

샌드위치 복합재 철도차량 루프구조물의 구조안전성 평가

Evaluation of the Structural Integrity of a Sandwich Composite Train Roof Structure

신광복* 류봉조** 이재열*** 이상진**** 조세현****
Shin, Kwang-Bok Ryu, Bong-Jo Lee, Jea-Youl Lee, Sang-Jin Jo, Se-Huen

ABSTRACT

We have evaluated the structural integrity of a sandwich composite train roof which can find a lightweight, cost saving solution to large structural components for rail vehicles in design stages. The sandwich composite train roof was 11.45 meter long and 1.76 meter wide. The reinforced frame was inserted in sandwich panels to improve the structural performance of train roof structure and had the shape of hollow rectangular box. The finite-element analysis was used to calculate the stresses, deflections and natural frequencies of the sandwich composite train roof against the weight of air-condition system. The 3D sandwich FE model was introduced to simulate the hollow aluminum frames which jointed to both sides of the sandwich train roof. The results shown that the structural performance of a sandwich composite train roof under load conditions specified was proven and the use of aluminum reinforced frame was beneficial with regard to weight savings in comparison to steel reinforced frame.

1. 서 론

철도차량의 경량화는 에너지 소비량 감소, 속도 증가, 적은 트랙 마모 및 큰 유효 탑재량 등의 장점이 있어 차량 개발에 있어 기본적인 요구사항으로 받아들여지고 있는 추세이다[1]. 철도차량의 경량화는 최적설계 및 모듈화 설계, 경량 소재 사용 등의 다양한 방법들로 인해 가능하다. 최적설계는 철도차량뿐만 아니라 자동차, 항공기, 선박 그리고 일반적인 기계구조물에서도 설계 및 해석 기술의 발전으로 인해 적용되고 있는 기술이다. 모듈화 설계는 철도차량에서 많은 적용이 되고 있지 않지만, 제작 공정의 감소 및 유지보수 효율화 등을 부가적으로 얻을 수 있어 철도차량 경량화를 위해 반드시 필요한 기술이다. 경량 소재를 사용한 철도차량의 경량화는 가장 널리 사용되는 방법이다. 강재 차체를 경량화하기 위해 스테인레스 강이 도입되었으며, 스테인레스 강 차체를 더욱 더 경량화하기 위해 알루미늄 차체가 개발되었다. 그러나, 알루미늄 차체는 중공 압출재 생산기술, 접합부의 용접기술 그리고 고가의 제작비용 등의 단점을 지니고 있다. 이런 이유로 1990년대 후반부터 유럽을 중심으로 알루미늄을 대신할 경량 소재에 대한 선정 연구가 활발히 이루어져 제 3세대 재료로 불리는 복합재료(composite materials)의 적용이 활발히 이루어지고 있다. 복합재료는 철도차량에 적용되기 시작한 초기에는 내장재, 전두부 등과 같이 2차 부재에 제

* 책임저자 : 국립 한밭대학교 기계설계공학과 교수, 정회원

** 국립 한밭대학교 기계설계공학과 교수, 정회원

*** 국립 한밭대학교 기계설계공학과

**** (주)한국화이바 철도차량사업부

한적으로 사용되어 왔으나, 현재에는 루프 구조물(roof structure), 사이드 구조물(side structure) 및 차체 외각(carbody shell)과 같이 하중을 직접 지탱하는 1차 부재로 사용이 확대되고 있다. 특히 루프 구조물(roof structure)에의 복합재료 적용은 철도차량에서 대형 구조물에 대한 경량화 및 비용 감소의 해결방안으로 사용되고 있으며 추가적으로 차량의 비틀림 강성(torsion stiffness)을 증가시켜 구조 안전성을 향상시키는 것으로 알려져 있다[2]. 루프 구조물에의 신소재 복합재료를 적용하여 경량화를 이룬 예는 영국의 Turbostar, 독일의 Puma 고속전철 그리고 스위스의 RARe-520 열차 등의 많은 사례가 있다. 본 연구에서는 국내에서 개발하고 있는 샌드위치 복합재 루프 구조물에 대한 설계 검증을 통해 구조안전성을 평가한 후 시제품을 제작하므로써 향후 양산에 대비한 독자 기술을 확보하고자 한다.

