

論文

하이브리드 복합재 철도차량 차체에 대한 시험적 연구

김정석⁺, 정종철^{*}, 이상진^{**}

An Experimental Study on the Hybrid Composite Carbody Structure

Jung-Seok Kim⁺, Jong-Cheol Jeong^{*}, Sang-Jin Lee^{**}

ABSTRACT

This paper has performed an experimental study on the hybrid composite carbody of Korean tilting railway vehicle. The hybrid composite carbody has the length of 23m and is comprised of a 40mm-thick aluminium honeycomb core and 2mm-thick woven fabric carbon/epoxy face sheet. In order to evaluate the structural behavior and safety of the hybrid composite carbody, the static load tests such as vertical load, end compressive load, torsional load and 3-point support load tests have been conducted. The test was performed under Japanese Industrial Standard (JIS) E 7105 standard. From the tests, the maximum deflection was 12.3mm and the equivalent bending stiffness of the carbody was 0.81×10^{14} kgf·mm². The maximum strain of the composite body was below 20% of failure strain of the carbon/epoxy face sheet.

초 록

본 논문에서는 하이브리드 복합재 틸팅차량 차체에 대한 시험적 연구를 수행하였다. 시험에 적용된 하이브리드 복합재 틸팅차량 차체는 길이가 23m이며 40mm두께의 알루미늄 하니콤 코어와 2mm의 직조된 탄소/에폭시 면재로 구성된 샌드위치 구조물이다. 하이브리드 복합재 틸팅차량 차체의 구조적 거동과 안전성을 규명하기 위해 수직하중, 차단압축하중, 비틀림하중 및 3점지지 하중조건하에서 정적인 하중시험을 수행하였다. 시험은 JIS E 7105규격에 근거하여 수행되었다. 시험을 통해 수직하중하에서 최대처짐은 최대 12.3mm이며 굽힘강성은 0.81×10^{14} kgf·mm²로 도시철도차량성능기준을 만족하고 있었다. 또한 강도 측면에서도 탄소/에폭시 면재의 파단변형률의 20% 이내로 안전도를 만족하였다.

Key Words : 하이브리드 복합재 차체(hybrid composite carbody), 틸팅열차 (tilting train), 정하중 시험(static load test), 파단변형률 (failure strain)

1. 서 론

철도차량(rolling stock)과 같은 대량운송수단은 궁극적인 기능은 많은 여객과 화물을 보다 빠른 시간에 수송하는 것이 목적이다. 따라서, 철도차량의 고속화를 구현하기 위해서는 차체 및 부품의 경량화, 각종기기의 소형화 및 고기능화 등 다양한 분야에 걸친 기술적 혁신이 선행되어야 한다. 특히, 철도차량 차체의 경량화는 운송량의 증대(capacity increase), 축중감소

(reduction of axle load)에 의한 선로부담감소 및 에너지 절감(energy saving)등 다양한 장점이 있다. 이러한 이유에서 차체 경량화는 지속적으로 진행되어 왔다. 철도차량용 차체 재료로 사용되기 위해서는 강도/강성, 내식성, 용접성, 그리고 가공성 등의 특성이 요구되며 경량화 측면에서는 저비중이 강조된다. 전통적으로 차체 재질로 많이 사용되어온 연강(mild steel)은 재료비가 저렴하고, 연속용접에 의한 기밀성 확보가 용이하며, 재료의 중탄성 계수가 높아 굽힘강성을 높이는 설계가 용이한

*+ 한국철도기술연구원 선임연구원, 교신저자(E-mail:jskim@krii.re.kr)

