

論文

바이모달 트램 적용 하니컴 샌드위치 복합재 패널의 저속 충격 해석

이재열*, 신광복^{**+}, 정종철^{***}

Simulation of Low Velocity Impact of Honeycomb Sandwich Composite Panels for the BIMODAL Tram Application

Jae Youl Lee*, Kwang Bok Shin^{**+}, Jong Cheol Jeong^{***}

ABSTRACT

This paper describes the results of experiments and numerical simulation studies on the low-velocity impact damage of two different sandwich composite panels for application to bodyshell and floor structure of the BIMODAL tram vehicle. Square test samples of 100mm sides were subjected to low-velocity impact loading using an instrumented testing machine at four impact energy levels. Part of this work presented is focused on the finite element analysis of low-velocity impact response onto a sandwich composite panels. It is based on the application of explicit finite element (FE) analysis codes LS-DYNA 3D to study the impact response of sandwich structures under low-velocity impact conditions. Material testing was conducted to determine the input parameters for the metallic and composite material model, and the effective equivalent damage model for the orthotropic honeycomb materials. Numerical and experimental results showed a good agreement for damage area and the depth of indentation of sandwich composite panels created by the impact loading.

초 록

본 논문에서는 바이모달 트램의 차체와 바닥재 구조 재료로 적용되는 2종류의 샌드위치 패널에 대한 충격 손상을 시험과 수치해석을 통해 상호 비교하였다. 적용된 시편은 100mm×100mm의 크기를 가지며 저속충격시험기를 사용하여 4가지 경우의 충격에너지에 대해 시험하였다. 또한, 저속충격 조건에 따라 차체 적용 샌드위치 구조물의 저속 충격 특성을 유한요소해석으로 분석하기 위해 범용 외연유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하여 특성을 분석하였다. 이때 금속재와 복합재 재료의 손상모델, 그리고 직교이방성 특성을 갖는 하니컴 재료의 유효손상모델을 제시하기 위하여 기계적 특성 시험을 수행하여 물성 파라미터를 획득하였고, 시험과 해석결과 충격 하중에 대한 샌드위치 패널의 손상 영역과 깊이를 비교적 잘 예측할 수 있음을 증명하였다.

Key Words : 저속충격(Low-velocity Impact), 충격손상(Impact Damage), 샌드위치 복합재 패널(Sandwich Composite Panel), 충격거동(Impact Behavior), 외연유한요소해석(Explicit Finite Element Analysis)

1. 서 론

차체의 중량은 차량의 운행비, 선로보수비 등의 유지보수비

에 큰 영향을 주며, 중량이 크면 차량의 수용가능 부하도 감소하게 된다. 따라서, 가능한 같은 기능과 강도의 차체라면 중량이 낮은 차체가 경제적인 측면에서 선호되고 있다. 이런 요

* 국립한밭대학교 기계설계공학과 대학원

**+ 국립한밭대학교 기계설계공학과, 교신저자(E-mail: shin955@hanbat.ac.kr)

*** (주)한국화이바, 차량사업부

구조건을 만족시킬 수 있는 복합재 차체(composite carbody)는 1990년대 이후 유럽, 미국과 캐나다에서 상용화를 위하여 활발히 연구 개발되어 상용화되었다. 캐나다에 Prevost와 네덜란드의 Phileas등이 대표적인 사례이다[1]. 복합재 차체는 경량화 측면에서 금속재 차체에 비해 최대 20~30% 정도의 차체 무게를 감소시킬 수 있으므로 차체 경량화가 중요한 도시형 차체 이동수단인 저상 버스 또는 경전철, 트램 등에 응용이 날로 증가하고 있는 추세이다[2].

현재 건설교통부에서는 국가교통핵심기술개발사업의 일환으로 바이모달 트램(BIMODAL tram)에 대한 연구개발을 진행하고 있으며, 기존의 금속재에 비해 높은 비강성 및 비강도(high specific stiffness & strength) 특성을 갖는 복합재를 적용한 차체 제작을 추진하고 있다. 국내에서는 한국형 고속 텀팅열차(TTX) 개발 사업에 복합재를 적용한 차체를 제작하여 시험 중에 있으나, 트램 또는 버스와 같은 도시형 승객 이동수단에는 적용된 사례가 없다[3]. 바이모달 트램 차체는 섬유강화 적층 복합재(fiber-reinforced composite laminate)와 샌드위치 구조물(sandwich structure)의 조합으로 구성되는 하이브리드 복합재 차체(hybrid composite bodyshell)로 개발될 예정이다.

그러나, 샌드위치 복합재 구조물은 일반적으로 충격 상태에 노출되면 매우 취약한 충격 특성을 나타내게 된다. 샌드위치 복합재가 적용된 차체구조물에 노출되는 충격 하중의 형태로는 차체의 제조, 수리 및 보수 작업 중의 공구의 낙하와 주행 중 노면의 자갈과 같은 질량체의 충돌, 환경악화로 인한 우박 등의 충돌 등의 형태가 있을 수 있다. 복합 적층판 면재와 심재로 구성된 샌드위치 복합재 구조에서 외부 질량체에 의한 충격 하중이 작용하면 여러 가지 파손 형태가 발생되며 그 형태로는 면재와 심재가 함께 파손되는 국부파손(local damage), 면재와 심재가 분리되는 디본딩(debonding), 적층 복합재 면재인 경우 층간분리(delamination)등이 대표적인 샌드위치 복합재의 파손모드가 발생하게 된다[4]. 이러한 파손이 충격에너지에 의해 발생되면 샌드위치 패널의 기계적 특성은 저하되어 심한 경우 차체 구조물로서 역할을 수행할 수 없게 된다. 따라서 샌드위치 복합재 구조물이 충격 하중에 대한 신뢰성을 확보하고, 설계방안을 설계자에게 제공하기 위해서는 샌드위치 구조물의 충격손상기동에 대한 체계적인 연구가 필요하다[5-6].

