〈 기술논문 〉

오토클레이브 성형된 길이 23m 복합재 철도차량 차체의 구조적 특성평가

김 정 석† · 이 상 진*

(2005년 7월 18 접수, 2005년 9월 22일 심사완료)

Structural Safety Evaluation of An Autoclave Cured Train Carbody with Length of 23m

Jung-Seok Kim and Sang-Jin Lee

Key Words: Tilting Train(틸팅 열차), Composite Train Carbody(복합재 차체), Load Test(하중시험), Autoclave (오토클레이브)

Abstract

This paper explains manufacturing process and experimental studies on a composite carbody of Korean tilting train. The composite carbody with length of 23m was manufactured as a sandwich structure composed of a 40mm-thick aluminium honeycomb core and 5mm-thick woven fabric carbon/epoxy face. In order to evaluate structural behavior and safety of the composite carbody, the static load tests such as vertical load, end compressive load, torsional load and 3-point support load tests have been conducted. These tests were performed under Japanese Industrial Standard (JIS) E 7105 standard. From the tests, maximum deflection was 12.3mm and equivalent bending stiffness of the carbody was 0.81×10^{14} kgf·mm^2. Maximum stress of the composite body was lower than 12.2% of strength of the carbon/epoxy. Therefore, the composite body satisfied the Japanese Industrial Standard.

1. 서 론

1990년 후반부터 차체 재료로 각광받고 있는 신소재 복합재료는 금속재에 비해 차체 무게 절감 효과가 크며, 내구성과 내식성이 우수하다. 또한, 일체성형에 의한 생산비 절감 및 제조 공정 단축, 공기역학적 형상 제작의 용이성 등의 많은 장점이 있다. 이러한 장점을 바탕으로 현재 유럽과 일본 등에서 최고속도 100km/h이하 저속 경량 전철, 모노레일 및 자기부상열차 등의 차체에 적용되고 있다. 그러나 최고속도 180km/h이상의 고속 도시간 열차(high speed intercity train)의 경우에는 지붕구조나 측벽(side wall)등의 국부적인 부분에만 적용되고 있다. 따라서 차체 전체에 복합재가 적용되어 상업운행중인 열차는 없는 실정이며, 복합재 차체의 시험에 대한 자료 역시 전무한 실정이다. 국내에서는 전동차의 전두부 등에 복합재가 일부 적용되고 있으나 하중을 감당하는 차체에는 적용되지 못하고 있다. 철도차량 차체에 대한 연구는 스테인레스 또는 알루미늄 적용 차체에 대한 연구[1~5]가 있으며, 복합재를 적용한 경우는 Lee,[6] Belingardi[7]와 Harte[8]의 연구와 같이 전두부나 저속 경량전철에 대한 연구가 있다. 현재 한국철도기술연구원과 한국화이바가 공동으로 복합재를 적용한 한국형 틸팅열차를 개발 중이다. 본 연구에서는 틸팅열차용 복합재 차체에 대한 강도 및 강성 등의 구조적 특성을 평가하기

† 정회원, 한국철도기술연구원 기존철도사업단
E-mail : jskim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5663 FAX : (031)460-5699
* (주)한국화이바 철도차량사업부

위해 정하중 시험을 수행하였다. 또한, 이를 통해 차체의 구조적 안전성을 평가하였다.

2. 23m 길이를 갖는 복합재 차체 제작

2.1 복합재 철도차량 차체의 특성

Fig. 1은 개발 중인 한국형 틸팅열차의 형상과 편성을 나타낸 것이다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 1편성은 6량으로 구성되며, 편성의 좌우측 선두에 2량의 제어동력차(motorized control car, Mcp)가 1량씩 위치하고 그 사이에 동력차(motorized car, M)와 부수차(trailer car, T) 2량씩이 위치하고 있다. 위의 차종 중 동력차(motorized car)용 차체가 시험에 적용되었다. 본 연구에서 개발중인 철도차량 차체는 Fig. 2와 같이 직조된 CF1263 탄소/에폭시 면재(woven fabric Carbon/Epoxy face)와 알루미늄 허니콤 심재(aluminum honeycomb core)로 구성된 샌드위치 구조로 되어있다.

