

## 소재대체법과 치수최적화 기법을 이용한 2층 고속열차 하이브리드 차체 구조물의 경량 설계 연구

임재문\* · 정민호\* · 김종연\*\* · 신광복\*\*\*†

### A Study on Lightweight Design of Double Deck High-Speed Train Hybrid Carbody Using Material Substitution and Size Optimization Method

Jae-Moon Im\*, Min-Ho Jung\*, Jong-Yeon Kim\*\*, Kwang-Bok Shin\*\*\*†

**ABSTRACT:** The purpose of this paper is to suggest a lightweight design for the aluminum extrusion carbody structure of a double deck high-speed train using material substitution and size optimization method. In order to conduct material substitution, the topology optimization was used to determine the application parts of sandwich composites at the carbody structures. The results of analysis showed that sandwich composites could be applied at roof and 2nd underframe. The size optimization was used to determine thickness of the aluminum extruded and carbon/epoxy composite. The design variable, state constraint and objective function were formulated to solve the size optimization, and then, the feasible design was presented by these conditions. The results of the lightweight design showed that the weight of double deck high-speed train hybrid carbody could be reduced by 2.18(17.70%) tons.

**초 록:** 본 논문의 목적은 소재대체법과 치수최적화 기법을 이용한 2층 고속열차 알루미늄 압출재 차체의 경량 설계를 제시하는 것이다. 소재대체법을 수행하기 위해 위상최적화 기법을 이용하여 차체 구조물의 샌드위치 복합재 적용 부위를 결정하였다. 해석결과, 루프와 2층 언더프레임에 샌드위치 복합재가 적용 가능함을 보여주었다. 치수최적화는 알루미늄 압출재와 카본/에폭시 복합재의 두께를 결정하는데 사용되었다. 치수최적화를 수행하기 위해, 설계변수, 제약조건, 목적함수를 정식화 하였으며 이러한 조건에 의해 유효설계를 도출하였다. 경량 설계의 결과로 2층 고속열차 하이브리드 차체의 무게를 2.18 ton(17.70%)까지 줄일 수 있음을 보여주었다.

**Key Words:** 경량 설계(Lightweight design), 치수최적화(Size optimization), 소재대체법(Material substitution), 위상최적화(Topology optimization), 샌드위치 복합재(Sandwich composites)

## 1. 서 론

2015년 12월 파리에서 개최되었던 기후변화당사국총회(COP21)에서 신기후체제에 관한 파리협정이 채택되면서

범지구적 기후변화대응을 위해 온실가스 및 에너지 소비량을 감축하는 등 장기 저탄소 개발 전략에 대한 문제가 대두되었다[1]. 이에 따라 철도, 자동차, 항공 등 수송분야에 대해 에너지효율을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행

Received 30 October 2018, received in revised form 7 January 2019, accepted 23 January 2019

\*Graduate School of Mechanical Engineering, Hanbat National University

\*\*Rolling Stock R&D Center, Dawonsys Co., Ltd.

\*\*\*†Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Corresponding author (E-mail: shin955@hanbat.ac.kr)

중에 있다. 특히 철도차량은 일반적인 승용차 그리고 화물차와 비교해 보았을 때 소모되는 에너지 대비 높은 수송량을 보여주고 있어 친환경 교통수단으로 각광받고 있다. 이러한 철도차량의 에너지효율을 향상시키기 위한 방법으로 전동기의 효율증가와 철도차량 차체구조물의 경량화가 대표적이라 할 수 있는데, 이 중에 차체구조물은 무게면에서 10 ton 내외의 큰 비중을 차지하고 있어 차체의 경량화를 통해 에너지효율을 크게 증가시킬 수 있다. 하지만 차체의 무분별한 경량화는 차량의 안전에 악영향을 미치게 되어 사고시 인명사고로 이어질 수 있어 차체 경량화 시 전문적인 연구를 통해 경량화가 진행되어야 한다[2].

철도차량의 차체를 경량화 하기 위한 방법에는 여러가지 연구사례가 존재한다. 대표적인 예로 Han 등[3]이 한국형 표준전동차인 K-EUM에 대해 위상최적화 기법을 이용한 알루미늄 압출재의 최적의 형상을 도출하여 높은 경량화 효과를 얻을 수 있음을 제시하였고, Yang 등[4]이 주행 방식 변경을 통한 차체 구조물의 경량화 가능성을 검토하여 횡압감소와 무게중심점을 낮추는 방법으로 차체 경량화가 가능함을 제시하였다. 또한 Hwang 등[5]이 2층 열차에 대해 반응표면모델을 이용하여 경량화 설계 연구를 제시하였고, Ko 등[6]이 자동무인경전철 복합재 차체 구조물의 구조 시험 및 해석적 검증에 의한 유한요소 모델 도출 연구를 수행하였으며, Lee 등[7]이 바이모달 트램 적용 하니컴 샌드위치 복합재 패널의 저속 충격 해석에 관한 연구사례도 존재한다.

