

틸팅차량용 복합재 차체소재의 기계적 특성 평가 기술

이은동*·윤성호*·신광복**·정종철***

Evaluation Techniques of Mechanical Properties for Composite Carbody of Tilting Train

Eun Dong Lee, Sung Ho Yoon, Kwang Bok Shin, Jong Cheol Jeong

Abstract

Testing methods for mechanical properties of the advanced composites were introduced. The mechanical properties, such as tensile properties, compressive properties, in-plane shear properties, flexural properties, and interlaminar shear properties, were evaluated along the warp and the fill directions. The CF3327 of the carbon fabric, the HG1581 of the glass fabric, and the HK285 of the aramid fabric were considered as reinforcements. Epoxy and phenolic resin were used as resin. The experimental results obtained in this study would be applicable in the design and structural analysis for the manufacture of the carbody of the tilting train.

Key Words: Testing methods, Mechanical properties, Advanced composites, Carbody, Tilting train

1. 서론

철도고속화를 위해 고속철도사업과 함께 철도 기술연구개발사업의 일환으로 기존 선로의 개선을 통해 속도 향상과 승차감을 개선시킬 수 있는 한국형 고속틸팅열차 개발이 진행되고 있다[1]. 틸팅열차는 곡선구간에서 속도의 감속이 없이도 운전이 가능하여 운행시간을 단축시킬 수 있으며 차량의 안전을 저하시키지 않고 속도를 향상시키기 위해서는 차체의 경량화가 요구된다. 복합소재가 철도차량에 응용되기 시작한 초기에는 외부하중이 크지 않는 이차 부재의 제작에 적용되어 왔지만 최근에는 경량화의 중요성으로 인해 차체의 제작에 적용되면서 큰 외부하중이 작용되는 일차 부재에의 사용도 증가되고 있다.

본 연구에서는 틸팅열차 차체의 경량화 설계를 위해 필수적인 복합소재의 기계적 특성을 평가하기 위한 표준화된 시험방법을 소개하고 차체의 제작에 적용될 수 있는 복합소재에 대한 기계적

특성을 실험적으로 평가함으로써 향후 차체의 설계 및 구조해석 뿐만 아니라 복합재 차체의 형상 최적화를 위한 데이터를 제공하고자 하였다.

2. 소재 종류 및 실험 방법

2.1 소재 종류

강화섬유는 직조된 탄소섬유인 CF 3327, 직조된 아라미드섬유인 HK285, 직조된 유리섬유인 HG1581의 3종류를 고려하였으며 수지는 에폭시와 페놀인 2종류를 고려하였다. 본 연구에서는 이들 강화섬유와 수지가 조합된 6종류의 복합소재에 대해 fill 방향과 warp 방향을 고려하여 총 12종류의 시편을 그림 1과 같은 경화조건을 적용하여 오토클레이브 성형공법으로 제작하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 인장특성

