

## 論文

## 낙하추 충격시험기를 이용한 스티칭된 샌드위치 복합재의 저에너지 충격거동 연구

윤성호\* · 이상진\* · 조세현\*\*

### Impact Behaviors of Stitched Sandwich Composites Under Low Energy Impact Using Drop Weight Impact Tester

Sung-Ho Yoon\*, Sang-Jin Lee\* and Sae-Hyun Cho\*\*

#### ABSTRACT

This study investigated the impact behaviors of the stitched sandwich composites under the low energy impact by the use of the drop weight impact tester. These sandwich composites consisted of the glass fabric faces with a urethane foam core. The upper face and the lower face were stitched to combine through the core thickness direction using the polyester reinforcements. Four types of the stitched sandwich composites, each having a different core thickness, were tested to determine the effects of the core thickness. The impact conditions were changed with the variations of the mass and the drop height of the impact tup. The test results showed that the core thickness and the impact conditions such as the drop height and the mass of the impact tup affected the impact force, the contact time, and the strain behaviors of the stitched sandwich composites. The stitched sandwich composites are able to avert the damage and also maintain the structural integrity even though the presence of the damage owing to the through-the-thickness reinforcements. However, it is important to improve the wetting ability of the stitched reinforcements so that the conventional structures are substituted for the stitched sandwich composites effectively.

#### 초 록

본 연구에서는 낙하추 방식의 충격시험기를 이용하여 스티칭된 샌드위치 복합재의 저에너지 충격거동을 조사하였다. 스티칭된 샌드위치 복합재는 유리섬유직물의 면재와 우레탄 폼의 코어로 구성되어 있으며 위쪽 면재와 아래쪽 면재는 폴리에스터 보강섬유로 코아의 두께방향을 따라 스티칭하여 일체형으로 결합되어 있다. 이때 코아의 두께가 충격거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 코아의 두께를 달리한 네 종류의 스티칭된 샌드위치 복합재를 고려하였다. 스티칭된 샌드위치 복합재에 작용되는 충격조건은 낙하추의 질량과 낙하추의 낙하높이를 조절함으로써 변화시켰다. 연구결과에 따르면 코아의 두께, 낙하추의 낙하높이, 그리고 낙하추의 질량 등의 변화는 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 충격하중, 충격체와의 접촉시간, 면재에 형성된 변형을 등에 영향을 미침을 알 수 있었다. 또한 스

\*금오공과대학교 기계공학부

\*\*한국화이버 복합재료연구소

티칭된 샌드위치 복합재는 스티칭부의 보강효과로 인해 손상을 억제시킬 뿐 아니라 손상이 발생한 경우에도 구조물로서 역할을 담당할 수 있다. 그러나 스티칭된 샌드위치 복합재를 효율적으로 기존의 구조물에 적용하기 위해서는 스티칭부에서의 수지함침성을 개선할 수 있는 제작공법의 연구가 필요하다.

### 1. 서 론

샌드위치 복합재는 강성이 높고 비교적 두께가 얇은 면재를 밀도가 낮은 코아의 양면에 부착시킨 형태로서 단일 부재의 금속재나 복합재에 비해 비강성과 비강도가 높을 뿐 아니라 피로특성, 단열성, 흡음성 등이 우수하다는 장점을 가지고 있기 때문에 항공기, 선박, 철도 차량, 냉동컨테이너, 건축재 등의 부재로서 널리 활용되고 있다[1]. 이때 면재는 알루미늄, 티타늄 등의 금속재 또는 유리섬유, 탄소섬유 등의 복합재가 주로 사용되며 축방향의 하중을 담당하는 역할을 한다. 코아는 목재, 폼 형태의 발포재, 하니콤 등이 주로 사용되며 전단하중을 담당하고 변형에너지를 흡수하는 역할을 한다. 이와 같은 샌드위치 복합재는 면재와 코아를 서로 접착시킨 형태로 되어 운용 중 가해질 수 있는 충격하중 등의 외적 요인에 의해 면재와 코아 사이의 층간분리, 코아의 압축파괴, 면재의 인장파괴, 코아의 전단파괴 등과 같은 손상이 쉽게 발생할 수 있다. 따라서 샌드위치 복합재를 효율적으로 구조물에 적용하기 위해서는 충격하중을 받는 샌드위치 복합재에서의 충격거동 및 충격특성의 평가에 대한 연구가 필요하다.

지금까지 샌드위치 복합재의 충격거동에 대해서는 실험적 또는 해석적 방법을 통해 많은 연구들이 진행되어 왔다. Lee 등[2]은 폼 코아의 밀도를 달리하여 제작한 샌드위치 복합재에 저속 충격하중을 가한 경우 코아의 밀도에 따른 샌드위치 복합재에서의 파손양상을 조사하였다. Caprino 등[3]은 코아의 밀도와 코아의 두께를 달리한 샌드위치 복합재에 다양한 충격에너지를 작용시킨 경우 충격에너지에 대한 손상과의 관계를 조사하고 충격후 면재에서의 잔류강도를 평가하였다. Wu 등[4]은 저속 충격하중을 받은 폼 코아 샌드위치 복합재에서의 손상 메카니즘을 조사하였다. Hiel 등[5]은 저속 충격하중을 받은 샌드위치 복합재에서의 손상판별법을 제시하고 샌드위치 복합재에서의 충격후 잔류강도를 평가하였다. Lee 등[6]은 샌드위치 복합재의 면재에 스트레인게이지를 부착함으로써 충격하중이 작용된 경우 면재에서의 변형율을 측정하였으며 또한 이들 결과들을 이용하여 다양한 충격조건에 따른 충격

