샌드위치형 복합재 하이브리드 차체의 경제성 분석에 관한 연구

A Study on the Economic Feasibility of Hybrid Bodysell Made of Sandwich Composite Plate

서승일^{1†} · 김정석¹ · 조세현²

Sung Il Seo · Jung Seok Kim · Se Hyun Cho

Abstract Composite honeycomb sandwich plate is light and strong. It is easy to produce. It began to be applied to the bodysell of rolling stock. Generally, weight saving amounts to 27%. However, the material cost of it is much higher than that of aluminum extrusion profile, which prevents popular use of it for bodysell. In this paper, manufacturing processes of two light materials were compared to investigate cost impact. After cost breakdown was defined, economics of two materials was analyzed using the previous cost data. Easy production of composite bodysell could compensate for higher material cost. Mass production of composite bodysell can make the equipment cost lower for the composite bodysell so that it may have strong competitiveness to the aluminum bodysell. Operational energy saving due to weight reduction was also presented referring to the actual statistical data in a metro line.

Keywords : Autoclave, Aluminum extrusion profile, Composite honeycomb sandwich plate, Economic feasibility study, Hybrid bodysell, Manufacturing cost, Weight saving

초 록 허니컴 샌드위치 복합재는 가볍고 강하며, 제작하기가 편리한 장점이 있어 철도차량 차체에 적용되기 시작하였다. 보통 중량감소량은 27%에 달하나, 재료비가 알루미늄 압출재에 비해 높기 때문에 차체에 널리 적용되지 못하였다. 본 논문에서는 두 가지 경량화 재질에 대하여 제작 과정을 고찰하고 원가를 분류하여 과거 자료를 기초로한 경제성을 분석하였다. 복합재 차체의 재료비 상승분을 제작의 용이성으로 상쇄할 수 있으며, 대량생산에 따른 장비비를 저감하면 알루미늄 차체에 비해 경쟁력을 가질 수 있음을 알 수 있었다. 지하철 노선의 통계자료를 참고로 하여 중량 감소에 따른 운행 에너지 감소량도 제시하였다.

주요어 : 경제성 분석, 알루미늄 압출재, 오토클레이브, 제작비, 중량감소, 하이브리드 차체, 허니컴 샌드위치 복합재

1. 서 론

복합재는 가볍고 튼튼한 기계적인 성질이 있어서 수송시스템의 경량화 재료로 활발히 활용되고 있다. 항공분야에서 복합재는 오래 전부터 초음속기의 기체에 광범위하게 적용되고 있으며, 최근 개발된 초대형 여객기의 주요 구조 부재로서 샌드위치형 복합재가 적용되었다[1]. 선박분야에서도 쌍동형 선박 등 초고속선의 선체재료로서 효율적으로 활용되고 있다[2]. 철도차량분야에서도 복합재의 활용이 지속적으로 확대되고 있는데, 근래에는 내장재 뿐만 아니라, 차체 전체를 복합재로 제작한 틸팅열차가 성공적으로 시험 운행되고 있다[3]. 최근에는 복합재를 이용한 대차프레임도 개발되었으며, 강도, 내구성, 적합성 등을 검증하였으므로 그 장점이 부각되고 있다[4].

복합재는 밀도가 낮고 인장강도와 피로강도가 높은 반면에, 복합재의 조합 및 내부 섬유 배치에 따라 변형이 많

이 발생할 수 있으므로 소재 자체만으로는 대형 구조체에 적용하기가 곤란하고, 보완 방안으로 샌드위치 판넬이나 강재 보강 구조체(steel reinforced structure)를 활용한다. 세계최초로 일체형 성형기술로 개발된 한국형 틸팅열차의 차체에도 알루미늄 허니컴 샌드위치 복합재판넬과 강재프레임으로 내부 보강된 구조체를 활용하고 있다[3].

복합재는 경량화가 가능하지만 재료비용이 알루미늄과 같은 경량금속 재료에 비해 높다는 약점이 있어서 경제적이지 못하다는 평가가 있으나, 대형 성형기를 활용하여 금형에 의한 양산 체계를 구축하였을 때 제작비용이 감소되는 이점이 있고, 경량화에 따른 에너지 비용 절감, 궤도 부담력 감소 등의 장점이 있다.

