

최적화 해석기법을 이용한 샌드위치 복합재와 알루미늄 압출재 하이브리드 모듈화 차체구조물의 경량 설계 연구

장형진* · 신광복**† · 한성호***

* 한밭대학교 기계설계공학전공, ** 한밭대학교 기계공학과, ***한국철도기술연구원 신소재틸팅열차시스템연구단

A Study on the Lightweight Design of Hybrid Modular Carbody Structures Made of Sandwich Composites and Aluminum Extrusions Using Optimum Analysis Method

Hyung Jin Jang^{*}, Kwang Bok Shin^{**†} and Sung Ho Han^{***}

^{*} Dept. of Mechanical Design Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

^{**} Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

^{***} Korean Railroad Research Institute

(Received May 31, 2012 ; Revised July 18, 2012 ; Accepted July 18, 2012)

Key Words: Sandwich Composite(샌드위치 복합재), Aluminum Extrusion(알루미늄 압출재), Topology Optimization(위상최적화), Size Optimization(치수최적화), Hybrid Modular Carbody Structure (하이브리드 모듈화 차체 구조물)

초록: 본 논문은 위상최적화와 치수최적화 해석기법을 이용한 샌드위치 복합재와 알루미늄 압출재로 구성되는 하이브리드 철도차량 차체 구조물의 경량 모듈화 설계에 관한 연구이다. 위상최적설계는 초기설계단계에 차체 구조물의 최적의 재료적용부위를 선정하기 위해 사용되었으며, 치수최적화설계는 하이브리드 차체 구조물의 최적 설계 변수를 찾기 위해 사용되었다. 이때, 최적화해석은 일계법과 부분문제근사법을 사용하였다. 위상최적설계해석을 통해 차체 구조물의 강성 및 제작성을 향상시키기 위한 언더프레임, 로우 사이드 패널 모듈에 1차 부재인 알루미늄 압출재의 적용이 적절하고, 샌드위치 복합재는 무게를 최소화하기 위한 2차 부재로서 루프 및 미들 사이드 패널 모듈에 적용이 적합하다는 결론을 얻었다. 또한, 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재로 구성되는 하이브리드 차체 구조물의 무게는 샌드위치 복합재로만 만들어진 차체 구조물과 비교하여 최대 17.7%까지의 경량화 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Abstract: In this study, the lightweight modular design of hybrid railway carbody structures made of sandwich composites and aluminum extrusions was investigated by using topology and size optimization techniques. The topology optimum design was used to select the best material for parts of the carbody structure at the initial design stage, and then, the size optimum design was used to find the optimal design parameters of hybrid carbody structures using first-order and sub-problem methods. Through the topology optimization analysis, it was found that aluminum extrusions were suitable for primary members such as the underframe and lower side panel module to improve the stiffness and manufacturability of the carbody structures, and sandwich composites were appropriate for secondary members such as the roof and middle side panel module to minimize its weight. Furthermore, the results obtained by size optimization analysis showed that the weight of hybrid carbody structures composed of aluminum extrusions and sandwich composites could be reduced by a maximum of approximately 17.7% in comparison with carbody structures made of only sandwich composites.

1. 서론

우리나라는 2004년 4월 경부고속철도의 개통으로 수송효율증대, 지역 간 이동시간 단축 등의 효과를 누리고 있다. 그러나, 고속철도의 영향을 받지 못하는 비수혜지역의 경우 표정속도가

107km/h로 정체되어 있는 실정이다. 기존 철도의 속도 향상을 위한 노선의 직선화, 전철화 등 개량사업이 진행되고 있지만 환경파괴 및 경제성 등의 문제로 인해 개발이 지체되고 있다. 따라서 기존 시설물을 최대한 활용하면서 효과적으로 고속 서비스를 제공할 수 있는 철도차량의 연구가 진행되고 있으며, 곡선부가 많은 기존선로에서 속도를 줄이지 않고 운행할 수 있는 틸팅열차가 개발

† Corresponding Author, shin955@hanbat.ac.kr

되어 실용화를 위한 연구가 수행 중에 있다.^(1,2)

틸팅열차는 차량의 경량화를 위해 차체의 1차 부재에 샌드위치 복합재를 적용하여, 차체의 무게 감소, 내구성 그리고 내식성 향상 등의 긍정적인 효과를 얻고 있다. 이러한 복합재 적용 철도차량은 기존 알루미늄 압출재 및 금속재 철도차량에 비하여 단위 수송력, 에너지 효율이 향상되어 보다 친환경적인 운영이 가능하다.⁽³⁾

이때, 새롭게 개발되는 철도차량의 경우 차체 경량화 요구 외에도 2005년 제정된 철도안전법에 따라 구조안전성 및 충돌안전도 평가가 반드시 수행되어야 하며, 고속화에 따른 안전성 확보의 중요성이 점점 커지고 있다.