거동을 조사하였다. Craft 등[7]은 코아의 밀도를 달리한 샌드위치 복합재에 저속 충격하중을 작용시킨 경우 충격에너지에 대한 손상과의 관계를 조사하였다. 이와 같은 연구들의 대부분은 충격하중을 받는 샌드위치 복합재에서의 충격거동과 손상 메카니즘에 대한 연구로서 충격하중 등의 외적 요인에 의해 쉽게 발생할 수 있는 손상을 억제하기 위한 방안에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 최근에는 샌드위치 복합재에서의 손상을 억제하기 위한 방편으로 코아의 양면에 부착된 면재들을 코아의 두께방향을 따라 스티칭함으로써 위쪽 면재와 아래쪽 면재를 서로 결합시킨 스티칭된 샌드위치 복합재의 개발이 시도되고 있다[8]. 이와 같은 형태의 샌드위치 복합재는 기존의 샌드위치 복합재와는 달리 코아와 면재들이 일체형으로 결합되어 있기 때문에 층간분리 등과 같은 손상의 발생을 억제하고 또한 손상이 발생한 경우에도 손상을 지연시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 낙하추 방식의 충격시험기를 이용한 저에너지 충격실험을 통해 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 충격거동을 조사하였다. 이를 위해 코아의 두께를 달리하여 제작한 네 종류의 스티칭된 샌드위치 복합재를 고려하였다. 특히 스티칭을 위해서는 폴리에스터 섬유를 사용하였으며 스티칭 간격은 길이방향과 폭방향을 따라 일정하게 고정하였다. 스티칭된 샌드위치 복합재에 충격에너지를 가하기 위해서는 낙하추의 질량과 낙하추의 낙하높이를 조절하였으며 충격실험을 통해 샌드위치 복합재에서의 충격하중, 낙하추와의 접촉시간, 면재에 형성된 변형을 등의 정보를 수집하였다. 또한 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 스티칭 효과를 조사하기 위해서는 기존의 샌드위치 복합재와 스티칭된 샌드위치 복합재에 각각 동일한 충격에너지를 가하여 얻은 충격특성을 서로 비교하였다. 아울러 충격실험의 결과를 통해 스티칭된 샌드위치 복합재의 제작시 발생할 수 있는 문제점을 지적하였다.

## 2. 스티칭된 샌드위치 복합재의 형상

스티칭된 샌드위치 복합재는 우레탄 폼으로 된 코아와 유리섬유직물로 된 면재로 구성되어 있으며 위쪽 면재와 아래쪽 면재는 코아의 두께방향을 따라 폴리에스터 섬유를 이용하여 스티칭함으로써 일체형으로 결합되어 있다. 스티칭된 샌드위치 복합재는 (주)한국화이버에서 규정된 절차에 따라 제작하였으며 제작공정을 간략히 소개하면 다음과 같다.

원하는 크기로 준비된 우레탄 폼 코아의 양면을 유리섬유직물로 덮는다. 코아의 양면에 덮인 유리섬유직물을 코아의 두께방향을 따라 특수제봉기를 이용하여 스티칭함으로써 일체형으로 만든다. 이때 스티칭에 사용되는 바늘의 직경은 폴리에스터 섬유다발보다 충분히 크게 하여 성형시 추출되는 과잉의 수지가 폴리에스터 섬유에 쉽게 함침되도록 한다. 수지가 함침된 유리섬유직물을 스티칭된 유리섬유직물의 최외층에 원하는 두께만큼 적층하고 이를 프레스로 가열/가압시킨다. 이때 온도는 3~4℃/min으로 120℃까지 상승시켜 90분간을 유지한 후 다시 4℃/min으로 냉각시킨다. 이와 같은 제작절차를 거치면 두께방향을 따라 스티칭된 샌드위치 복합재를 얻을 수 있다.

그림 1에는 두께방향으로의 스티칭 효과를 쉽게 구분할 수 있도록 코아를 제거시킨 후의 스티칭된 샌드위치 복합재 형상이 나타나 있으며 표 1과 표 2에는 각각 실험을 통해 평가된 면재와 코아의 기계적 특성이 나타나 있다. 특히 스티칭된 샌드위치 복합재의 경우 시편의 형상에 대한 표준화된 규정은 현재까지 제시된 바가 없지만 시편의 자유단이 스티칭부에 영향을 주지 않도록 길이가 400mm, 폭이 75mm인 보 형태를 취하였다. 이때 면재의 두께는 1.7mm로 고정하였으며 코아의 두께는 23mm, 37mm, 48mm, 61mm인

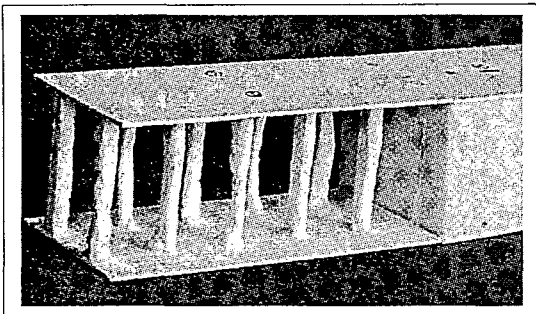


Fig. 1. Configuration of stitched sandwich composite

Table 1. Material properties for face material

	unit	direction	
		length-wise	width-wise
tensile modulus	GPa	26.7	16.4
tensile strength	MPa	371	163
compressive modulus	GPa	28.4	20.8
compressive strength	MPa	438	217
bending modulus	GPa	24.1	12.4
bending strength	MPa	273	81
shear modulus	GPa	4.1	4.2
shear strength	MPa	52	43

Table 2. Compressive properties for core material

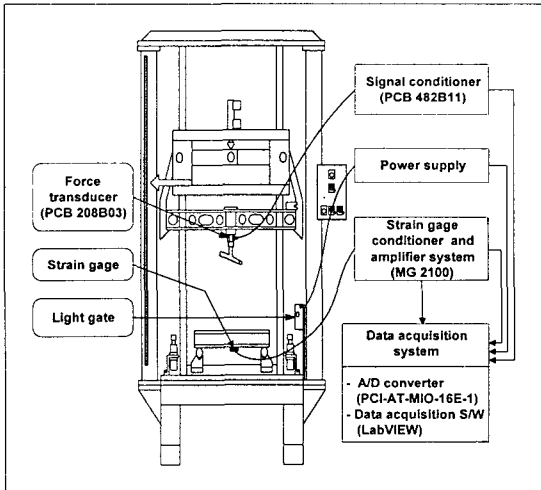
	-	unit	direction		
			thickness-wise	width-wise	length-wise
pure core	modulus	MPa	7.1	4.3	4.5
	strength	MPa	0.32	0.22	0.21
stitched core	modulus	MPa	19.7	5.6	3.5
	strength	MPa	0.67	0.25	0.21

네 종류를 고려하였다. 또한 스티칭 간격은 길이방향을 따라 30mm, 폭방향을 따라 40mm로 일정하게 고정시켰다.

