

3-D 복합재료 샌드위치 구조물의 2층 경전철 철도차량 구조체 적용성에 관한 연구

A Study on the Application of 3-D Sandwich Composite Structures to the Double-deck Light Train Carbody

이영신¹, 김재훈¹, 이호철², 길기남², 박병준³

Young-Shin Lee, Jae-Hun Kim, Ho-Chul Lee, Ki-Nam Kil, Byoung-Jun Park

Key Words : Composite(복합재료), Aluminum alloy(알루미늄 합금), Stitching Method(바느질 기술),
Glass Fiber Thread(유리섬유실), Stress concentration(응력집중)

Abstract

Composites are very useful material for light train carbody due to its high specific strength and lightweight characteristics. The composites, called 3-D board, are developed with a special stitching method. In this process, the glass fiber fabrics of skin material and foam core material are stitched together with glass fiber thread. The glass thread in Z-axis turns into FRP form. The conventional delamination problem can be solved with 3-D sandwich structure. In addition, with the lower density of foam, the weight of the panel and the operation expenses can be highly reduced. To evaluate the usefulness of the 3-D board, the double-deck light train carbody is studied. The stress analyses are carried out under various loads and boundary conditions with FEM Code, ANSYS. On comparing with the aluminum carbody, 3-D board carbody can be reduced by about 2 ton for the total weight of carbody.

1. 서론

현재 국내외로 철도차량 경량화를 위한 연구가 활발히 수행되어지고 있다. 경량화는 기술적 측면과 경제적 측면에서 많은 파급효과가 있다. 세계적인 차체 소재 발전추세는 다음과 같다. 1세대인 탄소강(mild steel) 또는 스테인레스강(stainless steel)에서 2세대 압출 알루미늄 합금으로 옮겨가고 있으며, 이는 다시 3세대 복합소재로 발전될 것이다

따라서, 복합소재 차체 적용기술에 대한 충분한 연구개발이 필요하다는 것은 당연한 사실이다. 철도차량에서 복합재료를 사용하는 이유는 낮은 비중으로 무게감량 효과가 크다는 점과 급속으로 성형이 어려운 객실 끝단(cab ends), 앞단부(nose section)와 같은 복잡한 모양을 용이하게 성형할 수 있으며, 내부식성 및 내충격성이 크다는 점이다. 그러나, 차량의 속도 향상 및 최적화를 위한 구조물의 경량화는 안전성과 운전부하의 요구사항, 쾌적성, 경제성을 동시에 만족할 충분한 강도를 가져야 하며, 승차감 향상을 위한 높은 굽힘 고유진동수 및 터널 주행 시, 교

*1 정회원, 충남대학교 교수

*2 학생회원, 충남대학교 대학원

*3 비회원, 충남대학교

행 시 등 외부압력변동의 영향이 최소화될 수 있도록 기밀구조에 합당해야 한다. 또한 저렴한 제조 및 유지보수비용 등 경제성을 고려하여 재료를 선정하여야 한다. 경제적, 산업적 측면에서의 경량 복합소재 차체의 개발은 고속전철뿐만 아니라 저속의 지하철 및 지상철 차체제작에 미치는 파급효과가 매우 크다. 그리고, 경량화는 최고 주행속도를 증가시킬 수 있어 운용비용을 절감할 수 있고, 궤도와 차량 각 부에 작용하는 부하를 감소시켜 유지보수 뿐만 아니라 주행에 필요한 에너지 효율을 증가시켜 비용의 절감과 각 부품의 내구수명 또한 연장시킬 수 있다.

국내외에서의 연구동향을 살펴보면, 일본의 경우 300계 신간선에 대해서 알루미늄 압출재, 듀랄루민, 알루미늄 허니콤 등의 경량 재료를 구조체에 적용하여 실험을 통해 무게 감량을 시도하고 있다. 프랑스는 제 3세대 TGV-2N(double-deck)의 구조체를 압출 알루미늄합금을 사용하고 2층바닥판을 알루미늄 허니콤 구조체를 사용하여 제작하고 있다. 국내의 한진, 대우등에서도 기존의 스테인레스강으로 된 구조체에서, 보다 가벼운 알루미늄을 이용한 구조체 개발에 총력을 기울이고 있다.

