

설계요구조건 검증을 통한 한국형 고속 틸팅열차(TTX)의 차체 재료 선정에 관한 연구

A Study on Material Selection of the Carbody Structure of Korean Tilting Train eXpress(TTX) through the Verification of Design Requirements

신광복¹ · 구동희² · 한성호¹ · 박기진³

Kwang-Bok Shin · Dong-Hoe Koo · Seong-Ho Hahn · Kee-Jin Park

Abstract

In order to determine the most suitable material system for achieving the lightweight design while fulfilling the design requirements of carbody structures of Korean Tilting Train eXpress(TTX), aluminum carbody, composite carbody, and hybrid carbody combined with aluminum and composite structures were considered in the present study. The finite-element analysis was used to verify the design requirements of the TTX carbody structures with the material system considered in the design stages. The stresses in the carbody structures and deflections of underframe against static load cases were used as design criteria. The results show that the hybrid carbody structures are beneficial with regard to weight savings and structural integrity in comparison to aluminum and composite carbody structures.

Keywords : Base frame(기본 골격), Carbody(차체), Composite material(복합 재료), Hybrid design(하이브리드 설계), Tilting train(틸팅열차)

1. 서론

철도의 고속화를 이루는 방안으로는 크게 두가지 방법이 있다. 그 중 하나는 직선화되고 레일 설비를 설치한 철도 노선을 새로 구축하여 고속 운행이 가능한 철도차량을 제작하여 운행하는 것이며, 두 번째 방안은 기존의 노선을 보완하고 최대한 활용하여 고속화가 가능한 차량을 운행시키는 방법이다. 전자의 경우 현재 경부고속전철 사업이 진행되어 상용운전을 눈앞에 두고 있으며, G7 고속전철의 국산화 개발이 완료되어 300km/h급의 고속전철에 대한 시험운행을 하고 있는 실정이다. 하지만 고속전철은 근본적으로 신선로를 건설해야하기 때문에 비용적으로나, 시간적인 면에서 단점을 지니고 있다. 따라서, 최소한의 비용투자로 일부 기존 철선로를 개량함으로써 차량을 고속화시키는 방안이 추진되고 있다. 한국철도기술연구원(KRRI)에서는

철도기술연구개발사업을 통해 기존선로를 일부 개선함으로써 속도 향상과 승차감을 개선시킬 수 있는 한국형 고속 틸팅열차(TTX) 개발사업을 수행하고 있다. 틸팅열차(tilting train)는 곡선 구간에서 차체를 기울여 원심력을 최소화함으로써 곡선구간에서 속도의 감소없이 안전하게 통과할 수 있고, 승객들의 승차감 또한 향상시킬 수 있는 신 개념의 철도차량이다[1].

특히, 틸팅열차의 차체 경량화는 곡선 구간에서 틸팅시 차체를 기울여야 한다는 점을 고려할 때 틸팅메커니즘의 효율적인 작동과 궤도 부담력 감소로 인한 유지보수 비용 절감 측면에서 가장 중요한 문제로 부각되고 있다. 철도차량의 차체 재료는 강재, 스테인레스강, 알루미늄 그리고 복합재료(composite material)가 현재 사용되고 있으며, 그 중 강재나 스테인레스강 차체(1세대 차체)는 화차, 각종 동차, 기관차, 객차, 전동차의 언더프레임의 후판부재 등에 주로 사용되고 있으나, 알루미늄이나 복합재 차체에 비해 경량화 측면에서 불리한 단점을 지니고 있다. 알루미늄을 이용한 2세대 차체는 초기 기본 차체 구조를 그대로 유지하고 재질

1 정회원, 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단, 선임연구원

2 정회원, 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단, 책임연구원

3 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단, 연구원

만 알루미늄 계열로 하였으나 최근 알루미늄 압출기술의 뒷받침에 힘입어 단순화 및 차체 경량화를 실현한 중공 압출재 알루미늄(hollow aluminum extrusions)을 차체 전장에 걸쳐 적용하고 있다. 국내에서는 표준화 전동차와 G7 고속전철의 차체에 알루미늄을 적용한 사례가 있다. 1990년 후반부터 3세대 차체 재료로 각광받고 있는 신소재 복합재료는 1, 2세대 철도차량에 비해 차체 무게의 절감 효과가 크며, 내구성, 내식성이 우수할 뿐만 아니라 일체성형으로 인한 생산비 절감 및 제조 공정 단축, 미려한 외관제작 용이 등의 많은 장점을 바탕으로 현재 유럽과 일본에서 경량전철과 탈팅열차에 많이 적용되고 있다[2,3]. 본 연구에서는 한국형 고속탈팅열차의 차체 경량화 및 설계요구조건을 만족시킬 수 있는 최적의 재료를 선정하기 위하여 설계단계에서 선정된 재료와 설계 기법에 따른 차체의 구조 거동을 비교하고, 이를 토대로 한국형 고속탈팅열차의 차체 구조 및 제작 개념도를 정립하는데 목적을 두고 있다.