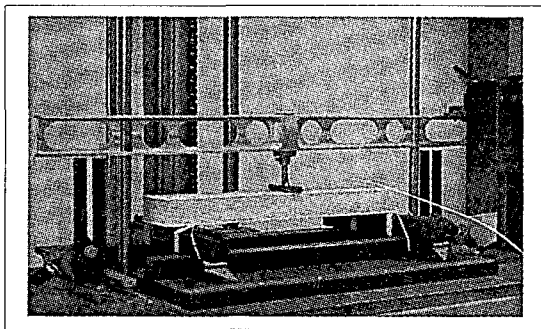
## 3. 충격실험

### 3.1 실험장치

본 연구에서는 스티칭된 샌드위치 복합재의 저에너지 충격특성을 평가하기 위해 그림 2와 같은 낙하추 방식의 충격시험기를 사용하였다. 스티칭된 샌드위치 복합재에 비교적 낮은 충격에너지를 가하기 위해서는 충격시험기의 낙하추 질량을 가능한 최소화시켜야 한다. 이와 같은 조건을 충족시키기 위한 낙하추는 비교적 복잡한 형상을 가지게 되며 사용재질로는 알루미늄 합금을 적용하였다. 낙하추는 최대 1500mm의 낙하높이를 가지고 베어링 강으로 만들어진 두 개의 지지봉을 따라 낙하되며 낙하추의 상단중앙부에는 질량조절추를 장착하여 낙하추의 질량을 조절할 수 있도록 하였다. 또한 충격시험기의 상단에는 공압시스템을 부착하여 필요시 낙하추를 가속시킴으로써 넓은 범위의 충격에너지를 얻을 수 있도록 하였다. 낙하추의 중앙하단부에 장착되어 샌드위치 복합재에 충격에너지를 가해



(a) Schematic diagram of drop weight impact tester



(b) Test fixture with stitched sandwich composite

Fig. 2. Overview of drop weight impact tester and its test fixture

주는 충격체는 강으로 제작하였으며 직경이 10mm인 실린더형으로 되어 있다.

샌드위치 복합재에서의 충격하중을 측정하기 위해서 낙하추와 충격체와의 연결부에 압전 방식의 충격하중 센서 (208B03, PCB)를 장착하였으며 하중센서에서 출력되는 전하량은 신호증폭기 (482B11, PCB)를 이용하여 전압으로 변환하였다. 일반적으로 낙하추의 낙하속도는 낙하추의 낙하높이를 알면 예측이 가능하지만 본 연구에서는 낙하추와 지지봉과의 마찰력을 고려한 정확한 낙하속도를 얻기 위해서 광차단 방식의 발광 다이오드와 수광 다이오드로 구성된 속도센서를 장착하였다. 낙하추의 낙하속도는 충격체가 샌드위치 복합재와 접촉되는 순간을 기준하였으며 샌드위치 복합재에서의 충격속도와 반발속도는 낙하추에 부착된 슬

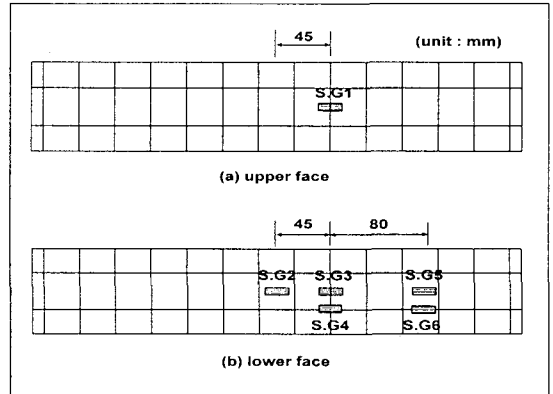


Fig. 3. Strain gage placements for stitched sandwich composite

릿의 통과시간을 측정하여 결정하였다. 스티칭된 샌드위치 복합재에 충격하중이 작용된 경우 면재에 형성된 변형율은 위쪽 면재와 아래쪽 면재에 6개의 스트레인 게이지 (KFG-5-120-C1-11, Kyowa)를 부착하여 측정하였다. 그림 3에는 스티칭된 샌드위치 복합재에 부착된 스트레인게이지의 위치가 나타나 있다.

충격거동을 조사하기 위해서는 샌드위치 복합재에서의 충격하중, 낙하추의 낙하속도, 낙하추와의 접촉시간, 면재에 형성된 변형율 등의 정보들이 필요하다. 이들 정보들은 A/D 변환기 (PCI-MIO-16E-1, National Instruments)가 장착된 컴퓨터로 입력하였으며 충격 특성의 평가를 위해서는 LabVIEW (National Instruments)를 이용하여 자체적으로 제작된 충격결과 분석용 프로그램을 적용하였다. 특히 자료수집을 위해서는 40,000samples/sec의 자료수집율을 적용하였다.

### 3.2 실험조건

스티칭된 샌드위치 복합재의 충격거동을 조사하기 위해 낙하추의 낙하높이와 낙하추의 질량을 적절하게 조절함으로써 다양한 충격에너지를 가하였다. 일반적으로 작용된 충격에너지에 의해 스티칭된 샌드위치 복합재가 손상되지 않은 경우에는 동일한 크기의 충격에너지를 반복해 작용하더라도 충격특성에는 큰 영향을 미치지 않는다[9]. 스티칭된 샌드위치 복합재에 손상을 유발시키지 않을 정도의 충격에너지를 가하기 위해서 충격체의 끝단이 면재와 접촉하는 순간을 기준으로 100mm, 150mm, 200mm, 250mm인 낙하추의 낙하높이를 적용하고 낙하추의 질량은 1.02kg, 1.44kg,

1.68kg, 1.92kg를 적용하였으며 이와 같은 충격조건을 통해서는 1.0~4.7J 범위의 충격에너지를 가할 수 있다. 또한 스티칭된 샌드위치 복합재의 파단시 충격하중을 평가하기 위해서는 낙하추의 낙하높이는 1200mm이고 낙하추의 질량은 2.16kg로 고정하였으며 이와 같은 충격조건을 통해서는 25.4J의 충격에너지를 가할 수 있다.

충격특성 평가에 적용된 스티칭된 샌드위치 복합재는 그림 2(b)에서와 같이 양단이 단순지지되어 있으며 충격하중은 시편중앙부에 작용되는 경우를 고려하였다. 특히 충격하중이 작용되는 경우에는 스티칭된 샌드위치 복합재가 시험치구에서 반발되지 않도록 시험치구와 접하는 시편의 양단지지부는 고무밴드로 고정시켰으며 스펠은 코아의 두께와 무관하게 340mm를 적용하였다.

**3.3 자료분석방법**

일반적으로 충격시험장치를 이용하여 구조재의 충격특성을 평가하는 경우 충격하중센서를 통해 얻어지는 충격신호는 구조재의 동특성 뿐 만 아니라 낙하추의 동특성을 포함하게 된다. 본 연구에서는 충격신호에서 낙하추의 동특성 영향을 제거하기 위하여 충격햄머를 이용하여 얻은 구조재와 낙하추에서의 주파수 응답특성과 필터링 신호분석기법을 적용하였다.

