

지상환경하에서 복합재료의 물성저하를 고려한 한국형 틸팅열차 하이브리드 차체 구조물의 정적안정성 평가

신 광 복* · 한 성 호*

(2003년 11월 21일 접수, 2004년 4월 20일 심사완료)

Evaluation of Static Stability of Hybrid Carbody Structures of Korean Tilting Train eXpress Including Degradation Effects of Composite Materials under Ground Environments

KwangBok Shin and SeongHo Hahn

Key Words: Composite Material(복합재료), Degradation(물성저하), Hybrid Carbody Structure(하이브리드 차체구조), Tilting Train(틸팅열차)

Abstract

In order to evaluate the static stability of hybrid carbody structures of Korean Tilting Train eXpress(TTX) caused by degradation of composites under ground environments, T300/AD6005 graphite/epoxy composite specimens were exposed to accelerated environmental conditions including ultraviolet radiation, temperature and moisture for 2000 hours. It was found that the stiffness and strength of composites after aging were lower than those of unexposed specimens, and decreased as the aging time increases. The values of the degraded properties were used in the static analysis to check the static stability of hybrid carbody structures caused by environmental degradation of composites. The results shown that the structural stability of hybrid carbody structures was affected by the degradation of composites after exposure to accelerated aging environments.

1. 서 론

철도차량의 차체 재료로는 강재, 스테인레스강, 알루미늄 그리고 복합재료가 사용되고 있다. 강재, 스테인레스강 차체는 1세대 차체 재료로서 알루미늄 차체에 비해 경량화 측면에서는 불리하지만 가장 손쉽게 철도차량의 차체에 적용될 수 있는 재질로 현재 화차, 각종 동차, 기관차, 객차, 전동차 언더프레임의 후판부재 등에 주로 사용되고 있다. 알루미늄 차체는 2세대 차체 재료로서 초기 기본 차체 구조를 그대로 유지하고 재질만

알루미늄 계열로 한 것이었으나 최근에는 알루미늄 압출기술의 뒷받침에 힘입어 차체의 전장에 걸쳐 압출재를 대폭 적용하여 제작공정의 단순화 및 차체의 경량화를 실현한 중공 압출재 구조의 알루미늄 차체가 적용되고 있다. 국내에서 알루미늄 차체는 표준화 전동차, G7 고속전철 등에 적용된 바 있다.

1세대 철도차량은 공기역학적 문제(전두부와 객차의 곡면처리), 내구성 문제(부식), 제조공정의 어려움과 차체 중량에 의한 선로의 마모증대라는 많은 문제점이 내포되어 있으며, 2세대 철도차량은 막대한 시설 투자비 부담과 복잡한 제조 공정으로 인한 인건비 증가, 알루미늄 용접기술의 어려움으로 일체성형이 불가능한 문제점을 안고있다. 1990년대 후반부터 3세대 차체 재료로 복합재료가 등장하여 각광을 받고 있는 데 1, 2세대 철도차량에 비해 복합재를 적용한 3세대 철도차량은 경량화에 의한 에너지 효율증가, 우수한 내

† 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원
기존철도기술개발사업단
E-mail : shin955@krri.re.kr
TEL : (031)460-5662 FAX : (031)460-5699

* 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단

구성, 내식성 그리고 일체성형으로 인한 생산비 절감 및 제조 공정 단축, 미려한 외관제작 용이, 가벼운 차체 중량으로 인한 차량 유지보수비 및 레도보수비 절감 등의 장점을 가지고 있다. 따라서, 3세대 복합재 차체는 유럽과 일본에서 차체의 경량화가 중요시되는 경량전철과 틸팅열차(tilting train)에 많이 적용되고 있다. 국내에서도 철도기술연구개발사업에서 연구개발중인 180km/h 급 한국형 틸팅열차(TTX)의 차체 재료를 복합재료로 선정하여 국책사업을 추진하고 있다.⁽¹⁾

그러나, 복합재료 특히, 고분자 복합재료(polymeric composites)는 일반 금속재에 비해 높은 비강성, 비강도 그리고 낮은 열팽창계수 외에 내부식성, 경량화, 가공성, 단열성 그리고 절연성 특성이 우수하여 철도차량 차체 재료로서 사용이 증가하고 있는 실정이지만 지구상의 환경인자(environmental factor), 즉, 온도변화, 습도, 자외선 등에 장기간 노출되면 기계적, 물리적 물성이 초기 값에 비해 감소하는 단점을 가지고 있다.⁽²⁾ 따라서, 철도차량과 같이 30년 이상 지상환경에서 상업운행을 목적으로 하는 구조물에 사용되는 복합재료는 운행 시 겪게되는 지구상의 환경변화를 극복할 수 있도록 설계 시 고려되어야 한다.

본 논문에서는 자연환경에 장기간 노출되었을 때 야기되는 섬유강화 적층 복합재료(laminated fiber-reinforced composite materials)의 기계적, 물리적 물성 저하를 가속노화 시험(accelerated aging test)에 의해 측정하여 물성저하가 한국형 틸팅열차의 하이브리드 차체 구조물(hybrid carbody structure) 거동에 미치는 영향을 설계단계에서 평가하고 이를 차체 설계 수정 및 보완 그리고 제작에 반영하고자 한다.