본 연구는 샌드위치형 복합재를 철도차량 차체에 적용하는 경우 재료비, 제작비 등의 비용분석과 운행을 고려한 에너지 비용 절감 효과를 분석하여 경제적인 측면에서 복합재 차체의 유용성을 제시하고자 한다.

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 신교통연구본부
E-mail : siseo@krrri.re.kr

¹한국철도기술연구원 신교통연구본부

²한국화이버(주) 차량사업본부

2. 차체의 제작 과정

2.1 샌드위치 복합재 차체

복합재 차체를 제작하는 방법으로 오토클레이브 성형법, 진공주입(vacuum infusion) 성형법, 필라멘트 와인딩성형법, 오픈몰드성형법, RTM(resin transfer molding)성형법, 인발성형법, 열프레스 성형법 등 다양한 성형법이 존재한다. 각 방법은 장단점이 있으므로 대상에 따라 적용 여부가 달라질 수 있다. 본 연구에서는 복합재 차체를 제작하기 위해 제작 가능성과 제작사의 시설 현황 등을 고려하여 오토클레이브 성형법을 적용하였다. 오토클레이브 성형법은 공정이 복잡하고 부자재가 많이 필요하며 공정 및 제조시간이 길고 대형 장비가 필요하다는 단점이 있지만, 기계적 성질이 우수한 제품을 만들 수 있는 장점이 있다[5].

허니컴 샌드위치형 복합재는 Fig. 1과 같이 허니컴 형상 알루미늄 박판의 상하를 탄소섬유 프리프레그로 적층한 구조로서, 중공(hollow) 단면이므로 가볍고 상하면의 복합재로 인해 강성이 증가되는 장점이 있다. 순수한 복합재 만으로는 과도한 처짐, 하부 기기 취부의 어려움 등의 문제가 있어서 보완책으로 내부에 골조를 삽입하고 하부 언더프레임은 스테인레스 스틸 구조로 하는 하이브리드형 차체를 고안하여 실제 차량에 적용하였다. 오토클레이브 성형법에 의한 차체 제작 공정은 다음 Fig. 2와 같다[3].

Fig. 1과 같은 허니컴 샌드위치 복합재 차체를 제작하기 위해 차체와 동일한 표면을 갖는 목형을 만들고 목형을 중심으로 FRP금형을 제작한다. 금형에 탄소 섬유로 직조되어 수지와 혼합된 프리프레그(prepreg)로 적층을 하는데, 적층과정에서 두께와 치수 관리를 위해 중간 중간에 압착(compaction) 작업을 실시한다.

Fig. 1 Section of hybrid bodyshell

적층 표면에는 알루미늄 허니컴과의 접착을 위해 필플라이(peel ply)를 부착한다. 1차 적층이 종료되면 진공으로 포장하고, 오토클레이브내에서 고온고압진공상태에서 성형을

Fig. 2 Flow of manufacturing process for hybrid bodysell of composite honeycomb sandwich plate

Fig. 3 Typical scenes of major manufacturing processes of hybrid bodysell

실시한다. 1차성형이 종료되면 알루미늄 허니컴 판재를 부착하고 차체강성 보강을 위해 사전에 제작한 내부골조를 취부한다. 이 후 프리프레그로 적층 하고, 다시 진공 포장하여 오토클레이브에서 2차 성형을 하고 탈형하여 차체를 완성한다. Fig. 3(a)는 1차 적층 후에 성형에 앞서 진공 포장하는 장면이고 Fig. 3(b)는 알루미늄 허니컴 판재를 붙이는 장면이고, Fig. 3(c)는 성형을 위해 금형이 오토클레이브내에 이송되는 장면이다. Fig. 3 (d)는 최종 탈형된 복합재 차체이다.

