

금속재와 적층복합재 면재를 갖는 샌드위치 패널의 저속충격 특성 연구

A Study on Low-Velocity Impact Characterization of Sandwich Panels with Metal and Laminate Composite Facesheets

이재열* 신광복† 이상진** 조세현** 목재균***
Lee, Jae-Youl Shin, Kwang-Bok Lee, Sang-Jin Jo, Se-Hyun Mok, Jai-Kyun

ABSTRACT

In this paper, the low velocity response of four different sandwich panels with metal and laminate composite facesheets has been investigated by conducting drop-weight impact tests using an instrumented falling-weight impact tower. Square samples of 100mm sides were subjected low-velocity impact loading using an instrumented testing machine at six energy levels. Impact parameters like maximum force, time to maximum force, deflection at maximum force and absorbed energy were evaluated and compared for four different types of sandwich panels. The impact test results show that sandwich panel with composite laminate facesheet could not observe damage mode of a permanent visible indentation after impact and has a good impact damage resistance in comparison with sandwich panel with metal aluminum facesheet.

1. 서론

건설교통부에서는 국가교통핵심 기술개발사업의 일환으로 한국형 초저상 버스에 대한 연구개발을 시작하였으며, 기존의 금속재에 비해 높은 비강성 및 비강도(high specific stiffness & strength) 특성을 갖는 복합재를 적용한 차체 제작을 추진하고 있다. 복합재 적용에 의한 차량의 경량화는 속도를 향상시키며 에너지 및 유지보수 비용 절감 등의 장점을 가지고 있어 항공기, 철도차량 및 선박 등에 광범위하게 사용되고 있다. 국내에서는 한국형 고속 틸팅열차(TTX) 개발사업에 복합재를 적용한 차체를 제작하여 시험 중에 있으나, 버스와 같은 도시형 승객 이동수단에는 적용된 사례가 없다[1-2].

한국형 초저상 버스 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. 섬유강화 복합재는 샌드위치 패널로는 제작이 어려운 곡률이 심한 일부 부위에 사용하게 된다. 즉, 초저상 버스의 1차 부재는 대부분 샌드위치 패널에 의해 제작된다.

일반적으로 차체 구성 재료에 대한 선정은 기본설계 단계(basic design stage)에서 가격 및 제작성 등을 고려한 재료들을 대상으로 정적 및 동적 시험 등을 수행하여 무게 대비 가장 우수한 재료를 선택하게 된다. 정적시험에서는 주로 인장, 압축, 전단 및 굽힘 등과 같은 기본적인 물성 평가를 수행하게 되며 동적 시험에서는 충격시험 등을 수행하게 된다[3]. 기존의 복합재 구조물에 대한 충격특성 평가는 주로 면재로 사용되는 복합재 적층판에 국한되어 평가되어 왔다[4-5]. 그러나, 샌드위치 구조물에 대한 사용이 증가되고 있는 추세이므로, 다양한 면재와 심재 재료의 조합으로 구성되는 샌드위치 구조물에 대한 충격특성 평가는 매우 중요한 연구과제이다. 샌드위치 구조물에 대한 충격 특성 평가는 최적의 차체 재료 선정뿐만 아니라 추후 발생하게 되는 유지보수 측면에서도 매우 중요하다.

본 연구에서는 한국형 초저상 버스 차체 및 바닥재 구조를 구성하게 될 최적의 샌드위치 구성 재료를

* 국립한밭대학교, 기계설계공학과 대학원, 정회원
† 교신저자, 국립한밭대학교 기계설계공학과, 교수, 정회원
 E-mail : shin955@hanbat.ac.kr
 Tel : (042)821-1156 Fax : (042)821-1587

** (주)한국화이바, 차량사업부, 정회원

*** 한국철도기술연구원, 신에너지 바이오달 수송시스템팀, 정회원

선정하고자 4종류의 샌드위치 패널에 대한 충격시험을 수행하여 충격에너지변화에 따른 충격특성을 평가하였다. 또한, 3차원 측정기를 사용하여 충격에 의한 샌드위치 패널들의 손상영역과 손상깊이 (damage areas and depth)를 측정하였으며, 시편을 절단하여 심재와 면재의 충격 손상모드(damage mode)를 관찰하였다.

