論文

강화섬유에 따른 준정적 하중하에서 복합소재 원형튜브의 에너지 흡수특성 평가 연구

김정석*+, 윤혁진*, 이호선*, 최경훈**

Effects of Reinforced Fibers on Energy Absorption Characteristics under Quasi-static Compressive Loading of Composite Circular Tubes

Jung-Seok Kim*+, Huk-Jin Yoon*, Ho-Sun Lee*, Kyung Hoon Choi**

ABSTRACT

In this study, the energy absorption capabilities and failure modes of four different kinds of circular tubes made of carbon, Kevlar and carbon-Kevlar hybrid composites with epoxy resin have been evaluated. In order to achieve these goals, these tubes were fabricated with unidirectional prepregs and compressive tests were conducted for the tubes under 10mm/min loading speed. From the test results, carbon/epoxy tubes were collapsed by brittle fracturing mode and showed the best energy absorption capabilities, while Kevlar/epoxy tubes were crushed by local buckling mode and worst. The hybrid [$90_C/0_K$] tubes were failed in a local bucking mode and showed good post crushing integrity, whereas [$90_K/0_C$] tubes were failed in a lamina bending mode and bad post crushing integrity.

초 록

본 연구에서는 탄소, 케블라 및 탄소-케블라 하이브리드 등 4가지 소재로 제작된 원형튜브시편에 대한 에너지 흡수능력 및 파손모드를 평가하였다. 이를 위해, 본 연구에서 일방향 프리프레그를 이용해서 원형튜브 제작하고 10mm/min의 하중속도로 준정적 압축시험을 수행하였다. 시험을 통해 취성파괴모드로 압축되는 탄소/에폭시로 제작된 튜브가 가장 우수한 에너지 흡수 특성을 보인 반면, 좌굴에 의해 압축되는 케블라/에폭시 튜브가 가장 낮은 에너지 흡수특성을 보였다. 하이브리드 [$90_C/0_K$]튜브의 경우 국부좌굴모드에 의해 에너지를 흡수했으며 우수한 압축후 구조온전성 특성을 보였다. [$90_K/0_C$] 튜브의 경우 주 파손모드는 단층굽힘모드이고 압축후 구조온전성이 확보되지 못했다.

Key Words : 파손모드(Failure modes), 에너지 흡수(Energy absorption), 압축후 구조온전성(Post crushing integrity), 복합재 튜브(Composite tube)

1. 서 론

복합소재는 우수한 기계적 성질과 경량화 효과에 의해 항공, 선박 및 자동차 분야에서 광범위하게 적용되고 있다. 철도차량분야에서도 복합소재는 전두부, 내장재 및 의자와 같은 하중을 감당하지 않는 2차 부재로 활발히 적용되고 있다. 최근에는 하중을 감당하는 1차 부재인 차체 구조물에도 적용이 확대되고 있다. Kim 등은 탄소섬유 복합소재로 제작된 철도차량용 차체소재에 대한 다양한 유지보수기법 및 저속 충격하중하에 파손모드를 고찰하였다 [1-2]. 또한, 정하중하에서 복합

* 한국철도기술연구원 철도구조연구실
*+ 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원, 교신저자(E-mail:jskim@krri.re.kr)
** 한국화이바 복합재료 연구소

소재 차체의 구조안전성을 평가하고 [3-4], 차량의 주행 중 차체에 전파되는 진동과의 공진 여부를 평가하기 위해 차체의 고유치를 시험적으로 평가하였다 [5]. 복합소재는 이러한 철도차량의 차체뿐만 아니라 소재 자체의 우수한 에너지 흡수특성 때문에 항공기나 철도분야에서 에너지 흡수부재로도 많이 적용되고 있다. 대표적인 사례로 Fig. 1과 같이 독일의 DLR사에서는 NH90과 Tiger 대전차 헬기의 바닥구조와 NH90헬기의 랜딩기어에 적용되는 복합소재 충돌흡수구조를 개발하였다. NH90헬기에 적용된 CFRP 충격흡수튜브는 트리거 하중(trigger load)이 100kN이고 압축길이는 190mm이다[6].

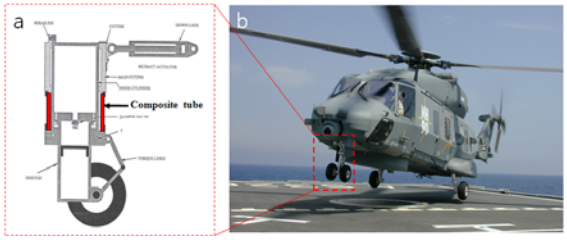

Fig. 1 Composite tube applications in aerospace; (a) a composite tube for NH90 nose landing gear and (b) NH90 helicopter [6].

