

반복하중을 받는 틸팅열차용 복합재 차체구조의 내구성 평가

Durability Evaluation of a Composite Carbody for Korean Tilting Train under Repeated Loadings

김정석[†] · 정종철* · 서승일**

Jung-Seok Kim · Jong-Cheol Jeong · Sung-Il Seo

Abstract

This paper explains a durability test of a large train car body made of carbon/epoxy composite material. The composite car body with the length of 23m was manufactured as a sandwich structure composed of an aluminum honeycomb core and CF1263 woven fabric carbon/epoxy faces. In order to evaluate durability of the composite car body, it was excited by two 500kN capacity hydraulic actuators installed underneath the body bolster. The natural frequency of the composite car body under full weight condition was found to be 4.33Hz. Based on this result, the excitation frequency and displacement of 5Hz and $\pm 1.0\text{mm}$, respectively, were used as inputs for the durability test. The test was conducted for 2×10^6 cycles. During the test, the nondestructive tests using X-ray radiography and dye penetration method was performed to determine the presence of the cracks. Upon completion of the test, no cracks were found.

Keywords : Hybrid, Composite Material, Tilting Train, Carbody, Durability, Nondestructive test

하이브리드, 복합재, 틸팅열차, 차체, 내구성, 비파괴 검사

1. 서론

철도차량의 차체는 운행 중 선로와의 상호작용에 의해 진동이 발생하게 되고, 지배적인 진동모드는 수직방향 저주파 굽힘 진동(vertical bending)이다. 차체 진동의 크기는 차체의 특성 및 선로의 상태에 따라 결정되는데, 선로나 휠이 마모될수록 증가하게 된다. 이러한 운행 중 발생하는 반복적인 저주파 진동은 차체 구조에 문제를 발생시킬 뿐만 아니라 멀미(travel sickness)를 유발하기도 한다. 이러한 이유에서 일반적으로 철도차량 차체는 골조상태(bare frame)에서 10Hz 이상의 굽힘 고유진동수를 갖도록 설계되어지도록 권고되고 있다.

따라서 철도차량의 개발 시 굽힘 진동에 의해 발생하는

반복하중에 대한 차체의 내구성 평가가 필요하다. 특히 현재 개발 중인 틸팅열차의 차체는 기존 금속재와 다른 탄소섬유 강화 복합소재(carbon fiber reinforced composite material)로 제작되고 있기 때문에 정하중 시험을 통한 구조안전성 검증뿐만 아니라 반복하중조건하에서의 내구성을 평가하는 것은 필수적이다. 복합재료는 기존 금속재에 비해 비강도, 비강성, 내구성과 내식성이 우수[1-2]하여 항공분야에 많이 적용되고 있다. 또한, 일체성형에 의한 생산비 절감 및 제조 공정 단축, 공기역학적 형상 제작의 용이성 등의 많은 장점이 있다. 이러한 장점을 바탕으로 현재 유럽과 일본 등에서 경량전철과 모노레일 등의 차체에 적용되고 있다. 국내에서는 현재 철도차량 전두부와 내장재등 주 하중을 감당하지 않는 2차 구조물(secondary structure)로 적용되고 있는 실정이다.

본 연구에서 개발중인 차체는 이미 정하중 시험을 통한 정적구조안전성 평가[3-5], 고유치 평가를 통한 1차 굽힘 및 비틀림 진동 평가[6-7], 저속충격시험을 통한 충격 하중하에