2. 한국형 고속탈팅열차(TTX)의 주요개발사양

한국형 고속탈팅열차는 철도기술연구개발사업을 통해 2006년 시제차 제작을 위해 국책과제로 수행되고 있으며, 현재 차량시스템에 대한 기본설계가 완료되어, 차량제작을 위한 상세설계가 진행되고 있다. 한국형 고속탈팅열차는 그림 1과 같이 6량 1편성으로 최대주행속도 180km/h, 설계속도 200km/h로 설계되었으며, 총무게 344ton, 전체길이 143m, 좌석수 280석(1등석: 60, 2등석: 220)의 EMU(Electric Multiple Unit) 타입의 중고속 열차이다. Table 1은 한국형 고속탈팅열차의 주요개발사양을 보여주고 있다.

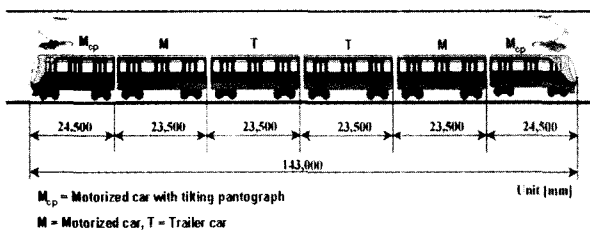


Fig. 1. Schematic of basic formation for TTX

Table 1. Principal data of TTX

Max. running speed	180km/h	Length	143m
Max. design speed	200km/h	No. of seats	280
Train formation	6 cars	No. of motors	16
Train type	EMU	No. of pantographs	2
Weight	344 ton	Max. tilting angle	8°

3. 차체 재료 선정 및 해석조건

3.1 차체 재료의 선정

철도차량의 차체는 주행속도에 대해 공기저항을 적게 받고 차륜과 레일간의 마모를 최소화함으로서 유지보수비용 절감을 이룰 수 있는 경량화를 고려하여야 하며, 부가되는 하중에 대해 충분한 강성 및 강도가 유지되게 설계되어야 한다. 특히, 경량화와 유지비용절감에 대한 요구조건은 철도차량에 새로운 재료의 적용 및 모듈화 설계기법을 도입시켰다. 한국형 고속탈팅열차의 차체 재료로는 경량화 측면과 제작기술 측면에서 유리한 알루미늄 차체, 제작비용 절감 및 기간 단축을 얻을 수 있고 알루미늄 차체에 비해 경량화 측면에서 유리한 신소재 복합재 차체 그리고 경량화 효과를 조금 줄이면서 구조적 안전성과 모듈화 설계가 가능한 하이브리드 차체(hybrid carbody)의 3가지 종류를 기본설계 단계에서 선정하였으며, 각각 기본 골격(base frame)의 두께는 2.8mm의 경우와 3.0mm인 경우를 고려하였다. 여기서, 기본골격의 두께는 그림 2와 같이 차체를 구성하고 있는 골격단면(frame section)의 기본적인 차체 셸 두께(basic thickness of carbody shell)를 의미한다. Table 2는 한국형 고속탈팅열차의 차체 구조로 고려하고 있는 6가지 종류를 나타낸 것이다.

해석에 사용된 재료는 알루미늄 차체의 경우 중공 압출재 알루미늄(Al 6005A-T6), 복합재 차체의 경우 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 적층구조(laminate structure)를 적용하였다. 또한 하이브리드 차체의 경우 언더프레임과 티-슬롯(T-slot)은 중공압출재 알루미늄(Al 6005A-T6)을 적용하고 복합재 구조물(지붕, 사이드프레임, 엔드프레임 등)은 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 적층구조를 적용하였다.

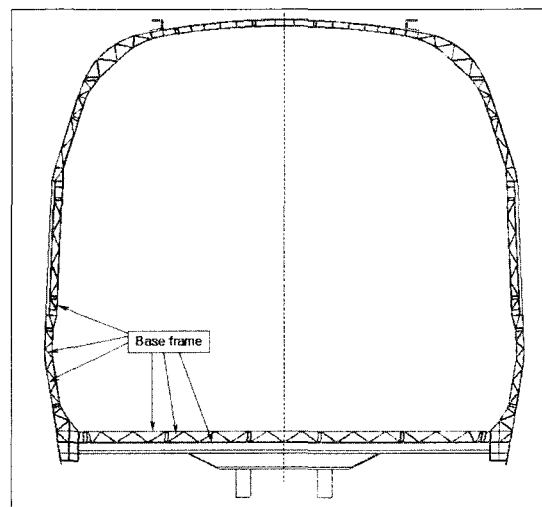


Fig. 2. The drawing of frame section of TTX

Table 2. The material system of TTX carbody structures considered in design stages

	Carbody type	Materials	Thickness of base frame, t_{bf} (mm)
Case 1	Aluminum carbody	Al. 6005A-T6 (hollow extrusions)	2.8
Case 2			3.0
Case 3	Composite carbody	HFG CU-125NS (laminated structure)	2.8
Case 4			3.0
Case 5	Hybrid carbody	Al. 6005A-T6 & HFG CU-125NS	2.8
Case 6			3.0