본 연구에서는 바이모달 트램 차체 및 바닥재 구조를 구성하게 되는 2종류의 샌드위치 복합재 패널에 대한 충격시험을 수행하여 충격에너지 변화에 따른 손상영역과 손상깊이(damage area and depth)를 3차원 측정기를 이용하여 측정하여 손상모드를 분석하였다. 또한, 면재와 심재재료의 물성 시험을 통해 측정된 데이터를 바탕으로 손상모델(damage model)을 제시하였고, 범용 외연 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하여 저속충격하중에서의 파손정도를 시험과 해석 결과를 통해 상호 비교하였다.

2. 바이모달 트램 적용 샌드위치 패널의 구성 및 제작

현재 개발 중인 바이모달 트램은 샌드위치 패널과 적층복합재 패널의 조합으로 제작되는 하이브리드 형태의 설계가 이루어지고 있다. Fig. 1은 바이모달 트램에 대한 외형 개념도를 나타내고 있으며 차체를 구성하는 대부분의 구조는 샌드위치 복합재이며, 굴곡이 심한 부위는 샌드위치 복합재의 특성상 적용이 불가능하여 적층복합재로 고려되고 있다. 차체 및 바닥 구조 재료로 고려중인 샌드위치 패널은 Tabel 1에서 보듯이 총 2종류이다.

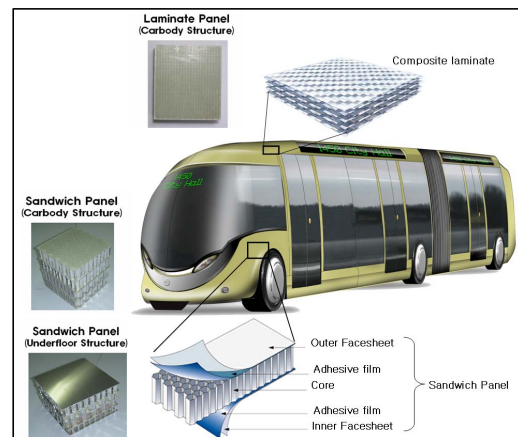


Fig. 1 Design concept of BIMODAL tram vehicle.

Table 1 The types of sandwich panels considered in design stage

Objective Part	Name*	Facesheet Material	Core Material	Thickness**, (mm)
Bodyshell	GE/AH	Glass fabric/Epoxy (WR580/NF4000)	Aluminum 5052 Honeycomb (3/8"-5052-0.0025")	3.0/25.4/1.5
Floor	AL/AH	ALuminum 5052	Aluminum 5052 Honeycomb (3/8"-5052-0.0025")	1.2/16.0/1.2

* Abbreviation of facesheet/core material

** Outer facesheet/core/inner facesheet

차체 구조물(bodyshell)에 적용되는 샌드위치 패널은 0.5mm 두께를 가지는 WR580/NF4000 직조 유리섬유/에폭시(Glass fabric/Epoxy; GE) 프리프레그를 외부면재의 경우 6장 적층하고 내부면재는 3장을 적층하여 구성하였고, 심재로는 알루미늄 하니컴 코어(Aluminum Honeycomb core; AH)를 고려하고 있다. 반면, 바닥재(floor) 적용 샌드위치 복합재 패널은 알루미늄 면재(ALuminum; AL)와 알루미늄 하니컴 코어(AH)에 의한 구성이 고려되고 있다.

충격시험에 사용될 샌드위치 패널은 오토클레이브(autoclave) 공법으로 제작하였고, 성형이 완료된 시편은 다이아 절단기를 사용하여 100×100mm로 절단하여 시편을 제작하였다[7].

3. 샌드위치 복합재 패널의 저속충격시험 및 해석

3.1 저속충격시험

충격시험은 Fig. 2에서 보듯이 Dynatup 8250 충격시험기를 사용하여 수행하였으며, 본 시험에 사용된 팁(tip)은 지름 15.86mm 인 반구형의 강철이고 충격체 질량은 1.95kg이었다. 충격에너지는 충격체의 낙하높이를 변화시키면서 조절하였다. 또한, 충격 후 샌드위치 시편에 발생하는 표면의 손상영역과 손상깊이는 Fig. 3의 3차원 측정기(모델명 : Cyclone)에 의해 측정하였다.

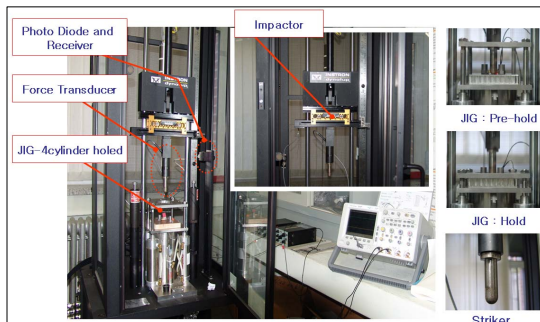


Fig. 2 Impact test machine.