2. 가속노화시험

2.1 복합재료에 미치는 지상환경 인자들

철도차량 등과 같이 지상 구조물에 사용되는 복합재료는 장기간의 운영 시 만나는 지구상의 환경변화를 극복하도록 설계되어야 한다. 지상환경인자들은 복합재 구조물의 기계적, 물리적 그리고 광학적 물성 등의 저하를 초래하게 된다. 복합재료에 미치는 지상환경인자들은 Fig. 1과 같이 온도, 자외선, 수분, 외부물체에 의한 충격, 용매와 화학물질에의 노출, 음향환경에의 노출 등

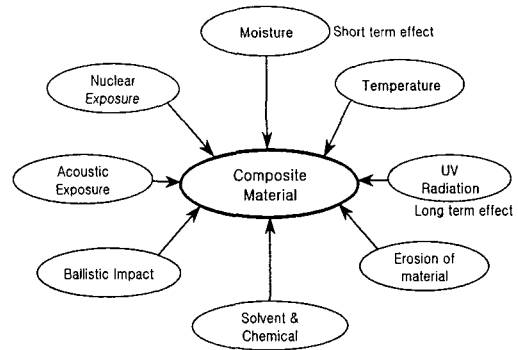


Fig. 1 Typical ground environmental factors on composite materials

다양하게 존재한다. 그 중에서 복합재료에 가장 많은 영향을 미치는 주요인자들은 온도, 수분 그리고 자외선으로 알려져 있다.⁽³⁾

온도(temperature)는 복합재료 구성성분들의 열팽창계수와 탄성계수를 변화시켜 잔류응력을 발생시키는 데 이러한 잔류응력은 복합재료의 층간분리(delamination)나 모재균열(matrix cracking) 등을 동반하여 심한 경우 기계적 파단이 일어나게 된다. 수분(moisture)이 복합재료의 모재(matrix)에 미치는 영향을 살펴보면 수분의 확산작용에 의해 모재로 침투하거나 모세관 현상에 의해 결합면(interface)에 침투하게 된다. 외부환경노출에 의해 표면이 손상을 받거나 균열이 생기면 이러한 침투현상은 촉진된다. 이런 수분은 모재의 유리전이온도(glass transition temperature)를 감소시키고 접합특성을 저하시키게 되는 데 이는 고온에서 모재지배물성(matrix dominated property)를 감소시키는 원인이기도 하다. 자외선(ultraviolet radiation)은 고분자에 영향을 준다고 알려졌는데 그 영향은 주로 10 μm의 복합재료 표면에서 일어난다. 실제로 태양광에 노출된 복합재 적층판은 옆면에서부터 모재의 표면물성저하가 일어나 파괴인성치 등이 감소하게 된다.⁽⁴⁾

2.2 가속노화시험 장비 및 조건

장기간 지상환경에서 운영되고 있는 복합재 구조물에 대한 내후성(weatherability) 연구는 국내에서 거의 찾아볼 수 없는 실정이다. 복합재 구조물이 지상환경에 장기간 노출되면 강성, 강도, 유리전이온도 등의 기계적 물성과 치수, 질량 등의 물리적 물성이 변화되므로 복합재 구조물의 외부

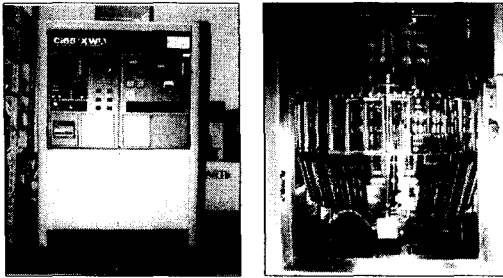


Fig. 2 Weather-Ometer Ci65/XWA

환경영향에 대한 연구는 구조물 설계 시 매우 중요한 인자가 된다. 이러한 복합재 구조물의 환경인자에 대한 영향은 물성변화들을 장기간에 걸친 실제 자연노화시험을 통하여 연구하는 것이 가장 정확한 데이터를 얻을 수 있는 최상의 방법이지만 이것은 오랜 시간과 비용이 필요하기 때문에 비효율적이다. 그에 비해 가속노화시험은 단기간의 시험을 통해 장기간 실제 자연환경시험과 비슷한 결과를 얻을 수 있고 실제 외부환경의 수많은 노화인자(aging parameter)를 임의로 조절 가능하므로 더 다양한 환경조건을 재현할 수 있는 장점이 있다.

2.2.1 웨더-오미터

본 연구에서 사용된 가속노화 장비는 웨더-오미터(Weather-Ometer)로 Atlas Device 사의 Ci65/XWA 모델이고 사용된 광원은 6500W의 제논 아크(Xenon arc)이다. Fig. 2는 가속노화장비의 외부모습과 내부에 장착된 시편들을 보여주고 있다.