자동차 분야에서도 독일 Jabob composite GmbH사는 에너지 흡수특성이 열경화성 수지에 비해 우수한 열가소성 수지(thermoplastic resin)를 적용한 충격흡수튜브를 개발하여 BMW M3차량에 적용하고 있으며, Fig. 2와 같이 복합소재 에너지 흡수튜브는 경주용 자동차에도 많이 적용되고 있다[7].

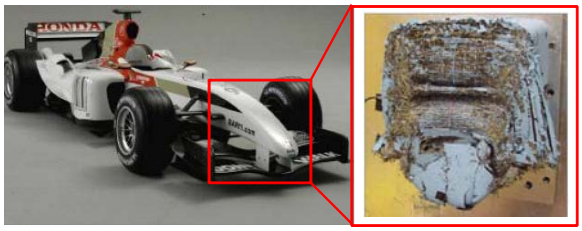

Fig. 2 Composite energy absorber for F1 racing car [7].

철도분야에서도 독일의 DLR사는 직조된 유리섬유/에폭시 충돌흡수튜브를 개발하여 ICT(Inter City Train) 열차에 적용하고 있다. 국내에서도 최근에 복합소재가 200km/h급 중고속 차량, 초저상 버스 및 경전철 차체 등에 활발히 적용되면서 차체 이외 차량 전두부의 충격흡수부재에 복합소재를 적용하려는 연구가 진행 중이다. 이러한 복합소재의 충격흡수특성에 관한 연구로 Thornton과 Farley [8-11]등은 유리, 탄소, 케블라 튜브를 이용한 준정적 압축시험을 통해 유리 및 탄소섬유 튜브는 취성파괴에 의해 에너지를 흡수하고, 케블라 섬유 튜브는 좌굴에 의해 에너지를 흡수함을 확인하였다. 또한, 에너지 흡수율을 극대화시키기 위해서는 수지의 파단변형률이 섬유의 파단변형률보다 높은 것이 유리함을 확인하였다. Warrior [12] 등은 수지의 물성에 따른 복합소재 원형튜브의 SEA (specific energy absorption)를 분석하여 수지의 압축강도가 SEA와 밀접한 연관성을 있음을 확인하였다. Savona 와 Hadavinia[13-14] 등은 모드 I 과 II 층간파괴인성과 SEA와의 연관성을 규명하였다.

본 연구에서는 현재 국내 철도차량분야에서 에너지 흡수부재로 적용가능한 일방향 탄소, 케블라, 탄소-케블라 하이브리드 소재를 이용하여 원형튜브를 제작하고 준정적 압축시험을 통해 각 소재별 에너지 흡수능력과 파손모드를 분석하였다. 이를 통해 각 소재별 철도분야 적용가능성을 확인하였다.

2. 에너지 흡수특성 평가시험

2.1 원형튜브제작

본 연구에서는 일방향 탄소, 케블라, [90(탄소)/0(케블라)] 및 [90(케블라)/0(탄소)] 하이브리드 등 총 4종류의 소재를 이용하여 Fig. 3과 같은 원형튜브를 제작하였다. 본 시험에 적용된 소재는 (주)한국화이바에서 공급한 것이다. 원형튜브의 제작과정은 먼저 일방향 프리프레그를 직경 30mm의 원형 금속파이프에 Fig. 3(a)와 같이 랩퍼(wrapper 또는 wrapping machine)를 이용하여 감고, 이를 오븐에서 성형하여 Fig. 3(b)와 같은 1m길이의 복합소재 원형파이프를 제작한다.

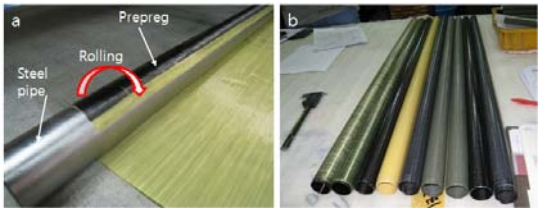

Fig. 3 Fabrication of composite circular tubes; (a) wrapping prepregs around a steel pipe and (b) final shape.

