Cut-out이 있는 Box형 차체의 하부구조 소재대체 경량화 설계 방법

조 정 길¹⁾ · 구 정 서^{*1)} · 정 현 승²⁾

서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과¹⁾ · 한국철도기술연구원 신교통연구본부²⁾

A Weight-reduction Design Method by Underframe Material Substitution in a Box-type Bodysell with Cut-outs

Jeonggil Cho¹⁾ · Jeongseo Koo^{*1)} · Hyunseung Jung²⁾

¹⁾Department of Rolling Stock Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 139-743, Korea

²⁾New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 360-1 Worum-dong, Uiwang-si, Gyeonggi 437-757, Korea

(Received 17 February 2012 / Revised 16 August 2012 / Accepted 24 August 2012)

Abstract : In this paper, a theoretical weight-reduction method was suggested to substitute an underframe material of a box-type bodysell having cut-outs with an alternative light-weight material. To utilize the material substitution method previously developed for a box-type hybrid bodysell not having cut-outs, we derived a box-type baseline model without cut-outs which is similar to the stiffness condition of a box-type bodysell having cut-outs. To do this, the thicknesses of roof and walls of the baseline model were determined such that the deflection of the baseline model under a distributed vertical load condition is equal to the sum of the theoretical section deflections of the original box model with cut-outs. Next, to derive a hybrid bodysell by under-frame material substitution, the material substitution method for a box-type hybrid bodysell without cut-outs was applied to the box-type baseline model. Finally, we compared the FE simulation results of the derived hybrid bodysells having cut-outs for various materials with the theoretical results of the suggested method, and we obtained their good correlations.

Key words : Material substitution(소재대체), Weight reduction(경량화), Hybrid bodysell(이종소재 차체 구조), Light-weight material(경량화 소재), Box-type carbody with cut-outs(cut-out이 있는 box형 차체)

Nomenclature

A : section area, m²

B : breadth, mm

H : height, mm

L : length, mm

t : thickness, mm

Θ : angle, rad

P : concentrated force, kg_f

F : applied force, kg_f

M : bending moment, kg_f · mm

ω : distributed load, kg_f / mm

ρ : density, kg/mm³

m : mass, kg

σ : stress, kg_f / mm²

δ : deflection, mm

E : Young's modulus, kg_f / mm²

I : moment of inertia of area, mm⁴

R : ratio of a mechanical property per weight

S : stiffness

Y : neutral axis

*Corresponding author, E-mail: koojs@seoultech.ac.kr

Subscripts

f	: failure level
o	: original design
b	: bodysell excluding the underframe (roof + wall)
r	: roof
u	: under-frame
w	: wall
s	: shear
i	: number of part
B	: bending

1. 서론

최근 교통산업에서 가장 중심이 되는 화두는 에너지 절감이다. 철도차량은 자동차, 항공기, 선박 등의 교통수단 중에서 가장 친환경적이며 적은 에너지를 소비하는 것으로 각광 받고 있다. 에너지의 절감을 위해 철도분야에서도 경량화 연구가 활발한데 이를 통하여 추진동력절감, 진동 및 소음 저감, 궤도 유지보수비 절감, 재료비 절감 등의 효과를 기대하고 있다.

경량화 방법은 형상 및 부재 배치의 최적설계와 경량소재를 적용하는 방법으로 크게 나눌 수 있다. 특히 경량소재의 적용에 관한 연구가 활발한데 차체의 경량화를 위해 기존의 강재 소재에서 스테인레스강, 알루미늄 합금재, 복합소재 등으로 변경되는 추세이지만 이렇게 소재를 대체할 경우 발생하는 경량화 설계방법,^{1,3)} 구조적 문제점,^{2,3)} 복합소재 응용기술^{4,5)} 등에 대하여 많은 연구들이 이루어지고 있다. 또 소재선정을 최적화하기 위하여 개념설계 단계에서 소재 대체에 의한 경량화 비율을 체계적으로 예측할 수 있는 방법들도 연구⁶⁻¹³⁾되고 있다.

