

철도차량 구조부품의 소재대체 설계 및 평가기법 연구

구정서* · 정현승

한국철도기술연구원

A Study on Material Substitution Design and Evaluation Method for Structural Components of Rolling Stocks

Jeong-Seo Koo* · Hyung-Seung Jung

Department of Rolling Stock Research, Korea Railroad Research Institute, 374-1 Woulam-dong, Uiwang-city, Gyeonggi-do 437-050, Korea

(Received 12 April 2004 / Accepted 21 June 2004)

Abstract : In this paper, a theoretical method was derived to redesign carbody members by substituting light-weight materials, and to estimate their structural characteristics. Some performance indices to estimate structural behaviors were derived in order to obtain equivalent designs in case of material substitutions under important design constraints of rolling stock, such as bending stiffness, natural frequency, bending and buckling strength. Validity of the theoretical method was evaluated by comparing its results with finite element results in some examples where the aluminium alloy was substituted for the structural steel. The numerical results of the examples show that the proposed method gives reasonable initial guesses for the material substitution designs.

Key words : Light-weight materials(경량화 소재), Material substitution(소재대체), Initial design(초기설계), Structural performance indices(구조성능인자), Finite element method(유한요소법)

Nomenclature

F : applied force, kgf
 ρ : density, kg/mm³
 σ : stress, kgf/mm²
 E : elastic modulus, kgf/mm²
 ν : Poission's ratio
 ω : natural frequency, cycle/sec
 t : thickness, mm
 A : section area
 I : Inertia of moment

Subscripts

a : aluminium alloy
 s : carbon steel
 f : fatigue

1. 서론

첨단신소재를 이용하여 항공기, 자동차 등 수송 수단을 경량화하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 수송기계의 경량화는 에너지 자원의 경제적 이용과 환경보존이라는 측면에서 더욱 중요하게 부각되고 있다. 현재 철도차량의 경우 경량화 소재로서 스테인레스강, 알루미늄 합금, 프라스틱 재료, 복합소재 등이 사용되고 있으나, 신소재 대체 설계시

*To whom correspondence should be addressed.
koojs@krri.re.kr

여기서, ℓ 은 차체 볼스터의 길이 1/2, C_1 은 구속 조건에 의해서 결정되는 상수, I 는 차체 볼스터의 단면 관성모멘트이다. 식 (1)을 굽힘강성에 대한 식으로 변경하면 다음과 같다.

$$S_B = \frac{F_b}{\delta} = \frac{C_1 EI}{\ell^3} \quad (2)$$

차체 볼스터 단면의 관성모멘트를 Fig. 4로부터 유도하면 다음과 같다.

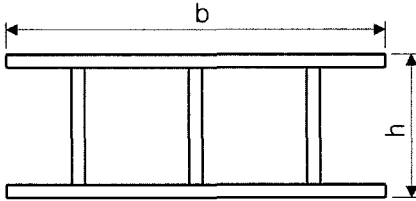


Fig. 4 Dimensions of the body bolster section

$$I = \frac{(ah + 2\beta b)}{4} \cdot t \cdot h^2 \quad (3)$$

여기서, a 및 β 는 차체 볼스터의 수직 및 수평 판의 두께 상수, t 는 차체 볼스터 판의 두께, b 및 h 는 차체 볼스터의 폭과 높이를 나타낸다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하여 전개하면 다음과 같다.

$$S_B = \frac{C_1 (ah + 2\beta b) \cdot h^2}{4 \ell^3} \cdot t \cdot E$$

$$= C_o \cdot t \cdot E \quad (4)$$

여기서, $C_o = \frac{C_1 (ah + 2\beta b) \cdot h^2}{4 \ell^3}$ 이다. 차체 볼스터의 소재를 철강재 대신에 알루미늄 소재로 대체할 경우, 철강재의 굽힘 강성을 S_{Bs} 라고 하고 알루미늄 차체 볼스터의 굽힘 강성을 S_{Ba} 라고 하면, 굽힘 강성은 동일하게 유지하는 조건으로부터 $S_{Bs} = S_{Ba}$ 의 관계식이 성립된다. 식 (4)를 이용하여 이 관계식을 풀어 쓰면 다음과 같다.

$$C_{os} \cdot t_s \cdot E_s = C_{oa} \cdot t_a \cdot E_a \quad (5)$$

여기서, 아래첨자 s 는 철강재를 나타내고 a 는 알루미늄 소재를 나타낸다. C_{os} , C_{oa} 는 굽힘강성 조건 하에서의 강재 및 알루미늄의 차체 볼스터의 치수 변경에 따른 인자이고, t_s , t_a 는 판의 두께, E_s , E_a 는 탄

성 계수를 나타낸다.