2. 경량 복합재 루프 구조물의 설계

2.1 구조 형상

설계 완료된 경량 복합재 철도차량 루프 구조물의 3차원 형상은 그림 1과 같다. 형상의 치수는 차량마다 다르게 적용되겠지만, 본 연구에서는 경량 전철에 적용하기 위해 길이는 11.45m, 폭은 1.76m로 설계하였다. 주 구조(main structure)는 알루미늄 스킨(skin)과 알루미늄 하니컴 코어(aluminum honeycomb core)으로 구성된 샌드위치 복합재(sandwich composite)로 구성되어 있으며, 샌드위치 구조 내부에 삽입된 보강재(inner stiffener)는 샌드위치 루프 구조물의 횡방향과 종방향 굽힘강성을 보강시키기 위해서이고, 엣지 보강재(edge stiffener)는 샌드위치 구조의 비틀림 강성을 향상시키기 위해서이다. 샌드위치 복합재 루프 구조물의 단면은 그림 2와 같이 구성하였다. 냉방장치는 루프 구조물 상부에 취부되고 루프 구조의 양쪽 끝단에는 증공 알루미늄 압출재 프레임이 사이드 구조와 체결되는 구조를 갖는다.

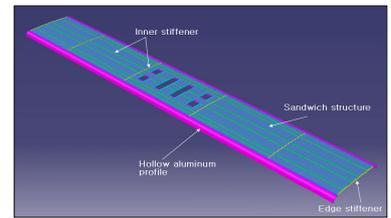


그림 1. 복합재 루프 구조물의 3차원 모델

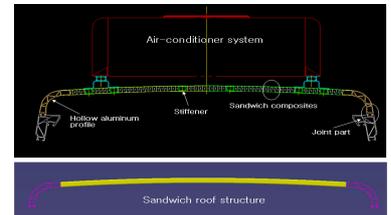


그림 2. 샌드위치 루프 구조물의 단면 형상

2.2 구성 재료들

샌드위치 루프 구조물은 앞에서 언급하였듯이 알루미늄 스킨과 알루미늄 하니컴 코어로 구성된다. 알루미늄 스킨의 사용은 차체의 재질과 동일한 재료를 사용함으로써 접합부에서 발생하는 이종 재료간의 응력 변화를 최소화하고 카본-에폭시 적층 복합재 스킨을 사용할 경우에 발생하는 알루미늄 하니컴 코어와의 전기적 부식(galvanic corrosion)을 방지하기 위함이다. 샌드위치 루프 구조물의 구성재료에 대한 구성 및 기계적 물성 값은 표1과 같다.

샌드위치 구조물의 강성을 증가시키기 위해 삽입된 금속 보강재는 그림 3과 같은 동일한

표 1. 샌드위치 복합재의 구성 및 물성

Type	Materials	Dimension	Properties
Skin	Al. 5052	t=1.2mm	E=69GPa ν=0.33 ρ=2700(kg/m ³)
Core	Aluminum honeycomb core	Cell size = 3/8 inch Cell wall thickness=70μm Cell depth = 32mm	E ₁₁ =8.27MPa E ₂₂ =1.31MPa E ₃₃ =1276MPa G ₁₂ =0.0001GPa G ₂₃ =117GPa G ₁₃ =296GPa ν ₁₂ =0.75 ν ₂₃ =0.0001 ν ₁₃ =0.0001 ρ=100(kg/m ³)
Adhesive film	Bondex 606	t=0.2mm	-

주) E : 탄성계수, G : 전단탄성계수, ν : 포아송 비, t : 두께, ρ : 비중

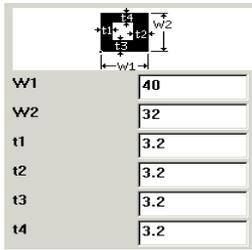


그림 3 삽입된 보강재의 단면

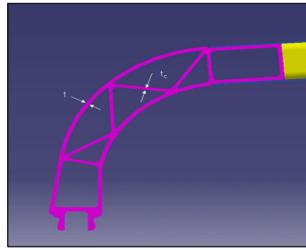


그림 4 중공 알루미늄 압출재 단면

형상을 가지고 있으며, 재질은 알루미늄 또는 강재로 제작할 예정인 데 재질의 선정은 무게 및 구조안전성을 검토한 후 결정할 것이다. 샌드위치 루프 구조물과 차체의 사이드 구조와 연결되는 중공 알루미늄 압출재 프레임의 단면은 그림 4와 같다. 심재의 두께(t_c)는 2.5mm, 상하판재의 두께(t)는 3.0mm이다.