그러나 경량소재를 적용하여 획기적인 경량화를 달성하려면 두 종류 이상의 소재를 적재적소에 배치한 하이브리드형 차체구조를 설계하는 것이 이상적이다.¹⁴⁾

본 논문에서는 에어컨 설치부, 창문, 출입문 등의 cut-out이 존재하는 차체에 이중소재를 적용한 하이브리드 형태의 차체를 이용하여 경량화 효과를 분석하는 것이 목적이다. 이를 위해 문제를 단순화하

여 기본설계단계에서 적용할 수 있도록 cut-out이 있는 단순 box-type model을 대상으로 이와 상응하는 baseline model을 개발하고, 여기에 기존에 개발된 소재대체이론¹⁵⁾을 적용하여 차체의 일부를 소재 대체하는 경량화 방안을 제시한다.

2. 경량화 이론식에 의한 소재별 비중량 기계적 물성지수

2.1 단순 박스형 차체 모델의 굽힘강성

차체가 수직하중을 받는 경우, 에어컨 설치부, 창문, 출입문 등의 cut-out을 무시하면 Fig. 1과 같이 대차 볼스타 상부에서 단순지지 되고 균일분포하중을 받는 단순 박스형 보로 가정할 수 있다. Euler 보 이론에 의한 전단력 및 굽힘 모멘트는 Fig. 2와 같다.

Fig. 1과 같은 하중 및 경계조건을 갖는 보의 중앙부 처짐(δ)은 식 (1)과 같다.

$$\delta = \frac{w l_2^2}{384 EI} (5l_2^2 - 24l_1^2) \quad (1)$$

식 (1)로부터 식 (2)와 같이 분포하중 하 차체의 굽힘강성(S_B)을 정의할 수 있다.

$$S_B = \frac{wL}{\delta} = C_B EI \quad (2)$$

Fig. 1 Rectangular tube model for bodysells

Fig. 2 Shear force and bending moment diagrams

$$C_B = \frac{384L}{l_2^2(5l_2^2 - 24l_1^2)} \quad (2a)$$

2.2 비강성 지수 R_A

차체 구조 설계시 기본적으로 고려할 사항으로 강도와 강성 조건이 있다. 강성 조건은 차체의 동적 안정성과 관련된 것으로 식 (2)의 굽힘 강성이 일정 수준에 도달하지 못하게 되면, 주행 중 진동 및 승차감 저하 등의 문제점이 발생한다. 일정한 강성조건을 만족시키며 중량을 감소시키기 위해서는 식 (3)을 최대화시키는 소재가 필요하다.¹⁵⁾

$$R_A = \frac{E}{\rho} \quad (3)$$

식 (3)을 대수함수를 사용하여 선형화하면 식 (4)와 같다.

$$\log E = \log R_A + \log \rho \quad (4)$$

M. F. Ashby^{10,13)} 등은 식 (4)의 특성을 분석할 수 있도록 각종 구조재료에 대하여 R_A 값을 대수 스케일로 된 도표를 제작하였다. R_A 을 최대로 하는 소재는 탄성계수-밀도 도표^{10,16)}에서 찾을 수 있는데 그 선정 과정을 Fig. 3에 나타내었다. 이 도표에서 E/ρ =일정한 직선의 기울기에 평행한 사선을 그어서, 이 사선이 상단에 가까운 곳에 위치하는 재료를 사용할 때 더 큰 경량화 효과를 얻을 수 있다.

철도차량 구조에는 높은 강성뿐만 아니라 강도, 내충격성, 내부식성, 가격, 가공성 등 여러 가지 특성을 고려할 때 현실적으로 검토될 수 있는 재료는

Fig. 3 Young's modulus and density diagram

Table 1 R_A values of typical materials

Materials	R_A (GPa m ³ /Mg)	R_A of typical materials	Weight reduction rate
강재	23-28	Carbon steel, $R_A = 27$ SMA570, $R_A = 27$ POSTEN55H, $R_A = 27$ ATOS55, $R_A = 27$ Stainless steel, $R_A = 25$	0% 0% 0% 0% -8.0%
Ti합금	24-27	Ti6Al-4V, $R_A = 26$	-3.8%
Al합금	23-27	6082-T6, $R_A = 26$	-3.8%
CFRP	30-57	C/E (0/90/±45), $R_A = 42$	35.7%
GFRP	15-20	$R_A = 17$	-58.7%
Mg합금	22-24	$R_A = 23$	-17.4%

CFRP, GFRP, Al합금, Ti합금, 강재, Mg합금 등이다. 이들 소재에 대하여 일정 굽힘강성 조건에서 구한 하부구조의 경량화 비율은 Table 1과 같다.

