

사용후 핵연료 수송용기 샌드위치 복합재 충격완충체의 유효등가 유한요소 모델 제시

강승구* · 임재문* · 신광복**† · 최우석***

Effective Equivalent Finite Element Model for Impact Limiter of Nuclear Spent Fuel Shipping Cask made of Sandwich Composites Panels

Seung-Gu Kang*, Jae-Moon Im*, Kwang-Bok Shin**†, Woo-Suk Choi***

ABSTRACT: The purpose of this paper is to suggest the effective equivalent finite element model for the impact limiter of a nuclear spent fuel shipping cask made of sandwich composite panels. The sandwich composite panels were composed of a metallic facesheet and a core material made of urethane foam, balsa wood and red wood, respectively. The effective equivalent finite element model for the impact limiter was proposed by comparing the results of low-velocity impact test of sandwich panels. An explicit finite element analysis based on LS-DYNA 3D was done in this study. The results showed that the solid elements were recommended to model the facesheet and core of sandwich panels for impact limiter compared to combination modeling method, in which the layered shell element for facesheet and solid element for core material are used. In particular, the solid element for balsa and red wood core materials should be modeled by the element elimination approach.

초 록: 본 논문에서는 샌드위치 복합재 패널로 제작되는 사용후 핵연료 수송용기 충격완충체의 유효등가 유한요소모델을 제시하는데 목적을 둔다. 샌드위치 복합재 패널은 금속재 면재와 각각 우레탄 폼, 발사목 그리고 레드우드 심재로 구성되었다. 충격완충체의 유효등가 유한요소 모델은 샌드위치 복합재 패널의 저속충격 시험과 해석결과와의 비교를 통해 제시되었으며, LS-DYNA 3D를 사용한 동적 외연 유한요소해석에 의해 수행되었다. 시험과 해석 결과, 충격완충체 샌드위치 패널의 유한요소 모델은 적층셸 요소의 면재와 솔리드요소의 심재를 사용한 기존의 혼합모델링 기법에 비해 면재와 심재 모두 솔리드 요소를 적용하는 방법이 더 정확한 결과를 나타냄을 확인하였다. 이때 발사목과 레드우드 심재는 요소제거 기능을 갖는 솔리드 요소로 모델링 되는 것이 추천되어진다.

Key Words : 발사목(Balsa wood), 충격완충체(Impact limiter), 저속충격(Low-velocity impact), 사용후 핵연료 수송용기(Nuclear spent fuel shipping cask), 레드우드(Red wood)

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈과 지구 온난화로 인해 에너지 효율이 높고 공기가 오염이 없는 원자력 에너지에 대한 수요

가 증가하고 있다[1]. 원자력 에너지의 지속적 사용에 따라 사용후 핵연료의 발생량이 증가하고, 이에 따라 발전소 내의 사용후 핵연료 저장공간이 부족하게 되어 대규모 저장 시설로 이동하고 있는 실정이다[2]. 사용후 핵연료를 운반

Received 10 February 2015, received in revised form 16 April 2015, accepted 28 April 2015

*Graduate School of Mechanical Engineering, Hanbat National University

**†Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Corresponding author (E-mail: shin955@hanbat.ac.kr)

***Division of Fuel Cycle System, Korea Atomic Energy Research Institute

하는 수송용기는 아주 강한 방사선과 높은 열이 배출되는 고준위 방사성 물질로부터 인간과 환경을 보호하기 위해 안전성이 철저히 보장되어야 한다. 이에, 국제원자력기구에서는 안전규정[3]에 의거하여 가상 사고조건과 정상 사고조건에 대한 시험을 통해 구조 안전성을 평가하도록 규정하고 있다. 시험의 종류는 9 m 자유낙하, 800°C 화재조건, 1 m 파열조건 및 200 m 침수조건 등이며, 시험 조건에 대해 구조적인 기술기준의 허용치를 만족해야 한다[4]. 이 중 9 m 자유낙하조건이 구조적으로 가장 큰 충격을 야기하기 때문에 최우선 검증대상으로 고려되고 있다. 낙하에 의한 수송용기의 손상을 방지하기 위해 수송용기의 양 끝에는 충격완충체가 결합된다[5,6]. 충격완충체는 충격흡수능력이 뛰어난 발사목, 레드우드, 우레탄 폼 그리고 허니콤 코어를 사용하며 내부식성이 강한 스테인리스강을 외부 구조재로 적용한다. 국내에서는 KN-18 SNF 수송용기 충격완충체에 스테인리스강판과 발사목을 적용하였으며, 이탈리아에서는 AGN1 수송용기에 카본/스틸복합재와 스테인리스강으로 제작된 충격완충체의 충격특성을 연구한 사례가 있다[7,8].

충격완충체는 시험 평가 및 제작에 앞서 반드시 해석적 평가를 통해 가상 사고조건 특히, 9 m 자유낙하조건에 대해 구조 안전성을 검증해야 하기 때문에 방향성을 갖는 완충재질의 기계적 물성 평가와 충격 특성의 파악은 무엇보다 중요한 설계인자가 된다. 또한, 자유낙하해석등과 같은 동적 외연 해석(dynamic explicit analysis)을 수행할 때는 방향성을 갖는 완충재질에 대해 어떤 등가의 유한요소모델을 적용하느냐에 따라 해석의 신뢰성과 정확성을 좌우하기 때문에 이 또한 중요한 연구대상이 된다.