낙하추에 의해 스티칭된 샌드위치 복합재에 충격에너지가 가해지는 경우 운동방정식은 식(1)과 같이 나타난다.

$$ma = mg - F \tag{1}$$

여기에서 m은 낙하추의 질량, a는 낙하추의 가속도, g는 중력가속도, F는 충격하중센서에서 얻어진 하중신호이다.

낙하추의 속도는 식(1)에서 나타난 낙하추의 가속도와 속도센서에서 얻어진 충격속도를 이용하면 식(2)와 같이 나타난다.

$$v_i = v_{i-1} + \frac{(a_{i-1} + a_i)}{2} (t_i - t_{i-1}) \tag{2}$$

여기에서  $v_{i-1}$ ,  $a_{i-1}$ 는 각각 시간  $t_{i-1}$ 에서의 속도와 가속도,  $v_i$ ,  $a_i$ 는 각각 시간  $t_i$ 에서의 속도와 가속도이다. 낙하추의 변위는 식(2)에 나타난 낙하추의 속도를

적분하면 얻을 수 있으며 식(3)과 같이 나타난다.

$$s_i = s_{i-1} + \frac{(v_{i-1} + v_i)}{2} (t_i - t_{i-1}) \tag{3}$$

여기에서  $s_{i-1}$ 는 시간  $t_{i-1}$ 에서의 변위,  $s_i$ 는 시간  $t_i$ 에서의 변위이다.

작용된 충격에너지에 대해 시편이 흡수한 충격에너지는 식(4)와 같이 나타난다.

$$T_i = T_{i-1} + \frac{1}{2} m (v_{i-1}^2 - v_i^2) \tag{4}$$

여기에서  $T_{i-1}$ 는 시간  $t_{i-1}$ 에서의 시편이 흡수한 충격에너지,  $T_i$ 는 시간  $t_i$ 에서의 시편이 흡수한 충격에너지, m은 낙하추의 질량이다.

스티칭된 샌드위치 복합재가 낙하추에 의해 충격에너지를 받는 경우 스티칭된 샌드위치 복합재와 낙하추를 그림 4와 같이 질량-스프링 모델로 단순화시키면 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 충격하중 및 낙하추와의 접촉시간은 예측이 가능하다[10].

낙하추가 스티칭된 샌드위치 복합재에 충격될 때의 초기속도를 알고 낙하추가 충격후에도 스티칭된 샌드위치 복합재와 접촉하여 운동한다고 가정하면 스티칭된 샌드위치 복합재의 처짐은 운동방정식을 통해 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며 샌드위치 복합재에서의 충격하중은 후크 법칙을 적용하면 식(6)과 같이 얻을 수 있다.

$$x = V_o \sqrt{\frac{m}{k}} \sin \sqrt{\frac{k}{m}} t \tag{5}$$

$$F = V_o \sqrt{mk} \sin \sqrt{\frac{k}{m}} t \tag{6}$$

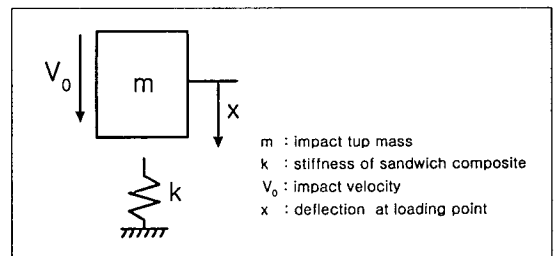


Fig. 4. Simplified mass-spring model

이때  $m$ 은 낙하추의 질량,  $k$ 는 스티칭된 샌드위치 복합재의 강성,  $V_0$ 는 충격시 낙하추의 초기속도이다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

그림 5에는 1.02kg의 질량을 갖는 낙하추를 코아의 두께가 37mm인 스티칭된 샌드위치 복합재에 떨어뜨린 경우 낙하높이에 따른 충격하중의 변화가 나타나 있다. 이때 낙하추의 낙하높이는 100mm, 150mm, 200mm, 250mm를 고려하였으며 낙하추의 낙하높이가 높을수록 충격시 낙하추의 초기속도는 증가하여 샌드위치 복합재에 작용되는 충격에너지는 높아진다. 본 연구에서는 시편의 변화에 대한 영향을 최소화하기 위해서 동일한 시편에 대해 각각 1.0J, 1.5J, 2.0J, 2.5J의 충격에너지를 가하여 3-4회 반복 실험을 수행하였다. 보 형태의 밀도가 낮은 폼 코아 샌드위치 복합재가 충격에너지에 의해 손상이 발생할 경우 코아의 전단 파괴, 코아/면재 접촉면에서의 층간분리 등이 육안으로도 쉽게 관찰할 수 있다. 또한 충격에너지를 받아 시편의 내부에 형성된 파손을 육안으로 관찰하기 어려운 경우에는 동일한 크기의 충격에너지를 다시 작용시키면 충격하중의 저하가 나타나게 된다. 그러나 본 연구에서는 주어진 충격에너지에 의해서는 육안으로 손상을 관찰할 수 없었으며 동일한 충격에너지를 작용시켜 반복 실험을 수행한 경우에도 얻어진 최대하중은 거의 일정하게 나타났다. 이로 미루어 볼 때 스티칭된 샌드위치 복합재에 작용한 2.5J 이내의 충격에너지는 손상을 발

생시키지 않음을 알 수 있다. 여기에서 보면 식(6)에 나타난 바와 같이 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 충격하중은 충격시 낙하추의 초기속도에 비례하며 낙하추의 초기속도는 낙하추 낙하높이의 제곱근에 비례하기 때문에 낙하추의 낙하높이가 높을수록 샌드위치 복합재에 가해지는 충격하중은 증가한다. 그러나 낙하추와의 접촉시간은 충격시 낙하추의 초기속도에는 무관하게 나타나며 낙하추의 낙하높이를 증가시키더라도 거의 일정한 값을 가진다.

그림 6에는 1.44kg의 질량을 갖는 낙하추를 100mm의 낙하높이에서 스티칭된 샌드위치 복합재에 떨어뜨린 경우 코아의 두께에 따른 충격하중의 변화가 나타나 있다. 이때 코아의 두께는 23mm, 37mm, 48mm, 61mm를 고려하였다. 일반적으로 샌드위치 복합재의 강성은 코아가 두꺼울수록 증가하며 이는 샌드위치 복합재에서의 충격하중과 낙하추와의 접촉시간에 영향을 미치게 된다. 특히 낙하추의 낙하높이와 낙하추의 질량이 일정한 경우 코아의 두께가 클수록 스티칭된 샌드위치 복합재의 강성은 증가하여 식(6)에서와 같이 샌드위치 복합재에서의 충격하중은 높아지고 충격체와의 접촉시간은 짧아진다. 그러나 충격하중을 접촉시간에 대한 적분한 물리량으로 나타나는 충격모멘트는 동일한 충격조건을 가한 경우 코아의 두께에 무관하게 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있다.