또한, 차체 측벽의 창문부위와 지붕구조의 에어콘 설치부분은 하중이 집중되는 부분이다. 따라서 이 부분의 보강을 위해 연강(mild steel)으로

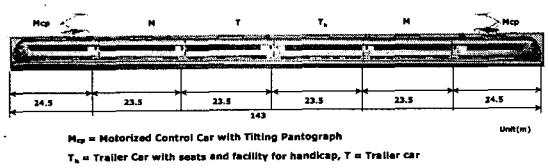


Fig. 1 Formation of Korean tilting train

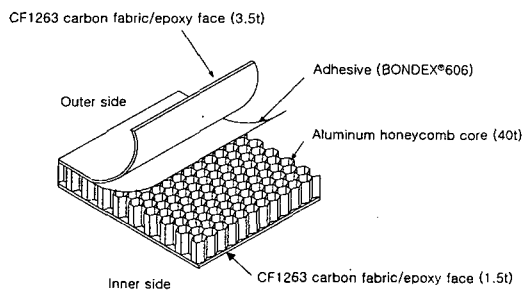


Fig. 2 Sandwich structure with aluminum honeycomb core and woven fabric carbon/epoxy face

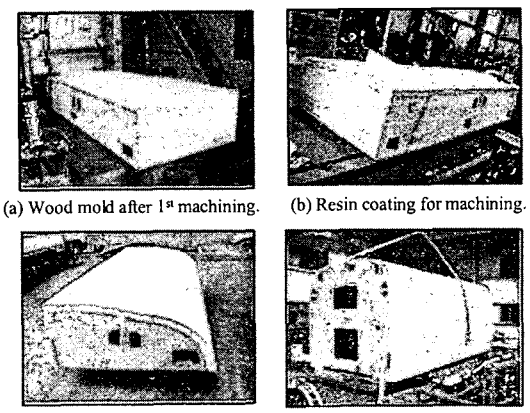
제작된 내부골조(inner frame)가 삽입되어 복합재 차체부분과 동시성형(co-cured)된다. Table 1은 직조된 CF1263 탄소/에폭시 면재의 기계적 물성치를 나타낸 것이다.

2.2 복합재 철도차량 차체의 제작

■ 목형제작 : 길이 23m의 복합재 철도차량 차체를 제작하기 위한 첫 번째 단계로 목형(wood mold)을 제작해야 한다.

Table 1 Material properties of the CF1263 Carbon/Epoxy

Mechanical properties	Values
Tensile elastic modulus in direction of warp, E_{wt} (GPa)	55.5
Tensile elastic modulus in direction of fill, E_{ft} (GPa)	48.3
Compressive elastic modulus in direction of warp, E_{wc} (GPa)	52.6
Compressive elastic modulus in direction of fill, E_{fc} (GPa)	52.1
Shear modulus, G_{12} (GPa)	3.81
Tensile strength in direction of warp, W_t (MPa)	936
Tensile strength in direction of fill, F_t (MPa)	885
Compressive strength in direction of warp, W_c (MPa)	542
Compressive strength in direction of fill, F_c (MPa)	513
Possion's ratio, v_{12}	0.099



(a) Wood mold after 1st machining. (b) Resin coating for machining.

(c) Wood mold after final machining. (d) Assembly of molds.

Fig. 3 Manufacturing process of wood mold

23m 길이의 일체형 목형은 제작상의 문제 때문에 세 부분으로 분리하여 제작하였다. 목형 제작을 위해 먼저 합판 및 목재로 기준면을 제작(Fig. 3(a))한 후 표면에 가공용 수지를 적층(Fig. 3(b))하게 된다. 그리고 CNC 밀링/보링 가공 등을 통해 외형면을 생성(Fig. 3(c))하게 되고 가공이 끝난 각각의 목형을 조립하여 최종적인 목형을 완성(Fig. 3(d))하게 된다.

■ FRP 몰드 제작 : 목형 제작이 완료되면 복합재 차체 제작의 전 단계인 FRP 몰드를 제작하게 된다. FRP 몰드의 제작 단계는 목형준비 및 이형 처리 → 겔 코팅(gel coating) (Fig. 4(a)) → 적층 (Fig. 4(b)) → 보강프레임 설치(Fig. 4(c)) → 성형(Fig. 4(d)) → 탈형 순이다. 이때, FRP 몰드의 재료는 glass fabric/epoxy를 사용하였고 두께는 20mm이다. 성형조건은 상온에서 4~5일 경화 후 60~80℃ 분위기 온도에서 4시간 동안 후경화(post-cure)하였다.

