

방사성물질 운반용기 완충체의 자유낙하 충격 거동에 관한 연구

박홍윤* · 신동필* · 서기석** · 정성환*** · 홍성인****

A Study on the free drop impact analysis of the impact limiter for radioactive material transportation cask.

H.Y. Park, D.P. Shin, K.S. Seo, S.H. Chung and S.I. Hong

Abstract

As the nuclear power plant has been operated continuously and increased gradually, transportation and storage of spent fuel are seriously considered nowadays. The transportation cask which contains radioactive material needs to be inspected about structural safety. About safety verification, prescription of IAEA Safety Standards states that cask must withstand hypothetical accident conditions. In this paper, 9m free drop impact analysis was performed for transportation cask and impact limiter by using the finite element methods. Furthermore, we obtained the dynamic behavior of wood to as compared with safety test results, and verified the safety of transportation cask.

Key Words : Impact Analysis, Anisotropic Material, Wood Crush, Dynamic Behavior, Explicit

1. 서론

원자력 발전소의 가동이 계속되고 발전량 또한 점차 증가함에 따라, 사용후 핵연료의 안전한 저장을 위한 운반용기 및 수송의 중요성이 부각되고 있다. 또한 사용후 핵연료에는 고준위의 방사성물질이 포함되어 있기 때문에 사고발생의 경우를 고려하여 용기에 대한 구조적 안전성에 대한 검증이 필요하다. 이러한 안전성 검증에 대해서는 과거에 고시 및 IAEA Safety Standards 등의

규정에서 가상사고 조건에 대한 구조시험을 명시하고 있다. 시험 조건중 9m 수직 자유낙하의 경우 운반용기의 최대 손상이 예측되는 부분에서 운반용기에 대한 충격력의 평가가 이루어진다. 이러한 평가를 위해서는 운반용기 본체와 충격력을 흡수할 수 있는 완충체에 대한 충격 해석이 필요하다.

일반적으로 완충체는 용기에 전달되는 충격하중을 최대한 흡수하기 위해 항복 강도이후 경화(Crush up)가 일어나기 전인 소성 변형의 구간이 큰 나무를 많이 사용

* 충남대학교 대학원 기계공학과
** 한국원자력연구소
*** 원자력환경기술원
**** 충남대학교 기계공학과

한다. 하지만 나무는 이방성 재질로서 그 결의 방향이 일정하지 않아 충격력이나 변형에 대한 예측이 쉽지 않다. 또한 대부분의 완충체는 내부에 격판을 포함하고 있는 구조로 되어있어 충격에 대한 거동을 명확히 제시하는 데 많은 어려움이 따른다. 이러한 이유로 기존의 연구는 주로 2차원 형상으로 가정한 해석이 주로 이루어졌다.⁽¹⁾

본 연구는 KN-12 운반용기의 안전성에 대한 평가로서, 유한요소 Code인 ABAQUS/Explicit를 사용하여 내부 격판을 고려한 3차원 형상으로 운반용기와 완충체의 충격에 대한 해석을 수행하여 나무의 충격거동과 격판의 영향을 분석하고, 실제 시험과 비교하여 운반용기의 안전성에 대해 평가하였다.

2. 이 론

2.1 Hankinson 실험식⁽²⁾

나무의 찌그러짐 용력에 대한 주요한 실험식은 Hankinson에 의해 제시되었다.

$$\sigma_c = \frac{\sigma_p \sigma_v}{\sigma_p \sin^n(\theta) + \sigma_v \cos^n(\theta)} \quad (1)$$

압축방향 θ 에 따른 용력(σ_c)을 결 방향의 용력(σ_p)과 결의 수직 방향에 대한 용력(σ_v)으로 나타내는 식으로 방향에 따른 나무의 용력을 예측할 수 있다. 여기서 상수 n 은 물성치와 관련된 상수값으로 1.5에서 2.0의 값을 갖는다.

2.2 에너지 보존의 법칙

입의 질량 또는 체적으로 한계가 구성되는 에너지 보존 법칙은 아래 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int_V \rho \left(e + \frac{1}{2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} \right) dV \\ & = \int_S \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} dS + \int_V \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{f} dV - \int \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, e 와 $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{v})/2$ 는 각각 단위 질량당 작용하는 내부 에너지 및 운동에너지를 나타내며, \mathbf{q} 는 전도 열 플럭스(conductive heat flux)를 나타낸다.

