

## 도시철도차량 차체의 경량화를 위한 소재 변경 및 구조체 최적화 연구

조정길\* · 구정서\*\* · 정현승\*\*

\* 서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과, \*\* 한국철도기술연구원 신교통연구본부

### Study on Weight Reduction of Urban Transit Carbody Based on Material Changes and Structural Optimization

Jeong Gil Cho\*, Jeong Seo Koo\*\* and Hyun Seung Jung\*\*

\* Dept. of Rolling Stock System, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,

\*\* New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute

(Received January 22, 2013 ; Revised April 11, 2013 ; Accepted May 30 2013)

**Key Words:** Weight Reduction(경량화), Urban Transit Carbody(도시철도차량차체), Size Optimization(치수최적설계), Frame type(프레임형태), Composite Materials(복합재료)

**초록:** 본 연구에서는 알루미늄 압출재로 구성된 한국형 표준전동차모델(K-EMU)의 차체를 대상으로 치수 최적설계와 구조체 소재 변경을 통한 경량화방안에 대해 연구하였다. 우선 K-EMU 차체의 하부구조, 측벽구조, 단부구조의 부재별 두께를 현재의 압출가능 두께를 적용하여 치수 최적화 기법으로 약 14.8% 경량화 하였다. 그리고 치수최적설계 된 K-EMU 차체에 유지보수성이 좋은 고장력강(SMA570)재질의 프레임타입 하부구조를 적용하여 초기 K-EMU 차체대비 약 3.8% 경량화 된 하이브리드 차체를 도출하였다. 마지막으로 샌드위치 복합재를 하부구조와 지붕구조에 적용하여 초기 K-EMU 차체대비 약 30% 경량화 된 초경량 하이브리드 차체를 도출하였다. 도출된 차체 모델들은 모두 전동차 구조체 하중시험법을 만족하였다.

**Abstract:** This study proposes a weight reduction design for urban transit, specifically, a Korean EMU carbody made of aluminum extrusion profiles, according to size optimization and useful material changes. First, the thickness of the under-frame, side-panels, and end-panels were optimized by the size optimization process, and then, the weight of the Korean EMU carbody could be reduced to approximately 14.8%. Second, the under-frame of the optimized carbody was substituted with a frame-type structure made of SMA 570, and then, the weight of the hybrid-type carbody was 3.8% lighter than that of the initial K-EMU. Finally, the under-frame and the roof-panel were substituted with a composite material sandwich to obtain an ultralight hybrid-type carbody. The weight of the ultralight hybrid-type carbody was 30% lighter than that of the initial K-EMU. All the resulting carbody models satisfied the design regulations of the domestic Performance Test Standard for Electrical Multiple Unit.

### 1. 서 론

자동차, 항공, 철도 등의 교통수단에 있어서 녹색성장을 위하여 수송에너지 절감을 위한 연구가 매우 중요한 문제로 부각되고 있다. 철도분야에서는 철도차량의 경량화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 국내에서도 철도차량을 구성하는 차체, 대차, 동력장치, 제어장치 및 내·외장품 등의 개별적인 경량화연구를 바탕으로 전체 차량

의 경량화 연구도 진행되고 있다.<sup>(1)</sup>

차체경량화 방법은 구조설계합리화,<sup>(2)</sup> 최신공법 적용, 경량소재 적용<sup>(3)</sup> 등 크게 3가지로 나뉘는데 본 연구에서는 현재 광주지하철 1호선, 대전지하철 1호선 등에 도입되어 운영 중인 한국형 표준전동차 Korean standard Electric Multiple Unit (K-EMU) 차체를 대상으로 경량소재 적용 및 구조설계 최적화에 대해 연구하였다.

철도차량 차체의 경우, 기존 강재에서 스테인레스강, 알루미늄합금, 복합소재 및 고장력강 등 점차 경량소재를 적용하는 방향으로 연구가 진행

† Corresponding Author, [koojs@seoultech.ac.kr](mailto:koojs@seoultech.ac.kr)

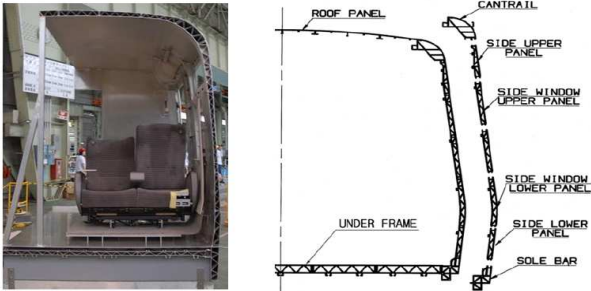


Fig. 1 Section Shapes of K-EMU

되고 있다. K-EMU 차체는 알루미늄 압출재로 Fig. 1과 같이 하부구조, 측벽구조, 단부구조는 이중판재구조로서 내·외측의 판재와 내부의 심재로 구성되어 있으며 지붕구조는 단일판재구조로 이루어져 있다.