2.2 알루미늄 압출재 차체

알루미늄 차체의 제작 과정은 Fig. 4와 같다. 알루미늄 합

Fig. 4 Flow of manufacturing process for bodysell of aluminum extrusion profile

Fig. 5 Typical scenes of major manufacturing processes of aluminum bodysell

금 소재의 용해 및 주조를 통해 빌렛을 제조하고, 열처리를 통해 재질을 균질화 한다. 차체 형상과 압출기의 용량을 고려하여 압출재 단면을 설계하고, 이에 따라 금형을 제작한다. 금형을 Fig. 5(a)와 같은 대형압출기에 장착하고 빌렛을 가압하여 Fig. 5(b)와 같이 금형을 통해 압출형재를 생산하고 다시 열처리를 실시하여 강도를 향상시킨다[6]. 압출형재는 변형을 구속하는 지그상에서 Fig. 5(c)와 같이 블록별로 용접되어 조립되고 다시 대조립되어 Fig. 5(d)와 같은 차체를 이루게 된다.

3. 샌드위치 복합재의 중량 감소 효과

3.1 굽힘하중하의 샌드위치 복합재 중량 감소 효과

샌드위치 복합재의 중량감소 효과를 확인하기 위해 Fig. 6과 같이 균일 면외 압력을 받는 단순지지 판재를 대상으로 고찰해 본다.

샌드위치 복합재 판재와 알루미늄 압출형재가 동일 굽힘강성을 갖기 위한 조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_c I_c = E_a I_a \quad (1)$$

여기서,

E_c = 샌드위치 복합재의 영률(Young's modulus)

I_c = 샌드위치 복합재의 단면2차 모멘트

E_a = 알루미늄 압출재의 영률(Youn's modulus)

I_a = 알루미늄 압출재의 단면2차 모멘트

Fig. 6 Sandwich plate under uniform pressure

중공 알루미늄 압출재와 샌드위치 복합재 심재의 자체 굽힘강성은 크기가 작으므로 무시하고 표면재만 굽힘강성에 유효하게 기여한다고 가정하면 위의 식(1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\rho_c b E_c = \frac{d_c^2 t_c}{2} = \rho_c \frac{\rho_a}{\rho_a} b E_a \frac{d_a^2 t_a}{2} \quad (2)$$

여기서,

ρ_c = 샌드위치 복합재의 밀도

d_c = 샌드위치 복합재의 표면재 사이 거리

t_c = 샌드위치 복합재 표면재 두께

b = 단면의 폭

ρ_a = 알루미늄 압출재의 밀도

d_a = 알루미늄 압출재 표면재 사이 거리

t_a = 알루미늄 압출재 표면재 두께

위 식(2)를 변형하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W_c = \frac{E_a \rho_c}{E_c \rho_a} W_a \quad (3)$$

여기서,

W_c = 샌드위치 복합재의 단위 폭당 중량

W_a = 알루미늄 압출재의 단위 폭당 중량

알루미늄 압출재(A6005A)와 복합재(CF1263)의 물성치($E_c/E_a=0.81$, $\rho_c/\rho_a=0.59$)를 위 식(3)에 대입하면 다음과 같이 중량비가 얻어진다.

$$W_c = 0.73W \quad (4)$$

추가로 강도(strength) 측면에서 설계한 경우 알루미늄 압출재와 복합재의 중량을 비교해 본다. Fig. 6과 같은 단순지지 샌드위치 보(beam) 구조에 대해 최대 굽힘 모멘트와 최대 굽힘응력을 계산하면 다음 식이 얻어진다.

$$\sigma_{bmax} = \frac{M_{max}}{Z} = \frac{pl^2}{8t_c d_c} \quad (5)$$

여기서,

σ_{bmax} = 샌드위치 복합재의 최대 굽힘 응력
 M_{max} = 샌드위치 판재의 최대 굽힘 모멘트
 Z = 샌드위치 판재의 단면계수
 p = 샌드위치 판재에 작용하는 균일 압력
 l = 샌드위치 판재의 길이

허용 굽힘응력 관점에서 판재를 설계하는 경우 요구 단위 두께는 다음 식과 같이 얻어진다.

$$t_{creq} = \frac{pl^2}{8\sigma_{cballow}d_c} \quad (6)$$

여기서,

t_{creq} = 샌드위치 복합재의 요구 두께
 $\sigma_{cballow}$ = 샌드위치 복합재의 허용 굽힘 응력

동일한 방법으로 알루미늄 압출재에 대해서도 요구 단위 두께를 계산하면 다음 식(7)과 같이 된다.