3. 유한요소해석

3.1 운반용기 및 완충체의 구조

방사성물질 운반용기는 Fig.1에서 보는 바와 같이 원통형 구조로 내부에 핵연료를 장전할 수 있는 Basket을 포함하고 있으며, 완충체는 구조적인 형상을 유지하고 충돌시 이탈을 방지하기 위해 내부의 격판(Gusset)과 Spruce, Beech 두 종류의 나무를 외부의 Casing이 감싸고 있는 구조이다. 중심부는 Spruce의 나뭇결이 반지름 방향으로, 외부는 Beech 재질의 적층구조로 결방향이 서로 90°를 이루고 있다.

3.2.1 모델링

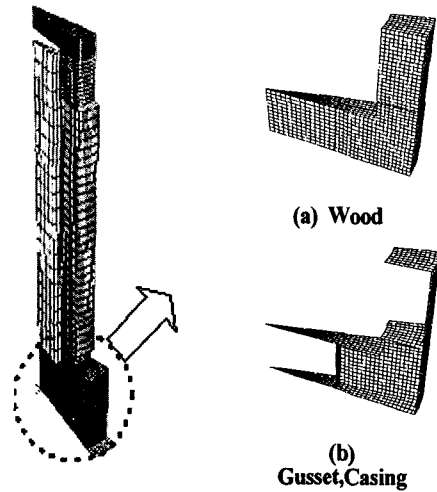


Fig. 1 Finite element model

운반용기의 정확한 해석을 위해서는 완충체의 내부 격판 구조에 대한 고려가 이루어져야 한다. 용기와 완충체가 축대칭 형상인 것을 고려하여 3차원 1/24 모델로서 가정하였다. 요소는 용기 본체 및 나무에 대해서는 ABAQUS에서 3차원 Solid 요소인 C3D8R을, Gusset과 Casing은 Shell 요소인 S4R을 사용하였으며, 충돌면은 강체(Rigid)로 취급하였다. 완충체의 주요 재질인 나무는 각각의 층을 결의 방향성에 따른 물성치를 갖는 재질로 가정하고, 적층시킴으로써 완충체의 특성이 나타나도록 하였다.⁽⁴⁾

3.2.2 해석방법

자유낙하 충격의 해석을 위해 충돌 직전인 경우로 가정하여 에너지 보존 법칙에 의해 12.784m/s의 초기 속도와 중력가속도, 질량을 고려하여 동적 해석을 수행하였다. 이 때 운반용기와 Casing, 격판, Spruce, Beech, 강

체 사이에는 단순 접촉으로 마찰이 없는 것으로 가정하였다.

3.2.3 해석 조건

운반용기 본체의 경우 SA350LF3재질로 이루어져 있으며, Casing의 재질은 SA240으로 그 기계적 성질은 Table.1과 같다. 이방성 재질인 Spruce와 Beech의 경우 Fig.2의 단축 압축시험 결과를 사용하였다. 그 기계적 성질은 결 방향에 따른 각각의 경우를 적용하고 항복응력 이후의 상태에서 소성 경화를 고려하였다.

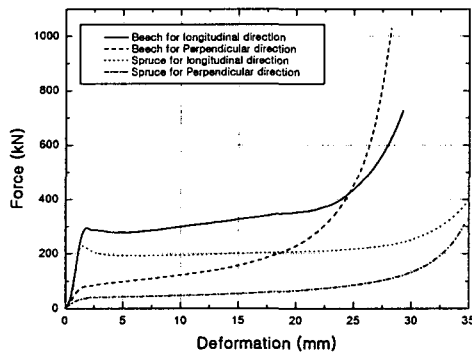


Fig. 2 Results of uniaxial test.

Table 1 Material Properties

	SA350 LF3	SA240	Beech		Spruce
			perpendicular	longitudinal	
Young's modulus (GPa)	191.674	195.12	1.439	0.424	0.156
Yield Strength (MPa)	258.6	206.8	37.54	8.97	4.509
Ultimate Strength (MPa)	482.6	517.1	-	-	-
Density (g/cc)	0.78	0.78	0.58	0.58	0.34
Poisson's Ratio	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4

4. 결과 및 고찰

4.1 유한요소 해석 결과

Fig.3은 각각의 경우 von Mises 응력을 나타내고 있다. 완충체에서 나무의 최대 응력값은 34.408MPa로 항복응력을 초과한 값으로 소성변형이 일어나 충격흡수가

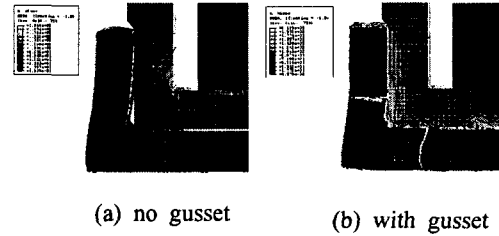


Fig. 3 A contour of von Mises stress.