3.2 차체의 모델링 및 해석 조건

한국형 고속킬링열차의 차체 구조안전성은 JIS E 7105[4]에 따라 평가하도록 개발사양서에 명기되어 있다. 따라서, 기본설계가 완료된 킬링열차의 차체는 JIS E 7105 규정에 의거하여 부가되는 하중조건 하에서 구조해석을 수행한 후 구조안전성 유무를 판단해야 한다[5]. 본 연구에서는 해석대상을 알루미늄 차체(case 1 & 2), 신소재 복합재 차체(case 3 & 4) 그리고 알루미늄과 신소재 복합재 구조물이 결합된 하이브리드 차체(case 5 & 6)를 선정하여 각각의 차체구조들이 수직하중 및 비틀림 모멘트를 받는 경우 구조안전성을 평가하였다. 차량은 하중이 가장 크게 분포하는 동력차(M Car)를 선택하였다. 한국형 고속킬링열차의 경우, JIS 규정에 의거하여 차체에 가해지는 수직하중은 46.68ton, 비틀림 모멘트는 4ton · m이었다. 수직하중은 승객과 취부 장비들의 중량을 고려한 것으로 “[(운전정비 중량-대차질량)에 따른 하중+최대승차인원의 질량에 따른 하중]×동적 부가하중계수-(차체중량+시험기자재 중량)에 따른 하중”으로 선정하게 되며 동적 부가하중계수는 주행 중의 상하진동가속도를 고려한 계수로 공기스프링을 사용할 경우 1.1로 정해져 있다. JIS E 7105의 규정에 의거한 한국형 고속킬링열차의 설계 요구조건은 고려되는 하중조건 하에서 차체의 최대응력은 재료의 항복응력을 초과하지 않아야 하며 언더프레임의

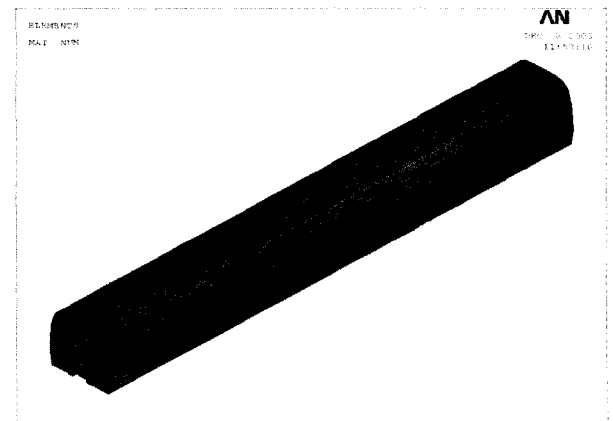
최대치침은 대차 볼스터간 거리의 1/1000인 15.97mm보다 작아야 한다. Table 3은 3가지 차체 구조에 대한 설계 요구조건을 나타내고 있다. 복합재 구조물의 경우 차체의 파손평가는 JIS 규정에는 명시되어 있지 않기 때문에 적절한 파손기준식(failure criterion)을 사용하여 판단해야 한다. 본 연구에서는 직접 적층판 접근방법(direct laminate approach)을 사용하여 복합재 차체 구조물의 파손유무를 평가하였다.

킬링차량 차체(M Car)의 기하학적 형상은 그림 3에 나타난 바와 같이 3차원 CAD 데이터로부터 Ansys70을 이용하여 3차원 카테시안 좌표계에서 X방향을 너비방향, Y방향을 높이방향, Z방향을 길이방향으로 모델링하였으며, 지붕, 사이드프레임, 엔드프레임, 언더프레임 등은 쉘요소(Shell element), 티-슬롯(T-slot)은 빔요소(Timoshenko beam element)를 사용하였다.

차체의 용접과 접합부위는 국부응력(local stress)이 발생하지만 본 논문에서는 전체적인 관점(global view)에서 차체



(a) 3-Dimension CAD model



(b) Finite-element model

Table 3. Design requirements of TTX carbody structures

Type	Under considerable Loading		
	Max. stress (MPa)	Deflection (mm)	
Aluminum carbody	< 207 (yield stress)	< 15.97	
Composite carbody	Suitable failure criterion*		
Hybrid carbody	Aluminum structures		< 207 (yield stress)
	Composite structures		Suitable failure criterion*

*Direct laminate approach was used in this study.

Fig. 3. Computer-aided models for TTX motorized car

의 구조거동을 관찰하는 데 목적이 있으므로 일체형으로 가정하였다. 또한, 재료선정에 따른 설계변경을 최소화하기 위해 모든 차체의 구조에 대해 같은 설계형상을 적용하였다.

3.3 재료 특성

복합재 차체구조는 섬유강화 적층판으로 제작된다고 가정하였으며, 적층판은 항공기 및 지상구조물 등의 제작 시 일반적으로 적용되는 $[0_n/\pm 45_{2n}/90_n]_s$ 의 준등방성(quasi-isotropic)으로 구성하였다. 여기서, n 은 플라이 개수(ply no.)로 차체 부위별 두께에 따라 조절된다. HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 복합재료의 일방향 물성은 Table 4에서 보듯이 ASTM 규정에 따라 구하였으며 시편은 각각의 시험당 6개를 사용하여 평균값을 취하였다.