특히, 경량화를 위해 사용되는 복합재의 경우 기존 강재 및 알루미늄 재료에 비해 높은 비강성과 비강도(specific stiffness and strength)특성을 지니지만, 철도안전법에서 요구하는 구조안전성 및 충돌안전도를 만족시키기 위해 금속 프레임을 보강해야 하며, 결과적으로 무게 절감효과는 크지 않아 경량화를 위해 고가의 탄소섬유 복합재 등을 적용해야 하는 단점을 지니고 있다. 이로 인해 차체 구조물의 보강에 따라 기존 금속재 및 알루미늄 차체에 비하여 약 5~10% 이내의 제한적인 경량화 효과를 얻을 수 있으며, 재료가격에 따른 제작비용과 공정수가 증가하는 단점 역시 지니고 있다. 특히, 국내에서 개발된 모든 복합재 철도차량은 오토클레이브(Autoclave) 공법을 통한 일체 성형으로 제작되었으며, 이러한 차체제작 공법은 대형 성형몰드, 장비 등의 고비용 성형자재를 필요로 한다. 이에, 생산에 소요되는 비용이 비정상적으로 상승하여 차량의 경쟁력을 감소시키는 요인으로 작용하게 된다. 또한, 일체 성형을 통한 철도차량의 제작은 열변형, 치수오차 등의 문제로 인해 완성차에 잔류응력이 발생하는 문제점을 갖고 있다.⁽⁴⁾

따라서, 기존의 금속재 차체 구조가 갖고 있는 우수한 제작성, 재료비용의 절감 그리고 높은 구조 특성의 장점과 신소재 복합재 차체 구조의 경량화 장점을 활용한 새로운 개념의 차체 설계 방식이 요구된다. 철도차량 설계분야 선진국에서는 하이브리드 모듈화 설계기법을 도입하여 기존 일체 성형 복합재 차체의 단점을 보완하고 유지보수성 향상, 운행수명연장 그리고 차량 생산단가 절감에 따른 경쟁력 향상 등의 효과를 얻고 있

다.⁽⁵⁾

A.Zinno 등⁽⁶⁾은 시험과 해석적 방법을 통해 얻은 결과를 바탕으로 모듈화 샌드위치 복합재 루프를 철도차량에 적용하여 경량화 효과를 얻었으며, Jean Paul 등⁽⁷⁾은 복합재와 금속재를 적용한 하이브리드 모듈화 선체 구조물의 구조안전성 평가를 수행하여 금속재 선체와 동등한 수준의 강성 및 강도를 갖는 경량화된 선체 구조물을 제시하였다. 신금철 등⁽⁸⁾은 철도차량 루프 부분에 적층복합재를 적용하기 위해 금속재와 복합재의 접착조인트 연구를 수행하였으며, 축소모델의 시험과 해석을 통해 조인트부의 안전성을 검증하였다.

이러한 철도차량의 모듈화 설계를 수행하기 위해서는 철도안전법 등의 요구조건을 만족하는 설계안을 제시하여야 한다. 이때, 최적화 설계기법은 주어진 요구조건을 만족시키면서 차체구조물의 경량화를 달성할 수 있는 방안으로, 새로운 개념의 하이브리드 차체 구조물의 설계 도출에 가장 적합한 방법으로 알려져 있다.⁽⁹⁾

따라서, 본 연구에서는 최적화 해석기법을 이용하여 샌드위치 복합재와 알루미늄 압출재가 적용된 하이브리드 모듈화 차체 구조물의 경량 설계 연구를 수행하였다. 최적화 해석 기법 중 위상최적화는 차체 구성 재료인 샌드위치 복합재와 알루미늄 압출재의 적용위치 선정을 위해 수행되었으며, 치수최적화는 차량 단면의 두께선정 및 추가적인 경량화 효과를 얻기 위해 수행되었다. 또한, 최적화 해석기법을 통해 도출된 모듈화 차체 구조물에 대해 철도안전법에 따른 구조안전성 및 충돌안전도를 평가하여 안전기준을 만족하는 모델을 제시하고자 한다.

2. 최적화 해석기법을 이용한 하이브리드 경량 모듈화 차체 구조물 설계

2.1 설계 개념

본 연구에서 샌드위치 복합재와 알루미늄 압출재를 적용한 하이브리드 모듈화 차체 구조물의 설계를 위해 최근 개발되어 시험 운행중인 틸팅열차를 대상으로 최적설계를 수행하였다. 국내에서 알루미늄 압출구조와 샌드위치 복합재가 동시 적용된 모듈화 차체가 개발된 사례가 없으며, 본 연구를 통해 도출된 모델과 비교 평가하기 위해

일체형 샌드위치 복합재가 적용된 틸팅열차를 고려하는 것이 적합하다고 판단된다. Fig. 1은 하이브리드 모듈화 차체 구조물의 설계 개념을 나타낸 것으로 위상최적화 해석을 통해 샌드위치 복합재와 알루미늄 압출재 적용위치를 선정한 후 조립하는 과정을 나타낸다.

샌드위치 복합재와 알루미늄 압출재를 적용한 하이브리드 모듈화 차체 구조물의 최적설계를 수행하기 위하여 Fig. 2의 최적화 해석과정에 따라 진행하였다. 첫 번째로 설계사양 및 요구조건에 따라 차체의 위상최적화 해석을 수행하여 구성재료의 적용부위를 선정한다. 이후 치수최적화 해석을 통해 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재의 면재와 심재두께를 결정하게 된다. 도출된 모델에 대해 철도안전법에서 규정하는 구조안전성 및 충돌안전도 평가를 수행하여 평가기준의 만족 여부 확인과 개선을 통해 최종모델이 도출된다.

