

복합재료 2층기차의 응력해석

A Stress Analysis of Double-deck Train with Composite Material

이영신* 김재훈* 박병준** 길기남** 주정수**
Lee, Young-Shin Kim, Jae-Hun Park, Byoung-Jun Kil, Ki-Nam Ju, Joung-Su

ABSTRACT

본 연구의 목적은 구체 경량화의 일환으로써, 복합재료(3-X Board, Al extrusion panel, etc) 사용에 대한 가능성을 판단하기 위한 기초자료를 구축하는데 있다. 해석 대상은 2층기차의 객차부분이고, 구체에 적용하는 복합재료는 3-X Board를 이용하였다. 구체의 구조 건전성을 평가하기 위해 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 다양한 하중하에서의 응력해석을 수행하였다. 구체에 사용되는 복합재료(3-X board)의 응력발생 경향을 파악하는 것이 목적이므로, 상세한 모델보다는 단순화된 모델을 이용하였다. 응력집중은 센터실(center sill), 1층 바닥과 측면과의 연결부, 그리고, 구체의 앞부분 창문 모서리에서 발생하였다. 압축 및 수직하중하에서의 응력값들은 재료의 항복강도내에 존재하였으나, 고유진동수는 제한값보다 낮은 값을 갖았다. 현재 상세모델에 대한 해석을 수행중에 있다. 본 연구는 복합재료(3-X board)가 적용된 구체에 대한 초기 연구로서 만족할 만한 결과를 제시한다.

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.

기술적인 측면을 살펴보면, 철도차량에서 복합재료를 사용하는 이유는 복합재료 자체의 낮은 비중에 따른 무게감량의 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 대비한 충분한 강도를 가져야 하며, 승차감 향상을 위한 높은 고강도 및 터널 주행시, 교행시 등 외부 압력변동의 영향이 최소화할 수 있도록 기밀구조에 합당해야 한다. 저렴한 낮은 제조비용과 유지보수의 용이성, 작업의 편리성 등 경제성을 고려하여 재료를 선정하여야 한다.

경제적, 산업적 측면에서의 경량 복합소재 차체의 개발은 고속전철뿐만 아니라 저속의 지하철 및 지상철 자체제작에 미치는 파급효과가 매우 크다. 그리고, 경량화는 최고 주행속도를 증가시킬

* 충남대학교 교수, 정회원

** 충남대학교 대학원, 학생회원

수 있어 운용비용을 절감할 수 있고, 궤도와 차량 각 부에 작용하는 힘을 감소시켜 유지보수 뿐만 아니라 주행에 필요한 에너지 효율을 증가시켜 비용의 절감과 각 부품의 내구수명또한 연장시킬 수 있다.

국내에서의 연구동향을 살펴보면, 일본의 경우 최고속도 300km/h의 300계 신간선(Nozomi)은 동력차 및 객차의 차체, 바닥판, 천장판 등을 대형 AI 압출재를 연속용접하여 제작한 차체, 비행기와 유사한 구조의 듀랄루민 판을 리벳한 차체, 대형 AI 압출재를 스팟용접하여 제작한 차체, 70mm 두께의 알루미늄 허니컴 패널을 연속 용접한 4종류의 차체를 제작하여 95년부터 실험을 통해 무게 감량에 대한 기술을 발전시키기 위한 시도를 하고 있다. 프랑스는 제 3세대 TGV 2N(double deck)의 구체를 압출 알루미늄 6005, 6061, 6085 합금을 사용하고 2층바닥판을 허니컴 알루미늄 구체를 사용하여 제작하고 있다. 국내에서는 한진, 대우등에서는 기존의 스테인레스강으로 된 구체에서 보다 가벼운 알루미늄을 이용한 구체 개발에 총력을 기울이고 있다. 현대정공(주)의 경우 마닐라 경전철을 제작 및 납품하고 있으며, 대우중공업(주)은 알루미늄 구체에 대한 연구를 거의 완료한 상태이다.

