게 고려되어야 한다.

(4) 본 연구에서 해석대상으로 선택한 수송용기의 수직낙하와 85° 경사낙하인 경우 수송용기는 ASME code에 기본을 둔 미국의 Regulatory guide 7.6의 평가기준을 만족시킨다. 수평낙하인 경우 외부셀은 극한강도를 초과한다. 그러나, 내부셀의 경우 소성은 일어나지만 극한강도 미만이어서 방사성물질이 누출되지 않도록 격납을 유지할 것으로 전체적으로 건전성이 유지된다.

## 참고문헌

- (1) 과학기술처, 1985, "방사성물질 포장 및 운반

- 에 관한 기술기준,” 과학기술처고시 제85-8호.
- (2) IAEA, 1985, “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials,” *IAEA Safety Series* No. 6.
- (3) Robinson, R. A., Zielenbach, W. J. and Lawrence, A. A., 1976, “A Survey of Strain-Rate Effects for Some Common Structural Materials Used in Radioactive Material Packaging and Transportation Systems,” *Battelle’s Columbus Laboratories*, BMI-1954.
- (4) Robinson, R. A., Haden, J. A. and Basham, S. J., 1978, “Experimental Studies of Dynamic Impact Response with Scale Models of Lead Shielded Radioactive Material Shipping Containers,” *Battelle’s Columbus Laboratories*, BMI-2001.
- (5) Aizawa, T., Yagawa, G., Ohtsubo, H., Takeda, H. and Ikushima, T., 1984, “A Round Robin on Numerical Analyses for Impact Problems,” *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 78, No. 3, pp. 377~387.
- (6) Kulak, R. F., 1987, “Three-Dimensional Contact/Impact Methodology,” *Argonne National Laboratories*, CONF-870819-1.
- (7) 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.
- (8) 강희영 외 15인, 1989, “KSC-4수송용기 안전 성분분석보고서,” 한국에너지연구소, KAERI/TR-137/89.
- (9) U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1978, “Design Criteria for the Structural Analysis of Shipping Cask Containment Vessels”, Regulatory Guide 7.6, Rev. 1.
- (10) *American Society of Mechanical Engineers*, 1989, “Boiler and Pressure Vessel Code, Section III.
- (11) Hibbit, Karlsson & Sorensen, 1991, *ABAQUS/Explicit User’s Manual*, Version 5.1.
- (12) Hibbit, Karlsson & Sorensen, 1992, *ABAQUS/Explicit Post Reference Guide*, Version 5.1.
- (13) PDA Engineering, 1990, *PATRAN User’s Manual*, Version 2.5.
- (14) PDA Engineering, 1989, *PATRAN Interface User’s Manual*, Version 3.1.
- (15) Charman, C. M. and Grenier, R. M., 1982, “Large Deformation Inelastic Analysis of Impact for Shipping Casks,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 759~784.
- (16) Nelson, T. A. and Chun, R. C., 1987, “Methods for Impact Analysis of Shipping Containers,” *U. S. Nuclear Regulatory Commission*, NUREG/CR-3966.
- (17) Burian, R. J., Black, W. E., Lawrence, A. A. and Balmert, M. E., 1979, “The Validity of Scale Modeling for Large Deformations in Shipping Containers,” *Battelle’s Columbus Laboratories*, BMI-2040.
- (18) Counts, J. and Payne, J. B., 1979, “Evaluation of Analysis Methods for Type B Shipping Container Impact Problems,” *Los Alamos Scientific Laboratory*, LA-6640-MS.