

소재대체에 의한 하이브리드형 차체구조의 경량화 예측 방법

A Method to Estimate the Weight-reduction of Hybrid BodysHELLs by Material Substitution

구정서[†] · 조현직^{*}

Jeong-Seo Koo · Hyun-Jik Cho

Abstract

In this paper, a theoretical approach is studied to predict structural performances and weight-reduction rates of hybrid bodysHELLs in case that the materials of roof structures are substituted. To determine other light-weight materials to be substituted for the original roof materials, bending and twisting deformations are considered under constant stiffness and strength conditions, which derive some new weight-reduction indices from a structural performance point of view. The indices derived to estimate the weight-reduction can be utilized as a good criterion at the conceptual design for material substitution of the roofs.

Keywords : Material substitution(소재대체), Weight reduction(경량화), Hybrid bodysHELL(이종소재 차체 구조), Light-weight materials(경량화 소재)

1. 서론

최근 에너지 가격 상승으로 수송 수단들의 에너지 절감에 대한 관심이 매우 높아졌다. 이들의 에너지 절감에 가장 중요한 요소는 경량화인데, 철도차량의 경우, 경량화는 에너지 비용의 저감뿐만 아니라 유지보수 비용과 환경비용을 절감할 수 있어서 파급효과가 매우 크다. 그러나 그 동안 철도업체의 보수적인 분위기 때문에 현재 철도차량은 승객 1인당 수송에 필요한 차량 중량이 항공기는 물론이고, 버스나 승용차보다 2배 이상 높은 수준이므로[1] 경량소재를 적용하여 대폭 경량화 할 필요가 있다.

철도차량 소재가 기존의 강재에서 경량화에 유리한 스테인레스강, 알루미늄 합금재, 복합소재 등으로 변경되는 추세이므로, 소재대체에서 발생하는 구조적 문제점[2,3], 경량화 설계방법[1,3], 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 연구[6-12]되고 있다.

그러나 경량소재를 적용하여 획기적인 경량화를 달성하려면 두 종류 이상의 소재를 적재적소에 배치한 하이브리드형(hybrid type) 차체구조를 설계하는 것이 이상적인데, 이러한 설계에서 어떤 소재를 조합하는 것이 경량화에 유리한지를 예측할 수 있는 방법이 아직 정립되어 있지 못하다. 그래서 본 논문에서는 하부구조, 벽구조, 지붕구조에 이종 재료를 사용한 하이브리드형 차체구조 개발 시 적용할 수 있는 소재대체 경량화 예측 방법을 연구하였다. 이 방법을 이용하면 소재대체 경량화 설계 시 개념설계 단계에서 최적의 소재 선정과 경량화 효과를 예측할 수 있다. 이 방법은 본 논문에서 사례로 다룬 지붕구조뿐만 아니라 벽구조 등 다른 구조의 소재를 변경하는 하이브리드형 차체구조 설계에도 적용 가능하다.

2. 지붕구조의 소재대체 경량화 예측

2.1 기본가정 및 차체 설계 조건

차체 구조 설계시 기본적으로 고려할 사항으로 강도와 강성 조건이 있다. 강도 조건(항복강도, 피로강도 등)은 차체에 발생하는 응력들이 허용응력범위 안에 있어야 한다는 조건으로 구조물의 정적 안전성에 관한 것이다. 강성 조건(저짐, 고유진동수 등)은 차량 구조물의 동적 안정성과 관련된 것으로 굽힘 강성 및 비틀림 강성이 일정 수준에 도달하지 못하게

[†] 책임저자 : 정희원, 서울산업대학교, 철도전문대학원
E-mail : koojs@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6878 FAX : (02)970-6088
^{*} 서울산업대학교 철도전문대학원

되면, 주행 중 진동이 유발되기 쉽고, 승차감이 나쁘게 되는 등 여러 가지 문제점이 발생한다.

차체구조 개념설계를 위한 단순화 모델로 Fig. 1과 같은 사각 튜브(tube)를 고려한다. 설계변수는 하부구조(underframe) 두께(t_u), 지붕두께(t_r), 측면벽 두께(t_w) 등이고, 이때 고려되는 하중은 압축하중(F_c), 수직분포하중(w), 비틀림 하중(T) 등이다. 이 단순 모델 차체의 개념설계 시 다음 사항들이 고려된다.

- 하부구조에 작용하는 압축하중(F_c)으로 발생하는 응력이 허용응력을 초과하지 말아야 한다.
- 수직분포하중(w)에 의해 발생하는 처짐이 허용치를 넘어서는(또는 허용고유진동수 이하) 안 되며, 이 때 발생하는 응력도 허용응력을 넘어서도 안 된다.
- 비틀림하중(T)에 의해 과도한 비틀림이 발생해서는 안 되며, 비틀림에 의해 발생하는 응력이 허용응력 이내이어야 한다.

2.2 지붕구조의 소재대체 설계 개념

철도차량 차체구조의 경량화 설계에 보편적으로 사용되는 기술은 크게 두 가지이다. 첫째는 구조물의 배열, 형상 및 치수를 경량화 관점에서 최적화하는 것이고, 둘째는 기계적 특성이 우수한 경량소재를 적용하는 것이다. 최근 철도차량 분야에서도 획기적인 경량화를 달성하기 위하여 경량소재 적용 설계가 보편화 되고 있다. 최적화 된 경량소재 적용 방법으로 차체구조를 하이브리드 화하는 설계기술도 개발되고 있는데, 이 방법은 각 소재의 기계적 특성을 고려하여 상이한 소재를 적재적소에 적용함으로써 비용 절감과 아울러 획기적인 경량화를 달성하는 것이다.

