

## 직조된 탄소, 유리 및 케블라 섬유 복합소재 튜브의 압축하중하에서 파손 메커니즘 분석 연구

### A Study on Failure Mechanisms of Composite Tubes with Woven Fabric Carbon, Glass and Kevlar/epoxy Under Compressive Loadings

김정석<sup>†</sup> · 윤혁진\* · 이호선\* · 권태수\*

Jung-Seok Kim · Hyuk-Jin Yoon · Ho-Sun Lee · Tae-Soo Kwon

**Abstract** In this study, the failure modes and energy absorption characteristics of four different kinds of circular tubes made of carbon, glass, Kevlar and carbon-Kevlar hybrid fibres composites with epoxy resin have been evaluated. To achieve these goals, compressive tests were conducted for the tubes under 10mm/min loading speed. Based on the test results, the carbon/epoxy tube showed the best energy absorption capability, while carbon-Kevlar/epoxy tubes were worst. In the failure mode during crushing, both of the carbon/epoxy tubes and the glass/epoxy tubes were crushed by brittle fracturing mode. The Kevlar/epoxy tubes were collapsed by local buckling mode like steel, while the carbon-Kevlar hybrid tubes were collapsed by mixed mode of local buckling and lamina bending.

**Keywords** : Composite Tube, Energy absorption, Quasi-static, Failure mechanism

**요 지** 본 연구에서는 탄소, 유리, 케블라 및 탄소-케블라 하이브리드 섬유로 제작된 원형튜브를 이용하여 각 소재별 에너지 흡수특성과 파손메커니즘을 규명하였다. 이를 위해 각 튜브에 대한 10mm/min의 준정적 압축시험을 수행하였다. 시험결과 탄소섬유 튜브가 가장 에너지 흡수특성이 우수했으며 탄소-케블라 하이브리드 섬유 튜브가 가장 낮은 에너지 흡수율을 보였다. 또한, 각 소재별 에너지 흡수메커니즘을 분석한 결과 탄소 및 유리섬유튜브는 취성파괴 모드로 압축되었다. 또한, 케블라 섬유 튜브는 국부좌굴에 의한 접힘모드가 지배적이고, 탄소와 케블라 하이브리드 섬유 튜브의 경우 단층굽힘과 국부좌굴모드가 혼합되어 나타났다.

**주요어** : 복합소재 튜브, 에너지흡수, 준정적, 파손메커니즘

## 1. 서론

복합재료는 기존 금속재에 비해 비강도, 비강성, 내구성과 내식성이 우수하여 항공분야 뿐만 아니라 철도분야에서도 적용이 확대되고 있다[1-3]. 특히, 최근 국내 철도차량 분야에서는 객차, 저상버스 및 경량전철 등의 차체구조물에 탄소 및 유리섬유 복합소재가 적용되고 있다. 이러한 철도차량 차체 구조물에 적용되는 소재는 기존 항공분야에서 많이 적용되는 고가의 일방향(unidirectional)소재가 아닌 일방향 소재에 비해 다루기가 쉽고 제작이 용이한 직

물형태(woven fabric)의 복합소재가 많이 적용되고 있다. 직물복합소재는 강화섬유가 서로 직각방향으로 정렬되어 있고, 한방향의 섬유는 다른 방향 섬유의 위와 아래 방향으로 엇갈려 짜여진(interlaced) 구조를 이루고 있다. 따라서, 충격과 균열진전에 대한 저항성이 일방향 소재에 비해 우수하다.

이러한 직물 복합소재는 항공 및 자동차 분야에서 차체 구조물뿐만 아니라 충격하중을 흡수하는 구조물로도 많이 적용되고 있다. 이러한 복합소재 충격흡수구조물은 주로 원형이나 사각형의 튜브형태, 샌드위치 구조 또는 정현파형상의 구조로 되어있다. 이러한 구조물 중 튜브형태에 대한 연구가 특히 많이 진행되었다.