[†] 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 기존철도사업단

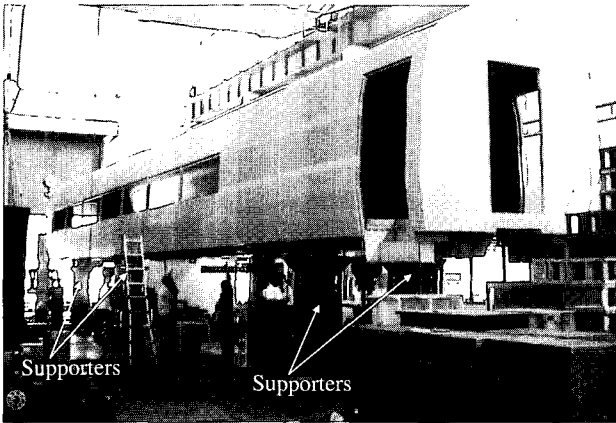
E-mail : jskim@krrt.re.kr

TEL : (031)460-5663 / FAX : (031)460-5699

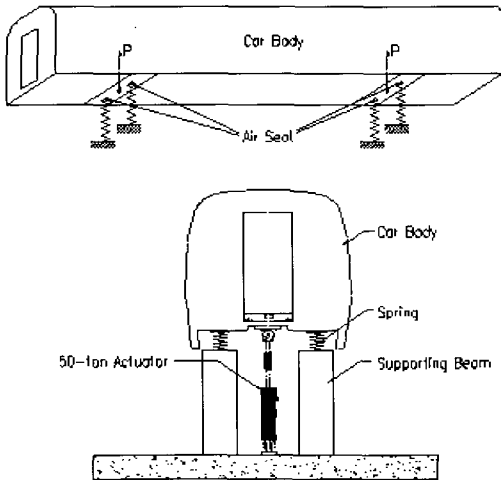
* (주) 한국화이버 차량사업부

**한국철도기술연구원 기존철도사업단

서의 거동평가[8-9] 등을 수행하여 정하중하에서 구조안전성을 확인하고 고유진동특성을 규명하였다. 본 연구에서는 이전 연구와 달리 반복하중조건하에서 차체의 구조안전성을 평가하기 위해 차체 한량을 대상으로 내구성 평가를 수행하였다. 이를 위해 복합재 차체에 대한 만차시 고유진동수를 측정하고, 이를 근거로 반복하중의 주기 및 크기를 결정하였다. 또한 내구성 시험 중 주기적인 비파괴 검사를 통해 차체의 안전성을 평가하였다.



(a) Composite carbody installed on the support beams



(b) Schematic diagram of the test setup

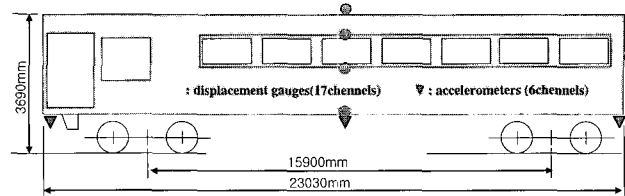
Fig. 1. The set-up for a composite carbody test.

2. 복합재 차체의 내구성 평가시험

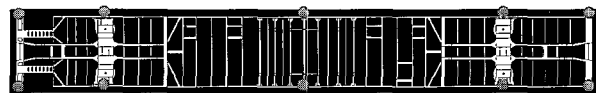
2.1 복합재 차체의 설치

탈링열차용 복합재 차체에 대한 내구성 시험을 수행하기 위해 시험차체를 Fig. 1과 같이 시험대 위에 고정하였다. 차체의 자중과 차체에 적재되는 하중의 중량 및 동하중의 크

기를 고려하여 차체의 전후방 공기스프링 장착 위치에 4조의 지지 빔을 제작하였다. 각 지지빔 상부에는 5개의 코일 스프링(탄성계수=950 kN/m)을 장착하여 시험 중 차체의 중량을 지지하면서 차체 가진시 발생하는 2~3mm의 진동을 흡수할 수 있도록 하였다. 내구성 시험시 동하중을 부과하기 위해 Fig. 1(b)와 같은 500kN 용량의 2조의 유압가력기(hydraulic actuator)를 차체 지지점(차체의 공기스프링 부착위치) 중앙에 설치하였다. 유압가력기는 바디볼스터(body bolster)에 부착된 평판에 볼트로 체결하여 차체의 지지점과 동일선상에서 가력되도록 설치하였다.



(a) Location of accelerometers and displacement gauge installed on the composite carbody.