특히 경량소재를 이용한 연구사례가 무게감소 및 에너지효율 향상에 큰 효과를 거둬으로써 이와 관련된 경량화 기법인 소재대체법(material substitution)에 대한 관심 또한 높아지고 있다. 소재대체법을 이용한 연구사례로는 일본의 신칸센 E4와 프랑스의 TGV Duplex가 존재하는데, 이들의 차량은 기존의 스테인리스 차체 대신에 알루미늄 차체로 재질을 변경하여 경량화를 달성하였다. 국내의 경우에도 인천 신공항 철도, 대전 지하철 등이 알루미늄 압출재를 적용하여 차체 개발에 성공한 상용화 사례가 존재한다. 최근에는 알루미늄 차체를 대신하여 샌드위치 복합재(sandwich composite)를 대체 적용하는 연구가 활발히 이루어지고 있으며 한국형 탈팅열차와 초고속 자기부상 열차가 그 대표적인 예이다[8-11].

본 논문의 연구대상인 2층 고속열차의 차체는 알루미늄 압출재로 이루어져 있다. 이러한 차체는 기존의 강재로 이루어진 것 보다 높은 에너지효율을 보이지만 알루미늄 소재의 특성상 압출재 단면구성에 있어 추가적인 경량화를 하기에는 한계가 있다. 따라서 알루미늄 압출재보다 비강성과 비강도가 높은 샌드위치 복합재를 이용한 경량화 방안을 제시하는 연구가 필요한 실정이다. 이를 위해 상기의 소재대체법으로 알루미늄 차체에 샌드위치 복합재를 적용

하고, 새롭게 생성된 하이브리드 차체 단면정보를 재정립하기 위한 치수최적화로 2층 고속열차의 경량화 연구를 수행하고자 한다. 알루미늄 압출재 2층 고속열차 기본설계(안)에 위상최적화 해석을 수행하여 재료의 밀도분포를 확인하였고 샌드위치 복합재가 대체적용가능한 부위를 선정하도록 하였다. 또한 하이브리드 차체의 설계변수, 제한조건 그리고 목적함수를 정식화 하여 치수최적화를 수행하였다. 치수최적화는 용도에 따라 일계법(first order method)과 근사법(sub-problem method)을 이용하였으며, 이때 사용된 상용 유한요소 해석 프로그램은 ANSYS의 APDL(ANSYS Parametric Design Language)이다.

## 2. 소재대체법을 이용한 하이브리드 차체 초기설계(안) 도출

### 2.1 2층 고속열차 차체 기본설계(안)의 제원

알루미늄 압출재로 구성된 2층 고속열차 차체 기본설계(안)은 수송능력을 극대화시키기 위해 차량한계를 최대한 활용하는 방안으로 설계되었다. 따라서 차량의 전체크기는 높이 4,500 mm, 폭 3,100 mm 그리고 길이 25,000 mm로 선정되었으며 차체 중량은 11.50 ton이다. 이는 일반철도와는 다르게 높이가 매우 높고 각 층을 나누기 위한 2층 언더프레임이 추가되어 양 옆의 사이드 프레임 중앙부에 슬바가 한쌍이 더 삽입되는 구조를 가지고 있다. 수송용량은 KTX-산천 대비 2배 높은 720명으로, 프랑스 TGV-Duplex의 545명보다 많게 선정되어 있으며 최고속도는 300 km/h이다. 2층 고속열차에 적용된 압출재의 재질은 알루미늄으로 탄성계수 70 GPa, 푸아송 비 0.33, 밀도 2,780 kg/m<sup>3</sup>의 특성을 가지며 재료의 항복강도는 215 MPa이다. Fig. 1은 2층 고속열차의 형상 및 제원을 보여주며, Table 1은 2층 고속열차 차체에 적용된 알루미늄 물성정보를 보여준다.

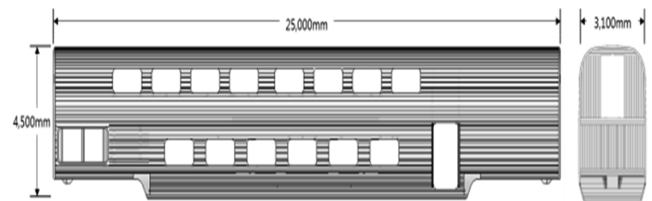


Fig. 1. 3D Model of double deck high speed train

Table 1. Mechanical Properties of aluminum

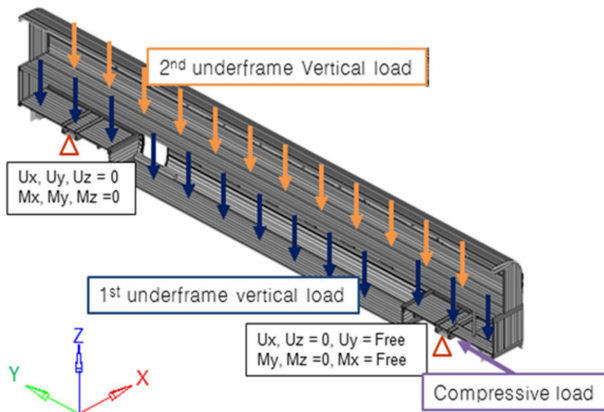
Elastic Modulus (GPa)	70
Poisson's ratio	0.33
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2,780
Yield stress (MPa)	215