$$t_{areq} = \frac{pl^2}{8\sigma_{aballow}d_c} \quad (7)$$

여기서,

t_{areq} = 알루미늄 압출재의 요구 두께
 $\sigma_{aballow}$ = 알루미늄 압출재의 허용 굽힘 응력

식(6)과 식(7)을 이용하여 동일조건에서 복합재와 알루미늄 압출재의 단위 폭당 중량비를 구하면 다음 식이 얻어진다.

$$W_{cstreng} = \frac{\sigma_{aballow}\rho_c}{\sigma_{cballow}\rho_a} W_{astreng} \quad (8)$$

여기서,

$W_{cstreng}$ = 강도 기준 샌드위치 복합재의 단위 폭당 중량
 $W_{astreng}$ = 강도 기준 알루미늄 압출재의 단위 폭당 중량

복합재(CF1263)는 가볍지만 허용-응력은 알루미늄 압출재(A6005A)의 허용-응력보다 큰 점을 감안하여 ($\sigma_{cballow}/\sigma_{aballow}=2.1$, $\rho_c/\rho_a=0.59$), 재료 물성치를 위 식(7)에 대입하면 다음

과 같은 중량비가 얻어진다.

$$W_{cstreng} = 0.28W_{astreng} \quad (9)$$

강성(stiffness) 측면에서 설계한 식(3)과 비교하여 보면, 강도(strength) 측면에서 설계한 경우 복합재의 중량이 더 감소될 수 있음을 알 수 있다.

실제 샌드위치 복합재 차체의 경우 상면과 하면의 두께가 다르고, 1차원 보(beam)가 아닌 2차원 판(plate)이며 등방성이 아닌 이방성 재질이므로 단순화된 식(1)과 식(5)로 굽힘 거동을 표현하는 것이 이론적 엄밀성이 부족할 수 있으나, 전체적인 경량화의 경향을 파악하는 데에는 의미가 있다.

3.2 차체 중량 비교

운행중의 차체는 수직, 수평, 비틀림 등 다양한 하중의 조합 상태에 놓이게 된다. 그 중에서 하중이 가장 크고 차체 설계에 직접 영향을 주는 것은 동적 가속도를 고려한 수직 하중이다. Fig. 1에서 보듯이 차체는 육면체의 상자형 구조이므로, 차체 바닥에 수직하중을 받게 되면 전체적 거동 측면에서 분포하중에 의한 굽힘 모멘트를 받는 보(beam)로 모델링할 수 있다. 국부적으로 구조적 불연속 부분에서 응력 집중이 발생할 수 있으나 재료의 배치 측면에서 지붕과 언더프레임은 Fig. 6의 표면재와 같은 역할을 한다고 볼 수 있다.

실제 차체에 대해 차량의 크기가 다르고, 적용 기준과 하중 조건이 다르므로 식(4)와 같이 중량을 간단히 비교하기는 곤란하나, 실적 자료를 기초로 유추하여 검증해 볼 수 있다[3,8]. Table 1은 실적 자료를 기초로 상부 차체에 대해서 중량을 비교한 것으로서 복합재 차체는 알루미늄 차체에 비해 22% 경량화 결과를 보여주고 있다. 알루미늄 차체는 도시철도 표준사양을 적용한 결과이고 출입문이 좌우 4개씩인데 비하여, 복합재 차체는 도시철도 표준사양보다 더 엄격한 철도안전법을 적용한 객차에 대한 설계 결과임을 감안하면, 간단한 비교 결과에 의한 27%의 경량화가 가능하다는 식(4)의 결과와 유사한 결과를 보여준다.

