

## 사용후핵연료 수송용기 충격완충체에 적용되는 발사목과 우레탄 폼의 기계적 특성 및 저속충격특성 평가 연구

구준성\* · 신광복\*\*† · 최우석\*\*\*

\* 한밭대학교 기계설계공학전공 대학원, \*\* 한밭대학교 기계공학과, \*\*\* 한국원자력연구원

### Evaluation of Mechanical Properties and Low-Velocity Impact Characteristics of Balsa-Wood and Urethane-Foam Applied to Impact Limiter of Nuclear Spent Fuel Shipping Cask

JunSung Goo\*, KwangBok Shin\*\*† and WooSuk Choi\*\*\*

\* Graduate school of Mechanical Design Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

\*\*\* Korea Atomic Energy Research Institute

(Received June 4, 2012 ; Revised July 31, 2012 ; Accepted July 31, 2012)

**Key Words:** Balsa-Wood(발사목), Urethane-Foam(우레탄 폼), Low-Velocity Impact(저속충격), Impact Limiter(충격완충체), Nuclear Spent Fuel Shipping Cask(사용후핵연료 수송용기)

**초록:** 본 논문의 목적은 사용후핵연료 수송용기 충격완충체의 완충재질로 고려되고 있는 발사목과 우레탄 폼 심재, 그리고 샌드위치 패널에 대한 저속충격거동 및 기계적 특성을 평가하는 것이다. 우레탄 폼은 등방성 재질로써 인장, 압축, 그리고 전단의 기본물성시험을 수행하였으며, 발사목은 서로 다른 직교방향에서 다른 물성을 갖는 이방성 재료이므로 아홉가지 방향에 대한 기계적 특성 평가를 하였다. 충격시험용 심재와 샌드위치 패널 시험편은 충격시험기를 사용하여 세가지 충격에너지 레벨(1J, 3J, 그리고 5J)에 대한 저속충격시험을 수행하였다. 시험 결과, 우레탄 폼과 성장방향을 제외한 발사목은 충격에너지 흡수율, 접촉하중, 그리고 손상영역에서 유사한 거동을 보였으며, 우레탄 폼 심재는 난연성과 비용절약이 우선시 되는 설계에서 완충재질로서 추천될 수 있고, 발사목 심재는 사용후핵연료 수송용기의 경량화를 위한 완충재질로써 우선 고려될 수 있다.

**Abstract:** This paper aims to evaluate the low-velocity impact responses and mechanical properties of balsa-wood and urethane-foam core materials and their sandwich panels, which are applied as the impact limiter of a nuclear spent fuel shipping cask. For the urethane-foam core, which is isotropic, tensile, compressive, and shear mechanical tests were conducted. For the balsa-wood core, which is orthotropic and shows different material properties in different orthogonal directions, nine mechanical properties were determined. The impact test specimens for the core material and their sandwich panel were subjected to low-velocity impact loads using an instrumented testing machine at impact energy levels of 1, 3, and 5 J. The experimental results showed that both the urethane-foam and the balsa-wood core except in the growth direction (z-direction) had a similar impact response for the energy absorbing capacity, contact force, and indentation. Furthermore, it was found that the urethane-foam core was suitable as an impact limiter material owing to its resistance to fire and low cost, and the balsa-wood core could also be strongly considered as an impact limiter material for a lightweight nuclear spent fuel shipping cask.

#### 1. 서 론

최근 원자력발전소의 지속적인 가동으로 사용

후핵연료의 발생량이 증가하고 있으며, 이에 발전소 내의 사용후핵연료의 저장공간이 부족하여 인접 발전소나 대규모 저장시설로 이동하고 있는 실정이다. 원자로에서 나온 사용후핵연료는 방사성물질이 포함되어 있어 강한 방사선과 높은 열이 방출되기 때문에 사용후핵연료 수송용기는 방사선 차폐와 구조적 안전성을 만족시킬 수 있는

† Corresponding Author, [shin955@hanbat.ac.kr](mailto:shin955@hanbat.ac.kr)

설계 및 제작이 이루어져야 한다.<sup>(1)</sup>

따라서, 사용후핵연료 수송용기는 국제원자력 기구의 안전규정(IAEA Safety Standard)에서 가상적인 사고조건에 대한 시험을 통해 구조 안전성을 평가하고 있다. 사고시험의 종류로는 낙하시험, 파괴시험, 화재시험, 그리고 침수시험으로 분류되고 있으며, 시험이 순차적으로 진행된 후 방사성물질의 누출이 발생하지 않도록 구조적 건전성을 요구받고 있다.<sup>(2)</sup>