2.2 위상최적화 해석을 이용한 샌드위치 복합재 적용부위 선정

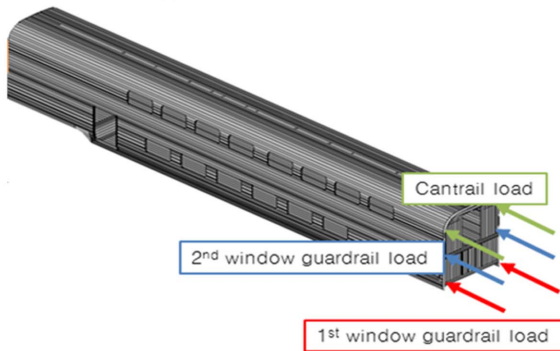
최적화 기법은 크게 치수최적화, 형상최적화, 위상최적화의 세 가지 기법으로 구분된다. 치수 및 형상 최적화의 경우 구조물의 연결구조는 고정시키고 부재의 치수를 변경하거나 형상을 변경하는 기법이며, 위상최적화는 주어진 하중 및 경계조건에 대한 최적의 재료밀도분포를 찾는 것으로 주로 초기 개념설계에 많이 사용된다. 본 연구에서는 소재대체에 의한 경량화를 위해 위상최적화를 먼저 수행하여 낮은 재료밀도로 설계할 수 있는 차체의 부재를 선정하였고 이를 통해 경량소재를 대체적용하기로 결정하였다. 경량화에 적용될 소재는 샌드위치 복합재이며 기존의 알루미늄 압출재보다 비강성과 비강도가 높은 소재이다. 샌

Table 2. Load condition of topology optimization analysis

Load condition		Load (Ton)
Compressive load	Centersill	200
	1st window guardrail	30
	2nd window guardrail	30
	Cantrail	30
Vertical load	1st underframe	27
	2nd underframe	25



(a) Underframe vertical load



(b) Window guardrail load

Fig. 2. Loading position for topology optimization analysis

드위치 복합재가 적용가능한 부재를 알아보기 위해 철도 안전법에서 규정하는 수직 하중, 압축 하중, 캔트레일 하중, 윈도우 가드레일 하중을 조합하여 구조해석을 수행하였다. 위상최적화 수행 시 수행 시간 및 경제적인 해석을 위해 알루미늄 압출재의 스킨과 리브를 셸(shell)요소로 모델링하였으며, 차체의 모든 영역을 위상최적화의 설계영역으로 선정하였다. Table 2는 위상최적화 해석을 위한 2층 고속열차의 하중조건들을 보여주고, Fig. 2는 하중조건에 따른 하중부여 위치들을 보여준다.

위상최적화를 수행하기 위해서는 경계조건 및 하중조건 그리고 설계영역을 선정하는 것뿐만 아니라 목적함수와 제약조건의 문제정의도 수행되어야 한다. 목적함수를 나타내는 식 (1)의 f1은 정적하중에 의한 차체구조물의 정적강성을 최대화한다는 것을 의미하고, 제한함수를 나타내는 식 (2)의 경우 질량의 30% 이하만의 질량을 사용하여 최적화를 수행한다는 의미를 나타낸다.

$$\text{Minimize } f1 = \text{Deflection of the carbody} \quad (1)$$

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

2.3 위상최적화 해석 결과

위상최적화 결과, Fig. 3에서 보는 것과 같이 부재의 색이 적색으로 표시된다면 재료의 밀도가 높은 부분이며 청색으로 변할 경우 재료의 밀도가 낮은 부분이라고 볼 수 있다. 해석 결과를 좀 더 면밀히 관찰해보면 사이드 프레임와, 숄바 프레임의 경우 적색으로 재료의 밀도가 높은 것을 알 수 있다. 1층 언더프레임, 2층 언더프레임, 루프 프레임의 경우 상대적으로 청색이며 이는 차체구조물에서 외력의 영향을 적게 받는 부분으로 샌드위치 복합재가 적용하기에 좋은 조건임을 뜻한다. 하지만 1층 언더프레임의 경우 차체와 대차를 연결해주는 볼스터부에서 재료밀도가 높게 나타나므로 이 부분에 샌드위치 복합재를 적용하기엔 부적절하다. 반면에 루프 프레임과 2층 언더프레임의 경우