2. 초저상 버스 적용 샌드위치 패널

2.1 샌드위치 패널의 구성

그림 1은 한국형 초저상 버스에 대한 외형 개념도를 나타내고 있으며, 차체 재료로 고려중인 샌드위치 패널은 Table 1에서 보듯이 총 4종류이다. 면재와 심재는 국내외에서 항공기, 철도차량, 선박 구조물 등에서 널리 사용되는 재료를 선정하였다.

초저상 버스 차체 구조물(bodyshell)에 적용될 샌드위치 패널은 WR580/NF4000 유리섬유/에폭시 (Glass fabric/Epoxy; GE) 적층 복합재 면재와 알루미늄 하니컴 코어(Aluminum Honeycomb core; AH) 또는 발사 코어(Balsa core; BA)에 의한 구성이 고려되고 있으며, 바닥재(floor) 적용 샌드위치 패널은 알루미늄 면재(Aluminum; AL)와 알루미늄 하니컴 코어 또는 발포 알루미늄 코어(Foaming Aluminum core; FA)를 고려중이다. 차체에 사용될 샌드위치 패널의 면재는 기계적 성능이 우수해야 하고, 심한 곡면에도 제작이 용이해야 하므로 금속재보다는 WR580/NF4000 복합재가 선택되었다. 표 1에서 두께는 외피(outer facesheet)/심재(core)/내피(inner facesheet)의 순서대로 표시한 것이다.

표 1. The types of sandwich panels considered in design stage.

Objective Part	Name*	Facesheet Material	Core Material	Thickness (mm)	Weight (kg)
Bodyshell	GE/AH	Glass fabric/Epoxy (WR580/NF4000)	Aluminum 5052 Honeycomb (3/8"-5052-0.0025")	3.0/25.4/1.5	0.08
	GE/BA		Balsa CK-100 (Contour type)	3.0/25.4/1.5	0.11
Floor	AL/AH	Aluminum 5052	Aluminum 5052 Honeycomb (3/8"-5052-0.0025")	1.2/16.0/1.2	0.08
	AL/FA		Foaming Aluminum 5052	1.2/16.0/1.2	0.14

* Abbreviation of facesheet/core material

차체와 바닥재에 사용될 면재와 심재에 대한 기본물성은 표 2와 3에 나타냈다.

2.2 샌드위치 패널 시편의 제작

충격시험에 사용될 샌드위치 패널은 오토클레이브(autoclave)를 사용하여 제작하였다. 샌드위치 패널의 제작 공정은 면재와 코어를 같은 치수로 준비한 후 면재와 코어 사이에 본덱스 606 (Bondex 606) 접합필름을 상온에서 접착시킨 후 적절한 온도와 압력 하에서 성형을 하게 된다. 면재가 복합재 적층판인 경우, 직물 프리프레그(fabric prepreg)를 원하는 두께만큼 적층해야 하는 추가적인 작업이 요구된다. 적층 작업이 완료된 샌드위치 패널은 오토클레이브의 압력과 온도 이력에 따라 동시에 성형하게 된다.

3. 샌드위치 패널의 충격특성 평가

3.1 충격시험장치

충격시험은 그림 2에서 보듯이 Dynatup 8250 충격시험기를 사용하여 수행하였으며, 이 충격시험기는 하중변환기 센서가 장착된 충격체, 충격속도를 측정하기 위한 광센서, 충격체를 유도하기 위한 두 개의 유도봉 등으로 구성된다. 본 시험에 사용된 텡(tup)은 지름 15.86mm인 반구형의 강철이고 충격체 질량은 1.40kg이었다. 충격에너지는 충격체의 낙하높이를 변화

표 2. Mechanical properties of facesheet materials.

Facesheet material	Direction	Tensile		In-plane shear		Density (kg/m ³)
		Modulus (GPa)	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Strength (MPa)	
WR580/NF4000	Fill	20.81	424.83	4.20	85.77	1850
	Warp	18.71	414.88			
Aluminum 5052	-	70.30	193.00*	25.90	138.00	2680

* Yield strength

표 3. Mechanical properties of core materials.