Thornton와 Farley 등[4-6]은 유리, 탄소, 케블라 튜브를

<sup>†</sup> 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실

E-mail : jskim@krii.re.kr

TEL : (031)460-5663 FAX : (031)460-5289

\* 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실

이용한 준정적 압축시험을 통해 유리 및 탄소섬유 튜브는 취성파괴에의 에너지를 흡수하고 케블라 섬유 튜브는 좌굴에 의해 에너지를 흡수함을 확인하였다. 또한, 에너지 흡수율을 극대화시키기 위해서는 수지의 파단변형률이 섬유의 파단변형률보다 높은 것이 유리함을 확인하였다. Warrior 등[7]은 수지의 물성에 따른 복합소재 원형튜브의 SEA를 분석하여 수지의 압축강도가 SEA와 가장 밀접한 연관성을 있음을 확인하였다. Ghasemnejad와 Hadavinia 등[8,9]은 모드 I과 II 층간파괴인성의 증가는 복합소재 튜브의 SEA의 증가와 직접적인 연관성이 있음을 확인하였다.

이상의 문헌조사를 통해 복합소재의 단위 무게당 에너지 흡수(specific energy absorption, SEA)특성은 다양한 인자에 의해 결정됨을 알 수 있었다. Fig. 1은 복합소재의 SEA에 영향을 미치는 인자들을 나타낸 것으로 소재종류, 강화섬유와 수지의 조합, 적층순서, 파손메커니즘, 하중부과판(laminate plates)과 복합소재사이 및 단층(lamina)간의 마찰계수, 흡수부재의 형상, 제작기법 및 트리거 형태 등 있다. 이 중에서 소재의 종류, 강화섬유와 수지의 조합, 적층순서 및 파손메커니즘은 독립된 변수가 아닌 서로 긴밀한 연관성을 가진 인자들이다.

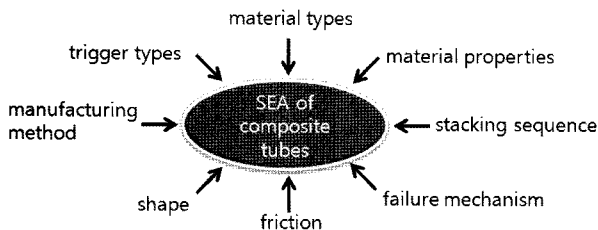


Fig. 1. Factors which have an effect on energy absorption capability of composite structures

본 연구에서는 현재 철도차량에 적용되고 있는 직물 탄소 및 유리섬유와 향후 적용이 예상되는 케블라 섬유와 탄소-케블라 하이브리드 섬유를 이용하여 원형튜브를 제작하고 준정적 압축시험을 수행하였다. 이를 통해 각 소재별 압축시 미시적/거시적 파손메커니즘을 분석하고 이러한 파손메커니즘과 에너지 흡수특성과의 연관성을 평가하였다.

## 2. 압축하중하에서 복합소재 튜브 구조물의 파손모드

### 2.1 미시적 파손모드(micro-failure modes)

압축하중하에서 복합소재 튜브의 미시적 파손모드는 아

래와 같이 크게 4가지 정도로 분류할 수 있다.

- 섬유 및 수지 파단(fiber and matrix fracture)
- 층간분리(delamination/interlaminar crack)
- 섬유-수지 분리(fiber-matrix debonding)
- 섬유의 미소좌굴 및 전단파괴(fiber microbuckling and kinking)

이러한 파손모드들은 단독으로 발생하지 않고 서로 혼합되어 발생한다.

### 2.2 거시적 파손모드(macro-failure modes)

#### 2.2.1 횡전단 모드(transverse shearing mode)

횡전단 모드는 여러개의 층간 및 축방향 균열을 갖는 썬기형태(wedge)의 적층판 단면으로 나타나며 취성 섬유(brittle fiber)에서 발생한다(Fig. 2).

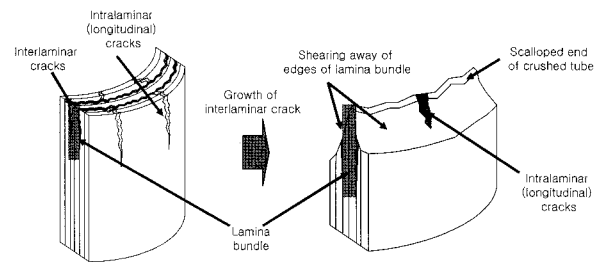


Fig. 2. Transverse shearing mode

#### 2.2.2 벌림모드(splaying mode)

매우 긴 층간, 층내균열 및 섬유방향에 평행한 균열이 발생하는 특징이 있으며 단층다발 파괴는 발생하지 않는다. 복합소재 벽이 내외부로 쪼개져서 앞모양(fron)으로 벌어지는 모드로 취성 섬유에서 발생한다(Fig. 3).

