

차원해석을 이용한 사용후 핵연료 수송용기의 충격력 실험식 공식화

Formulation on the Empirical Equation of the Cask Impact Forces by Dimensional Analysis

이 영 신[†] 김 용 재* 최 영 진**
Lee, Young-Shin Kim, Yong-Jae Choi, Young-Jin
(논문접수일 : 2004년 9월 2일 ; 심사종료일 : 2005년 8월 30일)

요 지

방사성물질은 다양한 분야에서 사용되고 있으며 이에 따른 국내 및 국제간 운반이 계속적으로 증가하고 있다. 방사성물질을 수송하기 위해서는 수송용기의 안전성이 확보되어야 한다. 방사성물질 수송용기의 안전규정에 관해서는 국내 원자력법 운반안전규정 및 IAEA 운반규정에서 규정하고 있다. 방사성물질 수송용기 중에서 사용후핵연료를 운반하는 수송용기는 본체와 충격완충체로 구성되어 있다. 본 논문에서는 사용후핵연료 수송용기의 충격완충체에 작용하는 충격력을 계산하는 간편한 실험식을 차원해석을 통하여 유도하였다. 해석결과는 기존의 충격면적법 및 유한요소해석과 비교를 통하여 그 타당성을 입증하였다. 본 실험식을 이용하여 수송용기의 낙하충격력을 쉽게 예측할 수 있다.

핵심용어 : 충격력, 충격완충체, 실험식, 수직낙하, 수평낙하, 경사낙하, 레드우드, 발사우드

Abstract

Radioactive material is used in the various fields. The numbers of transport for radioactive material have been gradually increased in both domestic and international regions. The safety of the cask should be secured to safely transport of radioactive material. The Korean atomic law and the IAEA safety standards prescribe regulations for the safe transport of radioactive material. The cask for spent fuel is comprised of the body and the impact limiter.

In this study, the empirical equation of the cask impact force is proposed based on the dimensional analysis. Using this empirical equation the characteristics of the impact limiter are analyzed. The results are also validated by comparing with the previous results of the impact area method and the finite element analysis. The present method can be used to predict the impact force of the cask.

keywords : *impact force, impact limiter, empirical equation, vertical drop, side drop, oblique drop, redwood, balsawood*

1. 서 론

방사성물질 수송에서 가장 중요한 안전확보 수단은 수송용기이다. 수송용기는 일반적으로 원통형인데 방사선을 차폐시키는 차폐재료 및 이를 구조적으로 지탱하는 구조재료로 이루어져 있으며 내부셀과 외부셀로 이루어진 구조체 사이에 방사선차폐 재료가 들어있는 형태이다. 수송용기의 안전요건에 관하여는 국내 원자력법 관련 방사성물질 운반규정(과학기술부, 2001), 국제원자력기구(IAEA)의 방사

성물질 운반안전규정(IAEA, 1996) 및 미국 10CFR71(1997) 등 국내·외의 방사성물질 수송관련 규정에서 정하고 있다. 이들 규정에서 수송용기에 부여되는 가상사고시험조건 중 9m 낙하충격시험은 매우 중요한 요건으로 9m 낙하시험을 실시한 후에 수송용기는 방사성물질의 누출 없이 건전성을 유지하여야 한다고 규정하고 있다.

수송용기에는 충격력 흡수능력이 우수한 재료로 제작된 충격완충체(impact limiter)를 수송용기의 상부와 하부에 부착하는데 이는 수송용기가 낙하하여 바닥에 충돌할 때에

[†] 책임저자, 정회원 · 충남대학교 공과대학 기계설계공학과 교수
전화: 042-821-6644 ; Fax: 042-821-8894
E-mail: leeys@cnu.ac.kr

* 한국원자력안전기술원 책임연구원

** 충남대학교 대학원

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 12월 31일까지 본 학회에 보내주
시면 2005년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

수송용기에 발생하는 충격력을 충격완충체의 압착(cru-shing) 과정을 통하여 흡수하고 수송용기에 전달되는 충 격력을 감소시키는 역할을 하게된다. 따라서, 충격완충체 에 사용되는 재료들에 대한 충격에너지 흡수특성이 파악되 어야 한다(이영신 등, 1993; 1997; 1999; 2004; 정성 환, 2000; Janberg 등, 1995; Hoffman 등, 1995; Langhaar, 1964; sedov 등, 1959).

현재 충격해석에서 가장 유용한 해석방법은 상용 유한요 소 해석코드를 이용한 해석이 되고 있으나 유한요소해석은 모델링에 시간이 많이 소요되므로 설계 후의 상세한 동적 해석에 이용되고 있다. 따라서 수송용기의 설계단계 및 안 전요건 검증단계 등에서 개략적인 동적거동을 파악할 수 있으면서도 정확성이 요구되는 해석방법이 필요하다. 수송 용기의 동적거동은 충격완충체와 수송용기 본체로 나누어 취급할 수 있는데, 이들에 대한 해석방법은 해석결과와 정 확성 및 이용의 편리성이 있어야 한다. 이러한 관점에서 수송용기가 낙하충격 시에 받는 충격력의 계산은 매우 중 요한 의미를 갖는다. 충격력이 정확히 계산된다면 동적문 제를 정적문제로 취급하여 쉽게 해석이 가능하며, 이것은 하나의 새로운 해석방법이 될 수 있을 것이다.

따라서, 본 논문에서는 낙하충격에 대한 충격력 실험식 을 고안하고 이 식을 이용하여 수송용기에 부착되는 충격 완충체의 동적특성을 분석하고 그 타당성을 제시하였다.

2. 충격력 실험식 유도

2.1 충격력 실험식 유도

차원해석(Dimensional analysis; Langhaar, 1964; sedov 등, 1959)이란 어떤 물리적 현상에 차원의 동차성 의 원리를 적용하여 이에 대한 실험식을 세우는 방법이다. 여기서 차원의 동차성 원리란 어떤 물리적인 관계를 나타 내는 방정식에 있어서 등호의 좌변과 우변의 차원이 같아 야 한다는 원리를 말한다. 즉, 차원해석이란 차원에 착안 하여 차원적으로 만족되는 조건을 찾아내는 방법이다.

m 개의 차원을 갖는 n 개의 물리량을 $(n-m)$ 개의 독립된 무차원 변수로 정리할 수 있는데, 이것을 Buckingham의 Π 정리라 한다(Szücs, 1980; David 등, 1982).

