

샌드위치 복합재 철도차량 루프구조물의 구조 안전성 평가 및 제작기술 연구

A Study on Manufacturing Technology and Evaluation of the Structural Integrity of a Sandwich Composite Train Roof Structure

신광복[†] · 류봉조^{*} · 이재열^{*} · 이상진^{**}

Kwang-Bok Shin · Bong-Jo Ryu · Jae-Youl Lee · Sang-Jin Lee

Abstract

We have evaluated the structural integrity of a sandwich composite train roof structure that can be a lightweight, cost saving solution to large structural components for rail vehicles in design stages. The sandwich composite train roof structure was 11.45 meters long and 1.76 meters wide. 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-conditioned system. The 3D sandwich finite element model was introduced to examine the structural behavior of the hollow aluminum extrusion frames joined to both sides of the sandwich composite train roof. The results shown that the structural performance of the sandwich composite train roof under loading conditions specified is satisfaction and the use of aluminum reinforced frame and aluminum honeycomb core is beneficial with regard to weight saving and structural performance in comparison with steel reinforced frame and polyurethane foam core. Also, we have manufactured prototype of sandwich composite train roof structure on the basis of analysis results.

Keywords : Autoclave(오토클레이브), Sandwich composite train roof(샌드위치 복합재 루프 구조물)

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 방법에 의해 달성 가능하다. 최적설계는 철도차량뿐만 아니라 자동차, 항공기, 선박 그리고 일반적인 기계구조물에서도 설계 및 해석 기술의 발전으로 의해 적용되고 있는 기술이다. 모듈화 설계는 철도차량에서 많은 적용이 되고 있지 않지만, 제작공정의 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 도입

되었으며, 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.

복합재료가 철도차량에 적용되기 시작한 초기에는 내장재, 전두부 등과 같이 2차 부재에 제한적으로 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 구조물에서의 복합재료 적용은 철도차량에서 대형 구조물에 대한 경량화 및 비용 감소의 해결방안으로 사용되고 있으며 추가적으로 차량의 비틀림 강성(torsional stiffness)을 증가시켜 구조 안전성을 향상시키는 것으로 알려져 있다 [2]. 루프 구조물에서의 신소재 복합재료를 적용하여 경량화를 이룬 사례는 영국의 터보스타(Turbostar), 독일의 퓨마

[†] 책임저자 : 회원, 한밭대학교, 기계설계공학과
E-mail : shin955@hanbat.ac.kr
TEL : (042)821-1156 FAX : (042)821-1587
^{*} 한밭대학교, 기계설계공학과
^{**} (주)한국화이버, 철도차량사업부

(Puma) 고속전철 그리고 스위스의 RARe-520 열차 등이 있다.

본 연구는 철도차량의 경량화를 위해 국내에서 개발되는 샌드위치 복합재 루프 구조물에 대한 최적의 구성 재료를 선정하기 위함이다. 설계단계에서 고려된 재료들은 구조 및 고유진동수 해석을 통해 비교 검토하여 시제품을 제작하는 것을 목적으로 하고 있다. 또한, 3차원 샌드위치 복합재 루프 구조물의 유한요소 해석 모델을 제시함으로써 상세 구조 해석과정을 정립하였다.

2. 샌드위치 복합재 루프 구조물의 형상

철도차량 차체 구조물의 경량화 및 모듈화를 위해 설계 완료된 샌드위치 복합재 루프 구조물의 3차원 형상은 그림 1과 같다.

루프 구조물의 치수는 적용되는 차량마다 다르게 적용되었지만, 본 연구에서는 경량 전철에 적용하기 위해 길이는 11.45m, 폭은 1.76m로 설계하였다. 주 구조물(main structure)은 샌드위치 복합재로 구성되어 있으며, 샌드위치 구조물 내부에 삽입된 보강재(inner stiffener)는 샌드위치 구조물의 횡방향과 종방향 굽힘강성을 보강시키는 역할을 하고, 엣지 보강재(edge stiffener)는 샌드위치 구조물의 비틀림 강성을 증가시키는 역할을 하게 된다. 샌드위치 복합재 루프 구조물의 단면은 그림 2와 같이 구성된다.