이때, 낙하사고 시험조건은 수송용기의 최대 손상이 예측되는 9m 높이에서 수평낙하, 수직낙하, 그리고 경사낙하와 같은 다양한 조건에 대한 시험을 통해 수송용기가 강제 수평면과 충돌할 때 내부의 방사성물질이 누출되지 않는지에 대한 평가가 이루어지게 된다. 이때, 낙하에 의한 수송용기의 손상을 방지하기 위해 충격완충체(impact limiter)가 수송용기 양 끝단에 결합되어 수송용기를 보호하게 된다.<sup>(3,4)</sup>

충격완충체에 적용되는 소재는 발사목(Balsa Wood), 레드목(Red Wood), 하니컴 코어(Honeycomb core), 그리고 우레탄 폼(Urethane Foam)이 주로 사용되고 있으며, 이들 재료는 이동간 발생될 수 있는 낙하사고로부터 수송용기를 보호하는 역할을 수행하고 있다. 국내에서는 KN-18 SNF 수송용기 충격완충체에 스테인리스강관 케이스와 완충재질로 발사목을 적용한 사례가 있으며, 해외의 경우, 이탈리아에서 AGN1 수송용기에 카본/스틸 복합재(carbon/steel)와 스테인리스강(stainless steel)으로 제작된 충격완충체에 대한 충격특성을 평가한 사례가 있다.<sup>(5,6)</sup> 이와 같이 사용후핵연료 수송용기는 요구되는 용량 및 크기에 따라 다양한 형태와 소재로 충격완충체를 제작하고 있다. 국내의 경우 충격완충체 제작 시, 금속재 면재와 완충재질 심재로 구성하고 있기 때문에 다양한 종류의 완충재질에 대한 기계적 특성 및 충격특성 평가가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 사용후핵연료 수송용기 충격완충체의 완충재질로 고려되고 있는 발사목과 우레탄 폼에 대한 기본물성시험을 수행하여 재료가 갖는 기계적 특성을 평가하였고, 다양한 사고조건에서 완충재질의 동적특성을 평가하기 위해 심재(발사목과 우레탄 폼)와 SUS304 면재를 갖는 샌드위치 패널에 대한 저속충격시험을 수행하였다. 이때, 우레탄 폼은 등방성 재질으로써 3가지 물성(인장, 압축,

그리고 전단)에 대해 평가하였으며, 발사목은 나이트를 기준으로 방향별 특성이 다른 이방성 재질의 특성을 고려하여 z,  $\theta$ , r방향별로 각각 3가지 방향 물성 즉, 9가지의 물성을 평가 하였다. 최종적으로, 기계적 특성과 저속충격특성 평가 결과를 바탕으로 최적의 사용후핵연료 수송용기 충격완충체 설계를 위한 기준으로 삼고자 하였다.

## 2. 충격완충체의 형상 및 완충재질별 기계적 물성 평가

### 2.1 사용후핵연료 수송용기의 충격완충체

충격완충체는 충격에너지를 흡수할 수 있도록 스테인리스강관 케이스 내부에 충격흡수력이 우수한 완충재질을 삽입한다.<sup>(7)</sup> 이때, 충격완충체에 적용되는 완충재질은 주로 발사목과 레드목, 또는 제작의 용이성을 위해 우레탄 폼이 사용되고 있다. 발사목 완충재질은 구조물의 경량화 및 완충성을 높이기 위해 널리 사용되고 있는 소재로써, 국내에서는 사용후핵연료 수송용기의 충격완충체로 사용되고 있다. 그러나, 발사목의 경우 화재사고조건에 대한 취약성을 갖고 있기 때문에 난연성이 강화된 우레탄 폼과의 상호 비교를 통해 사용후핵연료 수송용기 충격완충체의 완충재질로써의 타당성을 평가할 필요가 있다. Fig. 1은 사용후핵연료 수송용기의 형상과 충격완충체 형상을 나타내고 있다.<sup>(8)</sup>