임의의 문제에 있어서 차원상수를 포함한 물리량 x_1, x_2, \dots, x_n 이 n 개 있어서

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1)$$

인 식으로 표시된다고 하고, 기본단위의 개수를 n 개라 한

다. 이 때, $x_1^a, x_2^b, \dots, x_n^c$ 의 곱에 의하여 무차원량 π 를 만들면 그 수는 $(n-m)$ 개 이고, 식 (1)은

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (2)$$

인 식으로 놓을 수 있다. 이것을 π 정리라 한다.

Π 정리에 의한 무차원량 π 의 개수 $(n-m)$ 을 알더라도 각 π 의 꼴이 어떻게 되는가는 미정이다. 일반적으로 경험에 의한 사실에 기초를 두어 그 꼴을 차원적으로 결정한다. 각 π 를 다음과 같이 표시하고, 각 π 의 값을 결정할 수 있다.

$$\pi_1 = \frac{x_i}{x_1^{a_1} x_2^{b_1} \dots}, \quad \pi_2 = \frac{x_j}{x_1^{a_2} x_2^{b_2} \dots},$$

$$\pi_3 = \frac{x_k}{x_1^{a_3} x_2^{b_3} \dots}, \quad \dots \quad (3)$$

본 논문에서 충격력 실험식을 유도하기 위해 물체의 자유낙하에서 충격력 P 는 낙하높이 H , 낙하물체의 질량 M , 중력가속도 g 및 충격면적 A 의 양들과 관계가 있다고 가정한다. 이들 물리량에 대한 기호 및 차원을 표 1에 보이고 있다.

표 1 Units and dimensions of physical quantities for drop impact

Quantities	Symbol	Units	Dimensions
Impacting force	P	N, kg·m/s ²	MLT^{-2}
Mass	M	kg	M
Drop height	H	m	L
Impacting area	A	m ²	L^2
Gravity acceleration	g	m/s ²	LT^{-2}

충격력은 기본적으로 충격면적에 크게 좌우되므로 단위 충격면적당 충격력을 고려한다. 따라서 충격력 P 대신에 단위 충격면적 당 충격력인 단위 충격력 P_A 를 고려한다.

지금 물리량은 $m=4$, 기본단위는 M, L, T 의 3개, 즉 $n=3$, 따라서 π 의 개수는 $m-n=4-3=1$ 개 이다. π 의 분 모를 $x_1=H, x_2=g, x_3=M$ 이라고 두면 무차원수 π 는 다음과 같이 된다.

$$\pi = \frac{P_A}{H_1^a g_1^b M_1^c} \quad (4)$$

이들 차원의 동차성의 원리를 이용하여 차원방정식을 세워 a_1, b_1, c_1 을 구하면 $a_1=-2, b_1=1, c_1=1$ 이 되고, 식 (4)의 π 를 다시 표현하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\pi = \frac{P_A}{MgH^{-2}} = \frac{P_A H^2}{Mg} \quad (5)$$

이 식 (5)를 이용한 적당한 실험을 수행하여 함수 관계를 구하면 된다. 기본 관계로서 식 (5)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_A = k \frac{Mg}{H^2} \quad (6)$$

이와 같이 차원해석을 통하여 단위 충격면적 당 충격력을 유도하였으며 유도된 실험식은 동차성의 원리에 적합하여 타당성이 있다. 여기서, k 는 실험이나 수치해석 등에 의하여 구할 수 있다. 또한 식 (6)을 충격력으로 나타내면 다음과 같다.

$$P = kA \frac{Mg}{H^2} \quad (7)$$

또는,

$$P = C_k \frac{Mg}{H^2} \quad (8)$$

여기서, 계수(coefficient) $C_k = kA$ 를 낙하물체의 충격면적과 낙하높이에 관련된 계수이며, 이미 알고 있는 물리량인 충격완충체의 반경 R 과 낙하높이 H 의 함수로 표현된다면 충격력을 쉽게 계산할 수 있다.

먼저 수송용기를 원통형으로 고려하고 시뮬레이션을 통하여 충격력 P 를 산출한다. 여기서 충격력 P 는 낙하중량, 낙하높이 및 충격완충체의 반경을 일정하게 변화시키면서 구한다. 다음엔 산출된 충격력 P 와 식 (8)을 이용하여 계수 C_k 를 구한다. 그리고 구한 C_k 값을 이용하여 수송용기의 낙하충격면적과 관련된 충격완충체의 반경 R 로 표현되는 함수를 먼저 찾고, 그 다음 낙하충격높이 H 로 표현되는 함수를 찾는다.

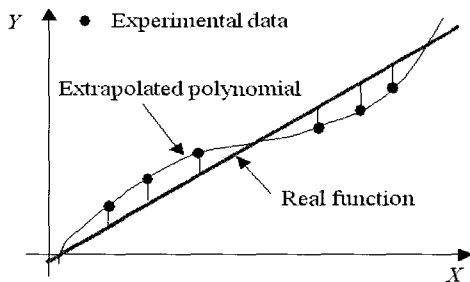


그림 1 Relations of extrapolated polynomial and real function

본 논문에서 이들 함수를 구하는 방법으로 최소자승법(Least square method; Carnahan 등, 1969; kreyszing, 1979)을 이용하였다. 최소자승법은 그림 1에 보인 바와 같이 실험을 통하여 측정되고, 오차가 포함된 자료에 대하여 가장 잘 대표되는 함수를 구하는 방법중 하나이다. 여기서는 최소자승법에 대하여 간략하게 설명한다.