식 (5)로부터 강재의 차체 볼스터를 알루미늄으로 소재 대체하여 굽힘 강성을 동일하게 하기 위한 볼스터 판의 두께를 구하는 식은 다음과 같다.

$$t_a = \frac{C_{os}}{C_{oa}} \cdot \frac{E_s}{E_a} \cdot t_s \quad (6)$$

그런데, 본 연구에서 강재의 경우 $\alpha = \beta = 1$ 이므로, 소재 대체 설계된 경우만 수직판 및 수평판의 두께 비를 고려하면,

$$\frac{C_{os}}{C_{oa}} = \frac{(h + 2b)}{(ah + 2\beta b)} \quad (7)$$

여기서 $\alpha\beta$ 는 각각 소재대체 설계된 수직판, 수평판의 두께 비례상수를 표시한다. 따라서 수직판과 수평판의 두께를 구하면 각각 다음 식과 같다.

$$t_{\alpha a} = \alpha \cdot \frac{C_{os}}{C_{oa}} \cdot \frac{E_s}{E_a} \cdot t_s \quad (8)$$

$$t_{\beta a} = \beta \cdot \frac{C_{os}}{C_{oa}} \cdot \frac{E_s}{E_a} \cdot t_s \quad (9)$$

식 (8), (9)에 포함된 형상 변수 C_{os}/C_{oa} 는 수평판과 수직판의 두께 비례상수의 함수인데, 다양한 두께 비에 대하여 식 (7)을 계산하고, Fig. 2의 차체 볼스터의 치수와 Table1의 알루미늄 소재의 물성 값을 식 (8), (9)에 대입하면 Table2와 같이 수직판 및 수평판의 두께가 결정된다.

Table 1 Material properties of the body bolster

Materials	Density (kg/mm ³)	Young's modulus (kgf/mm ²)	Poisson's ratio	Fatigue strength (kgf/mm ²)
Carbon steel	7.85×10 ⁻⁶	21,100	0.3	19.7
Aluminium alloy(6082)	2.7×10 ⁻⁶	7041	0.33	12.7

굽힘 강성 조건을 고려하여 소재대체에 의한 차체 볼스터의 경량화를 예측하기 위해서는 식 (10)을 이용한다.

$$m = A \cdot \ell \cdot \rho \quad (10)$$

여기서, m 은 질량, $A = (3ah + 2\beta b)t = A_o t$ 는 단면적, t 는 두께, ρ 는 밀도를 나타낸다. 굽힘 강성을 표

현하는 식 (4)의 $SB=C_0 \cdot t \cdot E$ 를 t 에 관해서 정리한 다음, 식 (10)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = A_0 \frac{S_B \cdot \ell}{C_0} \left[\frac{\rho}{E} \right] = A_0 \frac{S_B \cdot \ell}{C_0} / M_1 \quad (11)$$

여기서, M_1 은 굽힘강성조건에서 소재 대체에 의한 경량화 지수를 나타낸다. 알루미늄 대 강재의 차체 볼스터 질량비, 즉 경량화 비는 식 (11)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{m_a}{m_s} = \frac{A_{0a}}{A_{0s}} \cdot \frac{C_{0s}}{C_{0a}} \cdot \frac{E_s}{E_a} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (12)$$

여기서, $\frac{A_{0a}}{A_{0s}} = \frac{(3\alpha h + 2\beta b)}{(3h + 2b)}$ 는 차체 볼스터의 단면 비를 나타낸다.

한편, 차체 주요 부품의 고유진동수는 다음의 식 (13)으로부터 계산된다.⁶⁾

$$\frac{\omega_{na}^*}{\omega_{ns}^*} = \sqrt{\frac{\rho_s^* \delta_s}{\rho_a^* \delta_a}} \quad (13)$$

여기서, $\frac{\rho_s^*}{\rho_a^*} = \frac{(3h + 2b)\rho_s}{(3\alpha h + 2\beta b)\rho_a}$ 는 차체 볼스터 단면의 밀도비를 나타낸다.

식 (12), (13)을 이용하여 굽힘강성 조건에서 차체 볼스터 설계시 경량화 율과 고유진동수 변화율을 구하면 Table 2와 같다.

Table 2 The body bolster designs under constant stiffness

Materials	T-ratio (β/a)	Thickness (mm)	Mass ratio	Freq. ratio
Steel		t_s	1	1
AL	1.0	$t_a=3t_s$	1.03	1.05
	1.5	$t_{a\alpha}=2.05t_s$ $t_{a\beta}=3.07t_s$	0.94	1.05
	2.0	$t_{a\alpha}=1.56t_s$ $t_{a\beta}=3.12t_s$	0.91	1.06

2.2 굽힘강도 조건을 고려한 차체 볼스터의 소재대체 설계 이론식

차체의 주요 부품중의 하나인 차체 볼스터에 굽힘 모멘트가 작용될 때 볼스터 구조에 영구 변형이나 피로손상 등이 발생하여서는 안 되므로 소재대체 설계시 차체 볼스터가 일정한 굽힘 강도를 유지

하면서 경량화 될 수 있도록 설계하여야 한다. 차체 볼스터에 작용하는 굽힘 모멘트에 의하여 구조의 어떤 부위에 최대 허용응력(σ_f)이 발생할 때의 작용 하중 F_f 는 식 (14)로 표시할 수 있다.

$$F_f = C_2 \frac{I}{y} \frac{\sigma_f}{\ell} \quad (14)$$

여기서, ℓ 은 차체 볼스터 길이의 1/2, C_2 는 경계의 구속조건에 의해서 결정되는 상수, I 는 관성 모멘트, y 는 도심까지의 거리이다.