** 한국화이버 철도차량사업부

장점을 갖고 있으나 부식에 약하고 보수 유지비가 높으며 강도비가 낮은 등의 경량화에 곤란한 단점을 갖고 있다. 한편, 스테인레스 강 (stainless steel)의 경우 비중에 비하여 강도가 높아 효과적인 중량 감량을 꾀할 수 있고 내식성이 양호하여 보수 측면에서도 유리하다. 뿐만 아니라 강도 한계까지 부재를 얇게 할 수 있어서 경량화 효과를 얻을 수 있다. 그러나, 부재 두께의 감소에 의한 경량화에는 한계가 있어 보다 절실한 경량화 요구에 대해서는 강에 비교해 강도중량비가 높은 재료를 사용해야 한다. 이러한 측면에서 도입된 재료가 알루미늄 합금으로 비중이 낮아 경량화 측면에서 유리하고, 연속 용접에 따른 기밀성 확보가 용이하고 알루미늄 특유의 산화피막에 의한 내식성 확보로 보수비 측면에서도 유리하다. 강도와 강성에 있어서, 강도 중량비가 알루미늄 합금이 보통강에 비하여 2~4배 정도이므로 경량화 효과가 높아 최근 전동차나 객차 등의 재질로 많이 사용되고 있다. 1990년 후반부터 차체 재료로 적용되기 시작한 신소재 복합재료는 금속재 철도차량에 비해 차체 무게의 절감 효과가 크며, 내구성, 내식성이 우수할 뿐만 아니라 일체성형으로 인한 생산비 절감 및 제조 공정 단축, 미려한 외관제작 용이 등의 많은 장점을 바탕으로 현재 유럽과 일본에서 경량전철, 모노레일 및 자기부상열차 등의 차체에 적용되고 있다. 그러나 최고속도 180km/h 이상의 고속 도시간 열차(intercity train)의 경우에는 지붕구조나 측벽(side wall) 등의 부분에는 적용되고 있으나, 차체 전체구조물에 적용되어 상업운행중인 열차는 없는 실정이다. 따라서 관련 문헌 역시 드물고 [1-5] 복합재 차체의 시험에 대한 자료 역시 전무한 실정이다. 국내에서는 전동차의 전두부 등에 복합재가 일부 적용되고 있으나 하중을 감당하는 차체에는 적용되지 못하고 있다. 현재 국내에서는 최초 개발중인 한국형 틸팅열차의 차체에 복합재가 적용된다. 따라서 본 연구에서는 현재 개발중인 복합재 차체에 대한 정하중 시험을 수행하였다. 이를 통해 차체의 강도 및 강성 등 구조적 특성을 평가하였다.

2. 철도차량 차체의 시험절차

철도차량 차체의 구조 시험에 대한 기준은 아래와 같은 3가지 규격이 일반적으로 적용된다.

- JIS E7105 : Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock (Japanese Industrial Standard) [6]
- UIC 566 : Loadings of coach bodies and their components (International Union of Railways) [7]
- EN 12633 : Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies (European Standard) [8]

철도선진국인 유럽의 경우 UIC규격에 근거한 시험을 수행해 왔으나 최근에는 EN규격 적용하는 추세이다. 국내에서는 “도시철도차량의 성능시험에 관한 기준[9]”에서 규정하는 것처럼 현재 UIC나 EN보다는 JIS규격을 적용하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서도 JIS규격에 근거하여 복합재 철도차량 차체에 대한 하중 시험을 수행하였다. JIS규격에서는 다음과 같이 총 5가지 철도차량 차체에 대한 하중시험에 대해 규정하고 있다.

- 수직하중 시험 (Vertical load test)
- 차단 압축하중 시험 (End compressive load test)
- 비틀림 하중 시험 (Torsional load test)
- 3점지지 시험 (Three-point support test)
- 고유진동수 측정 시험 (Natural frequency measuring test)

본 연구에서는 이러한 하중조건 중 고유진동수 측정시험을 제외한 정하중 시험을 수행하여 복합재 철도차량 차체의 구조적 특성을 고찰하였다.

2.1 복합재 적용 철도차량 차체의 구조적 특성

본 연구에서 하중시험을 수행하고자하는 복합재 적용 철도차량 차체는 현재 한국철도기술연구원과 한국화이버(주)에서 개발중인 한국형 틸팅열차의 차체로 열차의 편성은 Fig. 1과 같다.

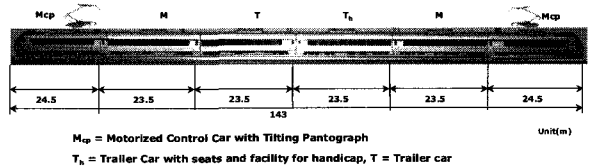


Fig. 1 Formation of Korean tilting train.