$x_i (i = 0, 1, \dots, n)$ 에서 함수치가 주어지고 $g(x)$ 를 함수에 대한 근사함수라 하면, 이때 근사함수 $g(x)$ 와 함수 $f(x)$ 는 $r_i (=g(x_i) - f(x_i))$ 의 차이를 갖게 되는데 최소자승법은 이들 차이의 제곱의 합인 식 (9)가 최소가 되게 하는 근사함수 $g(x)$ 를 구하는 것이다.

$$S = \sum_{i=0}^n r^2 = \sum_{i=0}^n \{g(x_i) - f(x_i)\}^2 \quad (9)$$

만약 주어진 함수값 $f(x)$ 의 정확도가 서로 다를 때에 최소자승법은 다음과 같이 r_i^2 에 가중인자 $\omega_i (\geq 0)$ 를 곱하여 계산한 S 를 최소가 되게 하는 $g(x)$ 를 찾는 문제로 수정할 수 있는데, 이를 가중 최소자승법이라 한다.

$$S = \sum_{i=0}^n \omega_i r^2 = \sum_{i=0}^n \omega_i \{g(x_i) - f(x_i)\}^2 \quad (10)$$

최소자승법은 $f(x)$ 가 구간 $\langle a, b \rangle$ 에서 정의된 연속함수일 경우에도 확대 적용할 수 있는데, 이 경우 최소자승법은 다음 식의 S 를 최소화게 하는 $g(x)$ 를 구하는 문제이며, 여기서 $\omega(x)$ 는 구간 $\langle a, b \rangle$ 에서 $\omega_i (\geq 0)$ 인 가중함수이다. 대부분의 경우 $\omega(x) = 1$ 을 취한다.

$$S = \int_a^b \omega \{g(x_i) - f(x_i)\}^2 dx \quad (11)$$

본 논문에서 $f(x_i)$ 는 실험을 통하여 산출된 C_k 값에 해당하며 C_k 값을 이용하여 이에 가장 대표되는 함수인 $g(x)$ 즉, 충격완충체의 반경 R 및 낙하높이 H 와의 함수관계를 찾는다.

2.2 충격력 실험식의 계수 산출결과

충격력 실험을 통하여 계수를 산출하는 과정은 비용과 시간이 많이 소요되므로 본 논문에서는 실제적인 실험을 통하여 계수를 구하지 않고, 대신에 실험과 유사한 결과를 나타내는 충격면적법에 의한 충격력 계산 및 유한요소 해석코드에 의한 시뮬레이션을 통하여 이들 계수를 구한다.

시뮬레이션에 사용된 재료는 수송용기의 충격완충체로 널리 쓰이는 레드우드와 발사우드를 선정하였다. 레드우드와 발사우드는 나무결에 평행한 방향과 수직인 방향 각각에 대하여 고려하였다. 그림 2는 수송용기의 해석모델이다. 여기서 L 은 용기본체의 길이, H 는 낙하높이, a 는 낙하각이다.

충격력을 구하기 위한 수치해석에서 수송용기의 낙하중량은 10ton에서 100ton까지 10ton씩 증가시켰으며, 충격면적을 묘사하기 위해 수송용기를 원통형으로 가정하여 반경 R 을 고려하였고, R 은 0.1m에서 2.0m까지 0.1m씩 증가시켰다. 또한, 낙하높이는 7m에서 12m까지 1m씩 증가시켰다. 낙하방법은 수직낙하, 수평낙하 및 경사낙하를 고려하였으며 경사낙하의 경우 낙하각(a)는 45°, 60° 및 75°에 대하여 수행하였다. 충격면적법에 의한 충격력 수치해석은 레드우드와 발사우드에 대하여 수행하였다. 또한 ABAQUS 및 DYNA3D를 이용한 시뮬레이션은 수직낙하 충격에 대하여 단순한 원통형 낙하물을 무게와 면적을 변화시키며 수행하였다. 이러한 시뮬레이션을 통하여 얻어진 많은 자료들은 실험식의 함수관계를 분석 및 결정하기 위하여 사용되었다.

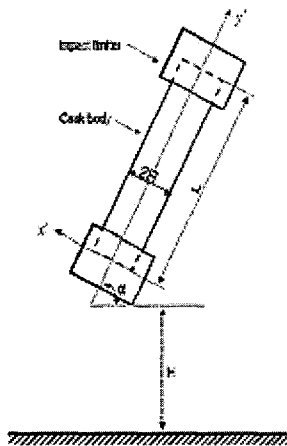


그림 2 Analysis model description of cask drop parameters

시뮬레이션을 통하여 실험식을 구한 절차는 첫째 재료별로 낙하방법에 따른 낙하충격력, 충격면적 및 충격시 변형량을 구했다. 이들 값들을 이용하여 식 (8)의 C_k 값을 구하였다. 산출한 C_k 값을 이용하여 먼저 충격완충체의 반경 R 과 관계되는 대표적인 함수관계식을 최소자승법을 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$C_k = kR^c \quad (12)$$

여기서, 계수 k , c 는 시뮬레이션을 통하여 결정될 수 있다.

또한, 낙하높이를 고려하기 위하여 식 (12)의 k 를 낙하높이 H 와 관계되는 대표적인 함수관계식을 최소자승법을 이용하여 구하였는데, 그 결과는 다음과 같다.

$$k = aH^b \quad (13)$$

그리고, 식 (12)는 다음과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$C_k = aH^b R^c \quad (14)$$

따라서, 식 (14)를 식 (8)에 대입하면 최종적으로 충격력 실험식을 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$P = aH^b R^c \frac{Mg}{H^2} = C_c \frac{Mg}{H^2} \quad (15)$$

여기서 계수 a , b 및 c 는 결정되어야 할 계수이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 충격력 실험계수 산출결과 및 고찰

(가) 수직낙하

수직낙하의 경우 충격완충체의 반경 R 및 낙하높이 H 에 관계된 계수 b 및 c 값은 재료의 종류에 관계없이 2.0으로 결정된다. 이들 결정된 계수 값을 고려하여 식 (15)를 수직낙하인 경우 다시 표현하면 다음과 같다.

$$P = aH^2 R^2 \frac{W}{H^2} = aR^2 W \text{ (N)} \quad (16)$$

여기서 a 는 재료의 종류 및 낙하중량(W)에 따라 결정된다.

그림 3은 수직낙하충격을 받는 레드우드 및 발사우드에 대하여 낙하중량에 따라 변하는 a 값을 나무결에 수평인 경우와 나무결에 수직인 경우를 비교해 보이고 있다.

(나) 수평낙하

그림 4는 수평낙하충격을 받는 레드우드 및 발사우드에 대하여 낙하중량에 따라 변하는 a 값을 나무결에 수평인 경우와 나무결에 수직인 경우를 비교해 보이고 있다.

b 의 값은 나무결에 수평한 방향이 나무결에 수직인 방향보다 약간 크고 낙하중량이 증가함에 따라 미세하게 약간씩 감소하는 경향을 띄고 있으나 무시할 정도로서 하나의 양으로 평가할 수 있다. 따라서, b 값을 평가하면 재료의 종류에 관계없이 평균값은 2.2820이고, 표준편차는 ± 0.0593 이므로 b 값은 2.2227~2.3113사이에 있음을 알

수 있고 평균값인 2.2830을 b 의 대표값으로 결정될 수 있음을 알 수 있다.

c 값은 b 값과는 반대로 나무결에 수평한 방향이 나무결에 수직인 방향보다 약간 작고 낙하중량이 증가함에 따라 약간씩 증가하는 경향을 띄고 있다. c 값은 나무결에 수평인 경우에 평균값 0.3520, 나무결에 수직인 경우 0.4182로 결정될 수 있다. 따라서, 이들 결정된 계수 b 및 c 값을 고려하여 식 (9)을 수평낙하인 경우 다시 표현하면 다음과 같다.