본 연구는 철도차량 구조체에 복합재료의 사용 가능성을 고찰하기 위하여 상용 유한요소 프로그램을 이용한 종합적인 해석을 통해 복합재료 구조체의 구조설계에 대한 기초자료로 삼기 위함이다. Fig. 1은 해석하고자 하는 2층 기차의 일반적인 형상이다. 여기서, 복합재료 적용 부위는 구조체의 지붕과 측면이고, 이용하는 복합재료는 3-D board이다. 그리고, 1층 바닥판과 2층 바닥판은 알루미늄 압출 패널을 이용하였다.

2. 본 문

2.1 3-D board 복합재료

철도차량에 적용되는 재료들은 일반적으로 강성은 높으면서, 가벼워야 한다. 그리고, 내구성도 뛰어나야 하며 유지보수가 쉬워야한다. 이러한 까다로운 조건을 모두 만족시킬 수 있는 재료로 현재 발표된 것이 전무한 실정이다. 그러나, 이러한 요구조건을 가장 근접하게 만족하는 재료로 상용화 단계에 있는 알루미늄합금과 항공기와 같은 경량구조물에 쓰이는 복합재료가 있다. 본 연구에서는 구조체 경량화를 위해, 현재 콘테이너에 적용하여 그 우수성이 인정된 3-D board를 구조체의 측면과 지붕에 적용하였다. Fig. 2는 구조체에 적용한 3-D board에 대한 설명을 그림으로 나타낸 것이다. (a)는 2층 기차의 구조체 전체에 3-D board를 적용한 경우를 나타낸 것이고, (b)는 측면과 지붕에 들어가는 3-D board의 입체도이다. 마지막으로 (c)는 3-D board의 내부 형상에 대한 상세도로써 적층재료와 보강재(reinforcement member)의 형상 및 위치 등을 나타내고 있다.

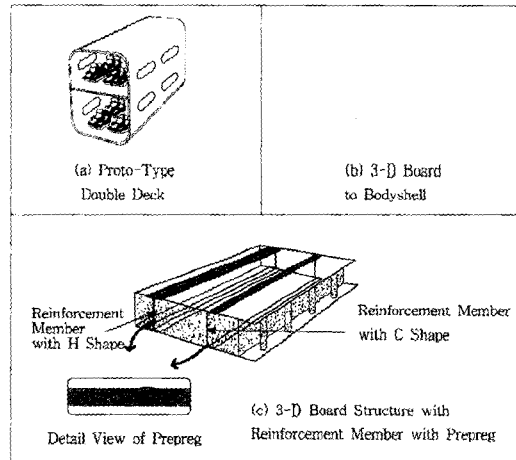


Fig. 2 Application concept of 3-D board to double-deck light train carbody

Fig. 1 Double-deck light train car-body (type : E455₁₀₀ - M1)

각 패널의 단면을 살펴보면, 외부표면은 면직 유리 섬유로 되어있으며, 내부의 코어재료는 폴리우레탄 폼으로 되어있다. 표면과 코어의 층간 분리 현상을 억제하기 위해 유리 섬유 실로 외부표면과 내부 코어를 연속으로 바느질을 하였다. 그리고, 외부 표면 층은 폴리에스테르나 에폭시 수지와 같은 열가소성 수지로 덮여있다.

경우에 따라서는 3-D board에 더 높은 강성을 갖게 하기 위해 외부 표면이나 폼사이에 금속재가 사용되는데, 만약 금속재를 사용하지 않고도 원하는 강성값을 갖는다면, 더 많은 무게를 줄일 수 있을 것이다. 또한 알루미늄 구조체와 비교할 때, 복합재료를 이용할 경우 약 2 톤정도의 중량을 줄일 수 있다.