그림 7에는 100mm의 낙하높이에서 코아의 두께가 23mm인 스티칭된 샌드위치 복합재에 낙하추를 떨어뜨린 경우 낙하추의 질량에 따른 충격하중의 변화가 나타나 있다. 이때 낙하추의 질량은 1.02kg, 1.44kg,

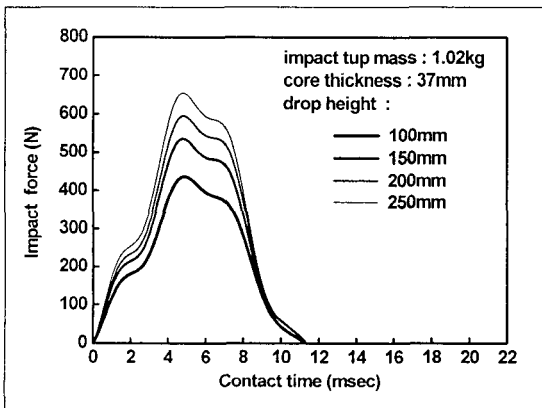


Fig. 5. Curves of impact force vs. contact time for various drop heights

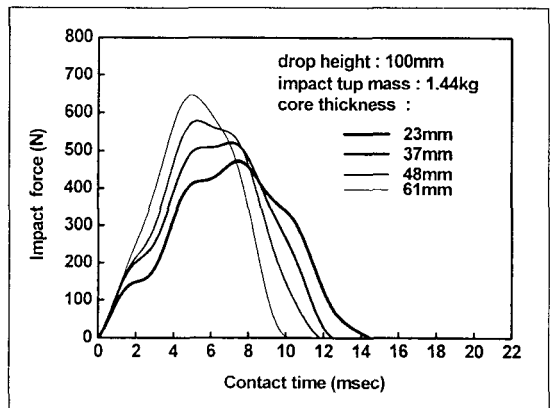


Fig. 6. Curves of impact force vs. contact time for various core thicknesses

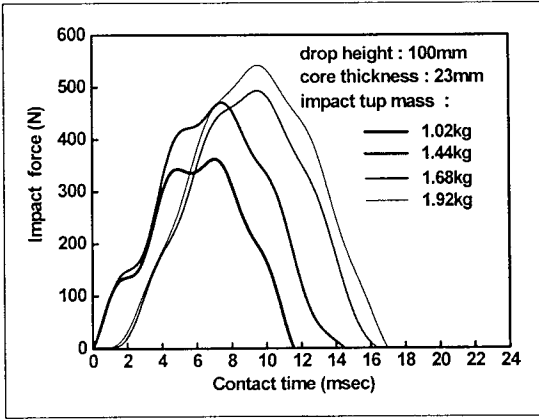


Fig. 7. Curves of impact force vs. contact time for various impact tup masses

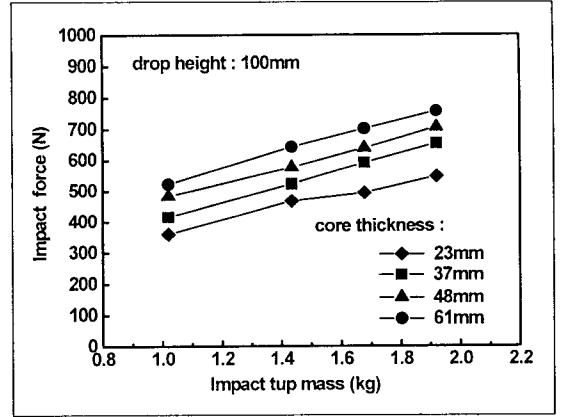


Fig. 8. Variations of impact force having varied with impact tup mass and core thickness

1.68kg, 1.92kg을 고려하였다. 일반적으로 낙하추의 질량을 변화시키면 그림 6에서와 같이 코아의 두께를 변화시킨 경우와 마찬가지로 샌드위치 복합재에서의 충격하중과 낙하추와의 접촉시간에 영향을 미친다. 샌드위치 복합재에서의 충격하중과 낙하추와의 접촉시간은 식(6)에서와 같이 각각 낙하추 질량의 제곱근에 비례한다. 따라서 낙하추의 질량이 증가할수록 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 충격하중은 높아지고 낙하추와의 접촉시간은 길어짐을 알 수 있다.

그림 8에는 100mm의 낙하높이에서 낙하추를 스티칭된 샌드위치 복합재에 떨어뜨린 경우 낙하추의 질량과 코아의 두께에 따른 충격하중의 변화가 나타나 있다. 이때 낙하추의 질량은 1.02kg, 1.44kg, 1.68kg, 1.92kg을 고려하였고 코아의 두께는 23mm, 37mm, 48mm, 61mm를 고려하였다. 여기에서 보면 코아의 두께가 일정한 경우 낙하추의 질량이 커지면 충격에너지가 증가하여 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 충격하중은 높아진다. 특히 코아의 두께가 23mm인 경우에 대해서는 낙하추의 질량이 1.02kg일 때의 충격하중은 361N이고 낙하추의 질량이 1.92kg일 때의 충격하중은 547N으로 낙하추의 질량이 1.92kg인 경우가 낙하추의 질량이 1.02kg인 경우보다 충격하중은 52% 높게 나타난다. 코아의 두께가 61mm인 경우에 대해서는 낙하추의 질량이 1.02kg일 때의 충격하중은 523N이고 낙하추의 질량이 1.92kg일 때의 충격하중은 757N으로 낙하추의 질량이 1.92kg인 경우가 낙하추의 질량이 1.02kg인 경우보다 충격하중은 45% 높게 나타난다. 그리고 낙하추의 질량이 일정한 경우 코아의 두

께가 클수록 스티칭된 샌드위치 복합재의 강성이 증가하여 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 충격하중은 커진다. 특히 낙하추의 질량이 1.44kg인 경우에 대해서는 코아의 두께가 23mm일 때의 충격하중은 467N이고 코아의 두께가 61mm일 때의 충격하중은 643N으로 코아의 두께가 61mm인 경우가 코아의 두께가 23mm인 경우보다 충격하중은 38% 높게 나타난다. 낙하추의 질량이 1.68kg인 경우에 대해서는 코아의 두께가 23mm인 경우의 충격하중은 494N이고 코아의 두께가 61mm인 경우의 충격하중은 701N으로 코아의 두께가 61mm인 경우가 코아의 두께가 23mm인 경우에 비해 충격하중은 42% 높게 나타난다.