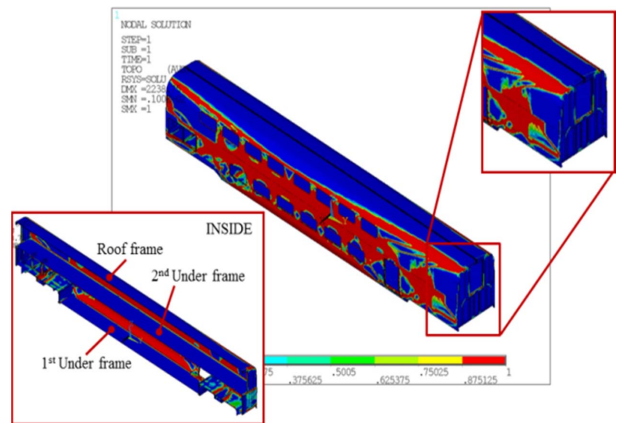


Fig. 3. Analysis result of topology optimization for combined loading condition

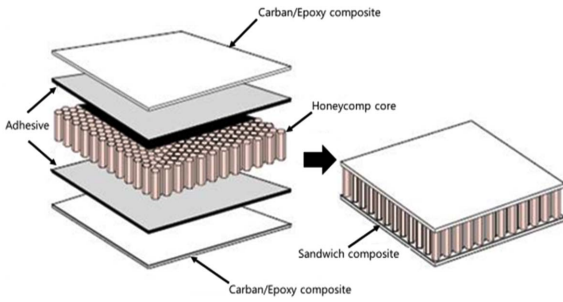


Fig. 4. Composition of sandwich composite

매우 단순한 구조 덕분에 소재대체를 적용하기에 유리한 이점이 있으므로 샌드위치 복합재를 적용하기에 적절하다. 따라서 2층 고속열차의 경량화 방안으로 루프 프레임과 2층 언더프레임의 알루미늄 압출재를 샌드위치 복합재로 대체하는 방법을 적용하였다. Fig. 4는 카본/에폭시 복합재와 하니컴 코어가 적용된 샌드위치 복합재의 구성 및 형상을 보여준다.

2.4 하이브리드 차체 생성

샌드위치 복합재의 면재부에는 카본/에폭시 복합재가 적용되고 심재에는 하니컴 코어가 적용되는 점을 고려해 보았을 때 알루미늄 압출재 형상을 구현했던 2차원 요소인 셀 요소만으로 이를 구현하기에 어려움이 있다. 따라서 2차원 요소로만 이루어진 하이브리드 차체의 경우 치수 최적

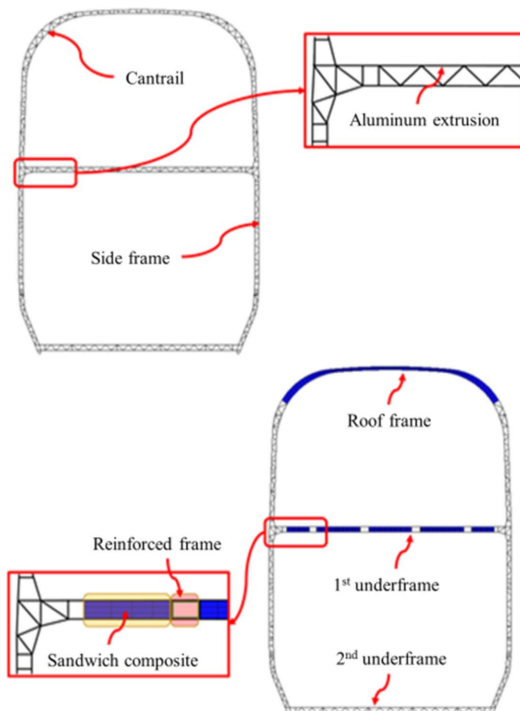


Fig. 5. Manufacturing concept of hybrid carbody through topology optimization analysis

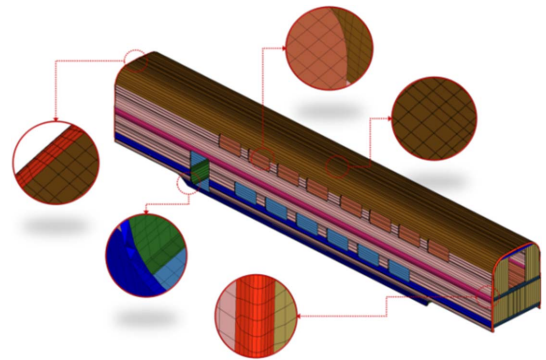


Fig. 6. Finite element model concept of hybrid carbody

Table 3. Mechanical properties of T700 carbon/epoxy composite

Elastic Modulus (GPa)			Shear Modulus (GPa)			Poisson's ratio		
E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	G <sub>12</sub>	G <sub>13</sub>	G <sub>23</sub>	ν <sub>12</sub>	ν <sub>13</sub>	ν <sub>23</sub>
134.6	7.6	7.6	3.6	3.6	3.2	0.3	0.3	0.3

화 및 구조안정성 평가 수행시 정확한 해석결과를 도출하기 어렵고 해석의 신뢰성 또한 떨어지게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 면재는 셀요소를 그대로 적용하고 심재의 경우 일반적인 3차원 구조물에 적용되는 솔리드(Solid) 요소를 이용하여 샌드위치 복합재를 구현하였다[12]. 특히 2층 언더프레임에 적용되는 샌드위치 복합재의 경우, 4mm의 두께를 가지는 각관을 길이방향과 폭방향으로 각각 삽입하여 조합 및 수직하중에 의해서 발생하는 처짐을 방지하도록 하였다. 소재대체법으로 인한 차체무게는 11.50 Ton에서 9.86 Ton으로 약 1.64 Ton(14%)가 감소되었음을 확인하였다. Fig. 5는 소재대체법을 적용한 유한요소 모델의 전후 단면을 보여주며, Fig. 6은 샌드위치 복합재가 적용된 하이브리드 차체 구조물의 유한요소모델을 보여준다. 그리고 Table 3은 샌드위치 복합재의 면재인 T700 카본/에폭시 복합재의 물성을 보여준다.