Table 1은 Metal board와 3-D board의 물성치 및 기계적 성질을 비교한 것이다.

Table 1 Comparisons of mechanical properties for 3-D board composites and metal sandwich structures

Item	Metal(Al./SUS) Board	3-D Board
Density (kg/m ³)	SUS : 7,850	FRP : 2,200 Foam : 40
	Al : 2,700	
	Foam : 40	
Specific Strength	11.1	17.5
Tensile Strength	Al : 265 MPa SUS304 : 520 MPa	343 MPa
Corrosion Resistance	Good	Excellent
Durability	Good	Excellent
Thermal Conductivity	Good (100 kcal/hrm ² °C)	Excellent (150 kcal/hrm ² °C)
Repair	-	Good

외부 표면이 금속재로 되있는 샌드위치 재료와 여러 가지 성능면에서 비교했을 때 3-D board는 많은 장점을 가지고 있다. 특히, 무게, 비강도, 내부식성, 내구성, 내화성 등이 뛰어나며, 이것은 3-D board의 철도차량 구조체에의 적용 가능성을 충분히 보여주고 있다고 할 수 있다.

2.2 유한요소 해석

2.2.1 모델링

2층 기차 구조체의 응력해석을 위하여, 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS 5.5 코드를 이용하였다.

구조체에 대한 해석 결과로 수직하중과 차단 압축하중하에서의 최대 응력집중부위와 최대 처짐값, 그리고, 고유진동수를 구하였다.

Fig. 3(a)는 본 연구의 해석 대상인 2층 기차 구조체의 유한요소 모델이다. 본 연구는 복합재료 사용에 대한 가능성을 판단하기 위한 초기 연구로써 가능한 한 구조체를 단순화시키기 위하여 노력하였다. 사용한 요소는 다음과 같다.

보강재를 모델링하기 위한 빔 요소(Beam 4)와 복합재료를 모델링하기 위한 최대 16적층까지 가능한 쉘 요소(Shell 91), 그리고, 복잡한 형상의 보강재를 단순화하여 모델링하기 위한 Shell 93 이 있다.

각각을 살펴보면, Fig. 3(b)에 나타나있는 빔 성분은 2절점 6자유도(UX, UY, UZ, RotX, RotY, RotZ)의 탄성 빔 요소(Beam 4)로 구조체의 단면적이 작은 보강재의 모델링에 이용되었다.

또 다른 보강재를 모델링하기 위한 요소는 8절점 6자유도의 쉘 요소(Shell 93)이다. 적용부위는 Fig. 3(b)의 쉘 요소들이며, 비교적 단면적이 커서 단순히 빔 요소로 보기 힘든 보강재(side bottom rail, side middle rail, roof rail)들이다.

그리고, 패널을 모델링하기 위한 요소는 8절점 6자유도의 비선형 적층 쉘 요소(Shell 91)로써 두꺼운 샌드위치 구조물의 모델에 이용된다. 적용부위는 Fig. 3(c)에 나타나 있다.

여기서, 1층 바닥과 2층 바닥은 알루미늄 압출재로 되어있으며, 측면과 지붕은 3-D Board로 되어있다. 사용한 절점수는 12,508개이고, 요소수는 4,768개이며 해석의 정확도를 기하기 위해 4 각형 요소를 사용하였다.