3. 경량 복합재 루프 구조물의 구조안전성 평가

3.1 샌드위치 복합재 구조물의 모델링 기법

본 논문에서 샌드위치 복합재 루프 구조물의 구조안전성 검증은 ANSYS V80을 사용하여 수행하였다. ANSYS에서 샌드위치 복합재 구조물의 해석은 8-노드 샌드위치 셸 요소(Sandwich shell element)를 사용하는 것을 기본으로 하고 있다. 샌드위치 복합재 루프 구조물의 거동만을 평가하고자 한다면 샌드위치 셸 요소와 금속 보강재를 모사하기 위한 빔 요소만을 가지고 해석을 수행할 수 있으나, 본 연구의 샌드위치 복합재 루프 구조물의 경우 양쪽 끝단에 접합된 중공 알루미늄 압출재 프레임의 거동 또한 중요하므로 이를 모두 고려하기 위해서는 3차원 모델링을 수행해야 한다. 따라서, 본 절에서는 샌드위치 셸 요소를 대신할 수 있는 3차원 모델링 기법에 대한 타당성을

표 2. 3차원 샌드위치 모델링 선정을 위한 비교 검증 요소들

경우	사용요소
1	Sandwich shell 91(8-node)+sandwich option (Reference)
2	Layered solid 46 (8-node)
3	Layered solid 191 (20-node)
4	Shell 63(skin)/Solid 45(core)
5	Shell 93(skin)/Solid 186(core)

표 3. 선정 요소들에 대한 고유진동수 비교 결과 (Hz)

Mode	경우1 (Ref.)	경우2	경우3	경우4	경우5
1	1.87(B)	1.64(B)	1.25(B)	1.86(B)	1.86(B)
2	5.16(B)	2.22(T)	3.45(B)	5.12(B)	5.12(B)
3	8.65(T)	3.22(B)	5.68(T)	8.46(T)	8.44(T)
4	10.14(T)	4.52(T)	6.78(B)	10.05(B)	10.04(B)
5	16.8(B)	5.33(B)	11.25(B)	16.62(B)	16.60(B)
6	17.48(T)	6.98(T)	11.51(T)	17.10(T)	17.06(T)
7	25.13(B)	7.96(B)	16.87(B)	24.82(B)	24.77(B)
8	26.68(T)	9.64(T)	17.61(T)	26.11(T)	26.05(T)
9	35.14(B)	11.13(B)	23.64(B)	34.61(B)	34.5(B)
10	36.42(T)	12.58(T)	24.11(T)	35.66(T)	35.0(T)

B = Bending mode, T = Twisting mode

샌드위치 복합재가 갖는 굽힘과 전단에 대한 특성을 잘 모사하지 못해 적합하지 않음을 보이고 있다. 본 연구에서는 경우 5에 비해 계산시간이 적은 경우 4를 선정하여 모델링을 수행하였다.

3.2 샌드위치 복합재 루프 구조물의 모델링 및 해석 조건

샌드위치 복합재 루프 구조물에 대한 구조안전성은 표4와 같이 고유진동수 해석 및 구조해석을

를 검증하였다. 비교 검증을 위한 대상은 길이 11,445mm, 폭 1,435mm를 갖는 샌드위치 구조물이며, 단면의 치수와 재료 물성은 표1을 기준으로 하였다. 모델링 기법의 타당성을 검증하고자 사용된 요소는 표2와 같이 5가지의 경우를 고려하였으며, 질량과 강성을 모두 검증할 수 있는 고유진동수 해석을 통해 검증하였다. 고유진동수 해석은 Block Lanczos 방법을 사용하였으며, 10개의 고유진동수를 추출하여 비교 검토하였다. 해석결과는 표 3과 같다. 표 3의 결과에서 보듯이 샌드위치 복합재 구조물은 2차원 셸 요소에 의한 모델링이 가능하면, 샌드위치 셸 요소를 사용하고 3차원 모델링을 해야 할 경우, 스킨은 셸 요소, 코어는 솔리드 요소로 모델링(경우4 또는 5)하여야 한다. 경우 2와 3의 3차원 적층요소(layered solid element)는