본 연구에서는 사용후 핵연료 수송용기 충격완충체의 완충재질로 고려되고 있는 발사목, 레드우드 그리고 우레탄 폼에 대한 최적의 유효등가 유한요소모델을 제시하고 충격 특성을 비교하는 데 목적을 두고 있다. 이를 위해 실험적 방법에서는 완충재질의 방향별 기계적 물성 평가와 샌드위치 패널의 저속충격 시험을 수행하여 정적 및 동적 특성을 파악하는 데 목적을 두었으며, 해석적 방법에서는 저속충격 시험 결과와의 비교를 통해 완충재질별 최적의 등가 유한요소모델을 제시하는 데 목적을 두었다.

2. 완충재질별 기계적 특성 및 저속충격 특성 평가

2.1 충격완충체의 형상

충격완충체는 내부에 완충재질을 삽입하여 충격에너지를 흡수하는 구조물이다[9]. 완충재질은 주로 발사목, 레드우드 그리고 우레탄 폼이 사용되며 스테인리스강판 케이스 내부에 위치하게 된다. Fig. 1은 사용후 핵연료 수송용기의 형상과 충격완충체의 형상을 보여준다.

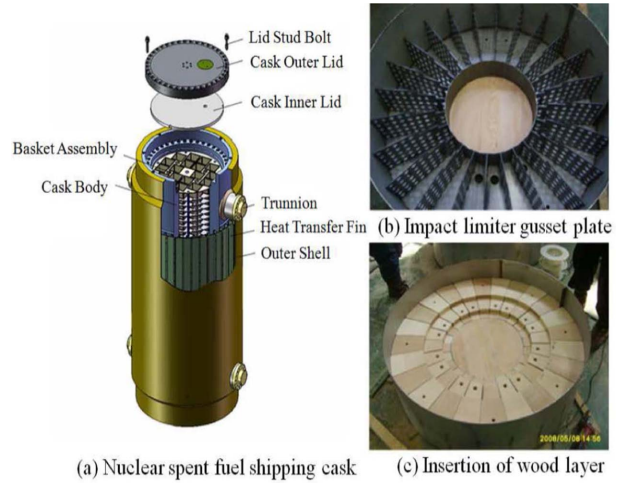


Fig. 1. Configurations of impact limiter

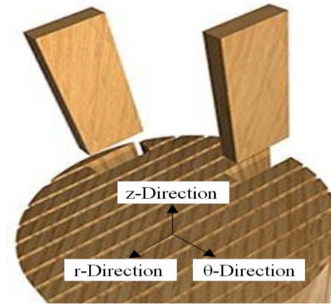


Fig. 2. Principal axes of wood

2.2 완충재질의 기계적 물성 평가

사용후 핵연료 수송용기 충격완충체에 적용되는 완충재질의 기계적 물성 평가는 방향별로 수행하여 평가하였다. 본 연구에서는 중앙아메리카, 남아메리카 북부 원산으로 120 kg/m³의 밀도를 갖는 중밀도 발사목과 북아메리카 원산으로 355 kg/m³의 밀도를 갖는 레드우드 그리고 난연성을 향상시킨 140 kg/m³의 밀도를 갖는 반경질 우레탄 폼을 사용하였다. 이때 발사목과 레드우드는 이방성(Anisotropic) 재료지만 직교이방성(Orthotropic) 재료로 가정하여 9-방향에 대한 기본물성을 도출하였다. 일반적으로 목재의 방향은 Fig. 2와 같이 나이트를 기준으로 z, r 방향으로 표현된다. 등방성 재료의 우레탄 폼은 인장, 압축, 전단시험을 통해 기계적 물성을 평가하였다.

발사목과 레드우드의 인장시험은 ASTM D1623 규정에 의거하여 수행하였으며, 우레탄 폼의 인장시험은 ASTM D3574 규정에 의거하여 수행하였다[10,11]. 발사목, 레드우드, 우레탄 폼의 압축시험은 ASTM C365 규정에 의거해 수행하였으며 전단시험은 ASTM C273 규정에 의거하여 수행하였다[12,13]. Fig. 3은 각 규정에 의거한 시험의 모습을 보여주며, 시험결과는 5개의 시편에 대한 평균값으로 정리하였다.