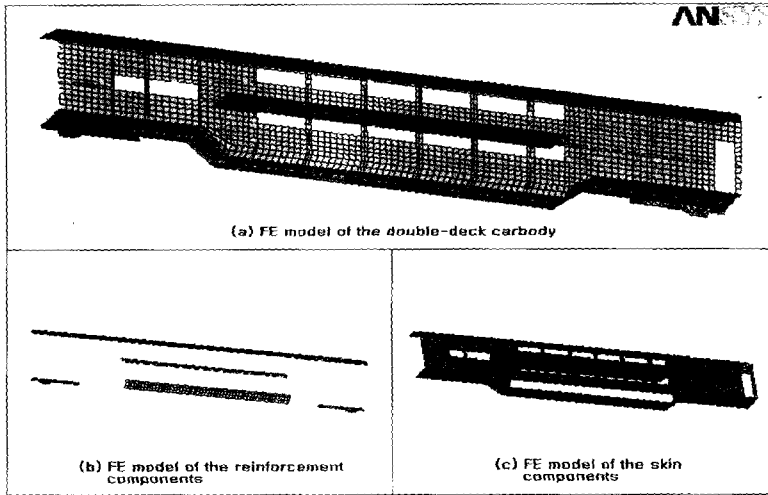


Fig. 3 Finite element models of the double-deck light train carbody

2.2.2 경계조건

본 연구에서 해석하고자하는 2층 구조체는 Fig. 4에서 제시한 구조체의 길이방향(x축)을 중심으로 양쪽의 형상이 같기 때문에 전체의 절반을 모델링한 뒤 대칭 경계조건을 적용하였다.

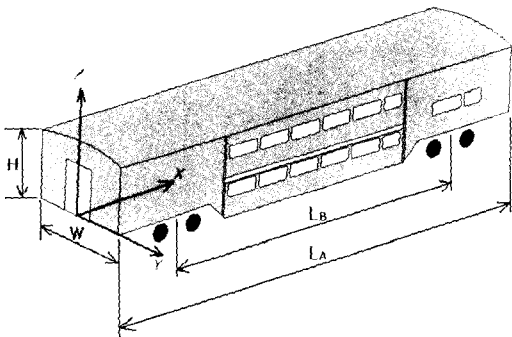


Fig. 4 Dimensions of the double-deck light train carbody

구속조건은 센터 실(center sill)과 교차하는 볼스터(bolster)에서 구조체의 높이 방향(z축)으로 변위가 0이라고 가정하였다. 적용되는 하중의 형태는 차단압축하중과 수직하중으로 나누어진다. 전자는 동하중계수를 고려하지 않은 대차하중을

제외한 공차하중이 균일 분포하중으로 1층 바닥 판 전체에 작용하며, 동시에, 구조체의 길이방향으로 양끝단에서 압축하중 120톤이 작용하는 것이고, 후자는 대차하중을 제외한 공차하중이 전차와 같이 작용하고 승객하중(정원 : 160명)이 1층과 2층의 승객탑승부에 균일하게 작용하는 것으로 동하중계수(1.2 g)를 고려하였다. 대칭경계조건이 적용된 구조체의 단면에서는 대칭경계조건에 맞게 각각 하중 크기의 절반이 작용하는 것으로 고려하였다. Table 2에 구조체의 제원과 하중의 크기에 대해 나타내었다.

Table 2 Dimensions of the double deck light train carbody

Item		Remark
Length of carbody(L _A)(mm)	24,000	-
Width of carbody(W)(mm)	2,960	-
Height of carbody(H)(mm)	4,260	-
Length between bogie center(L _B)(mm)	23,233	-
Carbody weight(kg)	39,000	-
Bogie weight(kg)	6,500	1 set(total 2 set)
Total weight of passengers(kg)	12,000	160×75 kg

2.3 결과 및 고찰

구조체의 강도 판단기준을 살펴보면 다음과 같다. 최대응력값은 항복강도 이하이어야 하고, 최대처짐값은 대차간 거리의 1/1000보다 작아야 한다. 그리고 굽힘 고유진동수는 10 Hz 이상이어야 한다. 이러한 요구조건에 부응하면서 차량을 경량화하기란 매우 힘든 작업이다. 따라서, 구조체의 경량화를 위해서는 항공기와 마찬가지로 철도차량에서도 복합재료가 사용되어야 한다.

2.3.1 차단 압축하중을 받는 경우

구조체가 차단압축하중을 받는 경우에, 하중조건은 Fig. 5와 같이 1층 바닥에 구조체 공차하중(dead weight)이 균일하게 작용하며 양쪽 센터실 끝단에서 압축하중이 작용한다.

