

복합재 틸팅열차 차체 구조물의 기본설계 검증을 위한 강도 평가

신광복* · 박기진**

The Evaluation of the Structural Strength to Check the Basic Design for the Composite Carbody of the Tilting Train

KwangBok Shin*, KeeJin Park**

Key Words: Tilting Train(틸팅열차), Composite Carbody(복합재 차체)

Abstract

Using composite materials for the carbody of tilting train has many advantages such as manufacturing variety, specific high-strength & stiffness characteristics, and long-life durability, but the strongest advantage could be the possibility of lightweight product. In the leading countries, the composite materials are used for the material for drivers' cabs, interior/exterior equipments for railway train, and it is now developing the composite materials applied for the train carbody structure. In this paper, we conducted the evaluation of structural stability for the aluminum and composite carbody of the Korean Tilting Train eXpress(TTX) with the service speed of 180km/h.

1. 서 론

최근 급증하는 교통수요에 비해 교통시설의 공급능력부족으로 심각한 교통장애와 혼잡이 가중되어 국민경제활동 위축 및 국가 경쟁력 저하를 초래하고 있는 실정이며, 이를 해소하기 위한 도로에서의 고속화에 대한 노력은 자동차의 급증으로 인해 고속도로에서조차 원하는 시간 내에 목적지에 도달할 수 없을 정도로 한계적 상황에 도달하였다. 이에 국내에서는 경부고속철도 건설을 통한 고속화와 수송력 증대에 박차를 가하고 있으나, 이는 고속용 신선로와 급전시스템을 이용하는 새로운 시스템으로 지역 간 균형발전, 기존 철도간선과의 연계 및 철도전반의 수송 효율성을 높이는 데는 한계가 있다. 현재 한국철도기술연구

원(KRRI)에서 개발중인 최고운행속도 180km/h급의 한국형고속틸팅열차(TTX)는 기존선로를 일부 개량하여 곡선부에서도 속도의 감속 없이 운행할 수 있는 틸팅시스템을 갖춘 차량으로 고속철도 개통시 비수혜지역 주민에게 편익을 제공하고 수송분담률 향상과 빠른 시간 내에 원하는 장소에 도달할 수 있는 서비스를 제공해 줄은 물론, 많은 물량을 신속하게 전달하여 경제발전에 이바지할 수 있는 장점을 가지고 있다. 틸팅열차는 승객이 받는 승차감 향상을 도모코자 차체를 틸팅 메카니즘에 의해 기울여 원심력을 감소시키는 원리로 곡선부에서 속도향상 효과도 가져온다. 따라서 차체의 무게감소는 틸팅시스템의 효율적인 작동과 궤도 부담력감소, 유지보수 비용 절감을 위해서 가장 중요한 문제로 부각되고 있다[1,2]. 현재 개발중인 한국형고속틸팅열차의 차체 구조재료는 압출재 알루미늄을 선정하여 기본설계를 하였으나 차체 무게감소를 위해서 신소재 복합재를 적용한 차체개발을 추진하고 있다.

본 연구에서는 복합재를 적용한 차체 구조물의

* 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 시스템엔지니어링팀 선임연구원

** 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 시스템엔지니어링팀 연구원

구조안정성을 검증하기 위하여 알루미늄 차량과 복합재 차량에 대한 상세한 3차원 모델링과 구조 해석을 통하여 차체의 구조적 특성을 파악하여 복합재 차체 구조물의 기본설계 검증 및 개발가능성을 확인하고자 한다.

2. 틸팅차량 차체 구조물 기본설계 및 구조해석 조건

2.1 틸팅차체 구조물 기본설계

틸팅차량의 기본사양(그림 1)은 6량 1편성으로 최대주행속도 180km/h, 총무게 344ton, 전체길이 143m로 기본설계 되었으며, 2D CAD도면을 CATIA로 입포트하여 CATIA상에서 스케치 및 extrude기능 등을 이용하여 3차원 모델링 하였다. 그림 2는 동력차(M2 Car)의 3차원 모델링 작업과정을 나타내고 있다.