3. 치수최적화를 이용한 하이브리드 차체 경량설계(안) 도출

3.1 치수최적화 문제의 정식화

알루미늄 압출재로 제작된 기본설계(안)의 단면치수정보는 샌드위치 복합재가 적용된 하이브리드 차체 초기설계(안)에 대해 최적화 되어있지 않으므로 이를 새롭게 선정할 필요성이 있다. 따라서, 하이브리드 차체의 주요 구성요소인 1층 언더프레임, 루프 프레임, 사이드 프레임, 솔바 프레임과 소재대체법으로 적용된 카본/에폭시 복합재를 포함한 총 5가지 부재를 설계변수로 구성하였다. 이때 하이브리드 차체 초기설계(안)의 치수 정보를 통해 두께가 변



회할 수 있는 범위를 부여하여 정해진 두께 범위를 초과하거나 미만이 되지 않도록 하였다.

치수최적화를 수행하기 위한 또 하나의 구성요소인 제약조건은 구조해석 시 재료의 항복강도를 초과하지 않도록 제한하는 역할을 수행한다. 이때 구조안전성 평가의 해석적 방법과 시험적 방법의 오차를 고려하여 항복응력의 안전계수 1.06를 적용한 200 MPa을 제약조건으로 적용하였다.

마지막으로 목적함수는 2층 고속열차의 에너지효율을 높이기 위해 차체무게 감소를 목표로 하며 치수최적화 해석 결과가 수렴하도록 도와준다. 여기서 제약조건의 Von-Mises 응력 기준을 낮게 잡거나 설계변수의 범위들을 좁게 잡는다면 제약조건과 설계변수가 각각 지정된 범위내에서만 움직여야 하기 때문에 알루미늄 압출재의 두께 변화폭이 작아져서 경량화 효과가 떨어지기 때문에 차체 구조물의 구조안전성이 확보될 수 있는 최소의 조건을 아래 식(3)과 같이 설계변수, 제약조건, 목적함수 3가지 조건을 정식화 하였으며, 이로써 최상의 경량화 효과를 가지도록 하였다[13].

$$\text{Find}[x] = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

$$\text{Maximum Von-Mises Stress} < 200 \text{ MPa} \quad (3)$$

Mass → Minimize

여기서  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 은 알루미늄 압출재의 설계변수들을 의미한다. 위 식을 이용하여 설계변수와 제약조건에 의해 반복해석을 거쳐 유효설계를 도출하면 목적함수에 의한 평가를 통해 무게가 가장 낮은 유효설계를 최적점으로 지정한다. 단면정보는 Table 4와 같이 적용하였다.

### 3.2 치수최적화 수행

치수최적화 수행은 근사법과 일계법으로 수행된다. 근사법은 근사함수를 이용하여 최적점을 찾는 최적화 방법이며 반응함수 도출을 위해 식 (4)와 같이 최소자승법을 이용하는 것이 특징이다. 이러한 특징으로 인해 최적화 해석 수

행속도가 빠르다는 장점을 가지고 있으나 최적점의 값이 정확하지 않다는 단점이 존재한다.

$$H = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n X_n + \sum_{n=1}^N b_n X_n^2 + \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N C_{mn} X_m X_n \quad (4)$$

여기서 H는 목적함수와 제약조건에 대한 반응함수,  $X_n$ 은 설계변수, N은 설계변수의 총 개수 그리고 a,b,c는 각각의 계수를 의미한다. Fig. 7은 치수최적화 기법 중의 하나인 근사법의 알고리즘을 보여준다.

이에 반해 일계법은 미분치를 이용하여 최적점을 찾는 방법으로 수행속도가 느리다는 단점이 있지만 최적점의 정확한 값을 찾을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 경제적인 해석을 위해 먼저 근사법으로 최적화를 수행하였고, 해석결과를 토대로 일계법을 이용해 다시 최적화를 수행하는 방식으로 해석을 진행하였다. 또한 치수최적화 수행 시 철도 안전법에 의거한 구조안전성 평가의 모든 조건을 고려하지 않고 가장 가혹한 조건인 압축하중 조건을 적용하여 해석을 수행하였다. Fig. 8은 치수최적화 기법 중 하나인 일계법의 알고리즘을 보여준다.