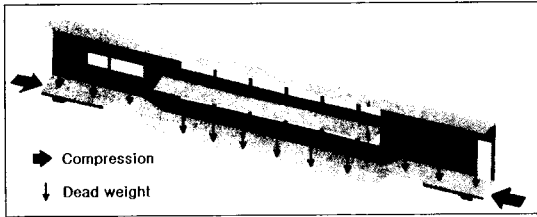


Fig. 5 Load conditions of the compressive load and dead weight

해석 결과, 최대 응력은 Fig. 6과 같이 1층 바닥과 측면의 서로 맞닿은 부분에서 발생하였다. 이때 최대 평균응력은 158 MPa이고, 이 값들은 알루미늄 압출재의 항복응력($\sigma_y = 480 \text{ MPa}$)과 비교할 때 충분히 안전하다고 판단된다. 최대 응력의 발생위치는 구조체가 압축하중(120 톤)을 받기 때문에 창문이나 출입문과 같은 개구부보다는 형상이 급격하게 변하는 부분에서 발생하여 응력이 집중되는 것으로 판단된다.

그림에서 보이는 것과 같이 전반적인 응력분포는 최대 응력 발생부위와 그 주위의 창문주위에 주로 분포 되어있다

Fig. 7은 차단압축하중을 받을 때 최대 처짐이 발생하는 1층 바닥과 2층 바닥의 길이방향(x축)에 따른 방향 처짐 곡선을 나타낸다. 1층 바닥의 경우 출입문쪽에서 최대 처짐이 발생하였으며, 구조체 높이방향(z축)으로의 최대 처짐값은 12.2 mm로 bogie간 거리의 1/1000인 23.23 mm의 절반 정도에 해당한다. 또한 구조체 중앙부에서의 최대 처짐값은 약 9 mm이다. 2층 바닥의 처짐은 압축력과 공차하중을 받는 1층 바닥의 변형에 의해 발생하며, 이때의 최대 처짐값은 2층 바닥의 양끝단으로, 그 값은 3.5 mm를 나타낸다.

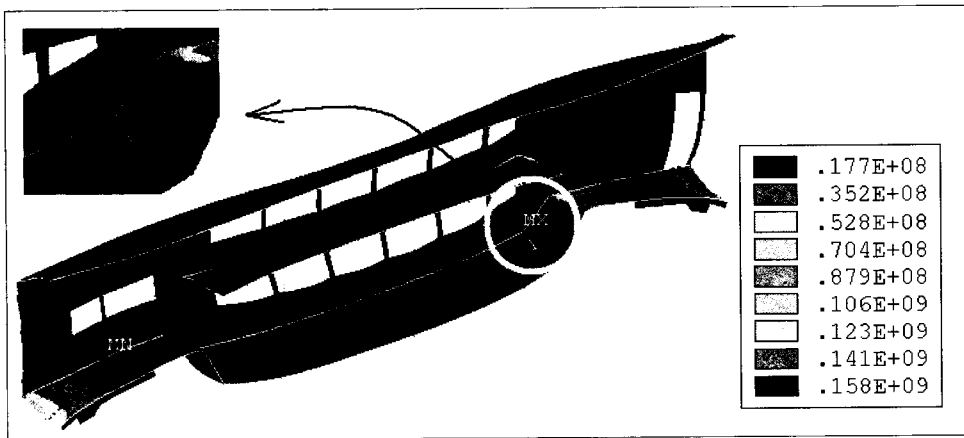


Fig. 6 Stress distribution under compressive load

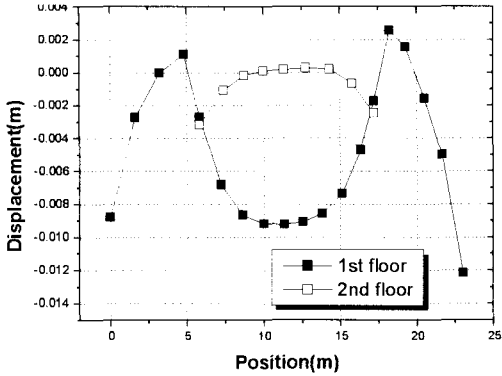


Fig. 7 Displacement of the center line of 1st and 2nd floor of double-deck light train carbody under compressive load