본 절에서는 지붕구조를 소재 대체하는 하이브리드형 차체 설계에서 다양한 대체 소재 적용 시 경량화 효과를 예측할 수 있는 방법을 제시하고, 대체 소재 사이의 경량화 효과를 비교 평가한다.

이를 위하여 지붕의 구조적 기능과 관련된 굽힘강성, 굽힘강도, 비틀림 강성, 비틀림 강도 등을 일정하게 유지하면서 소

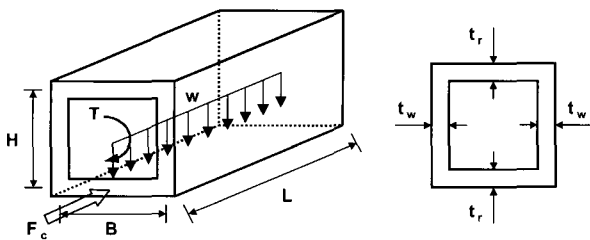


Fig. 1. Simplified bodyshell model and applied loads

재 대체에 의하여 최적의 경량화를 달성할 수 있도록 소재 종류 및 경량화 비율을 체계적으로 분석할 수 있는 이론을 제시한다.

2.3 일정 굽힘강성 조건에서 지붕의 소재대체 경량화

차체가 수직하중을 받는 경우, Fig. 2와 같이 대차 볼스타 상부에서 단순지지 되며 균일분포하중을 받는 튜브형 보로 가정할 수 있다. Euler 보 이론에 의한 전단력 및 굽힘모멘트는 Fig. 3과 같다.

Fig. 2와 같은 하중 및 경계조건을 갖는 보의 중앙부 처짐(δ)은 식 (1)과 같다.

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

식 (1)로부터 식 (2)와 같이 소재대체 이전의 초기 굽힘강성(S_{Bo})을 구할 수 있다.

$$S_{Bo} = \frac{wL}{\delta} = C_{Bo}EI \tag{2}$$

$$C_{Bo} = \frac{384 L}{l_2^2(5l_2^2 - 24l_1^2)} \tag{2a}$$

Fig. 4는 구붕구조 소재대체 설계의 개념을 설명하기 위한 것이다. 동일 소재로 설계된 Fig. 4(a)의 지붕 두께 t_{r0} 가 이중 소재로 소재대체 설계된 경우 Fig. 4(b)와 같이 지붕 두께가 t_r 로 변경된다고 가정한다. 이 때 초기지붕 구조의 물성(하부구조 및 벽구조와 동일하게 밀도: ρ , 탄성계수: E , 허용응력: σ_f)이 대체 소재 물성인 밀도 ρ , 탄성계수 E_r , 허용응력 σ_{fr} 로 변경된다고 가정한다.

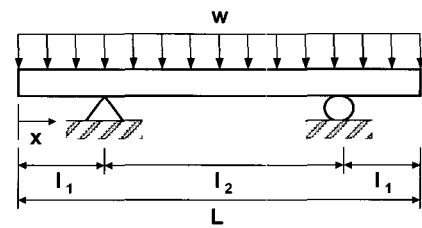
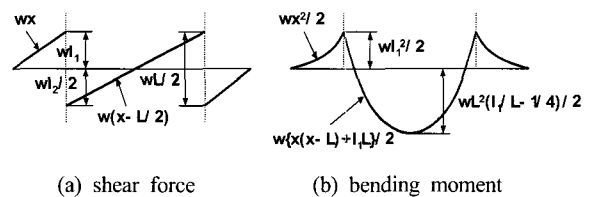


Fig. 2. Rectangular tube model for bodysells



(a) shear force (b) bending moment
Fig. 3. Shear force and bending moment diagrams

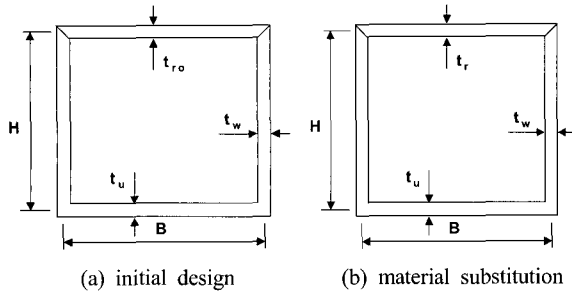


Fig. 4. Concept of material substitution for roofs

Fig. 4의 소재 대체 설계에서 차체 단면이 일정한 굽힘 강성 ($S_B = S_{B_0}$)을 가지려면 식 (2)로부터 EI 가 일정한 값을 유지하여야 한다. 그런데 지붕구조 외에는 치수나 소재에 변동이 없으므로 차체단면의 중립면에 대한 지붕구조의 EI 값만 일정하면 된다. 즉

$$EBt_{r_0}(H - Y_N)^2 = E_r B t_r (H - Y_N)^2 \quad (3)$$

이고, Y_N 은 바닥에서 정의한 중립면의 위치이다. 이 식을 정리하면

$$Et_{r_0} = E_r t_r \quad (3a)$$

와 같다. 따라서 일정 굽힘 강성 조건으로부터 소재대체 설계된 지붕구조의 소재 두께는 식 (4)와 같다.

$$t_r = \frac{Et_{r_0}}{E_r} \quad (4)$$

또한 Fig. 4의 소재대체 경량화 문제는 하부구조와 벽구조에 변경이 없으므로 지붕구조만의 경량화 문제로 단순화 된다. 따라서 지붕구조 소재대체 경량화는 식 (5)의 최적화 문제로 표현된다.

$$\text{Min}[m_r = BLt_r \rho_r] \text{ for constant } S_B \quad (5)$$

식 (4)를 식 (5)에 대입하면 식 (5a)와 같다.

$$\text{Min}[m_r = BL \frac{Et_{r_0}}{E_r} \rho_r] = [BLEt_{r_0}] \text{Min}(\frac{\rho_r}{E_r}) \quad (5a)$$

