

샌드위치 복합재 적용 바이모달 트램 차체의 설계검증을 위한 구조 성능 시험 및 해석적 비교 연구

A Study on the Comparison of Structural Performance Test and Analysis for Design Verification of Bimodal Tram Vehicle Made of Sandwich Composites

고혁영* · 신광복[†] · 정종철**

Hee-Young Ko · Kwang-Bok Shin · Jong-Cheol Jeong

Abstract This paper describes the evaluation of structural performance test and finite element analysis to verify the design of Bimodal Tram made of sandwich composites. The sandwich composite applied to vehicle structure was composed of a aluminum honeycomb core and WR580/NF4000 glass fabric/epoxy laminate composite facesheet. The load tests of vehicle structure were conducted for vertical load, compressive load, torsion and modal analysis according to JIS E 7105. The structural integrity of vehicle was evaluated by the measurement of displacement, stress and natural frequency obtained from dial gauge, strain gauge and gravity sensor, respectively. And finite element analysis using ANSYS v11.0 was done to compare with structural test. The results showed that the displacement, stress and natural frequency were in an good agreement with those of structural analysis using the proposed finite element models.

Keywords : Sandwich composite, Structural test, Finite element analysis, Bimodal tram, Structural integrity

요 지 논문은 샌드위치 복합재가 적용된 바이모달 트램의 설계검증을 위한 구조 성능 시험과 유한요소 해석에 대해 기술하였다. 차체 구조물에 적용된 샌드위치 복합재는 알루미늄 하니컴 심재와 WR580/NF4000 유리섬유/에폭시 면재로 구성되었다. 이때, 차체 구조물의 구조 시험은 JIS E 7105 규정에 따라 수직하중, 압축하중, 비틀림 및 고유진동수 시험이 각각 수행되었다. 그리고 다이얼게이지, 스트레인게이지, 가속도 센서를 통해 얻어진 처짐, 응력, 고유진동수 결과에 따른 구조 안전성을 평가하였다. 그리고 Ansys v11.0을 이용하여 유한요소해석을 수행하였고, 구조 시험 결과와 비교하였다. 구조 시험 결과는 제안된 유한요소 모델을 사용한 구조 해석 결과와 처짐, 응력, 고유진동수가 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

주 요 어 : 샌드위치 복합재, 구조 시험, 유한요소 해석, 바이모달 트램, 구조 안전성

1. 서 론

오늘날 지상운송 수단으로서 자가 차량 이용자가 증가함과 동시에 교통체증 및 화석연료 사용의 급증으로 인한 배기가스에 의해 환경오염은 날이 갈수록 증가하는 실정이다. 이에 국제적으로 지구 온난화를 방지하기 위한 교도의정서가

비준되었으며, 많은 선진국에서는 의무적으로 2012년까지 지온실가스 배출량을 1990년 수준보다 5% 이상 감축해야 한다. 현재 우리나라 역시 교도의정서의 영향을 받고 있으며, 대기오염의 주범인 도시형 버스의 배기가스를 줄이기 위한 차체의 경량화 및 새로운 교통시스템의 도입이 필요한 실정이다[1].

유럽의 선진국에서는 환경오염 및 교통체증의 감소를 위해 철도의 정시성과 친환경성, 버스의 유연성과 접근성을 적용한 트램이 개발되어 운행 중에 있다. 이에 국내에서도 대중교통의 효율화를 위해 2003년부터 CNG 하이브리드 구동형 바이모달 트램이 개발 중에 있으며, 2011년에는 실

[†] 책임저자 : 정회원, 한밭대학교, 기계공학부, 교수
E-mail : shin955@hanbat.ac.kr

TEL : (042)812-1156 FAX : (042)812-1587

* 정회원, 한밭대학교, 기계설계공학과, 대학원

** (주)한국화이버, 차량사업부

용화를 목적으로 하고 있다[2].

바이모달 트램은 2량 1편성으로 이루어져 있으며, 전용 선로에서의 자동운전뿐만 아니라 일반도로에서의 수동운전이 가능하도록 하여 운영측면에서 효율성을 높였다. 이때, 무인 자동운전 시스템을 적용하기 위해 전용 도로위에 전자석을 설치하여 자기장에 의한 경로를 탐색하고, GPS 신호 및 내부 입력 프로그램에 의해 운행 경로를 주행하게 된다[3-5]. 그리고 차량의 회전 반경을 최소화하기 위해 각 축의 조향각을 제어하는 전 차륜 조향 알고리즘을 개발하여 적용하였다[6]. 또한 차체의 경량화를 통한 에너지 효율의 증대를 위해 1차 부재인 차체 구조물에 샌드위치 복합재가 적용되었다. 이때, 복합재는 기존 금속재에 비해 비강도, 비강성 및 굽힘강성이 높고, 우수한 내구성 및 내식성 등의 수명 특성과 뛰어난 단열 및 소음차폐효과 등이 우수하여 항공 및 우주산업분야뿐만 아니라 지상운송 산업에도 많은 부분에 적용되고 있다[7]. 이에 국내에서도 텀열열차, 저상버스, 자동무인경전철 개발 등과 같은 국가 연구개발 사업에 샌드위치 복합재가 적용되었으며, 현재 시험운행 중에 있다.