- 나무결에 수평인 경우 :

$$P = aH^{2.2820} R^{0.3520} \frac{W}{H^2} \quad (\text{N}) \quad (17)$$

- 나무결에 수직인 경우 :

$$P = aH^{2.2820} R^{0.4182} \frac{W}{H^2} \quad (\text{N}) \quad (18)$$

여기서, a 는 재료의 종류 및 낙하중량(W)에 따라 결정되는 값이다. 또한 충격면적을 고려할 때에 단위폭 1.0을 사용하였으므로 식 (17) 및 식 (18)을 이용한 계산에서 충격완충체의 폭(m)을 곱해 주어야 한다.

(다) 경사낙하

경사낙하의 경우 수평낙하에서와 마찬가지로 나무결에 수평한 방향이 나무결에 수직인 방향보다 약간 크고 낙하중량이 증가함에 따라 미세하게 약간씩 감소하는 경향을 띄고 있다. 그러나 낙하각에 따른 변화는 거의 없었다. 결과적으로 이들 변화는 무시할 정도로서 하나의 양으로 평가할 수 있다.

따라서, b 값을 평가하면 재료의 종류에 관계없이 평균값은 2.5767이고 표준편차는 ± 0.0117 이므로 b 값은 2.5884~2.5650사이에 있음을 알 수 있고, 평균값인 2.5767을 b 의 대표값으로 결정될 수 있음을 알 수 있다.

c 값은 수평낙하에서와 같은 경향을 띄고 있는데 b 값과는 반대로 나무결에 수평한 방향이 나무결에 수직인 방향보다 약간 작고 낙하중량이 증가함에 따라 미세하게 약간씩 증가하는 경향을 띄고 있다. 또한, 낙하각에 따른 변화는 거의 없었다.

c 값을 평가하면 재료의 종류에 관계없이 평균값은 0.2248이고 표준편차는 ± 0.0144 이므로 c 값은 0.2392~0.2104사이에 있음을 알 수 있고, 평균값인 0.2248을 c 의 대표값으로 결정될 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 이들 결정된 계수 b 및 c 값을 고려하여 식 (15)을 경사낙하인 경우 다시 표현하면 다음과 같다.

$$P = aH^{2.5767} R^{0.2248} \frac{W}{H^2} \quad (\text{N}) \quad (19)$$

여기서 a 는 재료의 종류 및 낙하중량(W)에 따라 결정되는 값이다.

그림 5는 경사낙하에서 50ton 낙하중량으로 9m 충격력을 받는 나무결에 수평인 레드우드의 5°에서 85° 낙하각에 따라 변하는 식 (14)의 C_k 값을 나타내고 있는데 낙하각 45°를 기준으로 낙하각 45°이하에서는 낙하각이 증가할 수록 C_k 값이 감소하고, 낙하각 45°이상에서는 낙하각이 증가할 수록 C_k 값이 증가함을 알 수 있다. 따라서, 경사낙하에서 계수 a 값은 낙하각 45°를 기준으로 영역을 구분하여 결정되어야 한다. 즉, 낙하각 45°이하와 이상으로 구분하여 외삽에 의하여 a 값을 산출하여야 한다. 이는 낙하각 45°를 기준으로 충격완충체의 충격면적의 분포가 달라지기 때문으로 생각하며, 낙하각 45°이하에서는 충격완충체의 길이방향 면적이 충격력에 더 많은 영향을 미치고, 낙하각 45°이상에서는 충격완충체의 바닥면이 충격력에 더 많은 영향을 미친다는 것을 의미한다.

그림 6은 50ton 낙하중량으로 9m 충격력을 받는 나무결에 수평인 레드우드의 5°에서 85° 낙하각에 대한 C_k 선도를 보이고 있다.

그림 7은 낙하각 15°에서 75°까지 15°간격으로 산출된 계수 a 값을 각각 나타내고 있는데, 낙하각 15°인 경우가 가장 높고 75°, 30°, 60° 그리고 45°순으로 낮아짐을 알 수 있다.

낙하중량 및 낙하높이에 따라 산출된 a 값을 살펴보면 낙하중량이 작은 것로부터 큰 것으로 변함에 따라 작아지는 형태이며, 낙하중량이 작을 경우 그 값의 변화가 크나 낙하중량이 클 수록 그 변화는 급격히 작아지는 경향을 나타낸다. 수직낙하의 경우 낙하중량에 따른 변동이 낙하중량이 작을 때 매우 크게 나타나나 수평낙하 및 경사낙하인 경우 완만하게 변함을 알 수 있다. 또한, a 값은 재료의 압착강도(crushing strength)와 관련된다고 판단되며, 압착강도가 작을 수록 그 값이 현저히 작아짐을 알 수 있고 낙하중량이 커짐에 따라 천천히 변함을 알 수 있다.

수송용기의 안전요건 중 가상사고시험조건인 9m 자유낙하에 대하여 직접적으로 실험식과 계수선도를 이용하여 충격력을 계산한다면 매우 편리할 것이다. 이러한 목적으로 C_k 를 특정 9m 자유낙하에 대하여 충격완충체의 반경 R 에 따라 변하는 계수선도 형태로 나타낸다면 매우 편리한 도구

가 될 것이다. 그림 8 및 그림 9는 9m 수직낙하 및 수평낙하에서의 레드우드에 대한 계수 C_k 선도를 보이고 있다.

3.2 충격력 실험식 타당성 분석

충격력 실험식의 타당성을 분석하기 위해서는 해석방법이나 시험결과와의 비교를 통한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 충격면적법(Miller, 1993)에 의한 충격력계산 결과와 유한요소해석을 통한 충격력 결과를 비교하고 더 나아가 직접적이지는 않지만 시험결과와의 비교를 통해서 타

당성을 분석한다.