본 연구는 구체에 복합재료 사용의 가능여부를 판단하기 위하여 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 다양한 하중형태에 따른 응력집중 정도를 파악하고, 구체의 고유진동수를 해석하여, 종합적으로 복합재료를 이용한 철도차량 구조설계에 대한 기초자료로 삼기위함이다. Fig.1은 해석하고자 하는 2층기차의 일반적인 형상이다. 여기서, 복합재료 적용 부위는 구체의 지붕과 측면이고, 이용하는 복합재료는 3-X board이다. 그리고, 1층 바닥판과 2층 바닥판은 알루미늄 압출 패널을 이용하였다. 해석은 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS 코드를 이용하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과값들은 복합재료(3-X board)를 이용할 경우, 구체의 강도가 기존의 구체와 비교하여 강도면에서 결코 뒤지지 않는다는 것을 보여준다.

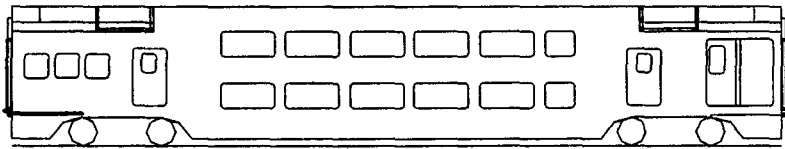


Fig. 1 Double deck train car-body (type : E455₁₀₀ - M1)

2. 본문

2.1 복합재료

철도차량에 적용되는 재료들은 일반적으로 강성은 높으면서, 가벼워야 한다. 그리고, 내구성도 뛰어나야하며 유지보수가 쉬워야한다. 이러한 까다로운 조건을 전부 만족시킬수 있는 재료로 현재 발표된 것이 전무한 실정이다. 그러나, 이러한 요구조건에 최대로 부합할 수 있는 재료로는 상용화 단계에 있는 알루미늄합금과 항공기와 같은 경량구조물에 쓰이는 복합재료가 있다. 본 연구에서는 구체 경량화를 위해, 현재 컨테이너에 적용하여 그 우수성이 인정된 3-X board를 구체의 측면과 지붕에 적용하였다. Fig. 2는 구체에 적용한 3-X board에 대한 설명을 그림으로 나타낸 것이다. (a)는 2층 기차의 구체 전체에 3-X board를 적용한 경우를 나타낸 것이고, (b)는 측면과 지붕에 들어가는 3-X board의 입체도이다. 마지막으로 (c)는 3-X board의 내부 형상에 대한 상세도로써 적층재료와 보강재(reinforcement member)의 형상과 위치등을 나타내고 있다. 각 패널의 단면을 살펴보면, 외부표면은 면직 유리 섬유로 되어있으며, 내부의 코어재료는 폴리우레탄 폼으로 되어있다. 보다 높은 강성을 주기위해 유리 섬유 실로 외부표면과 내부 코어를 연속으로 바느질을

하였다. 그리고, 외부 표면 층은 폴리 에스테르나 에폭시 수지와 같은 열가소성 수지로 덮여있다.