K-EMU 차체는 알루미늄 압출재로 제작된 monocoque 구조체로서 차체 전체에서 하중을 골고루 분담하도록 하여 차체 무게를 줄이고 제작성도 용이하게 하였다.<sup>(4)</sup> 하지만 K-EMU차체는 1998년 제작당시 압출기술의 한계로 인해 과도하게 설계된 부분이 존재하며 현재의 발달된 압출기술을 적용하면 추가적인 경량화가 가능할 것으로 판단되었다. 따라서 치수최적설계를 통해 전동차 구조체 하중시험조건을 만족하는 범위 내에서 부재별 두께를 줄이도록 연구하였다.

또한 압출재 형태 하부구조의 경우 제작성 및 경량화효과는 좋지만 압출재 특성상 사고발생시 손상범위, 손상수준을 추정하기 힘들고 해당 압출재 조달이 어렵기 때문에 유지보수 측면에서 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 치수최적화된 K-EMU의 하부구조에 프레임-판재구조를 적용한 하이브리드 형태의 차체모델을 구성하여 초기 K-EMU와 경량화효과를 비교분석하였다.

추가적으로 한국형 틸팅열차, 바이모달 트램 등에 적용하는 샌드위치복합재를 치수최적화된 K-EMU에 적용하여 초경량 차체를 도출하고 경량화효과를 비교분석하였다.

## 2. 초기 K-EMU 차체모델의 유한요소해석 및 치수최적설계

### 2.1 초기 K-EMU 차체모델의 유한요소해석

알루미늄 압출재로 구성된 K-EMU 차체의 유한요소해석을 위해 Altair사 Hypermesh의 일반 셸요

Table 1 FE models and dimension of K-EMU

Number of nodes[EA]	577064
Number of elements[EA]	671962
Mean element length[mm]	30
Width[mm]	3120
Length[mm]	19500
Height[mm]	2564
Weight[kg]	5934

Table 2 Mechanical properties of AL6005A

	Young's modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )	Density (kg/mm <sup>3</sup> )	Poisson's ratio	Allowable stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	
				Base zone	Weld zone
AL6005A	7000	2.7×10 <sup>-6</sup>	0.33	21.9	10.7

Table 3 Performance test standards for EMU

Loading condition	Load calculation method	
Vertical load	(Vehicle weight of maintenance status + Weight of the max. passenger - Weight of the bogie) × 1.2 - (Weight of the bare frame + Weight of the test equipment) ⇒ 52640(kgf)	
Vertical & compressive load	Compressive load	490,000 N ⇒ 50000(kgf)
	Vertical load	Vehicle weight of maintenance status - Weight of the bogie - (Weight of the bare frame + Weight of the test equipment) ⇒ 20260(kgf)
Twist load	39,200 N · m ⇒ 400000(kgf·mm)	
3-point load	Vehicle weight of maintenance status - Weight of the bogie - (Weight of the bare frame + Weight of the test equipment) ⇒ 20260(kgf)	

소인 pshell을 이용하여 Table 1, Fig. 2와 같이 모델링을 하였다.<sup>(5)</sup> 적용재료는 Table 2의 AL6005A이며 Table 3의 전동차 구조체 하중시험조건<sup>(6)</sup>을 적용한 유한요소해석을 수행하였다.

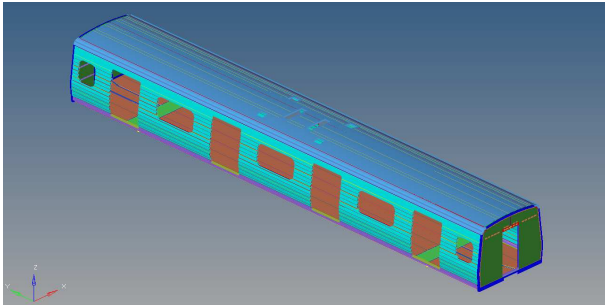


Fig. 2 FE models of K-EMU (shaded view)

Table 4 FE analysis results of initial K-EMU

	Initial K-EMU		Allowable limit
	Vertical load		
von Mises stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	Vertical load	14.1	21.9
	Vertical & compressive load	8.0	
	3-point load	15.8	
	Twist load	6.7	9.8
Deflection(mm)	Vertical load	7.1	13.8
1 <sup>st</sup> natural frequency(Hz)	Vertical load	13.2	over 10