9m 수직낙하충격에 대하여 살펴보면 낙하중량 $W=50$ ton, 낙하높이 $H=9$ m, 충격완충체의 반경 $R=1.0$ m를 기준으로 낙하충격력을 산출하여 비교하였다. 수직낙하의 경우 표 2에 보인바와 같이 충격력 실험식을 이용하여 계산한 충격력은 7.33×10^7 (N)이었고, 충격면적법에 의한 충격력은 7.33×10^7 (N) 그리고 유한요소해석에 의한 충격력은 7.37×10^7 (N)으로 나타났다. 충격력 실험식과 충격면적법에 의한 결과는 동일하며 유한요소해석에 의한 결과와 비교해 보면 1% 범위에서 일치함을 알 수 있다.

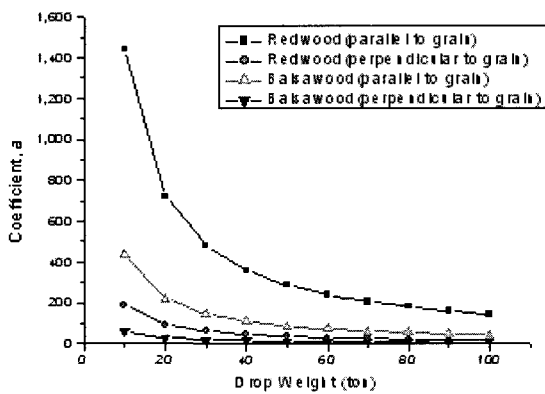


그림 3 Comparison of the coefficients(a) of redwood and balsawood for vertical drop

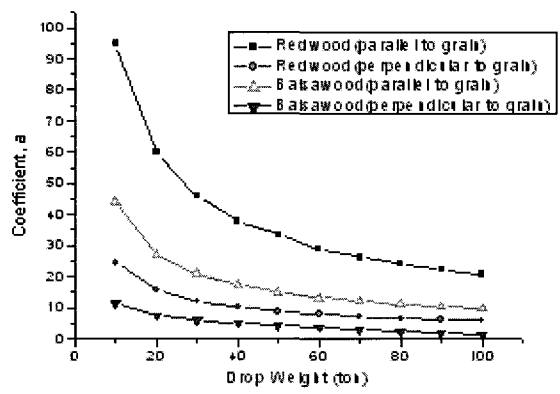


그림 4 Comparison of the coefficients(a) of redwood and balsawood for side drop

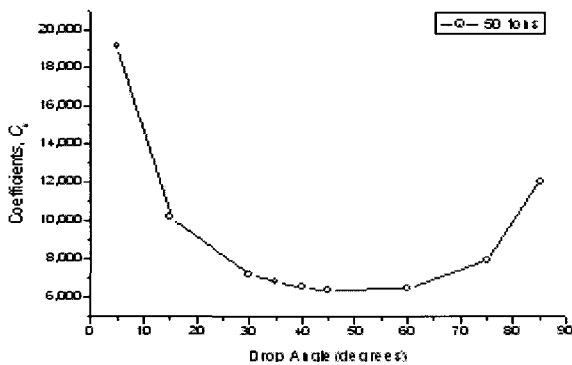


그림 5 Coefficients(C_k) of redwood (parallel to grain) for 9 m various oblique drop angle

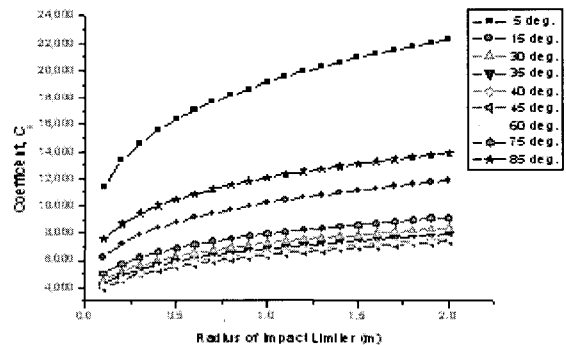


그림 6 Comparison of the coefficients(C_k) for redwood (parallel to grain) of 9 m various oblique drop angle

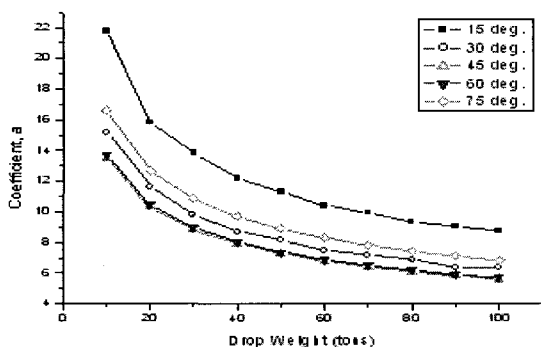


그림 7 Comparison of the coefficients(a) for balsawood (parallel to grain) of various oblique drop