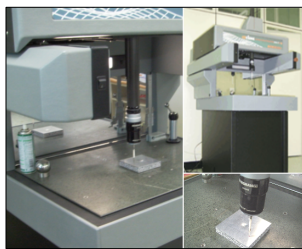


Fig. 3 3D scanner.

샌드위치 패널에 가해지는 충격에너지는 충격시험기가 가할 수 있는 최소의 충격에너지부터 시작하여 4 단계의 충격에너지 변화에 따른 충격특성을 관찰하였다.

일반적으로 저속충격의 물리적인 기준은 상대적으로 충격체의 질량이 작고 속도가 빠르거나, 질량이 크고 속도가 상대적으로 낮은 기준을 가질 수 있으며, 저속충격이 발생할 수 있는 두 가지 조건 중에서 우박이나 작은 돌 등에 의한 경우는 충격을 가하는 물체의 질량이 약 50g 이내, 속도는 15~60m/sec 정도이고, 공구 등의 낙하에 의한 경우는 질량이 대략 500g~5kg 사이, 속도는 6m/sec 정도 이내 즉 약 15J 이하의 에너지를 갖는 충격조

건이라고 통상적으로 분류하고 있다. 이에 본 연구에서는 약 16J 까지의 충격시험을 수행하였으나, 6J 이상부터는 알루미늄 면재를 사용한 샌드위치 시편의 경우 소성 변형이 크게 발생하여 지지대(clamping jig)까지 접근하였으며, 유리섬유/에폭시 적층판 면재를 적용한 샌드위치 시편의 경우에는 6J이내의 충격에너지에서도 층간분리나 모재균열 등의 손상이 관찰되었고 10J이상의 충격에너지에서는 일부 면재가 관통되는 현상을 보여 충격에너지를 6J이내로 선정하였다.

시편 종류별 적용된 충격에너지는 Table 2와 같이 차체 적용 샌드위치 시편(GE/AH)의 경우와 바닥재 적용 샌드위치 시편(AL/AH)의 경우가 약간의 차이를 보이는데 이는 시편의 높이가 시편 종류에 따라 다르기 때문에 생긴 것이다.

Table 2 The impact energy of GE/AH & AL/AH specimens.

Impact Energy (J)	GE/AH	AL/AH
	1.31	1.57
	3.17	3.04
	4.13	4.49
	6.00	5.93

3.2 저속충격해석

3.2.1 유효손상모델

충격체가 샌드위치 패널에 접촉하여 분리되는 동안 샌드위치 패널과 충격체가 접촉되는 주변 영역에 국부적인 변형이 발생된다. 이를 고전적인 빔, 평판, 쉘 이론을 통해 충격체와 샌드위치 패널과의 충격 특성을 모사하기에는 적절하지 않다. 샌드위치 패널의 충격 특성을 분석하기 위해서는 충격체와 샌드위치 패널의 동적 접촉(dynamic contact)문제로서 비탄성 변형(inelastic deformation)을 고려한 비선형 해석을 수행하여야 한다. 이때 국부적인 샌드위치 패널의 변형은 충격이 발생하는 영역에서 발생되며 충격체와 샌드위치 패널의 외부 면재와의 접촉조건에 따라 비탄성 거동을 보이게 된다. 이러한 비선형적인 요소를 고려한 충격거동해석을 수행하기 위하여 본 연구에서는 범용 비선형 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하였다. Fig. 4는 샌드위치 패널의 유한요소모델을 나타내었다.

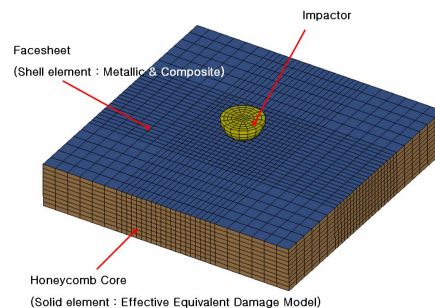


Fig. 4 Finite element model.

샌드위치 패널의 유한요소모델은 솔리드와 쉘요소의 조합으로 구성하였는데, 면재는 4개의 노드를 갖는 Belytschko-Tsai 쉘요소를 사용하였고, 심재는 8개의 노드를 갖는 솔리드 요소로 하니컴 코어를 유효등가모델링(effective equivalent modeling) 하였다[8].

직교이방성과 비균질 성질을 갖는 하니컴 샌드위치 구조는 여러 가지 형태의 파손모드를 갖는다. 하니컴 샌드위치 구조의 유한요소법을 이용한 모델링은 컴퓨터의 물리적 용량을 고려하여 모델링 되어야 하는데, 실제 하니컴 코어의 충격거동을 모사하기 위하여 실제 육각형의 하니컴 형상을 모델링 하는 것이 가장 이상적인 결과를 도출하지만 이는 해석 시간과 용량을 증가시키므로 실용적인 모델링 방법이라 할 수 없다 [9]. 따라서, 본 연구에서는 복잡한 파손형태를 가지는 하니컴 코어의 두께방향 압축시험을 통해 유효손상모델을 도출하여 솔리드 요소를 적용하여 하니컴 코어의 등가손상모델을 사용하였다.

3.2.2 하중 및 접촉 조건

샌드위치 패널의 유한요소모델과 저속충격시험결과를 비교하기 위하여 시험을 통해 측정된 충격에너지를 질량체로 모델링된 충격체에 초기속도 4가지씩을 각각 부가하여 하중을 전달하였다. 경계조건으로는 바닥 고정 지그와 상부 지그를 모델링하여 접촉조건을 부가하여 실제 시험 환경과 같이 모사토록 하였다. 충격체와 고정 지그 모델은 관심 대상이 아니므로 강체로 정의하였다.