그림 9에는 1.02kg의 질량을 가진 낙하추를 스티칭

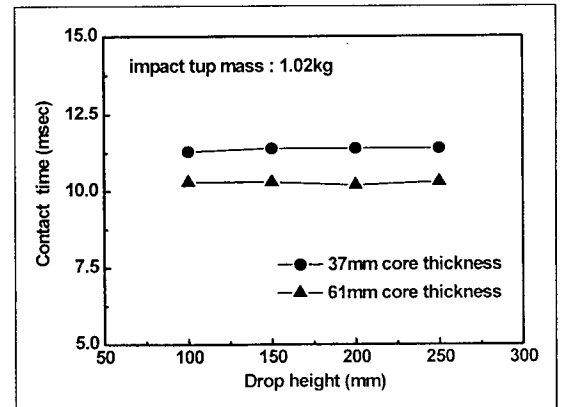


Fig. 9. Variations of contact time having varied with drop height and core thickness

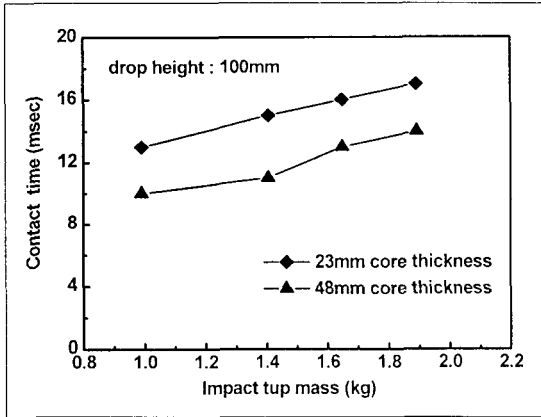


Fig. 10. Variations of contact time having varied with impact tup mass and core thickness

된 샌드위치 복합재에 떨어뜨린 경우 낙하추의 낙하높이와 코아의 두께에 따른 접촉시간의 변화가 나타나

있다. 이때 낙하추의 낙하높이는 100mm, 150mm, 200mm, 250mm를 고려하였고 코아의 두께는 37mm, 61mm를 고려하였다. 일반적으로 낙하추와의 접촉시간은 낙하추의 낙하높이에 무관하며 샌드위치 복합재의 강성과는 제공근에 반비례하는 관계를 갖기 때문에 낙하추의 낙하높이를 증가시키더라도 낙하추와의 접촉시간은 일정하며 코아가 두꺼울수록 샌드위치 복합재의 강성이 증가하여 낙하추와의 접촉시간은 짧아짐을 알 수 있다.

그림 10에는 100mm의 낙하높이에서 낙하추를 스티칭된 샌드위치 복합재에 떨어뜨린 경우 낙하추의 질량과 코아의 두께에 따른 접촉시간의 변화가 나타나 있다. 이때 낙하추의 질량은 1.02kg, 1.44kg, 1.68kg, 1.92kg을 고려하였고 코아의 두께는 23mm, 48mm를 고려하였다. 여기에서 보면 코아의 두께가 일정한 경우 낙하추의 질량을 증가시켜 스티칭된 샌드위치 복합재에 가해지는 충격에너지를 높이면 낙하추와의 접

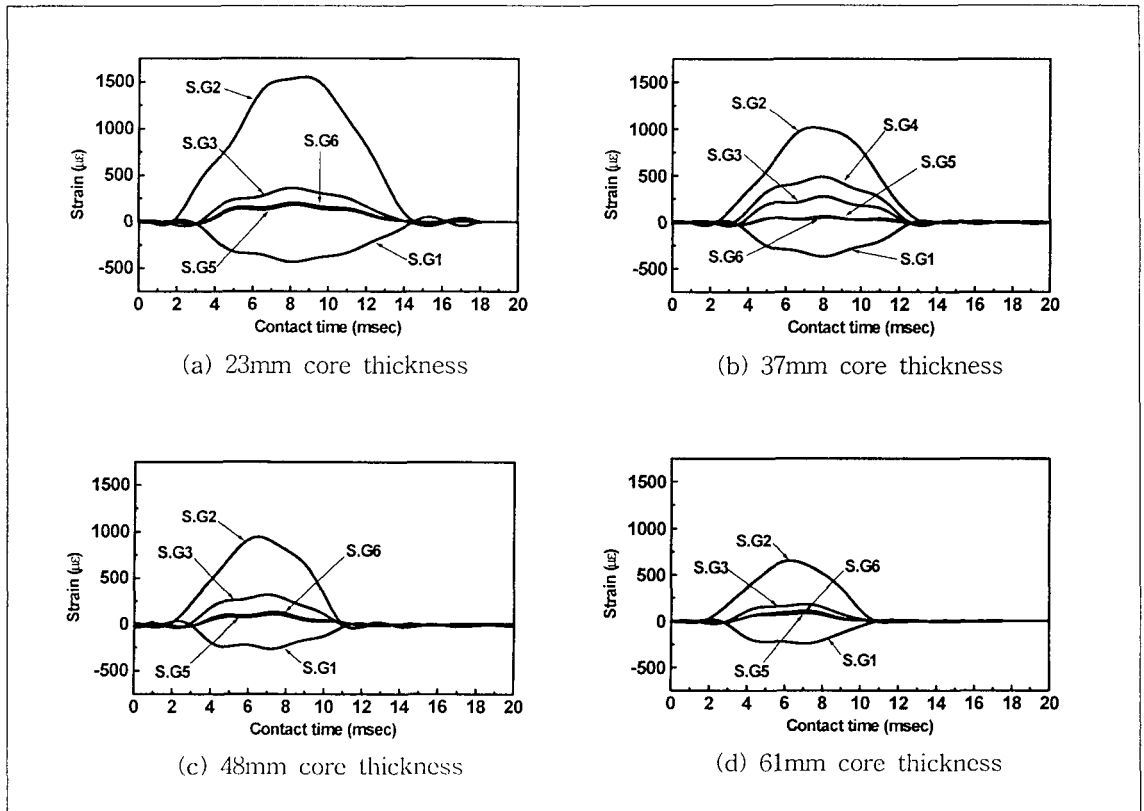


Fig. 11. Strains vs. contact time having varied with various core thicknesses



촉시간은 길어진다. 그러나 낙하추의 질량을 일정하게 적용한 경우 코아의 두께가 클수록 샌드위치 복합재의 강성은 증가하여 낙하추와의 접촉시간은 짧아짐을 알 수 있다.