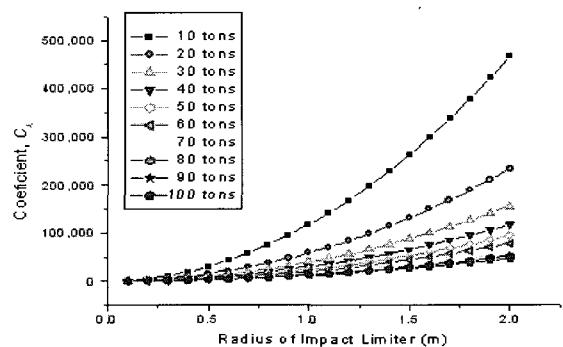


그림 8 Coefficients(C_k) of redwood (parallel to grain) for 9 m vertical drop

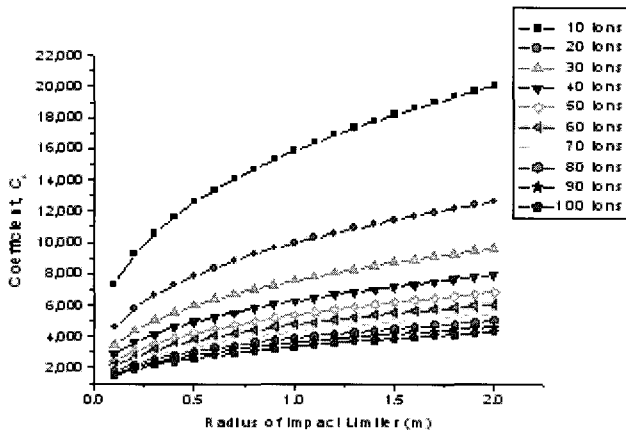


그림 9 Coefficients(C_k) of redwood (parallel to grain) for 9 m side drop

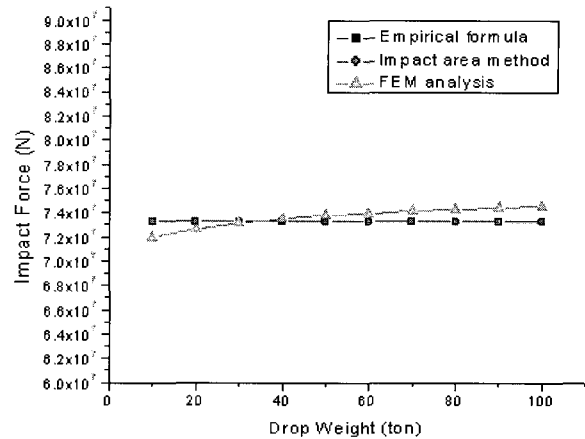


그림 10 Comparison of the impact forces for redwood (perpendicular to grain) of 9 m vertical drop

수평낙하의 경우 표 3에 보이는 바와 같이 충격면적법에 의한 결과와 비교하였는데 충격력 실험식의 경우 3.19×10^7 (N), 충격면적법에 의한 결과는 3.26×10^7 (N)으로 나타났다. 수평낙하에서는 충격력 실험식과 충격면적법에 의한 결과가 2%이내에서 일치하는 것으로 나타났다.

경사낙하의 경우 표 4에 보이는 바와 같이 수평낙하와 마찬가지로 충격면적법과 비교되었는데, 45° 경사낙하의 경우 충격력 실험식은 1.98×10^7 (N)이고, 충격면적법은 2.02×10^7 (N)으로 나타났으며, 60° 경사낙하의 경우 두 방법에서 결과가 2.0×10^7 (N)으로 동일한 결과를 가져왔다. 마지막으로 75° 경사낙하의 경우 충격력 실험식에 의한 결과는 2.42×10^7 (N)이었고, 충격면적법은 2.52×10^7 (N)으로 나타났다. 그림 10은 9m 수직낙하에 대한 충격력을 충격력 실험식, 충격면적법 및 유한요소해석 결과를 낙하중량에 따라 서로 비교해 보이고 있는데, 충격력 실험식과 충격면적법에 의한 결과는 거의 일치하고 있으며 유한요소해석에 의한 결과와는 약간의 차이는 있으나 6%이내에서 일치한다고 할 수 있다.

이상에서 충격력 실험식에 대한 타당성에 대하여 분석한 결과 충격력 실험식은 신뢰성이 있으며 직접적으로 충격력을 산출해 낼 수 있는 편리하고 유용한 도구로 고안되었음을 확인하였다.

표 2 Comparison of the impact forces for redwood (perpendicular to grain) of vertical drop

Case	Empirical formula	Impact area method	FEM analysis
W=50.0ton, H=9.0m, R=1.0m	7.33×10^7	7.33×10^7	7.37×10^7

표 3 Comparison of impact forces of the redwood (parallel to grain) for side drop

Case	Empirical formula	Impact area method
W=50.0 ton, H=9.0 m, R=1.0m	3.19×10^7	3.26×10^7

표 4 Comparison of impact forces of the redwood (perpendicular to grain) for oblique drop
Case : W=50.0 tons, H=9.0 m, R=1.0

Method	45°	60°	75°
Empirical formula	1.98×10^7	2.0×10^7	2.42×10^7
Impact area method	2.02×10^7	2.07×10^7	2.52×10^7

3.3 충격력 실험식을 이용한 충격완충체의 특성분석 및 고찰

사용후핵연료 수송용기는 수송용기 본체와 충격완충체로 구성되어 있다. 충격완충체의 하중특성에 대한 분석은 수송용기 설계에 있어서 매우 중요하다. 설계자가 충격완충체를 어떻게 설계하느냐에 따라 수송용기의 안전성 확보는 물론이고 수송용기의 중량을 감소시킬 뿐만 아니라 제작 비용을 감소시킬 수 있기 때문이다.

충격력 실험식 (15)는 낙하높이, 낙하중량 및 충격완충체의 반경에 따라 쉽게 충격력을 산출할 수 있게 한다. 충격력 실험식을 이용하여 낙하중량 및 충격완충체의 반경에 따라 충격력을 산출할 수 있는데, 이를 통하여 충격완충체의 특성을 파악할 수 있다.

수직낙하의 경우 식 (19)에서 알 수 있는 바와 같이 충격력은 충격완충체의 반경과 수송용기 중량과의 함수이다. 그림 11에서 보인바와 같이 수직낙하에서 최대충격력은

낙하중량 및 낙하높이에 관계없이 일정하게 나타나는데 이는 수직낙하의 경우 충격을 받는 충격완충체의 충격면적이 변하지 않는 것으로 가정하였으므로 충격을 받는 중에 충격면적은 일정하게 유지된 상태에서 충격에너지가 충격완충체의 변형에 의하여 흡수되기 때문이다. 즉, 수직낙하에서 낙하충격에너지는 충격완충체의 압착변형(crushing deformation)으로 나타나고 낙하높이, 낙하중량에 따라 충격 작용시간 및 압착 변형량은 달라지나 충격력은 일정하게 나타난다. 그림 12는 유한요소해석을 통하여 산출한 수직낙하충격을 받는 발사우드 충격완충체에 대한 낙하중량에 따라 변하는 압착 변형량을 보이고 있는데 낙하중량이 증가함에 따라 압착 변형량이 증가함을 알 수 있다.

수직낙하의 경우 충격완충체 재료인 발사우드가 받는 9m 낙하충격력을 그림 13 및 그림 14에 충격완충체의 반경의 변화에 따라 나타내었다. 수직낙하의 경우 충격완충체의 재료인 목재의 나무결의 방향에 따라 충격력분포가 달라지는 것을 알 수 있는데 나무결이 평행한 방향으로 충

격을 받는 경우가 나무결에 수직인 방향으로 충격을 받는 경우 보다 충격력이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이들 선도에서 알 수 있듯이 충격면적, 즉 충격완충체의 반경이 커질수록 충격력이 급격히 증가함을 알 수 있는데 나무결에 수평인 경우가 나무결에 수직인 경우보다 급격히 증가함을 알 수 있으며 나무결에 수직인 경우 그 경사는 매우 완만하게 약간씩 증가함을 확인하였다.

