

자동무인경전철 복합재 차체 구조물의 구조 시험 및 해석적 평가

An Evaluation of Structural Test and Analysis for Composites Vehicle Structures of Automatic Guideway Transit

고희영* 신광복†** 조세현*** 김대환***
Ko, Hee-Young Shin, Kwang-Bok Cho, Se-Hyun Kim, Dae-Hwan

ABSTRACT

This paper describes the results of structural test and finite element analysis for rubber wheel-type Automatic Guideway Transit(AGT) made of aluminum honeycomb sandwich composites with WR580/NF4000 glass-fabric epoxy laminate facesheets. The static tests of vehicle structure were conducted according to JIS E7105. These static tests have been done under vertical load, compressive load and 3-point support load. The structural integrity of AGT vehicle structure was evaluated by displacement, stress obtained from LVDT and strain gauges, and natural frequency. And finite element analysis using Ansys v11.0 was done to compare with the results of static test. The result showed that the results of structural integrity for static test were in a good agreement with these of finite element analysis.

1. 서 론

국내 인구의 도시 집중현상으로 인해 자동차 교통량이 급증하여 교통체증 및 환경오염 등과 같은 문제가 심각하게 대두되고 있다. 이에 도심과 부도심 사이의 신개념 대중교통 수단을 도입하는 방안으로 철도 차량의 특징인 정시성, 안정성, 저공해성, 대량 수송성, 에너지 절감성 등을 갖추고, 기존 철도에 비해 건설비와 건설면적이 적게 드는 자동무인경전철(Automatic Guideway Transit, AGT)이 유럽의 프랑스나 일본 등을 중심으로 발전되어 왔다[1-2]. 이러한 자동무인경전철의 가장 큰 특징은 전용 선로에서 자동제어에 의해 완전 무인으로 운행되는 교통시스템으로서 철제 차륜과 고무차륜이 적용되며, 안내방식으로 중앙안내방식과 측면안내방식, 편방안내방식이 사용된다. 이때, 무인운전방식은 기존 철도 차량의 운행 시스템에 비해 인력운영비 절감에 있어서 많은 비용의 절감 효과를 얻을 수 있으며, 기동성 있는 수송수용 대응이 가능하다[3].

현재 국내에서 개발된 자동무인경전철은 고무차륜이 적용되었으며, 경량화를 통한 에너지 효율의 극대화 및 승차 인원의 증대 등을 위해 차체 구조물에 복합재 샌드위치 구조물을 적용하였다. 이때, 샌드위치 복합재는 단일부재로 된 금속재에 비해 굽힘 강성이 높고 피로 수명이 길며, 저항성, 단열성 등이 우수한 특징을 갖는다[4].

본 논문에서는 자동무인경전철의 경량화를 위해 적용된 복합재 차체 구조물의 구조시험과 유한요소 해석을 통하여 구조 안전성을 평가하고 검증된 유한요소 모델을 통하여 설계된 차체 구조물의 보완점을

* 정회원, 한밭대학교, 기계설계공학과, 대학원
†** 교신저자 : 정회원, 한밭대학교, 기계설계공학과, 교수
E-mail : shin955@hanbat.ac.kr
TEL : (042)821-1156 FAX : (042)812-1587
*** 한국화이버(주), 차량사업부

제시하고자 한다. 이때, 차체 구조물에 대한 구조시험은 JIS E 7105 기준에 따라 수행되었으며, 유한요소 해석은 Ansys v11.0을 이용하여 구조시험과 동일한 조건으로 수행하였다.

2. 자동무인경전철의 구성

자동무인경전철은 그림 1과 같이 샌드위치 복합재와 적층 복합재를 차체 구성재료로 선정하여 적용하였다. 이때, 샌드위치 복합재 패널 내부에는 금속 보강재 보를 삽입하여 굽힘 강성을 향상시켰다. 표 1은 자동무인경전철에 적용된 구성 재료를 보여준다.