시편은 샘플홀더(sample holder)에 장착되어 제논 램프 주위를 1분에 1회전하게 되며 시편이 받는 조사량을 일정하게 하기 위하여 Fig. 2와 같이 홀더가 경사져있다. 웨더-오미터는 주요 제어변수(controlling parameter)를 기본적으로 제어함으로써 가속노화사이클을 구성하여 실제 지상환경을 모사하게 된다.

2.2.2 가속노화 사이클 구성

본 논문의 목적은 한국형 텀팅열차의 하이브리드 차체 구조물이 실제 자연환경에서 장기간 노출되어 운행 시 기계적, 물리적 물성이 어떻게 변화되는지를 고찰하고 이런 물성의 변화가 하이브리드 차체의 구조특성에 어떤 영향을 미치는

Table 1 Accelerated aging conditions for program No. 5

Drawing number	A-5570-5
Accelerated conditions	60m D & SS, 40m L, 20m L & SS, 60m L
Black panel temperature	Light : 60°C, Drak : 10°C
Relative humidity	10~95%
Irradiance level	0.37w/m ²
Light source	6500W water cooled xenon arc

지 설계단계에서 평가하는 데 목적이 있다. 따라서, 가속노화 사이클은 실제 철도차량이 운행되는 기후조건(온도, 습도, 강수량, 일조량 등)을 토대로 구성되어야 합리적일 것이다. 본 시험에서는 웨더-오미터가 제공하는 15 가지의 사이클 프로그램 중 No. 5를 선택하였는데 No. 5의 특징은 아래와 같으며 모사되는 가속노화 환경조건은 Table 1과 같다.⁽⁹⁾

첫째, 낮/밤을 라이트/다크(light/dark) 사이클을 통해 재현할 수 있다는 점이며 라이트 사이클 대 다크 사이클의 시간의 비율은 2:1이다.

둘째, 실제 지상환경조건에서의 강수 효과를 스프레이(spray)로 물을 뿌려 재현할 수 있다.

셋째, 프로그램은 "60m D & SS, 40m L, 20m L & SS, 60m L"로 구성되는 데 여기서, h는 시간, m은 분, L은 라이트(Light), D는 다크(Dark) 그리고 SS는 시편 스프레이(specimen spray)를 의미한다.

프로그램 No. 5는 우리나라의 과거 10년간의 평균기후조건(온도, 습도, 강수량 등)을 기초로 웨더-오미터에서 제공하는 프로그램 중 국내의 지상환경노화 시험에 가장 적합한 것으로 연구된 바 있다.⁽⁶⁾

2.3 시편제작 및 물성저하 측정시험

2.3.1 시편제작 및 시험장치 구성

본 논문에서 고려한 복합재료는 T300/AD6005 그라파이트/에폭시로 현재 지상구조물에 널리 적용되고 있는 재료이다.

시편은 Table 2에서 보듯이 ASTM 규격에 따라 시험 당 6개씩 제작하여 시험을 수행하였다. Table 2에서 TP는 인장물성(Tensile Property), CP는 압축물성(Compressive Property)을 의미한다.

Table 2 Test methods for mechanical properties

Material	Type	Dimension w×L×t (mm)	ASTM
T300/AD6005 Graphite/epoxy	Longitudinal TP	15×250×1	D3039M
	Transverse TP	25×175×2	
	Longitudinal CP	6×140×2	D3410M
	Transverse CP	6×140×2	
	Shear Property (12 plane)	20×76×3	D5379M

w=width, L=Length, t=thickness

복합재료의 물성치 시험은 폐회로 써보 유압재료 시험기인 Instron 1350을 사용하였고 변형률 증폭기는 스트레인 게이지 컨디션너 2100 시스템을 사용하였다.

2.3.2 가속노화진행에 따른 물성 저하 측정시험 및 결과 고찰

복합재료는 자연환경인자에 노출 후 물성이 저하되는 데 특히 강성 및 강도의 저하가 심하다. 본 연구에서는 한국형 텀팅열차의 하이브리드 차체 재료 중의 하나로 고려하고 있는 T300/AD6005 그라파이트/에폭시 복합재료에 대한 노화 전후의 강성과 강도의 변화를 ASTM 기준 시험법에 따라 기본물성 측정시험을 수행하였다. 이때, 복합재료 시편들의 강성은 ASTM 규정에 의해 응력-변형률 선도가 선형적으로 변화하는 0.1~0.3%의 변형률 구간을 선택한 후 이에 해당하는 응력차 값을 구하여 그들의 기울기로 강성을 정의하였다. 각각의 시편 외면에는 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 인장시험에서는 5mm 게이지 길이를 갖는 스트레인 게이지를 시편 외면 중앙 앞면에 2축 게이지, 뒷면에 1축 게이지를 부착하여 시험동안 발생하는 두께방향 굽힘의 양을 점검하였다. 압축시험에서는 시편 외면의 중앙 앞뒷면에 각각 1mm 게이지 길이를 갖는 1축 게이지를 부착하여 좌굴 발생을 점검하였다. 또한, 전단시험에서는 시편 외면의 중앙 앞뒷면에 각각 3mm 게이지 길이를 갖는 2축 게이지(+45° /-45° 방향)를 부착하여 순수 전단변형을 발생을 점검하였다.