해석에서 사용된 복합재 적층판 물성은 Table 4의 일방향 물성시험결과를 토대로 이론적인 적층공학상수(laminate engineering constants)[6]를 사용하였으며, Table 5는 계산에 의해 얻어진 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 복합재 적층판의 적층공학상수와 알루미늄 6005A-T6의 물성을 나

Table 4. The unidirectional properties of HFG CU-125NS graphite/epoxy composite materials

Material	Type	Stiffness (GPa)	Strength (MPa)	ASTM
HFG CU-125NS	Longitudinal tensile property	147.45	1834.90	D3039M
	Transverse Tensile property	9.24	38.12	
	Longitudinal compressive property	134.95	1165.27	D3410M
	Transverse compressive property	8.97	130.02	
	Shear Property (12 plane)	6.51	82.43	D5379M

Table 5. The mechanical properties of materials used in the structural analysis

Materials	Stiffness (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/mm ³)
HFG CU-125NS laminate ($[0_n/\pm 45_{2n}/90_n]_s$)	$E_1=E_2=57.61$	$\nu_{12}=\nu_{13}=0.297$	1.6×10^{-6}
	$G_{12}=G_{13}=22.21$		
Al. 6005A-T6	$E=69$	0.33	2.7×10^{-6}
	$G=26$		

n = Number of ply, E = Young's modulus, G = Shear modulus
 E_1 = Longitudinal modulus, E_2 = Transverse modulus
 G_{12} = 12-direction shear modulus, G_{13} = 13-direction shear modulus
 ν_{12} = 12-direction poisson's ratio, ν_{13} = 13-direction poisson's ratio

타내고 있다.

4. 차체의 재료에 따른 설계요구조건 검증

철도차량의 차체는 설계단계에서 구조적인 안전성을 UIC, JIS 등의 철도규격에 따라 검증한 후 상세설계 및 제작 단계로 넘어가야 한다. 따라서, 본 절에서는 한국형 고속터미널열차의 차체 구조로 검토중인 알루미늄 차체, 복합재 차체 그리고 하이브리드 차체를 기본설계단계에서 JIS E 7105에 따라 설계요구조건을 검증하여 각각의 차체 구조에 대한 구조 안전성을 평가하였다.

4.1 알루미늄 차체에 대한 구조안전성 평가

그림 4는 수직하중시 알루미늄 차체(case 1)의 최대응력 분포를 나타내고 있으며, Table 6은 기본골격 두께(t_{bf})의 변화에 따른 알루미늄 차체의 해석결과를 종합적으로 나타내고 있다.

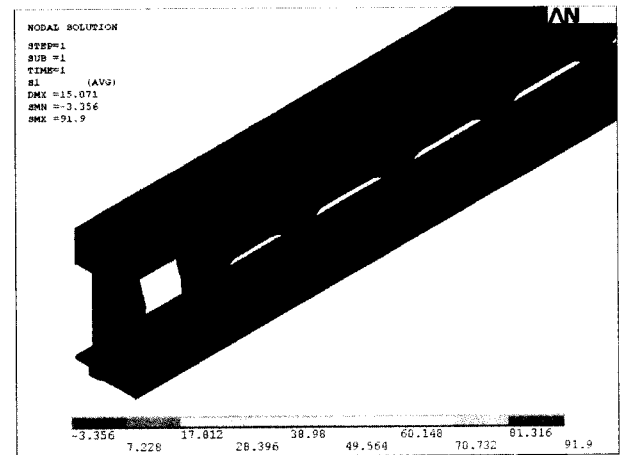


Fig. 4. The contour of maximum stress for aluminum carbody with $t_{bf} = 2.8\text{mm}$ under vertical load

Table 6. Analysis results for aluminum carbody

	Limit value	Case 1 ($t_{bf} = 2.8\text{mm}$)	Case 2 ($t_{bf} = 3.0\text{mm}$)
Max. stress (MPa)	< 207 (yield stress)	91.90 (under vertical loading)	86.24 (under vertical loading)
		79.31 (under twist loading)	73.46 (under twist loading)
Deflection (mm)	< 15.97	15.00 (under vertical loading)	14.16 (under vertical loading)
Weight (ton)	-	7.54	7.88

t_{bf} = Thickness of base frame

알루미늄 차체의 경우 수직하중시 최대응력은 사이드 프레임에서 세 번째 창문이 부착된 오른쪽 아랫부분에서 발생하였으며, Table 6에서 보듯이 case 1과 case 2 모두 수직하중시 최대응력은 알루미늄의 항복강도인 207MPa에 비해 약 1/2.3~1/2.8정도로 낮게 계산되었다. 또한 비틀림 모멘트시 발생하는 최대응력은 수직하중시 최대응력보다 더 작게 계산되었다. 즉, 차체에서 발생하는 응력은 항복응력을 기준으로 안전계수가 약 2.3으로 비교적 안전함을 알 수 있다.

수직하중시 발생하는 언더프레임의 최대처짐은 모두 허용 기준(15.97mm)보다 작게 계산되어 구조적인 안전성을 확보할 수 있었으며 알루미늄 차체의 무게는 case 1은 약 7.54 ton이며, case 2는 약 7.88 ton으로 계산되었다.

4.2 복합재 차체에 대한 구조안전성 평가

Table 7은 수직하중과 비틀림 모멘트시 복합재 차체에 대한 해석결과를 종합적으로 나타내고 있다. 복합재 차체의 경우 수직하중시 발생하는 차체의 최대응력은 알루미늄 차체와 같이 세 번째 창문이 부착되는 오른쪽 아랫부분에서 발생하였으며 최대응력값은 알루미늄 차체와 비슷하게 계산되었다.