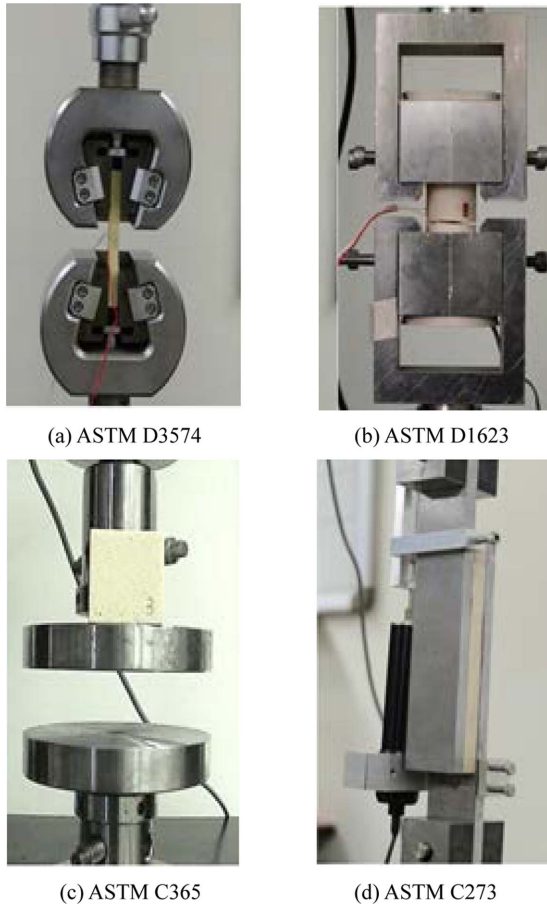


Fig. 3. Material property tests of absorber materials

Table 1. Mechanical properties of Urethane foam

Urethane Foam	Tensile	Compressive	Shear
Strength (MPa)	1.23	1.73	0.88
Modulus (MPa)	168.69	22.98	313.21

Table 2. Mechanical properties of Balsa wood and Red wood

Balsa wood		Tensile	Compressive	Shear
Strength (MPa)	z	2.63	9.58	1.43
	θ	0.48	0.70	0.79
	r	0.47	0.68	0.90
Modulus (MPa)	z	1,089.22	141.74	14.90
	θ	136.53	33.99	12.80
	r	133.17	26.09	13.01
Red wood		Tensile	Compressive	Shear
Strength (MPa)	z	15.14	45.96	1.99
	θ	1.24	6.31	1.32
	r	1.21	6.92	1.49
Modulus (MPa)	z	2,557.63	1,815.58	151.52
	θ	634.55	97.53	174.81
	r	637.16	117.34	172.57

우레탄 폼은 등방성 특성을 가지므로 인장, 압축 그리고 전단의 3가지 기계적 물성을 평가하였으며, Table 1은 우레탄 폼의 기본물성을 나타낸다. 발사목과 레드우드 모두 나이에 수직한 방향인 z 방향이 θ와 r 방향에 비해 높은 기계적 물성을 가짐을 확인하였다. Table 2는 발사목과 레드우드의 기계적 물성을 방향별로 정리한 것이다.

2.3 완충재질별 샌드위치 패널의 저속충격 시험평가

충격완충체는 Fig. 1과 같이 스테인리스강판 케이스에 완충재질을 삽입하는 형태로 제작되며, 본 연구에서는 SUS304 금속재 면재와 각각 우레탄 폼, 발사목 그리고 레드우드 심재를 갖는 샌드위치 패널들에 대한 저속충격 특성을 평가하였다. 이때, 우레탄 폼 심재를 갖는 충격시편은 일반적인 충격시험 시편 규격인 100 × 100 × 25 (mm³)로 제작하였다. 발사목과 레드우드 심재를 갖는 샌드위치 패널의 경우는 일정 두께를 갖는 판재 형태로 수입되기 때문에 판재의 치수를 고려하여 시편을 제작하였다. 발사목은 z-방향은 75 × 75 × 25 (mm³), θ-방향은 100 × 100 × 25 (mm³) 그리고 r-방향은 50 × 50 × 25 (mm³)로 제작하였으며 레드우드는 75 × 75 × 25 (mm³)로 제작하였다. 샌드위치 패널의 경우에는 1 mm의 두께를 갖는 스테인리스 강판을 양쪽 면에 붙여 제작하였다. 샌드위치 패널의 저속충격 시험은 충격해석 결과와의 비교를 통해 해석모델을 검증하기 위해 수행되었으며 해석에 필요한 재료의 특성을 획득하기 위한 시험이 아니기 때문에 시편의 치수 차이는 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. Fig. 4는 완충재질별 샌드위치 패널의 충격시험 시편 형상을 보여준다.

시험은 Dynatup 8250 낙하충격시험기를 사용하였으며, 충격 후 리바운드를 방지하여 수행하였다. 저속충격 시험에 사용된 충격체는 지름 16 mm의 반구형 강철로 질량 1.46 kg이며, 시편 고정 치구의 내경은 38 mm 이며, 가장 작은 충격 시편(50 × 50 × 25 mm³)을 지지하기에 충분한 치수를 갖는다. 시험은 3 J과 5 J에 대해 수행하였으며 손상영역과 손상깊이는 3차원 측정기로 측정하였다. Fig. 5는 충격시험에 사용된 장비를 보여준다.