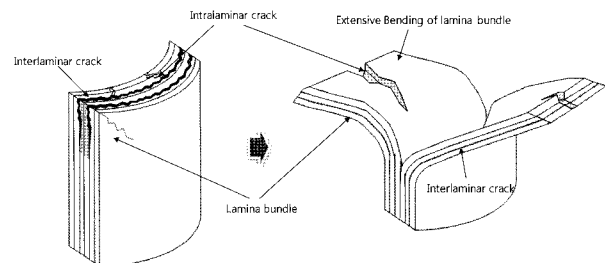


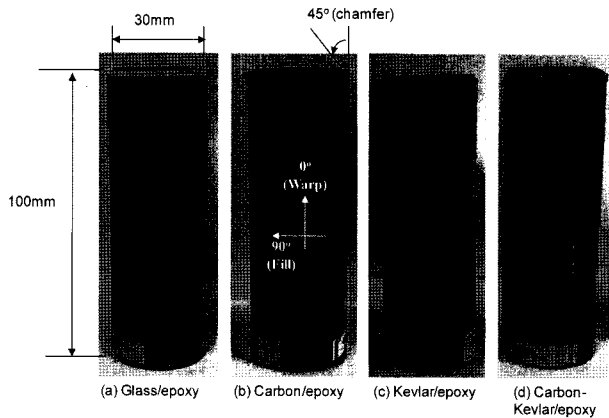
Fig. 3. Lamina bending mode

#### 2.2.3 취성파괴(brittle fracturing mode)

취성파괴는 횡전단 및 단층굽힘모드의 조합된 형태로 발생한다. 주로 취성 섬유적용시 발생한다.

**2.2.4 국부좌굴(local buckling mode) 및 점진적인 접힘(progressive folding mode)**

케블라, 다이마(dyneema) 및 스펙트라(spectra)같은 연성 섬유(ductile fiber) 적용시 발생하며 금속재와 유사한 거동을 보인다. 좌굴이 발생한 인장하중 작용부의 섬유는 갈라질 수 있으며, 국부적인 층간분리가 발생할 수 있다.



**Fig. 4.** Circular tubes made of woven fabric glass, carbon, Kevlar and carbon-Kevlar fibers

**3. 복합소재 튜브의 준정적 압축시험**

**3.1 원형튜브 제작**

본 연구에서는 직조된 탄소, 유리, 케블라 및 탄소-케블라 하이브리드 총 4종류의 소재를 이용하여 원형튜브를 제작하였다. 원형튜브의 제작과정은 먼저 직조된 프리프레그(prepreg)를 원형 금속파이프에 랩퍼(wrapper 또는 wrapping machine)를 이용하여 감고, 이를 오븐에서 성형하여 긴 복합소재 원형파이프를 제작한다. 성형조건은 분당 3.5°C로 135°C까지 온도를 올리고 135°C에서 1시간 30분 유지한 후 1시간에 걸쳐 온도를 상온까지 내렸다. 1mm의 길이로 제작된 튜브는 다이아몬드 와이어를 이용하여 습식으로 절단하여 절단후 절단면의 갈라짐을 방지하였다. 모든 튜브는 한국화이바의 R1222 에폭시 수지를 적용하였다.

원형튜브는 내경 30mm이고 길이는 100mm로 절단하여 사용하였다. 원형튜브의 이러한 치수는 튜브의 점진적(progressive)인 압괴를 유도하기 위해 설정하였다[5,6]. 또한, Fig. 4에서 알 수 있듯이 제작된 튜브의 한쪽 끝은 튜브 압축시 초기최대하중(initial peak load)을 낮추고 점진적인 파손(progressive failure)에 의한 안정적인 압괴를 유도하기 위한 트리거 장치(trigger mechanism)로 45도로 모서리를 가공하였다.