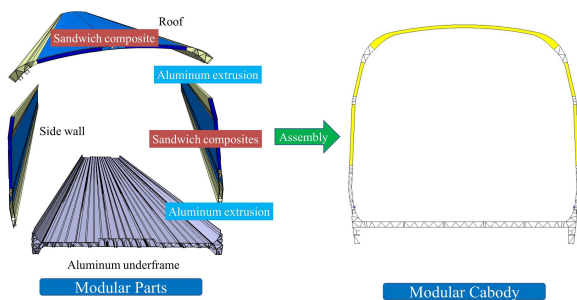


Fig. 1 Concept design of hybrid modular carbody structures

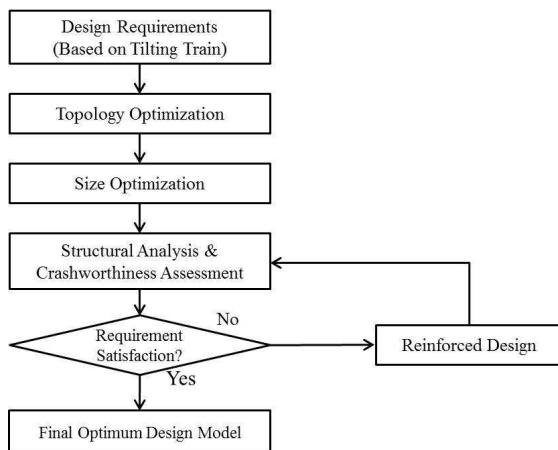


Fig. 2 The flow chart of optimum design for hybrid carbody

이때, 하이브리드 모듈화 차체 구조물의 설계요구조건은 일체형 복합재로 개발된 틸팅열차와 비교하기 위해 동일한 조건으로 하였으며, 무게, 제작방법 그리고 구조안전성 평가기준은 Table 1과 같다. 차체 무게의 경우 틸팅열차가 9.7Ton이며, 하이브리드 경량 차체 구조물은 틸팅열차 무게의 10~15% 감소된 무게를 설계목표로 선정하였다. 또한, 강성기준은 볼스터간 중심거리의 1/1000 이내, 강도기준은 최대응력이 재료의 항복강도보다 낮게 선정하였다. 제작방법은 기존의 일체형 성형공법을 그대로 적용하여도 생산성, 단가, 유지보수성에는 무리가 없을 것으로 판단된다.

2.2 위상최적화 기법을 이용한 부위별 재료선정

최적설계 기법은 크게 치수최적설계, 형상최적설계, 위상최적설계 등의 세 가지 기법으로 구분된다. 치수 및 형상 최적설계는 구조물의 연결구조는 고정시키고, 부재의 치수를 변경하거나 형상을 변경하는 기법이며, 위상최적설계는 주어진 하중 및 경계조건에 대한 최적의 재료배치를 찾는 것으로 주로 초기 개념설계에 많이 사용된다.⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 알루미늄 압출재와 경량화를 위해 선정된 샌드위치 복합재의 적용위치 선정을 위해 위상최적설계를 먼저 수행하였다.

위상최적화를 수행하기 위해 사용된 해석 프로그램은 ANSYS v13.0이며, 계산시간 및 효율성 향상을 위해 차체의외각을 덮고 있는 면을 쉘요소로 모델링하였다. 차량의 위상최적설계영역은 차체의 상부부분이며, 언더프레임은 비설계영역으로 기존 틸팅열차에 적용된 구조를 그대로 사용하였다.

식 (1)과 (2)는 위상최적화 문제정의를 나타내며, 식 (1)의 f_1 은 정적하중에 의한 차체구조물의 정적강성으로 최대화하는 것을 목표로 삼았다. 식

Table 1 Comparison of design requirements between tilting train and proposed hybrid carbody structure

	Tilting train	Proposed hybrid train
Mass	9.7 Ton	10~15% reduction
Stiffness	1/1000 of length between the bolster and bolster	
Strength	Metal	$\sigma_{max} < \text{Yield stress}$
	Composite	Tsai-Wu failure index < Limit value = 1
Manufacturing	Co-cured method using autoclave	

(2)는 질량을 100%라고 할 경우 30% 이하만의 질량을 사용하여 최적화를 수행한다는 제한조건이다.

$$\text{Minimize } f_1 = \text{Deflection of the carbody} \quad (1)$$

$$\text{Subject to mass fraction } \leq 0.3 \quad (2)$$

위상최적화 해석에 적용된 하중조건은 철도안전법에서 규정하는 하중조건을 고려하여 차체부분에 직접적인 영향을 미치는 수직, 캔트레일 그리고 윈도우가드레일 하중을 적용하였다. 이때, 각각의 하중과 3가지 하중을 동시에 고려한 조합하중을 적용하여 재료의 밀도 분포를 확인하였다. Fig. 3은 모듈화 차체의 위상최적화를 위한 설계영역과 비설계영역 그리고 조합하중의 하중조건을 나타낸다.

Fig. 4는 조합하중을 고려한 위상최적화 결과를 나타내며, 어두운 부분(빨간색)일수록 재료의 밀도가 높게 나타남을 의미한다.