### 2.2 완충재질별 기본 물성시험의 정의

사용후핵연료 수송용기 충격완충체에 적용되는

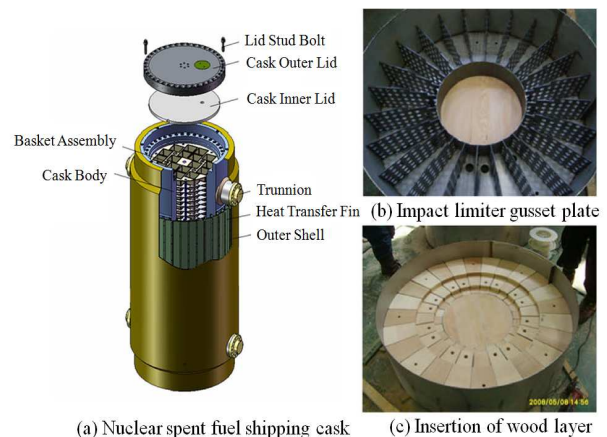


Fig. 1 Nuclear spent fuel shipping cask KN-18 and impact limiter

완충재질의 저속충격특성을 평가하기에 앞서, 발사목과 우레탄 폼이 갖는 기계적 물성을 먼저 평가하였다. 이때, 본 연구에서 사용된 발사목은 중앙아메리카·남아메리카 북부 원산으로,  $120\text{kg/m}^3$ 의 밀도를 갖는 중밀도 발사목(*medium density balsa wood*)이며, 목재가 가볍기 때문에 구조물의 경량화를 위해 적용되고 있다. 우레탄 폼은 밀도를 비교적 자유롭게 조절할 수 있는 소재로써, 폴리우레탄 수지를 발포시킨 상태에서 고화시킨 소재이다. 본 연구에서는 사용후핵연료 수송용기 충격원충체의 화재사고 조건으로부터 안전성을 확보하기 위해 난연성을 향상시킨  $140\text{kg/m}^3$ 의 밀도를 갖는 반경질 우레탄 폼을 사용하였다.

등방성 재질의 우레탄 폼은 인장, 압축, 그리고 전단시험을 실시하였으며, 발사목에 대한 기계적 특성은 서로 다른 직교 방향에서 다른 물성을 갖는 이방성이므로, 아홉 가지 방향에 대한 기본물성을 도출하였다. 일반적으로 발사목의 방향은 나이테를 기준으로 구분되어 z,  $\theta$ , r방향으로 표

기된다. Fig. 2는 본 시험에 적용된 발사목의 판재 가공방법과 그에 따른 각각의 방향성을 나타내고 있다.

우레탄 폼의 인장시험은 ASTM D3574 규정에 의거하여 수행하였으며, 발사목의 인장시험은 ASTM D1623 규정에 의거하여 수행하였다. 발사목과 우레탄 폼의 압축시험은 ASTM C365규정에 의거하여 평가하였으며, 전단시험은 ASTM C273 규정에 의거하여 평가하였다.<sup>(9-12)</sup> Fig. 3은 발사목과 우레탄 폼의 기본물성시험에 사용된 지그형상 및 시험편의 치수를 나타내고 있다.

### 2.3 완충재질별 기본 물성시험 결과

시험에 적용된 발사목은  $120\text{kg/m}^3$ 의 밀도를 갖으며, Fig. 2의 z,  $\theta$ , r방향별 물성을 평가할 수 있도록 시험편을 제작하였다. 이때, 시험편은 시험별로 5개를 수행하였고, 평균을 내어 정리하였다. 발사목에 대한 기본물성시험 결과, 나이테에 수직인 방향인 z방향에 대한 기계적 물성이  $\theta$ , r방향에 비해 높게 나타났다. 이런 이유는 발사목의 성장방향(z방향)에서 강성 및 강도가 높고, 성장방향에 수직인  $\theta$ , r방향의 강성 및 강도가 상대적으로 작기 때문이다. Table 1은 시험을 통해 얻어진 발사목의 각 방향별 기본물성 결과를 보여준다.

발사목의 성장방향을 기준으로 각 방향별로 인장, 압축, 그리고 전단하중에 의한 최종 파손모드는 Fig. 4와 같다. 인장 파손모드는 시험편의 파손 관심부인 중앙부에서 발생하여, ASTM에서 요구되는 파손조건을 만족하였다. 또한, 압축과 전단시험 역시 각 방향별 파손모드가 시험규정에 맞게 발생하였다.