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. 본 연구에서 수행한 시험에 적용된 차종은 동력차(motorized car)이다. 복합재 적용 동력차 차체는 Fig. 2와 같이 3종류의 재료와 구조로 구성되어 있다. 차체는 한국화이버(주)의 직조된 CF1263 탄소/에폭시 면재(CF1263 woven fabric carbon/epoxy face)와 알루미늄 허니콤 심재(aluminum honeycomb core)로 구성된 샌드위치 구조로 되어있다. 차체 측벽의 창문부위와 지붕구조의 에어컨 설치부분은 하중을 감당하는 부분이기 때문에 연강(mild steel) 내부골조가 삽입되어 복합재 차체부분과 동시성형(co-cured)되어 제작된다.

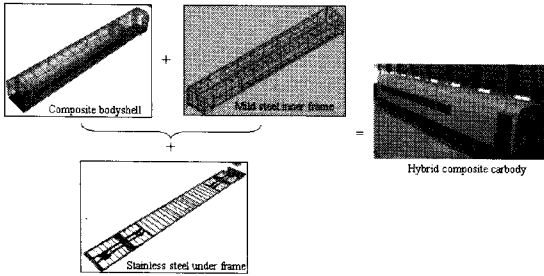


Fig. 2 Configuration of hybrid composite train carbody.

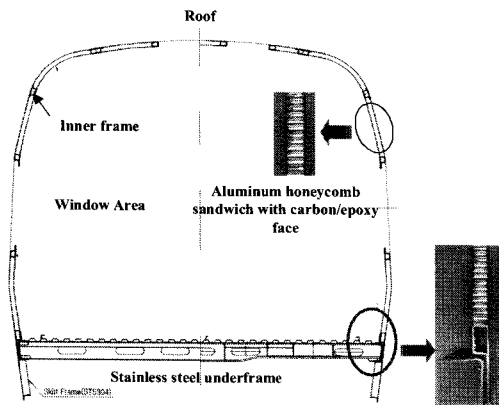


Fig. 3 Hybrid composite carbody section.

Table 1 Weight information of the motorized car

항 목	하중크기 (ton)	비 고
공차중량	46	동력차의 공차중량
정비중량	47.8	공차중량 + 1.8톤 (승무원, 물, 음료 등)
대차중량	18.2	대차 2 set의 무게
차체중량	8.85	. 복합재 차체 (1.2ton) . 언더프레임 (5.3ton) . 내부골조 (1.5ton)
승객하중	6.3	승객1인당중량x좌석수x혼잡계수 (75kgx56석x1.5)
시험기 자체중량	1.55	수직하중을 분포시키기 위한 프레임

이렇게 제작된 차체의 상부구조는 스테인레스 재질의 언더프레임과 접착(adhesive bonding)과 리벳(riveting)의 이중접합에 의해 체결되어진다. Fig. 3은 복합재 적용 동력차 차체의 단면을 나타낸 것이다.

Table 1은 시험에 적용된 동력차 차체의 중량정보를 나타낸 것이다.

3. 시험장치 구성

본 연구에서 구성된 시험 장비는 차체 지지부(supporting parts), 하중 적용부(loading parts), 데이터 측정부(measuring parts)와 같이 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 차체 지지부는 Fig. 4와 같이 수직하중 시험, 비틀림 시험 및 3점 지지시험 시 차체를 수직지지 하기 위한 지지대(vertical supports)는 바디 볼스터(body bolster)의 공기스프링(air spring)이 부착되는 곳(4-point)에 위치하며 비틀림 시험을 위하여 바디 볼스터 센터에 또 하나의 지지대가 위치한다. 총 5개의 수직 지지대는 차체의 레벨링 등을 위하여 자동 높낮이 조절이 가능하도록 하였다. 차단 압축 시험시의 차체는 반력벽(longitudinal support)과 연결기 고정부(coupler support) 사이에 위치한 지지기둥(support bar)을 통해 고정된다. Fig. 5는 하중시험에 적용된 수직지지대의 위치를 나타낸 것이다.