차체 부위별로 위상최적화 결과를 살펴보면, 로우 사이드 패널부분에서 가장 많은 재료의 분포가 발생하였으며, 하중이 적용된 캔트레일과 윈도우가드레일 부분 역시 재료의 밀도가 높게 발생함을 확인하였다. 이때, 루프의 경우 가장 적은 재료의 분포가 나타났으며, 미들 사이드 패널의 경우도 하중적용 부위를 제외하고 재료의 분포가 적게 나타남을 확인하였다. 따라서 루프와 미들 사이드 패널은 상대적으로 하중크기가 적어 금속재 보다는 경량화를 위해 샌드위치 복합재를 적용할 수 있으며, 비교적 큰 하중이 집중되는 로우 사이드 패널과 윈도우 가드레일, 캔트레일 부분에는 구조안전성을 위해 알루미늄 압출재를 적용하였다. Fig. 5는 위상최적화 결과를 바탕으로 차체 부위별 적용재료를 선정한 단면형상을 나타

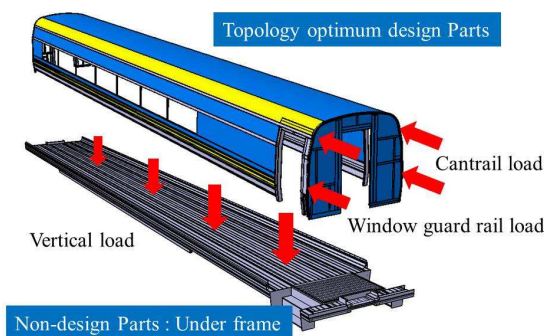


Fig. 3 Load conditions for topology optimization design

낸다. 이때, 단면형상은 기존 일체형 복합재 텀팅 열차 차체 구조물을 바탕으로 적용하였다.

이때, 재료의 적용 부위에 따라 사이드 패널, 로우 사이드 패널, 루프 총 3가지 모듈로 구분하였다. 또한, 차체 구조물의 제작 공정수를 최소화하기 위하여 사이드 패널 모듈의 경우 복합재 내부에 알루미늄 압출재를 삽입하는 형식으로 제시하였다.

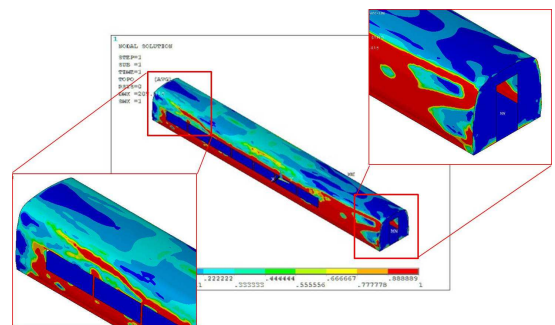


Fig. 4 Analysis results of topology optimization for combined loading condition

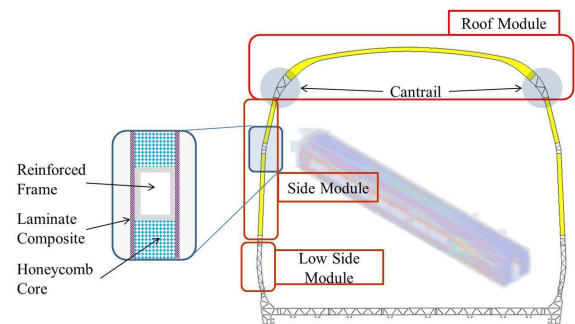


Fig. 5 Manufacturing concept of hybrid modular carbody through topology optimization analysis

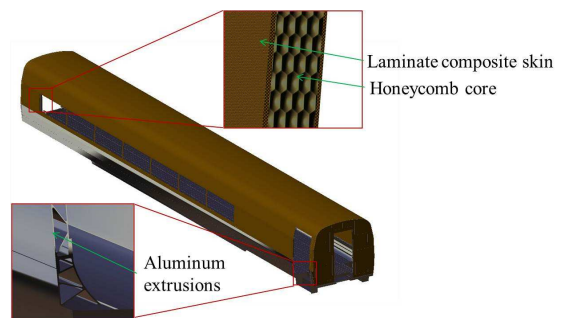


Fig. 6 3-D design concept of hybrid modular carbody

Fig. 6은 위상최적화를 통해 도출된 단면형상을 적용한 모듈화 차체 구조물의 3차원 모델로서 틸팅열차와 비교하여 무게가 9,674kg에서 8,037kg으로 약 17%의 경량화 효과를 나타내었다.

2.3 치수최적화 기법을 이용한 설계변수 선정

본 연구를 통해 도출되는 모듈화 차체의 경우 기존의 틸팅열차가 일체형 복합재만으로 제작되기 때문에 알루미늄 압출재의 데이터가 없어 틸팅열차와 유사한 구조 형상을 갖는 알루미늄 철도차량의 압출단면을 적용하였다. 모듈화 차체에 적용된 압출단면은 알루미늄 압출재로만 제작된 차체 구조물에 최적화된 치수이며, 샌드위치 복합재가 동시에 적용되는 모듈화 차체의 경우 단면치수를 새롭게 선정할 필요성이 있다. 따라서, 샌드위치 복합재의 면재 및 코어의 두께, 알루미늄 압출재의 스킨 및 리브의 두께에 대해 치수최적화를 수행하여 최적의 설계변수를 선정하였다.