Core material	Compressive		Shear		Density (kg/m ³)
	Modulus (GPa)	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Strength (MPa)	
Aluminum 5052 Honeycomb	1.37	2.55	0.51*	1.72*	59
Balsa CK-100	3.92	12.67	0.16	2.94	151
Foaming Aluminum 5052	4.67	3.17	1.73	9.20	473

* Plate shear property

시키면서 조절하였다. 또한, 충격 후 샌드위치 시편에 발생하는 표면의 손상영역과 손상깊이는 그림 3의 3차원 측정기(모델명 : Cyclone)에 의해 측정하였다.

샌드위치 패널에 가해지는 충격에너지는 충격시험기가 가할 수 있는 최소의 충격에너지부터 시작하여 6 단계의 충격에너지 변화에 따른 충격특성을 관찰하였다.

3.2 충격에너지 변화에 따른 충격특성 분석

충격에너지 변화에 따른 샌드위치 시편들에 대한 충격특성은 두 개의 그룹으로 나누어 수행하였다. 1 그룹은 WR580/NF4000 적층 복합재 면재(GE)와 알루미늄 하니컴 코어(AH) 또는 발사 코어(BA)를 사용하는 차체 적용 샌드위치 시편들(GE/AH, GE/BA)이며, 2그룹은 알루미늄 5052 면재(AL)와 알루미늄 하니컴 코어(AH) 또는 발포 알루미늄 코어(FA)를 사용하는 바닥재 적용 샌드위치 시편들(AL/AH, AL/FA)이다. 충격시험에 사용된 시편은 각각의 충격에너지별로 한 개씩만을 사용하였다.

3.2.1 차체 적용 샌드위치 시편들의 충격특성

차체 구조물로 사용될 샌드위치 시편들의 충격에너지는 1.31J, 2.26J, 3.17J, 4.13J, 5.07J, 6.00J 여섯 가지의 변화를 주어 수행하였다. 그림 4는 충격에너지 변화에 따른 차체 적용 샌드위치 시편들에 대한 시간에 따른 접촉력 이력 선도를 비교한 것이다. 충격에너지가 증가할수록 최대 접촉력과 접촉 시간이 증가하는 경향을 보이고 있다. 유리섬유/에폭시(glass/epoxy)등의 섬유 강화 적층 복합재에 대해서만 충격시험을 수행할 경우 시간에 따른 접촉력 이력 곡선은 일반적으로 짧은 파장들의 파동 등에 의해 심한 요동현상(fluctuation)이 발생하지만, 샌드위치 시편의 경우는 시간에 따른 접촉력 이력 곡선의 요동 정도가 매우 적게 일어난다. 이는 샌드위치 시편이 적층 복합재에 비해 굽힘 강성과 고유진동수가 월등히 높기 때문이다(6-8).

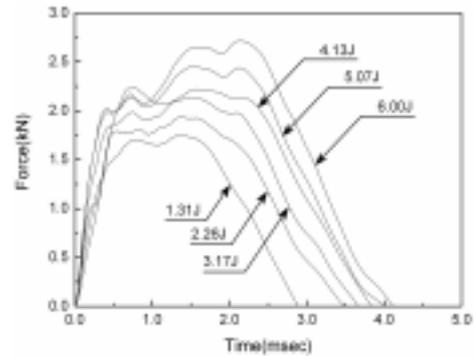
3.2.2 바닥재 적용 샌드위치 시편들의 충격특성

바닥재 구조물로 사용될 샌드위치 시편들의 충격에너지는 1.57J, 2.08J, 3.04J, 3.50J, 4.49J, 5.93J 여섯 가지의 변화를 주어 수행하였다. 그림 5는 충격에너지 변화에 따른 바닥재 적용 샌드위치 시편들에 대한 접촉력 이력 선도를 나타낸 것이다. 차체 적용 샌드위치 시편들과 마찬가지로 충격에너지가 증가함에 따라 접촉력 및 접촉 시간이 증가하고 있다. 바닥재 적용 샌드위치 시편들의 경우 면재가 금속재 알루미늄이므로 적층 복합재 면재에서 발생하는 섬유파단과 층간분리 등의 파손형태가 없어 하중의 급격한 증감의 반복경향은 비교적 적게 일어남을 확인할 수 있다. 즉, 바닥재 적용 샌드위치 시편들은 면재와 심재가 모두 금속 알루미늄으로 제작되어 면재의 두께방향으로의 움푹 파인 형태의 영구 변형(permanent indentation)과 심재의 국부적인 압괴(local crushing)에 의한 파손이 주된 모드인 것으로 판단된다. 차체 적용 샌드위치 시편들과는 달리 바닥재 적용 샌드위치 시편들의 충격거동은 심재의 종류에 따라 많은 차이를 보이고 있다. AL/AH 시편이 AL/FA 시편에 비해 75% 무게 절감 효과를 얻을 수 있다.