노화 이전 시편들의 물성을 알기 위하여 베이스라인 시험(baseline test)을 수행하였고 노화특성을 관찰할 시편들은 웨더-오미터에 각각 500, 1000, 1500 그리고 2000시간의 주기로 가속노화

Table 3 Variations of stiffness(GPa) for T300/AD6005 graphite/epoxy composites

Type	AT 0h	AT 500h	AT 1000h	AT 1500h	AT 2000h	Loss (%)
L TS	122.97	118.34	112.11	101.39	101.45	-17.50
T TS	8.32	7.93	8.01	8.77	8.99	8.05
L CS	109.78	105.05	103.27	102.22	105.07	-4.29
T CS	9.90	8.00	7.81	9.41	9.51	-3.94
S ₁₂	5.23	4.98	5.04	4.99	4.78	-8.60

L=Longitudinal; T=Transverse; TS=Tensile Stiffness; CS=Compressive Stiffness; S₁₂=Shear Stiffness; AT=Aging Time

Table 4 Variations of strength(MPa) for T300/AD6005 graphite/epoxy composites

Type	AT 0h	AT 500h	AT 1000h	AT 1500h	AT 2000h	Loss (%)
L TR	1750.70	1632.97	1625.97	1558.57	1527.56	-12.85
T TR	27.43	21.17	19.77	24.97	19.82	-27.74
L CR	1150.12	1087.94	1015.48	997.80	940.91	-18.19
T CR	155.01	135.09	133.99	134.65	153.76	-0.81
S ₁₂	70.95	71.63	71.01	72.81	71.45	0.70

TR=Tensile Strength; CR=Compressive Strength; S₁₂=Shear Strength

시킨 후 물성을 측정하였다. 2000시간동안의 가속노화시험 후 T300/AD6005 그라파이트/에폭시 복합재 시편은 전반적으로 물성(강성 및 강도)가 저하됨을 확인하였으며 Table 3과 Table 4는 각각 노화시간에 따른 일방향 복합재 시편들의 강성과 강도 변화 추이를 나타내고 있다.

Table 3에서 복합재료의 강성저하 추이를 보면, 섬유직각방향 인장강성(T TS)을 제외하고 모든 경우에 대해 노화시간이 경과됨에 따라 초기 물성에 비해 강성이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. Table 4에서 복합재료의 강도저하 추이를 살펴보면, 전단강도(S₁₂)를 제외하고 모든 경우에 대해 가속노화 환경에 노출된 시간이 경과함에 따라 강도가 초기치에 비해 현저히 감소함을 알 수 있다. 강도의 경우 섬유직각방향 인장강도(T TR)가 가장 큰 감소경향을 나타냈다.

T300/AD6005 그라파이트/에폭시 복합재료의 가속노화 시험결과, 섬유직각방향 인장강성(T TS)과 섬유직각방향 압축강도(T CR) 그리고 전단강도(S₁₂)의 경우 장기간 가속노화 진행 시 물성값이 초기치에 비해 증가하거나 비슷한 추이로 회복되는 것을 볼 수 있다. 이런 물성들의 회복경향 원인은 복합재료 수지의 후경화(post cure) 또는 시편들의 체적비 불균형에 기인한다고 알려져

있는 데, 본 연구에 사용된 시편의 체적비는 비교적 일정하여 수지의 후경화에 의한 현상이라 사료된다.

Fig. 3은 가속노화시간에 따른 복합재 표면의 상태를 전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과이다. 결과에서 보듯이 가속노화가 진행됨에 따라 복합재 표면에서는 환경인자에 의해 모재균열(matrix cracking)이 발생하여 모재가 시편에서 떨어져나가는 모재손실(matrix loss) 현상이 발생한다. 이런 현상은 노화가 계속될수록 시편 안쪽으로 진전되고 결국에는 물성 저하를 가져오는 원인이 된다.

3. 복합재료의 물성저하를 고려한 하이브리드 차체 구조물의 거동 해석

3.1 한국형 틸팅열차의 제원

180km/h급의 한국형 틸팅열차는 철도기술연구개발사업을 통해 2005년 7월 시제차 제작을 위해 국책과제로 수행하고 있다. 현재 차량시스템에 대한 기본설계가 완료되었으며 차체 재료는 기존 선로의 유지보수를 최소화하면서 차량의 속도 및 승객의 승차감, 틸팅의 원활한 수행을 위하여 차체의 경량화를 얻을 수 있는 복합재 적용을 고려하게 되었다.

또한, 틸팅열차는 전기식 차량이어서 주요 전장품이 모두 하부구조에 취부되므로 언더프레임은 매우 중요한 부위이다. 이에 차량의 하부구조 안정성을 보장하면서 차체의 경량화를 추구할 수

있는 구조가 요구되어 언더프레임은 금속재, 차체는 복합재를 적용하는 하이브리드 차체 개발을 추진하게 되었다. Fig. 4는 한국형 틸팅열차의 제작 개념도를 나타내고 있다.