이때, 치수최적화 해석에서 적층복합재의 구성 재료는 틸팅열차에 적용된 적층복합재 중 가장 많은 비중을 차지하는 카본(CF1263)/에폭시를 고려하였다. 치수최적화 해석은 ANSYS v13.0의 최적화 해석알고리즘을 사용하였다. 치수최적화 알고리즘은 빠른 결과를 도출할 수 있는 부분문제 근사화법(Sub-problem)과 일계법(First-order)으로 수행하였다. 설계변수로는 샌드위치 복합재의 면재 두께, 코어의 두께, 알루미늄 압출재의 스킨부 두께 그리고 리브 두께를 변수로 두었으며, 제작성을 고려하여 적층복합재와 알루미늄 스킨부의 두께는 동일하게 하였다. 이때, 설계 변수는 Fig. 7과 같이 각각 t_{os} (outer skin), t_{is} (inner skin), t_r (Rib), t_c (Core)라는 변수로 지정하였다. 제약조건으로는 틸팅열차 조합하중에 따른 슬바의 처짐결과를 적용하였으며, 변수의 한계는 틸팅열차의 기존설계 치수로 선정하였다.

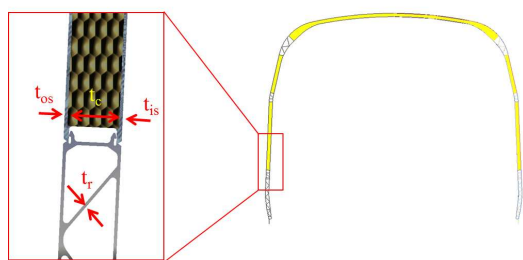


Fig. 7 Design parameters for size optimization analysis

치수최적화 문제를 정식화하여 나타내면, 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } \{X\} \quad (t_{os}, t_{is}, t_r, t_c) \\
 & \text{Minimize} \quad \text{mass of carbody structures} \quad (3) \\
 & \text{Subject to} \quad D_{max} \leq \text{Deflection}(16.9\text{mm}) \\
 & \text{Constraint} \quad 2\text{mm} \leq t_{os}, t_{is}, t_r \leq 4\text{mm}; t_c \leq 40\text{mm}
 \end{aligned}$$

여기서, D_{max} 는 슬바의 최대 처짐을 나타낸다.

Fig. 8은 치수최적화를 통한 외부 및 내부 스킨, 알루미늄 리브, 허니컴 코어의 두께 수렴결과를 나타낸다. 바깥쪽 스킨의 경우 기존 3.6mm에서 3.2mm, 안쪽 스킨은 3.1mm에서 3.1mm, 리브는 2.6mm에서 2.6mm, 코어 두께는 40mm에서 39mm로 최적화된 모델이 제시되었다.

Fig. 9는 치수최적화에 따른 무게 수렴결과를 나타낸 것으로, 틸팅열차의 무게인 9,674kg에 비해

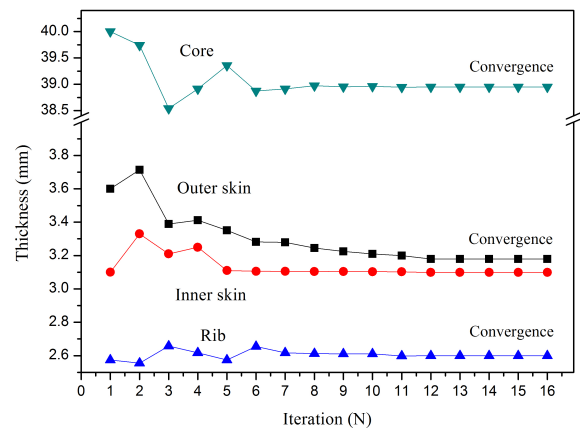


Fig. 8 Thickness results of size optimization analysis

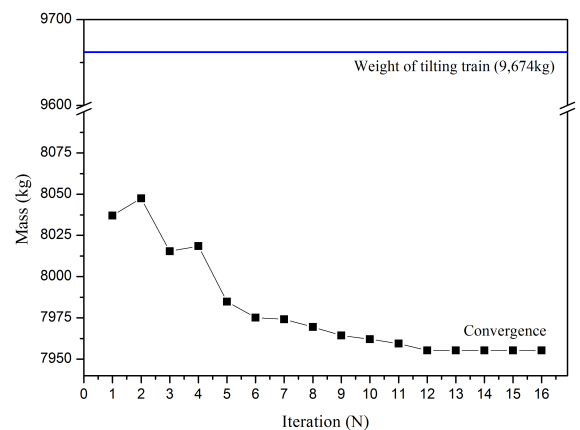


Fig. 9 Weight results of size optimization analysis

약 17.7% 감소한 7,955kg이 최종적으로 얻어졌다. 이때, 본 모듈화 차체 구조물의 경우 최적화된 일체형 복합재 차체 구조물의 단면을 바탕으로 설계되었기 때문에 위상최적화를 통한 차체 부위별 재료선정 만으로 17%의 경량화 효과를 얻을 수 있었다. 하지만, 상세한 단면치수 선정 및 추가적인 경량화를 위해 치수최적화해석을 수행하였으며, 약 1%의 경량화 효과(82kg)를 얻을 수 있었다. 또한, 스킨부에서 약 4mm의 치수가 감소되었으며, 적층복합소재의 경우 pre-preg를 적층하여 성형되기 때문에 적은 량의 치수감소라도 제작 공정 및 소요시간 그리고 재료의 가격을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다. 이때, 설계 요구사항으로 선정한 틸팅열차 무게의 10~15% 무게 감소조건에 만족함을 확인하였다.