그림 11에는 코아의 두께를 달리한 스티칭된 샌드위치 복합재에 낙하추를 떨어뜨린 경우 접촉시간에 따른 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 면재에 형성된 길이 방향의 변형율이 나타나 있다. 이때 낙하추의 낙하높이는 150mm이고 낙하추의 질량은 1.02kg으로 고정시켰으며 코아의 두께는 23mm, 37mm, 48mm, 61mm를 고려하였다. 여기에서 보면 스티칭된 샌드위치 복합재의 중앙부에 충격에너지를 작용시킨 경우 하중작용부에 가까울수록 높은 굽힘모멘트가 유발되어 길이방향의 변형율은 높아지지만 하중작용부에 멀어질수록 굽힘모멘트가 감소하여 길이방향의 변형율은 낮아진다. 동일한 크기의 충격에너지를 코아의 두께가 다른 스티칭된 샌드위치 복합재의 중앙부에 가한 경우 코아의 두께가 작은 스티칭된 샌드위치 복합재에서는 코아의 두께가 큰 스티칭된 샌드위치 복합재에 비해 처짐이 커지기 때문에 길이방향의 변형율은 높아진다. 스티칭된 샌드위치 복합재에서 위쪽 면재와 아래쪽 면재를 일체형으로 결합시키는 역할을 하는 스티칭부는 두께 방향으로 관통된 폴리에스터 섬유에 파잉의 수지가 함침되어 있기 때문에 위쪽 면재와 아래쪽 면재 사이에 보강기둥을 삽입한 형태로 간주할 수 있다. 이와 같은 스티칭부의 효과가 길이방향의 변형율에 미치는 영향을 조사해 보면 위쪽 면재에 형성된 변형율은 보강기둥의 효과로 인해 아래쪽 면재에 그대로 전달되어 아래쪽 면재에는 위쪽 면재에서와 크기는 같고 부호가 반대인 변형율이 형성된다. 그러나 스티칭부의 사이에서는 보강기둥의 효과를 얻지 못하고 코아 자체도 일종의 완충 역할을 하기 때문에 아래쪽 면재에는 위쪽 면재에서보다 작은 변형율이 나타난다. 특히 코아의 두께가 37mm인 스티칭된 샌드위치 복합재의 경우 스티칭부인 S.G.4에서의 변형율은 S.G.1에서의 변형율과 거의 동일하지만 스티칭부의 사이인 S.G.3에서의 변형율에 비해 높게 나타난다. 반면에 스티칭부의 사이인 S.G.5에서의 변형율은 S.G.6에서와 거의 동일한 크기를 가지며 코아의 두께를 달리한 경우에도 S.G.3에서의 변형율은 스티칭부인 S.G.1에서와 같이 코아의 두께에 무관하게 거의 대칭적으로 나타난다.

그림 12에는 기존의 샌드위치 복합재와 스티칭된 샌드위치 복합재에 각각 동일한 충격에너지를 작용한 경

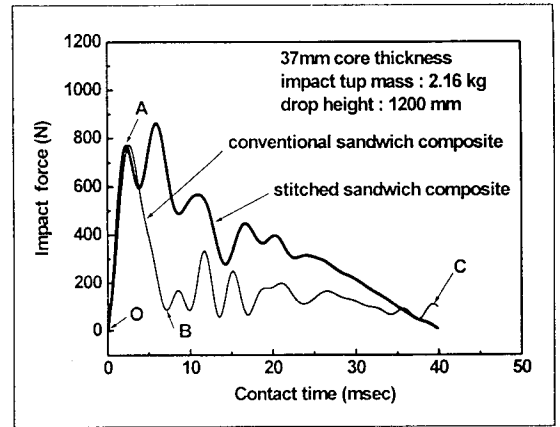


Fig. 12. Impact force vs. contact time for conventional and stitched sandwich composites

우 접촉시간에 따른 충격하중의 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 기존의 샌드위치 복합재의 경우 접촉시간에 따른 충격하중은 코아의 전단파괴가 발생하기까지 하중이 증가하는 구간 (O-A), 코아의 전단파괴로 인해 하중이 감소하는 구간 (A-B), 더 이상의 하중지지가 불가능한 구간 (B-C)으로 구분할 수 있다. 기존의 샌드위치 복합재에 코아의 전단파괴가 발생하면 하중지지능력은 거의 상실되고 면재와 코아의 접촉면을 따라 층간분리가 유발되어 구조물로서의 역할을 할 수 없다. 그러나 스티칭된 샌드위치 복합재의 경우 코아에 전단파괴가 발생하더라도 두께방향을 따른 스티칭의 효과로 인해 스티칭부가 파괴될 때까지 지속적인 하중지지가 가능하여 손상을 지연시키는 효과를 얻을 수 있다.

그림 13에는 기존의 샌드위치 복합재와 스티칭된 샌드위치 복합재에 2.16kg의 질량을 가진 낙하추를 1200mm의 낙하높이에서 떨어뜨린 경우 코아의 두께를 따른 파단하중의 변화가 나타나 있다. 이때 작용된 충격에너지는 25.4J이며 코아의 두께는 23mm, 37mm, 48mm, 61mm를 고려하였다. 여기에서 보면 코아의 두께가 23mm, 38mm, 47mm인 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 파단하중은 동일한 코아의 두께를 갖는 기존의 샌드위치 복합재의 경우보다 높게 나타난다. 그러나 코아의 두께가 61mm인 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 파단하중은 기존의 샌드위치 복합재의 경우보다 낮게 나타난다. 이에 대한 원인을 규명하기 위해서 코아의 두께가 61mm인 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 스티칭 부위를 조사하였으며 그림 14

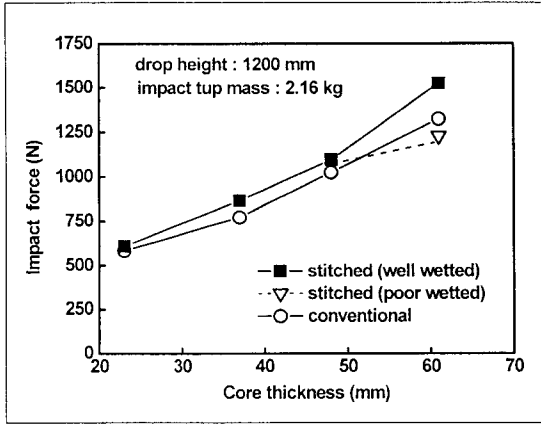


Fig. 13. Maximum impact force vs. core thickness for conventional and stitched sandwich composites