■ 복합재 차체 제작 : 본 연구에서 개발 중인 길이 23m의 철도차량용 복합재 차체는 오토클레이브를 이용하여 제작하였다. 오토클레이브 성형기법을 적용한 이유는 국내에서 철도차량분야에 복합재가 적용된 사례가 전무하고 복합재의 성형공법 중 가장 품질이 우수하기 때문이다. 본 연구에서 개발 중인 차체가 샌드위치 구조이고 내부에 금속재 골조가 삽입되기 때문에 제작성과 제품의 품질향상을 위해 2번의 성형과정을 거쳤다. 먼저 차체의 바깥쪽 면에 해당하는 면재에 대한 성형을 완료한다. 그리고 그 표면에 허니콤과 내부골조를 삽입하고 안쪽 면에 해당하는 카본/에폭시 면재를 적층한 후 2차 성형하여 차체를 완성하게 된다. Fig. 5는 1차 성형을 위한 공정 ((a) 탄소/에폭시 프리프레그의 적층 => (b) 진공처리 => (c) 오토클레이브 성형 => (d) 1차 성형 완료)을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 23m 길이의 대형 복합재 차체 구조물의 일체성형을 위해 길이 25m와 직경 5m를 갖는 오토클레이브를 이용하였다. Fig. 5의 1차 성형을 통해 차체 외곽부위에 대한 제작이 완료되면 금속재 내부골조의 설치와 알루미늄 허니콤 및 내부 탄소/에폭시 프리프레그의 적층 과정을 거친다.

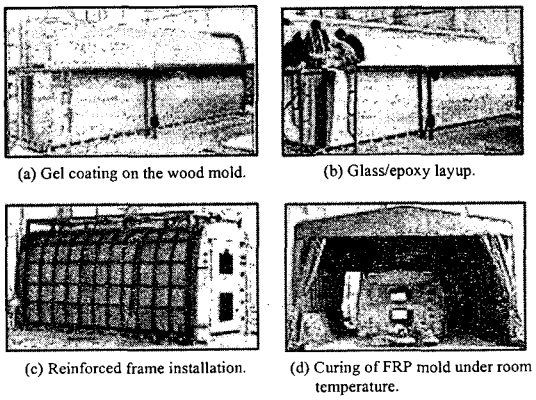


Fig. 4 Manufacturing process of FRP mold

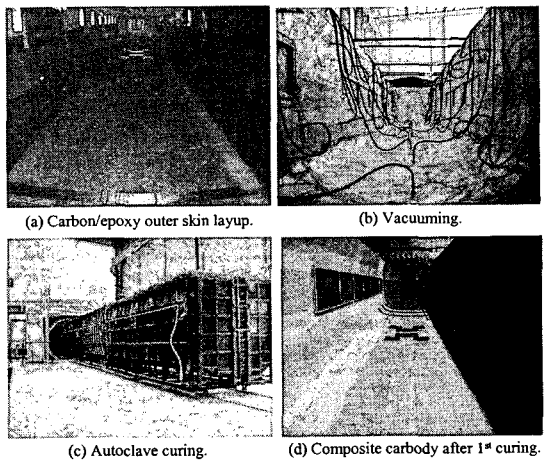


Fig. 5 Curing process for the outer skin

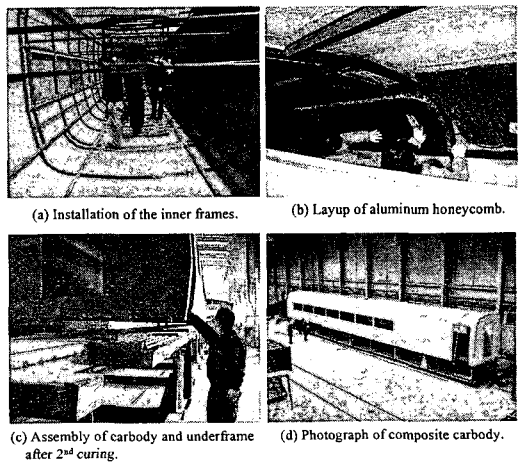


Fig. 6 Curing process for the inner skin

이렇게 2차 적층이 완료된 후 동일한 오토클레이브에서 2차 성형을 하게 된다. Fig. 6(a)와 (b)는 각각 내부골조 설치와 알루미늄 허니콤의 설치장면을 나타낸 것이다. 2차 성형 완료 후 복합재 차체는 Fig. 6(c)와 같이 스테인레스로 제작된 언드프레임과 접착제와 리벳 체결을 동시에 적용하여 조립된다. Fig. 6(d)는 최종적으로 제작 완료된 복합재 철도차량 차체의 형상을 나타낸 것이다.

3. 시험조건

본 연구에서는 이상의 과정을 통해 제작된 복합재 철도차량 차체의 구조적 특성 및 안전성을 시험을 통해 평가 하였다. 본 연구에서는 국내에서 철도차량 차체의 구조안전성 평가를 위해 적용하는 JIS(Japanese Industrial Standard) E7105[9]에 근거하여 아래와 같은 4가지 하중조건하에서 시험을 수행하였다.