Table 1에서 대체소재를 보통 강재와 비교하면 스테인레스 강, Ti합금, Al합금, Mg합금, GFRP는 비강성이 부족하여 경량화 효과가 없고, CFRP만 비강성이 우수하여 36% 정도의 경량화 효과를 얻을 수 있다.

2.3 비강도 지수 R_B

강도에 관한 조건은 차체에 발생하는 응력들이 허용응력범위 안에 있어야 한다는 조건으로 구조물의 손상 안전성에 관한 것이다. 일정한 강도조건을 만족시키며 중량을 감소시키기 위해서는 식 (5)를 최대화시키는 소재가 필요하다.¹⁵⁾

$$R_B = \frac{\sigma_f}{\rho} \quad (5)$$

식 (5)를 대수함수를 사용하여 선형화하면 식 (6)과 같다.

$$\log \sigma_f = \log R_B + \log \rho \quad (6)$$

식 (6)을 각종 구조재료에 대하여 R_B 를 도식화한 Fig. 4의 강도-밀도 도표로 분석할 수 있다. 즉 R_B 를 최대로 하는 소재는 Fig. 4에서 기울기 q/p 가 일정한 직선에 평행한 사선을 그어서, 이 사선이 최상단에 위치하는 재료를 사용할 때 최대 경량화 효과를 얻을 수 있다.

일정 굽힘강도 조건하에서 각종 소재의 경량화

Fig. 4 Strength and density diagram

Table 2 R_B values of typical materials

Materials	R_B (MPa m^3/Mg)	R_B of typical materials	Weight reduction rate
강재	24-220	Carbon steel, $R_B = 32$	0%
		SMA570, $R_B = 60.37$	47.0%
		POSTEN55H, $R_B = 51.44$	37.8%
		ATOS55, $R_B = 45.14$	29.1%
		Stainless steel, $R_B = 44$	27.3%
Ti합금	120-220	Ti6Al-4V, $R_B = 205$	84.4%
Al합금	12-220	6082-T6, $R_B = 89$	64.0%
CFRP	200-350	C/E (0/90/±45), $R_B = 326$	90.2%
GFRP	150-250	$R_B = 200$	84.0%
Mg합금	50-170	$R_B = 110$	70.9%

수준은 Table 2와 같다. Table 2에서 강재, 스테인레스 강, Al 합금, Mg합금, GFRP, Ti합금, CFRP등의 순서로 비강도가 높고, 보통 강재와 비교할 때 스테인레스 강은 28%, Al 합금은 64%, 그리고 Ti합금, GFRP, CFRP등은 80% 이상 경량화가 가능하다.

3. Cut-out이 있는 단순 box형 차체모델에 상응하는 baseline차체모델 도출

3.1 Cut-out이 있는 단순 box형 차체모델 정의 및 굽힘 처짐

소재대체 이론을 적용하기 위한 cut-out이 있는 단순 box형태의 모델을 구성하기 위해 한국형 표준 전동차¹⁷⁾의 하부구조, 측면 벽 구조 및 지붕구조의 평균두께를 이용하였다. 이를 적용한 유한요소모델의 제원 및 사용재료의 기계적 성질은 Table 3, 4와 같으며 하중조건은 모델의 특성상 측벽과 하부구조

Fig. 5 FEM result of the simple box-type model with cut-outs

Table 3 Dimension of the box model

Item	Data	Item	Data
Length	19500 (mm)	t_u	9.5(mm)
Width	3120 (mm)	t_r	3.2(mm)
Height	2564 (mm)	t_w	4.2(mm)

Table 4 Property of the Al alloy

	Young's modulus (kg_f/mm^2)	Density (kg_f/mm^3)	Allowable stress (kg_f/mm^2)
Al alloy	7000	2.7×10^{-6}	21.9

Table 5 Loading condition

Loading condition	Data
Vertical load	52640 (kg)

의 경계를 따라 분포하중으로 부여하였다. 수직하중시험조건에서의 유한요소해석결과 최대처짐량은 18.9mm이며 Fig. 5와 같다. 본 논문에서 사용한 유한요소해석은 Altair사의 Hyperworks를 이용하였다.¹⁸⁾

3.2 Cut-out이 있는 단순 box형 차체모델의 이론해

모델전체의 굽힘 처짐은 Fig. 6의 cut-out이 있는 단순 box형 모델의 중앙부분을 기준으로 단면의 형태별 8개의 파트의 처짐량을 반력의 집중하중에 의한 처짐량과 분포하중에 의한 처짐량으로서 축차적으로 구할 수 있다.¹⁹⁾

반력의 집중하중에 의한 처짐은 식 (7)의 처짐량과 식 (8)의 처짐각을 이용하여 8개의 파트별 처짐을 축차적으로 계산하였으며 약 13.5mm로 구할 수 있다.