차체 볼스터의 관성모멘트 I 에 대한 식 (3)과 도심까지의 거리, $y = h/2$ 를 식 (14)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$F_f = \frac{C_2 (\alpha h + 2\beta b) t \cdot h}{2} \frac{\sigma_f}{\ell} = C_3 \cdot t \cdot \sigma_f \quad (15)$$

여기서, $C_3 = \frac{C_2 (\alpha h + 2\beta b) \cdot h}{2\ell}$ 이다.

차체 볼스터의 소재를 철강재 대신에 알루미늄 소재로 대체 할 경우에도 굽힘 강도는 동일하게 유지되어야 하는 조건으로부터, 철강재의 굽힘 강도를 F_{fs} 라고 하고 대체 소재의 굽힘 강도를 F_{fa} 라고 하면, $F_{fs} = F_{fa}$ 의 관계식이 성립된다.

식 (4)를 이용하여 위의 관계식을 풀어 쓰면 다음과 같다.

$$C_{3s} \cdot t_s \cdot \sigma_{fs} = C_{3a} \cdot t_a \cdot \sigma_{fa} \quad (16)$$

여기서, 아래첨자 s 는 철강재를 나타내고 a 는 대체된 소재를 나타낸다. C_{3s} , C_{3a} 는 굽힘강도 조건에서의 차체 볼스터의 치수 변경에 따른 인자이고, t_s , t_a 는 판의 두께, σ_{fs} , σ_{fa} 는 최대허용응력을 나타낸다.

소재 대체 하였을 경우, 굽힘 강도를 동일하게 유지하기 위한 볼스터 판의 두께를 구하면 식 (17)과 같다.

$$t_a = \frac{C_{3s}}{C_{3a}} \cdot \frac{\sigma_{fs}}{\sigma_{fa}} \cdot t_s \quad (17)$$

$$\frac{C_{3s}}{C_{3a}} = \frac{(h + 2b)}{(\alpha h + 2\beta b)} \quad (18)$$

따라서, 수직판 및 수평판의 두께는 다음과 같다.

$$t_{\alpha a} = \alpha \cdot \frac{C_{3s}}{C_{3a}} \cdot \frac{\sigma_{fs}}{\sigma_{fa}} \cdot t_s \quad (19)$$

$$t_{\beta a} = \beta \cdot \frac{C_{3s}}{C_{3a}} \cdot \frac{\sigma_{fs}}{\sigma_{fa}} \cdot t_s \quad (20)$$

다양한 두께비에 대하여 Fig. 2의 차체 볼스터 치수와 Table 1의 소재 물성값을 넣어 수직판 및 수평판의 두께를 결정하면 Table 3과 같다.

굽힘강도 조건을 고려한 소재대체 설계시, 차체 볼스터의 경량화를 예측하기 위하여 굽힘 강도를 표현하는 식 (15)를 t 에 관해 정리한 다음, 질량식 (10)에 대입한다.

$$m = \left[\frac{F_t \cdot \ell}{C_3} \right] \left[\frac{\rho}{\sigma_t} \right] = \left[\frac{F_t \cdot \ell}{C_3} \right] / M_2 \quad (21)$$

여기서, M_2 는 굽힘강도 조건에서 소재 대체에 의한 경량화 지수를 나타낸다.

소재 대체된 차체 볼스터의 질량비, 즉 경량화 비를 구하기 위해서는 식 (21)을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{m_a}{m_s} = \frac{A_a}{A_s} \cdot \frac{C_{3s}}{C_{3a}} \cdot \frac{\sigma_{fs}}{\sigma_{fa}} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (22)$$

식 (22)를 이용하여 굽힘강도 조건에서 차체 볼스터 설계시 경량화율을 구하면 Table 3과 같다.

Table 3 The body bolster designs under constant strength

Materials	T-ratio (β/a)	Thickness (mm)	Mass ratio
Steel		t_s	1
AL	1.0	$t_a=1.55t_s$	0.50
	1.5	$t_{\alpha a}=1.06t_s$ $t_{\beta a}=1.59t_s$	0.48
	2.0	$t_{\alpha a}=0.81t_s$ $t_{\beta a}=1.61t_s$	0.47

2.3 좌굴강도 조건을 고려한 지붕 보강재의 소재대체 설계 이론식

지붕 보강재(roof stiffener)는 차체의 천장에 설치된 보강재로서 굽힘력보다는 압축 하중으로 인한 좌굴붕괴에 의하여 구조적 기능을 상실할 수 있는 부재이다. 이러한 좌굴 붕괴 특성은 부재의 단면형상과 재료특성에 따라 큰 영향을 받는 설계 요소로

서 경량화 설계에서 중요한 고려 사항이다. 지붕 보강재를 Fig. 5와 같은 구속 조건에서 압축하중 F 를 받는 보로서 모델링할 경우, 오일러 좌굴 하중(Euler buckling load)식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F_c = \frac{n^2 \pi^2 EI}{\ell^2} \quad (23)$$

여기서, n 은 지붕 보강재 끝단의 경계 조건에 의하여 결정되는 상수, ℓ 은 지붕 보강재의 길이를 나타내고 있다.