본 연구에서는 샌드위치 복합재가 적용된 바이모달 트램에 대해 비파괴 정하중 영역 하에서의 설계 및 해석 검증을 위한 구조 성능 시험과 유한요소 해석을 통하여 구조물의 안전성을 평가하고 검증된 유한요소 모델을 제시하고자 한다. 이때 바이모달 트램에 대한 구조 안전성 평가에 대한 기준은 따로 규정되지 않은 실정이며, 이에 구조시험은 철도차량에서 적용되는 JIS E 7105 기준을 참고하여 시험을 수행하였다. 유한요소 해석은 Ansys v11.0을 이용하였으며, 구조시험과 동일한 구속 및 하중조건을 모사한 해석을 수행하여 결과를 비교 검증하였다.

2. 바이모달 트램의 구성

바이모달 트램은 Fig. 1과 같이 2량 1편성으로 구성되어 있으며, 첫 번째 차체(Carriage 1)에는 2축, 두 번째 차체(Carriage 3)에는 1축이 적용되어 총 3축으로 이루어져 있다. 차체 구조물은 유리섬유/에폭시 적층 복합재 면재에 알루미늄 하니컴 심재로 구성된 샌드위치 복합재가 주를 이루고 있으며, 곡률 반경이 큰 부분은 적층 복합재가 적용되었다. 또한, 샌드위치 복합재의 강성 향상을 위해 알루미늄 압출재가 보강재로 사용되었다. 이때, 차체의 제작은 진공 상태에서 선정된 온도 이력(80°C, 121°C)과 압력(2.5bar)이 적용된 오토클레이브 공법을 이용하여 제작하였으며, 보강재와 복합재의 접착은 에폭시 성분의 접착필름을 사용하였다.

Table 1은 바이모달 트램에 적용된 샌드위치 복합재와

적층 복합재, 알루미늄 보강재 및 접착 필름 등의 구성 재료를 나타낸 것이다.

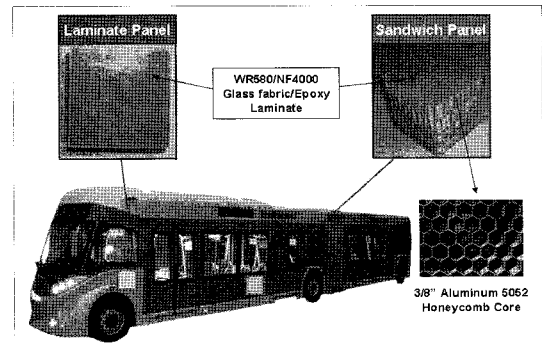


Fig. 1. Manufacturing concept of Bimodal Tram

Table 1. The materials used to Bimodal Tram structures

Part		Material
Sandwich Panel	Facesheet	WR580/NF4000 Glass fabric/epoxy
	Core	Aluminum 5052 honeycomb (3/8"-5052-0.0025")
Laminate composite		WR580/NF4000 Glass fabric/epoxy
Reinforced Beam		Aluminum 6063 T6 Extrusion profile
Adhesive Film		Bondex 750D

3. 바이모달 트램 복합재 차체의 구조 성능 시험

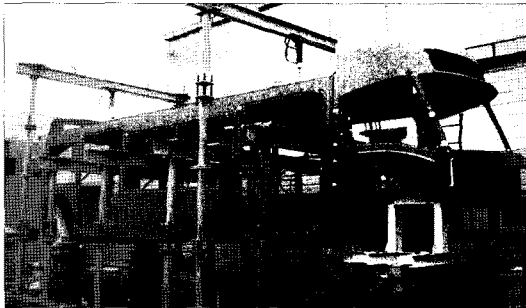
바이모달 트램의 구조시험은 JIS E 7105 기준을 적용하여 시험을 수행하였다[8]. 구조시험에 적용되는 하중은 Table 2에 나타나 있듯이 승객하중과 차체 중량을 고려하여 적용하였으며, 차체를 고정시키기 위해 차축이 위치되는 4곳에는 지그를 제작하여 적용하였다. 이때, 수직하중은 승객중량과 실내외 설비중량에 동하중 계수가 적용되었으며, 압축하중은 JIS E 7105 기준에 따라 294.3kN(30ton-f)를 적용하였다.