2.3.2 수직하중을 받는 경우

수직하중은 승객이 탑승하였을 때를 고려한 하중으로, Fig. 8과 같이 대차하중을 제외한 공차

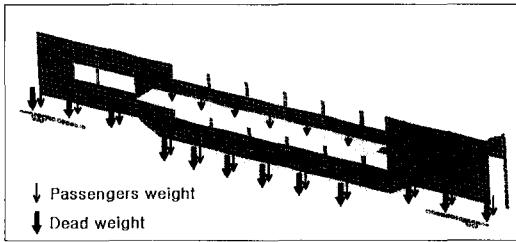


Fig. 8 Vertical load conditions of passengers weight and dead weight

하중이 1층 바닥 전체에 균일하게 분포되며, 승객하중(정원 160명)을 1층 및 2층에 균일하게 적용시켰다.

최대 응력발생부위는 Fig. 9와 같이 구조체의 끝단에 가장 인접한 창문 모서리에서 발생하였으며 이 때의 최대 응력은 31.1 MPa이다. 차단 압축하중이 작용할 때와는 달리 응력이 복합재 3-D board의 측면에 주로 분포되며, 이 때의 최대 응력은 3-D board의 항복응력의 10분의 1보다 작은 값이다. 각 층별 응력분포를 살펴보면, 3-D board의 외부표면에서의 응력분포는 평균응력의 크기와 크게 차이가 없으며, 측면에서의 응력분포에서 다소 차이를 보이나 그 경향은 대동소이하다. 이 때의 최대응력값과 발생위치는 모두 평균응력과 같다. 3-D board의 내부 폼의 응력분포는 응력의 변화가 거의 없이 매우 작은 값으로 균일하게 분포하였다. 그러나, 최대응력이 걸리는 2층 바닥과 측면이 만나는 점에서의 응력값은 해석에서 사용하였던 폼의 탄성계수값보다 큰 24.1 MPa를 갖는다. 따라서, 이 부분에 사용하는 3-D board는 내부에 보강재를 사용하거나 어떠한 다른 방안을 강구하여 응력이 집중되는 것을 막아야 한다. Fig. 10은 수직하중이 작용을 했을 때, 1층 및 2층 바닥의 길이방향에 따른 처짐값을 나타낸 그래프이다. 최대 처짐은 1층 바닥의 중앙에서 발생하였으며, 처짐량은 5.5 mm이다. 2층 바닥에서의 처짐량은 1층 바닥보다 작은 4.3 mm이다.