Fig. 5 Boundary and loading condition of the roof stiffener

Fig. 6은 지붕 보강재의 단면 형상 및 재원을 나타내고 있다. 이것으로부터 지붕 보강재의 관성모멘트를 구하면 식 (24)와 같이 표현된다.

$$I = \frac{7}{96} A \cdot a^2 \quad (24)$$

또, 식 (24)를 식 (23)에 대입하면 식 (25)와 같다.

$$F_c = C_1 \cdot A \cdot a^2 \cdot E \quad (25)$$

여기서 $C_1 = \frac{7n^2 \pi^2}{96 \ell^2}$ 이고, A 는 지붕 보강재의 단면적을 나타낸다.

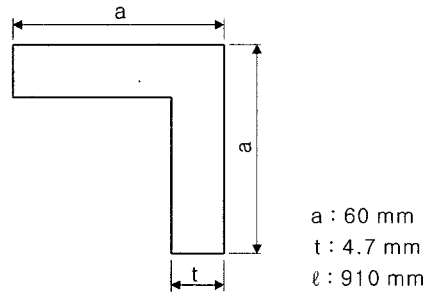


Fig. 6 Section dimensions of the roof stiffener

지붕 보강재의 소재를 철강재 대신에 다른 소재로 대체 할 경우에도 좌굴 강도는 동일하게 유지되어야 하는 조건으로부터, 철강재의 좌굴 강도를 F_{cs} 라고 하고 알루미늄 소재의 좌굴 강도를 F_{ca} 라고 하

면, $F_{cs} = F_{ca}$ 의 관계식이 성립된다. 식 (25)를 이용하여 위의 관계식을 풀어 쓰면 다음과 같다.

$$C_{ls} \cdot A_s \cdot a_s^2 \cdot E_s = C_{la} \cdot A_a \cdot a_a^2 \cdot E_a \quad (26)$$

식 (26)에서 철강재와 알루미늄 소재의 지붕 보강재 단면적은 각각 $A_s = 2 a_s t_s$, $A_a = 2 a_a t_a$ 이므로 식 (26)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$C_{ls} \cdot 2a_s t_s \cdot a_s^2 \cdot E_s = C_{la} \cdot 2a_a t_a \cdot a_a^2 \cdot E_a \quad (27)$$

지붕 보강재의 경계조건이 동일한 경우, $C_{la} = C_{ls}$ 이므로 식 (27)은 다음과 같이 정리된다.

$$t_s \cdot a_s^3 \cdot E_s = t_a \cdot a_a^3 \cdot E_a \quad (28)$$

알루미늄 소재의 지붕 보강재와 철강재의 치수의 비를 $t_a = \alpha t_s$, $a_a = \beta a_s$ 로 표현하면, 소재 대체 하였을 경우, 좌굴 강도를 동일하게 유지하기 위한 조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\alpha \beta^3 = \frac{E_s}{E_a} \quad (29)$$

일반적으로 보강재는 전체적인 좌굴이 일어나기 전에 국부적인 좌굴이 먼저 일어난다. 국부적인 좌굴거동을 예측하기 위해 지붕 보강재를 Fig. 7과 같이 한쪽 모서리는 단순지지되고 반대편 모서리는 자유단인 판으로 모델링하자. 보강재의 길이가 단면폭보다 훨씬 크므로, 국부 좌굴 응력은 식 (30)과 같이 쓸 수 있다.¹⁰⁾

$$\sigma_{cr} = 0.338 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2 \quad (30)$$

지붕 보강재의 단면적이 $2at$ 이므로, 국부 좌굴 하중 F_{CL} 은 다음과 같이 표현된다.

$$F_{CL} = 0.676 \cdot E \cdot \left(\frac{t^3}{a}\right) \quad (31)$$

따라서, 철강재를 알루미늄으로 소재 대체 할 경우에도 동일한 국부 좌굴 강도를 갖기 위한 조건은 다음과 같다.

$$0.676 \cdot E_s \cdot \left(\frac{t_s^3}{a_s}\right) = 0.676 \cdot E_a \cdot \left(\frac{t_a^3}{a_a}\right) \quad (32)$$

알루미늄 소재의 지붕 보강재와 철강재의 치수의 비를 $t_a = \alpha t_s$, $a_a = \beta a_s$ 로 표현하면, 식 (32)는 다

음과 같이 정리된다.

$$\frac{\alpha^3}{\beta} = \frac{E_s}{E_a} \quad (33)$$

식 (29)와 식 (33)를 이용하여 전체적인 좌굴강도 및 국부 좌굴강도를 갖기위한 알루미늄 소재의 치수를 구해보면, $\alpha=1.55, \beta=1.25$ 가 된다.

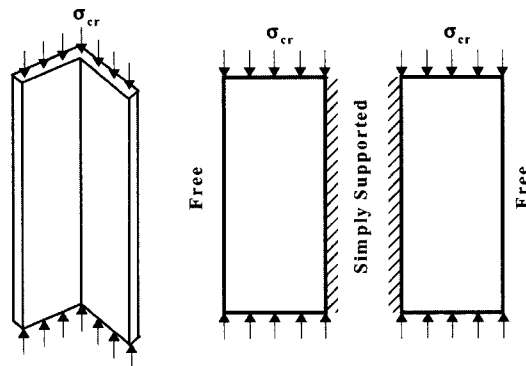


Fig. 7 Local buckling analysis model of the roof stiffener

소재 대체시 알루미늄 소재와 강재의 질량비 즉, 경량화 비율은 질량식 (10)을 이용해 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{m_a}{m_s} = \frac{\rho_a \cdot A_a \cdot \ell_a}{\rho_s \cdot A_s \cdot \ell_s} \quad (34)$$

보강재의 길이는 동일하다고 가정하고 식 (34)에 $t_a = \alpha t_s$, $a_a = \beta a_s$ 을 대입하면 경량화비는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{m_a}{m_s} = \alpha \beta \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (35)$$

좌굴강도 조건에서 지붕 보강재의 설계시 경량화율을 구하면 Table 4와 같다.