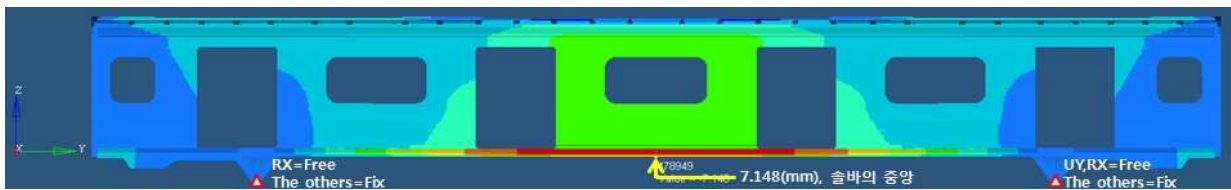


Fig. 3 FE analysis result of initial K-EMU under vertical loading condition (max. deflection)

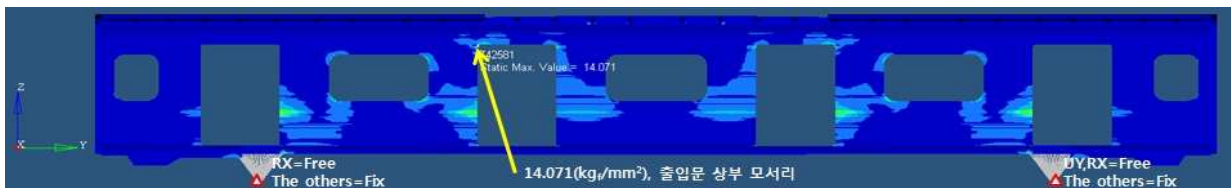


Fig. 4 FE analysis result of initial K-EMU under vertical loading condition (max. von Mises stress)

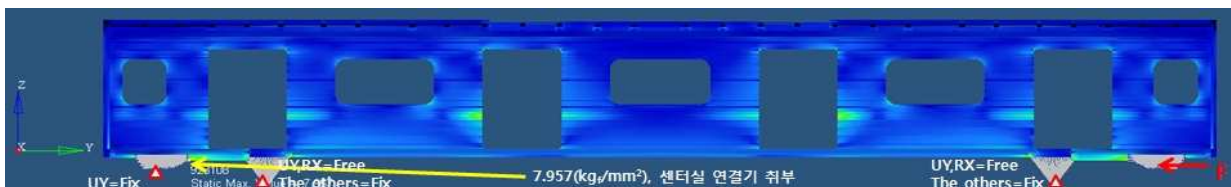


Fig. 5 FE analysis result of initial K-EMU under vertical & compressive loading condition (max. von Mises stress)

유한요소해석결과, Fig. 3~5와 같이 수직하중시험조건에서 하부구조와 측벽구조의 연결부인 solebar 최대처짐량이 약 7.1mm, 출입문 상부 모서리에서 최대등가응력이 약 14.1kgf/mm<sup>2</sup>, 승차감 척도인 고유진동수는 약 13.2Hz로 허용 기준치를 만족한다. 또한 수평압축하중시험조건에서는 센터실에서 최대등가응력이 약 8.0kgf/mm<sup>2</sup>로서 모재의 항복강도 조건을 만족하며, 3점지지 하중시험조건 및 비틀림 하중시험조건 모두 출입문 상부 모서리에 발생한 최대등가응력이 모재의 항복강도 및 피로강도 조건을 만족한다. 즉, 규정의 하중조건에 대한 초기 K-EMU 차량 해석결과는 Table 4와

같이 허용기준에 비해 여유가 있다.

이처럼 초기 K-EMU 차체가 규정의 허용기준에 비해 여유가 많은 이유는 제작당시 압출기술의 한계 때문이며 현재는 압출기술 향상으로 추가적인 경량화가 가능하다고 판단된다.

### 2.2 초기 K-EMU 차체모델의 치수최적설계

현재 철도차량 차체의 압출가능두께는 제품의 크기에 맞는 압출금형에 따라 다르다. 하부구조의 경우 REC금형으로 제작하며, 측벽, 지붕, 단부 등은 15인치보다 작은 형상의 금형을 이용한다. 압출두께는 1.1mm까지 제작이 가능하지만 철도차량

과 같이 20년 이상 운영하는 경우에는 안전율을 고려하여 적용하지 않고 있다. 제품의 크기에 따른 적용가능 압출두께는 Table 5와 같다.

일반적인 최적설계 방법으로는 위상최적설계를 통해 제품의 형상을 결정한 후 상세치수를 결정하기 위해 치수최적설계를 적용하는데, 본 연구 대상인 K-EMU의 경우, 제작성과 보수성을 고려한 위상설계가 이미 이루어져 있어 위상최적설계는 생략하고 치수최적설계를 수행하였다.

치수최적설계를 수행하기 위해 K-EMU 차체 중, 이중판재구조로 구성된 하부구조, 측벽구조, 단부구조의 판재(skin)와 심재(rib)를 Table 6과 같이 설계변수로 설정하였다.