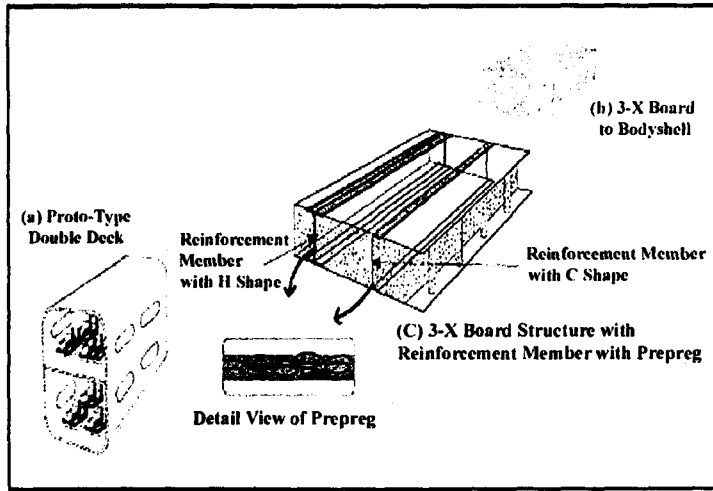


Fig. 2 Application of 3-X Board to Car Body Shell

경우에 따라서는 3-X board에 더 높은 강성을 갖게하기 위해 외부 표면이나 폼 사이에 금속재가 사용되는데, 만약 금속재를 사용하지 않고도 원하는 강성값을 갖는다면, 더 많은 무게를 줄일 수 있을 것이다. 알루미늄 구체와 비교할 때, 복합재료를 이용할 경우 약 2톤정도의 중량을 줄일 수 있다. Table 1은 세가지 다른 유형(3-X board, 알루미늄 그리고 SUS 표면 패널 그리고, 폼내에 보강재가 없는 3-X board)에 대해 각각의 물성과 성질을 비교한 것이다. 외부 표면이 금속재로 되있는 샌드위치 재료와 여러 가지 성능면에서 비교했을 때 3-X board는 많은 장점을 가지고 있다. 따라서, 3-X board는 철도차량에 적용가능하다고 판단되며, 이러한 3-X board가 가진 우수한 강성은 예상치 못한 하중 조건하에서 사용하는 동안 안전에 많은 이점을 줄거라 판단된다.

Table 1. Comparison of Composite & Metal Sandwich Structure

	Metal(Al/SUS) Board		3-X Board	
	Density	0.22g/cm ³	SUS : 7.9g/cm ³ Al : 2.7g/cm ³ Foam:0.04g/cm ³	0.16g/cm ³
Specific Strength		11.1		17.5
Tensile Strength		Al : 27kgf/mm ² SUS304:53kgf/mm ²		35kgf/mm ²
Corrosion Resistance		Good		Excellent
Durability		Good		Excellent
Processing Method		Foam Injection		Hot Press or Autoclave
Thermal Conductivity		Good(100)		Excellent(150)
Repair		-		Good

2.2 유한요소 해석

2.2.1 모델링

2층 기차 구체의 응력해석을 위해 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS5.5 코드를 이용하였다. 구체의 대한 해석 결과값으로서 수직하중과 차단압축하중하에서의 최대 응력집중부위와 최대 처짐값, 그리고, 고유진동수를 구하였다.

Fig. 3의 (a)는 본 연구의 해석 대상인 2층 기차 구체의 유한 요소 모델이다. 본 연구는 복합재료 사용에 대한 가능성을 판단하기 위한 초기 연구로써 가능한한 구체를 단순화 시키기위해 노력하였다. 사용한 요소를 살펴보면 다음과 같다. 보강재를 모델링하기위한 빔요소(Beam4)와 복합재료를 모델링하기 위한 최대 16적층까지 가능한 쉘요소(Shell91), 그리고, 복잡한 형상의 보강재를 단순화하여 모델링하기 위한 Shell93이 있다. 각각을 살펴보면, Fig. 3의 (b)에 나타나있는 빔성분은 2절점 6자유도(UX, UY, UZ, RotX, RotY, RotZ)의 탄성 빔요소(Beam4)로 구체의 단면적이 작은 보강재의 모델링에 이용되었다. 또 다른 보강재를 모델링하기 위한 요소는 8절점 6자유도의 쉘요소(Shell93)이다. 적용부위는 Fig. 3의 (b)의 면성분으로 비교적 단면적이 커서 단순히 빔요소로 보기 힘든 보강재(side bottom rail, side middle rail, roof rail)들이다. 그리고, 패널을 모델링하기 위한 요소는 8절점 6자유도의 비선형 적층 쉘요소(Shell91)로써 두꺼운 샌드위치 구조물의 모델에 이용된다. 적용부위는 Fig. 3의 (c)에 나타나 있다. 여기서, 1층 바닥과 2층 바닥은 알루미늄 압출재로 되어있으며, 측면과 지붕은 3-X Board로 되어있다. 사용한 절점수는 12508개이고, 요소수는 4768개다. 실제상으로 구체의 무게는 6.96톤이고, 해석모델은 대기경계조건을 고려했을때 7.288톤이다.