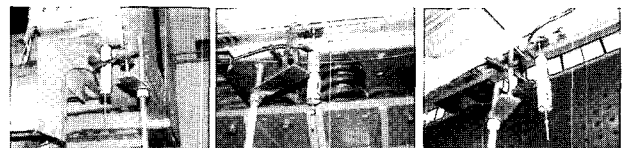
(b) Location of displacement gauge installed on the steel underframe.

Fig. 2. The installation locations of displacement gauges and accelerometers.

본 연구에서는 시험시 차체의 가속도 측정을 위한 가속도계를 언더프레임 하부 사이드실(side sill)의 양 끝단과 중앙 3개소에 설치하였다 (가속도계 모델명 : No. 4370 of B&C). 또한 차체의 처짐을 측정하기 위한 변위계는 차체의 양쪽 사이드실의 끝단, 바디 볼스터 및 차체의 중앙에 10개소와 차체측면 및 지붕에 7개소에 설치하였다 (변위계 모델명 : SPD of Tokyo sokki and DTH of Kyowa). Fig. 2는 가속도계, 변위계이지의 부착위치를 나타낸 것이고, Fig. 3은 차체에 설치된 것을 나타낸 것이다.



(a) Accelerometers placed on the underframe.



(b) Displacement gauges installed under the carbody.

Fig. 3. The accelerometers and displacement gauges installed at the center of the carbody and the car end.

시험 중 차체의 변형률을 측정하기 위해 이전 연구결과에 근거하여[3-5] 변형률 게이지 37개는 복합재 차체에 16개는 금속재 언더프레임에 부착하였다.

복합재 차체의 경우 Fig. 4와 같이 응력집중이 발생하는 창문모서리부에 집중적으로 부착하였다. 본 연구에서 이용된 시험용 복합재 차체는 직조된 CF1263 탄소/에폭시 면재와 알루미늄 허니콤 심재를 갖는 샌드위치 구조로 제작되었다.

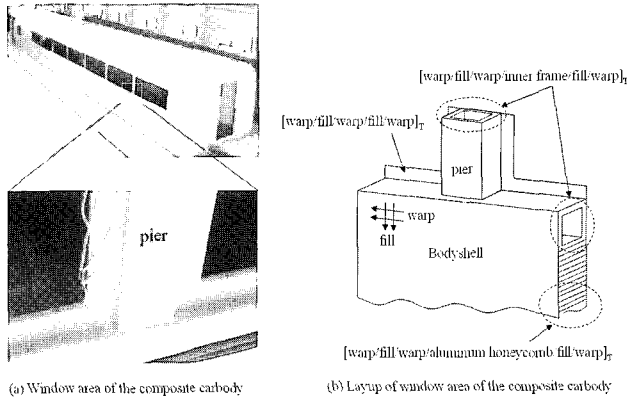


Fig. 4. The photographs and an illustration around the rectangular cutouts for window installation.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 복합재 차체의 창문부위는 부위별로 3가지의 다른 적층구조(layer)를 가지고 있는데, 차체 부위(bodyshell)는 [warp/fill/warp/aluminum honeycomb/fill/warp]T형태의 샌드위치 구조, 창문의 피어(pier)부분은 [warp/fill/warp/inner frame/fill/warp]T로 내장재 설치용 금속재 내부골조를 복합재가 감싸고 있는 구조, 유리창 설치부는 [warp/fill/warp/fill/warp]T의 적층구조를 가지고 있다. 적용된 변형률 게이지는 단축 게이지 26개(FLA-5 -17-1L, Tokyo sokki)와 로젯 게이지 27개(CEA-13- 125UR-120, MM)이다.

Fig. 5는 차체에 부착된 변형률게이지의 위치를 나타낸 것이다.

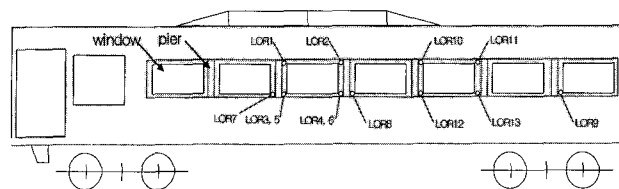


Fig. 5. The locations of the strain gauges placed on the left side of carbody.