충격체와 외부 면재와의 접촉은 표면 접촉 알고리즘(surface contact algorithm)인 면 대 면(surface to surface) 접촉 조건을 사용하였고 충격체와 피충격체 상호간의 침투(penetration)를 허용하지 않는 조건을 적용하였다. 접촉문제의 해의 정확성과 안정성을 위하여 벌칙 강성(normal penalty stiffness) 값을 선정하여야 하는데, 이때, 벌칙 강성 값이 높으면 상호간의 침투가 발생되기 전에 접촉이 발생하거나 침투량이 실제 거동과 다른 수치 오차가 발생하게 된다. 반대로 이 값이 낮으면 상호간의 침투로 인해 잘못된 결과가 도출된다. 본 연구에서는 충격체를 접촉면(master surface)으로 샌드위치 패널의 외부 면재를 목표면(slave surface)로 선정하여 여러 번의 해석을 통해 최적의 벌칙강성 값(0.2)을 도출하였다[10].

3.2.3 알루미늄 5052면재의 재료 모델

알루미늄 5052면재의 재료 모델은 LS-DYNA에서 제공하는 #24(*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY)를 사용하였다. 이 물성을 해석에 적용하기 위하여 알루미늄 5052 시편을 제작하여 인장시험을 통해 응력-변형률 곡선을 구하였고, Tabel 3에 정리하였다.

Table 3 Material properties of aluminum 5052

Density (kg/m ³)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)	Tangent modulus (GPa)
2,750	70.0	0.33	193.0	49.0

3.2.4 알루미늄 하니컴 코어의 재료 모델

하니컴 코어의 재료물성은 LS-DYNA3D에서 하니컴 재료물성인 #126(*MAT_MODIFIED_HONEYCOMB)을 적용하였으며, 비선형 탄소성 거동을 나타내는 하니컴 코어의 물성을 적용하기 위해서는 각 방향에 따른 압축 특성과 전단 특성 시험을 통해 응력-변형률 곡선을 적용하여야 한다. 하니컴 코어는 Fig. 5와 같은 방향을 정의할 수 있는데 x방향은 리본(ribbon)방향, y방향은 폭(transverse)방향 그리고 z방향은 두께(thickness)방향으로 정의하였다.

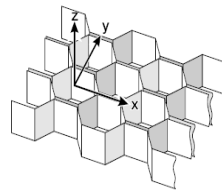


Fig. 5 Direction of honeycomb material.

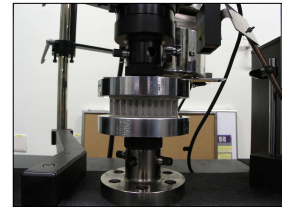


Fig. 6 Flatwise compressive test of honeycomb core.

본 연구에서는 Fig. 6과 같이 알루미늄 하니컴 코어의 두께방향에 대한 압축특성 시험을 통하여 응력-변형률 곡선을 구하였고, 길이 및 폭 방향 물성과 전단 물성은 그 영향이 재료특성에 미치는 영향이 작다는 가정 하에 물성을 정의하였다.

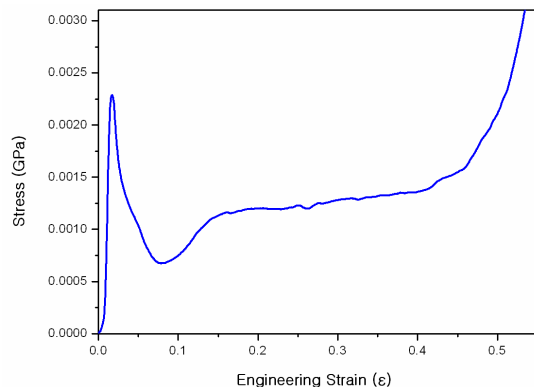


Fig. 7 The stress-strain curve for aluminum honeycomb core(z-direction).

Table 4 Material properties of aluminum honeycomb core.

Properties	Value
Density (kg/m ³)	59.26
Young's modulus for honeycomb material (GPa)	70
Poisson's ratio for honeycomb material	0.33
Elastic modulus, E _x (GPa)	0.33×10 ⁻³
Elastic modulus, E _y (GPa)	0.33×10 ⁻³
Elastic modulus, E _z (GPa)	1.37
Shear modulus, G _{xy} (GPa)	0.18×10 ⁻¹
Shear modulus, G _{yz} (GPa)	0.18
Shear modulus, G _{xz} (GPa)	0.18

Fig 7은 시험을 통해 구하여진 두께방향의 응력-변형률 그래프를 나타내었다. 하니컴 코어의 두께방향의 압축은 3가지 영역으로 나누어지며 첫 번째 영역으로 압축하중에 대한 선형탄성구간, 두 번째는 압축이 진행되면서 응력이 일정한 값을 나타내는 구간과 세 번째로 응력이 급격히 증가하면서 하니컴 셀이 완전히 압축되는 구간으로 구분할 수 있다. Table 4는 하니컴 코어의 재료 물성을 나타내었고, 제작사에서 제공하는 기본적인 물성데이터와 시험을 통한 데이터를 함께 나타내었다.