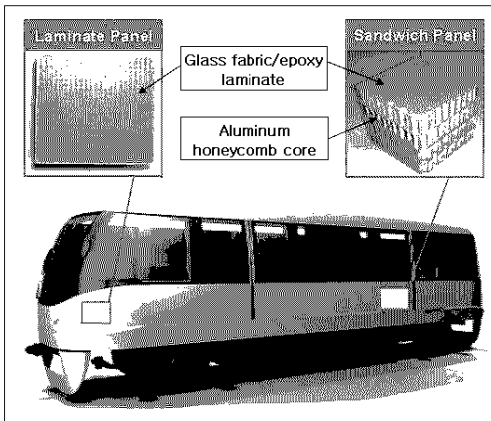


그림 1. 자동무인경전철의 구성

표 1. 차체 적용 재질

Part		Material
Sandwich panel	Facesheet	WR580/NF4000 Glass fabric/epoxy
	Core	Aluminum 5052 honeycomb (3/8"-5052-0.0025")
Laminate		WR580/NF4000 Glass fabric/epoxy
Reinforced beam	Carbody frame	Stainless steel SS400 Extrusion profile
	Under frame	Stainless steel SMA490B Extrusion profile

3. 자동무인경전철의 구조시험

자동무인경전철의 구조시험은 JIS E 7105 기준에 의해서 수행하였다[5]. 그림 2는 복합재 차체 구조물의 구조시험을 위해 설치된 시험장비의 모습을 보여주며, 표 2는 각 하중 시험별 적용된 하중 조건을 보여준다.



그림 2. 구조시험 모습

표 2. 하중 조건

Type	Load condition	Note
Vertical load	220.7 kN	-
Compressive load	63.4 kN+ 490.5kN	수직하중+ 압축하중
3-Point supported load	166.4 kN	-
Torsion	39.2 kN·m	-

3.1 수직하중 시험

수직하중 시험은 대차가 연결되는 전방의 2곳에 대해 평평한 블록에 원형롤러를 사용하여 길이방향 변위를 허용하였고, 후방의 2곳은 V홈 블록에 원형롤러를 사용하여 길이방향 변위는 구속하고 회전을 허용하였다. 이때 분포하중은 그림 3과 같이 하중 실린더를 이용하여 차체의 바닥면에 설치된 로딩바에 적용하였다. 수직하중 시험 결과 언더프레임 중앙에서 최대 〇〇mm가 발생하였고, 측면(side sill)에서는

최대 〇〇mm의 처짐이 발생함을 확인하였다.

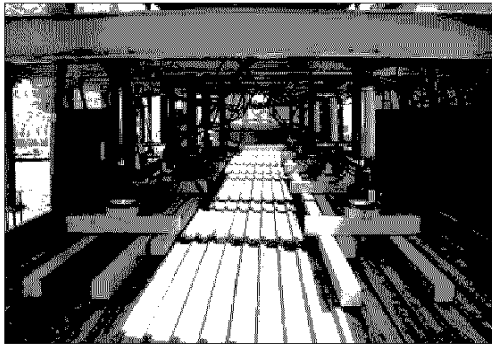


그림 3. 수직하중 시험

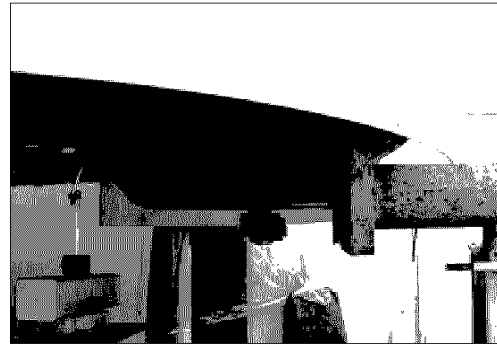


그림 4. 압축하중 시험

3.2 압축하중 시험

압축하중 시험은 대차가 연결되는 전·후방의 4곳을 평평한 블록에 원형롤러를 사용하여 길이방향 및 회전을 허용하였고, 후방의 연결기가 위치되는 곳에 지그를 이용하여 길이방향에 대해 구속하였다. 그리고 수직하중이 가해진 상태에서 그림 4와 같이 전방의 연결기가 위치되는 곳에 하중 실린더를 이용하여 압축하중을 가하였다. 압축하중 시험 결과 언더 프레임 중앙에서 최대 〇〇mm의 처짐이 발생함을 확인하였다. 이때, 압축하중이 가해지는 연결기 부위의 프레임이 좌굴에 의한 소성변형이 발생함을 확인하였다.