여기서 B, L, E, t_{r_0} 는 초기에 정의된 일정한 값을 갖는 상수이므로 일정 굽힘강성 조건하에서 차체중량을 최소화하려면 다음 R_1 을 최대로 하는 소재가 필요하다.

$$R_1 = \frac{E_r}{\rho_r} \quad (6)$$

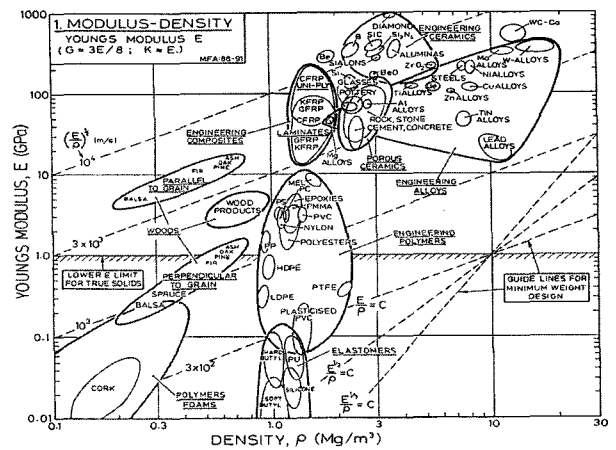


Fig. 5. Young's modulus and density diagram

Table 1. R_1 values of typical materials

차체 소재	R_1 (GPa m ³ /Mg)	대표소재의 R_1	경량화 비율
강재	23-28	Carbon steel, $R_1 = 27$	0%
		Stainless steel, $R_1 = 25$	-8%
Ti합금	24-27	Ti6Al-4V, $R_1 = 26$	-3.8%
Al합금	23-27	6082-T6, $R_1 = 26$	-3.8%
CFRP	30-57	C/E (0/90/±45), $R_1 = 42$	35.7%
GFRP	15-20	$R_1 = 17$	-17.4%
Mg합금	22-24	$R_1 = 23$	-58.7%

식 (6)을 대수합수를 사용하여 선형화하면 식 (6a)와 같다.

$$\log E_r = \log R_1 + \log \rho_r \quad (6a)$$

식 (6a)의 특성을 분석하기 위하여 각종 구조재료에 대하여 R_1 값을 도식적으로 비교할 수 있도록 대수 스케일로 된 차트를 이용할 수 있다. M. F. Ashby 등은[10] 각종재료의 여러 가지 성질 (밀도, 종탄성 계수, 항복 강도, 파손 강도, 열전도율, 열팽창 계수 등)에 대하여 대수 스케일로 된 차트를 제작하였다. R_1 을 최대로 하는 소재는 탄성계수-밀도 차트[10,16]에서 찾을 수 있는데 그 선정 과정을 Fig. 5에 나타내었다. 이 차트에서 E/ρ =일정한 직선의 기울기에 평행한 사선을 그어서, 이 사선을 기준으로 최상단에 위치하는 재료를 사용할 때 최대 경량화 효과를 얻을 수 있다.

철도차량 구조에는 높은 강성뿐만 아니라 강도, 내충격성, 내부식성, 가격, 가공성 등 여러 가지 특성이 동시에 필요하므로, 현실적으로 검토될 수 있는 재료는 FRP, Al합금, Ti합금, 강재, Mg합금 등이다. 이들 소재에 대하여 일정 굽힘 강성 조건에서 구한 지붕의 경량화 비율은 Table 1과 같다.

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

2.4 일정 굽힘강도 조건에서 지붕의 소재대체 경량화

하이브리드형 차체의 경우, 소재 대체로 인하여 허용 응력과 차체 단면의 중립축 위치가 변하므로 강도를 계산하는 것이 다소 복잡하다. 이중 재료를 지붕에 사용한 경우, 중립축에서 가장 먼 곳인 지붕에서 허용응력에 도달하기 전에 지붕과 연결된 벽면 모서리에서 허용응력을 초과할 수도 있다. 이러한 현상은 대체 설계된 지붕 소재의 허용 변형률과 원래 소재의 허용 변형률을 비교하여 판단할 수 있다.

식 (7a) 조건식을 만족하면 대체 설계된 지붕구조에서 허용 응력에 도달하는 경우이다.

$$\epsilon_{rf} \leq \epsilon_f \tag{7a}$$

여기서 ϵ_{rf} 는 대체 설계된 지붕소재의 허용 변형률이며, ϵ_f 는 본래 구조 소재의 허용 변형률이다. 또한 식 (7b) 조건식을 만족하면 벽면 모서리 구조에서 허용응력에 도달하는 경우이다.

$$\epsilon_{rf} > \epsilon_f \tag{7b}$$

2.4.1 소재 대체된 지붕에서 먼저 허용응력에 도달

위 식 (7a)의 조건은 Hook의 법칙에 의하여 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\frac{\sigma_{rf}}{E_r} \leq \frac{\sigma_f}{E} \tag{8}$$

아래의 Fig. 6은 소재대체 설계가 이루어진 지붕구조의 기계적 특성치와 나머지 구조(벽구조 및 하부구조)의 특성치를 표시한 것이다. 여기서 I_b, A_b, Y_b 는 지붕구조를 제외한 나머지 구조에 대한 면적모멘트, 단면적, 중립면의 위치 등이며, Y_N

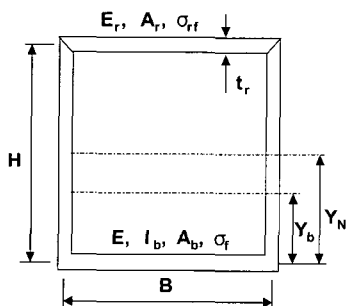


Fig. 6. Definition of sectional properties

은 전체 단면의 중립면 위치이다.