냉방장치는 루프 구조물 상부에 취부되고 루프 구조의 양쪽 끝단에는 중공 알루미늄 압출재 프레임이 차체의 사이드 구조와 체결되는 구조를 갖는다. 향후 중공 알루미늄 압출재 프레임은 알루미늄 차체와 용접에 의해 체결되어진다.

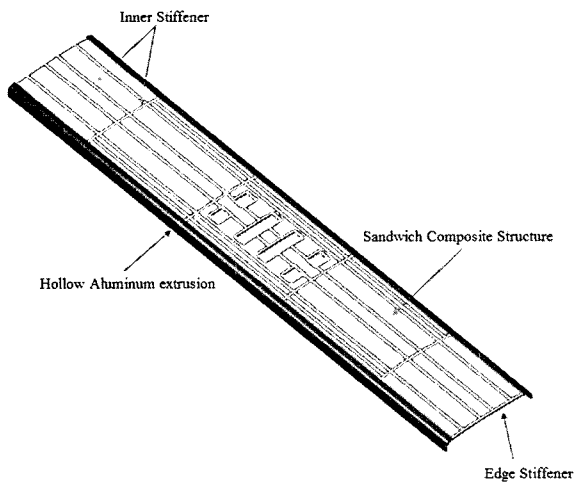


Fig. 1. 3-D CAD model of sandwich train roof.

3. 샌드위치 구조물의 재료선정

3.1 샌드위치 구조물의 재료 선정

루프 구조물은 스킨(skin)과 코어(core)로 이루어진 샌드위치 복합재와 그의 내부에 삽입되는 금속 보강재로 구성된다. 스킨의 재질은 알루미늄을 사용하게 되는 데 이유는 알루미늄 압출재 프레임과 차체의 재질과 동일한 재료를 사용함으로써 접합부에서 발생하는 이종 재료간의 응력 변화를 최소화하고 카본-에폭시 적층 복합재 스킨을 사용할 경우에 발생하는 알루미늄과의 전기적 부식(galvanic corrosion)을 방지하기 위함이다. 코어는 알루미늄 하니컴 코어와 우레탄 폼 코어(polyurethane foam core)를 선정하여 구조해석에 의한 평가를 통해 최적의 재료를 선택하게 된다.

샌드위치 구조물의 굽힘과 비틀림 강성을 증가시키기 위해 삽입된 금속 보강재는 그림 3과 같은 형상을 가지고 있으며, 재질은 알루미늄 또는 강재로 제작할 예정인 데 재질의 선정은 무게 및 구조안전성을 검토한 후 결정할 것이다. 샌드위치 복합재 루프 구조물과 차체의 사이드 구조와 연결되는 중공 알루미늄 압출재 프레임의 단면은 그림 4와 같다. 심재의 두께(tc)는 2.5mm, 상하판재의 두께(t)는 3.0mm이다.

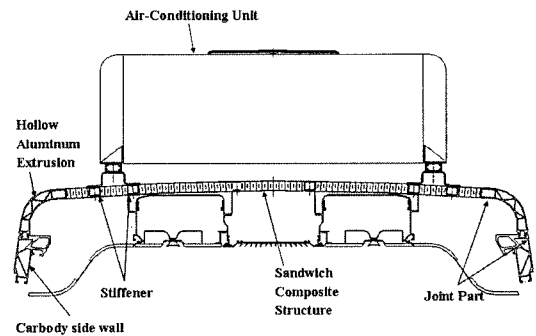


Fig. 2. The drawing of frame section of train roof.

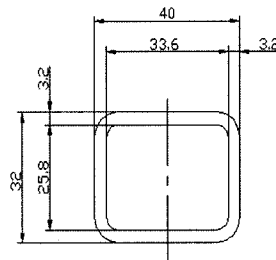


Fig. 3. The dimensions of inner stiffener

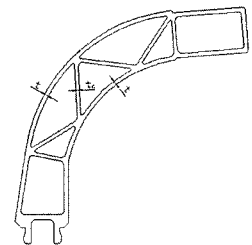


Fig. 4. The section of hollow aluminum extrusion frame

Table 1. The material system of sandwich train roof considered in design stages.

