

복합재료 경전철의 차체구조 해석

A Structural Analysis on the Light Rail Vehicle Body with Composite Material

이영신* 김재훈* 이호철** 길기남** 박병준**
Lee, Young-Shin Kim, Jae-Hun Lee, Ho-Chul Kil, Ki-Nam Park, Byung-Jun

ABSTRACT

The structural behavior of the composite material light rail vehicle body are investigated. Composite material is very useful for light rail vehicle structure due to its high specific strength and lightweight characteristics. The main carbody is made of aluminum alloy. The side wall and roof with composite panels can reduce total vehicle weight about 2000kg. In addition, with the lower density of the foam, enhances lightness in the panel and to save the operation expenses. The finite element analysis code, ANSYS is used to evaluate the stability of the body structure under the various load conditions.

1. 서론

첨단 신소재를 이용하여 항공기, 자동차 등의 수송 수단을 경량화하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 수송기계들의 경량화는 에너지 자원의 경제적 이용과 환경 보존이라는 측면에서 더욱 중요하게 부각되고 있는 과제이다. 현재 철도차량에는 경량화 소재로 스테인레스강, 알루미늄 합금 등의 경합금이 많이 사용되고 있으나 플라스틱, 금속복합재, 섬유강화 복합재 등의 첨단 소재는 보편적으로 활용되고 있지 못한 실정이다. 철도는 대중의 대량 수송 수단이므로 고 신뢰성이 요구될 뿐만 아니라 20년 이상의 장기적 사용에 대한 안정성이 필요하고, 한편으로는 제품 원가와 유지보수 비용이 저렴해야 하는 등으로 인하여, 지금까지는 재료비가 고가이고 제품제작의 신뢰성이 확보되지 못한 신소재의 활용에는 소극적일 수밖에 없었다. [1]

그러나 최근 들어 복합재료에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 실제로 항공기, 자동차 등의 수송기계에 복합재료가 적용되어 큰 무게 감량과 그에 따른 경제적 효과가 가시화 되면서, 철도차량에의 도입이 시도되고 있다. 경전철(light rail vehicle)은 도시내 고속 대량 수송철도와 비교하여 수송력, 속도 등은 뒤떨어지지만 도로부 등을 이용하기 때문에 역 설비, 인프라 구조물, 신호보안 시스템이 간단하게 설치할 수 있어, 건설비용을 큰 폭으로 낮추어 건설할 수 있는 철륵식의 전차이다.

* 충남대학교 교수, 정회원

** 충남대학교 대학원과정

따라서 도시인구가 그리 많지 않고 수송수요도 많이 기대할 수 없는 지역에서 도입이 기대되고 있다. 현재 경전철이 도입되고 있는 도시는, 독일의 쾰른, 휴라이브르그, 영국의 맨체스터, 프랑스의 글루노블, 미국의 LA등과 일본의 여러 도시들이다.

우리 나라에서는 몇몇 도시에서 경전철의 도입이 추진되기는 하였지만, 수익성의 문제로 확정된 곳은 없다. 99년 9월에 상일~하남 경전철 도입이 확정되었다. 이에 따라 다른 도시의 경전철 사업도 활기를 띠 전망이다. 또한, 도로상황의 악화와 에너지 자원의 부재로 인해 우리 나라에서의 경전철 도입은 더욱 더 확대될 것이며, 그에 따라 차량의 경량화는 매우 중요한 문제가 될 것이다.

철도차량의 경량화를 위한 국내의 연구동향을 살펴보면, 일본에서는 300계 신간선의 동력차 및 객차의 차체, 바닥 판, 천장 판 등을 대형 AI 압출재를 연속 용접하여 제작한 차체, 비행기와 유사한 구조의 듀랄루민 판을 리벳한 차체, 대형 AI 압출재를 스팟 용접하여 제작한 차체, 70mm 두께의 알루미늄 허니컴 패널을 연속 용접한 4종류의 차체를 제작하여 95년부터 무게 감량에 대한 기술개발을 시도하고 있다. 프랑스는 제 3세대 TGV 2N(2층기차)의 구체를 압출 AI 6005, 6061, 6085 합금을 사용하고 2층 바닥판을 허니컴 알루미늄 판을 이용하여 제작하고 있다. 국내에서는 한진, 대우등이 기존의 스테인레스강 차체에서 보다 가벼운 알루미늄 차체개발을 위해 노력하고 있으며, 현대정공(주)는 마닐라 경전철을 제작 및 납품하고 있다. [2]