3.3 충격에너지 변화에 따른 충격손상 분석

샌드위치 구조물이 실제 환경에 운행될 때 여러 가지 주위 환경에 의해 충격이 발생하고 이로 인해 충

그림 2. Impact test machine. 그림 3. 3D scanner



(a) GE/AH specimen

그림 4. Force-time histories for bodyshell sandwich specimens with different impact energy.

격손상을 받게 된다. 이런 충격손상은 심하지 않은 경우 충격부위에 대한 부분 수리 등으로 해결되기도 하지만, 심한 경우 구조적 결함으로 작용하기도 한다. 따라서 충격에너지 변화에 따른 충격손상에 대한 분석은 차후 발생하게 되는 유지보수 측면과 구조물의 성능유지에 영향을 주므로 반드시 분석해야 한다.

본 연구에서는 C-scan에 의한 면재의 층간분리 등과 같은 충격손상모드 및 손상영역 관찰을 시도하였으나, 면재가 직물형태인 경우 층간분리의 깊이별 관찰이 용이하지 않았으며 심재가 알루미늄 하니컴 코어 또는 발포 알루미늄 코어인 경우 연속적인 단면 형상이 아니므로 C-scan에 의한 관찰이 어려웠다.

따라서 본 절에서는 3차원 측정기와 광학기기를 이용하여 시편 표면에 발생하는 손상영역을 충격에너지 변화에 따라 분석하였으며, 시편 단면을 절단하여 충격을 받은 부위에 대한 면재와 심재의 손상모드를 관찰하였다.

그림 5. Force-time histories for floor sandwich specimens with different impact energy.

3.3.1 차체 적용 샌드위치 시편들의 충격손상

그림 6은 차체 적용 샌드위치 시편(GE/AH & GE/BA)에 대해 1.31J, 3.17J, 4.13J, 6.00J의 충격에너지에서 충격손상 영역을 나타낸 것이다. 각각 사진의 아래와 오른쪽 선(Line A & B)들은 3차원 측정기에 의해 시편 표면의 A와 B 방향으로 손상영역과 깊이를 정량적으로 표시한 것이다. 그림 6에서 보듯이 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.

그림 6에서 GE/AH 시편의 경우, 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 미비하게 발생됨을 그림 6(c)에서 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.

GE/BA 시편 역시 충격에너지가 증가할수록 손상영역은 증가하고 있으며, GE/AH 시편의 손상영역에 비해 큰 경향을 보이고 있다. 4.13J까지의 손상영역은 GE/AH 시편과 같이 원모양(circle shape)을 이루고 있으나, 이후의 충격에너지에서는 그림 6(d)에서 보듯이 손상영역이 화살표 방향으로 진전되는 현상을 보이고 있다. 이는 발사 코어를 사용한 GE/BA 시편의 경우 충격에 의한 응력파(stress wave)가 충격에너지 증가에 따라 접착력이 약한 부분으로 접착층 분리(de-bonding)를 발생시킨 것으로 판단된다. 이런 현상은 5.46J부터 발견되었다. GE/AH 시편에서는 심재인 알루미늄 하니컴 코어가 별집 모양의 단면적으로 구성되어 접착층으로의 응력과 전달을 최소화시켜 접착층 분리 등은 발견되지 않았다. GE/BA 시편의 경우에는 그림 6에서 보듯이 3차원 측정결과, GE/AH 시편과는 달리 두께 방향으로 움푹 파인 영구 변형 형태를 보이지 않고 있다.

그림 6. Impact damage areas for bodyshell sandwich specimens after impact.

그림 7. Pictures of samples sectioned at impact location for bodyshell sandwich specimens.
(arrow indicates impact location)

그림 8. Impact damage areas for floor sandwich specimens after impact.