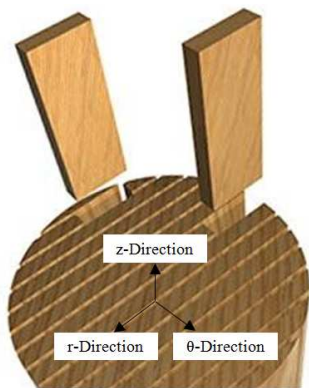


Fig. 2 Cutting direction for making boards and local coordinate of Balsa-Wood

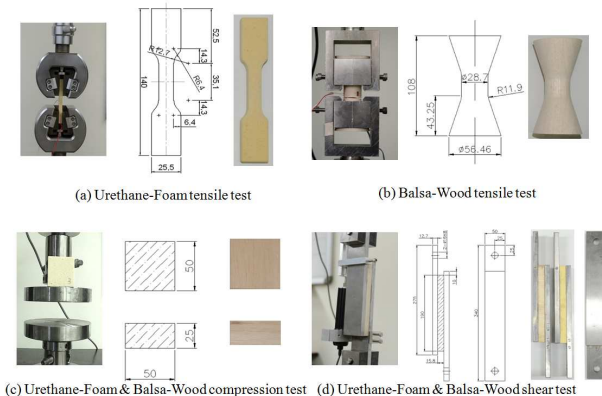


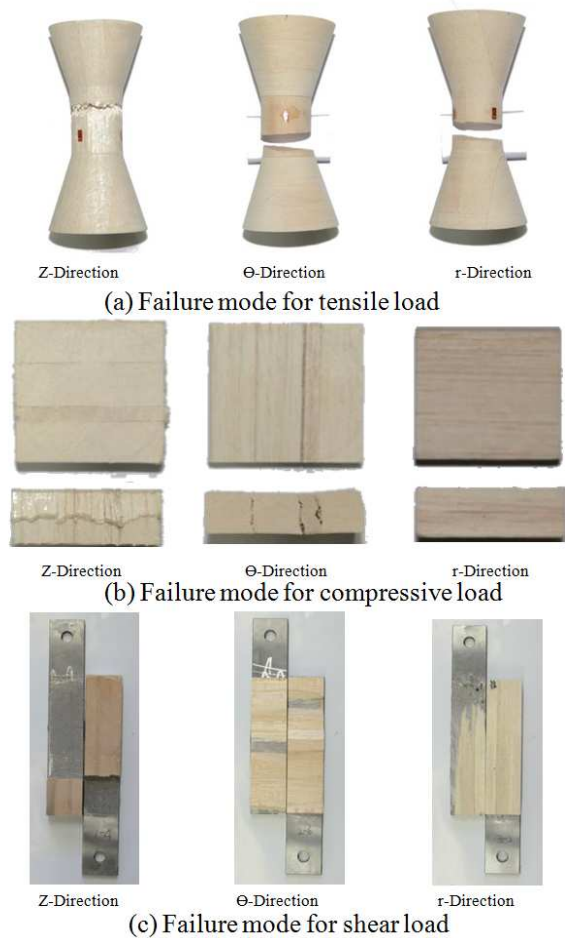
Fig. 3 Test Fixtures and dimension of specimens for mechanical property test

Table 1 Mechanical properties of Balsa-Wood

Balsa-Wood		Tensile	Compressive	Shear
Strength (MPa)	z-direction	2.63	9.58	1.43
	r-direction	0.47	0.68	0.9
	$\theta$ -direction	0.48	0.70	0.79
Modulus (MPa)	z-direction	1089.22	141.71	1007.27
	r-direction	133.17	26.09	975.17
	$\theta$ -direction	136.53	33.99	1259.80

**Table 2** Mechanical properties of Urethane-Foam

Urethane-Foam	Tensile	Compressive	Shear
Strength (MPa)	1.28	1.73	0.88
Modulus (MPa)	168.69	22.98	313.21



**Fig. 4** Failure modes created by mechanical test for Balsa-wood

시험에 적용된 우레탄 폼은 140kg/m<sup>3</sup>의 밀도를 갖으며, 3가지 물성(인장, 전단, 및 압축)을 평가하였다. 이때, 시험편은 발사목과 마찬가지로 시험별로 5개의 시험편은 준비하였으며, 평균값으로 결과를 정리하였다. 기본물성시험 결과, 발사목의  $\theta$ , r방향의 기본물성과 유사한 결과가 도출되었다. Table 2는 시험을 통해 도출된 우레탄 폼에 대한 기본물성 결과를 나타내고 있다.