최적화 기법을 통해 도출된 구조물은 철도안전법에 따라 구조안전성 및 충돌안전도를 평가하여 안전기준의 만족여부 확인 및 설계 개선여부를 확인하여야 한다.

3. 최적화된 하이브리드 경량 모듈화 차체 구조물의 구조안전성 및 충돌안전도 평가

3.1 구조안전성 평가

치수최적화를 통해 도출된 모듈화 차체 구조물에 대해 철도안전법에 따른 구조안전성 평가를 수행하였으며, 틸팅열차와 결과비교를 통해 모듈화 차체 구조물의 안전성을 검증하였다.

Table 2는 틸팅열차와 모듈화 차체 구조물의 하중조건에 따른 해석결과를 나타내며, 처짐 및 응력, 복합재 파손기준인 Tsai-Wu 파손지수로 평가하였다.

틸팅열차와 모듈화 차체 구조물의 동등한 수준의 강성 및 강도를 나타내어 하이브리드 설계 기법이 구조적 특성과 경량화 측면에서 유리하다는 것을 확인하였다.

수직하중에 대한 결과 솔바의 경우 처짐 기준인 15.90mm 이내를 만족하는 11.90mm가 발생하였으며, 금속재의 Von-Mises 응력은 알루미늄 모재부 항복강도인 215MPa보다 낮은 132MPa이 발생하여 기준을 만족하였다. 차체에 적용된 적층복합재 역시 Tsai-Wu 파손지수 값이 0.063이 나타나 구조적으로 안전함을 확인하였다.

Table 2 Comparison of structural analysis results of tilting train and modular carbody structures

Load case	Train type	Deflection of solbar (mm)	Von-Mises Stress (MPa)	Tsai-Wu (Failure index<1)
Vertical	Tilting	11.79	132	0.050
	Modular	11.90	131	0.063
Operation	Tilting	10.75	116	0.043
	Modular	10.87	117	0.058
Compressive	Tilting	-7.11	106	0.021
	Modular	-8.45	108	0.022
Window guard rail	Tilting	1.59	205	0.110
	Modular	1.72	172	0.082
Cantrail	Tilting	2.02	108	0.078
	Modular	2.12	82	0.079
Tensile	Tilting	5.31	79	0.013
	Modular	5.21	81	0.011
Combined	Tilting	16.69	153	0.067
	Modular	16.88	154	0.081

Table 3 Comparison of 1st bending natural frequency between tilting train and modular carbody structures

Model	1 st Bending natural frequency (Hz)
Tilting train	12.71
Hybrid modular train	13.51

Table 3은 고유진동수해석에 따른 1차 굽힘고유진동수를 틸팅열차와 비교한 것이다. 이때, 틸팅열차의 1차 굽힘고유진동수는 12.71Hz, 하이브리드 모듈화 차체구조물은 13.51Hz로 약 6% 높은 결과를 나타냈다. 이는 무게대비 강성이 높기 때문인 것으로 판단되며, 차체 구조물의 1차 굽힘고유진동수 평가기준인 10Hz 이상이 발생하여 안전기준을 만족함을 확인하였다.

3.2 충돌안전도 평가

구조안전성을 만족한 모듈화 차체구조물에 대해 철도안전법을 적용한 충돌해석을 수행하였으며, 틸팅열차와 결과비교를 통해 충돌안전도를 평가하였다. 모듈화 차체 구조물의 전두부 형상은 틸팅열차의 전두부 형상을 적용하였으며, 철

도안전법에서 규정하는 4가지 충돌시나리오에 대해 해석을 수행하였다.

Table 4는 철도안전법에서 규정하고 있는 4가지 충돌 시나리오와 안전기준에 대해 나타낸 것이다. 충돌해석에 사용된 모델은 선행연구⁽¹¹⁾를 통해 도출된 1차원 유효 등가 모델링 기법을 사용하였다. 1차원 유효 등가 모델링 기법은 충돌의 영향을 많이 받는 전방 2량에 대해서는 3차원 모델을 사용하고 비교적 충돌의 영향이 적은 후방 차량에 대해서는 1차원 등가모델을 적용하여 해석의 효율성을 향상시키는 방법이다.

Table 5는 평가기준이 동일한 충돌시나리오 1과 2의 해석결과를 틸팅열차와 비교하여 나타낸 것이다. 이때, 모듈화 차체의 경우 전체 차량중량이 틸팅열차에 비해 10.2Ton 감소한 331.2Ton으로, 차량 충돌 시 충격력, 변형량 그리고 가속도 등이 기존 틸팅열차에 비해 적게 나타남을 확인할 수 있다.

모듈화 차체 구조물의 충돌시나리오 1과 2의 타고오름 평가 결과, 차량과 차량사이의 중간연결기에서 허용하중(1,025kN)을 초과하지 않는 값

이 나타났으며, 이는 중간연결기의 끊어짐 현상이 발생하지 않음을 의미한다. 따라서, 차량과 차량사이의 충돌이 발생하지 않음으로 타고오름 현상을 발생하지 않았다.

충돌시나리오 1과 2의 운전자 생존공간 유지기준의 경우 전두부 에너지 흡수장치에서 약 240mm의 변형이 발생하였으나, 운전자 안전구간에는 80% 이상 유지조건을 만족하였다. 또한, 승객구간의 생존공간 유지기준의 경우 전체길이(12,680mm)의 1% 미만 변형기준을 만족하여, 안전기준인 생존공간 유지조건을 만족함을 확인하였다.