표 4. 샌드위치 복합재 루프의 해석 검증 경우들

	경우	사용요소	압출재와의 접합조건	보강재 재료
고유진동수 해석	1-1	Shell63 /Solid45	Bonded contact	Aluminum
	1-2			Steel
	1-3		Coupled set	Aluminum
	1-4			Steel
구조해석	2-1	Shell63 /Solid45	Bonded contact	Aluminum
	2-2			Steel
	2-3		Coupled set	Aluminum
	2-4			Steel

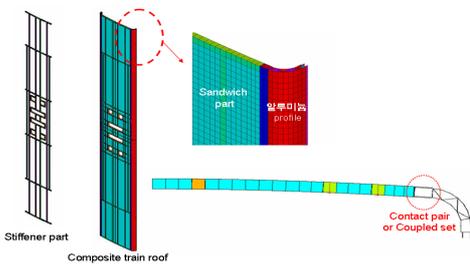


그림 5. 루프 구조물의 유한요소모델

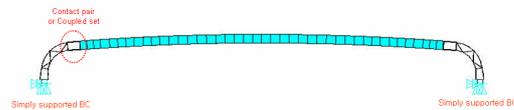


그림 6. 단순지지 경계조건

표 5. 단순지지 경계조건의 경우 고유진동수 해석 결과

Mode (Hz)	경우1-1	경우1-2	경우1-3	경우1-4
1	64.76	50.62	64.33	50.24
2	65.46	51.71	65.07	51.38
3	66.64	52.70	66.25	52.38
4	69.52	55.25	69.12	54.93
5	74.15	59.36	73.76	59.04
6	79.30	63.95	78.93	63.65
7	87.66	71.88	87.29	71.56
8	95.90	79.81	95.55	79.52
9	106.19	89.59	105.85	89.30
10	117.67	101.41	117.34	101.13
무게(kg)	393.58	596.26	393.58	596.26

전성을 검토하였다. 해석은 표4에 나타냈듯이 4가지 경우를 고려하였다.

3.4.1 접촉조건(경우 2-1 & 2-2)

복합재 루프 구조물과 중공 알루미늄 압출재 프레임간의 체결 부위를 접촉 요소(contact element)를 사용하였으며, 보강재의 재질은 알루미늄과 강재를 고려하였다. 유한요소 모델에서는

수행하여 평가하였다. 샌드위치 복합재 루프 구조물에 삽입된 보강재들은 재질에 따른 특성을 검토하고자 알루미늄과 강재를 고려하였으며, 샌드위치 복합재 루프와 중공 알루미늄 압출재 프레임과의 체결은 접촉요소(contact element)를 사용한 비선형 해석과 자유도(degree of freedom)를 공유하는 커플 구속조건(coupled set)을 사용한 선형해석을 수행하여 비교 검토하였다. 그림 5는 샌드위치 복합재 루프 구조물에 대한 유한요소 모델을 나타내고 있다. 보강재와 중공 알루미늄 압출재 프레임은 쉘 요소를 사용하여 모델링하였고, 샌드위치 복합재는 쉘 요소(스킨)와 솔리드 요소(코어)를 사용하여 모델링하였다.

3.3 샌드위치 복합재 루프 구조물의 고유진동수 해석

샌드위치 복합재 루프 구조물의 고유진동수 해석은 표 4와 같이 4가지 경우 대해 수행하였고, 경계조건은 그림 6과 같이 중공 알루미늄 압출재 프레임 끝단을 단순지지로 설정하였다. 고유진동수 해석결과는 표5와 같다. 결과에서 보듯이 10개의 고유진동수를 추출한 결과 모두 굽힘모드가 발생함을 알 수 있다. 단순지지된 루프구조물의 고유진동수는 보강재의 재질에 따라 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이런 보강재의 재질에 따른 굽힘 고유진동수의 변화는 차체 구조물 전체에 대해서도 영향을 줄 수 있다. 즉, 차체 구조물 전체에 대한 고유진동수가 설계 요구조건에 맞지 않을 경우 보강재 재질 변경 등으로 조절 가능할 수 있음을 말해준다.