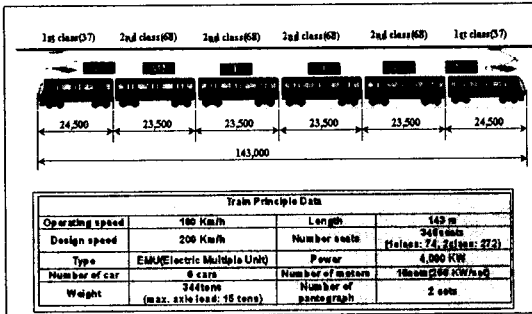


그림 1. 틸팅차량의 기본사양

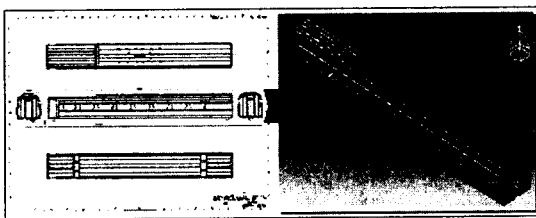


그림 2. M2 Car에 대한 3D CATIA 모델링

2.2 틸팅차량 차체 모델링

틸팅차량 차체의 기하학적 형상은 그림 3에 나타난 바와 같이 Ansys 7.0을 이용하여 3차원 카테시안 좌표계에서 X방향을 너비방향, Y방향을 높이방향, Z방향을 길이방향으로 모델링하였으며, 공기스프링이 차체에 연결되는 부위의 면(area)에 대해 변위를 구속하였다. 또한 FE 모델을 위해

사용한 절점과 요소들의 수는 표 1과 같다.

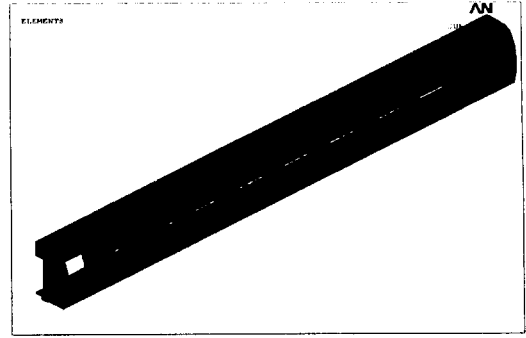


그림 3. M2 Car 차체 모델링 (1/2 모델)

표 1. FE 모델에 사용된 절점과 요소들의 수

형상	Element's Type	구현된 부위	개 수
Surface	Shell element(63)	차체 전반 (Carbody)	102724
Line	Beam element(188)	T-Slot	582

2.3 차체 재료의 물성치

틸팅차량 차체 구조재로 사용되는 재료는 알루미늄의 경우 Al 6005A-T6을 고려하였으며, 복합재의 경우 카본/에폭시를 고려하였다. 표 2는 해석에 사용된 알루미늄과 복합재료의 물성을 나타내고 있다. 이때 복합재 차체는 알루미늄 차체와의 구조강도비교를 위하여 섬유강화 적층판으로 모두 제작된다고 가정하였다. 또한 복합재 차체 구조해석시 적층판 물성은 공학상수(Engineering constants)를 사용하였다.

표 2. 해석에 사용된 복합재 및 알루미늄 물성치

재료	적층각	강성 (인장) GPa	강성 (전단) GPa	포아송비 (ν)	밀도 (kg/mm ³)
알루미늄 (Al 6005A-T6)		69	26	0.3	2.7×10 ⁻³
복합재 카본/에폭시	[0 _n /±45 _n /90 _n] _s	E ₁ =69.7	G ₁₂ =26.9	ν ₁₂ =0.296	1.6×10 ⁻³
		E ₂ =69.7	G ₁₃ =26.9	ν ₁₃ =0.296	
		E ₃ =10.3 (수치)	G ₂₃ =4.2 (수치)	ν ₂₃ =0.225 (수치)	

*n = number of ply

2.4 하중조건 및 경계조건

차체의 수직하중과 비틀림하중의 해석시 경계조건 및 하중조건은 JIS E 7105 규정에 준하였으며 표 3과 그림 4에 상세히 나타나있다[3].