	Skin	Core	Stiffener
Case 1	Aluminum 5052	Aluminum	Aluminum 6005A-T6
Case 2		Honeycomb	Steel
Case 3		Polyurethane Form	Aluminum 6005A-T6
Case 4			Steel

표 1은 샌드위치 복합재 루프 구조물의 재료로 고려되고 있는 구성 재료들을 나타낸다.

3.2 샌드위치 루프 구조물의 모델링

본 논문에서 샌드위치 복합재 루프 구조물의 구조안전성 검증은 ANSYS V9.0을 사용하여 수행하였다. ANSYS에서 샌드위치 복합재 구조물의 해석은 8-노드 샌드위치 셸 요소를 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 영향을 고려하기 위해서는 3차원 모델링을 수행해야 한다. 따라서, 샌드위치 셸 요소를 대신할 수 있는 3차원 모델링 기법을 도입하여 수행하였다. 표 2는 샌드위치 복합재 구조물에 대한 구성재료들의 기계적 물성값을 나타낸다.

3차원 모델링 도입에 대한 비교 검증을 위한 대상은 길이 11,445mm, 폭 1,435mm의 알루미늄 스킨과 알루미늄 하나 겹 코어로 구성된 샌드위치 구조물이며, 단면의 치수와 재료 물성은 표 2를 기준으로 하였다.

모델링에 대한 타당성을 검증하고자 사용된 요소는 표 3과 같이 5가지의 경우를 고려하였으며, 질량과 강성을 모두 검증할 수 있는 고유진동수 해석을 통해 검증하였다. 고유진동수 해석은 자유경계조건에서 Block Lanczos 방법을 사용하였으며, 10개의 고유진동수를 추출하여 비교 검토하였다.

해석결과는 표 4와 같다. 표 4의 결과에서 보듯이 샌드위치 복합재 구조물은 2차원 셸 요소에 의한 모델링이 불가능할 경우 3차원 모델링에서 스킨은 셸 요소, 코어는 솔리드 요소로 모델링(경우 4 또는 경우 5)하여야 한다. 경우 2와 경우 3의 3차원 적층요소(layered solid element)는 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.

Table 2. The mechanical properties of materials used in the structural analysis.

Type	Materials	Dimension	Properties
Skin	Aluminum 5052	t=1.2mm	E=69GPa ν=0.33 ρ=2700(kg/m ³)
			Core
	Polyurethane foam core	t=32mm	
Stiffener	Aluminum 6005A-T6	Fig. 3	E=69GPa ν=0.33 ρ=2700(kg/m ³)
	Steel	Fig. 3	E=210GPa ν=0.30 ρ=7800(kg/m ³)

E : Young's modulus, G : Shear modulus, ν : Poisson's ratio
t : Thickness, ρ : Density

Table 3. The selected elements to verify the 3D sandwich FE model.

Type	Elements
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)

Table 4. The results of natural frequencies for the selected elements at Table 3.

Mode	Type 1 (Ref.)	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
1	2.03(B)	1.87(B)	1.37(B)	2.02(B)	2.02(B)
2	5.59(B)	2.22(T)	3.77(B)	5.57(B)	5.57(B)
3	9.45(T)	3.66(B)	6.10(T)	9.38(T)	9.36(T)
4	10.98(B)	4.55(T)	7.42(B)	10.96(B)	10.93(B)
5	18.19(B)	6.05(B)	12.31(B)	18.10(B)	18.08(B)
6	19.11(T)	7.06(T)	12.35(T)	18.97(T)	18.92(T)
7	27.21(B)	9.05(B)	18.45(B)	27.07(B)	27.02(B)
8	29.17(T)	9.83(T)	18.92(T)	28.96(T)	28.89(T)
9	38.03(B)	12.64(B)	25.85(B)	37.81(B)	37.71(B)
10	39.81(T)	12.95(T)	25.93(T)	39.53(T)	39.44(T)

B = Bending mode, T = Twisting mode

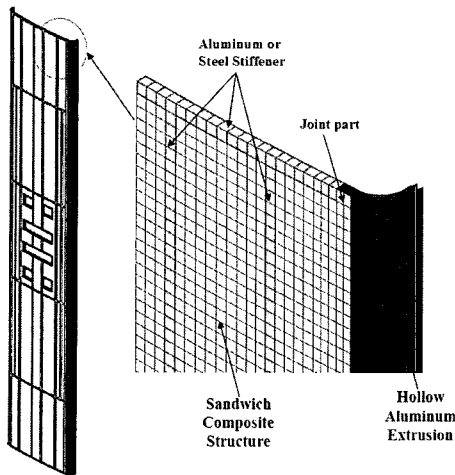


Fig. 5. Finite element models for sandwich train roof.