- 수직하중 시험 (vertical load test)
- 차단 압축하중 시험 (end compressive load test)
- 비틀림 하중 시험 (torsional load test)
- 3점지지 시험 (three-point support test)

3.1 시험장치 구성

본 연구에서 구성된 시험 장치는 차체 지지부(supporting parts), 하중 적용부(loading parts), 데이터 측정부(measuring parts)와 같이 세 부분으로 나눌 수 있다. 차체 지지부는 Fig. 7과 같이 하중시험 시 차체를 지지하는 부분이다.

하중 적용부는 시험하중을 유압 가력기(hydraulic actuator)를 이용하여 복합재 차체에 적용하는 부분이다. 수직하중은 Fig. 8과 같이 차체의 키스톤 플레이트(keystone plate) 상면에 부과 된다. 본 시험에서는 수직하중을 부과하기 위해 18조의 10ton용량 유압 가력기를 이용하였다. 차단 압축하중을 부과하기 위해서는 연결기 체결부(coupler support)에 1조의 200ton용량 유압 가력기를 이용하였다. 데이터 측정부는 시험시 얻어지는 변형률, 변위량 그리고 가속도 등을 측정하고, 실시간 확인 및 저장하는 부분이다. 본 시험에 적용된 스트레인 게이지는 TML사의 FRA-5-11-1L 모델이고, 계측 시스템은

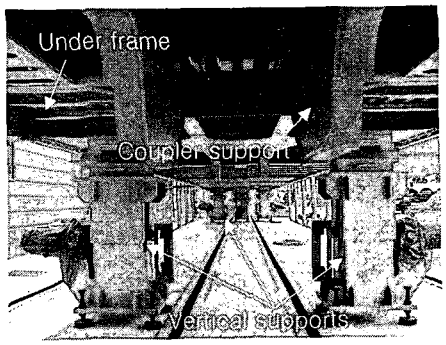


Fig. 7 Load support parts

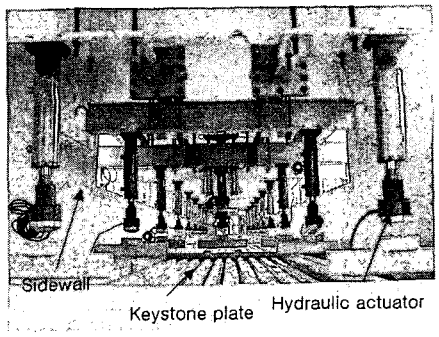


Fig. 8 Hydraulic actuators for the application of the vertical load

CAS사의 AI1600A 모델을 이용하였다.

3.2 시험절차

■ 수직하중시험 : 수직하중은 차량에 승객이 탑승한 만차조건(full weight)하에서 차체의 거동을 고찰하기 위한 하중조건이다. 수직하중은 Fig. 8과 같이 차체의 키스톤 플레이트 상면에 부과된다. JIS규격에서 규정하는 수직하중은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$Vertical\ load = a(C_s + M_p) - B - M \qquad (1)$$

여기서 a는 운행중 차체에 발생하는 상하방향 진동에 의해 유발되는 동하중(dynamic force)을 고려하기 위한 동하중 계수이다. 그리고 Cs는 정비중량(carbody weight in state of working order), Mp는 최대승객중량(weight of maximum riding persons), B는 차체의 무게(body structure weight) 및 M은 시험기자재의 무게(weight of testing machine materials)를 의미한다. 한국형 틸팅열차의

Table 2 Weight information of the motorized car of tilting train

Symbols	Meaning	Values
C_s	Carbody weight in state of working order	296 kN
M_p	Weight of maximum riding persons	63 kN
B	Body structure weight	88.5 kN
M	Weight of testing machine materials	15.5 kN
a	Coefficient of vibrating acceleration	1.3

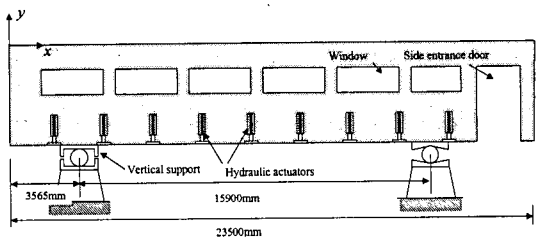


Fig. 9 Setup for the vertical load test

6량 편성 중 최대하중을 받는 동력차의 차체가 시험에 적용되었다. 동력차의 중량정보는 Table 2와 같다. 식 (1)에 근거하여 계산된 수직하중은 약 362kN이다. 수직하중을 비롯한 시험시 부과되는 모든 하중은 5단계로 나누어 서서히 증가시키면서 부과하였다. 하중적용단계는 0% ⇒ 30% ⇒ 50% ⇒ 70% ⇒ 90% ⇒ 100% 순서로 증가시켰다. 적용된 하중의 안정화 상태는 목표하중의 ±2% 이내이면 안정화 된 것으로 판단하였다. 그리고 하중이 안정화된 후 3분간 유지하였다. 수직하중의 시험조건은 Fig. 9와 같다.