Table 2. The load condition of Bimodal Tram

Type	Load condition		Note
	*C1	**C3	
Vertical load	144.62kN	100.05kN	승객중량 : 65kg/인 동하중계수 : 1.1 혼잡도 : 200%
Compressive load	294.3kN + 144.62kN	294.3kN + 100.05kN	압축하중+수직하중
Torsion	39.24kN·m	39.24kN·m	-

*C1 : Carriage 1, **C3 : Carriage 3

Fig. 2는 구조시험을 위해 C1과 C3 차체에 시험 장비가 설치된 것을 보여준다. 시험에 사용된 장비로는 차체를 고정시켜주는 지지대와 하중을 가해주는 유압실린더, 변위를 측정해주는 다이얼게이지, 고유진동수 측정을 위한 가속도 센서 등이 사용되었다. Fig. 3은 처짐 측정을 위해 설치된 다이얼게이지의 위치를 보여준다.



(a) Carriage 1



(b) Carriage 3

Fig. 2. Setup for structural test

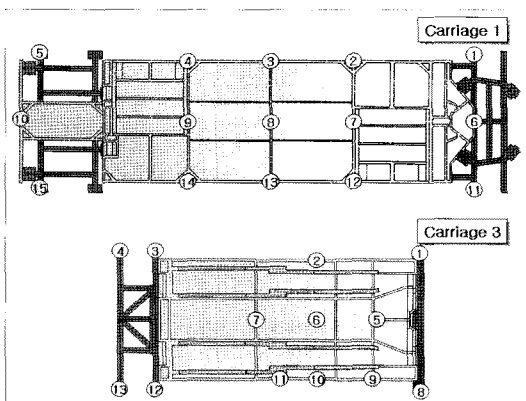


Fig. 3. Locations of dial gauge for measurement

3.1 수직하중 시험

수직하중 시험은 Fig. 4에 나타나 있듯이 전방의 차축 2 곳을 평평한 블록에 원형 롤러를 사용하여 차체의 길이방향으로 변위 및 회전을 허용하였고, 후방의 차축 2곳은 V 홈 블록에 원형 롤러를 사용하여 길이방향의 변위는 구속하고 회전은 허용하였다. 그리고 차체의 바닥과 지붕에 유

압 실린더를 이용하여 시험하중을 가하였다.

수직하중 시험을 수행한 결과 C1차체에서는 바닥 중앙 부분인 8번 위치에서 최대 처짐이 26.9mm가 발생하였고, C3차체에서 역시 바닥 중앙 부분인 6번 위치에서 8.9mm가 발생함을 확인하였다. 이때, 차량의 길이가 약 1.4배 정도 증가된 C1 차체가 C3차체에 비해 처짐이 더 발생함을 확인할 수 있었다.

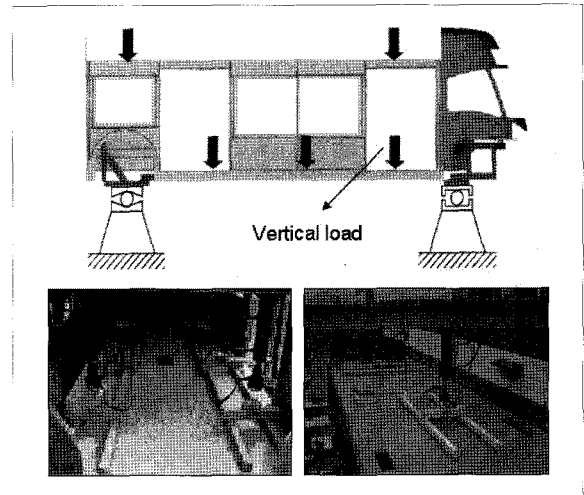


Fig. 4. Test setup of vertical load

3.2 압축하중 시험

압축하중 시험은 Fig. 5에 나타나 있듯이 전방과 후방의 차축 4곳을 평평한 블록에 원형 롤러를 사용하여 길이방향 및 회전을 허용하였고, 후방의 차체에 연결된 지그를 길이방향에 대해 구속하였다. 그리고 수직하중 시험과 동일한 하중을 가한 후에 차량 전두부에 압축 하중을 단계적으로 가하였다.

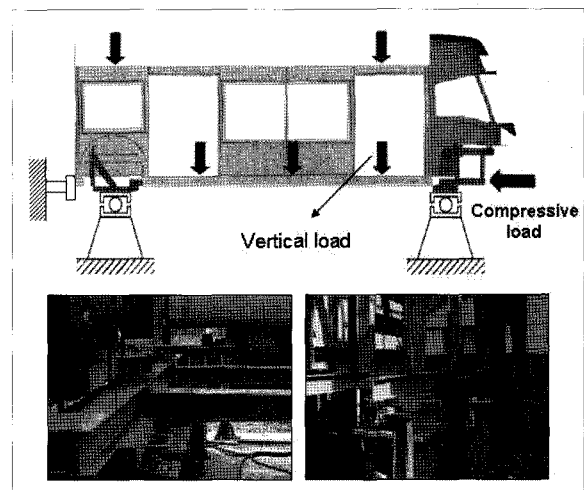


Fig. 5. Test setup of compressive load

압축하중 시험을 수행한 결과 C1차체에서는 바닥의 중앙인 8번 위치에서 최대 처짐이 18.9mm가 발생하였고, C3차체에서 역시 바닥의 중앙인 6번 위치에서 1.6mm가 발생함을 확인하였다. 이때, 수직하중 시험과 동일한 수직하중이 가해진 상태에서의 처짐량이 압축하중에 의해 감소됨을 확인할 수 있었다.