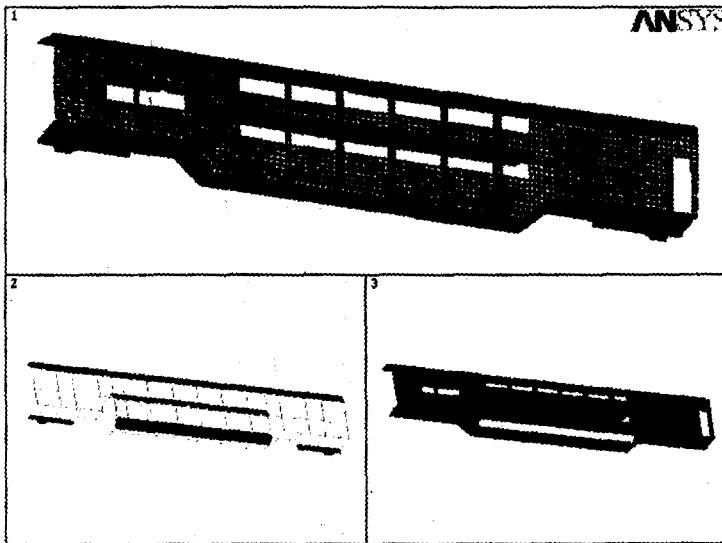


Fig. 3 Finite element model of the double deck car body

2.2.2 경계조건

본 연구에서 해석하고자하는 2층구체는 구체의 길이방향(UX)을 중심으로 양쪽의 형상이 같기 때문에 전체의 전반을 모델링한 뒤 대기경계조건을 적용하였다. 구속조건은 센터 실(center sill)과 교차하는 볼스터(bolster)에서 구체의 높이 방향(UZ)으로 변위가 0이라고 가정하였다. 적용되는 하중의 형태는 차단압축하중과 수직하중으로 나뉘어진다. 전자는 동하중계수를 고려하지 않은 대차하중을 제외한 공차하중이 균일 분포하중으로 1층 바닥판 전체에 작용하며, 동시에, 구체의 길이 방향으로 양끝단에서 압축하중 120톤이 작용하는 것이고, 후자는 대차하중을 제외한 공차하중이

전자와 같이 작용하고 승객하중(정원 : 160명)이 1층과 2층의 승객탄승부에 균일하게 작용하는 것으로 동하중계수 1.2g를 고려하여었다. 대칭경계조건이 적용된 구체의 단면에서는 대칭경계조건에 맞게 각각 하중 크기의 절반이 작용하는 것으로 고려하였다. Table 2에 구체의 제원과 하중의 크기에 대해 나타내었다.

Table 2 Dimension of the double deck train car-body

Item	Dimension(mm)	Remark
Length of car-body	24000	
Width of car-body	2960	
Height of car-body	4260	
Length between bogie center	23233	
Car body weight	39,000 kg	not considering 1.2g
Bogie weight	6,500 kg	1 set
Total weight of passengers	12,000	not considering 1.2g

2.3 결과 및 고찰

구체의 강도 판단기준을 살펴보면 다음과 같다. 최대 응력값은 항복강도 이하이어야하고, 최대 처짐값은 대차간 거리의 1/1000보다 작아야한다. 그리고 고유진동수는 10Hz이상이어야 한다. 이러한 요구 조건에 부응하면서 차량을 경량화하기란 매우 힘든 작업이다. 따라서, 구체의 경량화를 위해서는 항공기와 마찬가지로 철도차량에서도 복합재료가 사용되어야 한다.

2.3.1 차단압축하중을 받는 경우

첫 번째로 차단압축하중을 받는 구체의 응력분포를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 (a)~(d)는 각각 구체의 평균 응력분포와 알루미늄 압출재와 3-X board에서의 첫 번째, 두 번째, 세번째층에서의 응력분포를 나타낸다. 최대 응력 집중부위는 1층 바닥과 측면의 서로 맞닿은 부분의 양끝단에서 발생한다. 최대 평균응력은 161MPa이고, 알루미늄 압출재의 각 층에서 최대 응력값을 살펴보면, 첫 번째층은 158.9MPa, 두 번째층은 114MPa, 마지막으로 세 번째층은 119MPa이다. 엄밀하게 말하면 최대응력은 1층바닥의 1번째 층에서 발생한다. 이 값들은 알루미늄 압출재에서 표면 재료(7003)의 항복응력($\sigma_y = 480MPa$)과 비교할 때 충분히 안정하다고 판단된다. 최대 응력의 발생 위치는 구체가 압축하중(120톤)을 받기 때문에 창문이나 출입문과 같은 개구부보다는 형상이 급격하게 변하는 부분에서 응력이 집중되는 것으로 판단된다. 그림에서 보이는 것과 같이 전반적인 응력분포는 최대 응력 발생부위와 그 주위의 창문주위에 주로 분포되어있다.