그림 9. Pictures of samples sectioned at impact location for floor sandwich specimens.
(arrow indicates impact location)

그림 7은 충격이 가해진 후 차체 적용 샌드위치 시편들에 대해 면재와 심재의 충격손상모드를 시편을 절단하여 광학기기로 관찰한 것이다. 이때, 화살표는 충격 위치를 나타낸다. GE/AH와 GE/BA 시편의 면재에는 모두 층간분리에 의한 충격손상이 관찰되었다. 층간분리에 의한 면재의 손상영역은 그림 6에서 표시된 영역이며, 이런 층간분리는 충격에너지가 증가할수록 더욱 더 진전됨을 확인할 수 있었다. 심재의 충격손상모드는, 알루미늄 하니컴 코어를 적용한 GE/AH 시편의 경우에는 코어 셀의 국부적인 압괴에 의한 충격손상이 관찰되었고, 발사 코어를 적용한 GE/BA 시편의 경우에도 충격하중을 받은 부위에서 코어의 압괴 손상이 발생하였다.

그림 7에서 충격 손상을 받은 후 시편의 표면에는 다른 손상거동을 보이고 있다. GE/AH 시편의 경우에는 앞에서도 언급하였듯이 4.13J의 충격에너지부터 시편 표면에 미소의 움푹 파인 형태의 영구변형이 남아있음을 확인할 수 있지만, GE/BA 시편의 경우에는 그림 7에서 보듯이 시편 표면의 두께 방향 변형이 없음을 알 수 있다. GE/AH와 GE/BA 시편 모두 충격을 가하지 않은 면(back surface)에서는 인장파손(tensile failure) 등에 의한 충격손상이 발생되지 않았다.

3.3.2 바닥재 적용 샌드위치 시편들의 충격손상

그림 8은 바닥재 적용 샌드위치 시편(AL/AH & AL/FA)에 대해 1.57J, 3.04J, 4.49J, 5.93J의 충격에너지 변화에 따른 충격 손상 영역을 나타낸 것이며, 앞에서와 마찬가지로 각각 사진의 아래와 오른쪽 선(line A & B)들은 3차원 측정기에 의해 시편의 A와 B 방향으로 손상영역과 깊이를 정량적으로 표시한 것이다.

그림 8에서 AL/AH와 AL/FA 시편 모두 충격에너지가 증가함에 따라 손상영역과 깊이도 증가함을 확인할 수 있다. 상대적으로 AL/AH 시편의 손상영역과 깊이가 더 크게 발생하는 데, 이는 Table 3에서 보듯이 알루미늄 하니컴 코어가 발포 알루미늄 코어에 비해 강성이 작기 때문이다. 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 체 구조에 적용 시킬 경우 충격에 의해 외형적인 문제와 유지보수 문제 등을 유발할 수 있다

그림 9은 충격이 가해진 후 바닥재 적용 샌드위치 시편들에 대해 면재와 심재의 충격손상모드를 시편을 절단하여 광학기기로 관찰한 것이다. 두 종류의 샌드위치 시편 모두 비슷한 충격손상 모드를 보이고 있다. 충격에너지가 증가할수록 두께방향으로 움푹 파인 변형이 증가하는 모습을 볼 수 있으며, 면방향 손상영역 역시 더욱 더 진전됨을 알 수 있다. 알루미늄 하니컴 코어를 적용한 AL/AH 시편의 경우에는 코어의 국부적인 셀 압괴가 발생하였으나, 발포 알루미늄 코어를 적용한 AL/FA 시편의 경우에는 충

격하중을 받은 부위의 발포 알루미늄 코어가 압괴되면서 공기로 채워진 빈 구형 코어가 찌그러지는 현상을 나타내고 있다. 면재와 심재사이의 접촉층 분리는 발견되지 않았으며, 충격을 가하지 않은 면에서도 인장 파손 등의 충격손상이 발견되지 않았다.

4. 결 론

본 연구는 한국형 초저상 버스 적용을 위해 4 종류의 샌드위치 패널들에 대한 저속충격 특성 및 손상모드를 6 단계의 충격에너지 변화에 따라 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) WR580/NF4000 유리섬유/에폭시 적층 복합재 면재를 갖는 차체 적용 샌드위치 패널들의 흡수에너지, 최대 접촉력 등의 충격특성은 심재 종류에 무관하게 비슷한 경향을 보이고 있다. 다만, 손상영역은 발사코어를 적용한 샌드위치 패널(GE/BA)이 다소 크게 발생하였고, 무게 측면에서는 알루미늄 하니컴 코어를 적용한 시편(GE/AH)이 37% 정도 유리한 것으로 나타났다.