복합재 차체의 경우에는 복합재료의 파손경향이 일차원 혹은 이차원이 아닌 복잡한 파손양상(모재균열, 층간 분리, 섬유파손 등)을 보이므로 파손평가는 알루미늄 차체와 달리 단순히 최대응력만으로는 평가할 수 없다. 따라서, 층간 접근방법(ply by ply approach) 또는 전체 적층판 접근방법(total laminate approach)을 사용하여 평가해야 한다. 본 연구에서는 전체 적층판 접근방법인 Puppo-Evensen 파손기준식[7]과 Guess-Gerstle 파손기준식[8]을 이용하여 복합재 차체 구조물의 파손을 평가하였는데 Puppo-Evensen과 Guess-Gerstle 파손기준식은 복합재 적층 구조물에 대한 빠른 설계 검증에 주로 사용된다고 알려져 있다[9].

Puppo-Evensen 파손기준식은 평면응력상태이고 상호작용 계수 $\gamma \leq 1$ 이면 식 (1)과 같이 주어진다.

for $\gamma \leq 1$,

$$F_{Puppo-Evensen} = \left(-\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 - \gamma \left(\frac{X}{Y}\right) \left(\frac{\sigma_x}{X}\right) \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right) + \gamma \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 = 1$$

$$F_{Puppo-Evensen} = \gamma \left(\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 - \gamma \left(\frac{X}{Y}\right) \left(\frac{\sigma_x}{X}\right) \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right) + \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

여기서, 상호작용 계수(interaction factor) γ 는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\gamma = \frac{3S^2}{XY} \quad (2)$$

상호작용계수 γ 는 재료의 강도들이 서로에게 미치는 상호영향을 고려한 계수로 등방성재료인 경우 1, 직물 같은 재료(fabric-like material)인 경우 0이 된다.

Puppo-Evensen 파손기준식은 상호작용계수 γ 가 1보다 작을 경우 식 (1)과 같이 두 개의 타원 식(two distinct ellipse)으로 표현되고 타원들이 교차되는 영역이 파손면(failure surface)으로 정의된다. 식 (1)에 표현된 X, Y 그리고 S는 적층판 축(laminate axes)에 대한 강도를 나타내며 σ_x , σ_y 그리고 τ_{xy} 는 적층판 축에 대한 차체의 응력성분을 나타낸다.

Guess와 Gerstle 파손기준식은 Norris의 파손기준식과 유사하며 전단강도(S)는 고려하지 않고 있다. 그들의 파손기준식은 평면응력상태일 때 식 (3)과 같이 주어진다.

$$F_{Guess-Gerstle} = \left(\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 - \frac{\sigma_x}{X} \frac{\sigma_y}{Y} + \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

식 (1)과 식 (3)의 전체 적층판 접근방법을 이용하여 복합재 차체 구조물의 파손 평가를 위해서는 적층판에 대한 강도(X, Y 그리고 S)를 시험을 통해 구해야 한다. 본 연구에서는 복합재 적층판의 강도 측정을 위해 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 적층판을 오토클레이브 성형 후 시편을 제작하였으며 시편갯수는 시험당 6개였고 사용된 적층판의 구성은 $[0_3/\pm 45_6/90_3]_s$ 로 두께는 3.0mm이다. 두께를 3.0mm로 선택한 이유는 case 4($t_{bf}=3.0mm$)에 대한 파손평가를 위해서이다. Table 8은 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 적층판에 대한 강도 측정 결과를 나타내고 있다.

그림 5는 case 4에 대한 Puppo-Evensen 파손기준식과 Guess-Gerstle 파손기준식을 적용한 복합재 차체의 파손영역을 나타내고 있으며, 복합재 차체에 발생하는 응력분포는 매우 안전한 상태임을 확인하였다. 이때, 복합재 차체는 알루미늄 차체에 비해 약 40%의 무게절감효과를 가져올 수

Table 7. Analysis results for composite carbody

	Limit value	Case 3($t_{bf} = 2.8mm$)	Case 4($t_{bf} = 3.0mm$)
Max. stress (MPa)	Using direct laminate approach	91.47 (under vertical loading)	86.20 (under vertical loading)
		78.92 (under twist loading)	73.43 (under twist loading)
Deflection (mm)	< 15.97	18.23 (under vertical loading)	16.97 (under vertical loading)
Weight (ton)	-	4.47	4.67

Table 8. Strengths for HFG CU-125NS graphite/epoxy laminates

Material	Type	Strength(MPa)
HFG CU-125NS Laminate ([0 ₃ /±45 ₆ /90 ₃] _s)	X=Y	795.48
	S	128.92