본 연구에서는 최근 세계적으로 많은 도시에서 도입이 시도되고 있는 경전철 구체에 복합재료를 적용하여, 다양한 정적 및 동적 하중 하에서의 구체구조의 건전성을 평가하고, 구조설계의 기초자료를 제시하려 한다. 복합재료의 적용부위는 구체의 지붕과 측면이며, 재료는 3-X BOARD이다. 또한 바닥 판은 알루미늄 압출재를 사용하며, 모든 보강재는 알루미늄 합금을 사용하게 된다. 해석을 위하여 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS 5.5를 사용하였다.

2. 본문

2.1 복합재료

1970년대 이후로 가볍고 강성이 큰 재료로 복합재 샌드위치 판이 개발되어 항공기 구조물 제작에 많이 적용되고 있다. 철도 차량의 고속화 경량화 추세에 따라 이러한 샌드위치 판의 사용이 증가하고 있는데, 특히 독일의 AEG 및 MBB에 의하여 개발된 FRP 보기 프레임은 1988년 투입된 이후 100만 km의 주행기록을 가지고 있다. 일본의 철도기술연구소는 탄소섬유 복합재료의 보기 프레임을 시험용으로 개발하였는데 기존의 강재 보기 프레임에 비하여 70% 이상의 경량화를 달성하고 있다. 그러나, 재료의 가격이 높고, 리사이클링의 문제가 해결되지 못한 상태이기 때문에 완전한 복합재료 차체의 개발은 현재로서는 어려운 실정이다. 그렇지만 복합재료는 기계적 특성(비강성, 비강도, 피로특성, 진동 흡수성, 충격 에너지 흡수성, 내부식성 등)이 다른 재료에 비하여 매우 우수하므로 앞으로 철도차량에 확대 적용될 전망이다.[1]

본 연구에서는 컨테이너에 적용되어 그 우수성이 인정된 3X-BOARD를 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 1 은 해석에 사용된 3-X BOARD의 구조 및 재질을 나타낸다. 패널의 단면을 살펴보면, 외부 스킨은 면직 유리섬유로 이루어져 있으며, 안쪽의 코어는 폴리우레탄 폼으로 되어있다. 또한 외부 스킨과 내부 코어 사이의 접합 강도를 높이기 위해 두 재료를 유리섬유를 이용하여 스티칭 하였다. 또한 외부 스킨은 열 가소성 우레탄 필름으로 코팅되어 있다.

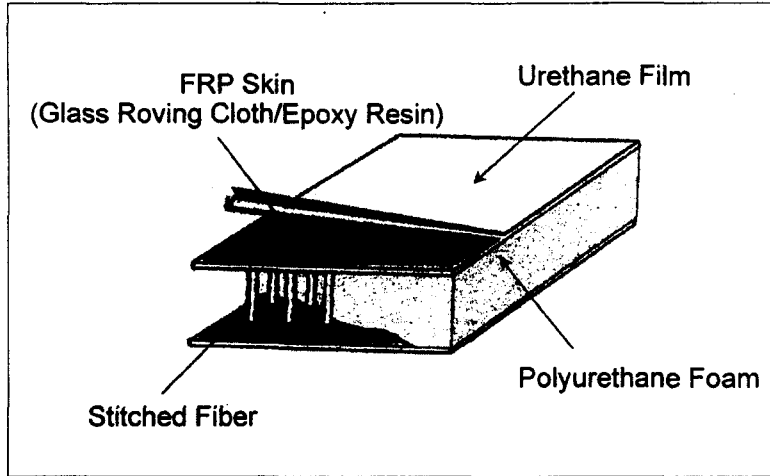


Fig. 1 Structure and materials of 3X-BOARD

Table 1은 3-X BOARD와 금속판(Al, SUS) 보드의 기계적 특성을 비교하여 보여주고 있다.