3.3 비틀림 시험

비틀림 시험은 Fig. 6에 나타나 있듯이 전방의 차축 2곳을 V홈 블록에 원형 롤러를 사용하여 길이방향의 변위는 구속하고 회전은 허용하였으며, 후방의 차축 사이의 중심 부분에 V홈 블록을 사용하여 차체를 3점 지지하였다. 그리고 유압 실린더를 이용하여 비틀림 하중을 부여하였다.

비틀림 시험을 수행한 결과 C1차체에서는 비틀림 하중이 가해진 위치와 근접한 5번 위치에서 최대 처짐이 25.0mm가 발생하였고, C3차체에서 역시 비틀림 하중이 가해진 위치와 근접한 1번 위치에서 19.0mm가 발생함을 확인하였다.

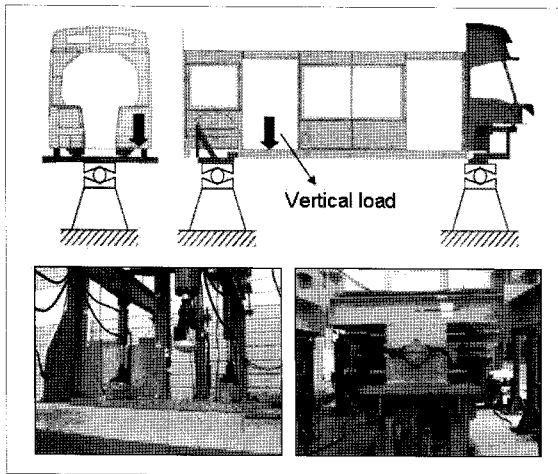


Fig. 6. Test setup of torsion

3.4 고유진동수 시험

굽힘 고유진동수 시험은 Fig. 7에 나타나 있듯이 수직하중 시험과 동일한 지지조건을 적용하였고, 비틀림 고유진동수 시험은 비틀림 시험과 동일한 지지조건을 적용하였다. 그리고 유압 실린더를 이용하여 차체에 굽힘 및 비틀림 변형을 가해 준 후 차체 고정용 지그를 이용하여 차체를 고정시킨 후 순간적으로 제거하여 진동을 발생시켰다[9].

고유진동수 시험을 수행한 결과 C1차체에서는 1차 굽힘 모드가 10.67Hz가 측정되었고, 1차 비틀림 모드는 3.47Hz가 측정되었다. 그리고 C3차체에서는 1차 굽힘 모드가 17.29Hz, 1차 비틀림 모드는 4.79Hz가 측정되었다. 이때, 일반적인 철도

차량의 설계 요구조건인 1차 굽힘 고유진동수가 10Hz 이상을 만족함을 확인하였다. Fig. 8과 9는 1차 굽힘 고유진동수와 1차 비틀림 고유진동수를 얻기 위해 측정된 시간영역 데이터를 FFT분석을 통해 변환한 그래프이다.

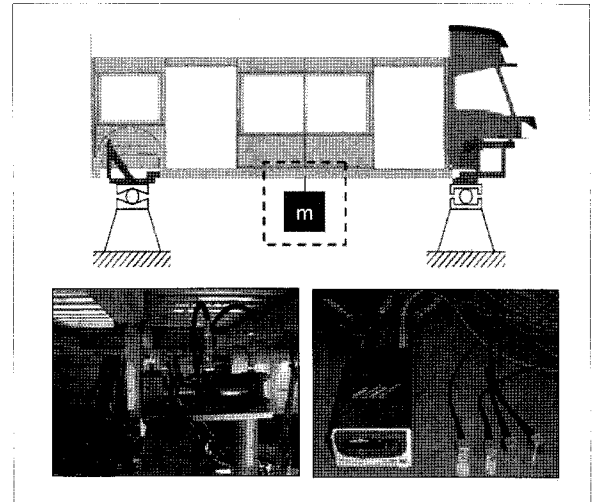
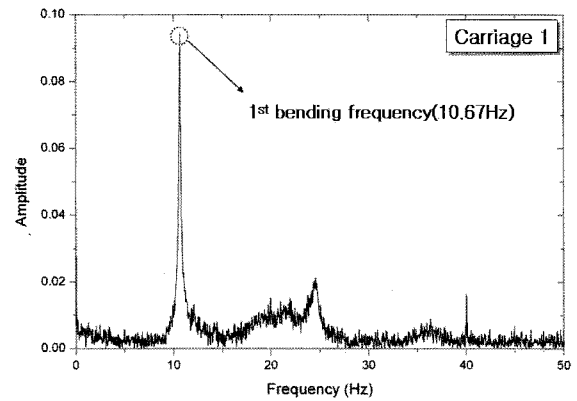
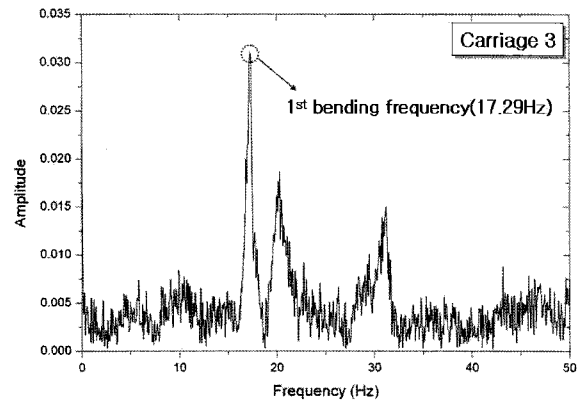