그림 5는 샌드위치 복합재 루프 구조물의 3차원 모델링을 나타내고 있다.

보강재와 중공 알루미늄 압출재 프레임은 쉘 요소를 사용하여 모델링하였고, 샌드위치 복합재는 쉘 요소(스킨)와 솔리드 요소(코어)를 사용하여 모델링하였다. 샌드위치 복합재 루프 끝단과 중공 알루미늄 압출재 프레임과의 체결은 접촉요소(contact element)를 사용하여 완전 접합 조건을 모사하였다.

4. 선정 재료에 따른 구조거동 평가

4.1 샌드위치 복합재 루프 구조물의 고유진동수 해석

샌드위치 복합재 루프 구조물의 구성 재료들에 따른 고유진동수 해석에서 경계조건은 그림 6과 같이 중공 알루미늄 압출재 프레임 끝단이 차체의 사이드 구조(side structure)와의 체결조건을 모사하기 위해 단순지지로 설정하였다. 고유진동수 해석결과는 표 5와 같다. 결과에서 보듯이 10개의 고유진동수를 추출한 결과 모두 굽힘모드가 발생하였다.

단순지지원 루프구조물의 고유진동수는 코어 및 보강재의 재질에 따라 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 고유진동수 값은 경우 1(알루미늄 스킨/알루미늄 하니컴 코어 및 알루미늄

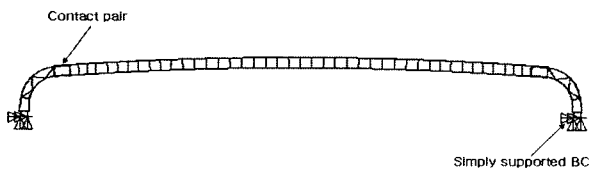


Fig. 6. The boundary conditions for modal analysis.

Table 5. The results of natural frequencies(Hz) for sandwich train roof.

Mode	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1	67.4	51.6	47.7	37.3
2	68.4	52.9	47.9	38.6
3	69.4	53.9	50.2	39.6
4	72.6	56.5	51.5	41.9
5	77.4	60.7	54.4	43.0
6	82.7	65.4	67.1	54.5
7	91.6	73.6	73.2	61.1
8	100.4	81.8	79.6	66.1
9	111.1	91.9	85.5	67.0
10	123.5	104.1	86.0	67.3
Weight(kg)	373.5	576.2	369.1	571.7

늄 보강재)이 가장 큰 경향을 보였고 경우 4(알루미늄 스킨/우레탄 폼 코어 및 강재 보강재)가 가장 작은 경향을 보였다. 샌드위치 루프 구조물의 코어 및 보강재 재질에 따른 고유진동수 값은 설계 검증에는 사용되지 않지만 철도차량의 경우 차체의 굽힘 고유진동수가 일반적으로 10Hz 이상이어야 하는 제약조건이 있으므로, 차체 구조물 전체에 대한 고유진동수가 설계 요구조건에 맞지 않을 경우 코어 및 보강재 재질 변경 등으로 조절 가능할 수 있음을 결과에서 보여주고 있다. 또한, 차체의 고유진동수가 10Hz이상이기 위해서는 비교적 굽힘 고유진동수 값이 높은 경우 1이 유리할 것으로 사료된다.

4.2 샌드위치 복합재 루프 구조물의 구조안전성 평가

본 절에서는 샌드위치 복합재 루프 구조물에 대한 구조해석을 수행하여 에어컨 시스템의 무게와 자중을 고려한 처짐과 응력 해석을 도출하여 구조 안전성을 평가하였다. 유한요소 모델에서는 대칭이므로 1/4만 고려하였다. 그림 7은 해석에 사용된 유한요소 모델에 대한 하중 조건 및 경계조건을 나타내고 있다.