한국형 틸팅열차의 주요 개발사양은 Table 5와 같으며 CATIA V5를 활용한 차체의 3차원 기본설계는 Fig. 5에 나타냈고 Fig. 6은 기본설계를 토대로 제작된 한국형 틸팅열차의 축소 모형을 보여주고 있다.

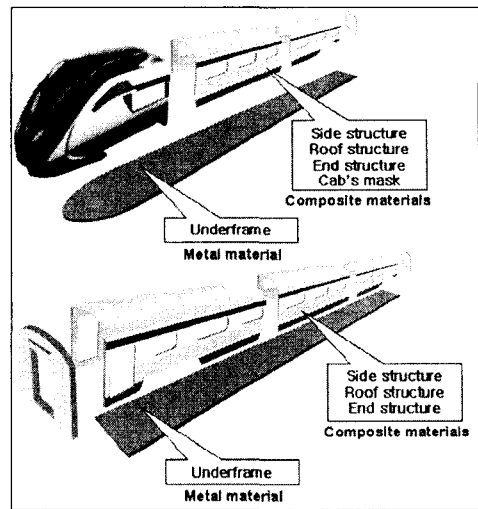


Fig. 4 Manufacturing concept for TTX carbody

Table 5 Principle data for TTX

Max. running speed	180km/h	Length	143m
Max. Design speed	200km/h	No. of seats	346
Train formation	6 cars	No. of motors	16
Train type	EMU	No. of pantograph	2
Weight	344Ton	Max. tilting angle	8°

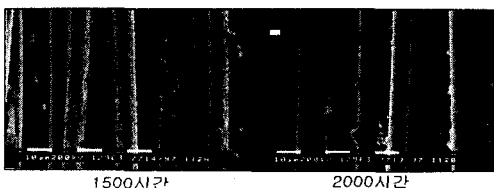
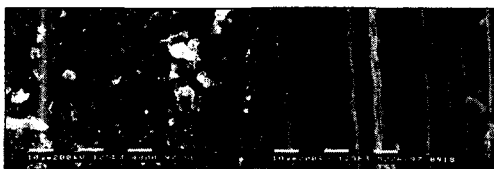
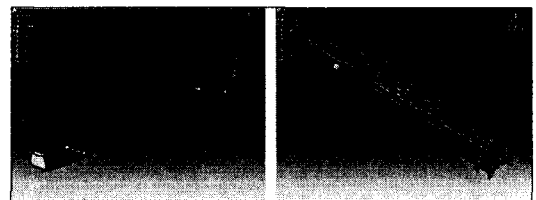


Fig. 3 Surface morphology of aged T300/AD6005 specimen using SEM



(a) T car (b) M car
Fig. 5 3D basic design for TTX carbody

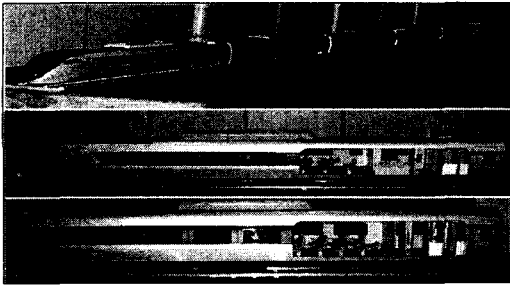


Fig. 6 Mockups for the basic design of TTX

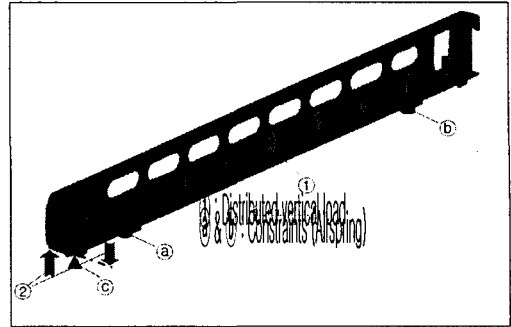
Table 6 Configuration for TTX carbody structure

Underframe & T-Slot	Carbody	Type
Al. 6005A-T6	Composite (T300/AD6005 Gr/Ep)	Hybrid Carbody

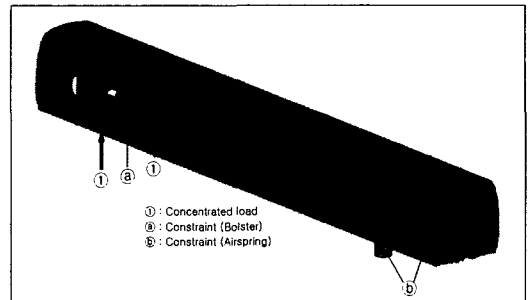
3.2 한국형 틸팅열차의 차체 구조평가기준 및 부위별 재료선정

한국형 틸팅열차의 차체 구조안정성은 JIS E 7105(8)에 따라 평가하도록 개발사양서에 명기되었다. 따라서, 기본설계가 완료된 틸팅열차의 차체는 JIS E 7105에 따라 구조해석을 수행한 후 구조안정성 유무를 판단하여야 한다. 해석은 Table 6과 같이 구성된 하이브리드 차체에 대해 수직 및 비틀림 하중이 작용하는 경우 수행하였으며 대상은 하중이 가장 크게 분포하는 동력차(M car)를 선택하였다.