수평낙하의 경우 충격면적에 따른 충격력의 경사가 수직 낙하에 비하여 조금 완만히 나타나며 모양도 약간 불룩한 형태로 나타난다. 그림 15 및 그림 16은 레드우드와 발사우드 각각에 대하여 9m 수평낙하에 대한 낙하중량별로 충격완충체의 반경에 따라 나타내었다. 여기서 알 수 있듯이 수평낙하에서는 낙하중량의 변화에 따라 충격력도 변함을 알 수 있다. 이는 수평낙하에서는 기본적으로 충격시 충격력이 작용하는 시간동안 충격면적이 변하기 때문이다. 낙하중량이 커질수록 낙하중량의 차이에 의한 충격력의 차이가 감소됨을 알 수 있었다.

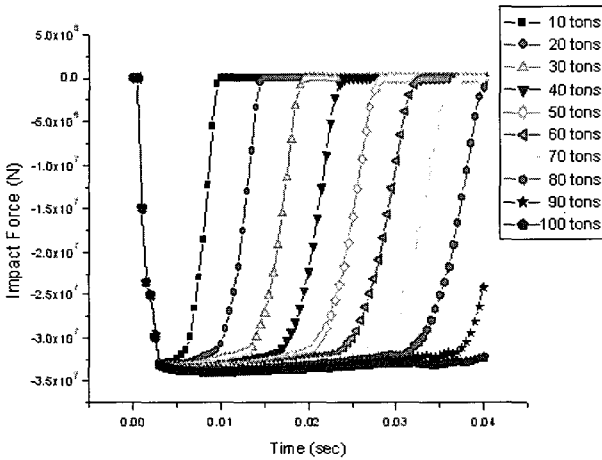


그림 11 Comparison of the impact forces for balsa wood (parallel to grain) of 9 m vertical drop

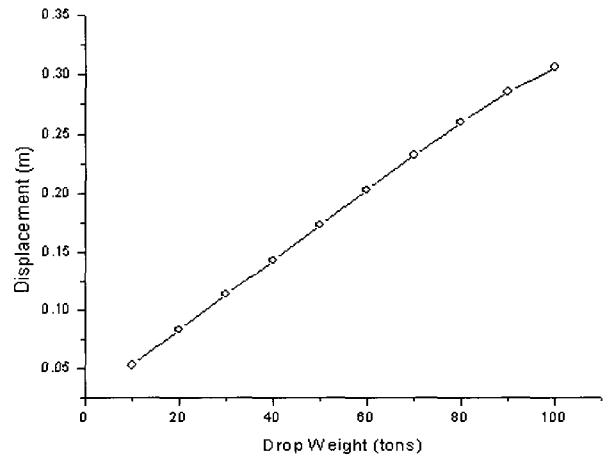


그림 12 Crushing displacements of balsa wood (parallel to grain) for 9 m vertical drop