경계조건은 고유진동수 해석과 마찬가지로 중공 알루미늄 압출재 프레임 끝단에 단순지지 조건을 부가하였다. 샌드위치 구조물과 압출재 알루미늄 프레임과의 접합부위는 접촉요소를 사용하여 완전 접합 조건을 부가하였다. 샌드위치 복합재 루프 구조물의 구성재료에 따른 구조 해석 결과를 표 6에 나타낸다.

결과에서 보듯이 알루미늄 하니컴 코어를 사용한 경우 1과 경우 2의 결과는 무게를 제외하고 비슷한 결과를 나타낼 수 있다. 이는 알루미늄 보강재를 사용한 경우 1은 강재 보강재를 사용한 경우 2에 비해 굽힘 강성은 상대적으로

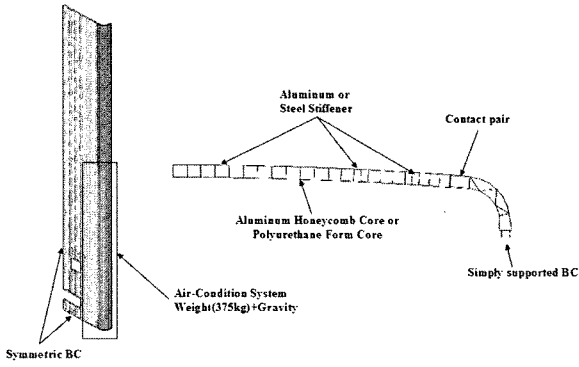


Fig. 7. The loading and boundary conditions for structural analysis.

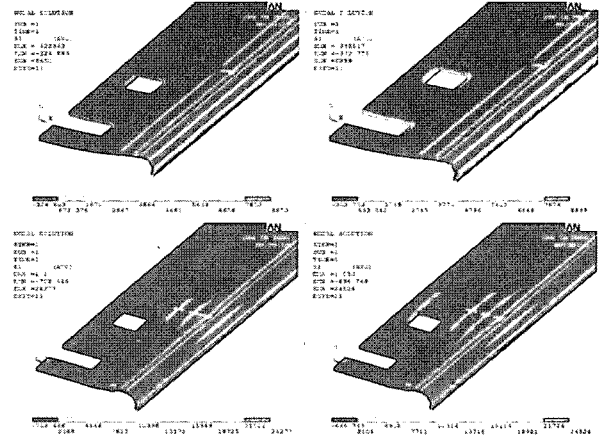


Fig. 8. The contours of the maximum principal stress of sandwich train roof.

Table 6. Analysis results for sandwich train roof.

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Maximum deflection(mm)		0.43	0.39	1.10	1.05
Maximum principal stress(MPa)	Skin	4.7	4.97	24.28	24.53
	Core	0.04	0.04	0.03	0.03
	Hollow aluminum extrusion	8.65	8.89	14.55	15.55
Total weight(kg)		373.5	576.2	369.1	571.7

낮지만, 무게가 가벼워 강재와 알루미늄 보강재를 사용한 경우가 서로 비슷한 결과를 보이는 것을 사료된다. 우레탄 폼 코어를 사용한 경우 3과 경우 4도 마찬가지로 무게를 제외하고 비슷한 결과를 나타내고 있다. 그림 8은 각각의 경우에 대한 최대 주응력 분포를 비교한 것이다. 알루미늄 하니컴 코어(경우 1 & 2)와 우레탄 폼 코어(경우 3 & 4)를 사용한 경우에는 응력과 처짐 측면에서 뚜렷한 결과 차이를 보이고 있다. 알루미늄 하니컴 코어를 사용한 경우가 구조 안전성 측면에서 우수한 것을 확인할 수 있다. 그림 9는 각각의 경우에 대한 처짐 결과를 나타낸 것이다.