Fig. 6 Half model of the simple box-type bodysell having cut-outs

Fig. 7 Share force diagram

Fig. 8 Bending moment diagram

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI} + \frac{Ml^2}{2EI} \quad (7)$$

$$\theta = \frac{Pl^2}{2EI} + \frac{Ml}{EI} \quad (8)$$

분포하중에 의한 처짐은 식 (9)의 처짐량과 식 (10)의 처짐각을 이용하여 8개의 파트별 처짐을 축차적으로 계산하였으며 약 3.2mm로 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{\omega l^4}{8EI} + \frac{Ml^2}{2EI} \quad (9)$$

$$\theta = \frac{\omega l^3}{6EI} + \frac{Ml}{EI} \quad (10)$$

측벽의 전단처짐은 일반적인 단순전단 처짐과 휘어지는 전단굽힘 처짐으로 구분할 수 있다. 우선 단순전단 처짐은 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\delta_s = \int_0^l \frac{F_s}{AG} x \cdot dx \quad (11)$$

여기서 F_s 는 $F_o + \omega \cdot x$ 로서 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\delta_s = \int_0^l \frac{F_o}{AG} dx + \int_0^l \frac{\omega \cdot x}{AG} dx = \frac{F_o x}{AG} - \frac{2.7x^2}{2AG} \quad (12)$$

식 (12)을 통해서 파트별 단순전단 처짐량의 합은 약 2.5mm로 구할 수 있다.

굽힘전단처짐은 cut-out이 존재하는 파트에서 작용하는 굽힘모멘트의 크기를 이용하여 구할 수 있다.²⁰⁾

$$M_i = \Delta M \cdot \frac{I_i}{\sum I_i} \quad (13)$$

굽힘전단처짐의 특성상 파트별 양 끝단의 처짐각 $\theta = 0$ 이므로 식 (14)의 조건을 만족해야 한다.

$$\theta = \frac{PL^2}{2EI} - \frac{ML}{EI} = 0 \quad (14)$$

여기서 식 (14)을 정리하면 다음과 같이 M 과 P_i 를 구할 수 있다.

$$M = \frac{PL}{2} \quad (15)$$

$$P_i = \frac{2M_i}{L} \quad (16)$$

Table 6 Theoretical result of the model with cut-outs

Bending deflection (mm)		Shear deflection (mm)	
① Distributed load	13.5	② Simple type	2.5
③ Concentrated load	3.2	④ Bending type	8.4
①-③	10.3	②+④	10.9
Total deflection : 21.2mm			

이를 이용하여 굽힘전단처짐량은 식 (17)으로 결정된다.

$$\delta_s = \frac{PL^3}{3EI} - \frac{ML^2}{2EI} = \frac{PL^3}{12EI} \quad (17)$$

식 (17)을 이용하여 cut-out이 존재하는 파트에서의 굽힘전단 처짐량은 약 8.4mm로 구할 수 있다.

3.3 baseline차체모델의 측벽 및 지붕구조의 두께값 계산

Model with cut-outs과 강성측면의 처짐량에 상응하는 baseline model을 결정하기 위해 측벽구조의 두께는 식 (12)을 이용하여 구할 수 있다. 여기서 baseline model은 출입문, 창문 등의 cut-out이 없기 때문에 굽힘전단처짐은 고려하지 않으며 식 (12)을 이용하여 model with cut-outs의 측벽의 전체 전단처짐량(10.9mm)에 상응하는 두께값을 구하면 약 0.5mm로 구할 수 있다.

또한 지붕구조의 두께는 model with cut-outs의 전체 굽힘 처짐량(10.3mm)에 상응하는 식 (18), (19)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{P^3}{3EI} - \frac{\omega l^4}{8EI} = 10.25(mm) \quad (18)$$

$$I = \frac{BH^2[H(t_r + t_u)t_w + 2Bt_r t_u]}{2(Bt_r + Bt_u + 2Ht_w)} + \frac{H^3 t_w}{6} \quad (19)$$

식 (19)을 이용하여 baseline model의 지붕구조의 두께값을 구하면 약 0.7mm로 구할 수 있다.