Table 1 Comparison of weight of upper carbody

Material	Weight of Upper Carbody(kN)	Ratio	Remarks
Stainless Steel	70.4	1.27	Data from Saemaul Express Train
Aluminum Alloy	55.6	1.00	Data from Standard Electric Multiple Unit
Composite	43.4	0.78	Data from Tilting Train Express

4. 복합재 차체의 제작비

4.1 제작비 비교

차체의 제작비용은 재료비(material cost), 직접인건비(direct

labor cost), 부대비(overhead cost), 장비비(equipment cost), 에너지사용비(energy cost), 가공비(tooling cost) 등으로 나눌 수 있는데, 재료비, 직접인건비, 에너지사용비등은 변동비(variable cost)라 할 수 있고, 부대비, 장비비, 가공비등은 고정비(fixed cost)라 할 수 있다. 고정비는 전체비용이 고정되어 있으므로 생산되는 단위가 커질수록 단위당 원가는 감소된다. 재료비는 차체에 투입되는 재료의 구입비용이고, 직접인건비는 작업에 투입되는 인력의 시간에 임금을 곱하여 결정되는 비용이며, 에너지사용비는 차체생산에 직접 소요되는 전력 등의 에너지 비용이다. 부대비는 관리자와 지원인력의 인건비, 공장 운영에 소요되는 각종 공과금 등의 운영 비용이다. 장비비는 성형기, 공장 설비 등의 주요장비와 시설의 건설비를 생산단위로 나눈 금액이고, 가공비는 금형과 각종 소모품들을 가공하는 데에 소요되는 비용이다.

재료비는 차체 설계 결과에 따라 소요되는 재료에 의해 결정되나, 직접인건비는 작업의 난이도에 따라 달라지게 된다. 2절에서 기술하였듯이 알루미늄 차체는 압출재의 가공, 용접 및 조립에 많은 시수(man-hour)가 소요되는데 비하여, 복합재 차체의 경우 전체 금형을 활용한 적층과 접착 작업에 시수가 소요되고 성형기에서의 성형 작업은 기계적으로 이루어진다. 복합재 차체 제작을 위한 에너지 사용은 주로 성형기에서 1, 2차 성형을 위한 전력과, 차체의 이동을 위한 운반기기의 전력사용이 대부분을 차지하는데 비하여 알루미늄 차체의 경우, 빌렛의 고압 압출을 위한 파워를 얻기 위해 대량의 전력이 이용되고 있으며, 생산된 압출재의 열처리를 위해서도 대량의 전력이 소요된다. 복합재 차체 제작

Table 2 Manufacturing costs and effectiveness of composite bodysell

Item	Type	Cost effectiveness
Material	Variable	Higher
Direct Labor	Variable	Lower
Overhead	Fixed	Lower
Equipment	Fixed	Lower
Energy	Variable	Lower
Tooling	Fixed	Lower

Fig. 7 Comparison of costs with aluminum bodysell

비용을 알루미늄 차체 제작 비용과 비교하여 요약정리하면 다음의 Table 2와 같다.

Table 2의 결과를 종합하여 언더프레임을 제외한 복합재 차체 부분만을 대상으로 시제품을 제작하는 과정에서 얻어진 자료를 기초로하여 알루미늄 차체 원가 자료와 상대적인 비교를 하면 Fig. 7과 같다(2005년 기준)[5.8]. 샌드위치 복합재 소재(prepreg와 aluminum sheet) 자체의 원가는 알루미늄 원소재에 비해 3배 이상 높지만, 허니컴 샌드위치 복합재 자체의 재료비는 동일한 조건의 알루미늄 압출재 차체와 비교하여 72% 정도 증가하고, 제작에 소요되는 인건비까지 고려하면 26%정도 상승된다.

4.2 제작비 분석

차체 전체에 대해 Table 2에서 제시된 각 비용 항목에 대해 점유 비중을 그래프로 표시하면 Fig. 8과 같다[9]. Fig. 8에서 외주비용(subcontracted cost)은 언더프레임을 제작하기 위해 외부 전문업체에 제작구매 의뢰한 비용이다. 이 비용은 주문량에 따라 비례적으로 증가되는 변동비라고 할 수 있다. 고정비는 차체 100량의 제작 발주가 이루어진 경우를 가정하여 분할하여 1량당 원가에 반영하였다. Fig. 8에서 장비비의 비중(24.2%)이 상대적으로 높게 나타나는데, 이는 성형기의 초기 투자비를 원가에 반영시킨 결과이다.