성형조건은 분당 3.5°C로 135°C까지 온도를 올리고 135°C에서 1시간 30분 유지한후 1시간에 걸쳐 온도를 상온까지 내렸다. 1m의 길이로 제작된 튜브는 다이아몬드 와이어를 이용하여 원하는 크기로 절단하였다.

압축시험을 위해 제작된 원형튜브는 Fig. 4와 같이 내경 30mm이고 길이는 100mm이다. 원형튜브의 크기는 Farley [9-11]의 연구를 참조하여 극한파괴(catastrophic failure)가 발생하지 않고 점진적인 파손(progressive failure)이 유도될 수 있도록 선정한 것이다. 또한, 제작된 튜브의 한쪽끝은 튜브 압축시 최대하중을 낮추고 점진적인 파손에 의한 안정적인 압축를 유도하기 위해 45°로 모서리를 가공하였다. 원형튜브에서 튜브의 길이방향을 0°방향으로 원주방향을 90°방향으로 설정하여 적층하였다. 본 연구에서 제작된 원형튜브는 모두 $[90/0]_n$의 적층을 가지며 각 소재별 단층의 두께가 다르기 때문에 층수 및 원형

튜브의 두께는 약간씩 차이가 있다. 본 연구에서는 각 소재에 대해 5개의 튜브를 제작하여 시험을 수행하고 평균하였다. Table 1은 각 소재별 적층순서, 단층의 두께 및 무게를 나타낸 것이다.

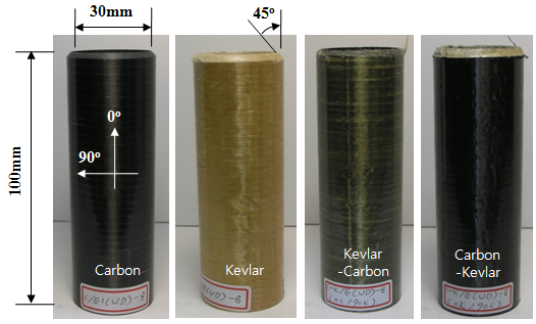

Fig. 4 Fabricated composite circular tubes.

Table 1 Information of composite tubes

Materials	Stacking sequence	Average weight (g)
Carbon	$[90/0]_5$	28.3
Kevlar	$[90/0]_4$	23.8
Hybrid	$[90_C/0_K]_{11}$	24.9
	$[90_K/0_C]_{11}$	24.9

제작된 튜브의 평균된 무게는 유리섬유/에폭시로 제작된 튜브가 가장 무거웠으며, 케블라/에폭시로 제작된 튜브가 가장 가벼웠다.

본 연구에서는 원형튜브에 대한 압축시험을 수행하기 이전에 원형튜브제작에 적용된 소재들에 대한 물성시험을 통해 인장, 압축, 전단 및 층간전단강도를 측정하였다. Table 2는 물성시험에서 측정된 각 소재별 물성치를 나타낸 것이다. 시험결과 모든 물성치는 예상대로 탄소, 탄소-케블라 및케블라 순서로 높은 분포를 보였다. 각 소재별 물성치의 상대적인 비를 확인하기 위해 탄소/에폭시의 물성치를 기준으로 정규화하여 NI (Normalized Index)로 표기하여 보았다. 그 결과 탄소-케블라 하이브리드 소재의 경우 전체적으로 탄소/에폭시 물성에 비해 최소 60%이상을 유지하였으며 섬유방향 탄성 및 전단강성은 80%수준, 층간전단강도는 거의 동일하였다. 그러나, 케블라/에폭시의 경우 대체로 탄소/에폭시의 65% 이상의 NI를 유지하였으나 섬유방향 인장강도의 경우 탄소/에폭시의 46%이고 압축강도의 경우 약 33%였다. 케블라/에폭시의 취약한 압축강도는 충격흡수측면에서 악영향을 줄 것으로 판단된다.

2.2 압축시험절차

본 연구에서 수행된 준정적 압축시험은 100kN용량의 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 시험하였다.