■ 차단 압축하중시험 : 차단 압축하중은 충돌시 발생하는 압축하중하에서 차체의 구조안전성을 평가하기 위한 시험이다. 압축하중 시험을 수행하기 위해서는 먼저 170kN의 수직하중을 부과한 상태에서 1200kN의 압축하중을 연결기 체결부에 부과해야 한다. Fig. 10은 압축하중의 시험조건을나타낸 것이다.

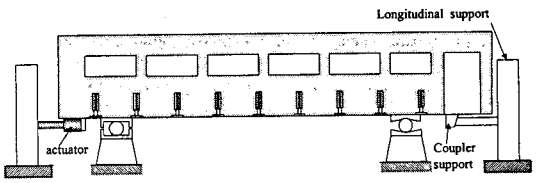


Fig. 10 Setup for the compressive load test

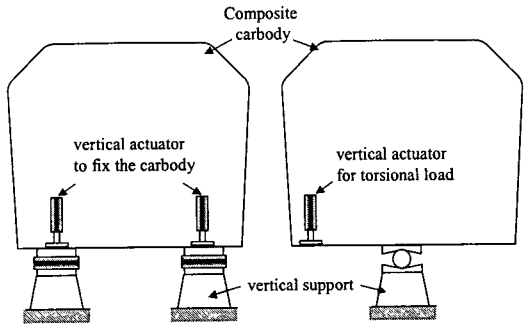


Fig. 11 Setup for the twist load test

■ 비틀림 하중시험 : 비틀림 하중은 철도차량의 운행 중 궤도 비틀림에 의해 유발되는 차체의 비틀림을 모의하기 위한 하중이다. 비틀림 시험시 40kN-m의 비틀림 토크를 가하였다. Fig. 11은 비틀림 시험시의 시험조건을 나타낸 것이다. 비틀림 시험시 차체의 한쪽 끝단은 2점 지지되고 반대쪽은 차체 바디볼스타의 중앙부를 Fig. 11과 같이 로울러 지지조건이 되도록 한다.

■ 3점지지 하중시험 : 본 시험은 조립이나 이동을 위해 리프트(lift)를 이용해서 차체를 들어 올리는 과정에서 4개의 리프트 중 하나에 문제가 발생하여 Fig. 12와 같이 차체가 3점지지 되는 상태에서 차체의 거동을 고찰하기 위한 시험이다. 3점지지 시험을 위해서 먼저 170kN의 수직하중을 부과하고, Fig. 12와 같이 4개의 지지점 중 하나의 지지점을 하강시켜 3점지지 조건을 구현하게 된다. 기존 수직하중, 차단 압축하중 및 비틀림하중 시험시에는 수직지지대가 차체 언드프레임의 바디볼스타 하부에 설치된다. 그러나 3점지지시험의 경우에는 차체의 리프트 잭(lift jack)위치로 이동하여 지지하게 된다.

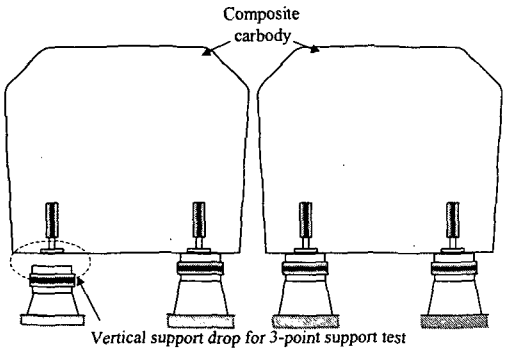


Fig. 12 Setup for the 3-point support load test

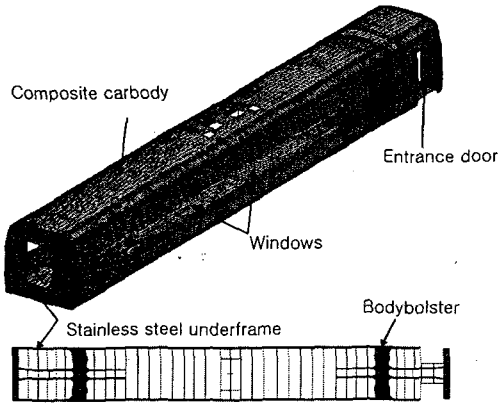


Fig. 13 Finite element modeling of the composite carbody

3.3 변형률 게이지 및 변위 게이지 설치

변형률 게이지와 변위 게이지의 부착위치는 최대 응력 및 최대 처짐이 발생하는 부분이어야 한다. 또한 하중조건에 따라 최대 응력 및 최대 처짐 발생 부분이 달라지므로 이러한 사항을 고려하여 각 하중조건별 유한요소해석을 통해 부착위치를 선정하였다.