**Table 1.** Composite tube information used for the compressive tests

Materials	Stacking sequence	Ply thickness (mm)	Weight (g)
Carbon/epoxy	[fill/warp] <sub>4</sub>	0.24	27.3
Glass/epoxy	[fill/warp] <sub>4</sub>	0.23	33.6
Kevlar/epoxy	[fill/warp/fill/warp/fill/warp/fill] <sub>T</sub>	0.25	22.3
Kevlar-Carbon/epoxy	[fill(carbon)/warp(Kevlar)/fill(carbon)/warp(Kevlar)/fill(carbon)/warp(Kevlar)] <sub>T</sub>	0.22	23.2

본 연구에서 제작된 원형튜브는 모두 [fill/warp]<sub>n</sub>의 적층을 가지는데 이것은 튜브의 최외층은 원주방향(hoop direction)과 씨실(fill)방향이 일치하도록 적층됨을 의미한다. 각 소재별 단층의 두께가 다르기 때문에 적층수 및 원형튜브의 두께는 약간씩 차이가 있다. [fill/warp]<sub>n</sub>적층을 적용하여 강화섬유가 배열되고 다음 층은 튜브의 길이방향으로 배열되도록 하였다. Table 1은 각 소재별 적층순서, 단층 두께 및 각 튜브의 평균적인 무게를 나타낸 것이다. Table 2는 복합소재 튜브에 적용된 4가지 소재에 대한 층간전단강도(ILSS) 및 모우드 I 층간파괴인성치를 나타낸 것이다.

**Table 2.** ILSS and fracture toughness of materials used in this study

Materials	Carbon	Glass	Kevlar	Kevlar-Carbon
ILSS(MPa)	66.7	65.3	43.1	51.9
G <sub>IC</sub> (J/mm <sup>2</sup> )	971	964.1	423.3	670.2

**3.2 압축시험**

본 연구에서 수행된 준정적 압축시험은 100kN 용량의 유압식 만능시험기를 이용하였다. 원형튜브를 압축하기 위한 상하 하중판(load platens)은 시험전에 평형을 확인하였다. 그리고 모든 튜브는 10mm/min의 속도로 압축되었다. 시험시 하중과 크로스헤드의 변위를 기록하였으며 각 소재별 5개의 튜브를 시험하여 결과를 평균하였다.

**4. 결과분석**

**4.1 하중-변위선도**

일반적으로 취성거동을 보이는 복합소재 튜브의 압축시 하중-변위선도는 Fig. 8과 같이 3구간으로 구분할 수 있는데 첫 번째 탄성구간(elastic stage)에서는 튜브가 압

축하중을 지지하면서 하중이 최대하중까지 증가되는 영역을 의미한다. 두 번째는 초기최대하중 이후 튜브에서 발생한 층간/층내균열의 점진적인 진전 및 단층급힘이 발생하여 실질적으로 대부분의 에너지를 흡수하는 영역인 점진적인 파손영역(progressive failure stage)이다. 마지막으로, 점진적인 파손영역에서 발생한 복합소재 튜브의 파편(debris)과 내부로 말려들어가는 인구조(frond)가 튜브내부에 쌓여서 하중이 급격히 증가하는 쌓임영역(stacking stage)으로 구분된다. 본 시험에서 약 3~4mm 압축지점까지 탄성영역이었고 약 70mm 압축시 탄소 및 유리섬유 튜브에서 쌓임영역이 시작되었다. 케블라와 탄소-케블라 하이브리드 튜브는 취성파괴가 아닌 좌굴에 의한 접힘모드로 압축되기 때문에 튜브 벽면이 점진적으로 접히면서 더 이상 접히지 않는 약 80mm부분에서 하중이 급격히 증가하였다.

Fig. 5에서 초기최대하중(트리거부의 압축강도)은 탄소 섬유 튜브가 약 30.6kN으로 가장 높았고 탄소-케블라 하이브리드 튜브가 약 16.9kN으로 가장 낮았다. 모든 튜브에서 초기최대하중까지 거의 선형적으로 하중이 증가하였으며 탄소 튜브를 제외한 나머지 튜브의 경우 하중이 급격히 감소했다. 탄소섬유 튜브의 경우 초기최대하중이후에도 하중이 급격히 감소하지 않고 점진적으로 감소하였다.