전체 단면의 중립면 위치 Y_N 은 식 (9)와 같다.

$$Y_N = \frac{EA_b Y_b + E_r A_r H}{EA_b + E_r A_r} \tag{9}$$

여기서 $A_r = t_r B$ 이다. 또한 보 단면에 작용하는 굽힘 모멘트 (M)와 이 때 지붕구조에 발생하는 응력과 관계는 식 (10)과 같다.

$$\sigma_r = \frac{-E_r (H - Y_N) M}{E[I_b + A_b (Y_N - Y_b)^2] + E_r A_r (H - Y_N)^2} \tag{10}$$

식 (10)에서 $E_r = E, \sigma_r = \sigma$ 라 두면 지붕구조 소재를 변경하기 이전인 초기 상태를 나타내는데, 굽힘 모멘트 M_f 가 작용할 때 지붕 구조의 응력이 σ_f 에 도달한다고 하면 식 (11)과 같은 관계를 구할 수 있다.

$$M_f = -\sigma_f \left[\frac{I_b}{H - Y_b} \left(1 + \frac{A_{ro}}{A_b} \right) + A_{ro} (H - Y_b) \right] \tag{11}$$

여기서 A_{ro} 는 초기 지붕구조의 단면적을 나타낸다.

그런데 굽힘 강도를 고려한 소재대체 설계에서는 식 (11)에서 구한 굽힘 모멘트 M_f 가 작용할 때 지붕구조에 발생하는 응력이 σ_{rf} 되게 A_r 을 결정하는 것이다. 식 (11)을 식 (10)에 적용하면 식 (12)와 같이 A_r 이 구해진다.

$$A_r = \frac{A_b}{I_b + A_b (H - Y_b)^2} \cdot \left[\frac{M_f (H - Y_b)}{\sigma_f} - \frac{E I_b}{E_r} \right] \equiv \frac{C_1}{\sigma_{rf}} - \frac{C_2}{E_r} \tag{12}$$

$$C_1 = \frac{M_f A_b (H - Y_b)}{I_b + A_b (H - Y_b)^2} \tag{12a}$$

$$C_2 = \frac{E I_b A_b}{I_b + A_b (H - Y_b)^2} \tag{12b}$$

이고, C_1, C_2 는 일정한 값을 갖는 상수이다. 따라서 일정 굽힘 강도 조건으로부터 소재대체 설계된 지붕구조의 두께는 식 (13)과 같다.

$$t_r = \frac{A_r}{B} \tag{13}$$

한편 일정 굽힘 강도 조건에서 지붕구조의 소재대체 경량화 문제는 하부구조와 벽구조에 변경이 없으므로 지붕구조만의 경량화 문제로 단순화 된다. 따라서 지붕구조 소재대체 경

량화는 식 (14)와 같은 최적화 문제로 표현된다.

$$\text{Min}[m_r = A_r L \rho_r] \text{ for constant } M_f \quad (14)$$

그리고 식 (12)를 식 (14)에 대입하면 식 (14a)와 같은 최적화 문제로 변환된다.

$$\text{Min}[m_r (C_1 \frac{\rho_r}{\sigma_{rf}} - C_2 \frac{\rho_r}{E_r})] \quad (14a)$$

$$R_2 = \frac{\sigma_{fr}}{\rho_r} \quad (14b)$$

여기서 L, C_1, C_2 는 일정한 값을 갖는 상수이고 R_1 는 식 (6)과 같다.

식 (14a)는 Fig. 7의 비탄성계수-비강도 차트로부터 소재 대체 설계 시 경량화에 유리한 소재의 우선순위를 구할 수 있다. 즉 일정 굽힘강도 조건에서 중량을 최소화하려면 R_2 를 최대로 하고 R_1 을 최소로 하는 소재가 필요하다. 그러나 이 경우에도 식 (8)의 조건을 만족해야 하므로 Fig. 7에 표시된 기울기가 소재대체 이전 초기 재료의 σ_f/E 보다는 작은 값을 가져야 한다.

보통 강재인 경우에는 $E=2.1 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_f=21.0 \text{ kgf/mm}^2$ 정도이므로 $\sigma_f/E=10^{-3}$ 이다. 따라서 강재 지붕구조를 일정강도 조건에서 소재대체 설계할 때 Fig. 7을 보면 SUS 강, Mg 합금, Al 합금은 일부 영역에서 강재의 σ_f/E 보다 작은 값을 가지는 경우($\epsilon_{rf} \leq \epsilon_f$)가 있지만, Ti합금, GFRP, CFRP 등은 이 조건을 만족시키지 못한다. 그런데 Fig. 7은 SUS 강, Mg 합금, Al 합금의 경우에도 일반적인 물성을 나타내므로 소재의 기계적 특성이 넓은 범위에 걸쳐 있어서 실제 차량 소재와 동떨어진 물성까지 포함하고 있다.

그래서 실제 철도차량에 적용할 수 있는 대표적인 소재에 대하여 R_2/R_1 비(σ_f/E 와 동일 개념)를 구하면 Table 2와 같다. 일정 굽힘강도 조건에서 소재대체로 지붕중량을 최소화하려면 R_2 를 최대로 하고 R_1 을 최소(즉 높은 R_2/R_1 비)로 하는 소재가 필요하고, 동시에 $\epsilon_{rf} \leq \epsilon_f$ 인 조건을 만족시키려면 R_2/R_1 비가 낮아야한다. 이러한 사실은 지붕구조의 소재 대체에 의하여 경량화를 달성할 수 없음을 의미한다.