표 3. JIS E 7105 규정에 따른 경계조건 및 하중조건

	경계조건	하중조건	하중크기
수직하중 해석	"(a) + (b)" 공기스프링 부착 위치 4곳을 완전 고정	"①" 언더프레임 상면에 분포하중으로 부하	[정비중량 + 최대승차인원 하중] × 1.1 - 차체중량 = 46.68 Ton
비틀림하중 해석	"(b) + (c)" ① 공기스프링 부착 위치 2곳을 완전 고정, ② 부분은 하나의 node를 선택하여 UY, UZ 방향만 구속	"②" 고정한 공기스프링의 반대쪽 모서리 부분에 하중 부하	26.3KN

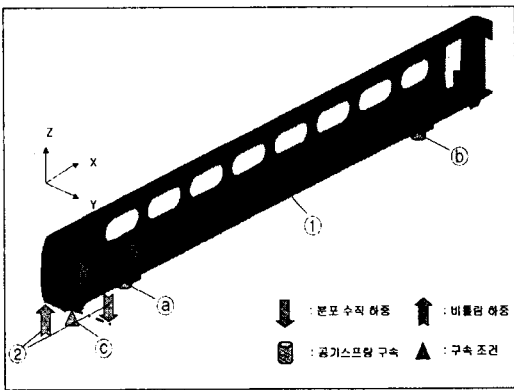


그림 4. 경계조건 및 하중조건

3. 틸팅차량 차체 구조해석 결과

3.1 알루미늄 차체의 해석결과

3.1.1 수직하중시 해석결과

해석 결과, 그림 5와 같이 차체 언더프레임 상면의 길이방향으로 중간 부위에서 15mm로 최대변위가 발생하며 최대응력(91.9Mpa)은 사이드 프레임에서 세 번째 창문이 부착되는 오른쪽 아랫부분에서 발생한다.

3.1.2 비틀림 하중시 해석결과

해석 결과, 그림 6과 같이 모멘트를 가한 부분의 차체 상부 부분에서 5mm로 최대변위가 발생

하며 최대응력(79.3Mpa)은 엔드 프레임의 출입구 상부 모서리 부분에서 발생한다.

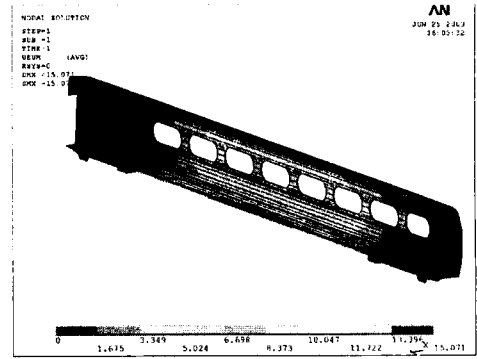


그림 5. 수직하중시 최대변위(알루미늄 차체)

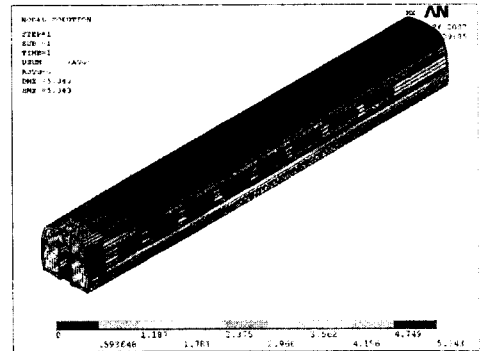


그림 6. 비틀림하중시 최대응력(알루미늄 차체)

3.2 복합재 차체의 해석결과

3.2.1 수직하중시 해석결과

카본/에폭시 차체에 대한 수직하중 해석시 최대변위(그림 7)는 15mm이며 최대응력(91.5Mpa)은 출입문에서 세 번째 창문 아랫부분에서 발생한다.

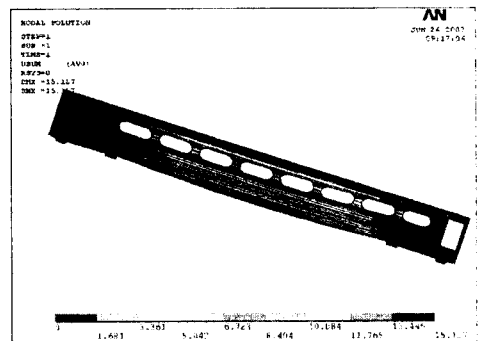


그림 7. 수직하중시 최대변위(복합재 차체)

3.2.2 비틀림하중시 해석결과

그림 8은 카본/에폭시 차체에 대한 비틀림 하중 해석시 최대변위(5.34mm)를 나타내고 있으며, 최대응력은 78.92Mpa로 나타났다.