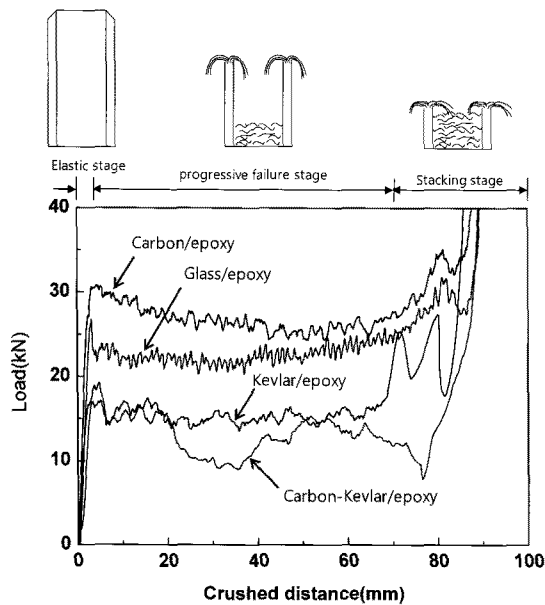


Fig. 5. Load-crushed distance curves for different composites

#### 4.2 단위무게당 흡수에너지

본 연구에서는 복합소재 원형튜브의 압축시험을 통해 얻어진 하중-변위선도를 이용하여 각 소재별 에너지 흡수 특성을 구하였다. 특히, 소재별 에너지 흡수특성을 평가하기

위해 단위무게당 흡수에너지(SEA)를 계산하여 비교하였다. 이때 단위무게당 흡수에너지는 식 (1)과 같이 튜브전체 길이에서 흡수에 기여한 무게(crushed weight)만을 고려하였다.

$$SEA = \frac{E_{abs}}{W_{total} \frac{L_c}{L_t}} = \frac{\int_0^{L_c} Fd\delta}{W_{total} \frac{L_c}{L_t}} \quad (1)$$

여기서  $E_{abs}$ 는 총 흡수된 에너지,  $W_{total}$ 는 원형튜브의 전체 무게,  $P$ 는 압축하중,  $\delta$ 는 압축변위,  $L_c$ 는 압축된 거리(에너지 흡수에 기여한 거리),  $L_t$ 는 튜브의 총길이를 의미한다. 단위무게당 흡수에너지는 탄소튜브가 약 98.0kJ/kg로 가장 높았고, 탄소-케블라 하이브리드 튜브가 약 54.5kJ/kg로 가장 낮았다.

#### 4.3 에너지 흡수과정 및 거시적 파손메커니즘

Fig. 6-7은 탄소 및 탄소-케블라 튜브가 60mm 압축지점과 시험종료 후 튜브의 형상을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 탄소섬유 튜브의 거시적 파손메커니즘은 취성파괴모드였다. 압축하중이 부과되면서 튜브벽면에 중앙부 균열이 발생하여 진전하고 압축하중에 의해 유발되는 원형튜브 원주방향 인장응력(hoop tensile stress,  $\sigma_h$ )에 의해 튜브의 길이방향으로 찢어짐(axial splitting)이 발생하여 진전하였다. 이러한 거동은 유리섬유 튜브에서도 거의 동일하게 나타났다.

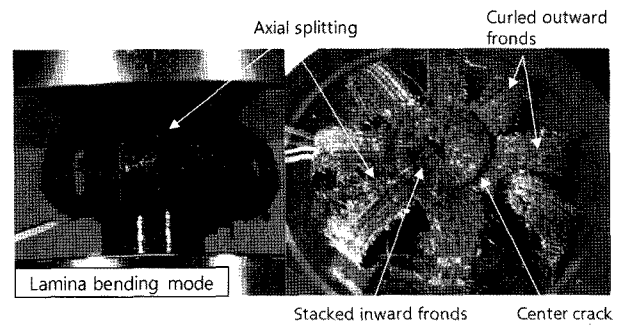


Fig. 6. Crush process of carbon/epoxy tubes.