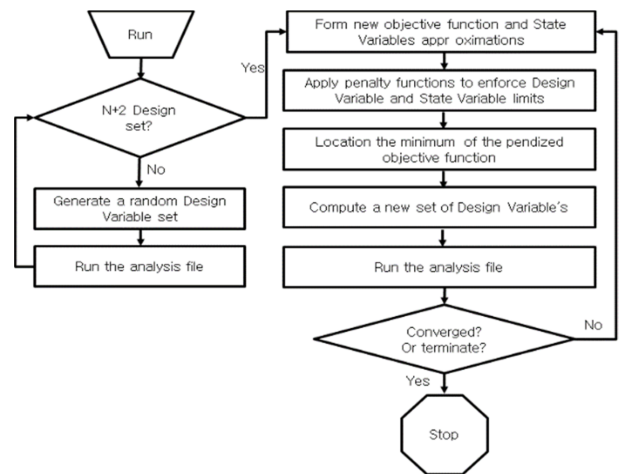


Fig. 7. Process of size optimization for sub-problem method

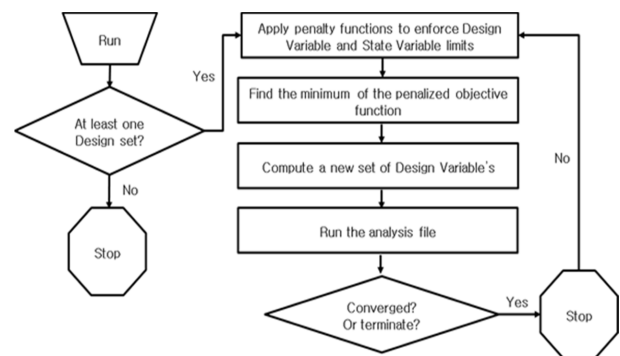


Fig. 8. Process of size optimization for first-order method

Table 4. Design variables for size optimization

Design variables		Thickness	Constraint
1 <sup>st</sup> underframe (mm)	Skin	2.8	2.3-3.3
	Rib	2.2	1.8-2.6
Side frame (mm)	Skin	2.8	2.3-3.3
	Rib	1.8	1.4-2.3
Roof frame (mm)	Skin	2.5	2.0-3.3
	Rib	1.8	1.4-2.3
Solebar (mm)	Skin	5.0	3.0-7.0
	Rib	5.0	3.0-7.0
Carbon/Epoxy composite (mm)	Skin	2.5	1.5-3.5

3.3 치수최적화 결과

200 MPa의 제한조건에 대하여 치수최적화를 수행한 결과 하이브리드 차체 중량이 9.86 ton일 때 9.32 ton으로 감소하였다. 이는 기존의 11.5 ton이었던 기본설계(안)과 대비하여 총 0.54 ton(4.7%)의 중량감소 효과가 나타남을 보여주고 있다. 여기서 각각의 알루미늄 압출재의 두께는 지정된 설계변수 범위 내에서 변동되었고 압출재의 제작성을 고려하기 위해 두께 결과를 두 번째 소수점에서 반올림을 적용하여 두께를 산출하였다. 알루미늄 압출재의 두께 감소는 솔바 프레임의 리브에서 1.6 mm으로 가장 큰 변동폭을 보였으나 반대로 솔바 프레임의 스킨에는 0.2 mm의 두께 증가를 보여주었다. 이는 리브의 두께가 감소하면서 증가하는 응력을 보완하는 작용으로 스킨의 두께가 증가한 것으로 판단된다. 솔바 프레임을 제외한 다른 부재들은 두께가 줄어들었고, 이는 하중의 영향에 비해 차체가 과설계되어 있음을 알 수 있었다. 루프 프레임의 스킨, 1층 언더프레임 스킨 그리고 사이드 프레임 스킨에서 0.5 mm의 두께

감소가 나타났고 1층 언더프레임의 리브, 사이드 프레임의 리브에는 0.4 mm의 두께 감소가 나타났다. 샌드위치 복합재의 면재부인 T700 카본/에폭시 복합재의 경우 0.7 mm의 두께감소 효과가 나타나는 것을 확인하였다. Fig. 9는 각 주요 설계변수의 두께와 무게 변화를 그래프로 보여주고 있고, Table 5는 치수최적화가 수행된 결과 및 두께정보를 나타낸다. 그리고 Fig. 10은 최적화 결과를 검증하기 위한 하이브리드 차체 구조물의 구조해석결과를 보여준다.

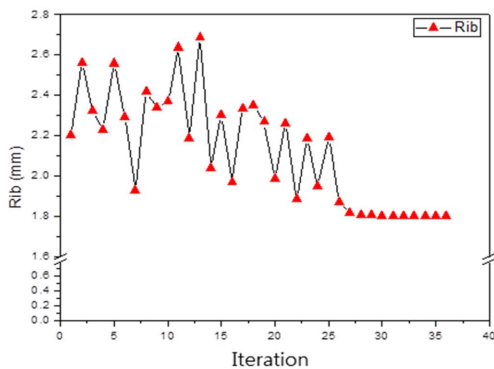
4. 결론

본 논문에서는 300 km/h급의 2층 고속열차 차체 구조물의 경량화를 위해 소재대체법과 치수최적화기법을 이용하여 샌드위치 복합재를 적용한 2층 고속열차 하이브리드 차체 경량설계(안)를 제시하는 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