Fig. 13은 유한요소 해석을 위한 차체의 모델을 나타낸 것이다. 유한요소해석시 복합재 차체부분은 2차원 쉘 요소(shell element)를 적용하였고, 창문사이의 내부 프레임들은 빔 요소(beam element)를 적용하였다. 그리고 언드프레임의 보강빔 역시 빔 요소로 모델링하였다. 해석은 요한요소전용 해석프로그램인 ABAQUS를 이용하였고, 해석에 적용된 요소(element)는 S4R 쉘 요소와 B31 빔 요소이다. 해석에 적용된 요소수는 37249개이고 절점수는 32955개이다.

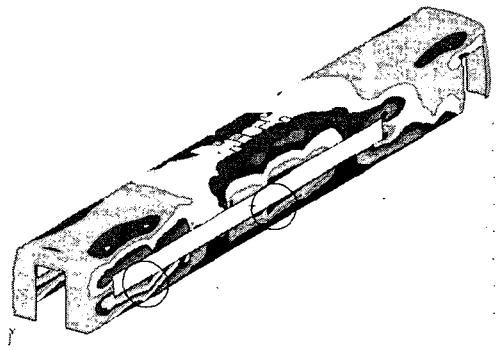


Fig. 14 Stress distribution of composite carbody

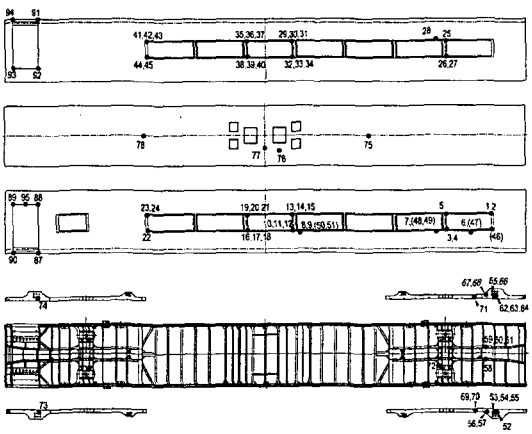


Fig. 15 Location of strain gauges on the composite carbody

Fig. 14는 수직하중하에서 차체 최외부 단층에서의 복합재의 위사(fill)방향에서의 응력분포을 나타낸 것이다. Fig. 14에서 알 수 있듯이 최대응력은 중앙 창문부위와 출입문 반대편에 위치한 창문부위에서 발생하였다. 출입문 반대편에 위치한 창문부위에서의 최대응력은 약 -6.62kgf/mm^{2}이었다.

이상의 유한 요소해석에 근거하여 사용된 총 채널수는 변위게이지를 포함하여 총 219 채널이며 부위별로 응력집중이 발생하는 창문 부위에 36개, 측벽부에 6개, 측출입문부에 4개, 천정부에 4개 및 언드프레임부에 21개의 변형률 게이지를 부착하였다. Fig. 15는 부착된 스트레인 게이지의 위치를 나타낸 것이다. 구조해석결과에 근거하여

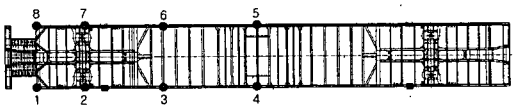


Fig. 16 Location of displacement gauges

Table 3 Design requirements for a train carbody

하중조건	강도조건	강성조건
수직하중	항복강도이하	최대처짐 < 대차간거리의 1/1000
		상당굽힘강성 > $6x10^{14}$ N · mm^2
차단압축하중	항복강도이하	-
3점지지하중	항복강도이하	-
비틀림하중	항복강도이하	-

응력집중이 발생하는 측 출입문과 창문부위에 집중적으로 부착하였다.

스테인레스로 제작된 차체 언더프레임의 경우에는 연결기 설치부에 집중적으로 게이지를 부착하였다. Fig. 16은 각 하중시험시 차체의 변형량을 측정하기 위한 변위계가 설치된 위치를 나타낸 것이다. 변위게이지는 수직하중시 최대처짐이 발생되는 차체 중앙부와 각 하중조건하에서 변형이 심하게 발생될 것으로 판단되는 측 출입문부, 하중지지부 등에 설치하였다.