Fig. 7. Test setup of natural frequency measurement

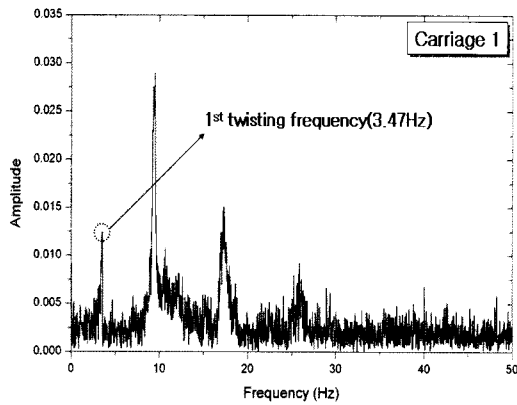


(a) Carriage 1

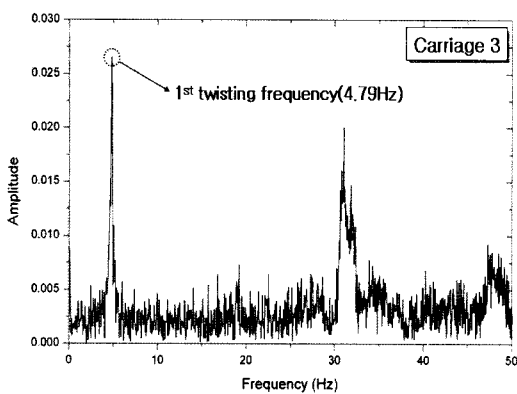


(b) Carriage 3

Fig. 8. Natural frequency of the 1st bending mode



(a) Carriage 1



(b) Carriage 3

Fig. 9. Natural frequency of the 1st twisting mode

4. 바이모달 트램 복합재 차체의 구조 해석

4.1 유한요소 모델링

바이모달 트램의 구조해석은 Fig. 10에 나타나 있듯이 C1과 C3차체를 각각 모델링 하였고, 유한요소해석 프로그램인 Ansys v11.0을 사용하여 해석을 수행하였다. 이때, 해석에 적용된 유한요소 모델은 Fig. 11에 나타나 있듯이 샌드위치 복합재 차체 부분은 복합재 적층 셸 요소인 shell 181을 사용하여 모사하였고, 알루미늄 압출재 프레임은 Timoshenko 빔 요소인 beam 188을 사용하여 모사하였다. 그리고 차체를 지지해주는 지그 부분은 탄성 셸 요소인 shell 63을 사용하였다. 셸 요소와 빔 요소를 적용한 모델은 구조물의 형상을 실제와 동일하게 적용한 솔리드 모델에 비해 모델링 및 해석에 소요되는 시간을 절감할 수 있으며, 선행 연구를 통하여 해석 결과의 오차 범위가 작게 나타남을 확인하였다[10]. 해석에 적용된 요소 수는 C1차체가 117,171절점과 123,074요소로 이루어져 있으며, C3차체는 67,033개의 절점과 75,527개의 요소로 이루어져 있다.