Table 4 Design of the roof stiffener under constant buckling strength

Materials	Thickness (mm)	Section width (mm)	Mass ratio
Steel	t_s	a_s	1.00
AL	$t_a = 1.55t_s$	$a_a = 1.25a_s$	0.67

3. 소재대체 설계의 수치해석적 검증

3.1 굽힘강성 조건시 차체 볼스터 해석 및 평가

굽힘강성 조건시 차체 볼스터의 소재대체 이론 예측식에 의한 구조 특성 예측결과를 검증하기 위해서 유한요소법을 사용하여 그 타당성을 검증한다.

Table 5 및 6은 굽힘 강성 조건을 고려한 이론식을 이용하여 차체 볼스터의 판 두께, 변형량, 고유 진동수, 응력 등 구조 특성을 예측한 결과와 유한요소 해석 결과를 표로 나타낸 것이다.

Fig. 8과 9는 굽힘 강성 조건에서 강재 차체 볼스터의 응력을 해석한 것인데 유사한 특성을 보여주고 있다. 각각의 수평판과 수직판에 대하여 응력이 비교적 균등하게 분포되어 있음을 알 수 있으나, 형상이 변경되는 부위에 응력 집중부가 형성되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 굽힘 강성 조건에 의해서 해석된 강재 차체 볼스터의 굽힘 모우드를 나타내고 있다. 해석된 굽힘 모우드의 고유 진동수는 1.04 Hz로 나타났다. Fig. 11은 굽힘 강성 조건에 의해서 알루미늄 차체 볼스터의 수평판 대 수직판의 두께비(β/a)가 1 일 경우의 굽힘 모우드를 나타내고 있다. 해석된 굽힘 모우드의 고유 진동수는 1.07 Hz로 나타났다.

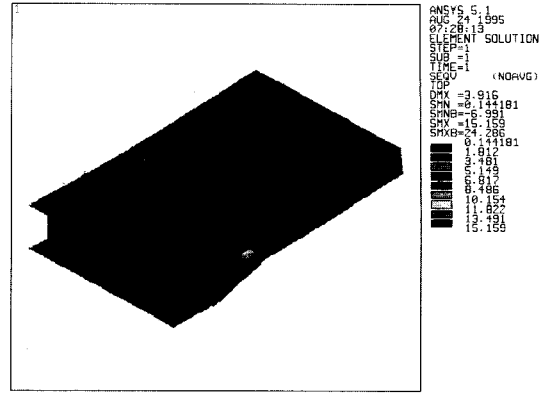


Fig. 8 Stress analysis of the steel body bolster under constant stiffness by FEM

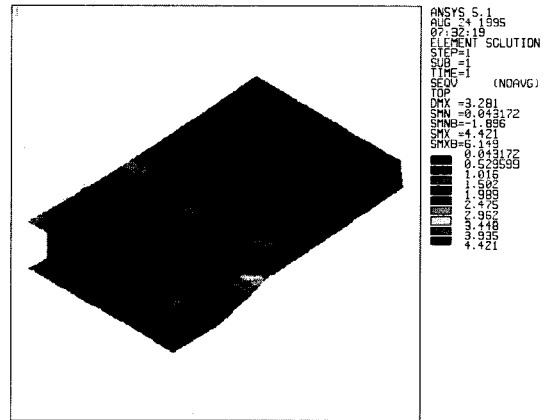


Fig. 9 Stress analysis of the aluminium body bolster under constant stiffness by FEM ($\beta/a=1$)

Table 5 Deflection and natural frequency of the body bolster under constant stiffness by FEM

Materials	T-ratio (β/a)	FEM deflection (mm)	Frequency ratio (ω_{ns}/ω_{ns})	Body bolster natural freq.(Hz)	
				Theory	FEM
Steel		3.916			1.04
AL	1.0	3.695	1.03	1.05	1.07
	1.5	3.956	0.93	1.05	1.09
	2.0	4.164	0.97	1.06	1.08

Table 6 Stresses of the body bolster under constant stiffness by FEM

Materials	T-ratio (β/a)	Stress(kgf/mm ²)		Fatigue Strength (kgf/mm ²)
		Theory	FEM	
Steel		7.48	7.8	19.7
AL	1.0	2.55	2.8	12.7
	1.5	2.70	2.94	
	2.0	2.72	3.0	