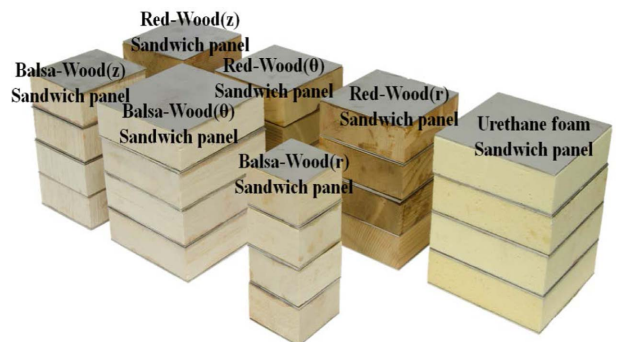


Fig. 4. Sandwich composite specimens for low-velocity impact test

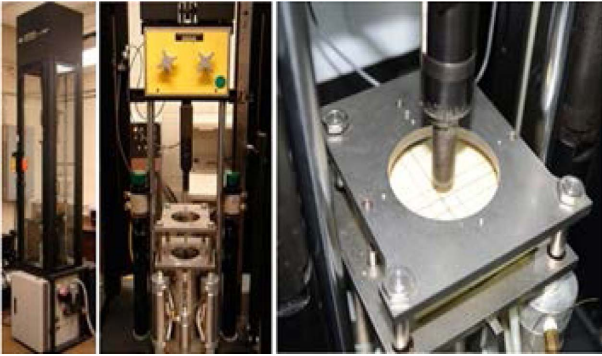


Fig. 5. Low-velocity impact test instrument

Table 3. Results of impact test for sandwich panels with Urethane foam, Balsa wood and Red wood core

Energy	Core Material	Direction	Absorbed energy(J)	Dent (mm)
3J	Urethane foam	-	1.75	1.47
	Balsa wood	z	1.62	0.58
		θ	2.07	1.33
		r	1.71	1.12
	Red wood	z	1.51	0.24
		θ	2.00	0.57
r		1.65	0.58	
5J	Urethane foam	-	2.66	2.05
	Balsa wood	z	2.59	1.03
		θ	3.28	1.90
		r	2.97	1.57
	Red wood	z	2.39	0.34
		θ	3.25	1.04
r		2.60	0.87	

저속충격 시험 결과, 발사목과 레드우드 심재를 갖는 샌드위치 패널의 경우, z 방향 에너지 흡수율이 가장 낮은 것으로 확인되었는데, 이는 나무의 성장방향인 z 방향의 물성이 θ , r 방향보다 상대적으로 높기 때문으로 판단된다. 또한 레드우드가 적용된 샌드위치 패널은 상대적으로 낮은 에너지 흡수율을 갖는데 이는 레드우드가 우레탄 폼과 발사목 보다 높은 탄성계수를 갖기 때문으로 판단된다. 가장 큰 충격에너지 흡수 특성은 θ 방향의 발사목 샌드위치 패널에서 나타났는데 이는 상대적으로 낮은 탄성 계수에 의해 충격 변형량이 높았기 때문으로 판단된다. Table 3은 저속충격 시험의 결과를 보여준다.

3. 충격완충체의 유효등가 유한요소 모델

저속충격 시 충격체가 샌드위치 패널에 접촉하고 분리

되는 동안 샌드위치 패널과 충격체가 접촉되는 주변 영역에 국부적인 변형이 발생되는데 이를 고전적인 빔, 평판 그리고 셸 이론을 통해 충격체와 샌드위치 패널의 충격 특성을 모사하기에는 적절하지 않다. 충격체와 샌드위치 패널의 동적 접촉 문제로써 비탄성 변형을 고려한 비선형 해석을 수행해야 한다. 이때 국부적인 샌드위치 패널의 변형은 충격이 가해지는 영역에서 발생되며 충격체와 샌드위치 패널은 접촉 조건에 따라 비탄성 거동을 보이게 된다. 이러한 비선형적 요소를 고려한 충격해석을 위해 동적 외연 유한요소 해석(Dynamic explicit finite element analysis) 프로그램인 LS-DYNA 3D를 사용하여 수행하였으며, 앞 절의 기계적 물성 시험을 통해 도출된 각 방향별 물성을 적용하였다. 기존의 연구에서는 샌드위치 패널의 해석 수행시 면재에 셸 요소(Shell element)를 적용하는 것이 더 정확한 해석결과를 얻을 수 있으나[14] 본 연구에서는 소성변형을 확인하기 위해 스테인리스 강판과 완충재질은 솔리드 요소(Solid element)를 사용하여 모델링을 수행하였으며, 경계조건으로 시편 고정장치와 시편에 접촉조건을 부여하였다. 충격체와 시편은 표면 접촉 알고리즘인 면대면(Surface to surface) 접촉조건을 사용하였으며 시편 고정장치와 충격체는 강체로 모사하였다. 완충재질은 종류별 그리고 방향별 물성이 다르므로 어떤 등가의 유한요소모델을 선택하느냐에 따라 결과에 많은 차이를 보이게 된다. 특히, 자연상태에서 성장하여 제공되는 발사목과 레드우드의 경우 직교이방성으로 가정하여 9개의 기계적 물성을 고려하지만, 실제로는 21개의 독립변수를 갖는 이방성 특성이므로 어떤 등가의 유한요소모델을 적용하느냐는 다른 완충재질보다 매우 중요한 변수가 된다. 따라서, 본 연구에서는 시험결과와의 수많은 비교분석을 통해 완충재질별로 최적의 등가 유한요소모델을 제시하고 평가하는 데 목적을 두었다.