Table 2 Mechanical properties of each material

Materials	Carbon	Kevlar (NI)	Carbon-Kevlar (NI)
Elastic modulus (GPa)	130	83.9 (0.65)	105.2 (0.81)
Shear modulus (GPa)	8.24	5.91 (0.72)	6.58 (0.80)
Tensile strength (MPa)	2725	1242.5 (0.46)	1888 (0.69)
Compressive strength (MPa)	551.2	182.4 (0.33)	328.4 (0.60)
Shear strength (MPa)	78.5	77.8 (0.99)	76.8 (0.68)
ILSS (MPa)	71	63.2 (0.89)	70.1 (0.99)

3. 시험결과 고찰

3.1 하중-변위선도

금속재와 달리 취성 폴리머 복합소재는 소성거동을 거의 보이지 않는다. 예를 들어 유리섬유의 경우 2~3%의 탄성변형 후 취성파괴거동을 보인다. 또한, 수지균열, 섬유파단 및 섬유와 수지간 분리등과 같은 미소파단모드가 압축거동 및 에너지 흡수능력을 결정하는 요인이다. 이러한 폴리머 복합소재는 압축하중하에서 일반적으로 극한파괴거동을 보인다. 극한파괴는 에너지 흡수측면에서는 바람직하지 못한 파괴양상으로 이러한 형태의 파손모드는 불안정한 층간 및 층내균열에 의해 유발되며, 길고 얇고 직경이 작은 튜브의 경우 오일러 좌굴(Euler buckling)의 형태로, 짧고 두껍고 직경이 큰 튜브의 경우에는 압축전단 및 축방향 갈라짐(splitting)의 형태로 발생한다. 이러한 극한파괴의 경우 초기최대하중(initial peak load)과 후하중(post-failure load)의 비가 커서 많은 충격에너지를 흡수할 수 없고, 초기최대하중이 클 경우 가속도의 증가로 충격흡수부재로서 부적합하다.

그러나, 이러한 취성 폴리머 복합소재의 파단양상을 트리거 메커니즘의 도입에 의해 점진적인 파손거동을 유도가능하다. 가장 보편적으로 적용되는 트리거 기법은 튜브의 끝에 모서리를 깎아내는 것이다. 이러한 점진적인 파괴시 초기최대하중과 후하중의 비가 높아 극한파괴에 비해 많은 에너지를 흡수할 수 있고, 초기최대하중도 낮출수 있다. Fig. 5는 트리거 메커니즘 도입을 통해 복합소재에 유도된 점진적인 파단시 전형적인 하중-변위선도를 나타낸 것이다.

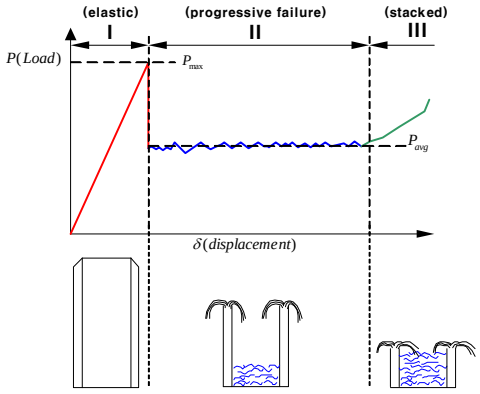

Fig. 5 Typical load-displacement curve for the progressive failure of composite tubes.

하중-변위선도의 각 단계별 특성은 다음과 같다.

- I 단계 (선형탄성영역) : 압축하중이 튜브에 부과되면서 하중이 선형적으로 증가하는 영역으로 트리거 부위에 응력집중이 발생한다. P_{max}값은 트리거부의 최대압축강도를 의미한다.
- II 단계 (점진적 파손영역) : 압축하중이 트리거부의 압축강도를 초과하여 파손이 발생되기 시작하는 영역으로 균열진전 및 정지를 반복하면서 점진적인 파손거동을 보인다. 균열이 진전하면서 단층다발(lamina bundle)이 파단되어 튜브의 내외부에 쌓이며 대부분의 에너지를 흡수하는 영역이다.
- III 단계 (쌓임영역) : 튜브내부공간에 파단조각들이 쌓여 더 이상 압축되지 않고 하중이 증가되는 영역이다.