Table 1. Comparison of composite & metal sandwich board

	3-X BOARD		Metal board	
Density	0.16g/Cm ³	FRP : 2.2g/Cm ³	0.22g/Cm ³	SUS : 7.9g/Cm ³
		Foam:0.04g/cm ³		Al : 2.7g/Cm ³
				Foam:0.04g/cm ³
Specific Strength	17.5		11.1	
Tensile Strength	35kgf/mm ²		SUS : 53kgf/mm ²	
			Al : 2.7kgf/mm ²	
Corrosion Resistance	Excellent		Good	
Durability	Excellent		Good	
Processing Method	Hot Press or Autoclave		Foam Injection	
Thermal Conductivity	Excellent(150)		Good(100)	

2.2 구조 해석

2.2.1 해석 방법

유한요소해석을 위하여 상용 유한요소 해석 코드인 ANSYS 5.5를 이용하였다. 해석 모델은 차체 길이방향을 X축, 차폭방향을 Z축, 높이방향을 Y축으로 하였다. 구체의 지붕과 측면은 3-X BOARD를 사용하였고, 바닥면은 알루미늄 압출패널, 그리고 모든 보강재는 알루미늄 합금을 이용하였다.

3-X BOARD를 모델링 하기 위해 최대 200적층이 가능한 적층 쉘요소인 SHELL99요소를 사용하였으며, 바닥판의 알루미늄 압출패널은 직교이방성의 성질이 있으므로, 등가 강성을 구한 후 모델에 반영시켰다. 또한 모든 보강재는 2절점 6자유도(UX, UY, UZ, RotX, RotY, RotZ)를 갖는 탄성

빔 요소(BEAM4)를 사용하였다. 요소의 형상은 삼각형을 이용하였다.

Fig. 2는 해석에 사용된 유한요소 모델을 나타내며, Table 2는 구체의 일반 제원을 보여준다.

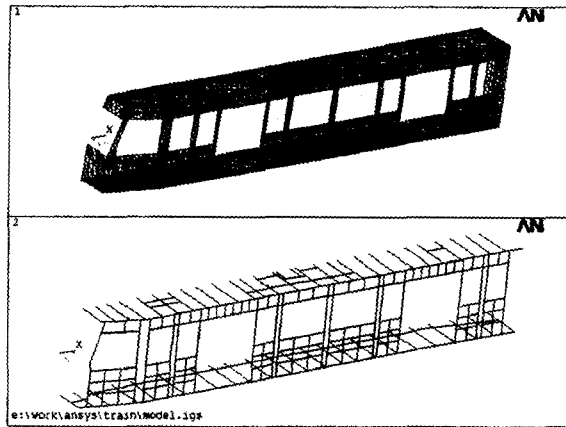


Fig. 2 Finite element model of the light rail vehicle body

Table 2. Dimensions of the light rail vehicle body

Item	Dimension(mm)	Remarks
Length of car body	13,000	-
Width of car body	2,581	-
Height of car body	2,274	Floor~Roof
Length between bogie center	10,000	-

2.2.2 경계조건

해석 대상이 길이방향(X축)을 중심으로 양쪽 대칭이므로 전체의 1/2 모델을 하여, 대칭 경계조건을 적용하였다. 구속조건은 양쪽 볼스터 위치의 수직변위, 즉 Y축 방향의 변위를 0으로 하였으며, 대각들기의 경우는 전체모델을 이용하였다. 적용된 하중은 차단압축하중과 수직하중 및 대각들기로 크게 대별되며, 차단압축하중은 공차하중+차단압축하중, 수직하중은 승객하중+공차하중으로 구성된다. 전자의 경우, 공차하중은 안전율을 고려하여 바닥판 전체의 노드에 가하였으며, 차단압축하중은 길이방향의 양 끝단에 50톤을 가하였다. 후자의 경우, 승객하중과 공차하중을 모두 바닥판 전체 노드에 가하게 되며, 승객하중에 동하중 계수 1.2가 적용된다. 대각들기는 앞쪽 볼스터 위치의 양 끝단중 한쪽에 2톤의 하중을 하가하여 약 4ton·m의 모멘트를 발생시키게 되며 나머지 끝단과 뒤쪽 볼스터위치의 양 끝단에 수직변위를 고정하였다. 또한, 고유치 해석을 통하여 구체의 굽힘모드와 비틀림 모드를 고찰하였다.

해석에 사용된 node수는 9957개, element수는 5977개 이다.

Table 3은 1/2 모델의 해석에 사용된 경계조건(구속조건 및 하중)을 보여준다.

