

복합재료를 적용한 한국형 고속틸팅열차(TTX)의 차체 구조해석 연구

A study on Structural Analysis of Korean Tilting Train eXpress(TTX) made of Composite Carbody Structures

신광복* 구동회** 박기진***
Shin, Kwang-Bok Koo, Dong-Hoe Park, Kee-Jin

ABSTRACT

The use of composite materials for the carbody structures of tilting train has many advantages because of manufacturing variety, specific high-strength & stiffness characteristics, and long-life durability, but the strongest advantage is 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 all aluminum carbody, all composite carbody and hybrid carbody structures of the Korean Tilting Train eXpress(TTX) with the service speed of 180km/h.

1. 서론

지금까지 국내에서 진행되고 추진되어온 기존 철도의 고속화는 경부선을 중심으로 1968년 95km/h, 1969년 110km/h, 1983년 120km/h, 1985년 135km/h (표준선 구간 140km/h)로 점진적으로 속도향상을 이루었으나, 1985년 이후 선로와 차량 시스템 전반에 대한 기반시설의 개량에 대한 연구투자가 미흡하여 속도향상이 답보상태에 있는 실정이다. 최근 교통수요는 계속 증가하고 있으나 교통시설의 공급능력부족으로 심각한 교통애로와 혼잡이 가중되어 국민경제활동 위축 및 국가 경쟁력 저하를 초래하고 있는 실정이며, 이에 국내에서는 경부고속철도 건설을 통한 고속화와 수송력 증대에 박차를 가하고 있으나, 이는 신선의 건설과 지역 간 균형발전, 기존 철도간선과의 연계 및 철도 전반의 수송 효율성을 높이는 데는 한계가 있다. 따라서 한국철도기술연구원(KRRI)에서는 고속철도 건설과 병행하여 기존선의 속도향상을 위한 고속화 사업을 추진중에 있다. 기존선 속도향상 실용기술개발사업은 기존선로를 일부 개량하여 고속의 추진 성능과 곡선부에서도 속도의 심한 감속 없이 운행할 수 있는 한국형 고속 틸팅열차(TTX)를 개발함으로써 고속철도 개통시 비수혜 지역 주민에게 편의를 제공하는 물론 수송력 증대에 박차를 가할 예정이다.[1]

틸팅차량 시스템은 곡선부에서 승객의 승차감 향상과 고속주행을 위하여 차체를 최대 8°까지 기울여 줌으로써 원심력을 감소시키는 원리이다.[2] 따라서 차체의 무게 감소는 틸팅시스템의 효율적인 작동뿐만 아니라 궤도 부담력을 감소시키므로 유지보수 비용 절감 측면에서도 중요한 요소라고 할 수 있다. 현재 개발중인 한국형 틸팅열차의 차체 구조재료는 압출재 알루미늄을 선정하여 기본설계 하였으나, 차체경량화를 위하여 신소재 복합재와 알루미늄을 결합한 하이브리드 설계기법(Hybrid design technique)을 적용한 차체를 개발중에 있다. 본 연구에서는 기본설계를 바탕으로 알루미늄 차체의 구조적인 안정성을 검증할 뿐 아니라 하이브리드 차체에 대한 상세한 모델링과 구조해석을 통하여 한국형 고속틸팅열차 차체의 구조적인 안정성을 평가하고자 한다.[3]

* 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 선임연구원, 정희원
** 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 책임연구원, 정희원
*** 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 연구원, 비희원

2. 한국형 틸팅열차의 기본사양 및 차체의 복합재료 적용 분야

한국형 고속 틸팅차량의 기본사양은 그림 1과 같이 6량 1편성으로 최대주행속도 180km/h, 설계속도 200km/h로 설계되었으며, 총무게 344ton, 전체길이 143m, 좌석수 346석(1등석: 74, 2등석: 272)의 EMU(Electric Multiple Unit) 타입의 중고속 열차이다.