3.2.5 WR580/NF4000 유리섬유/에폭시의 재료 모델

WR580/NF4000 유리섬유/에폭시 면재는 고속 충격 시 국부적인 구멍이 생겨서 충격체가 뚫고 나간다. 하지만, 속도가 충분히 크지 않는 경우인 저속충격의 경우 외관상 보이지 않더라도 복합재료 내부에는 손상이 발생할 수 있다. 복합재료가 저속 충격을 받을 경우에 충격 후 잔류강도(residual strength after impact)를 고려하여 손상 정도를 아는 것이 매우 중요하다. 금속면재의 경우 일반적으로 연성이 강하기 때문에 충격에너지를 잘 흡수하며, 잔류강도에 영향을 별로 미치지 않는다. 그러나, 복합재 적층판의 손상 모드는 섬유파단(fiber breakage), 층간분리(delamination)와 기지균열(matrix cracking)의 세 가지로 나눌 수 있다. 복합 적층판이 고속에서 관통되었을 경우는 섬유의 파단이 주 손상모드이고, 저속일 경우는 기지균열에 의한 층간분리가 주 손상모드이다. 계면에서의 층간 분리는 두 면의 적층각 차이에 의한 강성의 불일치에 의하여 주로 발생하게 된다[11].

본 연구에서는 차체적용 샌드위치 패널의 내·외부 면재인 WR580/NF4000 유리섬유/에폭시 적층 복합재의 저속 충격에서의 파손을 평가하기위하여 Chang-Chang 파손기준식(Chang and Chang failure criterion)을 선택하였다[12,13].

Table 5 The modified Chang-Chang failure criterion in LS-DYNA 3D.

Failure mode	Following conditions
Fiber breakage	<p>• Tensile, $\sigma_x > 0$</p> $e_{ft}^2 = \left(\frac{\sigma_x}{X_t} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S} \right)^2 - 1$ <p>where, $e_{ft}^2 \geq 0$: failed & $e_{ft}^2 < 0$: elastic</p>
	<p>• Compressive, $\sigma_x < 0$</p> $e_{fc}^2 = \left(\frac{\sigma_x}{X_c} \right)^2 - 1$ <p>where, $e_{fc}^2 \geq 0$: failed & $e_{fc}^2 < 0$: elastic</p>
Matrix cracking	<p>• Tensile, $\sigma_x > 0$</p> $e_{mt}^2 = \left(\frac{\sigma_y}{Y_t} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S} \right)^2 - 1$ <p>where, $e_{mt}^2 \geq 0$: failed & $e_{mt}^2 < 0$: elastic</p>
	<p>• Compressive, $\sigma_x < 0$</p> $e_{mc}^2 = \left(\frac{\sigma_y}{2S_c} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_y}{Y_c} + \left(\frac{\tau_{xy}}{S} \right)^2 - 1$ <p>where, $e_{mc}^2 \geq 0$: failed & $e_{mc}^2 < 0$: elastic</p>
Fiber and Matrix shearing	<p>• Tensile and Compressive,</p> $e_{md}^2 = \frac{\sigma_y^2}{Y_c Y_t} + \left(\frac{\tau_{xy}}{S} \right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t)\sigma_y}{Y_c Y_t} - 1$ <p>where, $e_{md}^2 \geq 0$: failed & $e_{md}^2 < 0$: elastic</p>

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$: 주재료방향(principal material direction)내에서의 응력성분;
 X_t, Y_t : 섬유방향과 섬유직각방향의 인장강도; Y_c, Y_c : 섬유방향과 섬유직각방향의 압축강도; S : xy평면 내의 전단강도; e : 파손지수(failure index);
 ft : fiber tensile; fc : fiber compressive; mt : matrix tensile; mc : matrix compressive; md : shearing mode of fiber & matrix

Chang-Chang 파손기준식은 응력성분을 기초로 하는 파손기준식으로서 섬유와 기지재료에 인장, 압축과 면내전단 하중에 의한 파손모드를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 MAT_54 (*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE) 물성카드를 사용하였으며, 이 물성카드는 Matzenmiller가 Chang-Chang 파손기준식과 Tsai-Wu 파손기준식을 수정하여 Table 5와 같이 제안한 복합재 적층판 파손모델로서 평판이론을 기초로 하여 면내·외 응력성분에 의한 섬유의 파손, 기지재료의 파손모드를 제공한다[14-17].

이때 적용되는 물성은 각 시험종류 및 시험방향에 따라 여섯 개씩 제작하여 인장(ASTM D 3039), 압축(ASTM D3410)과 전단물성시험(ASTM D5379)을 통해 Table 6과 같이 구하였다.

Table 6 Material properties of WR580/NF4000 glass fabric/epoxy laminate

Properties	Value
Density (kg/m^3)	1,830.00
Young's modulus – fill direction (GPa)	21.81
Young's modulus – warp direction (GPa)	18.71
Poisson's ratio between fill and warp direction	0.14
Shear modulus, G_{xy} (GPa)	4.53
Shear modulus, G_{yz} (GPa)	1.40
Shear modulus, G_{xz} (GPa)	1.40
Compressive strength – fill direction (MPa)	419.10
Compressive strength – warp direction (MPa)	439.12
Tensile strength – fill direction (MPa)	415.01
Tensile strength – warp direction (MPa)	421.95
Shear strength (MPa)	114.57

3.3 저속충격 시험 및 해석 결과 비교

저속충격 시험 후 C-scan에 의한 면재의 층간분리 등과 같은 충격손상모드 및 손상영역 관찰을 시도하였으나, 면재가 직물형태인 경우 층간분리의 깊이별 관찰이 용이하지 않았으며 심재가 알루미늄 하니컴 코어는 연속적인 단면 형상이 아니므로 C-scan에 의한 관찰이 어려웠다. 따라서 본 절에서는 3차원 측정기와 광학기기를 이용하여 시편 표면에 발생하는 손상영역을 충격에너지 변화에 따라 분석하였다.