하중 적용부는 시험하중을 유압 작동기를 이용하여 복합재 차체에 적용하는 부분이다. 키스톤 플레이트 상면에는 Fig. 6과 같이 10ton용량의 18조의 유압 작동기로 하중을 분포시키며 커플러 연결부에는 1조의 200ton용량의 유압 작동기로 압축하중을 가한다. 모든 시험하중은 주조정판넬(main control panel)로부터 조정하며 비례제어 밸브를 사용하여 보다 빠르고 정확하게 지정된 하중을 적용할 수 있도록 하였다. 데이터 측정부는 시험시 얻어지는 변형률, 변위량 그리고 가속도 등을 측정하여 실시간 확인 및 저장하는 부분이다. 본 시험에 적용한 스트레인 게이지는 TML사의 FRA-5-11-1L모델을 이용하였고 계측은 CAS사의 AI1600A 모델을 이용하였다.

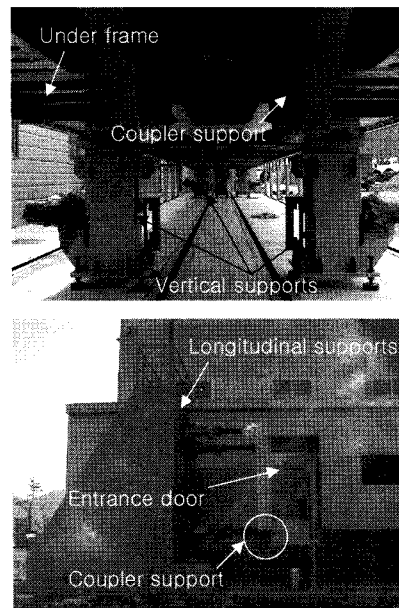


Fig. 4 Vertical and longitudinal supports.

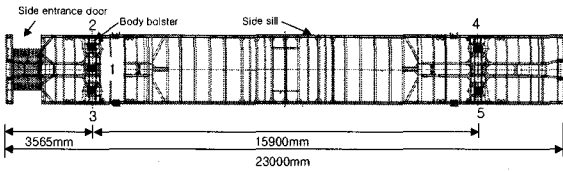


Fig. 5 Location of vertical supports.

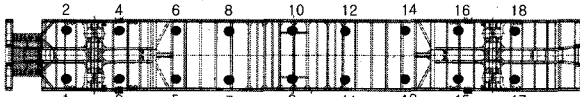


Fig. 6 Location of hydraulic actuators.

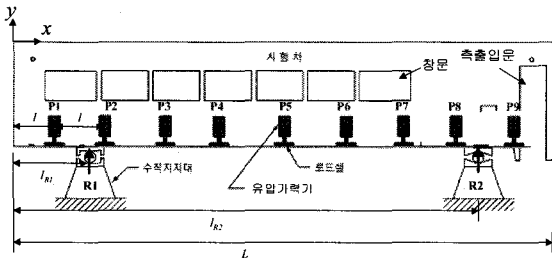


Fig. 7 Setup for vertical load test.

3.1 시험절차

시험차체는 제작, 조립 및 운반되어짐에 따라 불안정한 상태에서 초기운력을 받을 수 있으므로 차체의 안정화를 위하여 예비하중 시험을 실시한다. 예비시험은 최대 수직하중을 적용한 상태로 1시간 이상 유지한다.

- 수직하중시험 : JIS규격에서 규정하는 수직하중은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{수직하중} = 1.3(\text{정비중량} - \text{대차중량} + \text{승객하중}) - (\text{차체 중량} + \text{시험기재질량}) = 36.3\text{톤}$$

여기서 1.3은 운행중 차체에 발생하는 상하방향 진동에 의해 유발되는 하중을 고려하기 위한 동하중 계수이다. 시험시 수직하중을 부과하는 방법은 수직하중용 작동기(18개)를 이용하여 수직하중을 가한다. 하중적용단계는 30% → 50% → 70% → 90% → 100% 순서로 하중을 서서히 증가시킨다. 하중안정화상태는 목표하중의 ±2% 이내이면 안정화 된 것으로 판단하고 하중안정화 후 3분간 유지한다. 수직하중시험의 시험셋업은 Fig. 7과 같다. 수직하중은 차량에 승객이 탑승한 만차조건하에서 차체의 거동을 고찰하기 위한 하중조건이다. 따라서, 차체의 바닥