이때 적용된 우레탄 폼의 물성카드는 MAT_165_PLASTIC_NON-LINEAR_KINEMATIC이며 이는 우레탄 폼을 모사할 수 있는 MAT_057_LOW_DENSITY_FOAM, MAT_083_FU_CHANG_FOAM 그리고 MAT_063_CRUSHABLE_FOAM 물성카드와의 비교 결과, 우레탄 폼 샌드위치 패널의 저속충격 시험 결과와 가장 근사한 거동을 보여 선정하였다. 발사목과 레드우드의 물성카드는 MAT_WOOD 물성카드를 적용하였으며 이는 MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC, MAT_COMPOSITE_DAMAGE 물성카드와의 비교를 통해 선정되었다. 선정된 물성카드는 본 논문과 유사한 연구 사례인 참고문헌[15]에서 선정된 물성카드와 동일한 결과임을 확인하였다.

또한, 재료는 기계적 특성에 따라 고유의 댐핑계수를 갖는다. 그러나 본 연구에서 제시된 물성모델은 고유 댐핑계수의 적용이 불가능하여 발사목과 레드우드에 대한 댐핑계수는 충격면에 따라 변경 적용하는 방법을 적용하였다. 이때 완충재질의 경우, z 방향 0.40, θ 방향 0.15, r 방향 0.20

을 적용하였으며 샌드위치 패널의 경우, z 방향 0.10, θ 방향 0.15 그리고 r 방향의 경우 0.30의 댐핑계수를 적용하였다. 각각의 댐핑계수는 참고문헌[15]을 참고하여 적용하였다. 충격완충체에 적용되는 샌드위치 패널의 유효등가 유한요소 모델은 Fig. 6과 같으며 25,758개의 절점과 12,953개의 요소로 구성되었다. 제시된 유효등가 모델은 저속충격 시험 결과와의 비교를 통해 검증하였으며, 완충재질에 따라 해당되는 등가의 유한요소모델만 변경시켜주면 되도록 배치파일(Batch file)을 작성하여 재료나 재료의 방향을 수정 시 LS-DYNA 3D에서의 부수적인 수정 없이 자동으로 입력파일(Input)을 수정하도록 하여 해석을 수행하였다.

완충재질에 따른 유효등가 유한요소모델의 검증을 위해 저속충격 시험 결과와 충격해석 결과를 비교하였다. 저속 충격 해석은 시험과 동일하게 3 J과 5 J의 충격에너지에 대해 수행하였으며, 발사목과 레드우드에 적용된 MAT_WOOD 물성카드를 재료의 파손 발생시 요소 제거(Element

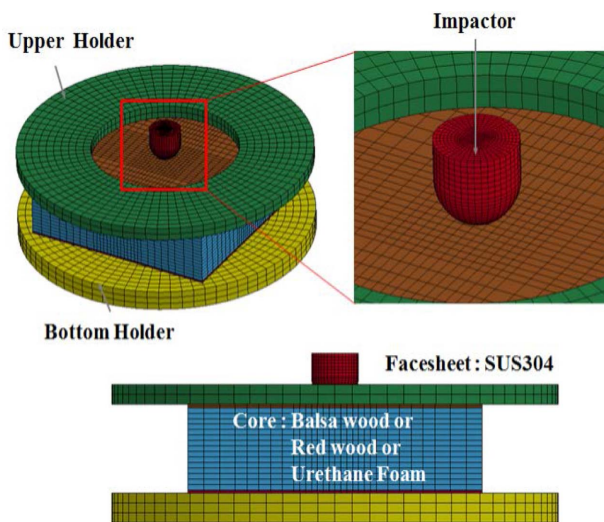


Fig. 6. The effective equivalent finite element model for sandwich panels

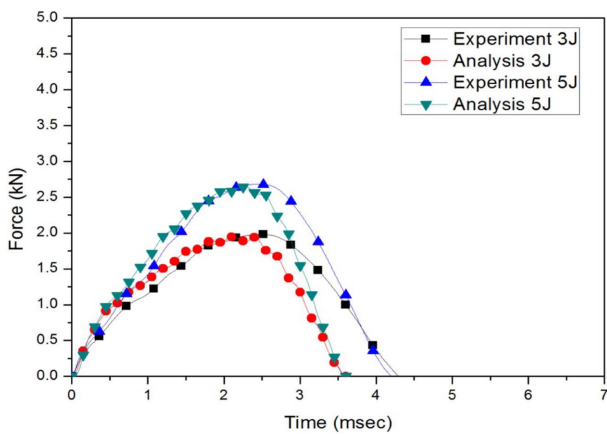


Fig. 7. The comparison results of force-time histories for Urethane foam sandwich panel after impact event