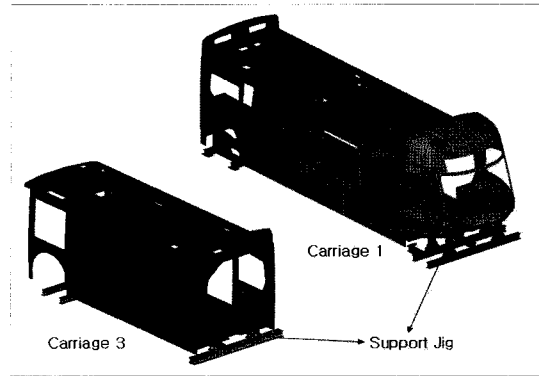


Fig. 10. Finite element model of Bimodal Tram

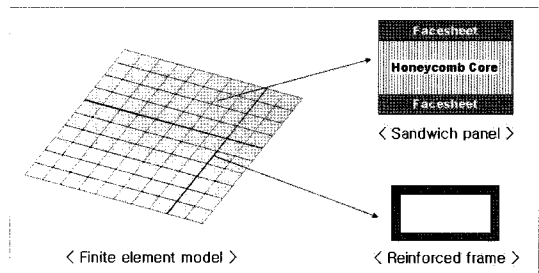


Fig. 11. Application of finite element model

4.2 차체 적용 물성

Table 3은 이방성 재질 특성을 갖는 차체 구조물의 샌드위치 패널 면재와 적층 복합재에 적용된 WR580/NF4000 유리섬유/에폭시와 알루미늄 하니컴 심재에 대한 물성을 나타낸 것으로 재료시험을 통해 직접 구하였으며, 하니컴 코어에 대한 각 방향별 포아송 비는 참고문헌[11]을 통해 얻었다. 이때, 하니컴 코어의 리본(ribbon)방향은 x축, 폭(transverse)방향은 y축, 그리고 두께(thickness)방향은 z축으로 Fig. 12와 같이 정의하였다.

Table 3. Material properties of WR580/NF4000 glass fabric/epoxy laminate and aluminum honeycomb

Properties	WR580/NF4000	Aluminum Honeycomb
Density (kg/m ³)	1,830	59
Elastic modulus (GPa)	E _x	22.64
	E _y	22.33
	E _z	3.48
Shear modulus (GPa)	G _{xy}	5.85
	G _{yz}	1.40
	G _{xz}	1.40
Poisson's ratio	ν _{xy}	0.15
	ν _{yz}	0.45
	ν _{xz}	0.45

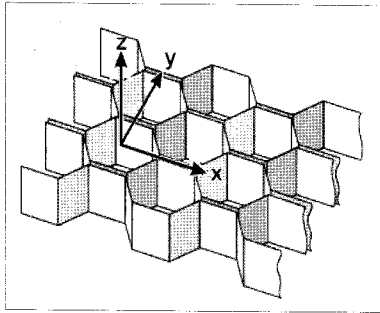


Fig. 12. Direction of honeycomb material

Table 4는 등방성 재질 특성을 갖는 차체에 적용된 알루미늄 보강재와 차체를 지지해주는 지그의 물성을 나타낸 것이며, 참고문헌[12]을 통해 얻었다.

Table 4. Material properties of aluminum 6063 T6 and SUS400

Properties	Aluminum 6063 T6	SUS400
Density (kg/m ³)	2,700	7,850
Elastic modulus (GPa)	68.9	200
Poisson's ratio	0.33	0.30

4.3 유한요소 해석 결과

유한요소 해석 결과는 구조시험에서 측정된 다이얼게이지의 처짐 결과와 동일한 위치에서 각각 비교하였다. Table 5는 각 시험에서 측정된 최대 처짐과 동일한 위치에서의 해석 결과를 비교하여 나타낸 것이며, C3차체의 압축과 비틀림 하중에 대한 경우를 제외하고 시험과 해석에 의한 처짐 결과가 10% 이내로 잘 일치함을 확인하였다. 이때, 10% 이상의 오차가 발생한 C3차체의 압축하중에 의한 결과는 상대적으로 처짐량이 작게 발생하여 오차가 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 차체의 제작과정에서 발생할 수 있는 성형 불량으로 인한 국부적인 물성저하 역시 오차 발생에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 반면, 비틀림 하중에 의한 처짐 결과는 다른 해석 유형에 비해 오차 범위가 많이 발생했다. 이는 시험 차량에 대한 재시험을 통해 변위 측정 및 구속 조건 등의 재확인 필요하지만, 시제차가 제작되어 재시험에 어려움이 있어 수행하지 못하였다. 그러나 시험과 해석결과가 전반적으로 잘 일치하여 제시된 해석 모델은 적절하다고 판단된다.

Fig. 13은 C1차체의 수직하중에 의한 중심부(center)의 처짐을 그래프로 나타낸 것이며, Fig. 14는 C3차체의 수직하중에 의한 측면부(side sill)의 처짐을 그래프로 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 15는 수직하중에 의한 C1과 C3차체의 변형된 형상을 보여준다.