2.2 복합재 차체의 가진주파수 및 가진변위 결정

본 연구에서 수행된 복합재 차체의 내구성 평가 시험은 $\pm 0.2g$ 의 진동가속도하에서 2×10^6 사이클 동안 수행되었다. 현재 철도차량 차체의 동하중 시험에 대한 기준이 없기 때문에 본 연구에서는 차체의 동하중계수를 설정하기 위해 JIS(Japanese Industrial Standard) E7105[10]기준을 참조하였다. JIS E7105기준에 의하면 차체 정하중 시험항목 중 수직 하중시험에 운행 중 차체에 발생하는 상하방향 진동에 의해 유발되는 동하중을 고려하기 위해 동하중 계수 0.2g를 고려하도록 되어 있다.

따라서 본 연구에서는 위 규격에 근거해서 0.2g를 동하중 계수로 설정하였습니다. 시험시 차체의 가진 주파수를 결정하기 위하여 만차시의 고유진동수를 측정하였다. 차체의 만차하중은 금속블럭(steel block)을 차체 바닥(keystone plate)에 적재하여 등분포 하중으로 부과하였다. 시험시 적용된 만차하중은 다음과 같다.

$$\text{Full weight loads} = (\text{공차하중} + \text{최대 승객하중} - \text{대차하중}) - \text{bareframe 중량} = 253kN$$

만차시 차체의 고유진동수는 두 가지 지지조건하에서 측정되었다. 첫 번째는 차체를 코일스프링이 설치되지 않은 지지대 위에 설치하고 만차시 차체의 고유진동수를 측정하고, 두 번째는 코일스프링으로 지지하고 측정하였다.

코일스프링이 설치되지 않은 조건에서는 차체의 고유한 진동특성을 얻기 위한 것이고, 코일스프링이 설치된 조건은 실제 시험조건에서의 스프링의 효과를 포함한 진동특성을 얻기 위한 것이다.

스프링이 지지되지 않은 조건에서 차체의 일차 굽힘 고유진동수를 파악하기 위해 차체 중앙에 충격(impact)를 가하고 차체 중앙에 설치된 가속도계를 통해 얻어진 가속도 신호를 FFT분석하였다.

Fig. 6은 이때 측정된 차체의 일차 굽힘 주파수(first bending natural frequency)로 4.33Hz 였다. 이전 연구[6]를 통해 차체 골조상태의 일차 굽힘 고유진동수는 약 10.25Hz 였다.

코일스프링이 설치된 조건에서 차체의 일차 굽힘 주파수를 결정하기 위해 차체의 바디 볼스터 하부에 설치된 유압 가력기를 이용하여 차체를 가진 시켰다. 이를 위해 가력기의 가진변위를 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 로 고정하고, 가력기의 가진 주파수를 1Hz ~ 5Hz까지 변화시키면서 가력기가 받는 하중을 측정하였다.

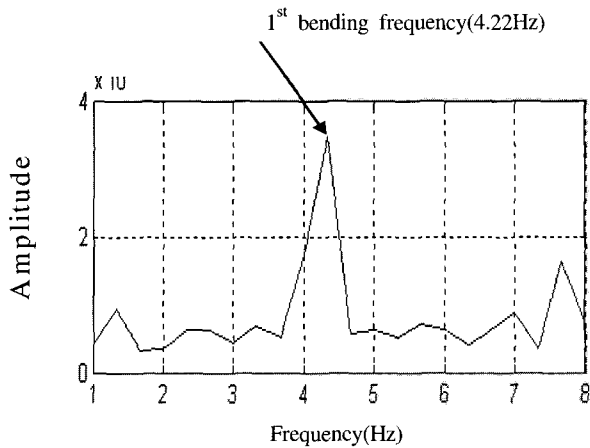


Fig. 6. The natural frequency of the first bending mode of the carbody with full weight load.