Table 3. Load & boundary conditions of vehicle body model

		Amplitude	Applied position	Remarks
Vertical load	Car-body weight	3,636.4kg	Floor panel	SHELL : 3284.67kg BEAM : 351.723kg
	Passenger's weight	6,318kg	"	1.2(dynamic load coefficient) × (seat:67+standing:257) × 65kg /2(2EA)/2(symmetrical)
Compressive load		50,000kg	Head and tail	
Eigen value		-	-	Bending & twisting mode
Constraint		UY=0	Bolster	

2.2.3 판정 기준

본 연구에서는 구체의 안전을 평가하기 위하여 정적강도(항복강도 이하), 강성기준, 진동기준 이외에 수직하중 및 차단압축하중 조건에서의 응력 분포를 고찰하였다.

본 연구에서 고찰한 설계 적합성을 판정하기 위한 기준을 Table 4.에 나타내었다.

Table 4. Design criterion of the vehicle body

Item	Criterion	Amplitude
Static strength	$\sigma_{max} < \sigma_y$	$\sigma_y : Al=480MPa, 3-X BOARD=390MPa$
Stiffness	$\delta_{max} < L/1000$	$L = 10,000mm$ (Dist. of support positions), $\delta_{max} < 10mm$
Eigen value	$\omega_n > 10Hz$	

2.3 결과 및 고찰

상용 유한요소해석 코드인 ANSYS 5.5를 이용하여 차단압축하중, 수직하중, 대각들기 에서의 구체의 응력분포, 처짐형상 및 그들의 크기를 얻어, 경전철에 복합재료의 적용 가능성을 고찰하였고, 굽힘 및 비틀림 고유치 해석을 수행하였다.

2.3.1 차단압축하중

(1) 정적 강도

구체의 양 끝단에 50톤의 차단압축하중과 바닥판에 공차하중을 가하여 해석을 수행하였다. 응력이 가장 크게 집중되는 곳은 차단압축하중이 작용하는 구체의 양 끝단으로, 약 83MPa을 보인다. 이 값은 알루미늄 압출재(7000계열)의 항복응력 ($\sigma_y = 480MPa$)과 비교하여 매우 작은 값으로, 차단압축상태 하에서는 구조적으로 안전함이 확인되었다. 또한 열차 구조물의 특성상 출입문과 창문이 많은 관계로, 그러한 부위에서의 응력집중 정도를 살펴보면, 뒤쪽 출입구 하부에서 약 60MPa로 다소 높은 값을 나타내며, 기타 창문 주위에서도 높은 응력 집중이 발생하고 있음을 알

수 있다. Fig. 3는 주요 부위의 응력분포를 보여주며, Table 5는 주요 부위에서의 최대 응력값을 보여주고 있다.