Fig. 8 Cost breakdown of hybrid composite bodysell based on prototype manufacturing data

복합재 차체 1량의 제작 원가를 1로 보고, 100량을 생산했을 경우를 가정하면, Fig. 8의 각 항목별 백분율이 해당 항목의 비용이 된다. 좀더 상세하게 표현하기 위해 차체 생산 단위가 증가함에 따른 전체 비용을 그래프로 나타내면 Fig. 9과 같이 된다.

현재 하이브리드 차체의 시제품 제작 사례를 기초로 100량 생산 기준의 제작원가를 산출해 보면 Fig. 9에서 보듯이 하이브리드 차체 원가가 알루미늄 차체의 원가 보다 7% 높

Fig. 9 Variation of costs with increasing number of units manufactured

게 나타난다. 알루미늄 차체의 경우에 대형 압출기 등은 이미 기존에 활용 실적이 많고, 사용한지 상당한 시일이 지났으므로 장비비는 원가에 고려하지 않아도 되는 항목이 된다. 간단한 계산식으로 알루미늄 차체와 동일한 원가로 판매하기 위한 손익분기 수량을 계산해 보면 다음과 같이 된다.

즉, 시제품 제작 자료를 기초로 할 때, 124량 이상의 차체를 생산하는 경우, 하이브리드복합재 차체는 알루미늄 차체에 비해 원가 경쟁력을 가질 수 있다.

$$N_c = \frac{C_{fix-tot}}{C_{sale} - C_{var}} = \frac{35.71}{0.932 - 0.643} = 123.4 \quad (10)$$

여기서,

N_c = 손익분기의 판매 수량

C_{sale} = 단위당 판매가

C_{var} = 단위당 변동비용

$C_{fix-tot}$ = 총고정비용

5. 운행비에 대한 고려

주행저항식에서도 알 수 있듯이, 열차가 주행하면서 소비하는 대부분의 에너지는 열차의 중량에 비례한다.

식(4)에서도 알 수 있는 바와 같이 복합재 차체의 중량은 알루미늄 차체에 비해 27% 정도 감소가 가능하며, 스테인레스 차체에 비해서는 50% 가까이 감소할 수 있다[7]. 차체 중량의 27% 감소(지하철 차량의 경우 7.5ton에서 5.5ton으로 감소)는 열차 전체 운행 중량(45ton 기준) 측면에서는 4.5% 정도의 감소 효과가 있다. 실제 운행 자료를 기준으로 서울시 지하철 2호선 1량당 연간 평균 소모 에너지는 98.6MWh 이고[10], 추진에 사용하는 에너지는 건전전동기의 출력(정격출력 200kW급 12대)과 보조전원장치의 용량(180kVA급 2대) 및 주행시나리오를 고려하여 소모 에너지의 80%라고 추정할 수 있다. 추진 소모 에너지를 비용으로 환산하면(전력비 70원/kWh 적용), 5.5백만원이 된다[11]. 차량의 수명을 25년으로 잡고 비용으로 환산하면 1.4억원이 되고, 중량 4.5% 절감에 따른 비용 절감효과는 6.2백만원이 된다. 이는 차체

Table 3 Energy saving of one composite hybrid bodyshell

Item	Electric power(kWh)	Cost (thousand won)	Remark
Annual consumed energy	98,517	6,896	Energy cost unit 70won/kWh
Annual consumed traction energy	78,813	5,517	80 percent of consumed energy
Life cycle consumed traction energy	1,970,340	137,924	Life cycle 25 years
Life cycle energy saving	88,665	6,207	Weight saving 4.5%

제작원가(1억원 전후)의 6%에 달하는 금액으로서 복합재 차체의 비용 상승 효과(5%~7% 상승 추정)를 흡수할 수 있는 정도가 된다. 에너지 절감 내용을 정리해 보면 다음 Table 3와 같다.