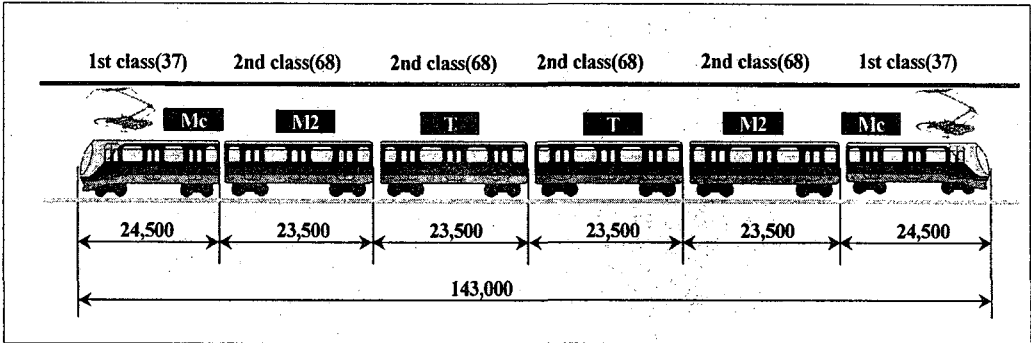


Fig.1 한국형 고속틸팅열차의 제원

철도차량의 차체는 차체의 경량화를 위하여 강재나 알루미늄을 단독으로 적용하기 보다 부분적으로 복합재를 적용하는 하이브리드 설계(Hybrid design)를 바탕으로 차체를 개발하는 추세이며, 한국형 틸팅열차의 차체 역시 그림 2와 같이 언더프레임은 강재나 알루미늄을 적용하고 나머지는 신소재 복합재료를 적용한 하이브리드 설계기법을 적용하여 차체를 개발중에 있다.[4] 본 연구에서는 알루미늄을 단독으로 적용한 차체의 경우를 기본으로 복합재 차체, 하이브리드 차체를 각각 모델링하여 해석함으로써 재료에 따른 틸팅차체의 구조적인 안정성을 비교/평가하였다.

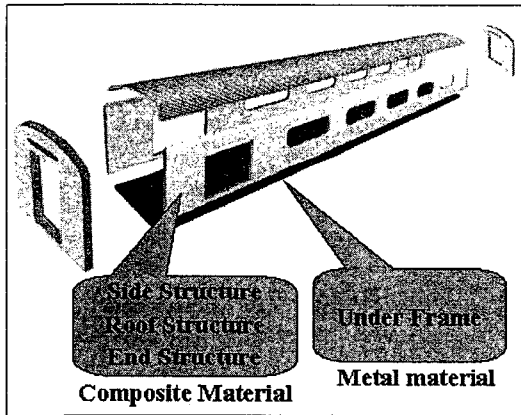


Fig.2 한국형 고속틸팅열차의 차체 제작 개념도

3. 틸팅열차의 차체 모델링 및 해석 조건

□ M2 Car 차체의 모델링

표1 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	188582

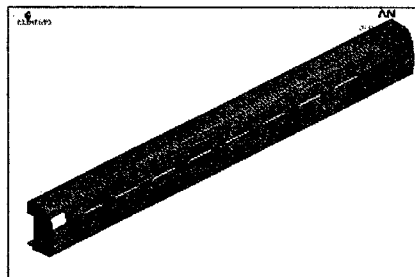


Fig.3 M2 Car 차체 모델링 (1/2 모델)

틸팅차량 차체의 기하학적 형상은 그림 3에 나타난 바와 같이 Ansys 7.0을 이용하여 3차원 카테시안 좌표계에서 X방향을 너비방향, Y방향을 높이방향, Z방향을 길이방향으로 모델링하였으며, 공기

스프링이 차체에 연결되는 부위의 면(area)에 대해 변위를 구속하였다. 또한 FE 모델을 위해 사용한 절점과 요소들의 수는 표 1과 같다.