3.4 샌드위치 복합재 루프 구조물의 고유진동수 해석

본 절에서는 설계가 완료된 샌드위치 복합재 루프 구조물에 대한 구조해석을 수행하여 에어컨 시스템의 무게를 고려한 처짐과 응력 해석을 도출하여 구조 안

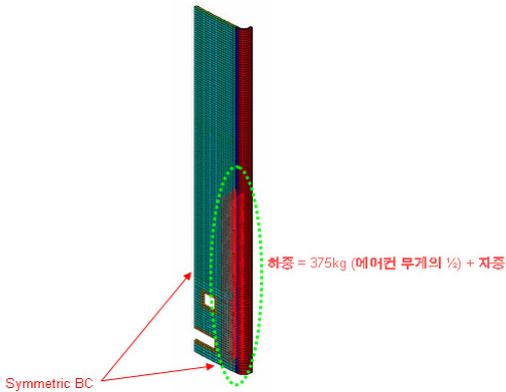


그림 8. 접촉조건인 경우 하중조건

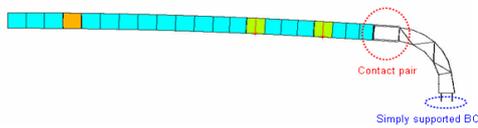


그림 7. 접촉조건인 경우 경계조건

서로 비슷한 결과를 보이고 있다. 무게 측면에서는 알루미늄 보강재를 사용한 경우가 34% 정도의 무게 절감 효과가 있음을 알 수 있다. 처짐과 응력 측면에서도 알루미늄 보강재를 사용한 경우와 강재 보강재를 사용한 경우의 결과 차이가 비교적 적어 무게 절감 효과를 고려한다면 알루미늄 보강재의 사용이 유리하다. 구조 안전성 측면에서는 두 재질에 대한 해석 결과 강성과 강고 측면에서 둘 다 안전한 것으로 확인되었다.

3.4.2 커플조건(경우 2-3 & 2-4)

표 7. 접촉조건을 사용한 경우의 구조해석 결과 비교

	경우 2-1 (Coupled set/ Aluminum stiffener)	경우 2-2 (Coupled set/ Steel stiffener)
최대 처짐(mm)	0.73	0.67
Max. principal stress(MPa)	15.89	15.83
전체 무게(kg)	393.58	596.26

로 알루미늄 보강재를 사용한 경우와 강재 보강재를 사용한 경우 각각의 처짐과 응력 결과는 비슷한 경향을 보이고 있다. 접촉 조건을 사용한 경우에 비해 처짐과 응력의 값은 비교적 높게 나타나는 데, 이는 커플 조건의 경우 선형해석인 관계에 기인한 것으로 판단된다. 그러나, 접촉조건과 마찬가지로 처짐과 응력 측면에서도 알루미늄 보강재를 사용한 경우와 강재 보강재를 사용한 경우의 결과 차이가 적어 무게 절감 효과를 중요시 한다면 역시 알루미늄 보강재의 사용이 추천된다.

표 6. 접촉조건을 사용한 경우의 구조해석 결과 비교

	경우 2-1 (Bonded contact/ Aluminum stiffener)	경우 2-2 (Bonded contact/ Steel stiffener)
최대 처짐(mm)	0.42	0.39
Max. principal stress(MPa)	8.69	8.93
전체 무게(kg)	393.58	596.26

대칭조건이므로 1/4만 고려하였다. 그림 7은 해석에 사용된 유한요소 모델에 대한 경계조건을 나타내고 그림 8은 접촉조건 및 커플조건의 경우 하중에 대한 조건을 나타낸다. 접촉조건을 사용한 루프 구조물의 구조해석 결과는 표6과 같다. 결과에서 보듯이 알루미늄 보강재를 사용한 경우와 강재 보강재를 사용한 경우의 처짐과 응력은 비슷한 결과치를 보여주고 있다.