우레탄 폼의 인장, 압축, 그리고 전단하중에 의한 최종 파손모드는 Fig. 5와 같다. 인장 파손모드는 시험편의 파손 관심부인 중앙부에서 발생하

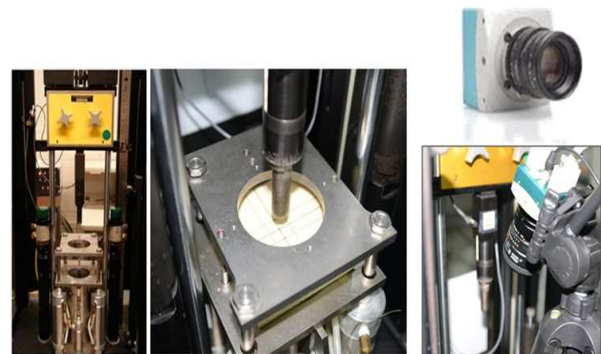


(a) Tensile failure mode (b) Compression failure mode (c) Shear failure mode

**Fig. 5** Failure modes created by mechanical test for Urethane-foam



**Fig. 6** Core materials and sandwich panel specimens for low-velocity impact test



(a) Impact test machine and fixture (b) High speed camera

**Fig. 7** Impact test machine

여, 시험편 간의 결과값 차이가 적게 나타났다. 또한, 압축과 전단시험 역시 파손모드가 시험규정에 맞게 발생하여 시험 결과값의 편차는 적었다.

### 3. 발사목과 우레탄폼 완충재질에 따른 저속충격 특성 평가

#### 3.1 완충재질별 저속충격 시험 정의 현재 사용후핵연료 수송용기의 충격완충체는



Fig. 1에서 보듯이 스테인리스강관 케이스에 발사목 또는 우레탄 폼과 같은 완충재질을 삽입하는 형태로 제작되고 있다. 이에, 발사목과 우레탄 폼 심재(core)에 대한 충격특성과 SUS304 면재를 갖는 샌드위치 패널에 대한 충격특성을 평가하였다. Fig. 6은 발사목과 우레탄 폼 심재와 샌드위치 패널의 충격시험용 시험편 형상을 나타내고 있다.

우레탄 폼 시험편은 일반적인 충격시험용 시험편 규격인 100×100×25(mm)로 제작하였다. 그러나, 발사목의 경우 일정 두께를 갖는 판재 형태로 국내에 수입되기 때문에 나이트를 기준으로 각 방향별 충격특성을 평가하기 위해서는 판재의 치수를 고려하여 시험편을 제작해야 한다. 이에, 발사목 충격시험편의 z 방향은 75×75×25(mm),  $\theta$  방향은 100×100×25(mm), 그리고 r방향은 50×50×25(mm)로 제작하였다.

충격시험은 Fig. 7에서 보듯이 Dynatup 8250 충격시험기를 사용하여 수행하였으며, 이 충격시험기는 하중변환 센서가 장착된 충격체와 충격체를 유도하기 위한 두 개의 유도봉으로 구성된다. 또한, 충격 후 충격체의 리바운드(rebound)를 방지하기 위한 장치가 설치되어 있어, 시험편에 한번의 충격만이 가해진다. 시험에 사용된 충격체(impactor)는 지름 16mm인 반구형의 강철로 1.46kg의 질량을 갖는다.<sup>(13,14)</sup> 이때, 충격시험은 수차례의 시험을 통해 시험편에 손상이 발생하는 1J을 기준으로 하여 3J, 그리고 5J에 대한 충격특성을 평가하였으며, 시험편에 발생한 손상영역 및 손상깊이는 3차원 측정기로 측정하였다.

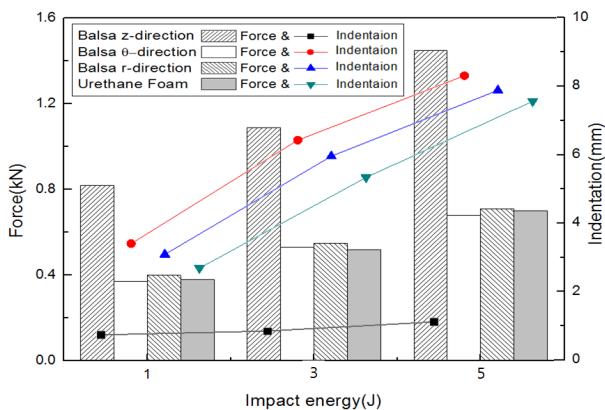


Fig. 8 The results of impact force and indentation response for Balsa-Wood and Urethane-Foam core with different impact energy

### 3.2 완충재질별 저속충격시험 결과

완충재질별 충격특성 평가는 발사목과 우레탄 폼 심재 자체와 실제 충격완충체 케이스로 적용되는 SUS304 면재를 갖는 샌드위치 패널에 대해 평가하였다. Fig. 8은 충격에너지 증가에 따른 발사목과 우레탄 폼 심재에 대한 충격력 및 손상깊이를 나타내고 있다.