에 균일분포하중으로 부과해야 한다. 그러나, 본 시험에서와 같이 18조의 유압 작동기 (길이방향으로 9조와 폭방향으로 2조씩)를 사용하여 하중을 부과할 경우 균일분포하중조건과 동일한 굽힘모멘트가 차체에 부과되도록 각 작동기의 하중 (P1에서 P9)을 설정해야 한다. 식(1)은 균일분포하중이 차체바닥에 작용할 경우 각 위치별로 차체에 부과되는 모멘트를 나타낸 것이다. 식(1)에서 w_0 와 M_b 는 각각 단위길이당 균일분포하중 값과 모멘트 값을 의미한다 [10].

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq l_{R1} \quad M_b &= -\frac{1}{2} w_0 x^2 \\ l_{R1} \leq x \leq l_{R2} \quad M_b &= -\frac{1}{2} w_0 x^2 + R_1(x - l_{R1}) \\ l_{R2} \leq x \leq L \quad M_b &= -\frac{1}{2} w_0 x^2 + R_1(x - l_{R1}) + R_2(x - l_{R2}) \end{aligned} \quad (1)$$

또한, 유압 작동기에 의한 집중하중이 부과될 경우의 굽힘모멘트는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} l \leq x \leq 2l \quad M_b &= P_1(l - x) \\ 2l \leq x \leq 3l \quad M_b &= P_1(l - x) + (P_2 - R_1)(2l - x) \\ 3l \leq x \leq 4l \quad M_b &= P_1(l - x) + (P_2 - R_1)(2l - x) + P_3(3l - x) \\ 3l \leq x \leq 4l \quad M_b &= P_1(l - x) + (P_2 - R_1)(2l - x) + P_3(3l - x) + P_4(4l - x) \end{aligned} \quad (2)$$

식(1)과 (2)의 식에서 균일분포하중에 의한 굽힘모멘트와 유압 작동기에 의한 집중하중에 의한 굽힘모멘트가 같아야 한다. 따라서, $x = l_{R1}$ 에서 식(1)과 (2)의 첫 번째식의 값이 같다는 조건에 의해 식(3)과 같이 P_1 의 값을 구할 수 있다.

$$P_1 = -\frac{w_0 l_{R1}^2}{(l - l_{R1})} \quad (3)$$

이상과 같은 방법으로 9개의 길이방향 하중부과위치에의 유압 작동기의 하중을 Table 2와 같이 계산할 수 있다.

Table 2 Hydraulic actuator forces

actuator forces	values (kgf)
$P_1 = P_9$	7930
$P_2 = P_8$	461
$P_3 = P_7$	4303
$P_4 = P_6$	3627
P_5	3628

- 차단 압축하중시험 : 차단 압축하중은 충돌시 발생하는 압축하중하에서 차체의 구조안전성을 평가하기 위한 시험으로 시험대상 차체의 공차중량, 즉 [공차 상태일 때의 차체 질량 - (구조체 질량+시험 기재질량)]=17톤 상태에서 시험하도록 규정하고 있다. 압축하중 시험을 수행하기 위해서는 먼저 17톤의 수직하중을 부과한 상태에서 120톤의 압축하중을 연결기 고정부에 부과한다. 압축하중은 차량이 운행되는 속도 및 용도에 따라 다른데 지하철과 같은 출퇴근용 전동차의 경우는 최고운행속도가 100km/h이하 이므로 압축하중은 50톤으로 규정되어 있고, 도시간을 운행하는 객차의 경우 100톤~120톤으로 규정되어 있는데 본 연구에서는 120톤을 적용하였다. Fig. 8은 압축하중시험시의 시험장치 셋업을 나타낸 것이다.

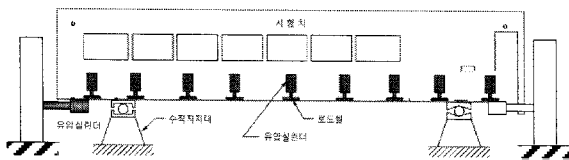


Fig. 8 Setup for compressive load test.