이루어짐을 나타낸다.

수직낙하의 경우는 식(1)에서 $\theta = 90^\circ$ 인 경우로 실험식에 의해 완충체의 나무에 발생하는 응력(σ_w)은 결의 수직방향 응력(σ_v)과 같은 값을 갖게 된다. 실제 실험의 완충체 변형량(20mm)으로 에너지 보존법칙 식(2)를 사용해 계산된 값은 47.208MPa로서 완충체의 최대 응력의 크기를 예측해 볼 수 있다.

운반용기의 최대 충돌 응력은 격판이 있는 해석의 경우 115.773MPa과 그렇지 않은 경우 25.864MPa을 나타내며, 이는 모두 운반용기의 항복응력을 초과하지 않는 값으로 안전성을 만족한다. 하지만 Fig.3(a)의 격판이 없는 완충체의 경우 충격 거동시 용기와 접촉하지 않는 부분에서도 변형이 발생해 충격력의 흡수가 이루어져 (b)의 경우보다 용기 본체에 발생하는 응력을 감소시켜 준다

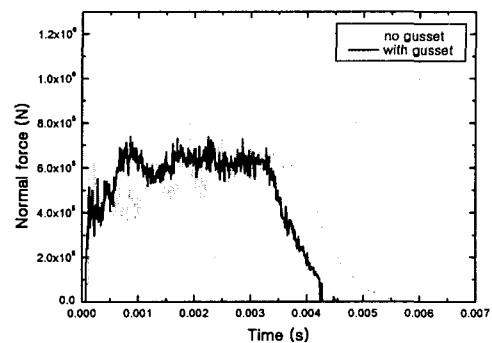


Fig. 4 Impact force-time history at rigid wall.

해석의 결과에서 충돌면에서 발생하는 충격력을 보면 Fig.4의 그래프에서 내부 격판을 고려한 해석이 그렇지 않은 경우에 비해 초기 충격력이 큼을 알 수 있다. 이는 내부 격판이 초기 변형에서 좌굴이 일어나기 때문이다. 이로 인해 충돌시간이 짧아져 전체적인 충돌에너지의 양은 나무로만 이루어진 경우와 같아지게 된다.

준정적해석에서 격판으로만 이루어진 구조와 비교해 나무와 격판의 조합으로 이루어진 구조가 받는 충격력은 약 1.5배임을 보인 Yoshimura와 Attaway의 연구⁽¹⁾에 비해, 나무로만 이루어진 구조와 격판과 조합되어 있는 구조의 최대 충격력은 그 크기가 유사함을 알 수 있다.

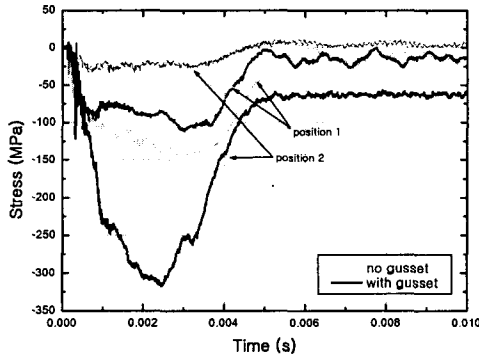


Fig. 5 Stress-time history

Fig.3에서 충돌 순간, 용기에서 최대 응력이 발생하는 곳이 다름을 알 수 있다. 완충체가 격판을 포함하고 있는 경우와 그렇지 않은 경우, 충격에 의해 운반용기 본체의 바닥 면에 발생하는 응력은 Fig. 5와 같다. 낙하방향에 대한 응력으로서, position 1의 그래프는 나무로만 이루어진 경우에서 최대 응력이 발생하는 위치를 기준으로 격판이 있는 경우의 응력과 비교한 것이고, position 2의 그래프는 격판이 있는 경우를 기준으로 비교한 것이다. 충돌에너지의 관점에서는 격판의 유무가 최대 충격력에 대한 영향이 크지 않았으나, 운반용기에 대한 응력에 대해 보면 격판이 위치하는 곳의 용기 바닥 면에서 응력의 집중현상이 나타남을 알 수 있다.