케블라 섬유 튜브의 경우 기존 문헌들의 결과와 유사하게 국부좌굴에 의한 점진적인 접힘 거동을 보였다. 탄소-케블라 하이브리드 섬유 튜브의 경우 날살(warp)방향으로 탄소섬유가 씨실(fill)방향으로 케블라 섬유로 직조되어 있다. 그리고 튜브의 최외층은 탄소섬유가 원주방향으로 케블라 섬유가 길이방향으로 배열되어 있다. 탄소-케블라 하이브리드 섬유 튜브의 경우 Fig. 7과 같이 초기 약 15mm

까지는 탄소섬유 튜브와 유사한 단층굽힘 거동을 보이다가 15mm 이후에는 케블라 섬유와 유사한 국부좌굴거동을 보였다.

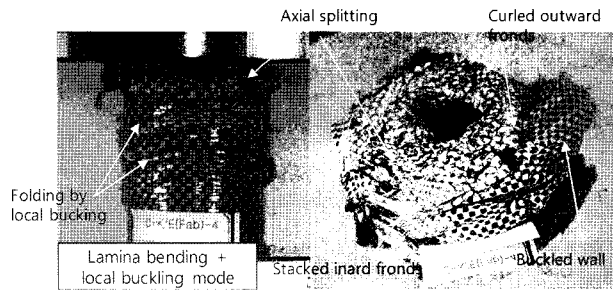


Fig. 7. Crush process of carbon-Kevlar/epoxy tubes

이것은 탄소-케블라의 하이브리드 효과와 트리거에 의한 것으로 판단된다. 그 이유는 트리거 없는 상태로 시험한 경우 탄소-케블라 튜브는 모두 국부좌굴모드로 압축되었다. 이러한 경향은 Farley[6]의 연구결과와도 잘 일치하였다. 그러나, 본 연구에서와 같이 튜브 끝단에 트리거부를 가공할 경우에는 단층굽힘과 좌굴모드가 혼합된 모드가 발생하였다. 이것은 트리거부가 원주방향 인장응력에 대한 저항성이 약하여 튜브의 길이방향으로 찢어짐이 먼저 발생하고, 이후 Table 2에서 알 수 있듯이 탄소 및 유리섬유 튜브에 비해 낮은 층간물성에 의해 중앙부 균열이 급격히 진전하면서 내외부 벽면이 좌굴되었다.

#### 4.4 미시적 파손메커니즘

Fig. 8은 탄소 섬유 튜브의 주요부위에 대한 파단면을 SEM으로 촬영한 것이다. ①번 부위는 튜브벽면의 중앙부 균열진전부로 Fig. 8에서 알 수 있듯이 모드 I 균열진전에 의해 섬유/수지 분리(debonding)가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 수지와 분리된 섬유의 표면에는 수지의 일부가 남아있는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 수지와 섬유간의 접촉강도가 우수함을 의미한다. 또한, ②번 부위는 단층다발이 굽힘하중을 받으면서 모드 II 층간파괴가 발생하여 단층간에 마찰이 발생하는 부위이다. 수직응력에 의한 수지의 벽계현상(cleavage)과 전단응력에 의한 수지의 해클(hackle)이 발생하였고, 모드 II 시험에서는 잘 관찰되지 않는 섬유파단도 자주 관찰되었다. 그 이유는 이 부분이 하중판에 의해 굽힘하중을 받기 때문이다. ③번의 경우 단층다발의 끝단으로 초기 트리거가 존재했던 부분이다. 이 부분에서는 광범위한 섬유파단이 관찰되었다. 이러한 섬유의 파단은 에너지 흡수특성 향상에 많은 기여를 한 것으로 판단된다. 유리섬유 튜브의 경우에도 유사한 파단면을 형성하였다.

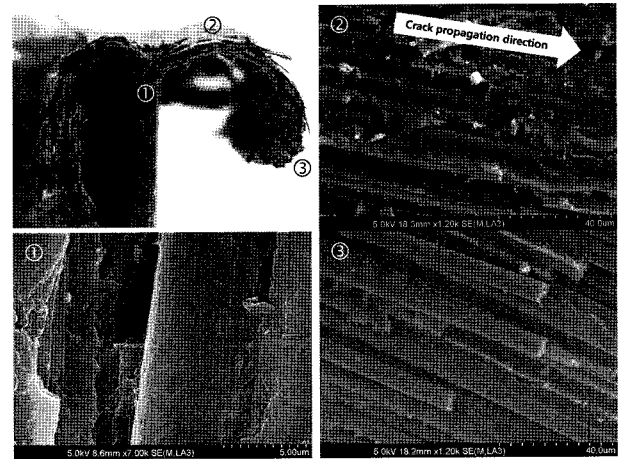


Fig. 8. Fracture surfaces of carbon/epoxy tube (① Mode I failure region, ② Mode II failure region, ③ end of fronds).