3.4 Baseline차체모델의 유한요소해석

Model with cut-outs과 동일한 조건으로 baseline model의 유한요소해석을 수행하였으며 해석결과 최대처짐량은 21.4mm이며 Fig. 9와 같으며 이론해와 유사한 결과임을 확인할 수 있다.

Fig. 9 FEM result of the baseline model

4. 소재대체설계

4.1 baseline차체모델 하부구조의 소재대체 설계

Model with cut-outs에 소재대체 이론을 적용하기 위해 우선 baseline model을 이용하였다. 전체 Al alloy를 적용한 baseline model과 동일한 굽힘강성 및 굽힘강도를 만족하면서 철도차량에 적용 가능한 CFRP, GFRP, Mg alloy, 고장력강을 하부구조에 적용하여 하이브리드모델을 구성하여 기준모델과의 특성을 비교해보았다.

Table 7 Property of the materials

	Young's modulus (kg/mm ²)	Density (kg/mm ³)	Allowable stress (kg/mm ²)
Al alloy	7000	2.7×10^{-6}	21.9
CFRP	7714	1.8×10^{-6}	59.9
GFRP	2949	1.7×10^{-6}	34.7
Mg alloy	4694	2×10^{-6}	22.5
SMA570	20979	7.62×10^{-6}	46.9
POSTEN55H			40.0
ATOS55			35.1

하부구조에 이중소재를 적용하는 경우 굽힘강성 및 굽힘강도를 고려하여 두께를 비교하였다. 우선 굽힘강성이 기준소재와 동일하다는 조건으로는 식 (20)을 이용하여 대체소재들의 두께를 구할 수 있다.

$$Et_{uo} = E_u t_u \quad (20)$$

즉, 소재대체 전·후의 $E \cdot t_u$ 가 일정하다는 조건으로 대체소재들의 두께를 구할 수 있다. 그리고 굽힘강도가 기준소재와 동일한 조건으로의 대체소재들의 두께는 다음 과정으로 구할 수 있다.¹⁵⁾

$$t_u = \frac{A_u}{B} \quad (21)$$

$$A_u = \frac{C_1}{\sigma_{uf}} - \frac{C_2}{E_u} \quad (22)$$

$$C_1 = \frac{M_f A_b Y_b}{I_b + A_b Y_b^2}, C_2 = \frac{E_b I_b A_b}{I_b + A_b Y_b^2} \quad (23)$$

소재대체 전후에 동일한 굽힘강성 및 굽힘강도를 만족하는 조건하에서 기존의 Al alloy가 아닌 대체소재를 적용할 때 동일 굽힘강성 조건에서의 두께와 동일 굽힘강도 조건에서의 두께를 비교한 후 두

Table 8 Thickness of the under-frame

Underframe	Condition of the equal stiffness (mm)	Condition of the equal strength (mm)
Al alloy	9.5	9.5
CFRP	8.6	3.4
GFRP	22.6	5.6
Mg alloy	14.2	9.2
SMA570	3.2	4.5
POSTEN55H	3.2	5.3
ATOS55	3.2	6.0

Table 9 FEM result and weight reduction rate of the hybrid type baseline model

Underframe	Deflection (mm)	Weight of the underframe (kg)	Weight reduction rate of the underframe	Weight of the full model (kg)	Weight reduction rate of the full model
Al alloy	21.4	1560.5	0%	1810.5	0%
CFRP	21.4	941.8	40%	1191.8	34%
GFRP	21.3	2337.5	-50%	2587.5	-43%
Mg alloy	21.3	1727.9	-11%	1977.8	-9%
SMA570	21.1	2086.2	-34%	2336.2	-29%
POSTEN55H	20.9	2457.1	-57%	2707.1	-50%
ATOS55	20.9	2781.6	-78%	3031.6	-67%

Fig. 10 FEM result of the CFRP hybrid baseline model

조건을 모두 만족하여야 하기 때문에 큰 두께 값을 정하여 수직하중시험조건의 유한요소해석을 수행하였다.