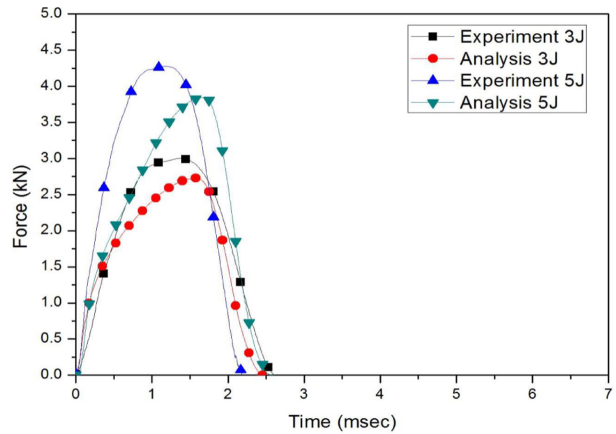


Fig. 8. The comparison results of force-time histories for Balsa wood sandwich panel after impact event

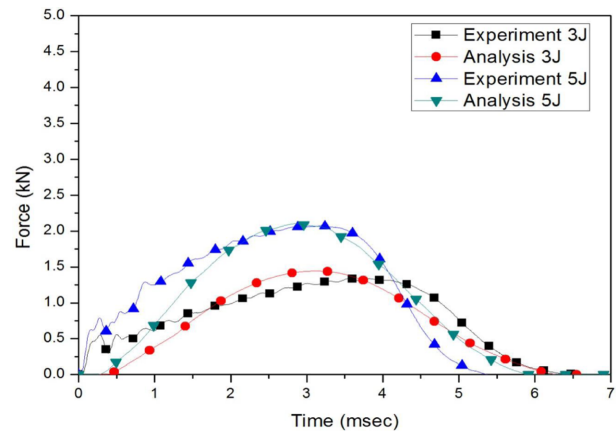


Fig. 9. The comparison results of force-time histories for Red wood sandwich panel after impact event

Table 4. Comparison of experimental and analysis results for contact force and dent after impact

Specimen			Contact Force(kN)	Dent (mm)
Urethane foam sandwich panel	3J	Experiment	1.99	1.47
		Analysis	1.95	1.57
	5J	Experiment	2.69	2.05
		Analysis	2.64	2.12
Balsa wood sandwich panel	3J	Experiment	3.00	0.58
		Analysis	2.73	1.11
	5J	Test	4.28	1.03
		Analysis	3.85	1.59
Red wood sandwich panel	3J	Experiment	3.12	0.57
		Analysis	3.14	0.79
	5J	Experiment	3.73	1.04
		Analysis	3.94	1.13

elimination)가 발생하는 옵션을 적용하여 수행하였다.

Fig. 7, Fig. 8 그리고 Fig. 9는 각각 3 J과 5 J의 충격에너지가 가해질 때 우레탄 폼 샌드위치, z 방향 발사목 샌드위치 그리고 θ 방향 레드우드 샌드위치 패널의 하중 이력선도를 보여주며, Table 4는 해석과 시험의 최대 접촉하중과 소성 변형된 깊이(dent)의 비교 결과를 보여준다.

우레탄 폼, 발사목 그리고 레드우드 샌드위치 패널의 저속충격 시험과 해석 결과를 비교해 보면 대부분의 경우에서 최대 10% 이내의 오차내에서 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 발생한 오차의 원인은 우레탄 폼 샌드위치 패널의 경우, 우레탄 폼의 기공 상태가 모든 시편에 대해 동일하지 않기 때문에 발생하였으며 발사목과 레드우드 심재를 갖는 샌드위치 패널의 경우, 성장을 통해 생성되는 자연재료로써 이방성 물성을 가지나 해석을 수행하는데 이방성 물성을 적용할 수 없어 직교이방성 재료로 가정하여 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 10, Fig. 11 그리고 Fig. 12는 저속 충격시험으로 발생한 손상영역과 충격해석을 통해 발생한 손상영역을 비교하여 나타낸 것이다. 우레탄 폼 샌드위치 패널의 경우 3 J에서 약 12%의 오차가 발생하였으나, 발사목 샌드위치 패널의 경우, 3 J과 5 J 모두 약 1% 이하의 오차가 발생하여 손상영역의 크기가 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다. 레드우드 샌드위치 패널의 경우에는 약 3%의 오차가 발생하여 유

효등가 유한요소 모델의 충격해석 결과가 저속 충격시험 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