결과에서 보듯이 우레탄 폼 코어를 사용한 경우 3과 경우 4의 처짐은 알루미늄 하니컴 코어를 사용한 경우에 비해 상대적으로 더 크게 발생하고 처짐 형상도 균일하지 않음을 알 수 있다. 즉, 우레탄 폼 코어의 기계적 물성이 보강재에 비해 월등히 떨어져 보강재 근처에서 처짐의 변화가 심하게 일어나는 것이다. 이는 그림 8에서 경우 3과 경우 4의 주응력 분포가 알루미늄 압출재 프레임과 접합되는 보강재 부근에서 집중되는 것으로도 확인할 수 있다.

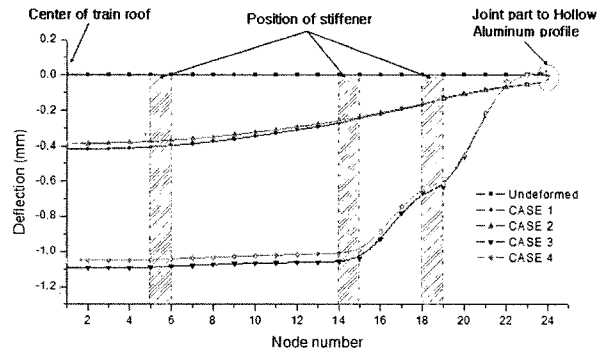


Fig. 9. Comparisons of deflections along the bottom surface of sandwich train roof.

4.3 구조안전성 평가 결과 요약

샌드위치 복합재 루프 구조물의 구성 재료에 따른 구조 안전성 평가 결과, 강도와 강성 측면에서 우레탄 폼 코어를 사용한 경우에 비해 알루미늄 하니컴 코어를 사용한 경우가 유리함을 알 수 있다. 또한, 알루미늄 하니컴 코어를 사용한 경우에는 무게 측면을 고려하면 알루미늄 보강재를 사용한 경우 1이 강재 보강재를 사용한 경우 2에 비해 35%의 무게 절감 효과를 얻을 수 있다.

따라서, 샌드위치 복합재 루프 구조물에 대한 최적의 구성 재료로는 알루미늄 스킨/알루미늄 하니컴 코어로 구성된 샌드위치 구조와 알루미늄 보강재가 추천된다. 또한, 제작성 측면에서도 우레탄 폼 코어를 사용하면, 알루미늄 스킨과의 접착성 측면에서 불리한 것으로 확인되었다.

5. 샌드위치 복합재 루프 구조물의 제작

샌드위치 복합재 루프 구조물에 대한 최적의 구성 재료를 선정하기 위해 구조안전성 평가를 수행하여 스킨은 알루미늄, 코어는 알루미늄 하나컴 코어 그리고 알루미늄 보강재가 선정되었다. 본 절에서는 구조안전성 검토를 통해 얻어진 결과를 이용하여 실제 샌드위치 복합재 루프 구조물을 제작하였다.

5.1 샌드위치 복합재 루프 구조물의 성형공법

샌드위치 복합재 루프 구조물에 대한 성형 공법은 다양하지만, 본 연구에서는 오토클레이브 성형 공법을 이용하여 제작하였다. 오토클레이브 성형공법은 고강성 및 고강도의 대형구조물을 일체형으로 제작할 수 있는 장점을 가지고 있는 우주항공용 복합재 구조물 제작에 많이 사용되는 공법이다. 장비 제작 비용과 유지보수비용이 다소 높은 단점이 있지만 국내에 대형 오토클레이브 장비를 이미 보유하고 있고 성형 공법이 안정화되어 샌드위치 복합재 루프 구조물 제작을 위한 최적의 성형 공법이다.

그림 10은 샌드위치 복합재 루프 구조물을 제작하기 위한 오토클레이브 장비를 보여주고 있다. 본 장비는 길이 30m, 직경 5m의 치수와 최대 설계압력 7bar, 최대운영온도 180°C의 성능을 가진다. 또한, 온도 및 압력은 자동 조절되는 최신의 시스템이다.

5.2 샌드위치 복합재 루프 구조물의 성형 공정

오토클레이브 성형 공법에 의한 샌드위치 복합재 루프 구조물 제작은 크게 5단계의 공정을 거쳐 완성되어 진다[3]. 그림 11은 샌드위치 복합재 루프 구조물을 제작하는 5단계의 공정을 보여주고 있다.