복합소재의 인장강성, 포와송비, 인장강도, 파단변형률 등의 기계적 특성을 평가하기 위해

* 금오공대 기계공학부

** 한국철도기술연구원

*** (주) 한국화이버

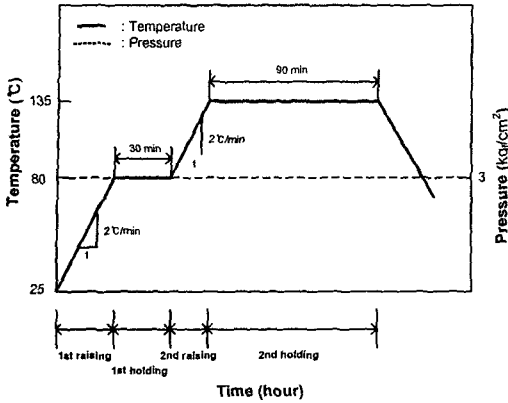


Fig. 1 Recommended curing cycles

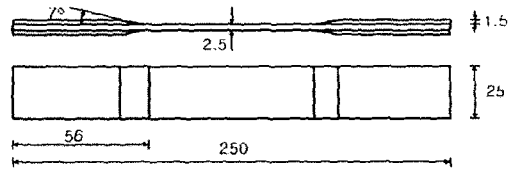


Fig. 2 Configuration of tensile test specimen

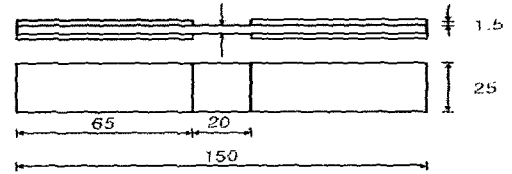


Fig. 3 Configuration of compressive test specimen

ASTM D3039[2]에 따라 시험을 수행하였다. 이때 하중시험기는 Zwick/Z100으로서 2.0mm/min의 변위제어상태로 하중을 가하였다. 시편의 중앙부에는 양축 스트레인게이지 (KFG-2-120-D16-11, Kyowa, Japan)를 부착하였으며 작용응력에 대한 변형을 변화는 변형률 증폭기 (2100 strain gage conditioner & amplifier, Measurements Group, USA)를 이용하여 측정하였다. 그림 2에는 인장시편의 형상이 나타나 있으며 시편의 끝단에는 보강탭을 부착하여 하중을 작용하는 경우 시편에 손상이 발생하지 않도록 하였다.

인장강성 E 는 식(1)에 의해, 포와송비 ν 는 식(2)에 의해, 인장강도 S 는 식(3)에 의해 평가하였으며 특히 인장강성과 포와송비를 결정하기 위해 응력-변형을 선도에서 선형성을 나타내는 1000~3000 $\mu\epsilon$ 의 변형률 범위를 고려하였다.

$$E = \frac{\Delta P}{A_g \Delta \epsilon_{//}} \quad (1)$$

$$\nu = - \frac{\Delta \epsilon_{\perp}}{\Delta \epsilon_{//}} \quad (2)$$

$$S = \frac{P_{cr}}{A_f} \quad (3)$$

여기에서 ΔP 는 하중 증분, $\Delta \epsilon_{//}$ 은 하중 방향의 변형률 증분, $\Delta \epsilon_{\perp}$ 는 하중의 횡방향 변형률 증분, A_g 는 스트레인게이지 부위의 시편 단면적, A_f 는 파단이 발생 부위의 시편 단면적, P_{cr} 은 파단하중을 나타낸다.

2.2.2 압축특성

복합재의 압축강성, 압축강도, 파단변형률 등의

기계적 특성을 평가하기 위해 ASTM D3410[3]에 따라 시험을 수행하였다. 이때 하중시험기는 Zwick/Z100을 사용하였으며 하중은 1.5mm/min의 변위제어상태로 가하였다. 시편의 중앙부에는 단축 스트레인게이지 (KFG-2-120-C1-11, Kyowa, Japan)를 부착하였으며 작용응력에 대한 변형을 변화는 변형률 증폭기를 이용하여 측정하였다. 그림 3에는 압축시편의 형상이 나타나 있다.

2.2.3 면내방향 전단특성

복합재의 전단강성과 전단강도를 평가하기 위해 ASTM D5379[4]에 따라 시험을 수행하였다. 이때 하중시험기는 Zwick/Z100을 사용하였으며 하중은 2.0mm/min의 변위제어상태로 가하였다. 시편의 중앙부에는 양축 스트레인게이지 (KFG-2-120-D16-11, Kyowa, Japan)를 부착하였으며 그림 4에는 면내방향 전단시편의 형상이 나타나 있다.

전단강성 G 는 식(4)에 의해, 전단강도 S 는 식(5)에 의해 평가하였다.

$$G = \frac{\Delta P}{A_g (|\Delta \epsilon_{+45}| + |\Delta \epsilon_{-45}|)} \quad (4)$$

$$S = \frac{P_{cr}}{A_g} \quad (5)$$

여기에서 ΔP 는 하중 증분, $\Delta \epsilon_{\pm 45}$ 은 수평면을 기준으로 반시계 방향으로 45°기울어진 면에서의 변형률, $\Delta \epsilon_{-45}$ 은 수평면을 기준으로 시계 방향으로 45°기울어진 면에서의 변형률, A_g 는 스트레인게이지 부위의 시편 단면적, A_f 는 파단발생 부위의 시편 단면적, P_{cr} 은 파단이 발생하기 직전의 최대

하중을 나타낸다.