- 비틀림 하중시험 : 3개의 차체 지지대(1번, 4번, 5번)를 이용하여 차체를 3점지지 하고, 15번~18번 실린더를 이용하여 차체를 고정한다. 비틀림 하중은 Fig. 6에서 표기된 유압작동기 배치도상의 1번과 3번 실린더를 통해 차체에 비틀림 하중을 가한다. 철도차량이 운행중 궤도의 비틀림 등에 의해 차체에 전달되는 비틀림 진동에 의해 유발되는 비틀림 모멘트가 통상 4ton-m정도로 알려져 있습니다. 따라서 JIS E 7105에서 4ton-m로 규정하고 있고 본 연구에서도 이 값을 비틀림 토크로 가하였다. Fig. 9는 비틀림 시험시의 시험장치 셋업을 나타낸 것이다.

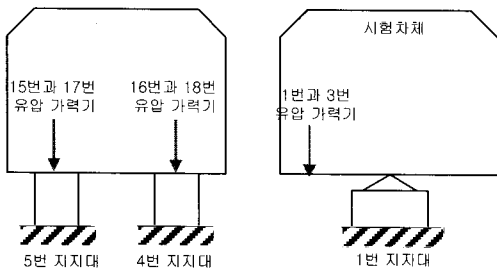


Fig. 9 Setup for twist load test.

- 3점지지 하중시험 : 4개의 차체 지지대(2번, 3번, 4번, 5번)를 이용하여 차체를 4점지지하고 차단압축하중조건과 동일하게 차체의 공차중량에 해당하는 17톤의 수직하중을 가한다. 수직하중이 가해진 상태에서 2번 지지대를 하강하여 차체의 3점지지조건을 구현한다. Fig. 10은 3점지지 하중시험시의 시험장치 셋업을 나타낸 것이다.

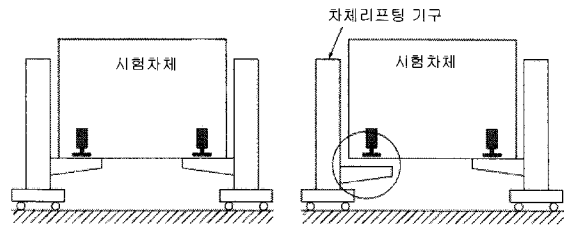


Fig. 10 Setup for 3 points support load test.

3.2 변형을 게이지 및 변위 게이지 설치

변형을 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. 사용된 총 채널수는 변위게이지를 포함하여 총 219 채널이며 부위별로 응력집중이 발생하는 창문 부위에 36개, 측벽부에 6개, 측 출입문부에 4개, 천정부에 4개 및 언더프레임부에 21개의 변형률 게이지를 부착하였다. Fig. 11은 탄소/에폭시 복합재 면재와 알루미늄 하니콤 심재로 제작된 복합재 차체에 부착된 스트레인 게이지의 위치를 나타낸 것이다. 구조해석결과에 근거하여 응력집중이 발생하는 측 출입문과 창문부위에 집중적으로 부착하였다.

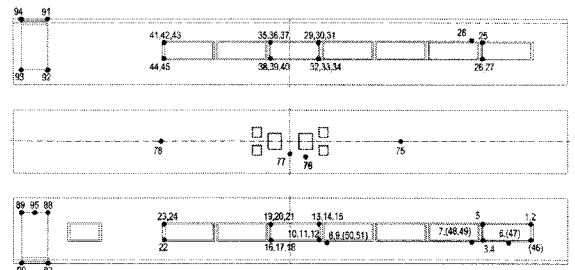


Fig. 11 Location of strain gauges on the composite carbody.

Fig. 12는 스테인레스 강으로 제작된 차체 언더프레임에 부착된 스트레인 게이지의 부착위치를 나타낸 것이다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 압축하중이 부과되는 연결기 설치부에 집중적으로 게이지를 부착하였다.

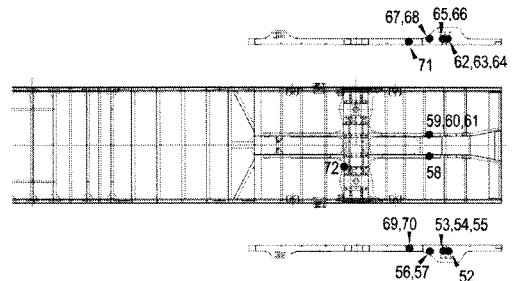


Fig. 12 Location of strain gauges on the steel underframe.