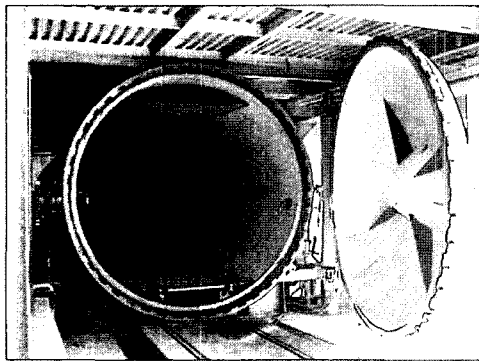


Fig. 10. Autoclave

단계 1은 샌드위치 복합재 루프 구조물을 성형하기 위한 몰드 제작 단계이며, 몰드는 샌드위치 구조를 적층하기 위한 고정 틀로 사용되어 진다. 몰드의 재질은 샌드위치 스킨과 동일한 재질을 사용하여 성형 중에 발생하는 열변형을 최소화해야 한다.

단계 2는 완성된 몰드 표면위에 샌드위치 구조물을 적층(lay-up)하는 단계이다. 적층은 외층 스킨을 몰드위에 놓은 후 외층 스킨과 코어를 접착하기 위해 두께 0.2mm의 본덱스 접합 필름(Bondex 606 adhesive film)을 스킨 위에 부착시킨 후 코어와 금속 보강재를 위치시키게 된다. 그 후 내층 스킨에 같은 본덱스 접합 필름을 부착시킨 후 코어에 위치하게 함으로 적층이 완료된다. 적층이 완료된 샌드위치 구조물은 외층 및 내층 스킨과 코어를 접합시키기 위해 진공백(vacuum bag)을 이용하여 적층된 샌드위치 구조물을 밀봉하고 압력을 가하게 된다. 이 때, 가해지는 압력을 1bar이다.

단계 3은 진공 백 작업이 완료된 샌드위치 구조물을 오토클레이브에서 성형하는 단계이다. 오토클레이브 성형 시 진공백의 압력은 스킨과 코어 층사이의 층간분리(delamination)를 방지하기 위해 성형이 완료될 때까지 1bar의 압력을 유지하고 오토클레이브 압력은 최대 2.5bar까지 유지시킨다. 온도는 성형 중에 발생할 수 있는 열변형을 최소화시키고 접착력을 향상시키기 위해 적절한 온도 사이클을 설정해야 한다. 본 연구에서는 총 16곳에서 온도를 측정하였으며, 온도가 60°C 까지 내려오면 오토클레이브를 열고 상온까지 자

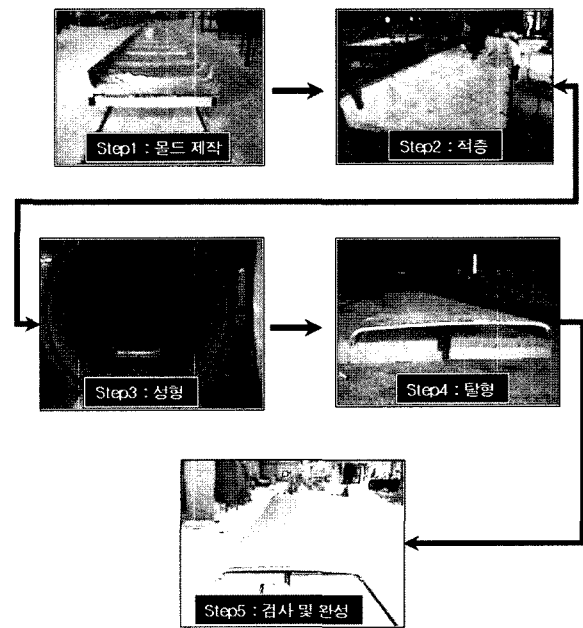


Fig. 11. The manufacturing processes of sandwich train roof.