2.2.4 굽힘특성

복합재의 굽힘강성, 굽힘강도, 최대변형률 등의 기계적 특성을 평가하기 위해 ASTM D790[5]에 따라 시험을 수행하였다. 이때 하중시험기는 Zwick/Z100을 사용하였으며 하중은 5.1mm/min의 변위제어상태로 가하였다. 작용하중에 대한 시편의 변형은 비접촉식 변형을 센서인 LVDT를 시편의 하단중앙부에 장착하여 측정하였다. 그림 5에는 굽힘시편의 형상이 나타나 있다.

굽힘강성은 하중-변위 선도에서의 초기 선형 기울기를 이용하여 식(6)에 의해, 굽힘강도는 식(7)에 의해 평가하였다. 특히 굽힘강성을 결정하기 위해서는 하중-변위 선도의 선형성을 나타내는 1~2mm의 변형률 범위를 고려하였다.

$$E_b = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (6)$$

$$S = \frac{3P_{cr}L}{2bd^2} \quad (7)$$

여기에서 E_b 는 굽힘강성, S 는 굽힘강도, L 은 지지점 사이의 거리, b 와 d 는 각각 시편의 폭과 두께, m 은 하중-변위 선도에서의 초기 선형구간의 기울기, P_{cr} 은 파단하중을 나타낸다.

2.2.5 층간전단특성

복합재의 층간전단특성을 평가하기 위한 시험은 ASTM D2344[6]에 따라 수행하였으며 사용한 하중장치는 Zwick/Z100으로 하중은 1.0mm/min의 변위제어상태로 가하였다. 그림 6에는 층간전단시편의 형상이 나타나 있으며 층간전단강도는 하중-변위 선도를 이용하여 식(8)을 이용하여 평가하였다.

$$S = 0.75 \times \frac{P_m}{b h} \quad (8)$$

여기에서 P_m 는 파단이 발생할 때의 최대하중, b 와 h 는 각각 시편의 폭과 두께를 나타낸다.

3. 실험결과

표 1~5에는 각각 6종류의 복합소재에 대한 12

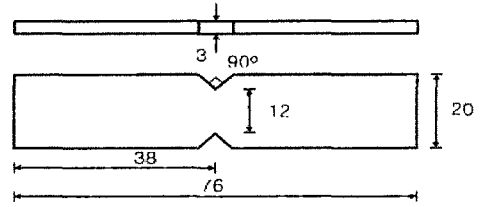


Fig. 4 Configuration of in-plane shear test specimen

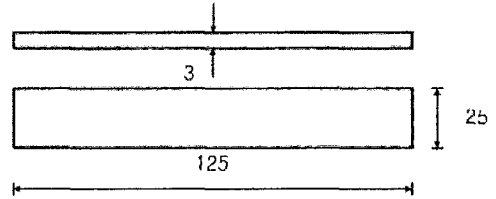


Fig. 5. Configuration of flexural test specimen

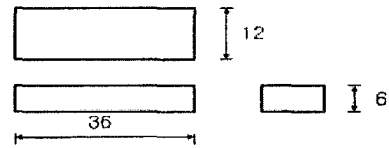


Fig. 6 Configuration of interlaminar shear test specimen

종류의 복합소재에 대한 인장특성, 압축특성, 면내전단특성, 굽힘특성, 층간전단특성 등이 정리되어 나타나 있다. 여기에서 보면 직조된 복합소재의 기계적 특성은 warp 방향의 경우가 통상적으로 fill 방향의 경우에 비해 높게 나타내며, 강화섬유로 직조된 탄소섬유를 적용한 경우가 직조된 유리섬유 또는 직조된 아라미드섬유의 경우에 비해 기계적 특성이 우수함을 알 수 있다.