Table 3. Summary of composite tube tests.

Materials	Total absorbed energy (kJ)	SEA (kJ/kg)	Micro failure mode	Macro failure mode
Carbon/epoxy	2.23	98.0	Interlaminar crack, fiber breakage	Brittle fracturing
Glass/epoxy	1.98	69.0	Interlaminar crack, fiber breakage	Brittle fracturing
Kevlar/epoxy	1.29	71.1	Fiber buckling	Local buckling
Carbon-Kevlar/epoxy	1.06	54.5	Interlaminar crack, fiber buckling	Lamina bending + Local buckling

Table 3은 이상의 4가지 복합소재 원형튜브에 대한 시험 결과를 요약한 것으로 소재별 총흡수에너지, 단위무게당 에너지 흡수량, 미시적 및 거시적 파손모드를 분석한 것이다. 취성 파손모드로 파손되는 탄소섬유 튜브가 총 흡수에너지(total absorbed energy) 및 SEA관점에 가장 우수한 것으로 나타났으며, 탄소-케블라 섬유 튜브가 가장 낮은 에너지 흡수 특성을 보였다. 유리섬유 튜브의 경우 총 흡수에너지는 탄소섬유 다음으로 많으나 유리섬유 튜브의 무게가 케블라에 비해 약 1.5배 이상 크기 때문에 SEA는 케블라 섬유 튜브에 비해 약간 낮다.

Fig. 9는 Table 2에서 제시된 층간전단강도와 층간파괴 인성을 총 흡수에너지와 연관성을 확인하기 위해 선형회귀분석(linear regression analysis)을 수행한 결과이다. 시험결과를 통해 복합소재 원형튜브가 압축하중을 받을 때 아래와 같은 두 가지의 층간균열이 발생함을 확인할 수 있었다.

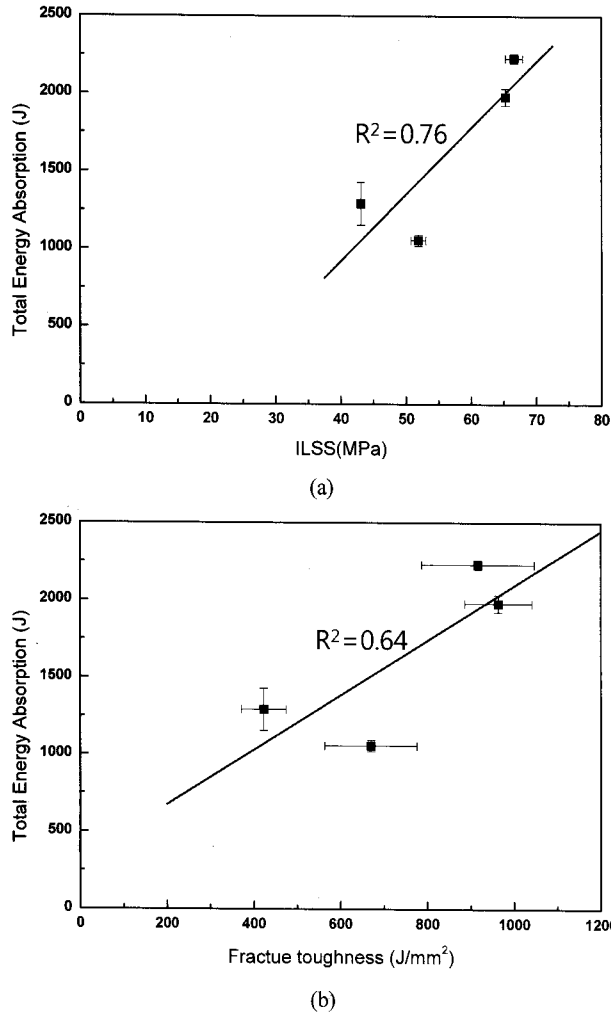


Fig. 9. Relationships between interlaminar material properties and TEA: (a) ILSS vs TEA, (b) Fracture toughness vs TEA