이때, 수직하중은 승객과 취부 장비들의 중량을 고려한 것으로 “[운전정비 중량-대차질량]에 따른 하중+최대승차인원의 질량에 따른 하중]×동적부가하중계수-(차체중량+시험지자재 중량)에 따른 하중”으로 선정하게 되며 동적부가하중계수는 주행 중의 상하진동가속도를 고려한 계수로 공기스프링을 사용할 경우 1.1로 정해져 있다. 한국형 틸팅차량의 경우 46.68 ton (6.53×10³ MPa)의 수직하중이 언더프레임 상면에 가해지며 수직하중 시 경계조건은 Fig. 7 (a)와 같다. 비틀림하중은 견인, 리프팅 등에서 발생할 수 있는 하중을 고려한 것으로 4 ton·m의 비틀림 모멘트를 차체에 가하도록 규정되어 있다. 비틀림 하중은 Fig. 7 (b)처럼 대차의 공기스프링 위치를 구속(ⓑ)하고 다른 쪽 대차의 볼스터 위치에 롤링(rolling)이 가능하도록 구속(ⓐ)한 후 대차 양 끝



(a) Under vertical load



(b) Under twist

Fig. 7 Boundary and loading conditions

Table 7 Mechanical properties of composite laminate and aluminum for baseline

Part	Materials	E ₁₁ (GPa)	E ₂₂ (GPa)	G ₁₂ (GPa)	ν ₁₂
Underframe & T-Slot	Al. 6005-T6	69		26	0.33
Carbody	Composite laminate (Baseline property)	48.06	48.06	18.53	0.297

단에 집중하중(26.3 kN, ①)을 부가하여 비틀림 모멘트만이 차체에 가해지도록 하였다. 구조해석은 Ansys70을 사용하였으며 해석에 사용된 물성은 Table 7과 같다.

차체에 사용되는 적층 복합재의 경우, 적층판은 [0_n/±45_{2n}/90_n]_s으로 구성하였으며 n은 플라이 개수(ply no.)로 차체 부위별 두께에 따라 조절되는 데 최소의 플라이 수, n은 3이다. 해석에서 복합재 적층판 물성은 일방향 물성시험결과를 토대로 적층 공학 상수(laminate engineering constants)를 사용하였다.

Fig. 8은 해석에 사용된 유한요소해석 모델링을

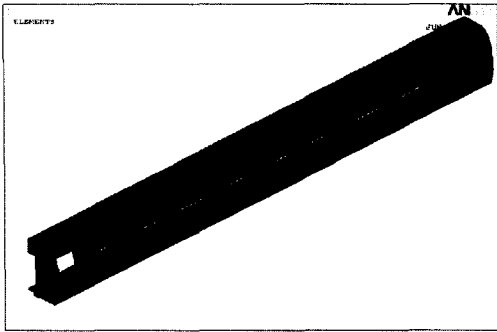


Fig. 8 Finite element model of the motorized car

Table 8 Analysis results of hybrid carbody structures before aging

	Loading case	Present value	Limit value	State
Max. stress (MPa)	Vertical load	64.68 ^c 65.22 ^a	c: suitable criterion a: <yield stress	safe (by Ref. 9)
	Twsit load	66.30 ^c 73.31 ^a	c: suitable criterion a: <yield stress	safe (by Ref. 9)
Max. deflection (mm)	Vertical load	15.76	<15.97	safe
Weight (ton)	-	6.25	-	-

c : composite part, a : aluminum (underframe)

나타내고 있으며 티-슬롯(T-slot)은 빔요소(beam 188), 지붕, 사이드프레임, 언더프레임 등은 셸요소(shell 63)를 사용하였다. 일반적으로 언더프레임은 강재를 사용하지만 틸팅열차의 경우 차체 경량화가 중요한 개발목표이므로 중공 압출재 알루미늄을 선택하였다.

3.3 복합재료 노화 전 하이브리드 차체의 구조 안정성 평가

노화 이전(baseline)의 물성을 사용하여 해석한 하이브리드 차체의 구조안정성 평가 결과는 Table 8과 같다.

결과에서 볼 수 있듯이, 응력값은 하중형태에 무관하게 안전한 상태를 유지하고 있으며 언더프레임 처짐도 비교적 안전한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 즉, 기본설계에서 도출된 한국형 틸팅열차의 하이브리드 차체 구조는 강성 및 강도 설계 측면에서 모두 안전한 상태를 유지하고

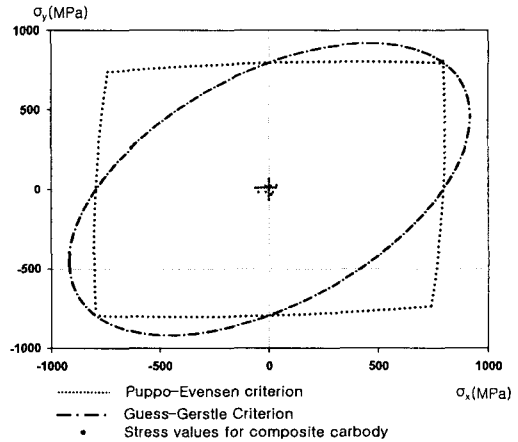


Fig. 9 Failure envelope for total laminate approach

있다. 최대응력은 세 번째와 네 번째 창문사이의 복합재 구조물 부위에서 발생하며 차량 무게는 전체 알루미늄 차체에 비해 20% 경량화 효과가 있다.