Fig. 5는 차단압축하중을 받을 때 최대 처짐이 발생하는 1층 바닥과 2층 바닥의 대칭경계조건이 주어진 구체의 단면에서의 처짐 곡선을 나타낸 것이다. 1층 바닥의 경우 출입문쪽에서 최대 처짐이 발생하였으며, 구체 높이방향(Z)에서의 최대처짐값은 12.2mm로 보기(bogie)간 거리의 1/1000인 23.23mm의 역 절반정도에 해당하여, 참고로 구체 중앙부에서의 최대 처짐값은 약 9mm이다. 공차하중이 1층바닥에 균일하게 분포되는 것으로 가정을 하였기 때문에 2층바닥의 처짐은 압축력과 공차하중을 받는 1층바닥의 변형에 의해 발행하며, 이때의 최대 처짐값은 2층바닥의 양끝단에서 발생하여 그 값은 3.5mm이다.

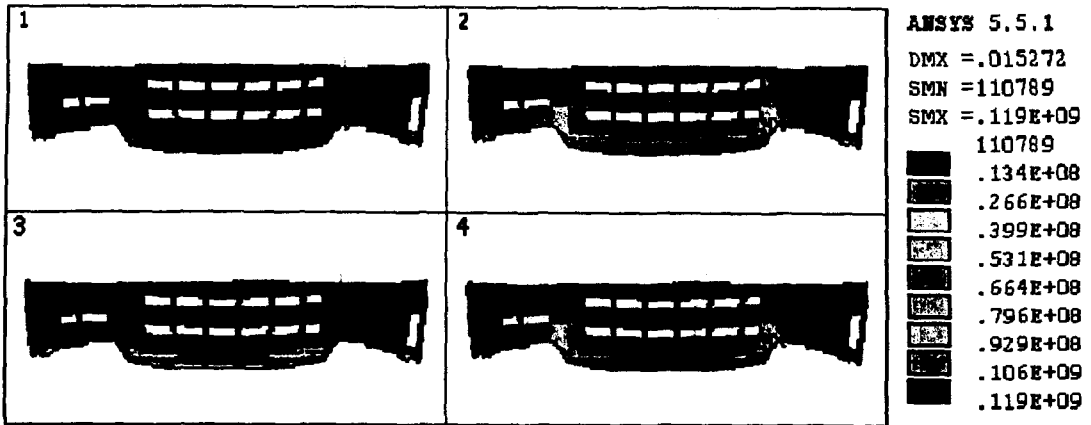


Fig. 4 Stress distribution under compression loads

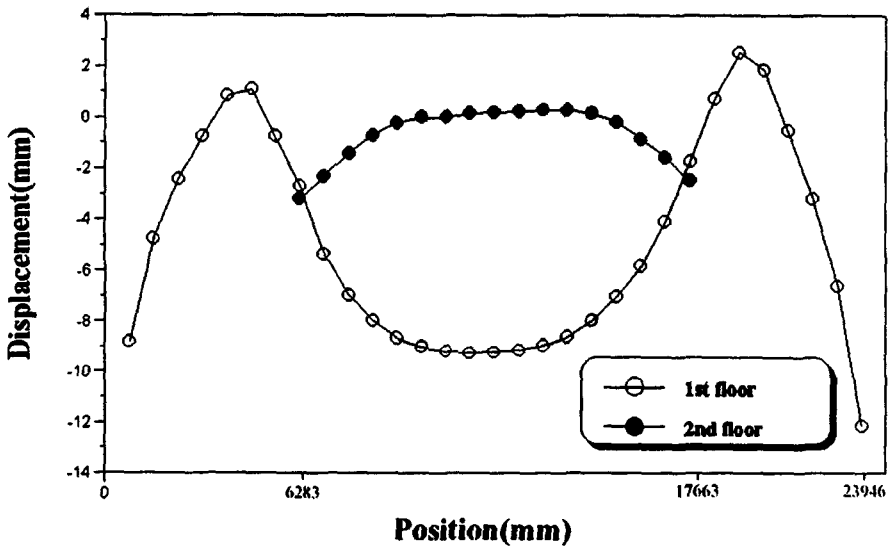


Fig. 5 Displacement of the center line of 1st and 2nd floor under compression loads