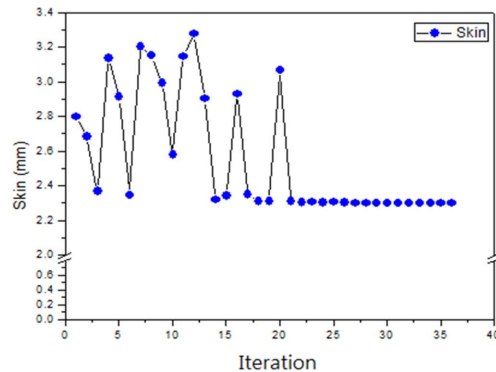
- (1) 샌드위치 복합재의 적용부위 선정을 위해 2층 고속열차 알루미늄 차체 구조물에 조합하중을 적용하여 위상최적화를 수행한 결과 2층 언더프레임과 루프 프레임에서 가장 낮은 재료 밀도가 발생하는 것을 확인하였다.
- (2) 위상최적화를 통해 재료의 밀도가 높게 나타난 부분에는 높은 구조 강성 및 강도가 요구되므로 알루미늄 압출재를 그대로 적용하였고 밀도가 낮은 부분에는 상대적으

Table 5. Thickness result of size optimization

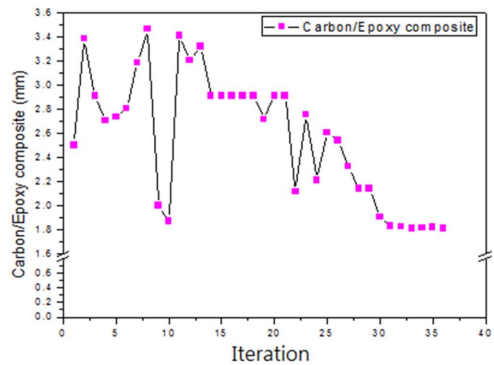
Roof		1st underframe		Solebar		Side frame		Composite
Skin	Rib	Skin	Rib	Skin	Rib	Skin	Rib	Skin
2.0	1.8	2.3	1.8	5.2	3.4	2.3	1.8	1.8



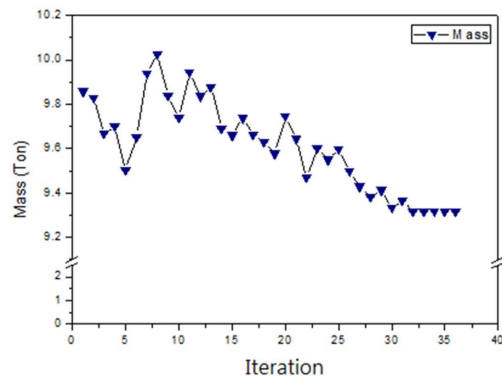
(a) Thickness result of rib



(b) Thickness result of skin



(c) Thickness result of T700 carbon/epoxy composite



(d) Weight result of hybrid carbody

Fig. 9. Thickness and mass result for size optimization

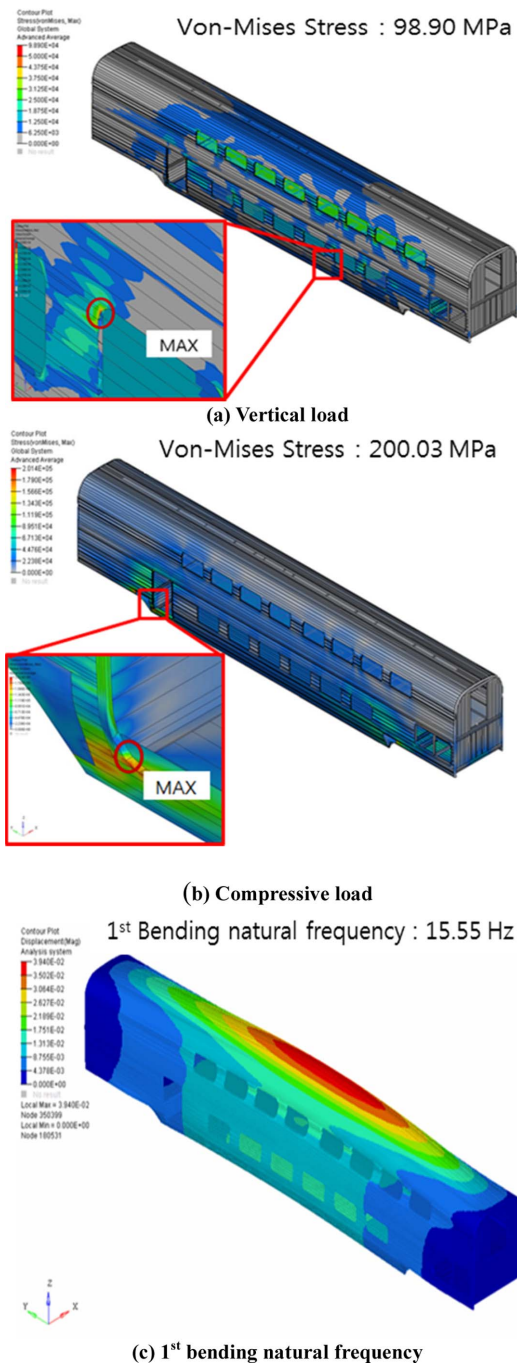


Fig. 10. Structural analysis result for lightweight design of carbody

로 낮은 구조 특성이 요구되어 경량화를 위해 2층 언더프레임과 루프 프레임에 샌드위치 복합재를 적용하였다. 그 결과, 약 1.64 Ton(14%)의 경량화 효과가 나타나는 것을 확인하였다.