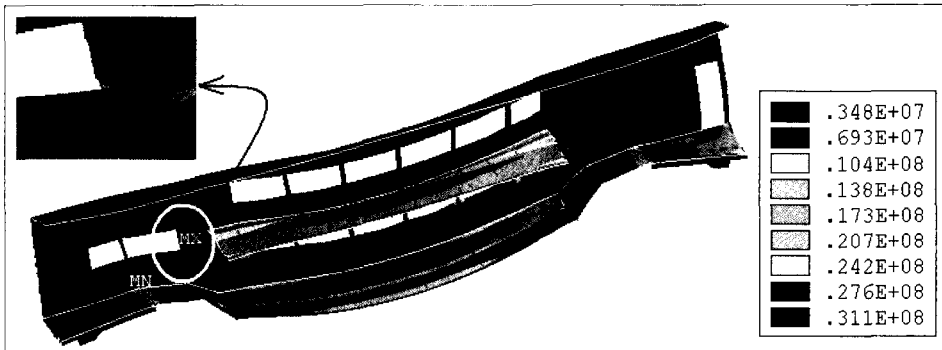


Fig. 9 Stress distribution under vertical loads

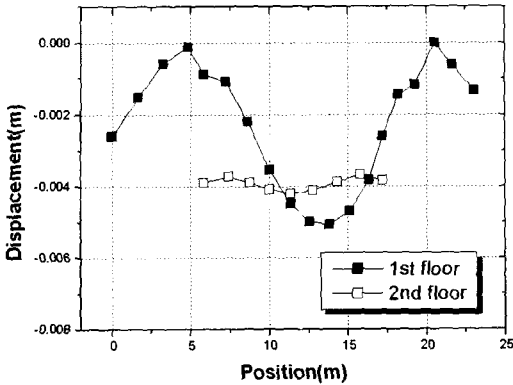
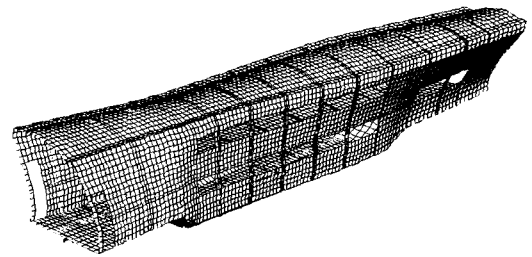


Fig. 10 Displacements of the center line of 1st and 2nd floor of double-deck light train carbody under vertical loads

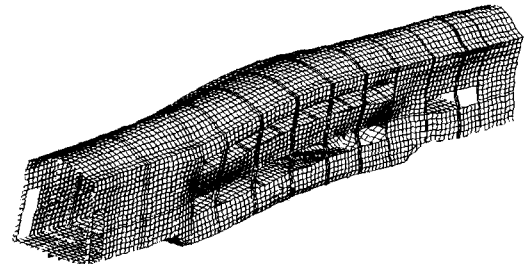
2.3.3 고유진동수

통상 속도 110 km/h 이하의 차량은 상하진동에 의한 승차감 때문에 굽힘고유진동수는 8 Hz 이상이 바람직하다. 따라서, 완성차량의 고유진동수가 8 Hz 이상이기 위해서는 구조체 자체에서 10 Hz 이상이 되어야 한다. 본 연구의 대상인 복합재료(3-D board)를 사용한 2층 기차의 구조체에 대한 동적 특성을 고찰하기 위하여 진동 해석을 수행하였다. 경계조건은 양쪽 볼스터(bolster) 위치에서 높이방향 변위를 구속하여 단순지지 조건을 적용하였다. 앞 절의 정적강도 해석에서와 달리 대칭 경계조건 없이 구조체 전체를 모델하여 해석을 수행하였다. 해석 결과 복합재료 고유의 높은 강성으로 인해 1차 굽힘모드가 19 Hz로써 최저 설계제한치보다 훨씬 높은 값으로 철도차량 구조체에 적용 가능함을 보였다.

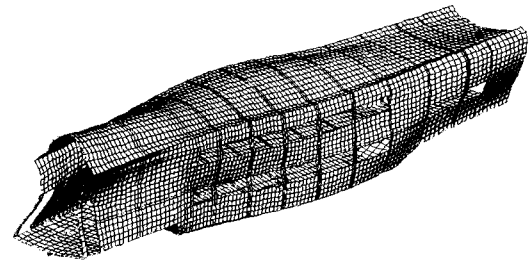
또한 1차 비틀림 모드 역시 10.4 Hz를 나타내어 동적응답에 안정적임을 알 수 있었다. Fig. 11에 굽힘, 비틀림의 1, 2차 모드 형상과 각 모드에 대한 고유진동수를 제시하였다. 그림에 보이는 바와 같이 2차의 비틀림 및 굽힘 고유진동수는 각각 23 Hz, 24 Hz이며, 셀모드를 동반하기 때문 매우 복잡한 모드형상을 나타내었다.