2.3.2 수직하중을 받는 경우

그림 6은 수직하중, 즉 대차하중을 제외한 공차하중과 승객하중(정원 160명)을 받을 때의 응력 분포를 압축하중에서와 같은 방법으로 나타내었다. 최대 응력발생부위는 구체의 끝단에 가장 인접한 창문 모서리에서 발생하였으며 이 때의 최대응력은 31.1MPa이다. 압축하중에서와는 달리 응력이 측면(3-X board)에 주로 분포되며, 이 때의 최대응력은 3-X board의 항복응력에 10분의 1보다 작은 값이다. 각 층별 응력분포를 살펴보면, Fig. 6의 (2)와 (4), 즉 3-X board의 외부표면에서의 응력분포는 평균응력과 크기가 크게 차이가 없으며, 측면에서의 응력분포에서 다소 차이를 보이나 그 경향은 대동소이하다. 이 때의 최대응력값과 발생위치는 모두 평균응력과 같다. 그림의 (3)은 3-X board의 내부 폼의 응력분포를 나타내는 것인데, 그림에서 보여지듯이 내부 폼에서는 응력의 변화가 거의 없다는 것을 알 수 있었으며, 그 값 또한 매우 작다는 것을 알 수 있다. 그러나, 최대응력이 걸리는 2층바닥과 측면이 만나는 점에서의 응력값은 해석에서 사용하였던 폼의 탄성계수 값보다 큰 24.1MPa를 갖는다. 따라서, 이 부분에 사용하는 3-X board는 내부에 보강재를 사용하거나 어떠한 다른 방안을 강구하여 응력이 집중되는 것을 막아야 한다.

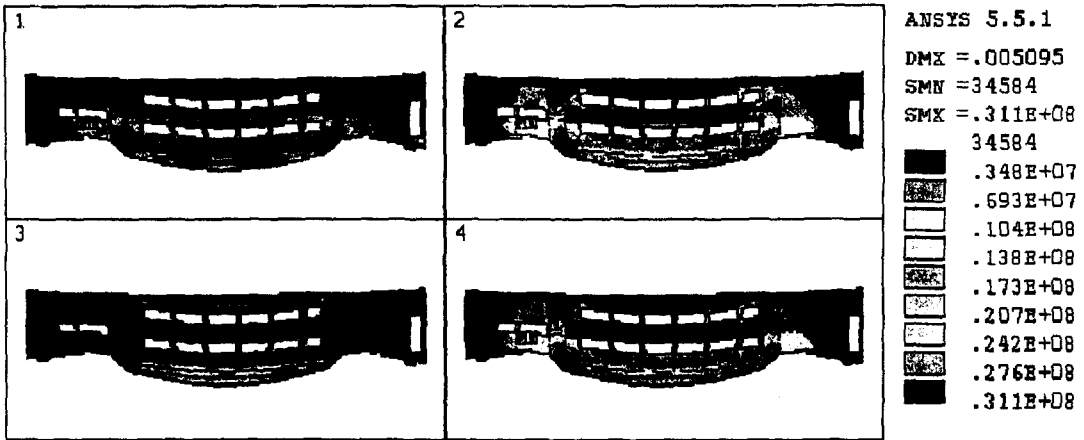


Fig. 6 Stress distribution under self-weight and passengers weight

Fig. 7은 수직하중이 작용을 했을 때, 구체의 대칭 단면에서의 높이방향(Z) 처짐값을 나타낸 그래프이다. 최대 처짐은 1층바닥의 중앙에서 발생하였으며, 처짐량은 5.5mm이다. 2층 바닥에서의 처짐량은 1층바닥보다 작은 4.3mm이다. 이 값들 모두가 안전한 범위에 있음을 알 수 있다.