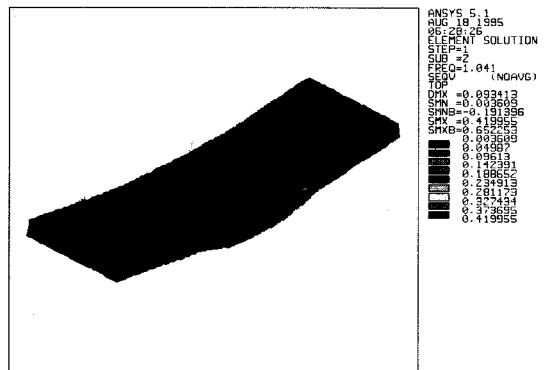


Fig. 10 1st bending mode of the steel body bolster under constant stiffness by FEM [1.04 Hz]

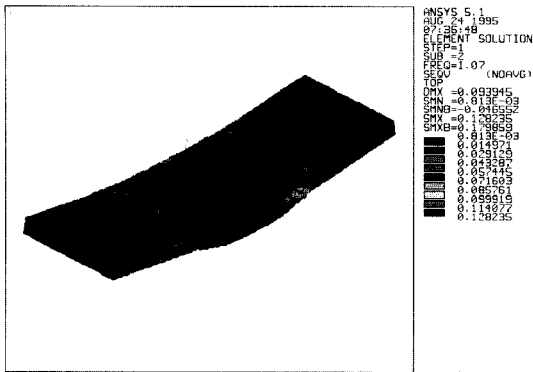


Fig. 11 1st bending mode of the aluminium body bolster under constant stiffness by FEM [1.7 Hz]($\beta/a=1$)

굽힘 강성 조건을 적용한 설계에서는 처짐량과 고유진동수 특성이 동일하게 설계되는 것을 목표로 한다. Table 5와 6의 결과를 분석하면, 소재대체설계는 강재설계에 비하여 처짐의 경우 5.6% 이하, 고유진동수의 경우 3.8% 이하의 오차로 일치하고 있다. 그러나 굽힘응력을 비교하면, 강재의 경우 152.5% 정도 피로강도상 설계여유가 있지만 알루미늄 재질의 경우 최소 323.3% 정도 설계여유가 발생한다. 따라서 Table 2, 5, 6을 고려하면, 본 차체 볼스터의 기존설계가 굽힘강성 측면에서 설계여유가 없다면 (설계제한조건이 굽힘강성이 되는 경우) 수직판/수평판의 두께 비를 2까지 바꾸더라도 Table 2와 같이 9% 이상의 경량화는 어렵다.

3.2 굽힘강도 조건시 차체 볼스터 해석 및 평가

굽힘강도 조건에서 차체 볼스터의 소재대체 이론 예측식에 의한 구조 특성 예측결과를 검증하기 위해서 유한요소법을 사용하여 그 타당성을 검증한다.

Table 7은 굽힘 강도 조건을 고려한 이론식을 이용하여 차체 볼스터의 판 두께, 응력, 변형량, 고유진동수 등 구조 특성을 예측한 결과와 유한요소 해석 결과를 나타내었다.

Fig. 12는 굽힘 강도 조건에 의해서 해석된 알루미늄 차체 볼스터의 응력을 나타내고 있다. 각각의 수평판과 수직판에 대하여 응력이 비교적 균등하게 분포되어 있음을 알 수 있으나, 형상 변경되는 부위

Table 7 Numerical results of the body bolster under constant strength by FEM

Materials	T-ratio (β/a)	Stress kg/mm^2		Fatigue Strength kg/mm^2	FEM Deflection (mm)	Body bolster natural freq.(Hz)	
		Theory	FEM			Theory	FEM
Steel		7.48	7.80	19.7	3.92		
AL	1.0	4.89	5.21	12.7	7.37	1.03	1.04
	1.5	5.00	5.43		7.92	1.02	1.06
	2.0	5.14	5.57		8.42	1.01	1.05

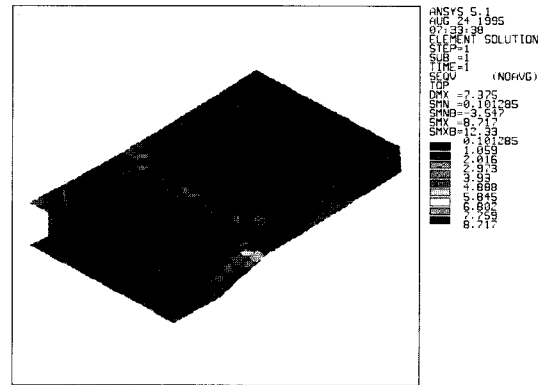


Fig. 12 Stress analysis of the aluminium body bolster under constant strength by FEM ($\beta/a=1$)

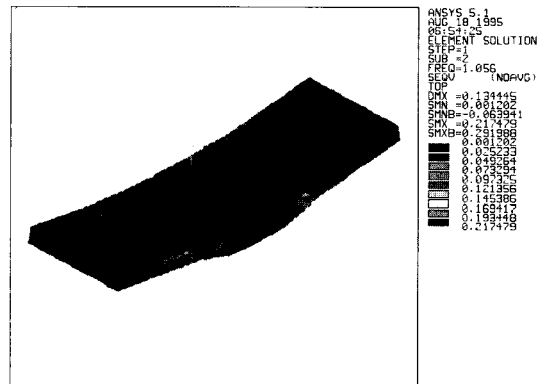


Fig. 13 1st bending mode of the aluminium body bolster under constant strength by FEM [1.06 Hz] ($\beta/a=1.5$)

에 응력 집중부가 형성되어 있다.