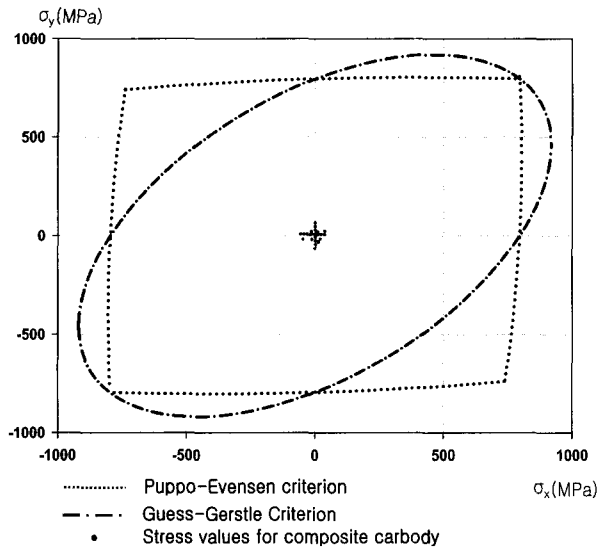


Fig. 5. Failure surfaces for composite carbody using direct laminate approach

있을 것으로 예상되었다. 하지만 수직하중시 언더프레임의 처짐량이 case 3의 경우 18.23mm로 허용기준을 크게 초과 하였으며, case 4의 경우에도 허용기준보다 높게 계산되어 최대처짐에 대한 구조적인 안전성을 확보하기가 어려웠다. 따라서, 복합재 차체의 경우 언더프레임의 강성을 증가시키는 설계기법이나 고강성 복합재 사용이 고려되어야 한다.

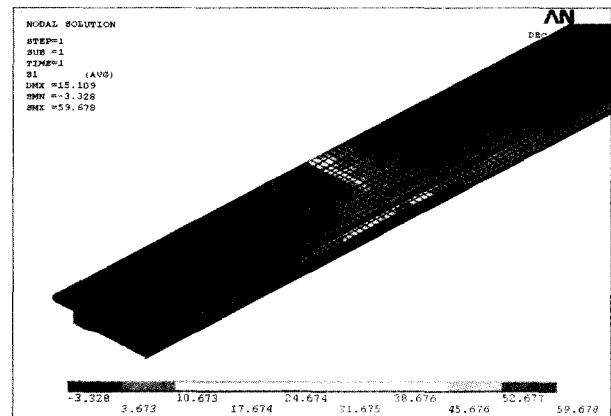
4.3 하이브리드 차체에 대한 구조안전성 평가

하이브리드 차체의 경우 알루미늄을 적용한 언더프레임과 복합재를 적용한 구조물(지붕, 사이드프레임, 엔드프레임)에 대해 각각의 구조안전성을 평가하였으며 Table 9는 하이브리드 차체의 해석결과를 종합적으로 비교하여 나타내고 있다.

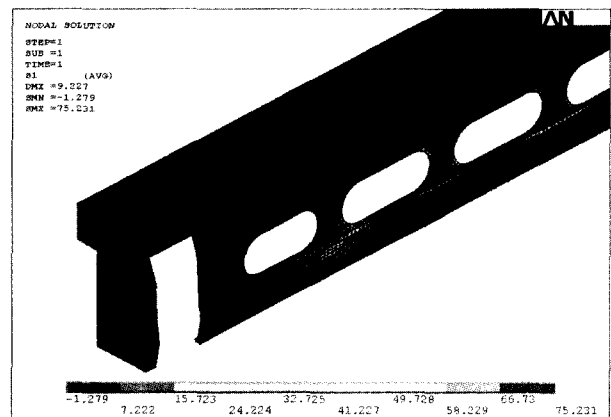
하이브리드 차체의 경우 알루미늄 언더프레임의 최대응력은 case 5와 case 6 모두 알루미늄의 항복응력보다 1/3 정도로 작게 계산되어 구조적인 안전성을 확인할 수 있었으며, 복합재 구조물에 대한 구조적인 안전성 검증은 Pупpo-Evensen 파손기준식과 Guess-Gerstle의 파손기준식을 적용하여 평가한 결과 그림 5와 유사한 결과를 보여 구조적으로 매우 안전하다는 것을 확인하였다.

Table 9. Analysis results for hybrid carbody

	Type	Limit value	Case 5($t_b=2.8\text{mm}$)	Case 6($t_b=3.0\text{mm}$)
Max. stress (MPa)	underframe (aluminum)	< 207	61.11 (under vertical loading)	59.68 (under vertical loading)
			78.89 (under twist loading)	73.39 (under twist loading)
	Other parts (composite)	Using direct laminate approach	79.82 (under vertical loading)	75.23 (under vertical loading)
			75.27 (under twist loading)	68.56 (under twist loading)
Deflection (mm)	-	< 15.97	16.26 (under vertical loading)	15.11 (under vertical loading)
Weight (ton)	-	-	6.00	6.25



(a) Aluminum structure(underframe)



(b) Composite structure

Fig. 6. The contour of maximum stress for hybrid carbody with $t_b=3.0\text{mm}$ under vertical load

그림 6은 case 6에 대한 수직하중시 알루미늄 언더프레임과 복합재 구조물(지붕, 사이드프레임, 엔드프레임)의 최대응력 분포를 나타내고 있다. 수직하중시 언더프레임의 처짐

량은 case 5의 경우 허용기준을 초과하였지만 case 6의 경우 최대처짐이 15.11mm로 허용기준보다 작게 계산되었다. 하이브리드 차체는 알루미늄 차체에 비해 약 20%정도의 차체 경량화 효과를 가져올 수 있을 것으로 예상되었다.