3.3 3점지지 하중 시험

3점지지 하중 시험은 차체를 이동시킬 때 지지되는 4곳의 지지점을 지지한 상태에서 하중 실린더를 이용하여 수직하중을 가한다. 이때, 그림 5와 같이 지지점 1곳을 아래로 하강시켜 차체가 3점지지 되도록 하였다. 3점지지 하중 시험 결과 지지점이 내려가는 곳에서 최대 〇〇mm의 처짐이 발생함을 확인하였다.

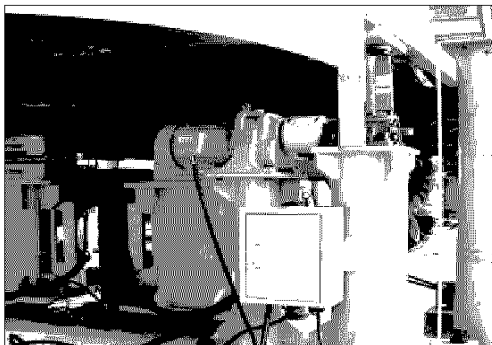


그림 5. 3점지지 하중 시험



그림 6. 고유진동수 시험

3.4 고유진동수 시험

고유진동수 시험은 수직하중과 동일한 지지조건을 적용한 상태에서 하중 이용하여 차체에 굽힘 변형을 가해준 후 그림 6에 나타나 있는 차체 고정용 지그를 이용하여 차체를 고정시킨 후 순간적으로 제거하여 진동을 발생시켰다[6]. 이때, 1차 굽힘 고유진동수가 〇〇Hz가 측정되었다.

4. 자동무인경전철의 구조해석

4.1 유한요소 모델링 및 적용 물성

자동무인경전철의 구조해석은 Ansys v11.0을 사용하여 해석을 수행하였다. 그림 7에 나타나 있듯이 적층 쉘 181 요소(4-node)를 사용하여 샌드위치 패널의 면재와 적층 복합재 및 보강재와 복합재 면재가

적층된 부분을 묘사하였고, 쉘 63 요소(4-node)를 사용하여 프레임 압축계를 모델링하였다. 그리고 솔리드 45 요소(8-node)를 사용하여 샌드위치 패널의 하니컴 심재를 유효등가손상모델링 하였다. 이때, 사용된 요소는 2차원 쉘 요소가 236,120개, 3차원 솔리드 요소가 102,408개이다.