발사목과 우레탄 폼 심재에 대한 저속 충격시험 결과, 발사목 z방향이 우레탄 폼과 발사목  $\theta$ , r방향에 비해 높은 충격력을 갖고 있으며, 충격에 의한 손상깊이의 증가율이 매우 작은 것을 확인하였다. 이러한 충격특성은 완충재질의 강성 및 강도가 높을수록 충격에 대한 내충격성이 높아 발생하는 충격력이 높으며, 충격손상영역이 작아

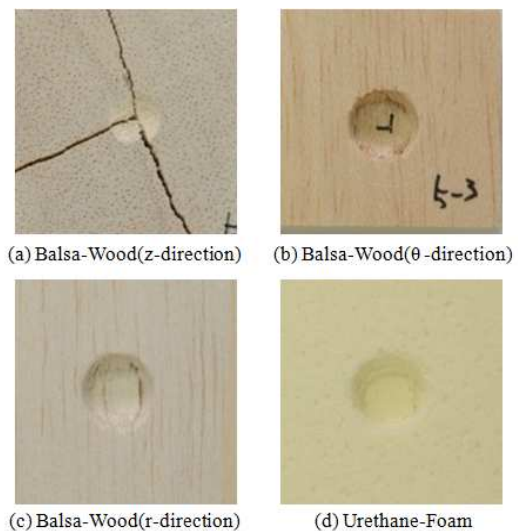


Fig. 9 Damage areas for Balsa-Wood and Urethane-Foam core subjected to 5J impact energy

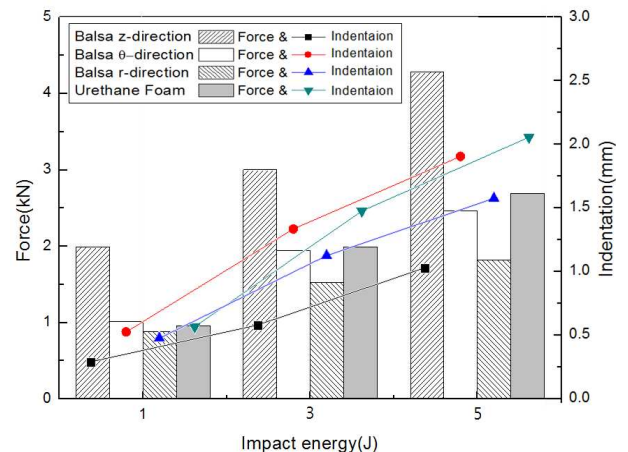


Fig. 10 The impact test results of impact force and indentation response for sandwich panels with different impact energy

지는 것으로 판단된다. 완충재질별 심재에 대한 충격손상특성은 충격 발생부에 압괴가 발생하였으며, 발사목 z방향은 5J의 충격에너지에서는 충격 발생부에서부터 외곽으로 점진적인 균열(crack)이 발생하는 것을 확인하였다. Fig. 9는 5J의 충격에너지에 대한 발사목과 우레탄 폼 심재의 충격손상영역을 나타내고 있다.

사용후핵연료 수송용기 충격완충체는 스테인리스 강판을 면재로 갖으며, 심재는 발사목, 또는 우레탄 폼과 같은 완충재질로 구성된다. 이에, 충격완충체의 낙하사고조건을 모사할 수 있도록 SUS304를 면재로 갖는 발사목과 우레탄 폼 샌드위치 패널에 대한 충격시험을 수행하였다. 이때, 면재의 두께는 1mm이며, 심재의 두께는 25mm로 제작하였다. 충격시험은 심재의 충격특성과 비교하기 위해 동일한 충격에너지 1J, 3J, 그리고 5J에 대해 수행하였다. Fig. 10은 충격에너지 증가에 따른 발사목과 우레탄 폼 샌드위치 패널에 대한 충격력 및 손상깊이를 나타내고 있다.

발사목과 우레탄 폼 샌드위치 패널에 대한 저속 충격시험 결과, 심재에 대한 충격시험 결과와 유사한 충격거동을 나타냈다. 샌드위치 패널은 SUS304 면재가 갖는 높은 면내 강성으로 인해 심재의 충격시험에서 발생한 손상깊이보다 약 4배가량 감소하였다. 그러나, 발사목 z방향은 다른 방향에 비해 강

성 및 강도가 높기 때문에 심재와 샌드위치 패널에서 발생하는 영구손상깊이가 큰 차이가 발생하지 않았다. Fig. 11은 충격에너지 증가에 따른 발사목과 우레탄 폼 샌드위치 패널의 충격손상영역을 나타내고 있다. 우레탄 폼과 성장방향(growth direction)을 제외한 발사목은 유사한 손상영역을 보였으며, 충격면에 발생한 손상영역은 충격에너지가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다.