4.4 구조안전성 평가결과 요약

Table 10은 알루미늄 차체, 복합재 차체 그리고 하이브리드 차체의 구조해석 결과를 종합적으로 비교한 것이다. 결과에서 보듯이 차체에서 발생하는 최대응력은 6가지 차체 구조 모두 구조적인 안전성을 확보할 수 있었으나, 복합재 차체(case 3 & 4)와 하이브리드 차체(case 5)의 경우 수직하중시 발생하는 언더프레임의 처짐량이 허용기준을 초과하였다.

그림 7은 수직하중시 재료 변화에 따른 언더프레임의 처짐을 도식적으로 나타낸 것으로, 알루미늄 차체, 하이브리드 차체 그리고 복합재 차체 순으로 처짐량이 커짐을 알 수 있

Table 10. Summaries of analysis results with carbody types

	Carbody type	Max. stress (MPa)	State	Deflection (mm)	State	Weight (ton)
Case 1	Aluminum	91.90	safe	15.00	safe	7.54
Case 2	carbody	86.24	safe	14.16	safe	7.88
Case 3	Composite	91.47	safe	18.23	fail	4.47
Case 4	carbody	86.20	safe	16.97	fail	4.67
Case 5	Hybrid	79.82	safe	16.26	fail	6.00
Case 6	carbody	75.23	safe	15.11	safe	6.25

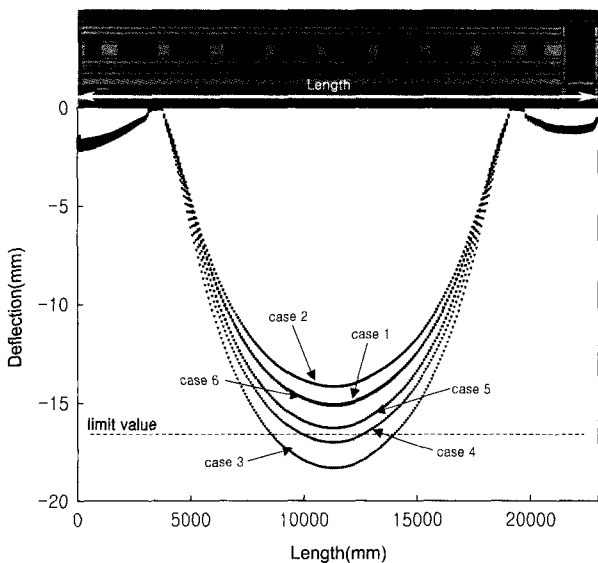


Fig. 7. Comparisons of deflections along central line of the underframe

다. 차체의 무게는 알루미늄 차체를 기준으로 비교할 때 복합재 차체의 경우 약 40%의 무게 절감이 예상되며, 하이브리드 차체의 경우 약 20%의 무게 절감이 예상되었다.

5. TTX 차체 구조의 제작 방향

한국형 고속탈링열차의 차체는 주요 전장품이 모두 하부 구조에 취부되므로 언더프레임은 매우 중요한 부위이다. 이에 해석결과를 바탕으로 차량의 하부구조 안전성을 보장하면서 차체의 경량화를 추구할 수 있는 차체구조는 하이브리드 방식(case 6, $t_b=3.0\text{mm}$)임이 확인되었다. 그림 8은 해석 결과를 바탕으로 결정된 한국형 고속탈링열차의 제작 개념도를 나타내고 있으며, 그림 9는 CATIA V5를 활용한 3차원 기본설계를 바탕으로 제작된 한국형 고속탈링열차의 축소 모형을 보여주고 있다.

그림 8에서 보듯이 하이브리드 차체의 언더프레임은 금속 재료 제작할 예정이며, 나머지 차체 구조물(지붕, 사이드프레임, 엔드프레임)은 신소재 복합소재를 적용하여 제작할 예정이다. 각각의 구조물들은 모듈화 설계기법이 도입될 것이고 볼트 체결(1차 접합)과 접착제를 이용한 체결(2차 접합)방법을 동시에 사용하여 구조물들을 조립할 예정이다. 볼트 체결과 접착제 체결방법을 동시에 사용하면 국부응력의 발생이 최소화되고 피로특성이 좋은 것으로 알려져 있다 [10]. 또한, 구조해석결과 하이브리드 차체의 언더프레임 처짐량이 허용기준에 근접하여 언더프레임에 대해 재질변경 또는 강성보강 설계가 요구되며 향후 하이브리드 차체에 대한 자연환경 인자의 영향을 고려한 내구성 평가와 하니컴