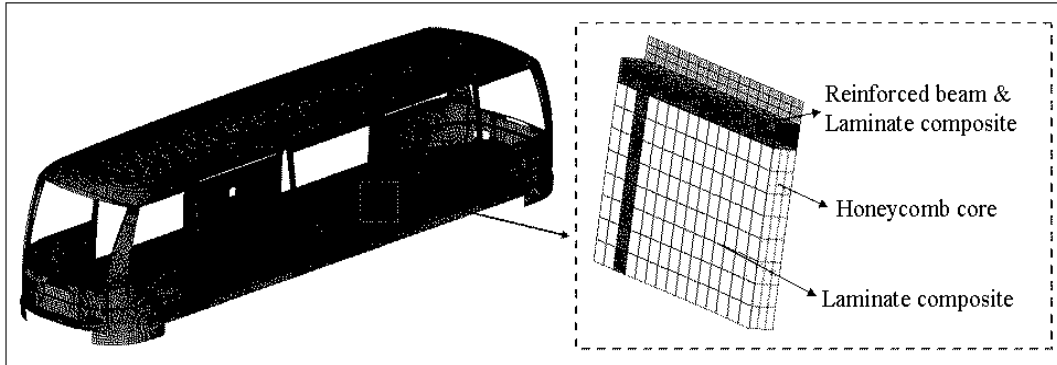


그림 7. 유한요소 모델링

표 3은 차체에 적용된 이방성 재질인 유리섬유/에폭시와 하니컴 코어, 그리고 등방성 재질인 상부 프레임과 언더 프레임에 적용된 보강재에 대한 물성을 나타낸 것으로 각각 물성 시험을 통해 얻었다. 그림 8은 적층 복합재와 하니컴 심재의 물성시험 모습을 보여준다.

표 3. 적용 물성

Properties	WR580/ NF4000	Aluminum Honeycomb	SUS400	SMA490B
Density (kg/m ³)	1,830	59	7,900	7,900
Elastic modulus (GPa)	E _x	22.64	0.693×10 ⁻³	210
	E _y	22.33	0.293×10 ⁻³	210
	E _z	3.48	0.105	
Shear modulus (GPa)	G _{xy}	5.85	0.618×10 ⁻³	-
	G _{yz}	1.40	0.032	-
	G _{xz}	1.40	0.032	-
Poisson's ratio	v _{xy}	0.15	0.33	0.3
	v _{yz}	0.45	0.0001	0.3
	v _{xz}	0.45	0.0001	0.3

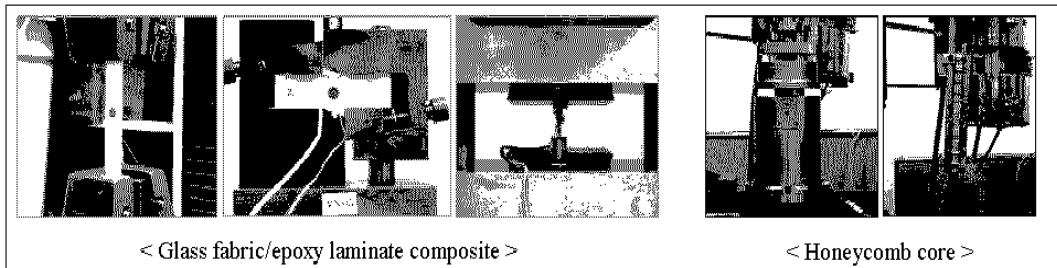


그림 8. 적층 복합재와 하니컴 심재의 기본 물성 시험

4.2 유한요소해석 결과

유한요소해석 결과는 구조시험에서 측정된 다이얼게이지와 동일한 위치에서 각각 비교하였다. 표 4는 각 시험에서 측정된 최대 처짐과 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 이때, 수직하중과 3점지지 하중에 대한 결과는 3.1% 이내로 잘 일치함을 확인하였다. 반면, 압축하중에 대한 결과 오차가 47.8%로 나타났

으며, 이는 압축시험과정 중에 하중점에서 편심이 발생하여 압축하중을 받는 프레임의 소성변형과 국부적 좌굴에 의한 것으로 확인하였다. 이는 추후 시험 차량에 대해 시험을 다시 수행하여 결과를 비교할 예정이다. 그림 9는 수직하중에 의한 언더프레임 측면(side sill)의 처짐을 그래프로 나타낸 것으로 시험 결과와 잘 일치함을 보인다.

표 4. 처짐 결과 비교

Type	Displacement (mm)		Error (%)
	Test	FEA	
Vertical load	○○	○○	3.1
Compressive load	○○	○○	47.8
3-Point supported load	○○	○○	2.7

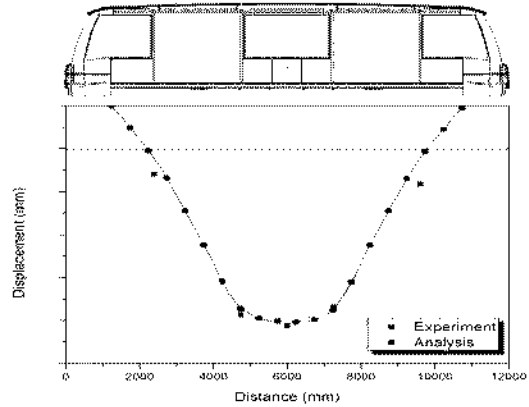


그림 9. 수직하중 처짐 그래프(side sill)