본 연구에서 사용한 치수최적설계기법은 압출재의 두께를 설계변수로 하고 구배법(gradient method)을 이용하여 제한조건과 목적함수에 맞는 최적 두께를 찾는 방법이다. 이는 함수의 최소점을 찾기 위해 초기 값에서 출발하여 경사가 음(-)에서 양(+)으로 변하는 점을 구하는 방법으로서 설계변수의 값을 설정한 범위 안에서 조정하

여 최종목표를 만족시키는 방법을 이용한다.<sup>(7)</sup>

K-EMU 차체에 대해 다음 설계조건으로 수직하중시험조건과 수평압축하중시험을 적용하여 Altair사의 Optistruct로 최적화를 수행하였다.<sup>(8)</sup>

- objective: minimize mass
- design variable: thickness of components
- design constraints:
  - max. deflection < 13.8(mm)
  - max. von Mises stress < allowable stress
  - 1<sup>st</sup> natural frequency > 10(Hz)

치수최적화 결과를 Table 7, 8에 정리하였으며 최종적으로 선택한 부재별 두께는 두개의 하중조건을 모두 만족하여야 하므로 큰 값을 선택하였다. 이렇게 치수최적설계 된 모델을 이용하여 나머지 비틀림 하중시험조건과 3점지지 하중시험조건에 대해서도 유한요소해석을 수행하였으며 모두 허용조건이내를 만족하였으며 초기모델 대비 약 14.8%의 경량화가 가능하였다.

Table 5 Extrusion thickness



	REC		Under 15"	
	Skin	Rib	Skin	Rib
Thickness(mm)	2.4	1.8	2.0	1.4
Shape and size(mm)	 <ul style="list-style-type: none"> <li>· width : 550</li> <li>· height : 50~70</li> </ul>		 <ul style="list-style-type: none"> <li>· width : 356</li> <li>· height : 30</li> </ul>	

Table 6 Design variables of initial K-EMU


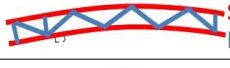


	Shape	Initial thickness (mm)		Range of thickness (mm)
		Skin	Rib	
Under-frame		Skin	2.8	2.4~2.8
		Rib	2.5	1.8~2.5
Side panel		Skin	3.0	2.0~3.0
		Rib	3.0	1.4~3.0
Solebar		Skin	5.0	2.4~5.0
		Rib	5.0	1.8~5.0
End panel		Skin	5.0	2.0~5.0
		Skin	3.0	2.0~3.0
		Rib	2.8	2.0~2.8
		Rib	2.8	1.4~2.8

Table 7 Design variables

		Initial thickness (mm)	Optimized thicknesses for vertical loading condition (mm)	Optimized thicknesses for vertical & compressive loading condition (mm)	Optimized thicknesses (mm)
Under-frame	Skin	2.8	2.4	2.4	2.4
	Rib	2.5	1.8	1.8	1.8
Side panel	Skin	3.0	2.0	2.0	2.0
	Rib	3.0	1.4	1.4	1.4
Solebar	Skin	5.0	5.0	3.4	5.0
	Rib	5.0	4.2	1.8	4.2
End panel	Skin	5.0	2.0	2.0	2.0
		3.0	2.0	2.0	2.0
	Rib	2.8	2.0	2.0	2.0
		2.8	1.4	1.4	1.4

Table 8 FE analysis results of optimized K-EMU

	Optimized K-EMU		Allowable limits
	Vertical load	Vertical & compressive load	
von Mises stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	Vertical load	19.1	21.9
	Vertical & compressive load	8.6	
	3-point load	20.6	
	Twist load	9.0	9.8
Deflection(mm)	Vertical load	9.0	13.8
1 <sup>st</sup> natural frequency(Hz)	Vertical load	13.0	over 10

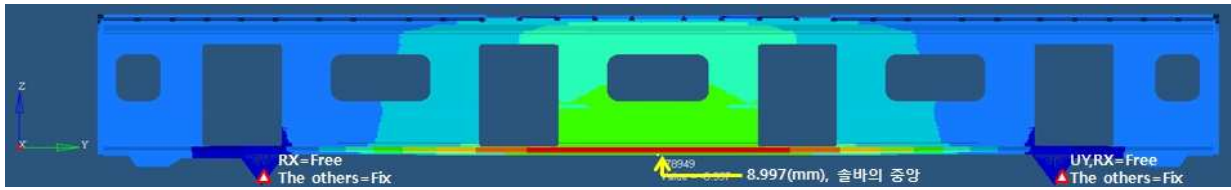


Fig. 6 FE analysis result of the optimized K-EMU under the vertical loading condition (max. deflection)