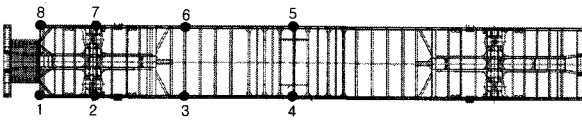


Fig. 13 Location of displacement gauges.

Fig. 13은 각 하중시험시 차체의 변형량을 측정하기 위한 변위계가 설치된 위치를 나타낸 것이다. 차체의 거동이 대칭이기 때문에 한쪽편에만 설치하였다. Fig. 14는 본 연구에서 수행한 시험장치와 시험차체의 형상을 나타낸 것이다.

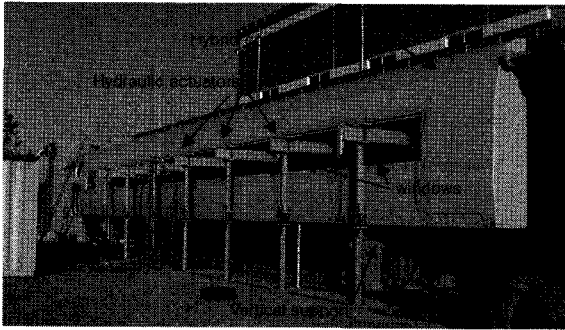


Fig. 14 Photograph of carbody load test.

4. 시험결과 및 토의

수직하중시험에서 최대변형률은 $-1201\mu\epsilon$ 으로 Fig. 11의 창문부위에 부착된 4번 게이지 위치에서 발생하였다. 이 값은 차체 적용 탄소/에폭시의 파단변형률 $9860\mu\epsilon$ 의 약 12.2% 정도였다. 또한 수직하중하에서 최대처짐은 Fig. 13의 변위게이지 4번과 5번 위치에서 발생하였으며 최대처짐은 약 12.3mm였다. 일반적으로 철도차량의 경우 차체의 강성 측면에서 최대처짐이 대차간 거리의 1/1000이하로 설계하도록 되어있다. 그 이유는 그 이상의 변위가 발생할 경우에는 측출입문부의 심한변형에 의해 출입문이 닫히지 않거나 언드프레임에 설치된 전기장치들의 간섭이 발생할 수 있기 때문이다. 본 연구에서 적용된 차체의 경우 대차간 거리가 15900mm이므로 측정된 최대처짐은 12.3mm로 1/1000이하 처짐조건인 15.9mm이하 조건을 만족하였다. 이렇게 측정된 처짐에 근거하여 차체의 등가굽힘강성(equivalent bending stiffness)을 식(4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\text{등가굽힘강성}(EI_{eqv}) = \frac{w_o L_2^2}{384\delta} (5L_2^2 - 24L_1^2) \quad (4)$$

여기서 w_o 는 단위길이당 등분포하중, L_1 은 차량끝단에서 볼스타 중심까지의 거리, L_2 는 볼스타 중심간 거리 및 δ 는 수직하중하의 최대처짐량이다.

$$w_o = 36300\text{kgf}/23000\text{mm} = 1.58\text{kgf}/\text{mm}$$

$$L_1 = 3565\text{mm}, L_2 = 15900\text{mm}, \delta = 12.3\text{mm}$$

식 (4)에 근거하여 차체의 등가굽힘강성을 계산하면 약 $0.81 \times 10^{14} \text{ kgfmm}^2$ 이다. 일반적으로 금속재 즉 알루미늄이나 스테인레스 강으로 제작된 철도차량 차체의 경우 차체의 등가굽힘강성이 $0.6 \times 10^{14} \text{ kgfmm}^2$ 이상을 만족해야 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준[9]을 만족하는 것으로 평가하고 있다. 따라서 본 복합재 적용 차체의 경우도 도시철도성능기준을 만족함을 알 수 있었다.