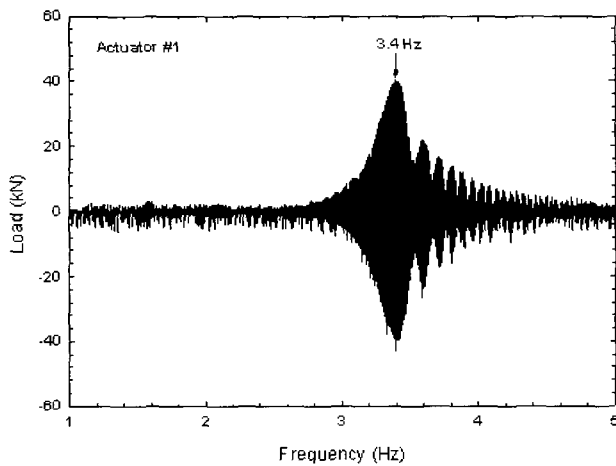


Fig. 7. The frequency of the actuators during frequency sweeping.

Fig.7은 차체 가진 주파수를 1~5Hz까지 스위핑(sweeping) 하면서 측정된 가력기의 하중신호 결과이다. 이 그래프상의 횡축은 가력기의 가진 주파수이며, 종축은 가력기가 받는 하중을 나타낸다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 가력기의 하중은 3.4Hz에서 가장 크게 작용함을 알 수 있다. 따라서, 스프링 지지대에 설치된 차체의 경우 스프링의 강성 효과에 의해 차체만의 강성에 비해 감소함을 알 수 있다. 본 연구에서는 위의 두 결과를 토대로 내구성 시험시 차체 고유진동모드와 시험설치조건하에서의 고유진동모드와의 공진을 회피할 수 있고, 시험에 소요되는 시간을 고려하여 내구성 시험 시 차체의 가진 주파수를 5Hz로 결정하였다.

내구성시험을 위한 가진 주파수가 결정된 후 차체의 가진 폭을 결정해야한다. 이전에 언급한 바와 같이 본 시험에서는 차체를 동하중계수 $\pm 0.2g$ 로 가진해야 하므로 차체의 가진

주파수는 이전에 결정된 5Hz로 고정하였다. 그리고, 유압가력기의 가진변위를 $\pm 0.81mm$ 에서 $\pm 1.5mm$ 까지 변화시키면서 차체에서 발생하는 변형률을 측정하여 이 값이 동하중계수 $\pm 0.2g$ 에 해당하는 변형률이 발생하는 변위를 가진변위로 설정하였다. Table 1에서 0.2g의 동하중계수는 아래와 같이 68.2kN의 정하중으로 환산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{수직동하중}(0.2g) &= (\text{만차하중} + \text{bareframe 중량}) \times (0.2) \\ &= (25.3 + 8.85) \times (0.2) = 68.2kN \end{aligned}$$

또한 가진변위에 따른 변형률을 비교하기 위해 이전 구조 해석 및 정하중 시험시[3] 응력이 많이 발생하는 LOR4, LOR9, LOR10, LOR13 게이지 값과 비교하였다. 이때 Fig. 5에 표기된 변형률 게이지 LOR4, LOR9, LOR10, LOR13에서 발생하는 변형률과 유압가력기의 가진변위의 변화에 따른 변형률을 비교하면 가진변위가 약 1.0mm일 때 가장 근사한 것을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 가진변위를 $\pm 1.0mm$ 로 설정하였다.

Table 1. Strains according to different excitation displacements.

Gauge No.	Dynamic factor ($\pm 0.2g = \pm 68.2kN$)	Excitation displacement(mm)			
		± 0.81	± 0.91	± 1.0	± 1.5
LOR4	$\pm 96\mu\epsilon$	$\pm 776\mu\epsilon$	$\pm 87\mu\epsilon$	$\pm 95\mu\epsilon$	$\pm 144\mu\epsilon$
LOR9	$\pm 222\mu\epsilon$	$\pm 188\mu\epsilon$	$\pm 213\mu\epsilon$	$\pm 237\mu\epsilon$	$\pm 353\mu\epsilon$
LOR10	$\pm 213\mu\epsilon$	$\pm 165\mu\epsilon$	$\pm 190\mu\epsilon$	$\pm 210\mu\epsilon$	$\pm 321\mu\epsilon$
LOR13	$\pm 175\mu\epsilon$	$\pm 126\mu\epsilon$	$\pm 144\mu\epsilon$	$\pm 160\mu\epsilon$	$\pm 243\mu\epsilon$