(2) WR580/NF4000 유리섬유/에폭시 적층 복합재 면재를 갖는 차체 적용 샌드위치 패널들의 충격손상모드는 동일하게 적층 복합재 면재에서는 층간분리, 코어에서는 국부적인 압괴 파손이 관찰되었으며 충격에너지가 증가할수록 층간분리에 의한 손상영역이 커짐을 확인하였다. 두께 방향으로 움푹 파인 영구 변형 형태는 거의 없었다.

(3) 금속 알루미늄 면재를 갖는 바닥재 적용 샌드위치 패널들의 충격특성은 흡수에너지만을 제외하고 심재 종류에 따라 커다란 차이를 보이고 있다. 최대처짐과 접촉시간은 알루미늄 하니컴 코어를 적용한 샌드위치 시편(AL/AH)이 높으며, 최대 접촉력은 발포 알루미늄 코어를 적용한 샌드위치 패널(AL/FA)이 높은 것으로 확인되었다. 이는 알루미늄 하니컴 코어를 적용한 샌드위치 패널의 상대적으로 강성이 낮음을 의미한다. 그러나, 무게 측면에서는 알루미늄 하니컴 코어를 적용한 샌드위치 패널이 75% 유리한 것으로 나타났다.

(4) 금속 알루미늄 면재를 갖는 바닥재 적용 샌드위치 패널의 충격손상모드는 차체 적용 샌드위치 패널들과는 다른 경향을 보이고 있다. 충격하중에 의해 두께방향으로의 움푹 파인 영구 변형이 주된 손상모드를 이루고 있다. 이런 손상모드는 유지보수 측면에서 매우 불리한 것으로 판단된다.

(5) 적층 복합재 면재를 사용한 차체 적용 샌드위치 패널들은 금속 알루미늄 면재를 사용한 바닥재 적용 샌드위치 패널에 비해 충격 손상 및 변형 형태 등의 충격 저항성이 우수한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 건설교통부에서 수행중인 국가교통핵심기술개발사업의 지원으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 신광복, 구동희, 한성호, 박기진(2004), “설계요구조건 검증을 통한 한국형 고속 틸팅열차(TTX)의 차체 재료 선정에 관한 연구”, 한국철도학회논문집, 제 7권, 2호, pp. 77~84.
- (2) 신광복, 구동희, 한성호(2004), “200km/h급의 한국형 고속틸팅열차(TTX) 개발사업 소개”, 한국복합재료학회, 제 17권, 3호, pp. 62~65.
- (3) 이재열, 전재선, 신광복, 이상진, 정종철(2006), “초저상 버스 차체 재료 선정을 위한 샌드위치 패널의 구조 특성 평가”, 한국복합재료학회 추계학술대회, pp. 176~180.
- (4) 전정규, 권오양, 이우식(2001), “곡률을 가진 적층복합재 구조에서의 저속충격손상 평가”, 한국복합재료학회, 제 14권, 2호, pp 22~32.
- (5) 김정석, 이재현, 정성균(2005), “하이브리드 복합재 철도차량 차체 적용 적층판의 저속충격특성 연구”, 한국복합재료학회, 제 18권, 3호, pp 7~12.
- (6) M. Q. Nguyen, S. S. Jacombs, R. S. Thomson, D. Hachenberg, M. L. Scott(2005), "Simulation of Impact on Sandwich Structures", Composite Structures, Vol. 67, No. 2, pp.

217~227.

(7) M. Hosur, M. Abdullah, S. Jeelani(2005), "Manufacturing and Low-velocity Impact Characterization of Foam Filled 3-D Integrated Core Sandwich Composites with Hybrid Facesheets", *Composite Structures*, Vol. 69, No. 2, pp. 167~181.

(8) J. H. Lee, C. D. Kong, Cotstas Soutis(2005), "Modeling of Low Velocity Impact Damage in Laminated Composites", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 4, pp. 947~957.