3.4 설계요구조건

본 시험에 이용된 복합재 적용 철도차량 차체는 구조적으로 도시철도차량의 성능기준(10)을 만족해야한다. 도시철도차량 성능기준은 현재 국내에서 운행 중인 전동차의 성능을 평가하는 기준이다. 도시철도차량 성능기준에서 제시하는 철도차량 차체의 설계요구조건은 Table 3과 같다.

Table 3에서 알 수 있듯이 도시철도 성능기준은 금속재 차량에 대해서만 규정하고 있다. 그 이유는 현재 복합재를 적용한 사례가 전무하기 때문이다. 따라서 복합재를 적용한 철도차량 차체에 적합한 성능기준에 대한 연구는 추후 지속적으로 수행되어야 할 것이다. 본 연구에서는 복합재 적용 부위에 대해 복합재의 파단강도 대비

Table 4 Comparison of finite element and test results

Results	Stress (MPa)		Maximum deflection (mm)
	gauge no. 3	gauge no. 4	
Finite element analysis	-48.1	-63.6	12.8
Test results	-46.4	-66.2	12.3
Error (%)	3.7	3.9	4

시험에서 측정된 응력값을 고찰하여 개발 중인 차체의 구조안전성을 평가하였다.

4. 시험결과

본 연구에서 수행한 4가지 시험은 각각 3회 반복해서 수행되었으며 응력과 처짐은 3회의 시험을 통해 얻어진 값의 평균치이다. 또한 전술한 하중적용단계인 0% ⇒ 30% ⇒ 50% ⇒ 70% ⇒ 90% ⇒ 100% 의 단계별로 하중을 증가시키면서 응력 및 처짐량을 관찰하여 급격한 하중증가에 따른 시험장치들의 불안정성을 최소화하도록 하였다. 수직하중시험에서 얻어진 최대 응력값은 -63.6MPa 로 Fig. 15의 창문부위에 부착된 4번 게이지에서 발생하였다. 이 값은 CF1263 탄소/에폭시 복합재의 위사(fill)방향 파단강도의 약 12.2% 정도였다. 최대 처짐은 12.3mm로 차체 중앙에서 발생하였고, Fig. 16의 4번과 5번 변위 게이지에서 측정되었다. 이렇게 측정된 게이지 3번과 4번에서의 응력과 최대 처짐은 Table 4와 같이 유한요소해석 결과와 비교하였다.

Table 4에서 알 수 있듯이 시험과 해석결과는 4%이내에서 잘 일치하고 있었다. 따라서 유한요소해석 결과에 근거한 변형률 게이지 부착위치는 타당함을 확인할 수 있었다.

일반적으로 철도차량의 경우 차체의 강성측면에서 최대 처짐을 대차간 거리의 1/1000이하가 되도록 제한하고 있다. 그 이유는 그 이상의 변위가 발생할 경우에는 측 출입문부의 심한 변형에 의해 출입문이 닫히지 않을 수 있고, 언드프레임에 설치된 전기장치들 사이에 간섭이 발생할

수 있기 때문이다. 본 연구에서 적용된 차체의 경우 대차간 거리가 15900mm이므로 측정된 최대 처짐은 1/1000이하 처짐 조건인 15.9mm이하 조건을 만족하였다. 이렇게 측정된 처짐량에 근거하여 차체의 등가굽힘강성 (equivalent bending stiffness)을 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$EI_{eqv} = \frac{w_o L_2^2}{384\delta}\left(5L_2^2 - 24L_1^2\right) \qquad (2)$$

여기서 w_o는 단위길이당 분포하중, L_1은 차량끝단에서 볼스타 중심까지의 거리, L_2는 볼스타 중심간 거리 및 δ는 수직하중하의 최대 처짐량이다.

w_o=362kN/23000mm=15.8N/mm

L_1=3565mm, L_2=15900mm, δ=12.3mm

식 (2)와 위와 같은 차량 데이터를 이용하여 등가굽힘강성을 계산하면 $8.1\text{x}10^{14}$ N · mm^2로 Table 3의 도시철도성능기준을 만족하였다.

차단 압축하중조건하에서 최대 응력값은 스테인레스 언드프레임의 연결기 고정부인 67번 게이지에서 발생하였으며 324MPa로 재질의 항복강도인 370MPa 이하로 설계기준은 만족하였다. 차단 압축하중하에서 최대처짐은 Fig. 16의 측출입문부위에 설치된 1번과 8번 게이지에서 발생하였으며 변위는 약 4.43mm 였다.