즉 앞에서와 같이 강재 지붕구조를 일정강도 조건에서 소재대체 하는 경우를 생각하면 Table 2에서 강재의 R_2/R_1 비가 가장 낮으므로 $\epsilon_{rf} \leq \epsilon_f$ 조건을 만족시키는 소재가 없다.

만약 알루미늄 합금 차체에 강재 지붕을 적용하면 $\epsilon_{rf} \leq \epsilon_f$ 조건은 만족하나 R_2/R_1 비가 낮아지므로 경량화에 도움이 되지 못한다. 실제로 경량화에 사용되는 소재의 우선순위가 강

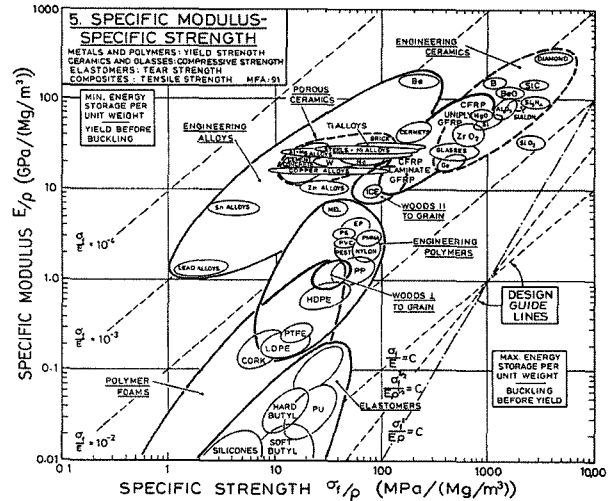


Fig. 7. Specific modulus and specific strength

Table 2. R_2/R_1 ratio for typical bodysell materials

차체소재	R_1 (GPa m ³ /Mg)	R_2 (MPa m ³ /kg)	R_2/R_1
강재	27	32	1.19
SUS강	25	44	1.76
Ti합금	26	205	7.88
Al합금	26	89	3.42
CFRP	42	326	7.76
GFRP	17	200	11.76
Mg합금	23	110	4.78

재<SUS강<알루미늄<CFRP 등이므로 ‘소재 대체된 지붕에서 먼저 허용응력에 도달하는 조건’은 현실적으로 적용 가능한 조건이 아니다. 왜냐하면 경량재료 차체의 지붕을 무거운 강재소재로 대체하는 경우는 없을 것이기 때문이다.

2.4.2 벽면 상단에서 먼저 허용응력에 도달하는 경우

지붕을 소재대체를 한 경우, 차체 단면의 중립축에서 가장 먼 곳인 지붕에서 허용응력에 도달하기 전에 지붕과 연결된 벽면 모서리에서 허용응력을 초과할 수 있다. 이 경우는 식 (7b)의 조건을 만족할 때 발생하는데, 여기에 Hook의 법칙을 적용하면 식 (15)와 같다.

$$\frac{\sigma_{rf}}{E_r} > \frac{\sigma_f}{E} \quad (15)$$

앞의 Fig. 6을 참조하면, 차체단면의 중립면 위치 Y_N 는 식 (9)와 같이 구해지고, 보 단면에 작용하는 굽힘 모멘트(M)와 지붕 모서리 벽구조에 발생하는 응력(σ_f)과의 관계는 식 (16)과 같다.

$$\sigma_f = \frac{-E(H - Y_N)M}{E[I_b + A_b(Y_N - Y_b)^2] + E_r A_r (H - Y_N)^2} \quad (16)$$

지붕구조 소재를 변경하기 이전인 초기 지붕구조에서 굽힘 모멘트 M_f 가 작용할 때 지붕 구조의 응력이 σ_f 가 된다고 하면 식 (11)과 같은 관계가 구해진다. 일정 굽힘 강도 소재대체 설계에서는 식 (11)의 굽힘 모멘트 M_f 가 작용할 때 지붕 모서리 벽 구조에 발생하는 응력이 σ_f 되게 A_r 을 결정하는 것이다. 식 (11)을 식 (16)에 적용하면 식 (17)과 같이 A_r 이 구해진다.

$$A_r = \frac{EA_b}{I_b + A_b(H - Y_b)^2} \left[\frac{M_f(H - Y_b)}{\sigma_f} - I_b \right] \cdot \frac{1}{E_r} \equiv \frac{C_3}{E_r} \quad (17)$$

$$C_3 = \frac{EA_b}{I_b + A_b(H - Y_b)^2} \left[\frac{M_f(H - Y_b)}{\sigma_f} - I_b \right] \quad (17a)$$

이고, C_3 는 일정한 값을 갖는 상수이다. 따라서 일정 굽힘 강도 조건으로 구한 소재대체 설계된 지붕구조의 두께는 식 (13)과 같다.

또한 일정 굽힘 강도 조건에서 소재대체를 하였을 때 차체 구조의 경량화 문제는 하부구조와 벽 구조에 변경이 없으므로 지붕구조만의 경량화 문제로 단순화 된다. 따라서 지붕구조 소재대체 경량화는 식 (14)와 같은 최적화 문제로 표현될 수 있다. 식 (17)을 식 (14)에 대입하면 식 (18)과 같은 최적화 문제로 변환된다.

$$\begin{aligned} \text{Min}[m_r = \frac{L\rho_r C_3}{E_r}] &= C_3 L \cdot \text{Min}[\frac{\rho_r}{E_r}] \\ &\equiv C_3 L \cdot \text{Min}[\frac{1}{R_1}] \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 L, C_3 는 일정한 값을 갖는 상수이다.