Hybrid type baseline 모델들의 유한요소해석 결과 Table 9에서와 같이 모든 모델에서 기준모델과 유사한 처짐량을 나타내었으며 이 중 하부구조에 CFRP를 적용한 하이브리드 모델만이 기준모델보다 하부구조가 약 40%, 모델전체는 약 34% 경량화가 가능하다.

4.2 Cut-out이 있는 단순 box형 차체모델 하부구조의 소재대체 설계

Hybrid type baseline 모델에 적용한 하부구조들의 소재별 두께를 이용하여 cut-out이 있는 hybrid type 모델을 구성하였다. hybrid type baseline model과 동일한 과정으로 수직하중시험조건의 유한요소해석을 수행하였다.

Hybrid type model with cut-outs 들의 유한요소해석 결과를 강성 및 강도측면에서 비교해보았다. Table 10

Fig. 11 FEM result of the CFRP hybrid model with cut-outs (displacement)

Fig. 12 FEM result of the CFRP hybrid model with cut-outs (von Mises stress)

에서와 같이 하부구조에 CFRP, GFRP, Mg alloy, SMA570를 적용한 hybrid모델의 경우 강도측면에서는 하부구조에서 발생하는 최대응력/소재별 허용응력의 비가 기준모델과 비교하여 여유가 있었지만 강성측면에서 처짐량을 비교해보면 여유 없이 비슷하였다. 즉, 강성 여유가 경량화를 제약하는 설계요소이다.

Table 10 FEM result and weight reduction rate of the hybrid type baseline model

Underframe	Deflection (mm)	Weight of the underframe (kg)	Weight reduction rate of the underframe	Weight of the full model (kg)	Weight reduction rate of the full model	Maximum stress of the side wall (kgf / mm^2)	Maximum stress of the underframe [A] (kgf / mm^2)	Allowable stress of the underframe [B] (kgf / mm^2)	A/B [%]
Al alloy	18.9	1560.5	0%	2704.8	0%	18.5	9.7	21.9	44
CFRP	18.9	941.8	40%	2086.1	23%	18.5	10.2	59.9	17
GFRP	18.7	2337.5	-50%	3481.8	-29%	18.5	6.1	34.7	18
Mg Alloy	18.8	1727.9	-11%	2872.1	-6%	18.5	8.0	22.5	36
SMA570	18.8	2086.2	-34%	3230.5	-19%	18.6	17.3	46.9	37
POSTEN55H	18.5	2457.1	-57%	3601.4	-33%	18.6	17.8	40.0	45
ATOS55	18.4	2781.6	-78%	3925.9	-45%	18.6	18.4	35.1	52

또한 하부구조에 POSTEN55H, ATOS55를 적용한 모델의 경우 강성측면에서 처짐량을 비교해보면 기준모델과 비교하여 여유가 있지만 강도측면에서는 기준모델과 비교하여 발생응력/허용응력의 비가 유사하거나 높았다. 즉, 강도 여유가 경량화를 제약하는 설계요소이다.

하이브리드 모델들의 측벽 cut-out부분에서 발생하는 응력집중결과를 기준모델과 비교하였을 때 유사한 응력분포를 확인할 수 있으며 출입문 상부의 모서리에서 최대응력(약 18.5 kgf/mm^2)이 발생하며 이는 측벽에 적용한 Al alloy의 허용응력(21.9 kgf/mm^2)이내의 응력분포를 가진다.

6가지 하이브리드 모델들의 경우 기준모델과 비교하여 각각 하부구조의 기계적 성질에 의해 경량화를 제약하는 설계요소가 변하게 되며 이 중 CFRP만이 높은 비강성 및 비강도 값을 가지므로 하부구조를 소재 대체할 경우, 하부구조의 중량을 약 40% 정도, 모델전체는 약 23% 경량화가 가능하다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) Cut-out이 있는 박스형 차체모델과 강성특성이 동등하게 cut-out이 없는 단순 박스형 baseline 모델을 도출하여 Cut-out 이 있는 하이브리드형 차체의 소재대체 경량화 방법을 개발하였다.
- 2) cut-out 이 있는 단순 box형 차체모델을 이용하여 구조체의 하중시험조건을 통한 유한요소해석결과와 이론해와의 유사성을 검증하였다.
- 3) 이론식에 의해 계산된 두께 값을 적용한 baseline 차체모델의 유한요소해석결과와 cut-out 이 있는 차체모델의 이론적 해석해와 유사성을 검증하였다.
- 4) 소재대체 경량화 이론의 적용을 위하여 도출된 baseline 모델을 통해 하이브리드 모델별 유한요소해석을 통해 경량화 비율을 검증하였으며 이때 적용한 하부구조의 소재별 두께를 이용하여 cut-out이 있는 model의 하이브리드 모델별 경량화 비율을 검증하였다.
- 5) 하부구조를 일정강성 및 일정강도조건에서 소재대체 설계할 경우, 소재별 기계적 특성에 의해