Table 5. Results of displacement for structural test and analysis

Type		Displacements (mm)		Error (%)	Location of dial gauge
		Test	Analysis		
Carriage 1	Vertical load	26.9	26.7	0.7	8
	Compressive load	18.8	19.8	5.3	8
	Torsion	25.0	22.8	8.8	5
Carriage 3	Vertical load	8.9	8.1	9.0	6
	Compressive load	1.6	1.3	18.8	6
	Torsion	19.0	16.0	15.8	1

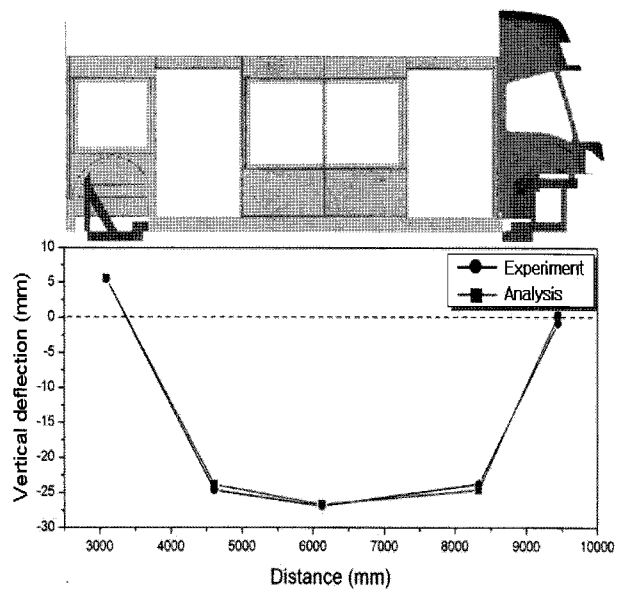


Fig. 13. The deflection graph of vertical load for carriage 1

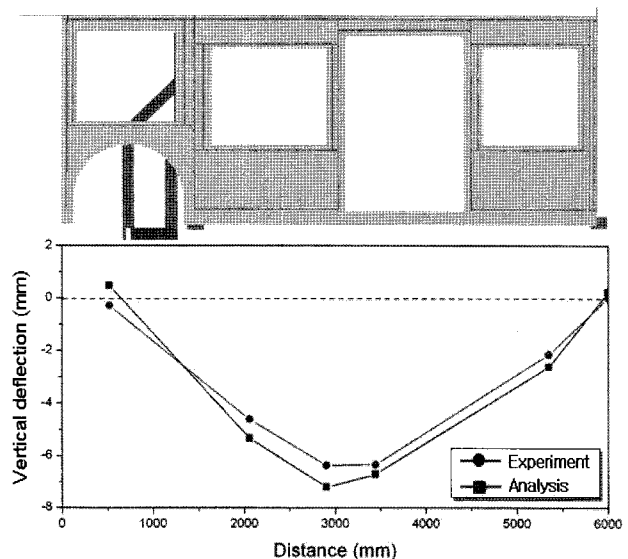
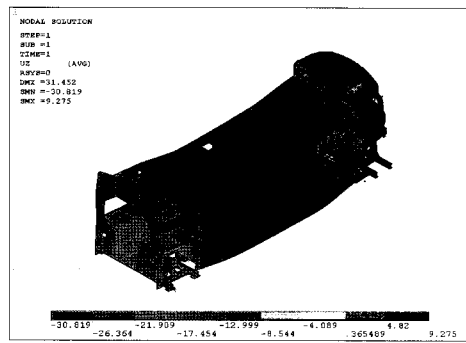
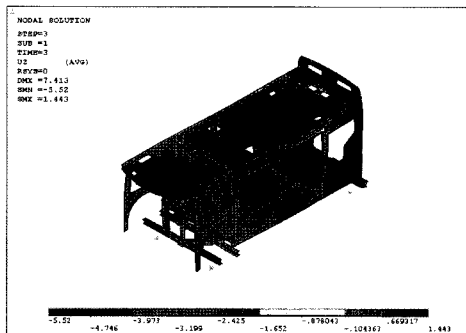


Fig. 14. The deflection graph of vertical load for carriage 3



(a) Carriage 1



(b) Carriage 3

Fig. 15. The contours of displacement for vertical load

고유진동수 해석을 통해 얻은 결과는 Table 6에 나타나 있듯이 1차 굽힘 모드와 1차 비틀림 모드를 시험과 비교하여 정리하였다. C1차체의 비틀림 고유진동수를 제외하고 시험과 해석에 의한 고유진동수 결과가 10% 이내로 잘 일치함을 확인하였다. 이때, C1차체의 비틀림 고유진동수는 10% 이상의 오차를 보였으며, 이는 다른 해석 유형에 비해 오차 범위가 높게 났다. 이에 구조시험의 비틀림 하중의 경우와 마찬가지로 재시험을 통해 가속도 측정센서의 위치 확인 및 구속 조건 등의 확인이 필요하지만 시제작이 제작되어 재시험은 수행하지 못하였다. 차량에 따른 결과에서는 시험과 유한요소 해석에서 C3차체가 C1차체에 비해 고유진동수 결과가 높게 나타났으며, 이는 차체의 길이가 짧은 C1이 굽힘 강성 및 비틀림 강성이 높게 나타난 것으로 판단된다.