식 (18)은 식 (15)을 만족시키면서 일정 굽힘강도 조건으로 차체중량을 최소화하려면 식 (6)의 R_1 을 최대로 하는 소재가 필요함을 의미한다. 식 (6)은 Fig. 5의 종탄성계수 밀도 차트로부터 소재 대체 설계시 경량화 비율을 구할 수 있다. 그러나 이 경우에도 식 (15)의 조건을 만족하여야 하므로 Fig. 7에 표시된 기울기가 소재대체 이전의 초기 재료 σ_f/E 보다는 큰 값을 가져야 한다.

보통 강재인 경우에는 $E = 2.1 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$, $\sigma_f = 21.0 \text{ kgf/mm}^2$ 정도이므로 $\sigma_f/E = 10^{-3}$ 이다. 따라서 강재 지붕구조를 일정 강도 조건에서 소재대체 설계할 때 Fig. 7과 Table 2 (R_2/R_1 이 상대적으로 커야 함)를 참조하면 SUS 강, Mg 합금, Al 합금, Ti합금, GFRP, CFRP 등 모든 경우가 강재의 σ_f/E 보다

큰 값을 가질 수 있으므로 $\varepsilon_r \leq \varepsilon_f$ 를 만족한다.

식 (6)을 이용하여 Al합금, 강재, Mg합금 재료들에 대하여 R_1 을 구하여 정리하면 앞에서 구한 Table 1과 같다. Table 1의 결과에서 보면, 차체의 일정 굽힘 강도조건에 대하여 강재 지붕구조를 여러 가지 경량소재로 소재대체 할 때, CFRP 소재 (경량화 36% 수준)외에는 경량화를 달성할 수 없다.

2.5 일정 비틀림 강성 조건에서 지붕의 소재대체

차체의 비틀림 강성은 주행중 좌우 비틀림 진동으로 승차감에 영향을 미치므로 차체 구조 설계시 고려하는 요소이다. Fig. 1과 같이 차체 단면에 비틀림 모멘트가 작용할 때, 전단흐름이 발생한다. 이 전단흐름에 대하여 일정한 비틀림 강성을 가져야 한다는 조건을 적용하여 차체설계를 하게 된다.

비틀림 하중(T)에 의한 차체 비틀림각을 ϕ , 비틀림 하중이 가해지는 두 지점 사이의 거리를 l_2 이라고 하면, ϕ 는 식 (19)와 같다[15].

$$\phi = \frac{Tl_2}{4A^2} \oint \frac{ds}{G_i t_i}, \quad (i = r, u, w) \quad (19)$$

여기서, $A = BH$ 로서 차체의 단면적을 나타내며, G_i 와 t_i 는 각각 지붕, 하부구조 및 벽구조의 Shear modulus 와 두께를 나타낸다.

소재대체 이전의 초기 차체구조의 경우,

$$\oint \frac{ds}{G_i t_i} = G \left(\frac{B}{t_u} + \frac{B}{t_{ro}} + \frac{2H}{t_w} \right) \quad (19a)$$

이고, 소재대체 이후의 경우,

$$\oint \frac{ds}{G_i t_i} = \left(\frac{B}{G_u} + \frac{B}{G_r t_{ro}} + \frac{2H}{G_w} \right) \quad (19b)$$

이다. 여기서 G_r 은 소재 대체된 지붕소재의 Shear modulus 이다. 식 (19a), (19b)로부터 소재대체 전후에 동일한 비틀림 강성을 가지려면, 다음 식 (20)을 만족하는 두께를 가져야 한다.

$$t_r = \frac{G_{t_{ro}}}{G_r} \quad (20)$$

Fig. 4 (b)와 같이 소재대체를 하였을 때 차체구조의 경량화 문제는 하부구조와 벽 구조에 변경이 없으므로 지붕구조만의 경량화 문제로 단순화 된다. 따라서 지붕구조 소재대체 경량화 설계는 식 (21)과 같은 최적화 문제로 표현될 수 있다.

$$\text{Min}[m_r = BLt_r \rho_r] \text{ for constant } S_T \quad (21)$$

식 (20)을 식 (21)에 대입하면 식 (21a)과 같은 최적화 문제로 변환된다.

$$\text{Min}[m_r = BL \frac{G t_{ro}}{G_r} \rho_r] = [BL G t_{ro}] \text{Min}(\frac{\rho_r}{G_r}) \quad (21a)$$

여기서 B, L, G, t_{ro} 는 일정한 값을 갖는 상수이므로 일정 비틀림 강성 조건에서 차체중량을 최소화하려면 다음 R_3 를 최대 로 하는 소재가 필요하다.

$$R_3 = \frac{G_r}{\rho_r} \quad (22)$$

그런데 전단계수 G 는 종탄성계수 E 의 향으로 나타낼 수 있으므로 식 (22)는 식 (6)의 R_1 을 최대 로 하는 재료를 선정하는 것과 동일한 문제가 되어, 결과는 Fig. 5와 Table 1과 같다.

2.6 일정 비틀림 강도 조건에서 지붕의 소재대체

비틀림 하중(T)을 받는 얇은 튜브에 발생하는 전단흐름(q)은 식 (23)과 같다.

$$q = \frac{T}{2A} \quad (23)$$

여기서, $A = BH$ 이며 차체 단면의 면적을 나타낸다. 이때 지붕에 발생하는 전단응력은 식 (24)과 같다.

$$\tau_r = \frac{T}{2BHt_r} \quad (24)$$

식 (24)는 순수전단 응력상태이므로 Von Mises 항복 조건을 적용하여 소재 대체된 지붕의 허용 전단강도를 구하면 식 (25)와 같다.

$$\tau_{rf} = \frac{\sigma_{rf}}{\sqrt{3}} \quad (25)$$

따라서 식 (24), (25)로부터 초기 지붕 구조의 비틀림 강도에 해당하는 비틀림 모멘트(T_f)를 전디는 소재 대체 설계된 지붕의 두께는 식 (26)과 같다.