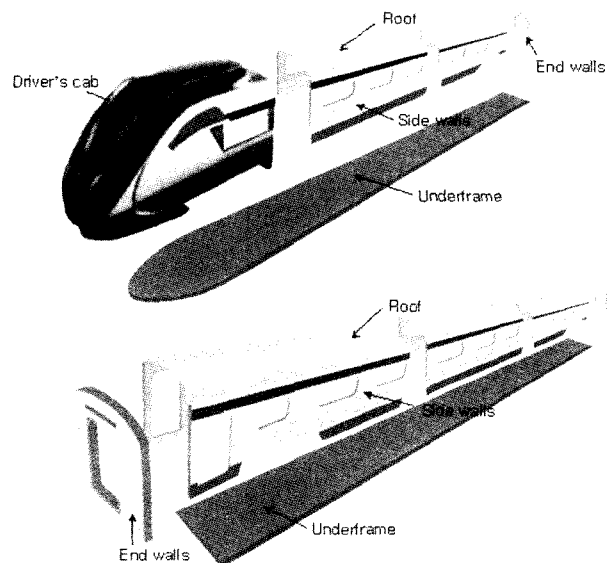


Fig. 8. Manufacturing concept for TTX carbodies

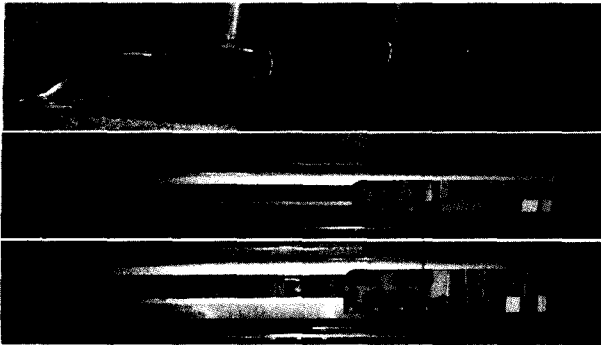


Fig. 9. Reduced scale models for TTX

하이브리드 차체에 대한 연구, 복합재와 금속재간의 접합기술 연구 등을 지속적으로 수행할 예정이다.

6. 결론

본 논문에서는 기본설계에 대한 설계요구조건 검증을 통해 180km/h의 한국형 고속 틸팅열차의 차체 경량화 및 구조 안전성을 확보할 수 있는 최적의 재료를 선정하고자 알루미늄 차체, 복합재 차체 그리고 하이브리드 차체를 선정하여 고려된 하중조건하에서 차체의 구조안전성을 평가하였으며 이에 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 알루미늄 차체의 경우 수직하중 및 비틀림 모멘트시 차체의 최대응력과 언더프레임의 최대처짐 모두 허용기준보다 낮게 계산되어 구조적인 안전성을 확보할 수 있었으나, 고려된 차체 구조 중 무게가 가장 크게 계산되었다.
- (2) 복합재 차체의 경우 알루미늄 차체에 비해 약 40% 정도의 경량화 효과를 기대할 수 있으나 수직하중시 언더프레임의 처짐량이 허용기준을 초과하여 구조적인 안전성을 확보하기 어려웠다. 따라서, 복합재 차체를 제작할 경우 설계요구조건을 만족시키기 위해서는 고강성 복합재 사용 또는 언더프레임의 강성보강 설계가 요구된다. 또한, 복합재 차체에서 발생하는 응력은 집적 적층판 접근방법을 사용하여 파손유무를 판단하였으며 그 결과 매우 안전한 것으로 확인되었다.
- (3) 하이브리드 차체의 경우 언더프레임은 알루미늄을 적용하고 나머지 차체 구조물은 적층 복합재를 적용했을 때 약 20%의 차체 경량화 효과를 가져오며, 수직하중 및 비틀림 모멘트시 차체의 응력 및 언더프레임의 처짐량에 대해 구조적인 안전성을 확보할 수 있었다.
- (4) 알루미늄과 신소재 복합재를 적용한 하이브리드 차체

개발은 한국형 고속틸팅열차의 차체 경량화와 구조안전성 측면을 고려할 때 최적의 차체 구조임을 확인하였다. 따라서, 향후 언더프레임의 재질변경 및 강성보강 설계, 충돌안정성 등의 동적 거동을 고려한 차체 설계기술, 금속재와 복합재간의 접합부 설계 기술 그리고 하이브리드 차체의 제작기술에 대한 심도 깊은 연구가 요구된다.

후 기

본 연구는 철도청 철도기술연구개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. K. B. Shin, W. H. You and H. S. Moon, "The application of composite materials in railway vehicle system", The Korean society for composite materials, Vol.15, No.5, pp.66-71, 2002.
2. K. J. Park, K. B. Shin and S. H. Hahn, "Application of composite materials in Korean eXpress Tilting Train(TTX) system," The 2003 Autumn Conference of Korean society for composite materials, pp.65-68, 2003.
3. G. Belingardi, M. P. Cavatorta and R. Duella, "Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train", Composite structures, Vol.61, pp.13-25, 2003.
4. Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock, JIS E 7105.
5. K. B. Shin, S. H. Hahn and K. J. Park, "Structural stability of composite carbody for Korean Tilting Train eXpress with the cervice speed of 180km/h", The 2003 Autumn Conference of Korean Society of Mechanical Engineers, Material and Fracture Division, pp.108-113, 2003.
6. R. M. Jones, "Mechanics of composite materials", Washington, D. C., McGRAW-HILL KOGAKUSHA Ltd., 1975.
7. A. H. Puppo and H. A. Evensen, "Strength of anisotropic materials under combined stresses", AIAA Journal, Vol.10, pp.468-474, 1972.
8. T. R. Guess and F. P. Gerstle, "Deformation and fracture of resin matrix composites in combined stress states", Journal of Composite Materials, Vol.11, pp.146-163, 1977.
9. K. B. Shin and S. H. Hahn, "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, 2003.
10. A. Starlinger, "Transportation industry applications of ABAQUS at ALCAN", ABAQUS Users Conference Proceedings, Maastricht, pp.1-16, 2002.