Fig. 6은 원형튜브에 대한 압축시험을 통해 얻어진 하중-변위 선도이다. 하중-변위선도는 Fig. 5의 전형적인 하중-변위선도와 유사한 경향을 보인다. 탄소/에폭시 튜브가 가장 높은 초기최대하중 및 평균하중 값을 보였다. 탄소/에폭시 튜브의 경우 약 2mm 압축지점까지 선형탄성 거동을 유지하고, 2mm 압축지점에서 트리거부 파단이 발생함을 알 수 있다. 트리거부 파단후 하중은 계속 증가하여 약 4.6mm 압축지점에서 초기최대하중값을 나타나고 이후 하중은 급격히 감소하였다. 케블라/에폭시 튜브가 가장 낮은 에너지 흡수능력을 나타내었다. 탄소, 케블라 및 [$90_K/0_C$]하이브리드 튜브의 경우 약 80mm 압축지점부터 하중이 증가하기 시작하는데 이것은 탄소 및 [$90_K/0_C$] 튜브의 경우에는 압축과정에서 발생된 파편과 튜브의 안쪽으로 말려들어가는 단층다발들이 쌓이면서 더 이상 압축되지 않기 때문이다. 케블라 튜브의 경우 금속재와 마찬가지로 국부좌굴변형을 통해 튜브벽면에 겹쳐지면서 더 이상 압축되지 않기 때문이다. 이와 달리 [$90_C/0_K$] 튜브의 경우 약 66.8mm 압축지점에서 하중이 급격히 증가하는 경향을 보이는데 그 이유는 파손모드부분에서 상세히 언급할 것이다.

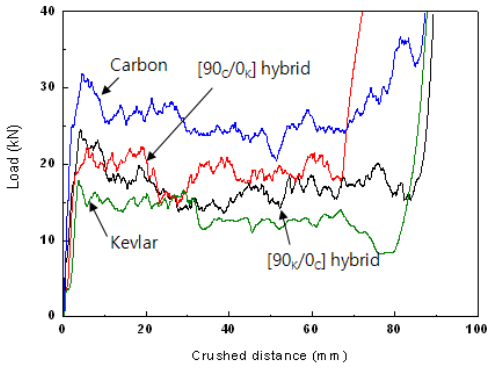

Fig. 6 Load-displacement curves of different tubes.

3.2 SEA

본 연구에서는 각 소재별 에너지 흡수능력을 평가하기 위해 Table 3과 같이 소재별 초기최대하중, 평균하중, 초기최대하중과 평균하중의 비율인 하중효율(crushing force efficiency, CFE) 및 무게당 흡수에너지(SEA)를 계산하여 비교하였다. 무게당 흡수에너지는 식 (1)과 같이 원형튜브에서 흡수에 기여한 무게(crushed weight)만을 고려하였다.

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

여기서 E_{abs}는 총 흡수된 에너지, W_{total}는 원형튜브의 전체무게, P는 압축하중, δ는 압축변위, L_c는 압축된 거리(에너지 흡수에 기여한 거리), L_t는 튜브의 총길이를 의미한다. Table 3에서 알 수 있듯이 SEA측면에서 볼때 탄소/에폭시 튜브가 가장 높은 값을 보였으며, 케블라/에폭시 튜브가 가장 낮았다. 또한 하이브리드 튜브의 경우 [$90_C/0_K$]가 [$90_K/0_C$]에 비해 약 7.23%정도 높은 SEA값을 보였다. [$90_K/0_C$]튜브는 초기최대하중은 높지만 CFE가 66.4%로 가장 낮아 전체적인 SEA가 [$90_C/0_K$]에 비해 낮았다.

Table 3 Measured energy absorption parameters

Materials	Peak load(kN)	Mean load(kN)	CFE(%)	SEA (kJ/kg)
Carbon/epoxy	31.3	25.2	80.5	91.1
Kevlar/epoxy	17.6	12.8	72.7	54.1
Hybrid [$90_C/0_K$]	23.3	18.9	81.1	77.1
Hybrid [$90_K/0_C$]	26.8	17.8	66.4	71.9

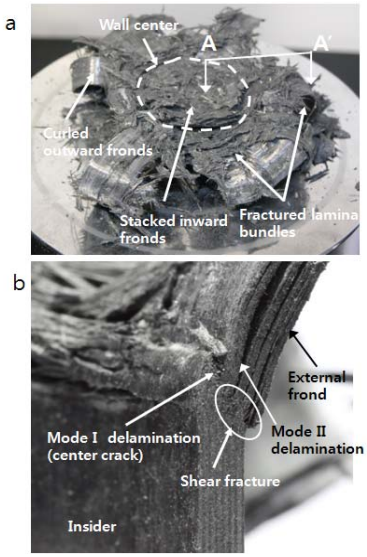

Fig. 8 (a) Crushed carbon/epoxy tube as brittle fracturing mode and (b) Sectional view of A-A'.