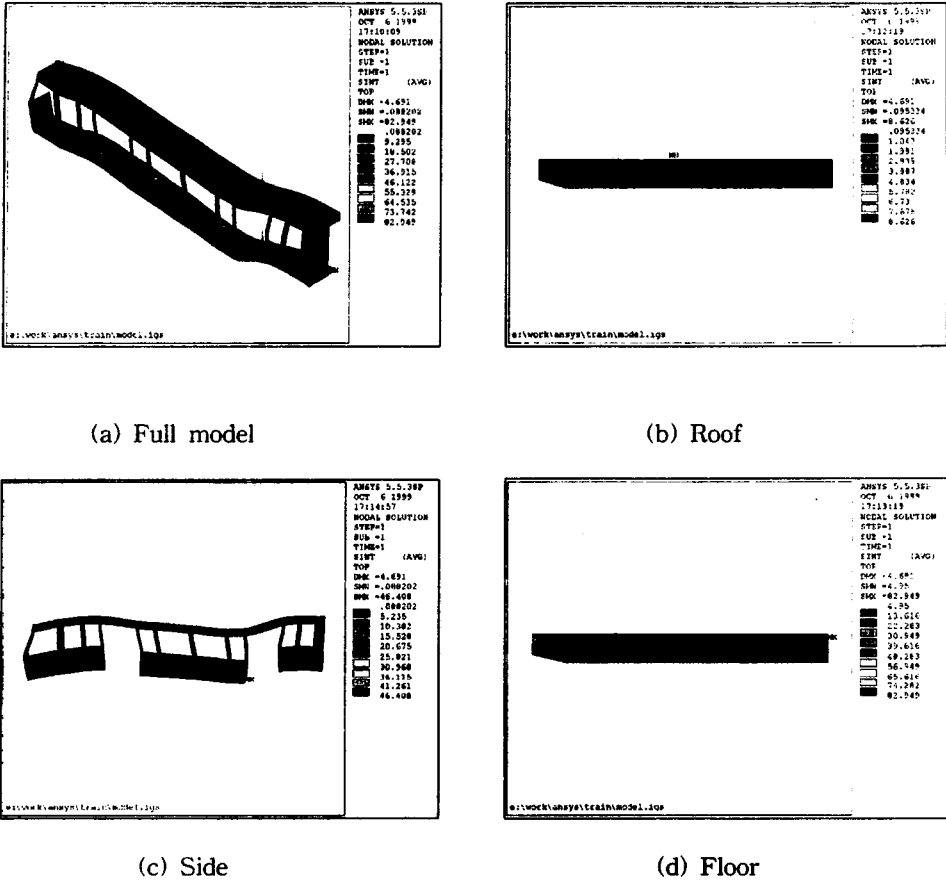


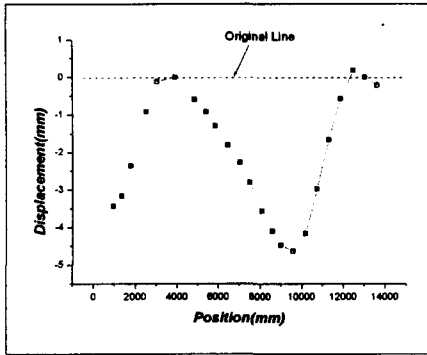
Fig. 3 Stress distributions under compressive loads

Table. 5 주요 부위별 최대응력(차단압축하중) (단위 : MPa)

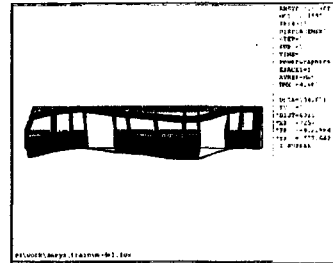
	Side panel	Floor panel	Roof panel	Door frame	Window frame
σ_{max}	46.4	83	8.6	60	20
σ_y	340	480	340	340	340

(2) 강성

최대 처짐량은 약 4.7mm로 판정기준인 지지점간 거리의 1/1000인 10mm보다 훨씬 작은 값을 나타내며, 판정기준을 만족하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4 (a)는 바닥판의 대칭면에 위치한 노드의 변위(처짐형상)를 보여주고 있으며, (b)는 변형된 구체의 형상을 보여준다.



(a) Displacement



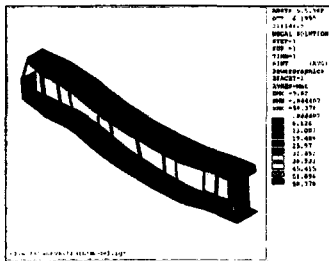
(b) Deformation

Fig. 4 Displacement of the centerline of floor under compressive loads

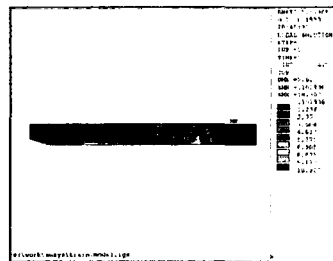
2.3.2 수직하중

(1) 정적 강도

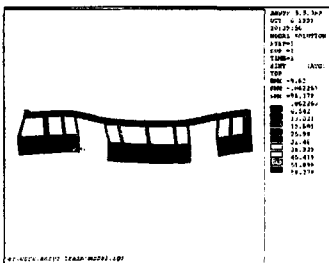
수직하중은 공차하중과 승객하중이 동시에 작용하며, 승객하중은 Table. 3에 제시되어 있다. 응력집중이 가장 큰 곳은 앞쪽 출입구와 바닥판이 만나는 곳이며, 약 58.34MPa를 보이고 있다. 이 값 역시 기준응력(약340MPa)에 비해 작은 값을 알 수 있다. 바닥판의 최대 응력은 앞쪽 볼스터위치로, 약 30MPa를 나타낸다. 이것은 알루미늄 압출패널의 허용응력인 480MPa에 비해 훨씬 작은 값이다. 차단압축하중의 경우와 마찬가지로, 구체의 출입구 및 창틀 부위에서 응력이 크게 집중됨을 볼 수 있으며, 주요 부위별 응력이 Fig. 5와 Table 6.에 제시되어 있다.