3점지지 하중하에서 복합재 차체 부위에서 최대 응력값은 차체 중앙부 창문하단에 위치한 12번 게이지에서 발생하였고 값은 99MPa로 파단강도의 약 10.6% 수준이었다. 언드프레임의 경우 최대응력은 103MPa 로 바디 볼스타에 위치한 72번 게이지에서 발생하였으며 항복강도의 30%정도였다.

비틀림 하중하에서 최대 응력은 3점지지 하중시와 동일한 12번 게이지에서 발생하였으며 25MPa이었다. 최대처짐은 측 출입문부인 1번 게이지에서 발생하였으며 변위는 약 9.09mm였다.

5. 결 론

이상의 복합재 적용 철도차량 차체의 시험적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 수직하중조건을 통해 차체의 강성을 대표하는 최대 처짐과 굽힘 강성을 측정하였고, 복합재 차체는 도시철도차량 성능기준을 만족하고 있음을 알 수 있었다.

(2) 수직하중조건을 비롯한 모든 하중조건하에서 금속재 언드프레임의 응력값은 허용범위내에 존재하였다. 복합재 차체부분의 경우 최대응력은 차체의 측 창문부위에 발생하였다. 이때 응력의 최대값은 CF1263 탄소/에폭시 복합재 파단 강도의 12.2% 이내로 강도를 기준으로 약 5 정도의 안전율을 확보하고 있음을 알 수 있었다.

(3) 변위의 경우 수직하중하에서 차체는 양단 단순지지된 빔과 유사한 형태로 변형하여 차체 중앙부에서 최대처짐이 발생하였다. 그러나 압축하중하에서는 압축하중인 언드프레임 하단에 설치된 연결기 설치 브라켓에 부과되므로 변형의 형태는 수직하중조건과 반대방향으로 발생하였다. 또한 차체의 키스톤 플레이트 상면에 수직하중이 부과된 상태에서 압축하중이 부과되므로 압축하중에 의한 차체 중앙부의 변형은 수직하중에 의한 변형과 상쇄된다. 따라서, 압축하중하에서 최대 처짐은 측 출입문부에서 발생하였다.

참고문헌

(1) Jeon, H. Y. and Sung, R. W., 1998, "A Study on the Structural Analysis and Test of an Electric Carbody," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 28~36.

(2) Kim, Y. S., Park, S. H., Beak, N. U. and Kim, D. S., 2003, "Development on the Aluminum Carbody for Rubber-Tired AGT Vehicle," *Proceedings of the 2003 Spring Conference & Annual Meeting of Korean Society of Mechanical Engineering*, pp. 1118~1123.

(3) Yoon, S. C., Baik, K .S., Kwon, S. T. and Kim, M. Y., 2004, "Structure Analysis of Body Structure for Electric Multiple Unit," *Proceedings of the 2004 Autumn Conference & Annual Meeting of Korean Society of Precision Engineering*, pp. 1335~1338.

(4) Chung, J. D., Kim, J. K., Yoon, S. C. and Pyun,

J. S., 2004, "A Safety Evaluation on the Loading Test of EMU's Carbody Having Stainless and Aluminum," *Proceedings of the 2004 Autumn Conference & Annual Meeting of Korean Society of Precision Engineering*, pp. 1525~1528.

(5) Chung, J. D., Kim, J. K., Pyun, J. S., Kim, W. K. and Hong, Y. K., 2004, "On Study the Safety Assessment of Accident Electric Multiple Unit," *Proceedings of the 2004 Autumn Conference & Annual Meeting of Korean Society of Precision Engineering*, pp. 1105~1108.

(6) Lee, Y. S., Kim, J. H., Lee, H. C., Kil, K. N. and Park, B. J., 2000, "A Study the Application of 3D Sandwich Composite Structures to the Double-deck Light Train Carbody," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 3, No. 2, pp. 92~99.

(7) Belingardi, G., Cavtorta, M. P., and Duella, R., 2003, "Material Characterization of a Composite-Foam Sandwich for the Front Structure of a High Speed Train," *Composite Structures*, Vol. 61, pp. 13~25.

(8) Harte, A. M., Mcnamara, J. F. and Roddy, I. D., 2004, "A Multilevel Approach to the Optimization of a Composite Light rail Vehicle Bodyshell," *Composite Structures*, Vol. 63, pp. 447~453.

(9) Japanese Industrial Standard (JIS) E 7105, 1994, Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock.

(10) Urban Transit Rolling Stock Performance and Safety Standard, 2000, Korean Ministry of Construction and Transportation.