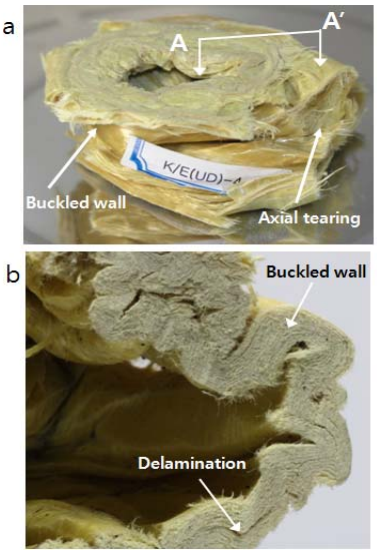

Fig. 9 (a) Crushed Kevlar/epoxy tube as local buckling mode and (b) Sectional view of A-A'.

3.3 압축모드

탄소/에폭시 튜브의 경우 압축시 횡전단(transverse shearing mode 또는 fragmentation mode) 및 단층굽힘 모드(lamina bending mode 또는 splaying mode)가 혼합된 취성파괴모드(brittle fracturing mode)의 형태로 압축되었다. 횡전단 모드는 여러개의 층간 및 축방향 균열을 갖는 쐐기형태의 적층판 단면으로 나타나며 취성 섬유에서 발생한다. 층간 및 축방향 균열은 단층다발을 형성하고 이 단층다발들은 부과하중에 저항하는 기둥과 같은 역할을 한다. 하중이 부과될 때 층간균열은 단층다발기둥의 뿌리부분이 파단되어 쐐기형태의 단면을 형성할 때까지 진전한다. 주 에너지 흡수메커니즘은 단층다발들의 파괴이다. 단층굽힘 모드는 매우 긴 층간, 층내균열 및 섬유방향에 평행한 균열이 발생하는 특징이 있으며 단층 다발 파괴는 발생하지 않는다. 복합소재 벽이 내외부로 쪼개져서 잎모양(frond)으로 벌어지는 모드로 취성 섬유에서 발생한다. 주 에너지 흡수메커니즘은 하중부과판과의 마찰, 단층간의 마찰 및 수지균열의 성장이다.

Fig. 8은 탄소/에폭시 튜브의 최종압축후 형상과 단면을 절단하여 벽면을 관찰한 것이다. 탄소/에폭시의 벽 중앙에 모드 I 층간분리가 존재하고 이를 중심으로 잎구조가 내외부로 굽혀져 있으며 잎구조의 끝단에는 전단파괴가 발생하였다.

Fig. 9는 케블라/에폭시 튜브의 압축된 형상으로 튜브벽면의 좌굴에 의해 점진적인 접힘(progressive folding)거동을 보임을 알 수 있다. 좌굴에 의해 접히는 과정에서 단층간 층간균열도 다수 발생했음을 확인할 수 있었다. 또한 압축과정에서 튜브의 원주방향에서 발생하는 인장응력에 의해 튜브의 벽면에 길이방향으로 균열(axial splitting)이 발생하였다. 이 균열은 하중이 증가하는 과정에서 지속적으로 성장하였다.

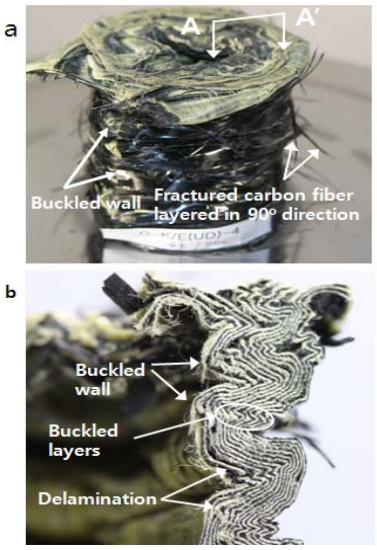

Fig. 10 (a) Crushed [$90_C/0_K$] hybrid as lamina bending mode and (b) Sectional view of A-A'.

하이브리드 튜브의 경우 탄소섬유가 최외층 90도 층에 적층되고 케블라섬유가 튜브의 길이방향인 0도 층으로 적층된 [$90_C/0_K$]적층의 경우에는 기존 케블라와 유사한 국부좌굴에 의한 점진적인 접힘 거동을 보였다 (Fig. 10). [$90_C/0_K$] 튜브는 원주방향으로 탄소섬유가 배치되어 있기 때문에 Fig. 10에서와 같이 원주방향 인장응력에 의해 탄소섬유의 파단이 다수 발생했지만 케블라 튜브와 같은 튜브의 벽면에 길이방향으로 균열은 발생하지 않았다. 이것은 Table 2에서 알 수