Fig. 10은 충돌시나리오 1의 충돌 시 발생하는 충격력-시간 그래프로써, 처음 전방연결기에서 충돌하중 발생 후 두 번째로 충돌에너지 흡수장치에서 충격력이 발생하였다. 이후 언더프레임과 상부 프레임에 충격이 가해졌으며, 순차적 충격

Table 4 The four scenarios of crashworthiness

Crash scenario	Crash Condition	Velocity & Load	Requirements
Scenario-1	Frontal crash	36 km/h	1. Anti-climbing 2. Safety region
Scenario-2	Huge obstacle crash	110 km/h	3. Crash absorbed energy 4. Crash deceleration
Scenario-3	Small obstacle crash	a-type : 300kN b-type : 250kN	Non-plastic deformation of carbody and coupler
Scenario-4	Coupler crash	10 km/h	

Table 5 Comparison of crashworthiness results for crash scenario-1,2

Requirements	Scenario-1		Scenario-2	
	Tilting train	Hybrid modular train	Tilting train	Hybrid modular train
Anti-climbing	Safe	Safe	Safe	Safe
Safety region	Cab	240mm	233mm	244mm
	Passenger	0.8mm	0.7mm	0.4mm
Absorbed energy	Safe	Safe	Safe	Safe
Avg. Deceleration	3.84g	3.77g	3.98g	3.89g

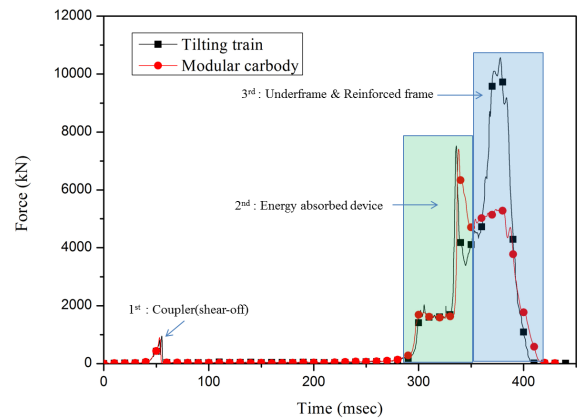


Fig. 10 Comparison of force-time curves for the scenario-1

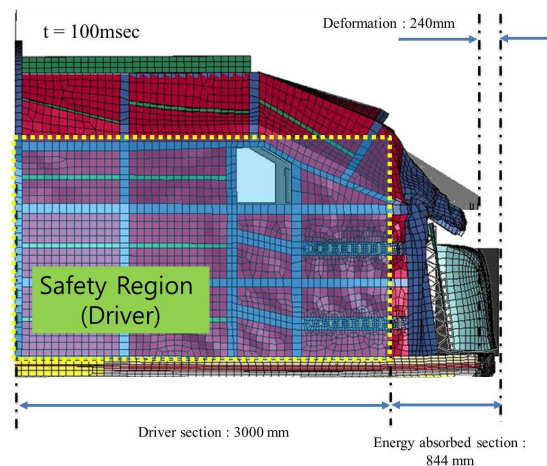


Fig. 11 The deformation of front section for the scenario-2

Table 6 Comparison of crashworthiness results for crash scenario-3,4

Requirement	Scenario-3		Scenario-4	
	Tilting train	Hybrid modular train	Tilting train	Hybrid modular train
Von-Mises Stress (MPa)	194	194	117	110

에너지가 발생하여 안전기준인 충돌에너지 흡수 구조 조건에 만족함을 확인하였다. 틸팅열차와 비교해보면 충돌에너지 흡수장치 이후 충격력이 비교적 적게 발생하였으며, 이는 전체차량 중량이 감소하였기 때문이다.

Fig. 11은 충돌시나리오 2의 전두부 변형형상으로 에너지 흡수구간에서 240mm의 변형이 발생함을 확인하였다. 충돌감속도의 경우 평균 감속도 기준인 5g 이하의 값이 나타나 안전기준을 만족함을 확인하였다.

Table 6은 충돌시나리오 3과 4의 결과를 나타낸 것으로 발생하는 최대 Von-Mises 응력값이 알루미늄 모재부 항복강도(215MPa) 보다 낮은 값이 나타나 영구변형이 발생하지 않음을 확인하였다.

이때, 충돌시나리오 3의 장애물제거기 충돌은 동일한 구조 형상으로 인해 값이 동일하게 나타남을 확인하였다. 충돌시나리오 4는 차량과 차량 사이의 연결기 충돌로서 전방연결기가 설치되는 언더프레임 하부부분에서 항복강도(215MPa)를 초과하지 않는 110MPa이 발생하여 안전함을 확인하였다.

본 연구를 통해 도출된 모듈화 차체의 경우 기존 틸팅열차에 비해 약 17.7%의 경량화 효과를 얻었으며, 구조안전성 및 충돌안전도 평가를 통해 동등하거나 우수한 수준의 안전기준을 갖고 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 최적화 해석기법을 이용하여 샌드위치 복합재와 알루미늄 압출재가 적용된 하이브리드 경량 모듈화 차체 구조물에 대한 최적설계 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존 일체형 복합재 차체 구조물의 구조강성을 향상시키고, 추가 경량화 효과를 얻을 수 있는 샌드위치 복합재와 알루미늄 압출재가 적용

된 하이브리드 모듈화 차체 구조물의 설계(안)을 위상최적화와 치수최적화 해석 기법을 통해 제시하였다.