충격에 의한 완충재질별 충격에너지 흡수율은 모든 충격에너지 레벨에서 유사한 경향을 보였다. 이중 대표적인 5J의 충격에너지에 대한 충격에너지 흡수율은 우레탄 폼과 발사목  $\theta$ , r방향에서 유사한 특성을 나타냈으며, 발사목 z방향은 3.02J로 가장 낮은 충격에너지 흡수율을 보였다. 따라서, 발사목 z방향은 충격에너지 흡수율이 다른 방향에 비해 낮지만, 발생하는 손상영역은 작아지게 된다. Fig. 12는 5J의 충격에너지에 대한 발사목과 우레탄 폼 심재의 충격에너지 흡수율을 나타내고 있으며, 충격에너지 흡수율은 충격력-처짐 선도를 적분(면적값)하여 계산하였다.

향후, 사용후핵연료 수송용기 충격완충체를 발사목, 또는 우레탄 폼 완충재질로 제작할 경우, 선택한 완충재질에 따라 다음과 같은 특성을 고려하여 제작할 필요가 있다. 발사목 완충재질은 나무의 성장방향이 충격면이 되도록 제작한다면 우레탄 폼보다 높은 내충격성을 갖기 때문에 경량화 효과를 얻을 수 있다. 반면, 우레탄 폼에 비해 낮은 난연성으로 화재사고에 대한 대안이 필요할 것으로 판단된다. 우레탄 폼 완충재질은 발사목에 비해 우수한 난연성을 확보할 수 있고, 다양한 형상으로 제작이 용이하다. 하지만, 높은

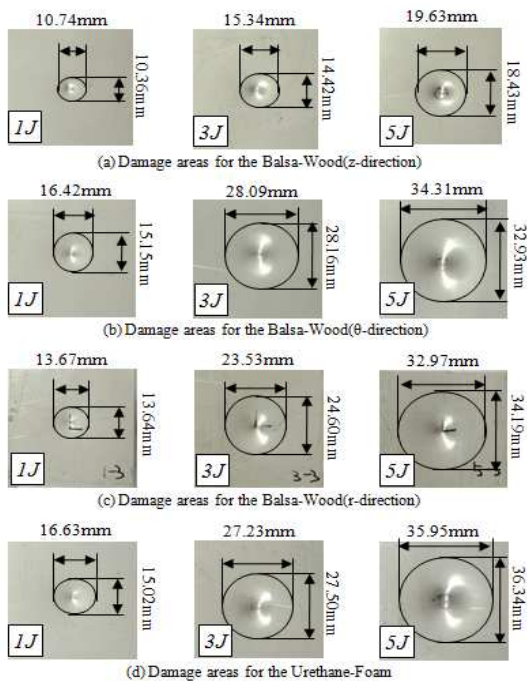


Fig. 11 Damage areas for sandwich panels due to various impact energies

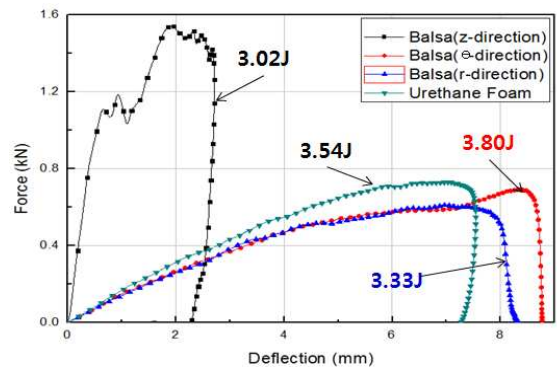


Fig. 12 Absorbed energy of Balsa-Wood and Urethane-Foam for impact energy of 5J

충격에너지 흡수율로 인해 수송용기의 안전성을 확보하기 위해서는 충격완충체의 용적이 증가해야 하는 단점이 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 사용후핵연료 수송용기 충격완충체의 완충재질로 고려되고 있는 발사목과 우레탄 폼과 샌드위치 패널에 대한 기본물성시험과 저속충격시험을 수행하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 우레탄 폼은 등방성 재질로써 3가지 방향(인장, 압축, 그리고 전단)에 대한 기계적 물성을 도출하였으며, 발사목은 이방성 재질의 특성을 고려하여 z,  $\theta$ , r방향별로 각각 3가지 방향 물성측, 9가지의 기계적 물성을 도출하였다.

(2) 발사목과 우레탄 폼 완충재질의 기계적 특성은 발사목  $\theta$ , r방향, 그리고 우레탄 폼이 유사한 강성 및 강도를 갖으며, 발사목 z방향은 다른 방향에 비해 7~8배 정도 높은 강성 및 강도를 갖는 것을 확인하였다.