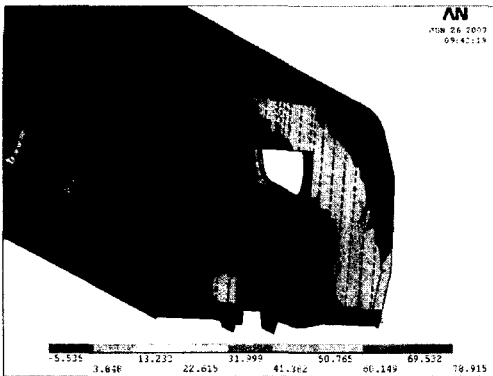


그림 8. 비틀림하중시 최대응력(복합재 차체)

3.3 해석결과 요약

차체 재질에 따른 수직하중과 비틀림하중 해석결과는 표 4에 정리되어 있으며 알루미늄의 항복강도가 210Mpa인 점을 고려할 때 모든 하중조건에서 최대응력이 91.9Mpa(안전계수=3)로 알루미늄의 항복강도보다 크게 낮게 나타났으며, 사이드실의 변형량 또한 대차 중심간의 거리의 1/1000인 15.9mm보다 작게 처지는 것으로 계산되었다. 또한 복합재 적층판에 대한 파손강도는 복합재 차체에 적용할 재료와 동일한 재료로 시편을 제작([0₃/±45₆/90₃]_s, t=2.8mm)하여 측정하였으며, 시편이 완전히 파손되었을 경우 최종파손강도는 643.1 Mpa로 나타났다. 복합재의 파손은 모재파손 등의 1차 층파손(first ply failure) 후 점진적으로 파손이 진행되어 최종적인 적층판 파손에 도달하게 된다. 따라서 복합재 구조물의 파손평가는 파손기준식 또는 시험을 통해 결정해야 하지만, 기본설계 단계에서는 단순한 수치 비교만을 통하여 검증하였다. 복합재 차체에 대한 모든 하중조건에서 계산된 최대응력은 91.5MPa로 복합재(카본/에폭시)의 파단강도 보다 낮게 측정되었으며, 사이드실의 변형량 또한 대차 중심간의 거리의 1/1000인 15.9mm보다 작게 처지는 것으로 계산되었다. 따라서 복합재를 적용한 차체 제작시 알루미늄을 적용한 차체에 비해 무게를 40% 절감시킬 수 있으며 구조적인 안정성 또한 문제가 없음을 확인 할 수 있었다.

표 4. 알루미늄 차체와 복합재 차체의 결과비교

차체 재질		최대변위 (mm)	최대응력 (N/mm ²)	M2 Car 총 무게 (Ton)
수직 하중	알루미늄 (Al 6005A-T6)	15.07	91.9	7.54
	카본/에폭시 (T300/N5208)	15.13	91.46	4.47
비틀림 하중	알루미늄 (Al 6005A-T6)	5.51	79.30	7.54
	카본/에폭시 (T300/N5208)	5.34	78.92	4.47

4. 결론 및 향후 계획

틸팅열차 차체 구조물의 기본설계를 토대로 알루미늄 차체 대비 신소재 복합재 차체에 대한 수직하중 및 비틀림 하중 해석 결과 카본/에폭시 복합재료의 경우 최대 변위 및 최대 응력값은 알루미늄 차체의 경우와 비슷한 결과를 보였으나, 차체 무게를 약 40% 절감시킬 수 있으며, 구조적인 안정성 측면에서도 별 문제가 없음을 확인하였다. 이 결과는 향후 복합재 틸팅차체 구조물에 대한 개발가능성을 긍정적으로 제시할 뿐만 아니라 철도차량의 경량화에도 기여할 것이다. 향후에는 샌드위치 구조를 갖는 복합재 차체에 대한 연구와 복합재 차체 구조물의 파손평가연구를 체계적으로 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 철도청의 철도기술연구개발사업에 의해 지원되고 있으며 이에 감사합니다.

참고문헌

- (1) K.B.Shin, W.H.You, H.S.Moon, 2002, "The application of composite materials in railway vehicle system," The Korean society for composite materials, Vol.15, No.5, pp.66-71.
- (2) K.J.Park, K.B.Shin, S.H.Han, 2003, "Application of composite materials in Korean eXpress Tilting Train(TTX) system," The Korean society for composite materials, pp.65-68.
- (3) JIS E 7105, 1994, "Test method for static load of body structures of railway rolling stock".