또한 샌드위치 패널 2종류에 대한 저속충격해석을 수행하여 샌드위치 패널의 종류에 따라 파손영역을 비교하였다. 이때 급속재 면재를 갖는 AL/AH 샌드위치 패널은 소성변형영역을, 적층 복합재 면재를 갖는 GE/AH 샌드위치 패널은 기지재료의 파손에 의한 층간분리 파손영역을 도출하였다. 샌드위치 패널과 충격체간의 충격으로 샌드위치 패널의 손상깊이 또한 유한요소해석을 통해 평가하였다.

Fig. 8은 바닥재 적용 샌드위치 시편(AL/AH)에 대해 선정된 충격에너지 별 충격손상영역에 대해 시험과 해석결과를 비교하여 나타난 것이다.

시험 결과(Fig. 8의 오른쪽) 사진의 아래와 오른쪽 선(Line A & B)들은 3차원 측정기에 의해 시편 표면의 A와 B 방향으로 손상영역과 깊이를 정량적으로 표시한 것이며, 해석 결과(Fig. 8의 왼쪽)는 알루미늄 5052면재와 알루미늄 하니컴 코어로 구성된 AL/AH 샌드위치 패널의 저속 충격 해석을 통해 외부 급속재 면재의 소성변형영역(region of plastic strain)을 나타낸 것이다. AL/AH 샌드위치 패널의 저속 충격 해석을 통해 소성변형영역을 확인한 결과 충격에너지가 증가함에 따라 손상영역이 증가하였으며, 시험결과와 파손영역이 일치하는 것을 확인하였다.

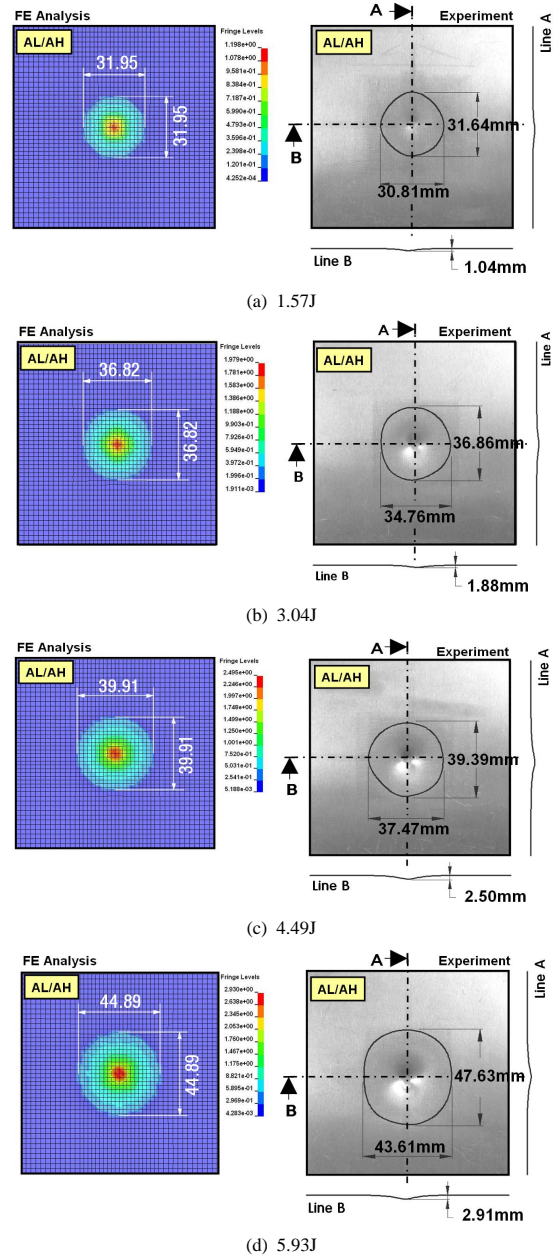


Fig. 8 Comparisons of impact damage areas for AL/AH sandwich panels after impact.

Fig. 9는 차체 적용 샌드위치 시편(GE/AH)에 대해 선정된 충격에너지 별 충격손상영역에 대해 시험과 해석결과를 나타낸 것이다.