고유진동수 해석 결과는 표 5에 나타나 있듯이 1차 굽힘 고유진동수 결과가 0.9%로 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이때, 시험차량의 시험과 해석에 의한 1차 굽힘 고유진동수 결과가 10Hz이하로 낮은 특성을 보였으나, 유한요소 모델에 대해 언더프레임(side sill)을 보강함으로써 굽힘 고유진동수가 00Hz로 높아짐을 확인하였고, 이를 실차에 적용하여 굽힘 강성을 높였다.

표 5. 굽힘 고유진동수 결과 비교

Type	1st Bending mode (Hz)		Error (%)
	Test	FEA	
Initial model	○○	○○	0.9
Modified with reinforced side sill	-	○○	-

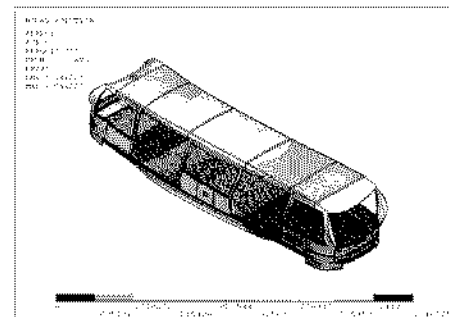


그림 10. 1차 굽힘 고유진동수 결과

자동무인경전철 복합재 차체 구조물에 대한 구조시험과 유한요소모델에 대한 해석의 비교를 통하여 결과가 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 본 연구를 통해 검증된 유한요소 모델을 이용하여 현재 설계된 차체 구조물의 강성 및 강도가 취약한 부위에 대해 해석을 통하여 설계를 보완하고자 한다.

5. 결 론

본 연구는 샌드위치 복합재와 적층복합재가 적용된 자동무인경전철 차체 구조물에 대해 구조시험과 유한요소해석을 통하여 특성 평가 및 검증된 모델을 도출하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 구조 성능 평가 시험은 JIS B 7105 규정에 따라 수행되었으며, 복합재 차체 구조물에 대해 수직하중, 압축하중, 3점지지 하중, 고유진동수 시험에 대해 처짐 및 고유진동수를 각각 측정하였다.

(2) 구조해석은 쉘 요소와 솔리드 요소를 적용하여 수직하중, 압축하중, 3점지지 하중 및 고유진동수 해석을 수행하였으며, 시험과 해석 결과가 압축하중의 경우를 제외하고 잘 일치하는 검증된 유한요소 모

델을 도출하였다.

(3) 자동무인경전철의 시험차량에서 강성 및 고유진동수의 결과가 10Hz 이내로 측정되었으나, 설계된 모델의 보완 시에 검증된 유한요소 모델을 사용하여 제작비용 및 기간의 절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. J. S. Koo, H. S. Han, H. J. Cho (2002), "A Study on Crashworthiness of Rubber Tired AGT", The Korean Society for Railway, Vol. 5, No. 4, pp. 99~105.
2. Hiroyuki, M., Masahisa, M., Yasuyuki, S., Makoto, K., Shinichi, S., Hiroyuki, K. (Jun. 2003), "Automate People Mover System 'Crystal Mover' for Singapore's LTA," Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review, Vol. 40, No. 3.
3. K. S. Lee, J. G. Beak, J. S. Koo, J. S. Jung, H. J. Kim (2000), "Environmental LRT System Design", Autumn conference of The Korean Society for Railway.
4. J. Y. Lee, K. B. Shin, S. J. Lee (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.
5. Japanese Industrial Standard (JIS) E 7105 (1994), Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock.
6. J. S. Kim, J. C. Jeong, S. H. Cho, S. I. Seo (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.