6. 결 론

본 연구에서는 다양한 장점을 가진 복합재 차체가 철도분야에서 적극적으로 활용되기 위해 제작과 운행비용 측면의 경제성을 분석하고 고찰하였다. 현재 차체 경량화를 위해 활용되고 있는 알루미늄 압출재의 제작과정 및 원가 특성을 복합재 차체와 비교 분석하였고, 복합재 차체 제작 과정에서 얻은 자료를 기초로 경제성을 비교하였다.

허니컴 샌드위치형 복합재는 알루미늄 압출재에 비해 동일 강도를 기준으로 27%의 경량화가 가능하다. 경량화에도 불구하고 복합재 차체는 알루미늄 압출재 차체에 비해 소재 자체의 원가가 높기 때문에 재료비는 알루미늄 차체에 비해 72% 높게 나타난다. 그러나 제작과정의 용이함 때문에 인건비에서 원가 상승의 상당부분을 흡수할 수 있어 재료비와 인건비를 합산고려하면 26%의 비용이 증가될 수 있다. 원가 항목을 모두 고려하였을 때, 하이브리드 복합재 차체의 제작비는 알루미늄 압출재 차체에 비해 5~7% 비용 상승이 예상되지만, 복합재 차체의 초기 투자비 등의 고정비의 효과를 줄이기 위해 제작 양수를 늘리게 되면 알루미늄 차체와 경쟁력이 있게 된다. 또한 경량화에 따른 운행 에너지 비용을 고려하면 현재의 자료를 기준으로 수명주기에 걸쳐 차체 제작 원가의 6%에 해당하는 금액을 절감할 수 있다. 따라서 복합재 차체는 알루미늄 차체에 비해 비용적인 측면에서도 경쟁력을 가질 수 있게 된다.

참고문헌

- [1] D. Gay, S.V. Hoa, S.W. Tsai (2003) Composite materials and aerospace construction, *Composite Materials : Design and Application*, 7, CRC Press, pp. 135-176.

- [2] Det Norske Veritas (2003) Hull structural design fiber composite and sandwich construction, *Rules for Classification of High Speed Light Craft and Naval Surface Craft*, 3(4), pp. 1-30.
 - [3] S.I. Seo, J.S. Kim, S.H. Cho (2008) Development of hybrid composite bodyshell for tilting trains, *Proc. of IMechE, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit*, 222, pp. 1-13.
 - [4] K.W. Jeon, K.B. Shin, J.S. Kim (2010) A Study on the evaluation of fatigue life and strength of light weight bogie frame made of glass fiber/Epoxy 4-Harness Satin Woven Laminate Composite, *2010 Autumn Proc. Journal of the Korean Society for Railway*, pp. 2436-2441.
 - [5] S.H. Cho et al. (2007) Development of carbody shape/interior and facilities technology, *R&D Project Report of Railway Technologies R&D1-6*, Ministry of Construction and Transportation, pp. 101-140.
 - [6] S.I. Seo, J.T. Kim, I.C. Park, D.H. Lee, D.S. Shin (1999) Development of aluminum carbody and production technologies of large aluminum extrusion profiles for rolling stocks, *Journal of the Korean Society for Railway*, 2(1), pp. 1-13.
 - [7] S.I. Seo et al. (1998) *Development of system engineering technologies for electric multiple units, R&D Report for Standardization of Urban Railway Rolling Stocks*, Ministry of Land and Transportation, pp. 6-11.
 - [8] S.I. Seo et al. (1998) *Study on development of aluminum extrusion profiles for rolling stocks*, Ministry of Industry and Resource.
 - [9] M.G. Ferrer, P. Schwab, I. Blanc, O. Jolliet (2005) Composite carbody for Korean Tilting Train Express project-Cost and environmental assessments screening, *Progress Report N2 of Laboratory of Ecosystem Management*, Ecole Poly technique Federale De Lausanne, pp. 14-17.
 - [10] E.G. Nam et al. (2010) Power consumption of railway infrastructures, *Statistics of Korea Railway Industries*, pp. 139-148.
 - [11] H.W. Oh (2005) State-of-Arts of domestic railway rolling stocks, *Data Books of Urban Railway*, 6(1), E&G Book, pp. 3-10.
- 접수일(2011년 8월 19일), 수정일(2012년 2월 8일),
게재확정일(2012년 2월 8일)