알루미늄 보강재를 사용한 경우는 강재 보강재를 사용한 경우에 비해 굽힘 강성은 낮지만, 중량이 상대적으로 가벼워 강재와 알루미늄 보강재를 사용한 경우가

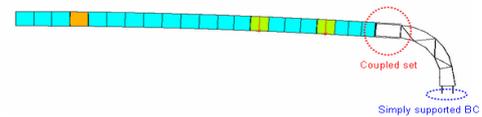
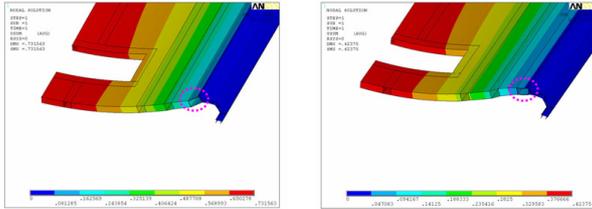


그림 9. 커플조건인 경우 경계조건

커플 조건을 고려한 경우 유한요소 모델은 그림 9와 같이 커플조건의 경우 경계조건이고 그림 8와 같이 접촉조건의 경우와 커플조건의 경우 하중조건을 서로 같다. 커플 조건을 사용한 루프 구조물의 구조 해석 결과는 표7과 같다. 결과에서 보듯이 접촉조건을 사용한 경우와 마찬가지로

3.4.3 접촉조건과 커플조건에 대한 해석결과 비교

접촉 조건을 사용한 비선형 해석 결과에서의 처짐과 응력 값은 커플 조건을 사용한 경우에 비해 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이는 그림 10에서 보듯이 각각의 경계조건에 따라 체결부에서 변위에 대한 기울기가 다른 경향을 보이기 때문이다. 접촉조건을 사용한 경우에는 체결부에서 완전 접합이라는 경계조건이 부가되므로



(a) 커플 조건 (b) 접촉조건
그림 10. 접촉조건과 커플조건간의 체결부 변형 비교

상대적으로 발생하는 기울기 값이 작고, 커플 조건을 사용한 경우에는 체결부에서 자유도 (degree of freedom)만을 공유하기 때문에 발생하는 기울기 값이 크게 나타남을 알 수 있다. 이런 기울기의 차이는 루프 구조물에 발생하는 처짐과 응력 값에 영향을 주므로 커플 조건을 사용한 경우가 큰 결과치를 상대적으로 보이는 것이다.

4. 결론

(1)알루미늄 샌드위치 복합재 루프 구조물은 강성과 강도 측면에서 구조 안전성을 충분히 확보한 것으로 판단된다. (2)복합재 루프 구조물의 고유진동수 해석 결과 보강재의 재질에 따라 공진에 대한 설계 변수로 활용할 수 있음을 해석적으로 관찰하였다. 또한, 보강재 재질은 비틀림 모드보다는 굽힘 모드에 영향을 주는 것을 확인하였으며, 알루미늄 보강재를 사용한 경우의 굽힘 고유진동수가 강재 보강재를 사용한 경우의 굽힘 고유진동수에 비해 큰 경향을 보였다. (3)복합재 루프 구조물의 구조해석 결과 보강재 재질에 따라 처짐과 응력 값의 차이는 크지 않았다. 이는 알루미늄 보강재를 사용한 경우의 무게 절감 효과와 강재 보강재를 사용한 경우의 굽힘 강성 증가 효과가 구조 거동에 비슷한 영향을 주기 때문이라 사료된다. 따라서, 무게 절감 효과를 설계 우선 순위 선정할 경우 알루미늄 보강재의 사용이 추천된다. (4)체결부위에 대한 조건을 접촉과 커플 조건으로 나누어 해석한 결과, 고유진동수 해석에서는 큰 차이를 보이지 않았지만, 구조 해석에서는 차이를 보였다. 이는 고유진동수 해석에서는 접촉조건을 선형으로 가정하기 때문에 커플 조건과 큰 차이를 보이지 않은 것이다. 반면, 구조해석에서는 접촉 조건은 비선형 해석, 커플 조건은 선형 해석이므로 처짐과 응력 결과치가 차이를 보이고 있다. 실제 체결부위는 접합체결이므로 상세 구조해석을 위해서는 접촉조건에 의한 해석이 추천된다.

참고문헌

1. 신광복, 구동희, 한성호, 박기진 (2004) "설계요구조건 검증을 통한 한국형 고속틸팅열차 (TTX)의 차체 재료 선정에 관한 연구". 한국철도학회 논문집, 제7권 2호, pp.77-84
2. Cantrill, J. and Mableson.R(2003), "Development and prototyping of a lightweight composite train roof", 14th COMPOSIT Workshop.