$$t_r = \frac{\sqrt{3} T_f}{2BH\sigma_{rf}} \quad (26)$$

여기서 초기 지붕 구조의 비틀림 강도에 해당하는 비틀림 모멘트(T_f)는 식 (26)에서 소재대체 이전의 지붕두께 및 허용응력을 대입하면, 식 (27)과 같다.

$$T_f = \frac{2BH\sigma_{rf}t_{ro}}{\sqrt{3}} \quad (27)$$

따라서 식 (26), (27)로부터 일정 비틀림 강도(T_f)조건 하에서 소재 대체 설계된 지붕두께는 식 (28)과 같다.

$$t_r = \frac{\sigma_f}{\sigma_{rf}} t_{ro} \quad (28)$$

한편 일정 비틀림 강도 조건으로 소재대체 할 때 차체구조의 경량화 문제는 하부구조와 벽 구조에 변경이 없으므로 지붕구조만을 경량화 하는 문제로 단순화 된다. 따라서 지붕구조 소재대체 경량화 설계는 식 (29)와 같은 최적화 문제로 표현될 수 있다.

$$\text{Min}[m_r = A_r L \rho_r] \text{ for constant } T_f \quad (29)$$

그리고 식 (28)을 식 (29)에 대입하면 식 (30)과 같은 최적화 문제로 변환된다.

$$\text{Min}[m_r = LB t_r \rho_r] = BL \sigma_f t_{ro} \cdot \text{Min}[\frac{\rho_r}{\sigma_{rf}}] \quad (30)$$

여기서 B, L, σ_f, t_{ro} 는 일정한 값을 갖는 상수이므로 식 (31)의 R_2 를 최대 로 하는 소재가 일정 비틀림 강도 조건에서 최대 경량화를 달성할 수 있다.

$$R_2 = \frac{\sigma_{rf}}{\rho_r} \quad (31)$$

식 (31)은 식 (14b)와 일치하며, 대수함수를 사용하여 선형화하면 식 (31a)와 같다.

$$\log \sigma_{rf} = \log R_2 + \log \rho_r \quad (31a)$$

식 (31a)를 분석하기 위하여 각종 구조재료에 대하여 R_2 를 도식적으로 비교할 수 있도록 만든 M. F. Ashby 이 개발한 대수 스케일로 된 차트를 이용할 수 있다. R_2 를 최대 로 하는 소재는 강도-밀도 차트에서 찾을 수 있는데 그 선정 과정을 Fig. 8에 나타내었다. 이 차트에서 σ_f/ρ =일정한 직선의 기울기에 평행한 사선을 그어서, 이 사선을 기준으로 최상단에 위치하는 재료를 사용할 때 최대 경량화 효과를 얻을 수 있다.

일정 비틀림 강도 조건하에서 구한 각종 지붕 소재의 경량화 수준을 비교하면 Table 3과 같다. Table 3에서 강재, 스테인레스 강, Mg 합금, Al 합금, Ti합금, GFRP, CFRP등의 순서로 비강도가 높고, 보통 강재와 비교할 때 스테인레스 강은

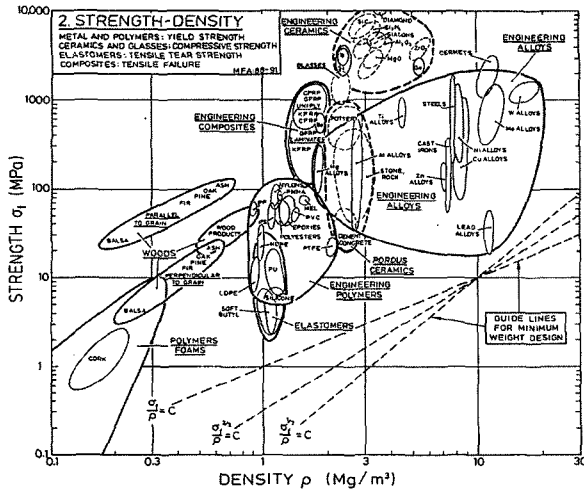


Fig. 8. Strength and density diagram

Table 3. R_2 values of typical materials $R_2 = 32$

차체 소재	R_2 (MPa m ³ /kg)	대표 소재의 R_2	경량화 비율
강재	24-220	Carbon steel, $R_2 = 32$	0%
		Stainless steel, $R_2 = 44$	42%
Ti합금	120-220	Ti6Al-4V, $R_2 = 205$	84%
Al합금	12-220	6082-T6, $R_2 = 89$	64%
CFRP	200-350	C/E (0/90±45), $R_2 = 326$	90%
GFRP	150-250	$R_2 = 200$	84%
Mg합금	50-170	$R_2 = 110$	71%

42%, Al 합금은 64%, 그리고 Ti합금, GFRP, CFRP등은 80% 이상의 경량화가 가능하다.

2.7 R_1, R_2 지수를 이용한 지붕구조 소재대체 경량화 예측 기법

예를 들어 어떤 보통 강재 차체에서 굽힘 강도와 비틀림 강도가 설계 제한 조건을 정확하게 만족시키고, 굽힘 강성은 설계 제한 조건에서 20%의 여유가, 그리고 비틀림 강성은 충분한 여유가 있을 경우, Table 4와 같이 소재대체 경량화 비율을 예측할 수 있다.

지붕을 소재 대체할 경우, 경량화 효과를 예측하려면 구조 해석 등을 이용하여 먼저 기존 지붕구조에 대한 각종 강도 및 강성의 여유를 계산하여야 한다. 굽힘강도 여유 경우 R_2/R_1 비가 기준소재(강재)에 비하여 모두 높은 값을 가지므로 식 (15)의 조건을 만족한다. 따라서 식 (18)의 R_1 값에 의하여 굽힘 강도 여유가 결정되는데, 차체의 굽힘 강도를 고려한 지붕의 소재대체 경량화 지표로 강성지수인 R_1 가 사용된다 는 점이 매우 특이하다.