2.3 비파괴 검사

시험 중 차체 구조물에서 발생하는 균열을 감지하기 위해 비파괴 검사를 수행하였다. 복합재 부분은 X-ray를 이용하였고, 금속재의 용접부는 PT(Dye Penetration Test) 기법을 적용하였다. 복합재 차체는 방사선을 이용한 균열검사 위치는 Fig. 8과 같이 차체 창문 모서리 부분을 중심으로 20개소이다. 특히 복합재 차체부분의 경우 구조해석이나 정하중 시험에 의하면 창문모서리 부위에서 응력집중이 발생하므로 이러한 부위에 대해 균열발생을 중점적으로 관찰하였다.

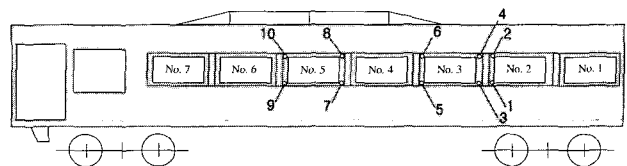


Fig. 8. The ten inspected areas located on the left side of carbody.

언더프레임과 같은 금속재 용접부는 육안 및 PT시험을 수행하여 균열발생여부를 검사하였다. 비파괴 검사는 하중 적재전에 일차로 수행하고, 시험 수행 중 40만 사이클 주기로 수행하였다. 또한 200만 사이클의 내구성 시험 종료후 최종적으로 수행하여 기존의 검사결과들과 비교하였다.

3. 시험결과

이전에 언급한 바와 같이 내구성 평가시험은 만차상태에서 $\pm 0.2g$ 의 수직동하중 조건으로 2×10^6 회를 실시한다. 시험을 수행하기 이전에 부착된 변형률 게이지 및 변위계의 선형성을 확인하기 위하여 최대 적재중량을 9단계로 나누어 적재하면서 차체의 변형률과 변위를 측정하였다.

Fig. 9는 적재중량에 따라 측정된 변형률 게이지 신호의 대표적인 예(변형률 게이지 번호 : LOR10-LOR13)를 보여준다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 변형률 게이지의 신호는 적재중량에 대해 거의 선형성을 보이고 있다. 그러나, 일부 구간에서 보이는 비선형성은 차체바닥의 위치에 따라 단계별로 적재되는 강재블록의 양이 일정하지 않기 때문에 차체에 가해지는 하중분포가 다소 불균형하게 작용함에 따른 것으로 판단된다.

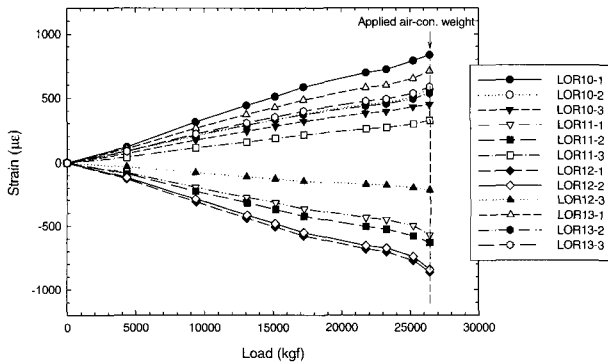


Fig. 9. The measured strains according to the applied load.