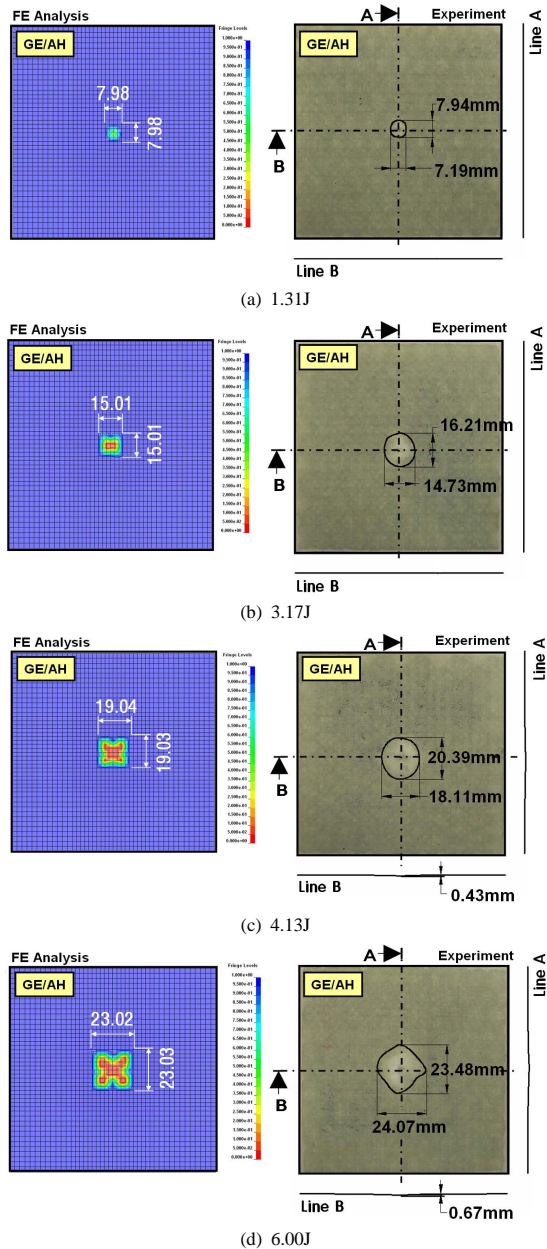


Fig. 9 Comparisons of impact damage areas for GE/AH sandwich panels after impact.

저속충격시험에서(Fig. 9의 오른쪽) WR580/ NF4000 적층 복합재 면재를 사용한 차체 적용 샌드위치 시편에 발생하는 손상영역은 하얗게 나타나 육안으로도 비교적 잘 보임을 알 수 있다. 이 손상영역은 충격에 의한 적층 복합재 면재에 발생하는 층간분리인 것으로 확인되었다[7]. 또한,

충격에너지가 증가할수록 손상영역이 증가하는 경향을 보이고 있다. 특이한 사항은 3.17J까지는 시편의 두께 방향 변형이 발생하지 않았으나, 4.13J부터는 3차원 측정결과, 면재의 두께 방향으로 변형이 미미하게 발생됨을 Fig. 9(c)의 오른쪽 그림에서 확인할 수 있다. 이는 4.13J의 충격에너지에 의해 알루미늄 하니컴 코어의 국부적인 압괴(local crushing)가 더욱 커져 WR580/NF4000 적층 복합재 면재가 두께 방향으로 미소의 움푹 파인 변형(permanent indentation)이 발생함을 의미한다. 또한 해석 결과(Fig. 9의 왼쪽) WR580/NF4000 유리섬유/에폭시 적층 복합재 면재와 알루미늄 하니컴 코어로 구성된 GE/AH 샌드위치 패널의 저속 충격 해석을 통해 외부 적층 복합재 면재의 파손 영역(damage area)에 대하여 나타내었다. 이때 파손 영역은 기지 재료의 파손 지수(Table 5의 e_{mt})를 나타낸 것으로 이는 층과 층이 분리되는 층간분리로 가정하였다.

Table 7 Comparisons of Impact response for AL/AH sandwich panel

Impact energy (J)	Dent depth (mm)			Plastic strain area (mm ²)		
	EXP	FEA	Error (%)	EXP	FEA	Error (%)
1.31	1.04	1.19	14.42	765.38	801.33	4.70
3.17	1.88	1.98	5.32	1006.65	1064.23	5.72
4.13	2.50	2.49	0.40	1159.34	1250.35	7.85
6.00	2.91	2.93	0.69	1633.73	1581.86	3.17

EXP : Experiment; FEM : Finite element analysis

Table 7은 알루미늄 면재와 알루미늄 하니컴 코어로 구성된 AL/AH 바닥재 적용 샌드위치 패널에 대한 저속충격시험 및 해석결과를 요약한 것으로 충격에너지에 따라 손상깊이 및 소성변형영역에 대해 비교하였다. 비교 결과 해석과 시험이 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Table 8 Results of impact test for GE/AH sandwich panel

Impact energy (J)	Dent depth (mm)			Delamination area (mm ²)		
	EXP	FEA	Error (%)	EXP	FEA	Error (%)
1.57	-	0.12	-	44.92	49.99	11.27
3.04	-	0.16	-	187.87	176.86	5.86
4.49	0.43	0.46	6.98	290.89	284.73	2.12
5.93	0.67	0.66	1.49	443.72	415.99	6.25

EXP : Experiment; FEA : Finite element analysis

Table 8은 WR580/NF4000 적층 복합재 면재와 알루미늄 하니컴 코어로 구성된 GE/AH 차체적용 샌드위치 시편에 대한 저속충격시험 및 해석결과를 요약한 것이며, 시험으로 측정된 층간분리영역과 해석을 통해 분석된 기지재료의 파손영역이 비교

적 잘 일치하는 것을 확인하였다. GE/AH 샌드위치 패널의 저속충격 시험에서 1.57J과 3.04J의 충격에너지로 시험된 시편의 경우 변형 정도가 매우 미미하고, 면재의 조도가 변형량과 크게 차이가 나지 않아 3차원 측정이 용이하지 않았다.