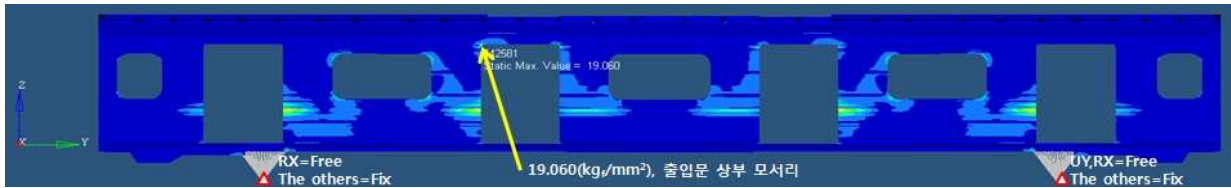


Fig. 7 FE analysis result of the optimized K-EMU under the vertical loading condition (max. von Mises stress)

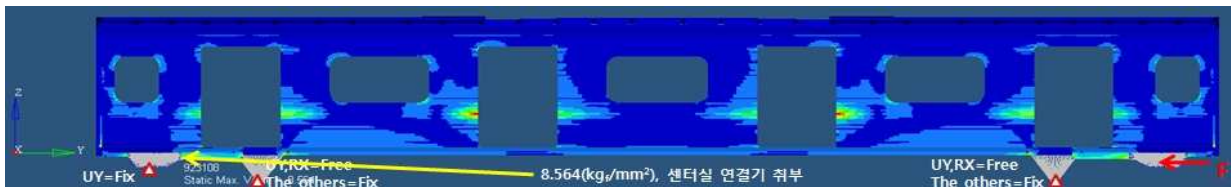


Fig. 8 FE analysis result of the optimized K-EMU under the vertical & compressive loading condition (max. von Mises stress)

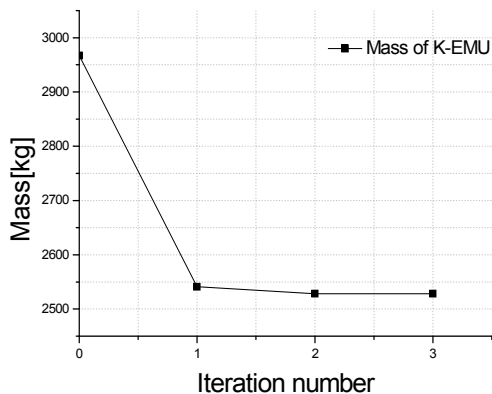


Fig. 9 Weight reduction history of K-EMU

### 3. 프레임 타입의 하부 차체구조 적용

#### 3.1 프레임 타입 하부구조를 적용한 하이브리드 차체모델의 유한요소해석

일반적으로 알루미늄 압출재형태의 차체는 기존의 강재 및 SUS 프레임 타입 차체에 비해 경량화가 용이하지만 사고 발생 시 어떤 부위에 크랙이 발생했는지 추정하기 어렵고 해당 압출재 수급 등 보수도 어렵다. 그러나 프레임 타입의 강재 차체는 압출재 차체에 비하여 인성이 좋고 손상



Frame type

Extrusion type

Fig. 10 Comparison of under-frame type

부위의 검사도 용이하며 수리범위 추정과 수리가 용이하기 때문에 하부구조 적용이 선호되고 있다.

알루미늄 압출재로 구성된 K-EMU 차체의 치수 최적설계를 통해 약 14.8%의 경량화가 가능했지만 추가적인 경량화와 유지보수 장점이 있는 하이브리드 형태의 차체모델을 구성하기 위해 지붕구조, 측벽구조, 단부구조는 AL6005A재질의 치수 최적설계된 K-EMU 차체를, 하부구조는 Table 9의 SMA570재질의 서울시 3호선 신조전동차 차체의 프레임 타입의 하부구조<sup>9)</sup>를 적용하였다. 여기서 하부구조의 전체적인 크기는 K-EMU 차체모델과 일치할 수 있도록 맞추어서 구성하였다.

치수 최적설계된 K-EMU 차체의 하부구조에 기존 압출재 형태와는 달리 종방향으로 stiffner가 일정한 간격으로 배치된 Fig. 10과 같은 3호선 신조

**Table 9** Mechanical properties of SMA570

	Young's modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )	Density (kg/mm <sup>3</sup> )	Poisson's ratio	Allowable stress (kgf/mm <sup>2</sup> )
AL6005A	20979	7.6×10 <sup>-6</sup>	0.33	46.9

**Table 10** FE analysis results of the frame-type hybrid carbody

	Vertical load	Allowable limits
von Mises stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	18.8	AL6005A : 21.9 SMA570 : 46.9
Deflection(mm)	12.1	13.8
1 <sup>st</sup> natural frequency(Hz)	12.9	over 10

**Table 11** Design variables of the frame-type hybrid carbody

	Initial thickness(mm)	Range of thickness(mm)	Optimized thickness(mm)
Floor	5.67	2.4~5.67	2.4
stiffner	4	2.4~4	2.4

전동차 하부구조를 개조설계 적용한 후, 동일한 조건으로 수직하중시험조건으로 유한요소해석을 수행하였다.