경량화를 제약하는 설계요소가 다르며 높은 비강성 및 비강도 값을 가지는 CFRP만이 Al alloy에 비해 하부구조의 중량을 약 40%정도, 모델전체는 약 23% 경량화가 가능하다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) W. Brocker and R. D. Rosenberger, "Light Weight Potentials in Coach Body Structures of High-speed Trains," Proceedings of WCCR, Vol.D, pp.713-721, 1997.
- 2) D. Swan, C. Nev and J. Carruthers, "Affordable Rail Vehicles," Bodysells Seminar of Advanced Railway Research Center, UK, 1994.
- 3) N. Tagawa, H. Yamashiro and K. Kadota, "Development of New Carbody Structure for High Speed Train," Proceedings of the International Conference on Speed-up Technology for Railway and Maglev Vehicles, Vol.1, pp.477-481, 1993.
- 4) T. Suzuki, K. Sato and K. Akutsu, "Weight Reduction of a Railway Car Body Shell by Applying New Material," Proceedings of the International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, Yokonamo, Japan, pp.65-72, 1993.
- 5) S. Matsuoka and T. Nakamura, "Development of Carbon Fiber Reinforced Plastic Carbody Shell," Proceedings of the International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, Yokonamo, Japan, 1993.
- 6) J. S. Koo, "A Study on the Conceptual Design for the Material Substitution of Rolling Stock Structures," Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol.17, No.2, pp.171-181, 2004.
- 7) J. S. Koo, H. J. Cho, Y. S. Jeon and S. K. Cheong, "A Study on the Conceptual Design of Carbodies with Shell Type Sections for Weight Reduction Using the Material Substitution,"

- Conference Proceedings of Korean Society for Railway, pp.186-186, 2005.
- 8) G. Dioter, Engineering Design, a Material and Processing Approach, McGraw Hill, New York, 1983.
- 9) G. Lewis, Selection of Engineering Materials, Prattice Hall, Inc., USA, 1990.
- 10) M. F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.
- 11) M. F. Ashby, "Multi-objective Optimization in Material Design and Selection," ACTA Materialia Millenium Issue, Vol.48, pp.359-369, 2000.
- 12) J. S. Koo and H. S. Jung, "A Study on Material Substitution Design and Evaluation Method for Structural Components of Rolling Stocks," Transactions of KSAE, Vol.12, No.4, pp.74-84, 2004.
- 13) P. Sirisalee, M. F. Ashby, G. T. Parks and P. J. Clarkson, "Multi-criteria Material Selection in Engineering Design," Advanced Engineering Materials, Vol.6, pp.84-92, 2004.
- 14) J. S. Koo and H. J. Cho, "A Method to Estimate the Weight-reduction of Hybrid Bodysells by Material Substitution," The Korean Society for Railway, Vol.9, No.6, pp.635-643, 2006.
- 15) J. G. Cho, J. S. Koo and H. S. Jung, "A Study on Weight-reduction Design of a Hybrid Body-shell Made by Substituting Underframe Material in a Box-type Carbody," Transactions of KSAE, Vol.19, No.5, pp.100-112, 2011.
- 16) D. M. Chun, S. H. Ahn and J. D. Jang, "Construction of Web-based Material Database and Case Study of Material Selection for Automotive Engine Pulley," Transactions of KSAE, Vol.14, No.4, pp.107-114, 2006.
- 17) T. S. Kwon, H. Y. Lee, K. S. Lee and S. K. Choi, "Bodyshell Strength Analysis for Standard EMU," The Korean Society for Railway, Vol.9, No.6, pp.455-463, 1998.
- 18) Radioss for Linear, Altair Engineering Inc., USA, pp.14-24, 2010.
- 19) A. Bedford and K. M. Liechti, Mechanics of Materials, Prentice Hall, Inc., USA, 2002.
- 20) 스키야마 다케시, 철도차량과 설계기술, 기전연구사, 2005.