□ 하중조건 및 경계조건

그림 4는 각각의 하중시험에 대한 경계조건 및 하중조건을 나타내고 있다. 수직하중의 경우 차체의 수직방향 지지는 공기스프링 시트 위치에 지지하고 수평방향의 지지는 강체 운동을 막기 위해 공기스프링 시트 위치에 X, Y 방향을 구속하였다. 하중위치는 JIS E 7105 규정에 따라 언더프레임 상면에 등분포로 부가하였으며 하중의 크기 또한 JIS E 7105 규정에 준하였다.[5] 비틀림하중의 경우 차체 한쪽의 볼스터 중심 선상의 공기 스프링 부착 부위 2군데를 완전 고정하고 고정 부위와 반대편의 차체 언더프레임과 볼스터 중심 선이 만나는 점을 X, Z 방향만 구속하였다. 하중의 위치는 공기 스프링을 구속한 쪽과 반대쪽의 모서리 부분에 부가하였다.

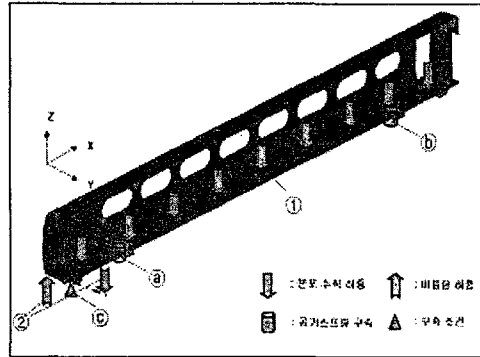


Fig.4 JIS E 7105 규정에 의거한 경계조건 및 하중 조건

□ 차체 재질의 물성치

한국형 틸팅차량의 차체 재질은 알루미늄 6005-T6과 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 복합재료를 적용하였으며, 표 2와 표 3은 해석에 사용된 알루미늄 6005-T6과 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 적층판의 물성치를 나타내고 있다. 이때 복합재 차체는 알루미늄 차체와의 구조강도 비교를 위하여 섬유강화 적층판으로 모두 제작된다고 가정하였다. 적층판 물성은 일방향 물성치를 토대로 적층공학상수(Laminat engineering constants)를 사용하였다.

표2 알루미늄 6005A-T6 물성치

재료	강성 GPa	포아송비 (ν)	밀도 (kg/mm ³)
Al 6005A-T6	E=69 G=26	0.3	1.6×10 ⁻⁶

표3 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 물성치

재료	적층각	강성 GPa	포아송비 (ν)	밀도 (kg/mm ³)
HFG CU-125NS	[0 _n /±45 _{2n} /90 _n] _s	E ₁ =E ₂ =57.61 G ₁₂ =G ₁₃ =22.21	V ₁₂ =V ₁₃ =0.297	1.6×10 ⁻⁶

*n = number of ply(n_{min}=3)

4. 틸팅열차의 차체 해석 결과

□ 알루미늄(Al 6005A-T6) 차체의 해석결과

그림 5는 알루미늄 차체에 대한 수직하중 해석시 최대응력 분포를 나타내고 있다. 알루미늄 차체에 대한 최대응력은 세 번째와 네 번째 창문사이의 아랫부분에서 86.24MPa로 계산되었다. 이는 알루미늄의 항복응력인 207MPa보다 매우 낮은 수치로 구조적인 안정성을 확보할 수 있으며, 비틀림 하중에서도 최대응력은 73.46 MPa로 항복응력에 비해 매우 낮게 측정되었다. 또한 차체 언더프레임 상면의 길이방향으로 중간 부위에서 14.16mm로 최대변위가 발생하였으며, 이는 대차 중심간의 거리의 1/1000인 15.9mm보다 작게 처지는 것으로 측정되었다.