유한요소해석결과는 Table 10과 같이 solebar의 최대처짐량이 약 12.1mm, 출입문 상부 모서리에서 최대등가응력이 약 18.8kgf/mm<sup>2</sup>, 승차감 척도인 고유진동수는 약 12.9Hz로 허용 기준치를 만족하였다. 하지만 하부구조에 사용된 SMA570이 AL6005에 비해 상대적으로 밀도가 높으며 분포비를 역시 많기 때문에 초기 K-EMU 차체에 비해 약 15% 정도 무게가 증가했다.

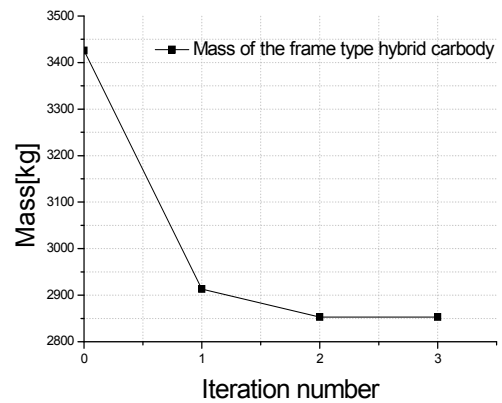
3.2 프레임 타입 하부구조를 적용한 하이브리드 차체모델의 치수최적설계

초기 K-EMU 차체에 비해 무거워진 프레임타입 하이브리드 차체를 경량화 하기 위하여 하부구조에서 종방향으로 배열된 stiffner와 바닥판재의 두께를 대상으로 치수최적설계를 수행하였다.

치수최적설계 된 모델의 수직하중시험조건 해석결과 모두 허용조건이내를 만족하였으며 나머지 하중조건의 해석결과도 Table 12와 같이 모두 허용조건을 만족하였다. 또 초기 K-EMU 모델 대

**Table 12** FE analysis results of the optimized frame-type hybrid carbody

	Optimized frame type hybrid carbody	Allowable limits
von Mises stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	Vertical load	19.0
	Vertical & compressive load	15.5
	3-point load	19.6
	Twist load	7.4
Deflection(mm)	Vertical load	12.8
1 <sup>st</sup> natural frequency(Hz)	Vertical load	12.1
		21.9
		9.8
		13.8
		over 10



**Fig. 11** Weight reduction history of the frame-type hybrid carbody

비 약 3.8%의 경량화가 가능하였다.

이처럼 프레임타입 하이브리드 차체를 치수최적설계를 통해 알루미늄 압출재 차량 정도의 무게로 구현 할 수 있었으며, 경량화 효과는 크지 않지만 유지보수 측면에서 유리한 프레임 타입의 하부구조설계로서 큰 의미가 있는 결과이다.

4. 복합소재의 차체구조 적용

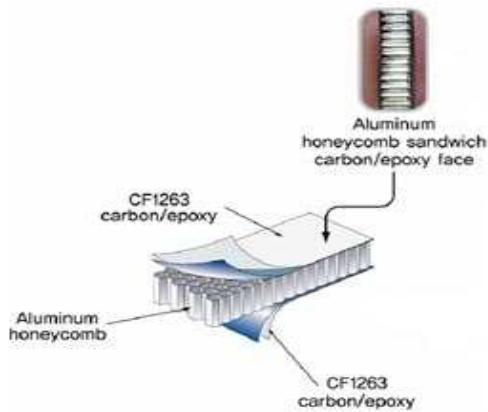
4.1 복합소재의 구성

현재 철도차량에 적용되는 소재는 기존의 강재, SUS에서 알루미늄 압출재, 고장력강, 복합소재 등으로 점차 경량소재의 사용을 늘려 차량의 무게를 줄이는 방향으로 연구개발이 진행되는 상황이다. 따라서 본 연구에서도 치수최적설계 된 K-EMU 차체에 추가적인 경량화로 초경량 차체를 달성하기 위하여 바이모달 트램, 한국형 틸팅열차(TTX)에 적용되고 있는 샌드위치 복합소재를 적용하고 유한요소해석으로 차체의 구조적 안전성을 평가하였다.