있듯이 탄소섬유가 케블라섬유에 비해 인장하중에 대한 저항성이 2배 이상 크기 때문이다. 따라서. 길이방향 균열이 발생하지 않았기 때문에 좌굴에 의해 접힌부분이 쌓여 Fig. 6에서 언급한 바와 같이 약 66.8mm 압축시점에서 더 이상 압축되지 않았다. 또한, Fig. 10에서 알 수 있듯이 압축과정에서 탄소와 케블라 층사이에 층간분리가 발생하고 이렇게 분리된 단층들에 미소 좌굴이 발생하였다. 그러나, [$90_K/0_C$] 적층의 경우에는 취성섬유의 특성인 단층굽힘모드로 압축되었다 (Fig. 11).

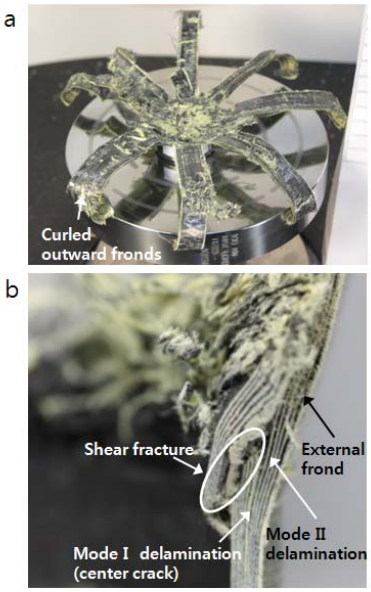

Fig. 11 (a) Crushed [$90_K/0_C$] hybrid as lamina bending mode and (b) Sectional view of A-A'.

3.4 결과분석

하중-변위선도 및 SEA분석에서 탄소/에폭시 튜브가 가장 높은 초기최대하중, 평균하중 및 SEA 값을 보였으며 케블라/에폭시 튜브가 가장 낮은 에너지 흡수능력을 나타내었다. 이것은 탄소/에폭시 튜브의 경우 에너지 흡수측면에서 마찰이나 섬유파단과 같은 고에너지가 요구되는 파손메커니즘(취성파괴모드)으로 압축되는 반면 케블라/에폭시 튜브는 에너지 흡수측면에서 비효율적인 벽면의 좌굴에 의한 점전적인 접힘모드로 압축되기 때문이다. 또한, 기계적 물성측면에서 탄소섬유가 케블라 섬유에서 비해 압축시 지배적인 역할을 담당하는 압축강도나 튜브벽면의 층간균열발생에 대한 저항성을 반영하는 ILSS가 우수하기 때문이기도 하다.

탄소-케블라 하이브리드 튜브의 경우 [$90_C/0_K$]튜브가 [$90_K/0_C$]에 비해 우수한 에너지 흡수능력을 보였다. 이것은 [$90_C/0_K$]튜브가 비록 에너지 흡수측면에서 불리한 좌굴모드로 압축되지만 원주방향 탄소섬유에 의해 꽤 우수한 SEA값으로 보였다. 그러나 [$90_K/0_C$]튜브의 경우 탄소섬유가 튜브의 길이방향으로 배치되어 압축하중시 원주방향 인장에는 저항하지 못하고 내외부로 벌어진다. 원주방향으로 적층된 케블라 섬유는 원주방향 인장하중에 의해 쉽게 파단되어 단층굽힘모드로 압축되면서도 [$90_C/0_K$]튜브에 비해 낮은 SEA값으로 보였다.

압축모드 측면에서 볼때 [90/0]으로 적층된 원형 튜브의 경우 압축모드가 튜브의 길이방향(0^o층)으로 배치된 강화섬유의 특성에 의해 결정됨을 확인할 수 있었다. 즉, 0^o층에 탄소 및 유리섬유와 같은 취성 섬유가 적층될 경우에는 취성파괴 및 단층굽힘모드와 같은 취성 섬유로 제작된 튜브에서 발생하는 압축모드가 발생하고, 0^o층에 케블라와 같은 연성섬유가 적층될 경우에는 연성 섬유 튜브에서 주로 발생하는 좌굴모드가 지배적이다.