4. 결론

틸팅열차 차체의 경량화 설계를 위해 필수적인 복합소재의 기계적 특성을 평가하기 위한 표준화된 시험방법을 소개하고 차체의 제작에 적용될 수 있는 복합소재에 대한 기계적 특성을 실험적으로 평가하였다. 본 연구를 통해 얻어진 실험결과들은 향후 틸팅열차 복합재 차체의 설계 및 구조해석 뿐 아니라 차체의 형상 최적화를 위한 자료로 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 철도청의 철도기술연구개발사업에 의해 지원되고 있으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) K.B. Shin, W.H. You, H.S. Moon, "The Application of Composite Materials in Railway Vehicle System," Journal of The Korean Society for Composite Materials, Vol. 15, No. 5, pp. 66-71, 2002.
- (2) ASTM D3039, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03, 2001.
- (3) ASTM D3410, "Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03, 2001.
- (4) ASTM D5379, "Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-notched Beam Method", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03, 2001.
- (5) ASTM D790, "Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 08.01, 2001.
- (6) ASTM D2344, "Standard Test Method for Short-beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03, 2001.

Table 1. Results of tensile test

Materials		Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Strength (MPa)	Failure strain (%)
CF3327/Epoxy	Fill	48.3	0.070	548.9	1.12
	Warp	55.5	0.099	642.2	1.07
CF3327/Phenolic	Fill	48.7	0.189	341.4	-
	Warp	47.3	0.094	390.9	-
HG1581/Epoxy	Fill	23.7	0.137	410.1	2.13
	Warp	24.5	0.145	461.2	2.30
HG1581/Phenolic	Fill	15.5	0.029	243.8	1.59
	Warp	21.7	0.127	317.3	1.97
HK285/Epoxy	Fill	29.9	0.090	560.5	1.90
	Warp	30.7	0.099	545.5	1.86
HK285/Phenolic	Fill	26.1	0.097	526.7	1.82
	Warp	25.2	0.059	511.3	-

Table 2. Results of compressive test

Materials		Modulus (GPa)	Strength (MPa)	Failure strain (%)
CF3327/Epoxy	Fill	50.5	546.5	1.19
	Warp	57.2	587.7	0.95
CF3327/Phenolic	Fill	51.8	211.7	0.37
	Warp	52.4	265.5	0.57
HG1581/Epoxy	Fill	28.9	468.2	1.51
	Warp	29.8	479.9	1.45
HG1581/Phenolic	Fill	25.2	295.4	-
	Warp	26.2	319.9	-
HK285/Epoxy	Fill	27.2	174.7	-
	Warp	27.2	178.1	-
HK285/Phenolic	Fill	23.6	106.1	-
	Warp	26.5	109.3	-

Table 3. Results of in-plane shear test

Materials		Modulus (GPa)	Strength (MPa)
CF3327/Epoxy	Fill	3.65	114.71
	Warp	3.81	123.38
CF3327/Phenolic	Fill	3.92	80.24
	Warp	3.92	75.65
HG1581/Epoxy	Fill	4.53	114.52
	Warp	4.34	114.57
HG1581/Phenolic	Fill	4.03	87.66
	Warp	4.10	90.60
HK285/Epoxy	Fill	1.80	103.17
	Warp	1.87	105.65
HK285/Phenolic	Fill	1.49	62.81
	Warp	1.57	66.75

Table 4. Results of Flexural test

Materials		Modulus (GPa)	Strength (MPa)	Max. strain (%)
CF3327/Epoxy	Fill	46.43	775.64	1.75
	Warp	48.54	797.47	1.76
CF3327/Phenolic	Fill	39.35	414.27	1.14
	Warp	42.11	545.11	1.39
HG1581/Epoxy	Fill	22.68	518.07	2.88
	Warp	23.79	579.97	3.19
HG1581/Phenolic	Fill	17.98	351.47	2.25
	Warp	19.90	464.91	2.79
HK285/Epoxy	Fill	24.47	336.42	4.08
	Warp	24.27	330.16	4.12
HK285/Phenolic	Fill	20.16	261.12	4.35
	Warp	21.19	280.43	4.20

Table 5. Results of interlaminar shear test

Materials		Strength (MPa)
CF3327/Epoxy	Fill	75.28
	Warp	75.39
CF3327/Phenolic	Fill	39.71
	Warp	29.82
HG1581/Epoxy	Fill	72.84
	Warp	77.03
HG1581/Phenolic	Fill	35.21
	Warp	35.29
HK285/Epoxy	Fill	53.60
	Warp	52.95
HK285/Phenolic	Fill	24.03
	Warp	21.19