Fig. 13은 굽힘 강도 조건에 의해서 알루미늄 차체 볼스터의 수평판 대 수직판의 두께비(β/a)가 1.5 일 경우의 굽힘 모우드를 나타내고 있다. 해석된 굽힘 모우드의 고유진동수는 1.06 Hz로 나타났다.

굽힘강도 조건을 적용한 설계에서는 허용응력 관

점에서 동일하게 설계되는 것을 목표로 한다. Table 7에서 강재와 알루미늄 합금 소재의 피로강도를 비교하면 알루미늄은 강재의 64.5%이나, 굽힘강도 조건으로 소재대체 설계한 후 FEM으로 구한 굽힘 응력비는 수평판 대 수직판의 두께비(β/a)가 1일 경우 알루미늄이 강재의 66.8%이고, 2일 경우 71.4%이다. 즉 소재의 피로강도비에 비하여 소재대체설계의 굽힘응력비는 3.6 ~ 10.7%의 상대오차를 나타내고 있다. 이러한 오차는 소재대체를 위한 초기설계로서는 충분히 좋은 예측치라 할 수 있다.

고유진동수의 경우 소재대체 설계에 의하여 4% 이하의 오차를 나타내고 있으나, 처짐 변위의 경우 강재에 비하여 알루미늄 합금은 188.0 ~ 214.8% 수준을 보여주고 있다. 따라서 Table 3, 5를 고려할 때, 본 차체 볼스터의 처짐을 8.42 mm 이상 허용할 수 있다면 50% 이상의 경량화가 가능하지만, 처짐량에 제한조건이 있다면 그에 비례하는 수준의 경량화는 가능하지 않다.

3.3 지붕 보강재의 좌굴강도 해석 및 평가

지붕 보강재의 소재 대체 설계를 위해서는 좌굴강도 조건을 고려한 이론식을 적용하여 지붕 보강재의 두께 및 단면폭을 설계하고 임계 좌굴 강도 및 국부 좌굴 강도에 대한 유한요소 해석을 수행하여 소재대체 설계의 타당성을 검증한다.

Table 8은 강재 지붕 보강재의 임계 좌굴 및 국부 좌굴 유한 요소 해석 결과와 좌굴강도조건 이론식을 이용하여 소재대체 설계를 한 알루미늄 보강재의 유한 요소 해석 결과를 비교한 것이다.

Table 8 Numerical results of the roof stiffener under constant buckling strength by FEM

Materials	Global buckling load(kg)	Local buckling load(kg)	Mass ratio
Steel	189,596	27,638	1.00
AL	186,445	27,538	0.67

Fig. 14는 강재 지붕 보강재를 보로 모델링하여 좌굴해석을 수행한 결과이다. Fig. 15는 알루미늄 지붕 보강재에 대한 좌굴해석 결과이다. Fig. 16은 강

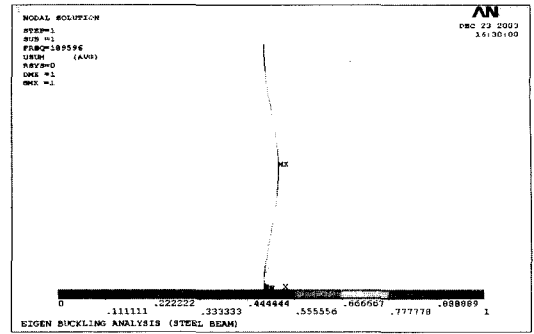


Fig. 14 Global buckling analysis of the steel roof stiffener

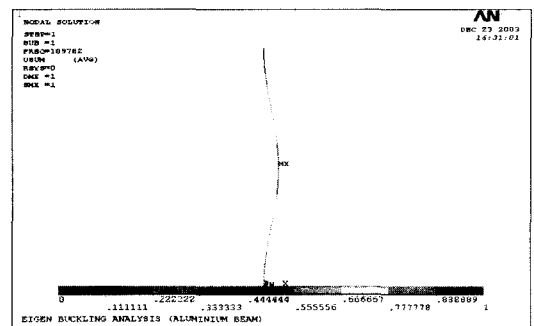


Fig. 15 Global buckling analysis of the aluminium roof stiffener

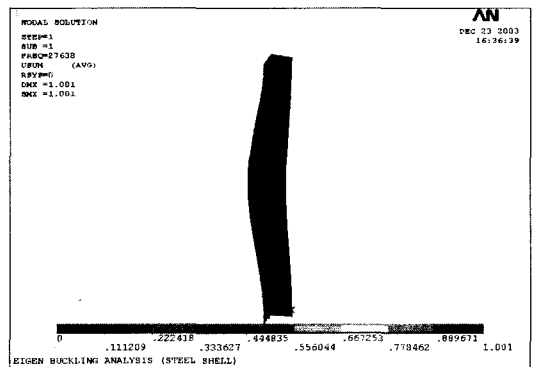


Fig. 16 Local buckling analysis of the steel roof stiffener

재 지붕 보강재를 셸로 모델링하여 국부좌굴해석을 수행한 결과이다. Fig. 17은 알루미늄 지붕 보강재에 대한 국부 좌굴 해석 결과이다.