샌드위치 패널 2종류에 대한 저속충격시험 및 해석 결과 AL/AH 그리고 GE/AH 샌드위치 패널은 충격에너지가 증가함에 따라 손상영역과 깊이도 증가함을 확인할 수 있었다. 알루미늄 면재를 사용한 바닥재 적용 샌드위치 시편들의 손상영역은 WR580/NF4000 적층 복합재 면재를 사용한 차체 적용 샌드위치 시편들에 비해 작은 충격에너지에서도 매우 크게 발생하며, 면재의 두께 방향으로 움푹 파인 영구 변형 형태 역시 매우 크게 나타난다. 이런 이유로 알루미늄 면재를 사용한 샌드위치 패널을 차체 구조에 적용시킬 경우 충격에 의해 외형적인 문제와 유지보수 문제 등을 유발할 수 있다. 시험 결과 직조형태의 유리섬유/에폭시 면재를 갖는 샌드위치 패널의 저속충격특성이 우수한 것으로 확인되었다.

결 론

본 논문은 바이모달 트램의 차체에 적용되는 GE/AH 샌드위치 패널과 바닥재에 적용되는 AL/AH 샌드위치 패널에 대한 저속충격 특성을 충격시험과 외연유한요소해석을 통해 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 저속충격시험 결과 금속 알루미늄 면재를 적용한 샌드위치 패널(AL/AH) 보다 직조형태의 유리섬유/에폭시 적층 복합재 면재로 구성된 샌드위치 복합재 패널(GE/AH)이 손상 깊이 및 영역이 적게 나타나 우수한 저속충격특성을 나타낸 것으로 확인되었다.
- (2) 샌드위치 복합재 패널을 구성하는 금속 알루미늄 및 유리섬유/에폭시 적층 복합재 면재에 대한 기본적인 기계적 물성 시험을 수행하여 재료의 손상모형을 제시하였고, 특히 알루미늄 하니컴 코어의 경우 솔리드 모델로 모사하기 위한 유효손상모형을 도출하였다.
- (3) 적층 복합재의 특성상 외부 하중에 의하여 재료내에 발생하는 하중으로 인해 섬유 및 기지재료에 대한 파손 그리고 층과 층이 분리되는 층간분리 파손이 발생된다. 이로 인해 급격한 하중감소가 발생되면 구조체로서의 건전성을 확보하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 적층 복합재 면재에 대한 파손 모드를 수정된 Chang-Chang 파손기준식을 사용하여 해석하였으며 시험결과와 손상영역 및 깊이와 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 건설교통부의 국가교통핵심기술개발사업의 지원에

의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Hankook Fiber Glass Co. Ltd., "Development Urban Fuel Cell Tram Bodysheell and Interior System," *Third Year Report*, 2006.
- 2) Martec Limited Prevost Car, "Intercity Bus Weight Reduction Program Phase I," 2000.
- 3) Shin, K. B., Lee, J. Y., Ryu, B. J. and Lee, S. J., "A Study on Flexural Behaviors of Sandwich Composites with Facesheet of Unequal Thickness," *Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 2, pp. 201-210, 2007.
- 4) Hachenberg D, Mudra C, Nguyen M. "Folded structure an alternative core material for future sandwich concepts," *In :DGLR Conference*, Munich, Germany; 17-21 November 2003.
- 5) Lee, J. Y., Jeon, J. S., Shin, K. B., Lee, S. J. and Jeong, J. C., "Evaluation of the Structural Performances of Sandwich Panels for the Material Selection of the Low Floor Bus Bodysheell," *Autumn Conference of Korean Society for Composite Materials*, pp. 176-180, 2006.
- 6) Abrate, S., "Impact on Composite Structures," *Cambridge: Cambridge University Press*, 1998.
- 7) Shin, K. B., Lee, J. Y. and Lee, S. J., "A Study on Low-Velocity Impact Characterization of Various Sandwich Panels for the Korean Low Floor Bus Application," *Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 31, No. 4, pp. 506-516, 2007.
- 8) Rouse M, Anbur DM, Bodine J, Dopker B., "Evaluation of a Composite Fuselage Sandwich Stuctruces with Thick Facesheets," *NASA Technical Memorandum*, 11309.
- 9) Choi, H. T., Chang F. K., "A Model for Predicting Damage in Graphite.Epoxy Laminated Composites Ruesulting form low DYNA3d Subjected to Low Velocity Point Impact," *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, pp. 834-855, 1987.
- 10) Meo, M., Morris, A. J., Vignjevic, R. and Marengo, G., "Numerical Simulations of Low-Velocity Impact on an Aircraft Sandwich Panel," *Journal of Composite Structures*, Vol. 62, pp. 353-360, 2003.
- 11) Lemaitre, J. and Desmorat, R., "Engineering Damage Mechanics-Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures," *Springer Verlag*, 2005.
- 12) Chang, FK, and Chang KY., "A Progressive Damage

- Model for Laminated Composite Containing Stress Concentrations,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, pp. 834-855, 1987.
- 13) Tsai, S. W. and Hahn, H. T., “Introduction to Composite Materials,” Technomic Publishing Co, 1950.
- 14) Azzi, V. D. and Tsai, S. W., “Anisotropic Strength of Composites,” *Experimental Mechanics*, Vol. 5, pp. 283-288, 1965.
- 15) Tsai, S. W, and Wu, E. M., “A General Theory of Strength for Anisotropic Materials,” *Journal of Composites Materials*, Vol. 5, 58-80, 1971.
- 16) Matzenmiller, A., Luvliner, J. and Taylor R. L., “A Constitutive Model for Anisotropic Damage in Fiber-composoites,” *Journal of Mechanical of Materials*, Vol. 21, pp. 125-152, 1995.
- 17) LS-DYNA, “Keyword User’s Manual, Version 971,” Livermore Software Technology Corporation, 2006.