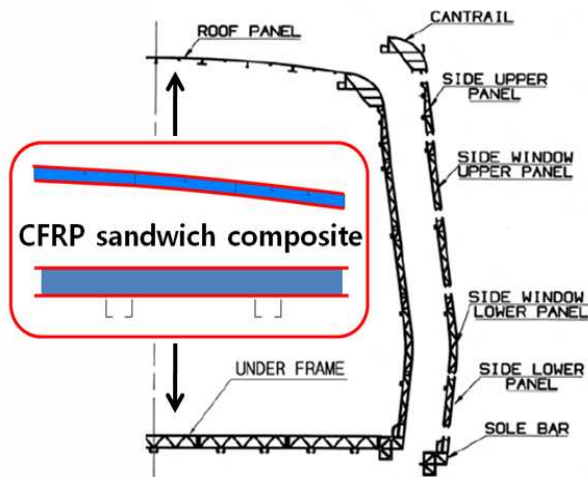
복합소재로서 탄소섬유와 에폭시로 적층된 면재(skin)와 알루미늄 허니콤의 심재(core)로 구성된 CFRP 샌드위치 복합재를 Fig. 12, 13, Table 13과 같이 치수최적설계 된 K-EMU 차체의 하부구조와 지붕구조에 적용하였다.<sup>(10)</sup>

**Table 13** Mechanical properties of CFRP-sandwich composite

		CF1263	Aluminum honeycomb
Density		1.52E <sup>-6</sup> (kg/mm <sup>3</sup> )	5.9E <sup>-8</sup> (kg/mm <sup>3</sup> )
Elastic modulus	E <sub>x</sub>	5955.1(kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	0.071(kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
	E <sub>y</sub>	4940.8(kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	0.030(kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
	E <sub>z</sub>	1087.8(kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	10.714(kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
Shear modulus	G <sub>xy</sub>	595.9(kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	0.063(kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
	G <sub>yz</sub>	372.4(kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	3.265(kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
	G <sub>xz</sub>	372.4(kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	3.265(kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
Poisson's ratio	V <sub>xy</sub>	0.12	0.33
	V <sub>yz</sub>	0.45	0.0001
	V <sub>xz</sub>	0.45	0.0001



**Fig. 12** CFRP-sandwich composite



**Fig. 13** Section Shapes of K-EMU CFRP-sandwich composite

4.2 복합소재의 적용 및 유한요소해석

면재(skin)의 CF1263carbon/epoxy는 적층 셀요소를 이용하였으며 심재(core)의 알루미늄 허니콤은 실제의 육각기둥형태의 허니콤을 모사하기에는 모델링과 해석시간이 많이 소요되므로 등가 솔리드 요소로 모델링하였다.<sup>(11)</sup>

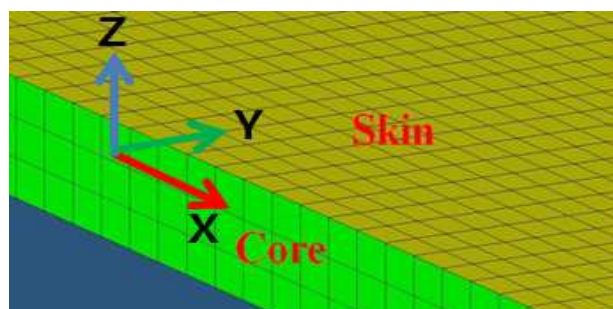
하부구조의 CF1263carbon/epoxy 면재(skin)의 두께는 5(mm)×5, 지붕구조의 CF1263carbon/epoxy 면재(skin)의 두께는 5(mm)×3 이며, 알루미늄 허니콤 심재(core)의 상하부분에 bondex606을 적용하여 적층하였다.

치수최적설계 된 K-EMU 차체의 하부구조와 지붕구조에 CFRP 샌드위치 복합재를 변경 적용한 하이브리드 차체모델에 대하여 전동차 구조체 하중시험조건으로 유한요소해석을 수행하였다.

Table 14와 같이 모든 하중시험조건에서 구해진 해석결과가 허용범위를 만족하며 Fig. 15와 같이 적층복합재의 경우 Tsai-Wu 파손기준식<sup>(12)</sup>을 적용하여 평가하였으며 평가기준 1이하로 안전함을 확인하였다.