(2) 차체 구성재료의 적용부위 선정을 위해 위상최적화 해석을 수행하여 차체 로우 사이드 패널 부분과 하중이 적용된 윈도우 가드레일, 캔트레일 부분에서 재료의 밀도가 집중되는 것을 확인하였다. 따라서, 재료의 밀도가 높게 나타난 부분에는 높은 구조강성 및 강도가 요구되므로 알루미늄 압출재를 적용하였고 밀도가 낮은 부분에는 상대적으로 낮은 구조 특성이 요구되어 경량화를 위해 샌드위치 복합재를 적용하였다.

(3) 형상최적화 해석을 수행한 후, 샌드위치 복합재 면재 및 코어의 두께, 알루미늄 압출재에 대한 상세 설계치수를 도출하기 위해, 치수최적화 해석을 수행하였다. 이를 통해 얻어진 주요 부위의 최적화된 두께를 반영한 결과, 기존 틸팅열차의 무게보다 17.7% 경량화된 하이브리드 모듈화 차체 구조물을 얻을 수 있음을 확인하였다.

(4) 최적화 기법을 통해 도출된 모듈화 차체 구조물을 철도안전법에 따라 구조안전성 및 충돌안전도를 평가한 결과, 안전기준에 모두 만족함을 확인하였다.

(5) 본 연구를 통해 확립된 하이브리드 모듈화 차체 구조물의 최적설계 기법은 향후 경량 철도 차량뿐만 아니라 고속철도, 초고속자기부상 등과 같이 고속운행에 따른 높은 구조 강성과 강도가 요구되는 철도차량의 경량화에 특히 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

(6) 본 연구에서 금속재와 복합재의 모듈화 설계에 따른 이종재료간의 접합문제가 발생하게 된다. 기존에는 리벳과 접착제를 이용한 접합이 이루어 졌지만, 철도차량과 같이 지속적인 하중을 받는 철도차량의 경우 리벳부의 재료에서 강성 및 강도가 저하되는 문제점이 있다. 이에, 금속재와 복합재의 새로운 접합방법에 대한 연구가 필요한 실정이며, 이에 슬롯방식을 적용한 새로운 접합방법에 대해 연구를 수행 중에 있다.

후기

본 논문은 한국철도기술연구원의 한국형 틸팅열차 신뢰성 평가 및 운용기술개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Chung, S. Y., An, S. J. and Kim, P. J., 2009, "An Analysis on the Railway Vehicle System for the Introduction of New Transit Systems," *Spring Conference of the Korean Society for Railway*, Changwon, Korea, pp. 388~395.
- (2) Shin, K. B., You, W. H. and Moon, H. S., 2002, "The Application of Composite Materials in Railway Vehicle System," *The Korean Society for Composites Materials*, Vol. 15, No. 5, pp. 66~71.
- (3) Ko, H. Y., Shin, K. B. and Jeong, J. C., 2009, "A Study on the Comparison of Structural Performance Test and Analysis for Design Verification of Bimodal Tram Vehicle Made of Sandwich Composites," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 12, No. 4, pp. 518~525.
- (4) Kim, J. S., Jeong, J. C. and Seo, S. I., 2007, "Durability Evaluation of a Composite Carbody for Korean Tilting Train Under Repeated Loadings," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 1, pp. 39~44.
- (5) Hudson, W., Carruthers, J. and Robinson, A., 2009, "Multiple Objective Optimization of Composite Sandwich Structures for Rail Vehicle Floor Panels," *Composite Structures*, Vol. 92, No.9, pp. 2077~2082.
- (6) Zinno, A., Fusco, E., Prota A. and Manfredi, G., 2009, "Multiscale Approach for the Design of Composite Sandwich Structures for Train Application," *Composite Structures*, Vol. 92, No. 9 pp. 2208~2219.
- (7) Paul, J., Caccese, V., Berube, V. and Thompson, L., 2007, "Analysis of a Hybrid Composite/Metal Ship Hull Structural System with Removable Panels," *Ships and Offshore Structures*, Vol. 2, No. 3, pp. 227~240.
- (8) Shin, K. C., Kim, Y. G., Lee, D. K. and Choi, J. M., 1996, "Behavior of Composite-Steel Shell Structures Subjected to Internal Pressure," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 1, No. 1, pp. 254~259.
- (9) Jang, H. H., Jeong, S. B., Park, G. S., Lee, J. W. and Park, G. J., 2011, "Structural Optimization of a Railway Vehicle Body," *Spring Conference of Trans. of the KSME*, pp. 35~36.
- (10) Hong, J. S., Lee, H. Y., Kim, W. K. and Choi, S. K., 1999, "A Study on the Optimization for Size Design of EMU Aluminium Bodyshell," *Spring Conference of the Korean Society for Railway*, Kyungju, Korea, pp. 232~237.
- (11) Jang, H. J., Shin, K. B. and Han, S. H., 2011, "A study on the Crashworthiness Evaluation and Performance Improvement of Tilting Train Carbody Structure made of Sandwich Composites," *The Korean Society for Composites Materials*, Vol. 24, No. 5, pp. 9~16.