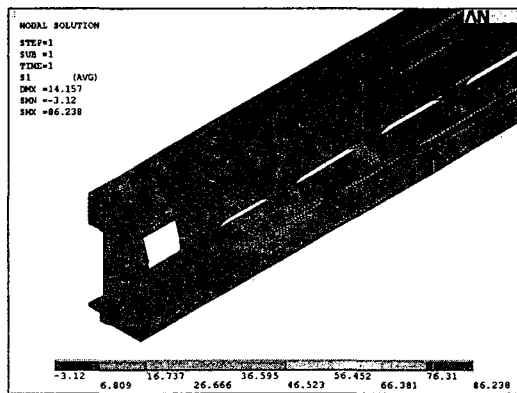


Fig.5 알루미늄 차체의 수직하중시 최대응력

□ 복합재(HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시) 차체의 해석결과

HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 복합재 차체에 대한 수직하중과 비틀림하중 해석시 구속조건

및 하중조건은 알루미늄차체와 동일한 조건으로 해석하였다. 그림 6은 수직하중시 최대응력 분포를 나타내고 있으며, 최대응력은 알루미늄 차체의 경우와 같은 세 번째 창문 아랫부분에서 86.2MPa로 측정되었다. 이때, HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시와 같은 복합재 차체의 경우에는 Puppo-Evensen의 파손기준식과 같은 전체 적층판 접근법을 통해 최대응력에 대한 파손을 분석하였으며, 분석 결과 안정성이 확보되었다.[6] 하지만 차체 언더프레임 상면의 길이방향으로 중간 부위에서 최대변위는 16.97mm로 대차 중심간의 거리의 1/1000인 15.9mm보다 높게 측정되었다. 비틀림하중 해석시 최대변위는 6.02mm이며 최대응력은 73.43MPa로 측정되었다.

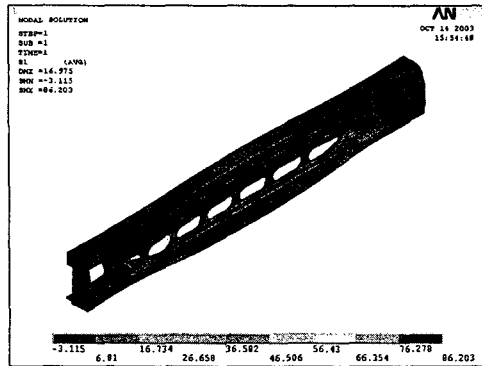


Fig.6 복합재 차체의 수직하중시 최대응력

이때 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 복합재 차체의 무게는 4.66톤이었다.

□ 하이브리드 차체의 해석결과

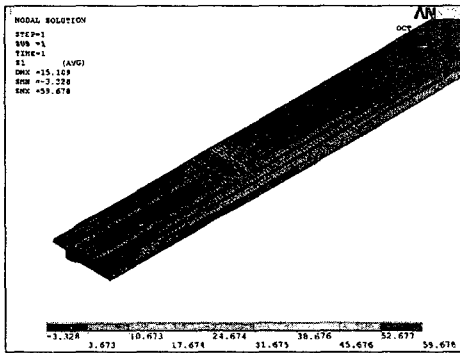


Fig.7 하이브리드 차체의 알루미늄 부분

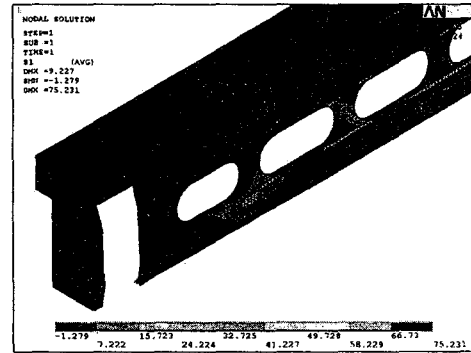


Fig.8 하이브리드 차체의 복합재 부분

수직하중 하에서 하이브리드 차체에 대한 구조해석 결과는 그림 7~8에 나타났다. 그림 7은 언더프레임(알루미늄), 그림 8은 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 복합재 차체의 해석 결과이다. 알루미늄으로 제작된 언더프레임의 최대응력은 73.39MPa로 측정되었고, 복합재 차체의 최대응력은 75.23MPa로 측정되었다. 또한 최대변위는 언더프레임에서 15.11mm로 나타났으며, 하이브리드 차체의 무게는 6.25톤으로 측정되었다.