운반용기 바닥면의 반지름 방향의 변형량을 시험치와 비교해 보면 Fig.6에서와 같이 격판을 고려한 해석의 경우가 실제 시험의 결과와 유사함을 알 수 있다. 이는 이 방성 재료의 나무에 대해 등방성 재질이 적층된 형태로 가정하여 수행한 해석의 방법이 용기 본체의 변형량을 예측하는데 있어 적합함을 보여 준다.

Fig.7에서 충격 거동시 완충체의 압축 변형을 보면 최대 압축량은 격판이 없는 해석이 4.3mm정도 크게 나타난다. 격판이 충격 하중시 좌굴이 일어나 충격력을 흡수함으로써 완충체 전체의 압축량을 감소시킴을 보여준다. 또한 나무로만 이루어진 완충체의 경우, Fig.4와 Fig.7에서와 같이 충돌 시간이 길어지고 완충체의 압축량이 증가함으로써 용기본체에서 발생하는 응력과 변형량의 크

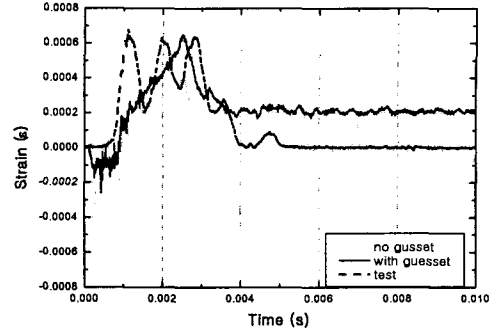


Fig. 6 Strain-time history of the cask bottom.

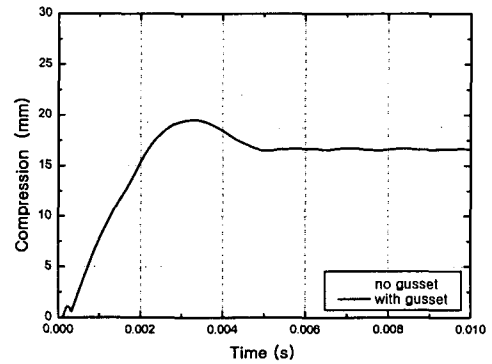


Fig. 7 Compression of the impact limiter.

기는 감소함을 알 수 있다. 완충체가충격 거동이 끝난 후의 압축 변형량은 Tabl 2 에서와 같이 실제의 시험값에 비해 해석의 결과가 10~30%정도 작게 나타난다. 이러한 차이는 나무의 물성치를 정적인 실험값을 사용하여 나타난 것으로, 동적인 물성치를 측정하고 적용한다면 보다 정확한 압축량을 나타낼 수 있을 것으로 보여 진다.

Table. 2 Compression of Impact limiter

	Test	Analysis	
		with gusset	no gusset
Compression	20mm	16.7mm	18.9mm

5. 결 론

방사성 물질 운반용기 완충체의 충격 거동에 관한 유

한 요소 해석을 통하여 완충체 내부 격판이 거동에 미치는 영향을 평가하였다.

(1) 완충체는 그 구조상으로는 내부의 격판이 주요한 요소이지만, 초기 충격력을 증가시키고 운반용기에 응력 집중을 유발하므로 이를 방지할 수 있는 격판의 형상 설계가 필요하다.

(2) 이방성 재료를 등방성 재료의 적층된 형태로 가정한 해석 결과와 시험결과를 비교하여 이방성 재료의 충격 거동의 해석방법을 제시하였다.

(3) KN-12 운반용기에 대하여 유한요소 해석을 수행하고 시험 결과와 비교하여 그 안전성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구소에서 수행되어진 KN-12 Transportation Cask Safety Test를 기반으로 수행되었

다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Yoshimura, H.R., Attaway, S.W., "Dynamic and Static Behavior of Metal Gussets in Cask Impact Limiters", Sandia Nat'l. Lab. p. 5.
- (2) Hankinson, R.L., 1921, "Investigation of Crushing Strength of Spruce at Various Angle of Grain", U.S. Air Service, Air Service Inform. Cir. III (259), p. 15.
- (3) Attaway, S.W., 1988, "A Local Isotropic /Global Orthotropic Finite Element Technique of Modeling the Crush of Wood", Sandia Report, SAND88-1449, pp. 12~14