**Table 14** FE analysis results of CFRP-sandwich composite hybrid carbody

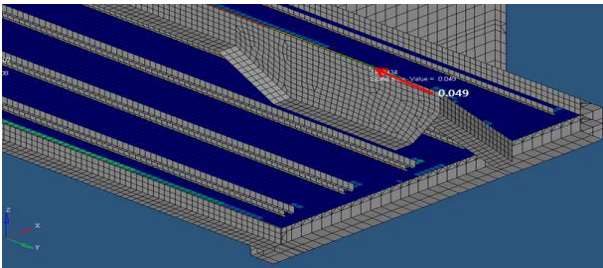
		CFRP-sandwich composite hybrid carbody	Allowable limits
von Mises stress (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	Vertical load	19.6	21.9
	Vertical & compressive load	19.0	
	3-point load	17.2	
	Twist load	7.9	9.8
Deflection(mm)	Vertical load	12.9	13.8
1 <sup>st</sup> natural frequency(Hz)	Vertical load	13.8	over 10
	Vertical load	0.049	1
Tsai-wu failure index	Vertical & compressive load	0.152	
	3-point load	0.030	
	Twist load	0.006	



**Fig. 14** FE models of CFRP-sandwich composite

**Table 15** Comparison of weight reduction rate

	Mass(kg)	Weight reduction rate(%)
Initial K-EMU	5934	0
Optimized K-EMU	5055	-14.8
Initial frame-type hybrid carbody	6850	+15.4
Optimized frame-type hybrid carbody	5706	-3.8
CFRP-sandwich composite hybrid carbody	4134	-30.3



**Fig. 15** Tsai-wu failure index (vertical loading condition)

Table 15는 초기 K-EMU 차체모델부터 프레임 타입 하이브리드차체, 그리고 CFRP 샌드위치 복합재를 적용한 초경량 하이브리드 차체모델의 경량화비율을 정량적으로 비교하였다.

최종적으로 구해진 CFRP 샌드위치 복합재를 적용한 초경량 하이브리드 차체모델은 초기 K-EMU 차체에 비해 약 30% 경량화가 가능하였다.

#### 4. 결론

본 논문은 차체모델의 경량화를 위한 치수최적설계, 소재 변경 및 구조체 형태 변화를 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 알루미늄 압출재를 적용한 초기K-EMU 차체의 부재별 두께를 치수최적설계를 통해 약 14.8% 경량화가 가능하였다.

(2) K-EMU 차체에 SMA570소재의 프레임 타입 하부구조를 적용하고, 치수최적설계를 통해 초기 K-EMU차체보다 3.8%경량화 되고 유지보수에 유리한 하이브리드 차체를 설계하고 국내 법규 만족 여부를 해석적으로 검증하였다.

(3) K-EMU 차체의 하부구조와 지붕구조에 CFRP 샌드위치 복합재를 적용하여 약 30% 경량화 된 초경량 하이브리드 차체를 도출하고 국내 법규 만족 여부를 해석적으로 검증하였다.

본 연구에서 도출된 초경량 하이브리드 차체는 향후 이중 재료간 접합부 이음매 설계 방법 연구를 통하여 국내 철도차량 차체 경량화 설계에 기여할 것으로 기대된다.

#### 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Kim, H. W., Kim, J. W., Jung, H. S. and Park, K. B., 2011, "A Study on Evaluating System Performance for Light-Weight Rolling Stock," *The Korean Society for Railway*, Vol. 14, No. 6, pp. 489~494.
- (2) Han, S. W. and Jung, H. S., 2010, "Weight Reducing of Aluminum Extrusion Profiles of a Railway-Car Body Based on Topology and Size Optimization," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 2, pp. 213~221.
- (3) Cho, J. G., Koo, J. S. and Jung, H. S., 2011, "A Study on Weight-reduction Design of a Hybrid Bodysell Made by Substituting Underframe Material in a Box-type Carbody," *The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 19, No. 5, pp. 100~112.
- (4) Kwon, T. S., Lee, H. Y., Lee, K. S. and Choi, S. K., 1998, "Bodysell Strength Analysis for Standard EMU," *The Korean Society for Railway Fall Conference*, pp. 455~463.
- (5) "Hypermesh," 2011, Altair Engineering Inc.
- (6) Korean Ministry of Construction and Transportation, 1998, "Performance Test Standard for Electrical Multiple Unit," Promulgation No. 22.
- (7) Jasbir S. Arora, 2004, *Introduction to Optimum Design*, Academic Press
- (8) "Optimization," 2011, Altair Engineering Inc.
- (9) Choo, D. H., Kim, Y. M., Koo, B. C. and Koo, J. S., 2009, "A Study on Strcutual Strength



Analysis and Load Test Evaluation of New Model EMU for Seoulmetro Line 3," *The Korean Society for Railway Fall Conference*, pp. 2034~2044.

(10) <http://tran.fiber-x.com/>

(11) Jang, H. J., Shin, K. B., Ko, H. Y. and Ko, T. H., 2010, "A Study on the Standardized Finite Element Models for Carbody Structures of

Railway Vehicle Made of Sandwich Composites," *The Korean Society for Railway*, Vol. 13, No. 4, pp. 382~388.

(12) Tsai, S. W. and Wu, E. M., 1971, "General Theory of Strength for Anisotropic Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, No. 1, pp. 58~80.