(3) 발사목과 우레탄 폼 심재 및 1mm 두께의 SUS304를 면재를 갖는 샌드위치 패널에 대한 저속충격 특성평가 결과, 발사목과 우레탄 폼 심재 및 샌드위치 패널의 저속충격특성은 유사한 거동을 보였으며, 우레탄 폼과 발사목의  $\theta$ , r방향에서 유사한 충격에너지 흡수율, 접촉하중, 그리고 손상영역이 발생하는 것을 확인하였다. 이때, 발사목 z방향은 충격에 대한 에너지 흡수율이 낮아 높은 접촉하중 및 낮은 손상깊이가 발생하는 것을 확인하였다.

(4) 향후, 낙하사고 조건에 대한 사용후핵연료 수송용기 충격완충체의 설계를 위해서는 각각의 완충재질이 갖는 기계적 특성을 고려해야 할 것으로 판단된다. 모든 방향에서 동일한 충격거동, 높은 충격에너지 흡수효과, 그리고 우수한 난연성을 확보하기 위해서는 우레탄 폼 완충재질로 설계하는 것이 효과적이고, 충격완충체의 경량화를 위해서는 우레탄 폼에 비해 내충격성이 높은 발사목 성장방향이 충격면이 되도록 설계하는 것이 효과적이다. 그러나, 발사목의 경우 우레탄 폼에 비해 난연성이 떨어지기 때문에 이에 대한 대책마련이 필요할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 한국원자력연구원에서 수행중인 방사성 폐기물 관리기술 개발사업의 지원으로 수행

하였으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Ku, J. H., Seo, K. S., Kang, H. Y. and Kim, Y. J., 1995, "A FEM Analysis of the Dynamic Behavior of Spent Nuclear Fuel Transport Cask Under Oblique Drop Impact," *Trans. of the KSME A*, Vol. 19, No. 12, pp. 3252~3259.
- (2) Chung, S. H., Ku, J. H., Kang, H. Y. and Lee, Y. S., 1994, "Study of Side Drop Impact for Cask," *Autumn Conference of Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 441~445.
- (3) Lee, Y. S. and Kim, Y. J., 1994, "A Study on the Dynamic Behaviors of a Shipping Container Under Drop Impact Loading," *Trans. of the KSME*, Vol. 18, No. 11, pp. 2805~2816.
- (4) Ku, J. H., Seo, K. S., Min, D. K. and Kim Y. J., 1998, "Effect of the Weldment Failure of Cask Impact Limiter on the Impact Absorbing Behavior," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 22, No. 12, pp. 2286~2295.
- (5) Kim, K. S., Kim, J. S., Choi, K. S., Shin, T. M., et al., 2010, "Dynamic Impact Characteristics of KN-18 SNF Transport Cask. Part 2: Sensitivity Analysis of Modeling and Design Parameters," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 37, No. 4, pp. 560~571.
- (6) Aquaro, D., Zaccari, N., Di Prinzio, M. and Forasassi, G., 2010, "Numerical and Experimental Analysis of the Impact of a Nuclear Spent Fuel Cask," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, No. 4, pp. 706~712.
- (7) Ku, J. H., Seo, K. S., Park, S. W. and Kim, Y. J., 2000, "Beneficial Influence of the Weldment Rupture of Cask Impact Limiter Case on the Impact Absorbing Behavior," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 196, No. 3, pp. 263~279.
- (8) Kim, K. S., Kim, J. S., Choi, K. S., Shin, T. M., et al., 2010, "Dynamic Impact Characteristics of KN-18 SNF Transport Cask. Part 1: An Advanced Numerical Simulation and Validation Technique," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 37, No. 4, pp. 546~559.

- (9) ASTM D3574, 2003, Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials--Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams.
- (10) ASTM D1623, 2003, Standard Test Method for Tensile and Tensile Adhesion Properties of Rigid Cellular Plastics.
- (11) ASTM D365, 2003, Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores.
- (12) ASTM D273, 2000, Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials.
- (13) Jeon, K. W., Shin, K. B., Ko, H. Y., Kim, D. H., 2009, "A Study on Low-Velocity Impact Characterization of Honeycomb Sandwich Panels According to the Changes of Impact Location and Core Fabrication Angles," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 1, pp. 64~71.
- (14) Shin, K. B., Lee, J. Y., Lee, S. J., 2007, "A Study on Low-Velocity Impact Characterization of Various Sandwich Panels for the Korean Low Floor Bus Application," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 4, pp. 506~516.