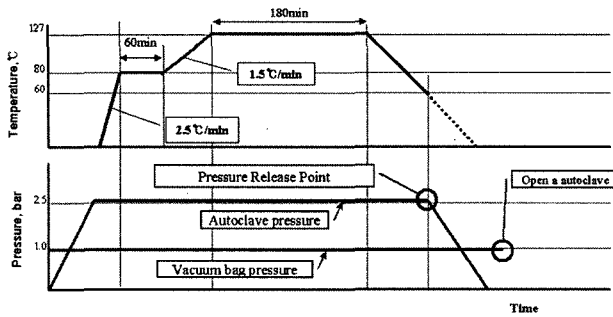


Fig. 12. The curing cycles using autoclave.

연냉각 시킨 후 샌드위치 구조물을 오토클레이브에서 꺼내었다. 그림 12는 샌드위치 루프 구조물 제작을 위한 오토클레이브 성형 사이클(curing cycle)을 나타내고 있다.

단계 4는 성형 완료된 샌드위치 루프 구조물과 몰드를 탈형시키는 단계이다. 탈형 시 표면에 손상이 가해지지 않도록 조심스럽게 작업을 해야 한다. 실제적으로 몰드 표면에는 성형 전에 이형처리 등을 하여 탈형 작업은 어렵지 않게 이루어졌다.

단계 5는 탈형이 완료된 샌드위치 루프 구조물에 대한 검사단계이다. 제작 완료된 샌드위치 루프 구조물은 정밀 치수 검사, 스킨과 코어 층 사이의 층간분리 유무 검사 등을 통해 결함을 확인한 후 이상이 없는 경우 제작 완료가 된다. 그림 11에서 제작 완료된 샌드위치 루프 구조물을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 국내에서 개발 중인 샌드위치 복합재 루프 구조물의 경량화 및 구조 안전성을 확보할 수 있는 최적의 재료를 선정하고자 샌드위치 구성재료에 따른 구조안전성을 평가하였으며, 결과를 바탕으로 실제 샌드위치 복합재 루프 구조물을 제작하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 샌드위치 복합재 루프 구조물의 구성재료들로 고려된 4가지의 경우에 대한 구조 및 고유진동수 평가 결과, 알루미늄 스킨/알루미늄 하니컴 코어로 이루어진 샌드위치 복합재와 알루미늄 보강재가 최적의 루프 구조물 재

료로 선정되었으며, 강제 보강재를 사용한 경우에 비해 구조 안전성 측면에서는 비슷한 반면 35%의 무게 절감 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

- (2) 우레탄 폼 코어를 사용한 경우 응력과 처짐이 보강재 근처에서 변화가 심하게 일어남을 확인하였으며, 제작성 측면에서도 알루미늄 스킨과의 접착성에 문제가 있는 것으로 확인하였다.
- (3) 구조안전성 평가로 선정된 샌드위치 복합재 루프 구조물을 오토클레이브 공법에 의해 제작하였으며, 정밀 치수 검사, 스킨과 코어와의 층간분리 유무 검사 등을 확인한 결과 결함을 발견하지 못하였다.
- (4) 철도차량 경량화를 위해 개발된 샌드위치 복합재 루프 구조물은 모듈화 공법에 의해 제작되는 철도차량에 적용할 수 있으며 대량 생산 측면과 유지보수 측면에서 매우 유리하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 2005년도 한밭대학교 교내학술 연구비의 지원을 받아 수행하였으며, 또한 공동연구로 참여해 주신 한국화이바(주) 철도차량사업부에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 신광복, 이상진 (2004). “복합재료를 이용한 철도차량 경량화 사례 및 기술”, 한국복합재료학회 논문집, 제 17권 4호, 한국복합재료학회, pp.82-86.
2. Cantril, J. and Mableson, R. (2003). “Development and prototyping of a lightweight composite train roof”, 14th COMPSIT Workshop.
3. K.B.Shin, K.Choe, S.Lee and S.Yoon(2005). “The manufacturing processes of hybrid railway carriage structures of Korean tilting train express with service speed of 180km/h”, 26th SAMPE Europe International Conference.
4. Hyoung-Gu Kim, Nak-Sam Choi (2004). “Prediction of mechanical properties of honeycomb core materials and analysis of interlaminar stress of honeycomb sandwich composite plate”, The Korean Society for Composite Materials, Vol.17, No.1, pp.29-37.