차단 압축하중조건하에서 최대변형률은 스테인레스 언드프레임의 연결기 고정부인 67번 게이지에서 발생하였으며 응력값으로 환산하면 $32.4\text{kgf}/\text{mm}^2$ 로 재질의 항복강도인 $37\text{kgf}/\text{mm}^2$ 이하로 설계기준은 만족하였다. 차단 압축하중하에서 최대처짐은 Fig. 10의 측출입문부위에 설치된 1번과 8번 게이지에서 발생하였으며 변위는 약 4.43mm였다.

비틀림하중하에서 최대변형률은 차체의 중앙부 창문하단에 12번 게이지에서 발생하였으며 값은 $480\mu\epsilon$ 으로 파단변형률의 약 4.8%였다. 비틀림하중하에서 최대처짐은 측출입문부인 1번 게이지에서 발생하였으며 변위는 약 9.09mm였다.

3점지지 하중하에서 최대변형률은 비틀림하중시 최대변형률이 발생한 곳과 동일한 12번 게이지에서 발생하였고 변형률값은 $1866\mu\epsilon$ 으로 파단변형률의 약 19% 수준이었다. 이상의 결과를 요약하면 Table 3과 같다.

Table 3 Experimental results under static load tests

하중조건	측정항목	측정치
수직하중	최대변형률 (발생부위)	$-1201\mu\epsilon$ (측창문부위)
	최대 처짐 (15.9mm 이하)	12.3mm
	상당굽힘강성 ($0.6 \times 10^{14} \text{ kgfmm}^2$ 이상)	$0.81 \times 10^{14} \text{ kgfmm}^2$
차단압축 하중	최대변형률 (발생부위)	$32.4\text{kgf}/\text{mm}^2$ (연결기 고정부)
3점지지 하중	최대변형률 (발생부위)	$1866\mu\epsilon$ (측창문 중앙)
비틀림 하중	최대변형률 (발생부위)	$480\mu\epsilon$ (측창문 중앙)

4. 결 론

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

1. 수직하중조건을 통해 차체의 강성을 대표하는 최대처짐이나 굽힘강성등은 도시철도차량성능기준을 만족하고 있었다.
2. 차단 압축하중조건을 제외한 하중조건하에서 최대 변형률은 복합재 차체의 창문부위에 발생하였고 이때 변형률의 최대 값은 탄소/에폭시 면재 파단변형률의 20% 이내에 존재하였다. 복합재 차체부분의 최대 변형률은 3점지지 하중조건하에서 발생하였으며 차체 중앙부에 위치한 창문의 하단부에서 발생하였다.
3. 차단 압축하중하에서는 최대응력이 스테인레스 언더프레임부에서 발생하였으나 항복응력 이내에 존재하여 안전도를 만족하였다.

참고문헌

- 1) G. Belingardi, M. P. Cavatorta, R. Duella, "Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train," *Composite structures*, Vol. 61, 2003, pp. 13-25.
- 2) A. M. Harte, J. F. McNamara and I. D. Roddy, "A Multilevel Approach to the Optimization of a Composite Light Rail Vehicle Bodyshell," *Composites Structures*, Vol. 63, 2004, pp. 447-453.
- 3) K. B Shin, D. H. Koo, "A Study on the Evaluation of the Failure for Carbody Structures Made of Laminated Fiber Reinforced Composite Materials Using Total Laminate Approach," *J. of the Korean Society for Composite materials*, Vol. 17, No. 1, 2004, pp. 18-28.
- 4) K. B. Shin and S. J. Lee, "A Study of Manufacturing Technology of hybrid Composite Carbody Structures Using Autoclave Molding Process," *J. of the Korean Society for Composite materials*, Vol. 18, No. 2, 2005, pp. 52-58.
- 5) J. S. Kim, J. H. Lee, and S. K. Cheong, "A Study on the Low Velocity Impact Response of Woven Fabric Composites for the Hybrid Composite Train Bodyshell," *J. of the Korean Society for Composite materials*, Vol. 18, No. 3, 2005, pp. 7-13.
- 6) JIS E7105 : Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock (Japanese Industrial Standard), 1994.
- 7) UIC 566 : Loadings of coach bodies and their components (International Union of Railways), 3rd edition, 1990.
- 8) EN 12633 : Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies (European Standard), 2000.
- 9) 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준, 건설교통부, 2000.
- 10) Gere and Timoshenko, *Mechanics of Materials*, Thomson Information Publishing Group, 1990.