복합재 적층판이 사용되는 차체의 강도는 참고 문헌[9]에서 제안한 전체 적층판 접근방법(total laminate approach)에 의해 평가하였으며 Fig. 9와 같이 복합재 차체에서 발생하는 응력분포가 매우 안전한 영역에 존재함을 알 수 있다.

3.4 복합재료 노화를 고려한 하이브리드 차체의 구조 안정성 평가

본 절에서는 자연환경인자에 의한 복합재료의 물성저하 특성을 가속노화시험에 의해 구한 결과를 이용하여 노화진행에 따른 한국형 틸팅열차의 하이브리드 차체 구조의 거동변화를 관찰하고자 한다. 복합재 시편의 일방향 물성저하 측정결과(Table 3)를 토대로 산출된 복합재 적층판의 가속노화에 따른 공학상수(engineering constants) 변화는 Table 9와 같고 이 값은 틸팅열차 차체 구조물의 노화에 따른 거동변화 해석을 위해 사용되었다.

언더프레임에 사용되는 알루미늄과 같은 금속재의 경우 자연환경인자에 의한 노화가 거의 일어나지 않으므로 물성 변화가 없는 것으로 가정하였다. 가속노화가 진행됨에 따른 하이브리드 차체의 구조해석 결과는 Table 10에 나타났다.

결과에서 보듯이, 응력의 경우 노화시간에 무관하게 모두 안전한 값을 유지하고 있다. 그러나,

Table 9 Variations of engineering constants for $[0_n/\pm 45_{2n}/90_n]_s$ graphite/epoxy laminate due to degradation

Aging Time(hr)	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}
0	48.06	48.06	18.53	0.297
500	46.18	46.18	17.80	0.297
1000	44.16	44.16	17.05	0.295
1500	40.74	40.74	15.72	0.296
2000	40.65	40.65	15.64	0.299

Table 10 Analysis results with increasing aging time for hybrid carbony structure

	Loading case	AT 0hr (Baseline)	AT 500hr	AT 1000hr	AT 1500hr	AT 2000hr
Max stress (MPa)	Vertical load	64.68 ^c (safe) 65.22 ^a (safe)	62.79 ^c (safe) 66.32 ^a (safe)	60.69 ^c (safe) 67.59 ^a (safe)	57.41 ^c (safe) 69.92 ^a (safe)	57.46 ^c (safe) 69.97 ^a (safe)
	Twisit load	66.30 ^c (safe) 73.31 ^a (safe)	65.82 ^c (safe) 73.30 ^a (safe)	65.21 ^c (safe) 73.28 ^a (safe)	64.28 ^c (safe) 73.24 ^a (safe)	64.38 ^c (safe) 73.24 ^a (safe)
Max. deflection (mm)	Vertical load	15.76 (safe)	16.21 (fail)	16.48 (fail)	17.01 (fail)	17.02 (fail)

c : composite part, a : aluminum (underframe), AT : Aging Time

언더프레임 처짐의 경우 노화전(baseline)의 경우를 제외하고 모두 한계 값을 벗어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 하이브리드 차체의 노화에 따른 언더프레임 처짐 변화 특성을 나타내고 있다. Fig. 10에서 보듯이 노화 전(baseline) 처짐량은 한계값내에 존재하지만 자연환경인자에 의한 복합재 적층판의 강성 저하로 복합재 차체가 감당해야 할 하중이 알루미늄 언더프레임에 전가되어 언더프레임의 처짐량이 노화시간이 증가함에 따라 커짐을 확인할 수 있다. 즉, 복합재료의 자연환경인자에 의한 물성 저하가 하이브리드 차체의 구조안정성을 저하시키는 것이다.

따라서, 하이브리드 차체의 경우 복합재 구조물의 노화 진행을 최소화하는 방안(수분 및 자외선 차단 페인팅 기술) 또는 설계 보완(고강성 복합재 사용 또는 치수수정)이 요구된다. 하이브리드 차체의 구조안정성 평가결과, 복합재 적층판이 노화되기 이전(baseline)에는 강성 및 강도 측면에서 모두 개발요구사항을 만족시키고 있음을 알 수 있다. 그러나, 복합재료에 대한 자연환경인자 영향 평가 후 구조거동을 보면, 강성저하로