5. 해석결과 요약 및 결론

표 4는 한국형 고속틸팅열차의 재료에 따른 차체 구조해석 결과를 요약한 것이다. 알루미늄을 차체의 구조재로 적용한 경우 JIS E 7105 규정에 준한 수직하중과 비틀림하중 해석시 구조적인 안정성을 확보할 수 있었지만 무게가 가장 크게 측정되었으며, HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 복합재를 적용한 차체의 경우 차체의 무게는 알루미늄 차체에 비해 약40%정도 감소시킬 수 있었으나 그

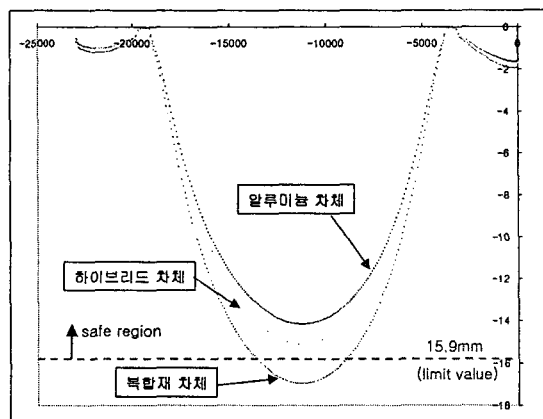


Fig.9 재료에 따른 틸팅열차 차체의 최대변위 비교

림 9의 그래프와 같이 수직하중 해석시 최대변위가 대차 중심간의 거리의 1/1000인 15.9mm보다 높게 측정되어 구조적인 안정성을 확보하기가 어려웠다. 하이브리드 차체의 경우, 수직하중 해석과 비틀림 하중 해석시 최대응력에 의한 파손여부는 Puppo-Evensen의 파손기준식에 의한 분석에서 안전성을 증명할 수 있었다. 최대변위 또한 허용기준보다 낮게 측정되어 구조적인 안정성을 확보할 수 있었으며, 차체의 무게는 알루미늄 차체에 비해 약 20%정도 절감시킬 수 있었다. 따라서 신소재 복합재료와 알루미늄을 결합한 하이브리드 차체개발은 차체 경량화와 구조안정성 측면에서 우수하여 한국형 고속틸팅열차의 차체 구조재로 최적이라 판단된다.

표4 재료 물성에 따른 한국형 틸팅 차체의 해석 결과 비교

차체재질	알루미늄 차체 (Al 6005A-T6)	HFG CU-125NS 차체 (그라파이트/에폭시)	하이브리드 차체 (복합재+알루미늄)
최대응력(MPa)	86.24	86.2	73.39
최대변위(mm)	14.16	16.97(unsafe)	15.11
M2 Car 총 무게(Ton)	7.88	4.66	6.25

참고문헌

1. K. B. Shin, W. H. You, 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, S. H. Han, "Application of composite materials in Korean eXpress Tilting Train(TTX) system," The Korean society for composite materials, pp.65-68, 2003
3. 신광복, 한성호, 박기진, "180km/h급 한국형 틸팅열차 복합재 차체 구조물의 안정성 평가", 대한기계학회 추계학술대회, 2003
4. G. Belingardi, M. P. Cavatorta, 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
5. JIS E 7105, "Test method for static load of body structures of railway rolling stock," 1994
6. 신광복, 한성호, "섬유강화 적층 복합재 차체 구조물의 파손평가 연구", 한국철도학회 추계학술대회, 2003

후 기

본 연구는 철도청 철도기술연구개발사업에 의해 지원되고 있으며 이에 감사합니다.