시험시 부가하중에 대한 변형률 게이지의 응답을 확인하기 위하여 시험 중 변형률 게이지(LOR10)의 신호를 Fig. 10과 같이 측정하였다. Fig. 10의 신호는 모니터링된 변형률 게이지의 peak/valley 신호이다. 변형률의 변동범위를 정리하여 하단부에 나타내었다. Fig. 10의 하단 그림으로부터 시험이 완료될 때까지 변형률의 변동 범위는 거의 일정함을 알 수 있으며, 반복하중이 균일하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

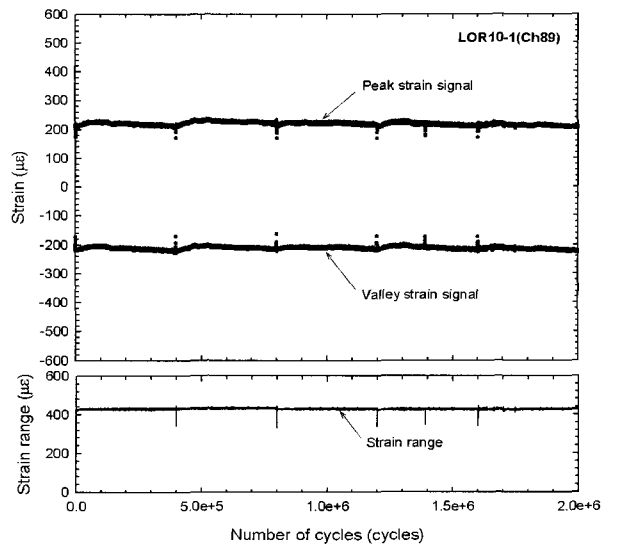


Fig. 10. Peak/valley values of strain measured during test.

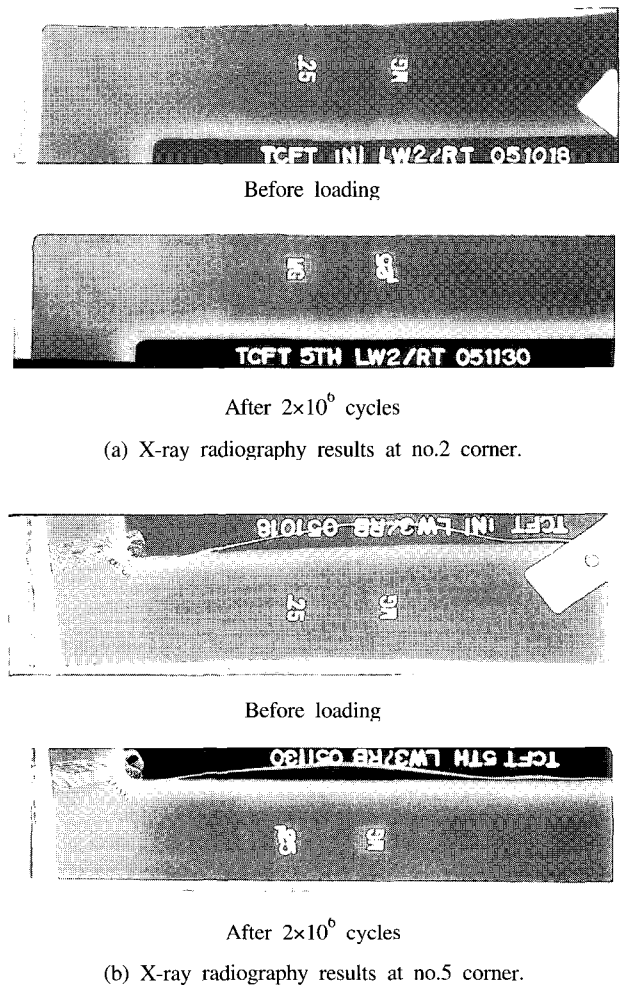
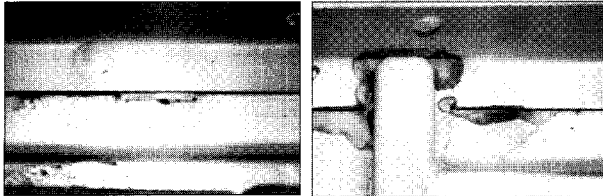


Fig. 11. The X-ray radiography results for the composite carbody at the corners of the windows.