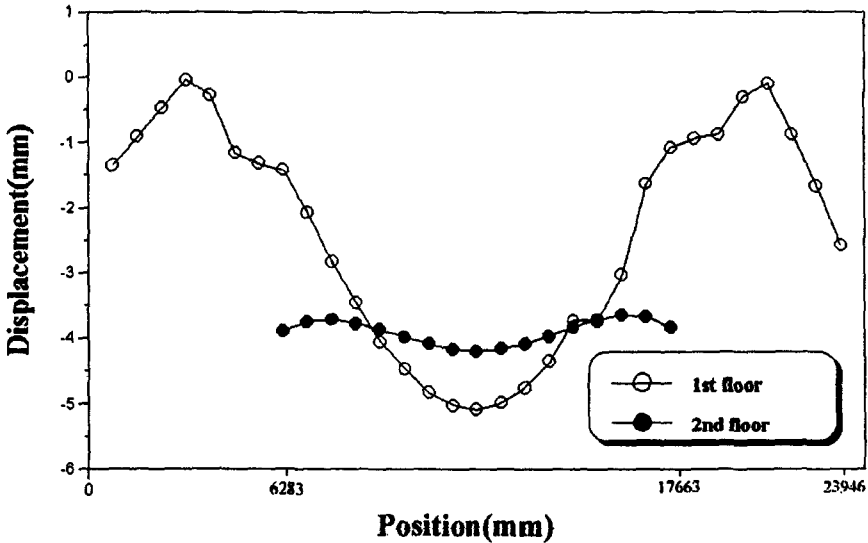


Fig. 7 Displacement of the center line of 1st and 2nd floor under car body weight and passengers weight

2.3.3 진동해석

복합재료(3-X board)를 사용한 구체에 대한 진동해석을 수행하였다. 해석결과 복합재료 고유의 높은 강성값과는 다르게 낮은 고유진동수를 보였다. 앞에서 언급한 구체 고유진동수에 대한 제한 규정인 10Hz와 비교하여 상당히 낮은 진동수인 4Hz와 8Hz의 값을 가진다. 고유진동수를 높이기 위해서는 구체를 경량화하거나 강성을 높이는 방법이 있는데, 현재 구체 경량화가 목적이기 때문에, 보다 높은 강성을 갖는 재료나 보강법을 개발해야 할 것이다. 보다 정확한 진동해석을 위해 구체를 보다 상세히 모델링하여 해석중에 있다.

2.3.4 고찰

Table 3에 본 연구를 통해 구한 압축하중과 수직하중하에서의 최대응력값과 참고문헌에서 제시하는 최대응력값들을 비교하였다. 비록, 구체의 형상이 다르고, 최대 응력발생위치에 차이가 있지만, 각 하중하에서의 최대응력값들은 비슷한 경향을 가진다는 것을 알 수 있으며, 특히 복합재료 (3-X board)가 수직하중에서의 성능이 뛰어나다는 것을 알 수 있다. 최대 응력의 발생위치가 모두 복합재료라는 점을 감안하면, 철도차량에 복합재료를 사용하는 것에 대한 긍정적인 결론을 얻을 수 있으나, 보다 정확한 사용 가능성 여부의 판단은 실험을 통해 검증되어야 할 것이다.

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

하중조건	Present	Reference[1]	Reference[2]
압축하중	161MPa	-	189MPa
수직하중	31MPa	190.7	180MPa
고유진동수	4Hz	-	-

3. 결론

철도차량 경량화를 위한 방안으로서, 복합재료(3-X board)의 사용 가능성을 판단하기 위해 2층 기차를 대상으로 유한요소해석을 수행하였다. 구체의 모든 부재를 세밀하게 모델링하여 해석하는 것에 비해 정확성은 떨어지지만 일반적인 응력 분포의 경향을 얻기위해 각 부재들을 단순화하여 해석을 수행하였다. 해석결과, 차단압축하중과 수직하중이 작용했을 때, 각각에 대해서 복합재료 (3-X board)는 각 재료의 항복응력을 넘지않았으며, 최대 처짐량도 제한값을 넘지 않았다. 이를 통해 복합재료가 기존의 스테인레스 강이나 알루미늄 패널에 뒤지는 않는 강성을 지니고 있어, 강성면에서는 철도차량에 적용가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 고유진동수는 제한값인 10Hz보다 낮은 값을 갖았다. 본 연구를 통해 철도차량 구체에 복합재료를 사용하는 것에 대한 긍정적인 결론을 얻었다.

후기

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

참고문헌

1. 전형용, 성낙원 (1998), "전동차 차체 구조물에 대한 구조해석 및 실험에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 15권 12호, pp.28-35..
2. 김진혁, 박근수, 박상규 (1998) "경전철 차량 개발을 위한 차체 강도 평가", 한국철도학회지
3. 스키야 다게시 (1996), "철도차량과 설계기술", 機電研究社.
4. Swanson Analysis Systems Inc., 1992, "ANSYS User's Manual : Volume III Elements"