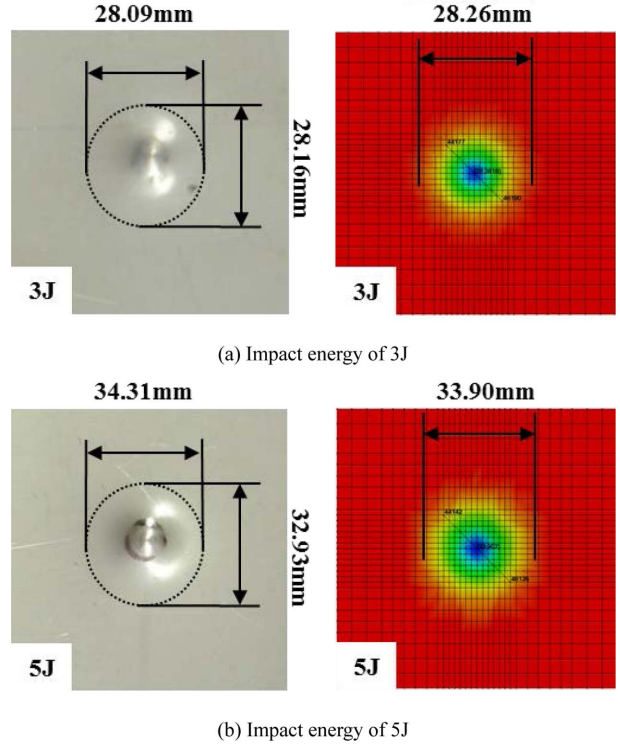


Fig. 11. Damage area of Balsa wood sandwich panels after impact

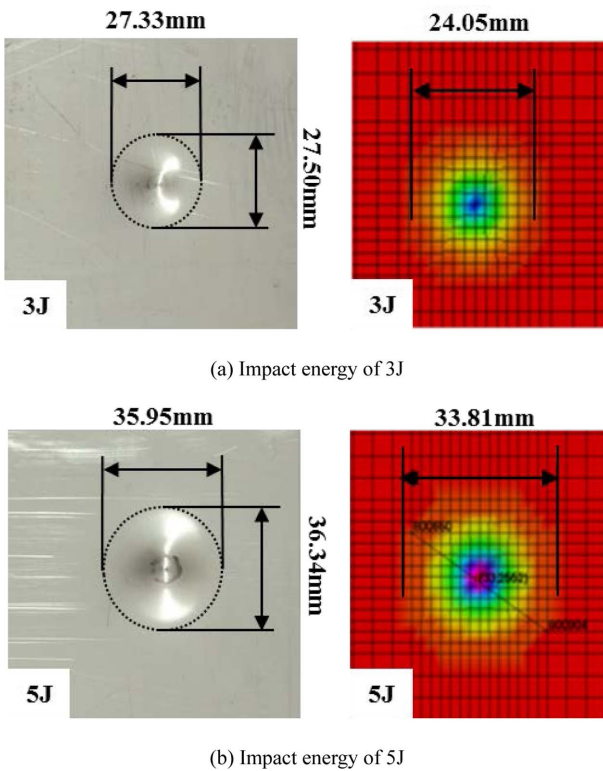


Fig. 10. Damage area of Urethane foam sandwich panels after impact

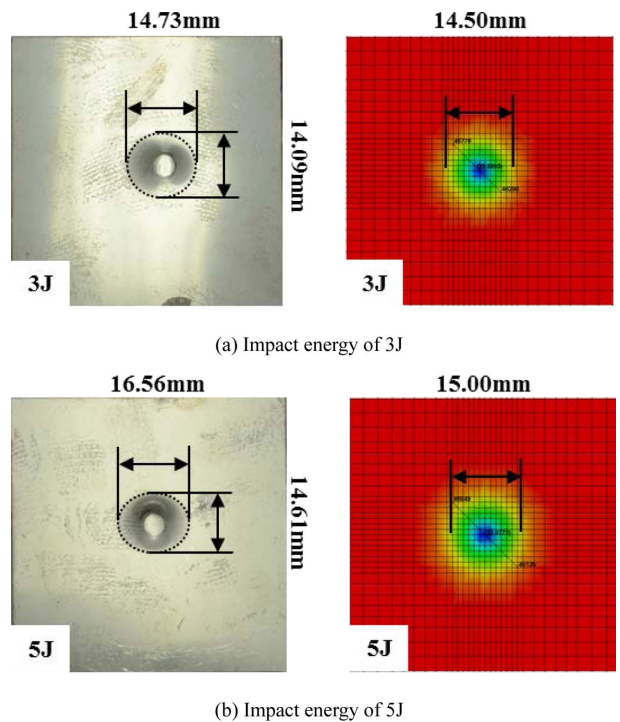


Fig. 12. Damage area of Red wood sandwich panels after impact

4. 결 론

본 논문에서는 사용후 핵연료 수송용기의 충격완충체에 적용되는 완충재질의 기계적 물성을 평가하고 이를 바탕으로 유효등가 유한요소모델을 제시하는 데 목적을 두고 있다. 샌드위치 복합재 패널에 대한 유효등가모델의 검증 을 위해 저속충격 시험을 수행하였으며 해석모델과의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 사용후 핵연료 수송용기 충격완충체의 완충재질에 적용되는 발사목, 레드우드 그리고 우레탄 폼의 기계적 물성을 평가하였다. 이때, 자연상태에서 성장하여 제공되는 발사목과 레드우드는 직교이방성으로 가정하여 9-방향에 대해 기계적 물성을 평가하였으며, 우레탄 폼은 등방성 특성을 가지므로 3방향에 대한 기계적 물성을 평가하였다.