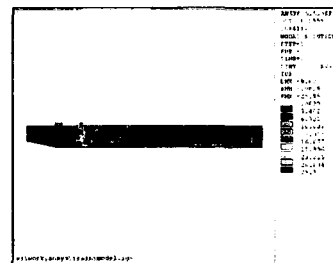
(a) Full model



(b) Roof



(c) Side



(d) Floor

Fig. 5 Stress distributions under passengers weight and body weight

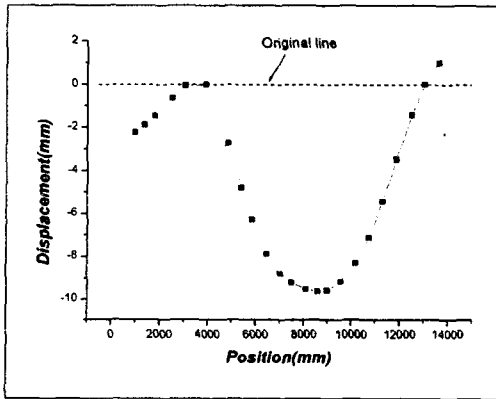
Table 6. 주요 부위별 최대응력(수직하중)

(단위 : MPa)

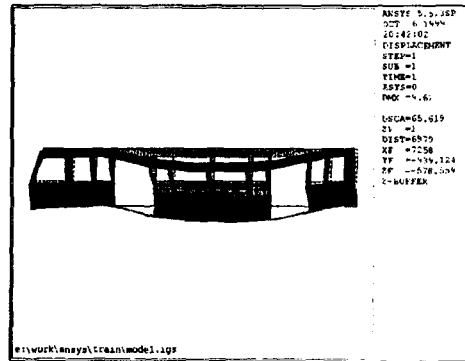
	Side panel	Floor panel	Roof panel	Door frame	Window frame
σ_{max}	58.4	30	10.3	58.4	31
σ_y	340	480	340	340	340

(2) 강성

최대 처짐량은 약 9.62mm로 판정기준인 지지점간 거리의 1/1000인 10mm보다 작은 값을 나타내며, 판정기준을 만족하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6 (a)는 Fig. 3과 마찬가지로 바닥판의 대칭면에 위치한 노드의 변위(처짐형상)를 보여주고 있으며, (b)는 변형된 구체의 형상을 보여준다.



(a) Displacement



(b) Deformation

Fig. 6 Displacement of the centerline of floor under passengers weight and body weight

2.3.3 대각들기 및 고유치 해석

구체의 비틀림 하중에 대한 건전성을 평가하기 위하여 앞쪽 지지점(볼스터위치)의 한쪽에서 2ton의 수직하중을 가하였다. 구속조건은 앞쪽 지지점의 나머지 끝단과 뒤쪽 지지점의 양단에 상하방향 변위를 0으로 제한하였다. 결과적으로, 가장 큰 응력은 앞쪽 지지점측의 측면패널의 출입구 상부 모서리에서 발생하며 크기는 약28MPa, 최대 변위는 8.3mm를 나타낸다. 앞의 경우와 마찬가지로 개구부 주위(출입구, 창틀 모서리 등)에서 응력이 집중되지만, 모두 허용응력 이내에 존재하고 있다. Fig. 7 (a)는 대각들기 조건에서 응력분포를 나타낸다.

규정상 철도차량의 진동수는 10Hz를 넘어야 한다. 그러나 본 논문에서의 해석 결과는 굽힘 및 비틀림 진동수가 모두 10을 넘지 못하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 고유진동수를 높이기 위한 방안이 모색되어야 하겠다. Fig. 7(b)는 굽힘 및 비틀림 모드형상을 나타낸다.

하기 위해 노력했다.

참고문헌

1. 최진민 등(1995), "대형구조시스템 최적화 및 성능평가기술 개발-세부과제 VI : 소재 대체를 이용한 차체 경량화 설계 기술 개발", 과기처 시행 특정연구개발사업 연구보고서, 한국기계연구원
2. 이영신, 김재훈, 박병준, 길기남, 주정수(1999), "복합재료 2층기차의 응력해석", 1999년도 한국철도학회 춘계학술대회 논문집 pp.75~82
3. 김진혁, 박근수, 박상규(1998), "경전철 차량 개발을 위한 차체 강도 평가", 1998년도 한국철도학회 춘계학술대회 논문집 pp.466~473
4. 전형용, 성낙원(1998), "전동차 차체 구조물에 대한 구조해석 및 실험에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 15권 12호, pp.28-35
5. Swanson Analysis Systems Inc., 1992, "ANSYS User's Manual : Volume III Elements"