Fig. 11은 시험중 수행된 복합재 차체에 대한 X-ray 검사 결과를 나타낸 것으로 Fig. 8에 표기된 창문부 2와 5에 대한 것이다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 하중적재전에 촬영된 X-ray영상(before loading)과 2×10^6 사이클의 시험 수행 후(after 2×10^6 cycles)촬영된 영상에서는 차이가 없었으며, 균열도 관찰되지 않았다.



(a) Center areas of the stainless steel underframe.



(b) Car end areas of the stainless steel underframe.

Fig. 12. The dye penetration test results conducted after 2×10^6 cycle for the welding areas.

Fig. 12는 2×10^6 사이클 시험수행 후 금속재 언더프레임의 중앙부와 단부에 위치한 용접부에 대한 PT 시험결과를 나타낸 것이다. PT시험결과 균열은 관찰되지 않았다.

이상의 시험을 통해 개발된 복합재 적용 틸팅열차용 차체의 내구성을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 복합재 적용 하이브리드 한국형 틸팅열차용 차체에 대해 반복하중 하에서의 내구성을 평가하였다. 이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 만차조건하에서 측정된 차체의 일차 굽힘 주파수는 4.33Hz 였고, 내구성 시험을 위해 코일스프링위에 설치되었을 경우에는 3.4Hz였다.
2. 시험중 변형률 게이지의 peak/valley 신호의 관찰을 통해 시험이 완료될 때까지 변형률의 변동 범위는 거의 일정함을 알 수 있으며, 반복하중이 균일하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

3. 하중 적재전에 촬영된 X-ray영상, PT시험결과와 매 40만 사이클 주기 및 2×10^6 사이클의 시험 완료 후 수행된 비파괴 검사결과들을 분석한 결과 복합재 차체와 금속재 언더프레임에서는 어떠한 균열도 관찰되지 않았다.

4. 이상의 연구를 통해 하이브리드 복합재 차체는 내구성을 확보하고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. G. Belingardi, M. P. Cavtorta and R. Duella, 2003, "Material Characterization of a Composite-Foam Sandwich for the Front Structure of a High Speed Train," Composite Structures, Vol. 61, pp. 13-25.
2. A. M. Harte, J. F. Mcnamara and I. D. Roddy , 2004, "A Multilevel Approach to the Optimization of a Composite Light rail Vehicle Bodysell," Composite Structures, Vol. 63, pp. 447-453.
3. Kim J. S., Lee S. J. and Shin K. B., 2006, "Manufacturing and Structural Safety Evaluation of a Composite Train Carbody," Composite Structures, Vol. 79, pp. 468-476, 2007.
4. 김정석, 정종철, 한정우, 이상진, 김승철, 서승일, "한국형 틸팅열차용 복합재 차체의 하중적재에 따른 구조적 특성 고찰," 한국철도학회논문집, 제 9권, 제 3호, pp. 251-256, 2006.
5. Kim J. S., Cheong J. C. and Lee S. J., "Numerical and Experimental Studies on the Deformational Behavior of a Composite Train Carbody of the Korean Tilting Train," Composite Structures, Accepted for Publication.
6. 김정석, 정종철, 조세현, 서승일, "복합재 철도차량 차체 고유진동수에 대한 해석 및 시험적 연구," 대한기계학회논문집 A권, 제 30권, 제 4호, pp. 473-480, 2006.
7. Kim J. S. and Cheong J. C., "Natural Frequency Evaluation of a composite Train Carbody with Length of 23m," Composite Science and Technology, Vol. 66, pp. 2272-2283, 2006.
8. Kim J. S. and Cheong S. K., "A Study on the Low Velocity Impact Response of Laminates for Composite Railway Bodysells," Composite Structures, Vol. 77, pp. 484-492, 2007.
9. Lee J. H., Cheong S. K., Kim J. S. and Eum K. Y., "Impact Characteristics and Damage Detection of Woven Carbon/Epoxy laminates for Car Body Structures of a Tilting Train," Key Engineering Materials, Vol. 321-323, pp. 942-945, 2006.
10. Japanese Industrial Standard (JIS) E 7105, Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock, 1994.