(2) 금속재 면재와 우레탄 폼, 발사목 그리고 레드우드 심재로 각각 구성된 샌드위치 패널들에 대한 충격특성을 평가하기 위해 저속충격시험을 수행하였다. 저속충격시험 결과, θ 방향의 발사목 심재를 갖는 샌드위치 패널이 가장 높은 충격 에너지 흡수 특성을 가졌으며, z 방향의 레드우드 심재를 갖는 샌드위치 패널에서 가장 낮은 충격 에너지 흡수 특성이 확인되었다.

(3) 사용후 핵연료 수송용기 충격완충체에 적용되는 샌드위치 복합재 패널의 유효등가 유한요소 모델은 저속충격시험과의 비교를 통해 제시되었다. 샌드위치 복합재 패널의 유한요소모델은 기존의 혼합모델링 기법보다는 면재와 심재 모두 솔리드요소를 사용하는 방법이 더 정확한 동적 해석 결과를 나타내는 것으로 확인하였다. 이는 금속재 면재를 갖는 샌드위치 패널의 경우 충격에 의한 면재의 소성 거동을 모사하기에는 쉘 요소보다는 솔리드요소가 더 적합한 결과라 사료된다. 또한, 발사목과 레드우드 심재가 적용된 샌드위치 패널의 경우, 심재에 사용되는 솔리드 요소에는 요소제거기법의 적용이 추천된다.

(4) 본 논문에서 제시된 샌드위치 복합재 패널의 유효등가 유한요소 모델은 사용후 핵연료 수송용기 충격완충체의 동적 거동을 평가하기 위한 최적의 유한요소모델로 제안된다. 제안된 샌드위치 복합재 패널에 대한 유효등가 유한요소모델은 심재의 종류에 따른 물성의 방향성과 파손 거동 그리고 심재의 충격 후 소성 거동을 자동적으로 반영 하도록 배치파일을 작성하여 사용후 핵연료 수송용기 충격완충체의 해석 신뢰성 및 구조 건전성 확보에 기여할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Kang, S.G., Shin, K.B., Goo, J.S., and Choi, W.S., "Evaluation of Impact Characteristics of Absorber Materials for Spent Fuel Shipping Cask using Numerical Analysis", *Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering*, Gwangju, Korea, Oct. 2012, pp. 789-790.
2. Goo, J.S., Shin, K.B., and Choi, W.S., "Evaluation of Mechanical Properties and Low-Velocity Impact Characteristics of Balsa-Wood and Urethane-Foam Applied to Impact Limiter of Nuclear Spent Fuel Shipping Case", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 36, No. 11, 2012, pp. 1345-1352.
3. IAEA, 1985, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials", IAEA Safety Series, No. 6.
4. Chung, S.H., and Lee, Y.S., "A Study on the Side Drop Impact of a Nuclear Spent Fuel Shipping Cask", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 21, No. 3, 1997, pp.457-469.
5. Lee, Y.S., and Kim, Y.J., "A Study on the Dynamic Behaviors of a Shipping Container Under Drop Impact Loading", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 18, No. 11, 1994, pp. 2805-2816.
6. Ku, J.H., Seo, K.S., Min, D.K., and Kim, Y.J., "Effect of the Weldment Failure of Cask Impact Limiter on the Impact Absorbing Behavior," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 22, No. 12, 1998, pp. 2286-2295.
7. Kim, K.S., Kim, J.S., Choi, K.S., Shin, T.M., and Yun, H.D., "Dynamic Impact Characteristics of KN-18 Transport Cask - Part 2 : Sensitivity Analysis of Modeling and Design Parameters," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 37, 2010, pp. 560-571.
8. Aquaro, D., Zaccari, N., Di Prinzio, M., and Forasassi, G., "Numerical and Experimental Analysis of the Impact of a Nuclear Spent Fuel Cask," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, 2010, pp. 706-712.
9. Ku, J.H., Seo, K.S., Park, S.W., and Kim, Y.J., "Beneficial Influence of the Weldment Rupture of Cask Impact Limiter Case on the Impact Absorbing Behavior," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 196, 2000, pp. 263-279.
10. ASTM International, "Standard Test Method for Tensile and Tensile Adhesion Properties of Rigid Cellular Plastics," 2003, ASTM D1623.
11. ASTM International, "Standard Test Method for Flexible Cellular Materials-Slab, Bonded and Molded Urethane Foams," 2003, ASTM D3574.
12. ASTM International, "Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores," 2003, ASTM C365.
13. ASTM International, "Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials," 2003, ASTM C273.
14. Jang, H.J., Shin, K.B., Ko, H.Y., and Ko, T.H., "A Study on the Standardized Finite Element Models for Carbody Structures of Railway Vehicle Made of Sandwich Composites," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 13, No. 4, 2010, pp. 382-388.
15. Goo, J.S., "A Study on Low-velocity Impact Characteristics of Impact Limiter Materials applied to Nuclear Spent Fuel Shipping Cask," Master's Thesis, Hanbat National University, Korea, 2013.

1. Kang, S.G., Shin, K.B., Goo, J.S., and Choi, W.S., "Evaluation of Impact Characteristics of Absorber Materials for Spent Fuel