Table 4. An example on weight reduction of a roof

차체 소재	강성 (R_1)	강도 (R_2)	굽힘 강성 여유	굽힘 강도 여유	R_2/R_1 판정	비틀림 강도 여유	지붕의 경량화율
강재	27	32	20%	0%	1.2(기준)	0%	0%
SUS강	25	44	11%	-7.4%	1.8(적합)	72%	-8%
Ti합금	26	205	15%	-3.7%	7.9(적합)	540%	-3.8%
Al합금	26	89	15%	-3.7%	3.4(적합)	178%	-3.8%
CFRP	42	326	86%	55.6%	7.8(적합)	918%	35.7%
GFRP	17	200	-25%	-37.0%	11.8(적합)	525%	-58.7%
Mg합금	23	110	2%	-14.8%	4.8(적합)	243%	-17.4%

한편 고려 중인 대체소재들에 대하여 강도 및 강성의 여유를 산출 비교하여 둘 중 낮은 여유가 경량화 설계를 지배하는 것으로 결정하면 된다. 본 사례의 경우에는 굽힘 강도 여유 값이 경량화를 제약하는 설계요소이다.

본 사례에서는 대체 소재들이 높은 강도여유를 가짐에도 불구하고 낮은 강성 여유 때문에 경량화가 어렵다. 다만 CFRP는 높은 비강성 값을 가지므로 지붕을 소재 대체할 경우, 지붕의 중량을 36% 정도 경량화 할 수 있다.

3. 결론

본 연구의 주요 결과 및 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 유도한 소재 대체 경량화 지수(R_1, R_2)는 개념설계 단계에서 지붕구조의 소재 변경에 의한 경량화 효과를 정량적으로 분석할 수 있는 수단을 제공해 준다.
- (2) 본 소재대체 경량화 지수를 이용하면 지붕구조를 소재대체 설계할 때에도 강도 및 강성의 설계 여유와 R_2/R_1 값을 산출하여 경량화 비율을 예측할 수 있다.
- (3) 강재 지붕구조를 일정 굽힘 강도 및 강성 조건에서 소재대체 설계할 경우에는 경량소재의 낮은 강성특성으로 인하여 CFRP 소재(지붕을 36% 경량화) 외에는 경량화를 달성할 수 없다.

참고 문헌

1. W. Brocker, R. D. Rosenberger (1997). "Light Weight Potentials in Coach Body Structures of High-speed Trains", Proceedings of WCRR '97, Vol. D, pp.713-721
2. D. Swan, C. Nev and J. Carruthers (1994). "Affordable Rail Vehicles", Bodyshells Seminar of Advanced Railway Research Center, United Kingdom

3. N. Tagawa, H. Yamashiro, K. Kadota (1993). "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
4. T. Suzuki, K. Sato, K. Akutsu (1993). "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
5. S. Matsuoka and T. Nakamura (1993). "Development of Carbon Fiber Reinforced Plastic Carbody Shell", Proceedings of the International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, Yokonamo, Japan
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.
7. J. S. Koo, H. J. Cho, Y. S. Jeon and S. K. Cheong (2005). "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
8. G. Dioter, Engineering Design (1983). a Material and Processing approach, McGraw Hill
9. G. Lewis (1990). Selection of Engineering Materials, Praticce Hall, Inc., USA
10. M. F. Ashby (1999). Materials Selection in Mechanical Design, Butterworth-Heinemann, OXFORD
11. M. F. Ashby (2000). "Multi-objective Optimisation in Material Design and Selection," ACTA Materialia Millenium Issue, Vol. 48, pp.359-369
12. J. S. Koo and H. S. Jung, "A Study on Material Substitution Design and Evaluation Method for Structural Components of Rolling Stocks," KSAE, Vol.12, No.4, pp.74-84, 2004.
13. P. Sirisalee, M. F. Ashby, G. T. Parks and P. J. Clarkson (2004). "Multi-criteria Material Selection in Engineering Design," Advanced Engineering Materials, Vol.6, pp.84-92
14. F. S. Tse, I. E. Morse and R. T. Hinkle (1986). Mechanical Vibrations, Allyn Bacon, Inc.
15. E. F. Bruhn (1973). Analysis & Design of Flight Vehicle Structures, S. R. Jacobs & Associates, Inc.
16. D. M. Chun, S. H. Ahn and J. D. Jang (2006). "Construction of Web-based Material Database and Case Study of Material Selection for Automotive Engine Pulley," KSAE, Vol.14, No.4, pp.107-114

부 록

본 논문에 사용된 기호와 첨자를 정리하면 다음과 같다.

기호(nomenclature)

- B : breadth, mm
- H : height, mm
- L : length, mm
- t : thickness, mm
- F : applied force, kgf
- M : bending moment, kgf·mm
- T : torque, kgf·mm
- w : distributed load, kgf/mm
- q : shear flow, kgf/mm
- ρ : density, kg/mm³
- m : mass, kg
- σ : stress, kgf/mm²
- E : elastic modulus, kgf/mm²
- G : shear modulus, kgf/mm²
- v : Poission's ratio
- A : section area, mm²
- I : moment of inertia of area, mm⁴
- J : polar moment of inertia of area, mm⁴
- R : ratio of a mechanical property per weight
- S : stiffness

하첨자(subscripts)

- c : compression
- d : displacement allowed
- f : failure level
- o : original design
- b : bodyshell excluding the roof (underframe + wall)
- r : roof
- u : under frame
- w : wall
- B : Bending
- N : neutral axis
- T : twisting