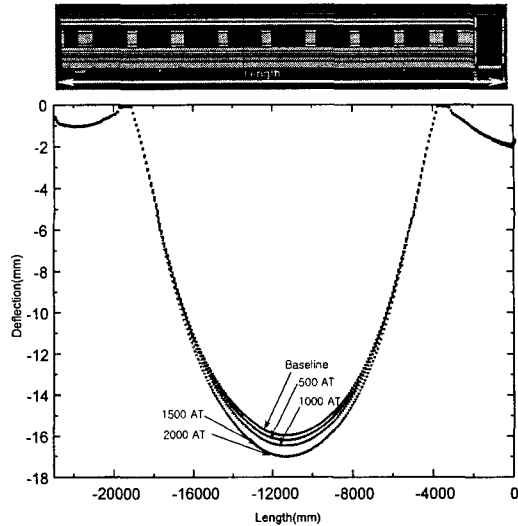


Fig. 10 Deflections along central line of the underframe with increasing aging time

인해 하이브리드 차체의 구조안정성 특히, 언더프레임의 처짐이 개발요구사항을 만족시키지 못하고 불안정상태(unstable)를 보이고 있다. 즉, 차량설계 시 복합재료에 대한 노화특성을 고려하지 않는다면 일정기간 차량 운행 후 구조적 불안정 상태가 되어 예기치 못한 위험한 상황을 맞을 수도 있게 된다는 것이다. 따라서, 복합재료를 차체 재료로 사용하는 하이브리드 차체의 경우 복합재료의 노화 특성을 면밀히 검토한 후 설계에 반영하여야 할 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 가속노화시험을 통해 복합재료의 강성 및 강도저하를 측정하였으며 복합재의 물성저하가 한국형 틸팅열차의 하이브리드 차체 구조물의 거동에 미치는 영향을 설계단계에서 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 온도, 수분, 자외선 등에 장기간 노출된 T300/AD6005 그라파이트/에폭시 복합재료 시편에 대한 가속노화시험을 웨더-오미터를 사용하여 500, 1000, 1500, 2000시간동안 수행하였다. 가속노화환경에 노출된 시편들은 노출시간이 경과함에 따라 강성 및 강도가 현저히 저하되는 경향을 보였다. 2000시간의 가속노화 후 강성의 경우, 섬유방향 인장강성(-17.5%)과 1-2방향 전단강성

(-8.6%)이 큰 물성저하 현상을 보였고 강도의 경우, 섬유직각방향 인장강도(-27.74%)와 섬유방향 압축강도(-18.19%)가 초기치에 비해 물성저하 정도가 크게 나타났다. 또한, 전자현미경에 의한 표면관찰결과 모재균열과 모재손실이 발생함을 확인하였다.

(2) 한국형 틸팅열차의 하이브리드 차체에 대한 구조 안정성 해석결과 복합재료의 노화 이전에는 하이브리드 차체가 강성 및 강도 측면에서 모두 개발요구사항을 만족하였으며 차체 경량화를 이룰 수 있음을 확인하였다. 그러나, 지상환경 가속 노화 시험결과 복합재료의 강성 및 강도 저하로 인해 하이브리드 차체의 구조 안정성이 노화시간이 증가함에 따라 악화됨이 고찰되었다. 특히, 언더프레임의 처짐량이 500시간 가속노화 동안 한계값을 넘어 구조적 불안정 상태에 도달하게 되었다.

(3) 한국형 틸팅열차의 하이브리드 차체는 지상 환경에서 장기간 안전한 운영을 위하여 설계 단계에서 복합재 노화특성을 최소화 시키는 수분 및 자외선 차단 페인팅 기술적용 또는 고강성 복합재 적용이 요구된다.

후 기

본 연구는 철도청에서 주관하는 철도기술연구 개발사업의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Shin, K. B., Hahn, S. H. and Park, K. J., 2003, "Structural Stability of Composite Carbody for Korean Tilting Train eXpress with the Service

speed of 180km/h," *The 2003 Autumn Conference & Meeting of Korean Society of Mechanical Engineers, Material and Fracture Division*, pp. 108~113.

(2) Shen, C. H. and Springer, G. S., 1977, "Effects of Moisture and Temperature on the Tensile Strength of Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 11, pp. 2~16.

(3) Niu, M. C., 1992, *Composite Airframe Structures*, Connilit Press LTD., First Edition, pp. 357~382.

(4) Larsson, F., 1986, "The Effect of Ultraviolet Light on Mechanical Properties of Kevlar 49 Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 15, pp. 19~22.

(5) Ci65/XWA Weather-Ometer Manual, 1992, Atlas Electric Devices Company.

(6) Hong, S. H., Shin, K. B., Jung, B., Hwang, T. G., Kim, J. S., Kim, C. G. and Hong, C. S., 1998, "Prediction of Long-Term Performance of a Composite Material Using Accelerated Environmental Test," *The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 11, No. 5, pp. 1~13.

(7) Shin, K. B., Kim, C. G. and Hong, C. S., 2003, "Correlation of Accelerated Aging Test to Natural Aging Test on Graphite/Epoxy Composite Materials," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 22, No. 9, pp. 849~866.

(8) Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock, JIS E 7105.

(9) Shin, K. B. and Hahn, S. H., 2003, "A Study on the Evaluation of the Failure for Carbody Structures made of Laminated Fiber-Reinforced Composite Materials," *The 2003 Autumn Conference & Annual Meeting of Korean Society for Railway*, pp. 65~72.