(3) 2층 고속열차 하이브리드 차체의 단면치수정보를 새롭게 정립하기 위해 치수최적화를 수행하였으며 이를 위해 설계변수, 제약조건, 목적함수를 정식화 하였다. 특히 구조안전성 평가의 해석적 방법과 시험적 방법의 오차를 고

려하여 알루미늄의 항복응력을 215 MPa에서 200 MPa으로 제한하였다. 치수최적화 해석은 경제적인 해석을 위해 근사법과 일계법을 조합하여 수행되었고 해석결과 0.54 Ton (4.7%)의 중량 감소 효과가 나타났다.

(4) 소재대체법과 치수최적화를 통해 얻어진 두께정보를 하이브리드 차체에 반영한 결과, 기존 2층 고속열차의 기본설계(안)의 무게보다 총 2.18 Ton(17.7%)의 경량화 효과가 발생하였음을 확인하였다.

(5) 하이브리드 차체 제작을 위한 소재대체법과 최적화 기법은 경량화뿐만 아니라 우수한 구조적 성능도 확보하게 되어 2층 고속 철도차량 차체 기술 향상에 많은 기여를 할 것으로 사료된다.

(6) 추후에 2층 언더프레임에 대한 이종재료간 접합부의 강도평가가 수행되어야 하며 치수 최적화 결과에 따른 알루미늄 압출재의 제작성 검토도 수행되어야 할 것으로 사료된다.

## REFERENCES

1. Park, S.W., *Post-2020 Climate Regime and Paris Agreement*, Ph. D Thesis, Kwangwon National University, KR, 2016.
2. Hudson, W., Carruthers, J., and Robinson, A., "Multiple Objective Optimization of Composite Sandwich Structures for Rail Vehicle Floor Panels," *Composite Structures*, Vol. 92, No. 9, 2009, pp. 2077-2082.
3. Han, S.W., and Jung, H.S., "Weight Reducing of Aluminum Extrusion Profiles of a Railway-car Body Based on Topology and Size Optimization," *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 35, No. 2, 2011, pp. 213-221.
4. Yang, H.S., Joo, J.Y., Park, H.C., and Lee, A.H., "Study on the Structure with Lightweight by Modification of Traveling System for Railway Vehicles," *Proceeding of Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, 2011, pp. 1191-1198.
5. Hwang, W.J., and Kim, H.J., "Weight Minimization of a Double-deck Train Carbody Using Response Surface Method," *Proceeding of Spring Conference of the Korean Society for Railway*, 2005, pp. 122-127.
6. Ko, H.Y., Shin, K.B., and Kim, D.H., "A Study on Structural Test and Derivation of Standard Finite Element Model for Composite Vehicle Structures of Automated People Mover," *Composite Research*, Vol. 22, No. 5, 2009, pp. 1-7.
7. Lee, J.Y., Shin, K.B., and Jeong, J.C., "Simulation of Low Velocity Impact of Honeycomb Sandwich Composite Panels for the BIMODAL Tram Application," *Composite Research*, Vol. 20, No. 4, 2007, pp. 42-50.
8. Koo, J.S., and Jung, H.S., "A Study on Material Substitution Design and Evaluation Method for Structural Components of Rolling Stocks," *Journal of The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 12, No. 4, 2004, pp. 74-84.
9. Cho, J.G., Koo, J.S., and Jung, H.S., "Study on Weight Reduction of Urban Transit Carbody Based on Material Changes and Structural Optimization," *Journal of the Korean Society of*

- Mechanical Engineers*, Vol. 37, No. 9, 2013, pp. 1099-1107.
10. Kang, S.G., Shin, K.B., Park, K.J., Lee, E.K., and Yoon, I.R., "A Study on the Weight-reduction Design of High-speed Maglev Carbody Made of Aluminum Extrusion and Sandwich Composite Roof," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 38, No. 10, 2014, pp. 1093-1100.
  11. Jang, H. J., Shin, K.B., and Han, S.H., "A Study on the Crash-worthiness Evaluation and Performance Improvement of Tilting Train Carbody Structure Made of Sandwich Composite," *Composites Research*, Vol. 24, No. 5, 2011, pp. 9-16.
  12. Ko, H.Y., Shin, K.B., and Jeong, J.C., "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, 2009, pp. 518-525.
  13. Choi, Y.G., Shin, K.B., and Kim, W.H., "A Study on Size Optimization for Rocket Motor with a Torispherical Dome," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 34, No. 5, 2010, pp. 567-573.