Table 6. Results of natural frequency for 1st bending and twisting

Type		Natural frequency (Hz)		Error (%)
		Test	Analysis	
Carriage 1	1 st bending	10.67	11.64	9.1
	1 st twisting	3.47	4.20	21.0
Carriage 3	1 st bending	17.29	17.81	3.0
	1 st twisting	4.79	4.49	6.3

5. 결론

본 논문은 샌드위치 복합재와 적층 복합재가 적용된 바이모달 트램의 차체 구조물에 대해 구조시험 및 유한요소 해석을 통하여 구조 안전성을 평가하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 구조 성능 평가 시험은 JIS E 7105 규정을 적용하여 수행되었으며, 이때, C1과 C3차체에 대해 수직하중, 압축하중, 비틀림 시험, 그리고 고유진동수 시험에 대해 처짐 및 고유진동수를 각각 측정하였다.
2. 수직하중, 압축하중, 비틀림 시험을 통하여 C1차체가 C3차체에 비해 더 많은 처짐이 발생함을 확인하였으며, 이는 C1차체의 길이가 C3차체에 비해 1.4배 정도 길게 제작된 이유로 판단된다.
3. 고유진동수 시험을 통해 얻은 1차 굽힘 고유진동수는 C1차체가 10.67Hz, C3차체가 17.29Hz가 측정되어 10Hz 이상을 만족하였으며, 1차 비틀림 고유진동수는 C1차체가 3.47Hz, C3차체가 4.79Hz의 결과를 확인하였다. 이때, C3차체가 C1차체에 비해 고유진동수 결과가 높게 나타났으며, 이는 C3의 차체 길이가 짧아 굽힘 강성 및 비틀림 강성이 높게 나타난 것으로 판단된다.
4. 구조 해석은 셸 요소와 빔 요소를 적용한 제안된 유한요소 모델을 사용하여 수직하중, 압축하중, 비틀림 및 고유진동수 해석을 수행하였으며, 결과가 10% 이내로 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 추후 응력 및 변형률 결과의 비교 검증에 대한 추가적인 연구를 수행하여 차량 개발 시에 유한요소 해석을 이용한 구조 특성 및 안전성 평가를 통해 소요 시간 및 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 국토해양부의 교통체계효율화사업의 지원에 의하여 수행된 것이며, 이에 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

1. Shin, K.B., You, Y.H., and Suk, H.S.(2002), "Application of Composite Materials for Rolling Stock System," Korean Society for Composites Materials, Vol. 15, No. 5, pp. 66-71.
2. Yoon, H.T., Park, Y.K., Chang, S.K., and Mok, J.K.(2008), "The Functions and Roles of Bimodal Tram in the Public Transportation System," Spring Conference of The Korean Society for Railway, pp. 2443-2446.
3. Leem, S.G., Mok, J.K., Jang, S.K., and Yoon, H.T.(2007), "The

- detail design of Bi-modal Vehicle System,” Spring Conference of The Korean Society for Precision Engineering, pp. 835-836.
4. Choi, S.H., Park, T.W., Lee, S.H., and Moon, K.H.(2007), “Development of the Virtual Driving Environment for the AWS ECU Test Platform of the Bi-Modal Tram,” Autumn Conference of The Korean Society for Railway, pp. 280-287.
 5. Ryu, J., Hwang, B.I., Lee, S.N., and Ryu, H.J.(2008), “Design of Navigation Control System for Bi-Modal Tram,” Spring Conference of The Korean Society for Railway, pp. 1046-1052.
 6. Jeon, Y.H., Park, T.W., Lee, S.H., Kim, D.G., and Moon, K.H. (2008), “Development of the All-Wheel-Steering Algorithm using Dynamic Analysis of the Bi-modal Vehicle,” The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 144-151.
 7. Lee, J.Y., Shin, K.B., and Lee, S.J.(2007), “A Study on Failure Evaluation of Korean Low Floor Bus Structures made of Hybrid Sandwich Composite,” The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 15, No. 6, pp. 50-61.
 8. Japanese Industrial Standard (JIS) E 7105(1994), Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock.
 9. Kim, J.S., Jeong, J.C., Cho, S.H., and Seo, S.I.(2006), “Analytical and Experimental Studies on the Natural Frequency of a Composite Train Carbody,” The Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 30, No. 4, pp. 473-480.
 10. Shin, K.B., Lee, J.Y., Ryu, B.J., and Lee, S.J.(2007), “A Study on Flexural Behaviors of Sandwich Composites with Facesheets of Unequal Thickness,” The Korean Society for Railway, Vol. 10, No. 2, pp. 201-210.
 11. Kim, H.G.(2005), “Strength and Deformation Analysis of Honeycomb Sandwich Composites Considering Local Deformation of Honeycomb Core,” Hanyang University.
 12. Metals Handbook, Vol. 2(1990), “Properties and Selection : nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials,” ASM International 10th Ed.
- 접수일(2009년 3월 30일), 수정일(2009년 5월 7일),
 게재확정일(2009년 8월 5일)