복합소재가 단지 철도차량의 에너지 흡수부재로 적용될 경우에는 부재 자체가 모두 파단되면서 많은 에너지를 흡수하는 취성파괴모드로 압축되는 것이 유리하다. 그러나 철도차량 차체 구조물에 적용될 경우에는 승객의 보호측면에서 이러한 취성파괴모드로 압축되어서는 안 된다. 따라서, 복합소재가 철도차량 차체 구조물에 적용되기 위해서는 충돌후 구조온전성 (post collision structural integrity)이 확보되어야 한다. 이러한 충돌후 구조온전성 측면에서는 좌굴에 의해 압축되는 케블라/에폭시나 [$90_C/0_K$]튜브가 유리하다.

4. 결 론

이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 하중-변위선도 및 SEA분석에서 탄소/에폭시 튜브가 가장 높은 초기최대하중, 평균하중 및 SEA 값을 보였으며 케블라/에폭시 튜브가 가장 낮은 에너지 흡수능력을 나타내었다.

(2) 탄소와 케블라 섬유의 하이브리드 튜브의 경우 압축모드측면에서 0^o층에 배치된 강화섬유의 특성에 의해 결정됨을 확인할 수 있었다. 따라서, 이러한 특성을 잘 활용한다면 상호 상반된 특성인 에너지 흡수능력과 구조온전성을 동시에 적절히 만족하는 충격흡수 구조물 설계에 유용하리라 판단된다.

(3) 본 연구를 통해 우수한 에너지 흡수능력이 요구되는 철도차량의 전두부 연결기와 같은 에너지 흡수부재에는 탄소/에폭시 튜브가 가장 적합하고, 에너지 흡수능력과 동시에 승객의 안전이 요구되는 차체 구조물의 경우에는 [$90_C/0_K$]튜브가 가장 유리할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 산업기술연구회에서 지원하는 과제인 일반사업 “복합소재의 철도차량 적용에 관한 연구”의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1) 김정석, 신광복, “복합재 철도차량의 유지보수기법,” 한국복합재료학회지, 제17권, 제6호, 2004, pp. 67-70.
2) Kim J. S. and Cheong S. K., “A Study on the Low Velocity Impact Response of Laminates for Composite Railway Bodyshells,” *Composite Structures*, Vol. 77, 2007, pp. 484-492.
3) Kim J. S. and Cheong J. C., “Natural Frequency Evaluation of a composite Train Carbody with Length of 23m,” *Composite Science and Technology*, Vol. 66, 2006, pp. 2272-2283.
4) 김정석, 정종철, 이상진, “하이브리드 복합재 철도차량 차체에 대한 시험적 연구,” 한국복합재료학회지, 제18권, 제6호, 2005, pp. 19-25.
5) Kim J. S., Cheong J. C. and Lee S. J., “Numerical and Experimental Studies on the Deformational Behavior of a Composite Train Carbody of the Korean Tilting Train,” *Composite Structures*, Vol. 81, 2008, pp. 225-241.
6) C. Kindervater, “The Crashworthiness of Composite Aerospace Structures,” Workshop, the Crashworthiness of Composite Transportation Structures, TRL, Crowthorne, 3rd October 2002.
7) M. Wacker and M. Hormann, “Simulation of the Crash Performance of Crash Boxes based on Advanced Thermoplastic Composite,” 22nd CAD-FEM Users’ Meeting 2004 International Congress on FEM Technology with ANSYS CFX & ICEM CFD Conference, International Congress Center Dresden, Germany, 2004.
8) Thornton, P. H. and Edwards, P. J. “Energy Absorption in Composite Tubes,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 16, November, pp. 521-544, 1982.
9) Farley, Gary L. “Energy Absorption of Composite Materials,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 17, May, 1983, pp. 267-279.
10) Farley, Gary L. “Effect of Fiber and Matrix Maximum Strain on the Energy Absorption of Composite Materials,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 20, July, 1986, pp. 322-334.
11) Farley, Gary L., Bird, Richard K., and Modlin, John T. “The Role of Fiber and Matrix in Crash Energy Absorption of Composite Materials,” *Journal of the American Helicopter Society*, April, 1989, pp. 52-58.
12) N. A. Warrior, T. A. Turner, E. Cooper, M Ribeaux, “Effects of Boundary Conditions on the Energy Absorption of Thin-walled Polymer Composite Tubes Under axial Crushing,” *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, 2008, pp. 905-913.
13) H. Ghasemnejad, B. R. K. Blackman, H. Hadavinia and B. Sudall, “Experimental Studies on Fracture Characterizations and Energy Absorption of GFRP Composite Box Structures,” *Composite Structures*, Vol. 88, 2009, pp. 253-261.
14) H. Hadavinia and H. Ghasemnejad, “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, 2009, pp. 303-314.