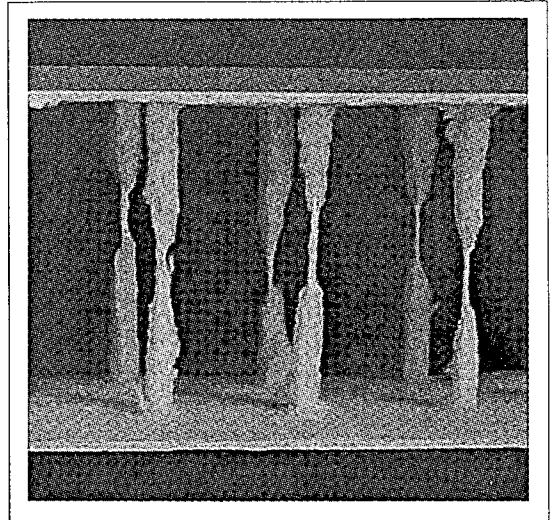


Fig. 14. Poor wetted region around stitched reinforcements

에는 코아의 두께가 61mm인 스티칭된 샌드위치 복합재에 대한 스티칭부의 형상이 나타나 있다. 여기에서 보면 스티칭부의 일부는 수지함침성이 비교적 양호하지 않음을 알 수 있으며 이러한 스티칭부는 일종의 결함으로 작용하여 충격하중을 받는 경우 비교적 낮은 충격하중에서도 쉽게 손상이 발생되게 된다. 이러한 현상은 코아의 두께가 클수록 지배적으로 나타나기 때문에 코아의 두께가 61mm인 스티칭된 샌드위치 복합재의 파단하중은 스티칭되지 않은 기존의 샌드위치 복합재의 경우보다 낮게 나타날 수 있다. 그러나 스티칭부에서의 수지함침성이 개선된 경우 스티칭된 샌드위치 복합재의 파단하중은 기존의 샌드위치 복합재나 수지함침성이 양호하지 않은 스티칭부를 갖는 스티칭된 샌드위치 복합재의 경우보다 높게 나타남을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 낙하추 방식의 충격시험기를 이용하여 저에너지 충격에너지를 스티칭된 샌드위치 복합재에 작용시킨 경우 스티칭된 샌드위치 복합재에서의 충격거동과 충격특성을 조사하였다. 이때 스티칭된 샌드위치 복합재는 유리섬유직물의 면재와 우레탄 폼의 코아로 구성되어 있으며 위쪽 면재와 아래쪽 면재는 두께방향을 따라 스티칭하여 일체형으로 결합시켰으며 스티칭 간격은 길이방향과 폭방향을 따라 일정하게 하였다. 스티칭된 샌드위치 복합재는 코아의 두께에 따라 네 종류를 고려하였으며 충격조건은 낙하추의 낙하높

이와 낙하추의 질량에 따른 다양한 경우를 고려했다. 연구결과에 따르면 스티칭된 샌드위치 복합재는 기존의 샌드위치 복합재에 비해 두께방향으로 보강효과를 얻을 수 있기 때문에 스티칭부의 파괴시까지 지속적인 하중지지가 가능하며 파단을 지연시키는 효과도 얻을 수 있다. 그러나 코아의 두께가 커지면 성형시 과잉의 수지가 스티칭부로 원활하게 함침되지 못하여 스티칭부가 일종의 결함으로 작용되며 이로 인해 낮은 충격하중에서도 비교적 쉽게 손상이 발생할 수도 있다. 따라서 스티칭된 샌드위치 복합재가 기존의 금속재 또는 복합재 구조물에 효율적으로 대체되기 위해서는 스티칭부에서의 수지함침성을 개선할 수 있는 제작공법에 대한 연구와 수지함침성이 양호한 스티칭된 샌드위치 복합재의 적용이 필수적이다.

### 후 기

본 연구는 1998년도 한국과학재단 핵심전문연구(과제번호 : 981-1003-023-2)의 연구비 지원에 의하여 수행된 결과의 일부이며 한국과학재단 및 관계자에게 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Allen, H.G., Analysis and Design of Structural Sandwich Panel, 1st Ed., Pergamon Press, Oxford, 1969.
2. Lee, Y.J. and Shyu, Y., "Low Velocity Impact Failure Analysis of Sandwich Beam", Proceedings of ICCM-11, Volume II: Fatigue, Fracture and Ceramic Matrix Composites, Gold Coast, Australia, 1997, pp.II495-II501.
3. Caprino, G. and Teti, R., "Impact and Post-impact Behavior of Foam Core Sandwich Structures", Composite Structures, Vol.29, 1994, pp.47-55.
4. Wu, C.L. and Sun, C.T., "Low Velocity Impact Failure Analysis of Sandwich Beam", Composite Structures, Vol.34, 1996, pp.21-27.
5. Hiel, C., Dittman, D., and Ishai, O., "Composite Sandwich Construction with Syntactic Foam Core - A Practical Assessment of Post-impact Damage and Residual Strength", Composites, Vol.24, 1993, pp.447-450.
6. Lee, L.J., Huang, K.Y., and Fann, Y.J., "Dynamic Responses of Composite Sandwich Plate Impacted by a Rigid Ball", Journal of Composite Materials, Vol.27, 1993, pp.1238-1256.
7. Craft, W.J., Hughes, D.R., and Kelkar, A.D., "Low Velocity Impact Damage of Organic Foam Core Sandwich Composites", Proceedings of ICCM-11, Volume II: Fatigue, Fracture and Ceramic Matrix Composites, Gold Coast, Australia, 1997, pp.II513-II521.
8. Cho, S.H., Jeong, S.T., and Jang, K.W., "Method of Manufacturing Reinforced Insulating Panel", U.S. Patent No.:5,888,329, 1999.
9. Yoon, S.H., Kwon Y.W., and Clawson, L.A., Jr., "Experimental Investigation on Low Energy Impact Behavior of Foam Cored Sandwich Composite", KSME International Journal, Vol.11, 1997, pp.136-142.
10. Mines, R.A.W., Worrall, C.M., and Gibson, A.G., "The Static and impact Behaviour of Polymer Composite Sandwich Beams", Composites, Vol.25, 1994, pp.95-110.