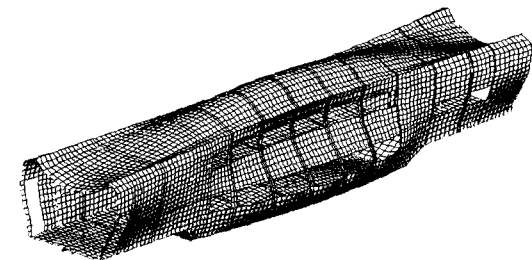
(a) 1st twisting mode shape (10.4 Hz)



(b) 1st bending mode shape (19 Hz)



(c) 2nd twisting mode shape (23 Hz)



(d) 2nd bending mode shape (24 Hz)

Fig. 11 Various eigen mode shapes of the double-deck composite light train carbody

2.3.4 고찰

Table 3에 본 연구를 통해 구한 압축하중과 수직하중하에서의 최대응력값과 참고문헌에서 제시하는 최대응력값들을 비교하였다. 본 연구에서의 구조체와는 형상과 크기가 서로 다르지만 두 가지 적용 하중 하에서의 응력집중 분포는 비슷한 경향을 가진다. 참고문헌 [4], [5]에서는 압축 및 수직하중하에서 구조체의 최대응력은 비슷한 값을 갖지만, 3-D board를 이용한 구조체는 압축하중과 수직하중하에서의 최대응력이 차이가 크다. 특히 복합재료(3-D board)를 적용한 구조체는 수직하중에서 최대응력이 31 MPa 수준으로 그 성능이 매우 뛰어나다. 최대응력의 발생위치가 모두 복합재료라는 점을 감안하면, 철도차량에 복합재료를 사용하는 것에 대한 긍정적인 결론을 얻을 수 있다. 굽힘 고유진동수 역시 최저 설계제한치 10 Hz를 만족하고 있다.

Table 3 Comparisons with the maximum stress of references under various load conditions

Load condition \ Stress	Maximum stress		
	Present	Ref.[5]	Ref.[6]
Compressive load	158 MPa	-	189 MPa
Vertical load	31 MPa	190.7 MPa	180 MPa

3. 결론

철도차량 경량화를 위한 방안으로서, 복합재료(3-D board)의 사용 가능성을 판단하기 위해 2층 기차를 대상으로 유한요소해석을 수행하였다.

해석결과는 다음과 같다

- (1) 차단 압축하중과 수직하중이 작용했을 때, 각각에 대해서 복합재료(3-D board) 2층 기차는 각 재료의 항복응력을 넘지 않는다.
- (2) 차단 압축하중과 수직하중이 작용했을 때, 최대처짐량은 제한값을 넘지 않는다.

- (3) 복합재료 2층기차 구조체는 최저 굽힘 고유진동수가 19 Hz이다.

따라서, 복합재료가 기존의 스테인레스 강이나 알루미늄 패널에 뒤지는 않는 강도 및 강성을 지니고 있어 철도차량에 적용 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 철도차량 구조체에 복합재료의 활용 가능성에 대한 긍정적인 결론을 얻었다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 과학기술 기초중점연구 기계공학연구(1998-018-E-0009)로 재정적 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. IMechE., "Vehicle Structures," Proceedings on the International conference on Vehicle Structures, IMechE., Conference Publications, 1984
2. 한국기계연구원, "차세대 궤도차량의 요소기술 개발", 연구보고서, UCN030-422.M, 1996
3. 백남욱, 조동규, "철도차량과 설계기술", 기계연구사, 1996
4. 전형용, 성낙원, "전동차 차체 구조물에 대한 구조 해석 및 실험에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 15권 12호, pp. 28-35, 1998
5. 김진혁, 박근수, 박상규, "경전철 차량 개발을 위한 차체 강도 평가", 1998년도 춘계학술대회논문집, pp. 466-473, 1998
6. 서승일, 김진태, 박일철, 이동현, 신돈수, "알루미늄 철도차량 차체 설계 및 대형 알루미늄 압출재 생산 기술 개발", 한국철도학회지, 2권 1호, pp. 1-15, 1999
7. Swanson Analysis Systems Inc., "ANSYS User's Manual : Volume III Elements," Swanson Analysis Systems Inc., 1992