- 모드 I 균열 : 튜브벽면 따라 진행되는 중앙부 균열
- 모드 II 균열 :
  - 취성파괴모드로 압축되는 탄소 및 유리섬유 튜브에서 단층다발이 하중판에 의해 튜브의 내외부로 굽혀지면서 발생하는 층간균열
  - 좌굴모드로 압축되는 케블라 및 탄소-케블라 섬유 튜브에서 튜브벽면이 접히면서 발생하는 층간균열

이러한 층간균열의 발생과 진전거동은 복합소재 튜브의 에너지 흡수특성에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[8-9]. Fig. 9에서 알 수 있듯이 본 연구의 경우에도 총 흡수에너지는 층간전단강도 및 모드 I 층간파괴인성,  $G_{IC}$ 와 회귀계수의 제곱(square of regression coefficient),  $R^2$ 가 각각 0.76과 0.64로 꽤 연관성이 있음을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 국내 철도차량분야에 적용되고 있거나 적용가능한 소재에 대한 에너지 흡수특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 탄소섬유 튜브가 가장 우수한 무게당 에너지 흡수특성을 보였고 케블라, 유리 및 탄소-케블라 하이브리드 섬유 순이었다.
2. 탄소와 유리섬유 튜브는 취성파괴모드가 지배적이었고, 케블라 섬유의 경우 국부좌굴에 의한 접힘모드가 지배적이었다. 그러나, 탄소와 케블라 하이브리드 섬유 튜브의 경우 단층굽힘과 국부좌굴모드가 혼합되어 나타났다.
3. 파단면 관찰을 통해 취성섬유의 경우 층간파괴와 섬유 파단이 지배적인 미시적 파손메커니즘임을 확인하였다.
4. 선형회귀분석을 통해 각 튜브소재의 층간물성과 총 흡수에너지는 상당한 연관성이 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 산업기술연구회에서 지원한 일반 연구사업 “복합소재의 철도차량 적용에 관한 연구”의 일부입니다. 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김정석, 정종철, 한정우, 이상진, 김승철, 서승일(2006), “한국형 텀팅열차용 복합재 차체의 하중적재에 따른 구조적 특성고찰,” 한국철도학회지, 제9권 제3호, pp. 251-256.
2. Kim, J. S. and Cheong, S. K.(2007), “A Study on the Low Velocity Impact Response of Laminates for Composite Railway Bodysells,” Composite Structures, Vol. 77, pp. 484-492.
3. Kim, J. S., Cheong, J. C. and Lee, S. J.(2008), “Numerical and Experimental Studies on the Deformational Behavior of a Composite Train Carbody of the Korean Tilting Train,” Composite Structures, Vol. 81, pp. 225-241.
4. Thornton, P. H. and Edwards, P. J.(1982), “Energy Absorption in Composite Tubes,” Journal of Composite Materials, Vol. 16, November, pp. 521-544.
5. Farley, Gary L.(1983), “Energy Absorption of Composite Materials,” Journal of Composite Materials, Vol. 17, May, pp. 267-279.
6. Farley, Gary L., Bird, Richard K., and Modlin, John T.(1989), “The Role of Fiber and Matrix in Crash Energy Absorption of Composite Materials,” Journal of the American Helicopter Society, April, pp. 52-58.
7. Warrior, N. A., Turner, T. A., Cooper, E. and Ribeaux, M.

- (2008), "Effects of Boundary Conditions on the Energy Absorption of Thin-walled Polymer Composite Tubes Under axial Crushing," *Thin-Walled Structures* Vol. 46, pp. 905-913.
8. Ghasemnejad, H., Blackman, B. R. K., Hadavinia, H., and Sudall, B.(2009), "Experimental Studies on Fracture Characterizations and Energy Absorption of GFRP Composite Box Structures," *Composite Structures* Vol. 88 ,pp. 253-261.
9. Hadavinia, H. and Ghasemnejad, H.(2009), "Effects of Mode-I and Mode-II Interlaminar Fracture Toughness on the Energy Absorption of CFRP Twill/weave Composite Box Sections," *Composite Structures* Vol. 89, pp. 303-314.
- 접수일(2009년 6월 8일), 수정일(2009년 6월 30일),  
게재확정일(2009년 8월 7일)