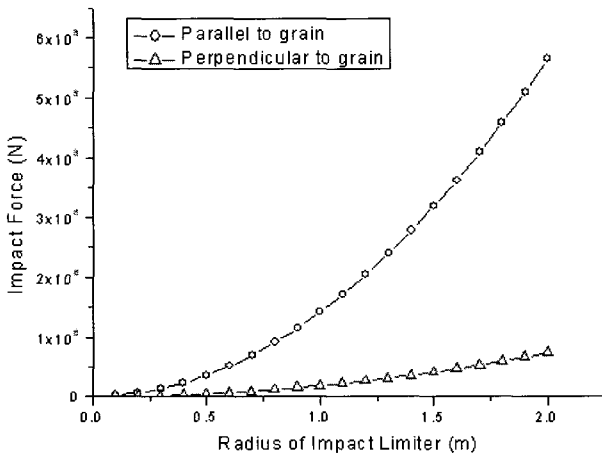


그림 13 Impact forces of redwood for 9 m vertical drop

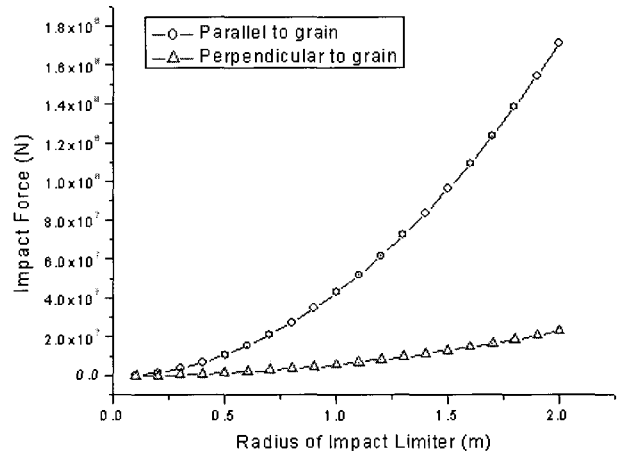


그림 14 Impact forces of balsawood for 9 m vertical drop

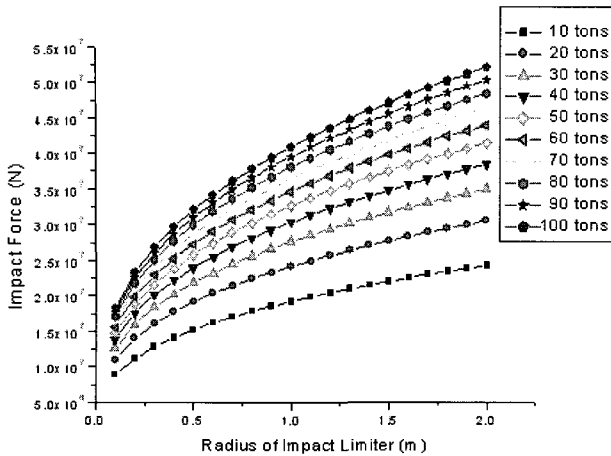


그림 15 Impact forces of redwood for 9 m side drop

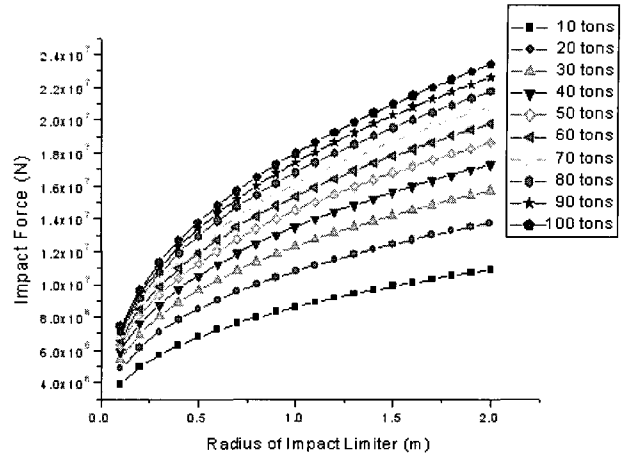


그림 16 Impact forces of balsawood for 9 m side drop

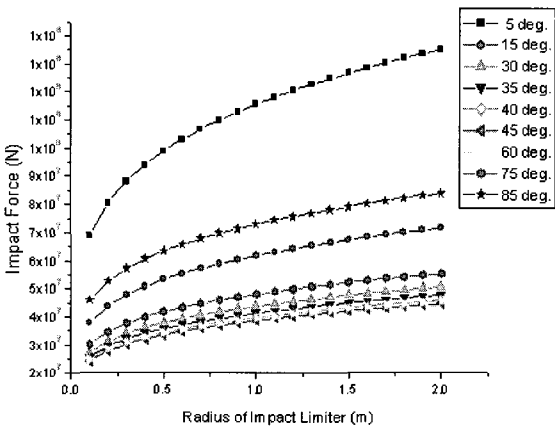


그림 17 Comparison of the impact forces for redwood (parallel to grain) of various oblique drop angle

경사낙하의 경우 앞서 제시한 그림 5~7에 보인 바와 같이 충격력은 낙하각 45°를 기준으로 각각 다르게 나타나는데 낙하각 45°에서 가장 작은 충격력이 발생되고 낙하각 45°이하의 경사낙하에서는 낙하각이 증가함에 따라 충격력이 감소하고 낙하각 45°이상의 경사낙하에서는 낙하각이 증가함에 따라 충격력이 증가하게 된다. 그림 17은 9m 경사낙하에서 낙하중량 50ton에 대한 낙하각 5°에서 85°까지 낙하각에 따라 변하는 충격력을 보이고 있다. 여기서 낙하각 5°일 경우 가장 큰 충격력이 발생되며 낙하각 45° 경사낙하에서 가장 작은 충격력이 발생됨을 알 수 있다. 이는 낙하각 45°를 기준으로 낙하각 45°이하의 경사낙하에서 충격시 낙하면과 접촉하는 충격원충체의 충격면적이 낙하각 45°이상의 경사낙하의 경우 보다 더 큼을 의미한다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수송용기의 낙하충격력을 낙하방법에 따라 간단히 계산할 수 있는 실험식을 얻었다.
- (2) 충격력 실험식에 사용되는 계수, a 값을 그림으로 나타내어 쉽게 결정할 수 있도록 하였다. 또한, 수송용기의 가상 사고 시험조건 중 하나인 9m 자유낙하에 대한 충격력을 구하는데 필요한 계수값을 쉽게 구할 수 있도록 C_k 선도를 제시하였다.
- (3) 고안된 충격력 실험식에 의한 충격원충체의 충격특성을 분석한 결과 낙하각 45°를 기준으로 낙하각 45°이하에서는 낙하각이 증가할수록 충격력이 감소하나 낙하각 45°이상에서는 낙하각이 증가할수록 충격력이 증가한다. 또한, 충격원충체의 충격면적이 증가함에 따라서 발생하는 충격력이 증가하는데 충격원충체 재료의 나무결 방향이 평행인 경우가 수직인 경우보다 충격력이 매우 급격히 증가하고 나무결에 수직인 방향이 매우 낮고 완만하게 증가한다.

참 고 문 헌

과학기술부(2001) 방사성물질 포장 및 운반에 관한 규정, 과학기술부 고시(개정안)

이영신, 김용재(1993) 낙하충격력을 받는 방사성물질 수송용기의 동적거동에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 18(11), pp.2805~2816

이영신, 정성환(1997) 사용후핵연료 수송용기의 수평낙하 충격에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 12(3) pp.457~469

이영신, 최영진, 김승중, 김용재, 이재형(2005), LS-DYNA3D 및 ABAQUS/Explicit Program를 이용한 사용후 핵연료 운반용기의 자유낙하 충격특성연구, 한국전산구조공학회논문집, 18(1), pp.43~50

- 정성환(2000) 자유낙하조건에 대한 원통형 수송용기 충격 완충체의 충격특성연구”, 충남대학교대학원, 박사학위논문, pp.1~165
- B. Carnahan, H.A. Luther J.O. Wilkes, "Applied Numerical Method", John Willey and Sons, Inc., New York
- Chung, S .H., Ji, P. K., Choi, B. I., Lee, H. Y., Lee, Y. S.(1999) Conceptual Design of the KN-12 Spent Fuel Shipping Cask, Transactions of the International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology(SMiRT15), 7, pp.129~136
- David, F. W., Nolle, H.(1982) Experimental Modelling in Engineering, Butterworths, Toronto
- E. Kreyszig(1979) Advanced Engineering Mathematics, John Willey and Sons, Inc., New York
- H.L. Langhaar(1964) "Dimensional Analysis and Theory of Models", John Wiley and Sons, Inc., New York
- Hoffman, E .L., Ammerman, D. J.(1995) Dynamic Pulse Buckling of Cylindrical Shells under Axial Impact : A Benchmark Study of 2D and 3D Finite Element Calculations, Transport and Storage of Radioactive Materials, ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, ASME, PVP-Vol.307, pp.53~60
- IAEA(1996) Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, IAEA Safety Standards Series No. ST-1
- Janberg, K., Diersch, R., Spilker, H., Dreier, G.(1995) Design Assessment for Transport and Storage Casks, *International Journal of Radioactive Materials*, 6(2/3), pp.191~196
- Lee, Y. S., Chung, S. H.(1997) Impact Analysis for a Radioactive Package, Transactions of the International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology(SMiRT14), 6, pp.57~63
- 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
- Miller, G. K.(1993) Calculation of Impact Loads for High Energy Drops of Cylindrical Containers, *International Journal of Impact Engineering*, 13(4), pp.511~526
- Sedov, L. I., Holt, M., Friedman, M.(1980) Similarity and Dimensional Methods in Mechanics, Academic Press, New York
- Szücs, E.(1980) Similitude and Modelling, Elsevier Scientific Publishing Company, New York
- US 10CFR Part71(1997) Packaging and Transportation of Radioactive Material, USA.