좌굴강도 조건을 적용한 설계에서는 전체적인 좌굴강도 및 국부 좌굴 강도 관점에서 동일하게 설계되는 것을 목표로 하고 있다. Table 8에서와 같이 두 가지의 소재의 좌굴강도가 상당히 잘 일치함(1.7%

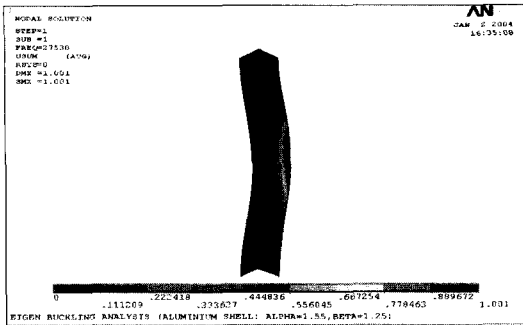


Fig. 17 Global buckling analysis of the aluminium roof stiffener

이내)을 보아 본 연구에서 제안된 소재 대체 설계 이론식이 좌굴강도 조건을 잘 고려하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 지붕 보강재의 경우 강재를 알루미늄 합금으로 소재 대체 설계함으로써 33%의 경량화가 가능하다.

4. 결 론

본 연구에서는 차체 구조부품의 소재 대체 경량화 설계시 사용할 수 있는 이론식을 개발하였다. 개발된 이론식의 타당성을 검증하기 위하여 강재로 된 차체 볼스터와 지붕보강재를 알루미늄 재료로 소재대체 설계하고 이때 예측된 구조역학적 성능을 유한요소 해석과 비교하였다.

- 1) 굽힘강성을 동일하게 유지하는 조건으로 강재의 차체 볼스터를 알루미늄 소재대체 하였을 경우, 차체 볼스터의 수평판과 수직판의 두께, 고유진동수, 응력, 질량비를 계산하는 이론식의 결과는 유한요소 해석의 결과와 잘 일치하였다. 굽힘강성 조건에 의한 차체 볼스터의 경량화 효과는 알루미늄으로 소재 대체하였을 경우는 수직/수평판의 두께비를 2까지 증가시켜야 최대 9% 정도의 경량화가 가능하였다.
- 2) 굽힘강도를 동일하게 유지하는 조건으로 강재의 차체 볼스터를 알루미늄으로 소재대체 하였을 경우, 차체 볼스터의 수평판과 수직판의 두께, 고유진동수, 응력, 질량비를 계산하는 이론식의 결과는 유한요소 해석의 결과와 잘 일치하였다. 굽힘강도조건하에서 차체 볼스터의 경량화 효과는 알루미늄으로 소재 대체하였을 경우에

50% 정도의 경량화가 가능하였다.

- 3) 좌굴강도를 동일하게 유지하는 조건으로 강재의 지붕 보강재를 알루미늄으로 소재대체 하였을 경우, 지붕 보강재의 두께 및 단면적을 예측하는 이론식의 결과는 유한요소해석의 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 전체적인 좌굴강도 및 국부 좌굴강도 조건에 의한 이론식을 적용하여 강재의 지붕 보강재를 알루미늄으로 소재 대체하였을 경우, 33%의 경량화가 가능하였다.

결론적으로 본 연구에서 유도된 소재대체 설계 이론식은 소재대체 초기설계에 사용할 수 있는 수준의 좋은 예측치(볼스터의 경우 수치해석 대비 최대 10.7% 이하의 상대오차)를 제공하였다. 차체볼스터의 경우 굽힘강도상 설계 여유가 최소 323.3%나 있음에도 불구하고 굽힘강성의 제약으로 인하여 만족할 만한 경량화를 달성할 수 없었다. 그러나 지붕보강재의 경우 좌굴강도 조건에 의하여 33%의 경량화가 가능하였다. 본 연구에서 개발된 방법은 다양한 소재 및 부재에 대하여 일반화될 수 있다.

References

- 1) W. Brocker, R. D. Rosenberger, "Light Weight Potentials in Coach Body Structures of High-speed Trains," Proceedings of WCRR '97, Vol.D, pp.713 -721, 1997.
- 2) T. Suzuki, K. Sato, 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.
- 3) N. Tagawa, H. Yamashiro, 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) G. Dioter, Engineering Design, a Material and Processing approach, McGraw Hill, 1983.
- 5) G. Lewis, Selection of Engineering Materials, Prentice Hall, Inc., USA, 1990.
- 6) M. F. Ashby, Materials Selection in Mecha-

- nical Design, Butterworth-Heinemann, OXFORD, 1999.
- 7) M. F. Ashby, "Multi-objective Optimisation in Material Design and Selection," ACTA Materialia Millenium Issue, Vol.48, pp.359-369, 2000.
 - 8) B. C. Goo, S. W. Seo, "Probabilistic Fatigue Life Evaluation of Rolling Stock Structures," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.89-94, 2003.
 - 9) 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.
 - 10) E. F. Bruhn, Analysis & Design of Flight Vehicle Structures, S. R. Jacobs & Associates, Inc., 1973.