

복합재 철도차량 차체의 피로내구시험 절차에 대한 연구

김정석[#]·한성호^{*}·서승일^{*}·정종철^{**}·조세현^{**}

A Study on Fatigue Test Procedure of a Composite Train Carbody

Jung-Seok Kim, Seong-Ho Han, Sung-Il Seo, Jong-Cheol Jeong, Sea-Hyun Cho

Abstract

This paper explains the fatigue test procedure of a composite train carbody. 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 fatigue strength of the composite carbody, the carbody will be excited by two 50-ton capacity hydraulic actuators. The excitation frequency will be measured by natural frequency evaluation test under full weight condition. The test The fatigue test is to be conducted for 2×10^6 cycles. During the fatigue test, the nondestructive tests using X-ray and liquid penetrant will be performed. From crack detection tests, the location and fatigue crack progress will be investigated.

Key Words: Composite carbody (복합재 차체), Fatigue test(피로시험), 가진주파수(Excitation frequency).

1. 서론

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/h 이하 저속 경량 전철, 모노레일 및 자기부상열차 등의 차체에 적용되고 있다. 그러나 최고속도 180km/h 이상의 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 실정이

며, 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 피로 강도 평가하기 위해 피로내구시험 수행을 위한 절차에 대한 연구를 수행하였다.

2. 복합재 차체의 정하중 시험

틸팅열차의 복합재 차체의 구조안전성은 JIS(Japanese Industrial Standard) E7105(9)에 근거한 정하중 시험을 통해 검증하였다. 기 수행된 정하중 시험에서는 아래와 같은 4가지 하중조건

[#] 한국철도기술연구원, 기존철도사업단

^{*} 한국철도기술연구원, 기존철도사업단

^{**} 한국화이바(주) 철도차량사업부

하에서 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)

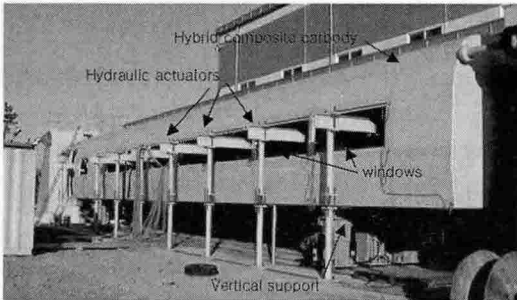


Fig. 1 Photograph of carbody load test.

본 시험에 이용된 복합재 적용 철도차량 차체는 구조적으로 도시철도차량의 성능기준⁽¹⁰⁾을 만족해야 한다. 도시철도차량 성능기준은 현재 국내에서 운행 중인 전동차의 성능을 평가하는 기준이다. 도시철도차량 성능기준에서 제시하는 철도차량 차체의 설계요구조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Design requirements for a train carbody.

하중조건	강도조건	강성조건
수직하중	항복강도이하	최대처짐 < 대차간거리의 1/1000
		상당압힘강성 > $6 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$
차단압축하중	항복강도이하	-
3점지지하중	항복강도이하	-
비틀림하중	항복강도이하	-

수직하중조건을 비롯한 모든 하중조건하에서 급속제 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. 복합재 차체의 피로시험 절차

본 연구에서 수행하고자하는 피로시험의 목적은 정하중 시험에서 고찰할 수 없는 반복하중하에서 취약부위 및 피로균열을 관찰하고 균열진전 특성을 고찰하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 차체의 만차상태에서의 고유진동수와 유사한 주기로 가진하는 방식으로 반복하중을 가하게 된다.

3.1 만차시 고유치 측정시험 절차

피로시험의 가진 주파수를 결정하기 위하여 만차시의 고유진동수를 측정해야 한다. 차체의 만차상태를 모의하기 위해서 먼저 차체에 만차시 승객중량을 고려한 등분포 하중으로 가한다. 이러한 수직하중은 steel block을 차체 바닥 (keystone plat)에 적재하여 구현하였다. 수직하중의 크기는 정하중(1.0g)에 해당하는 25.25톤이다.

$$\begin{aligned} \text{정하중}(1.0g) &= (\text{공차하중} + \text{최대 승객하중} - \text{대차하중}) - \text{bareframe 중량} = 46 \\ &+ 6.3 - 18.2 - 8.85 = 25.25\text{톤} \end{aligned}$$

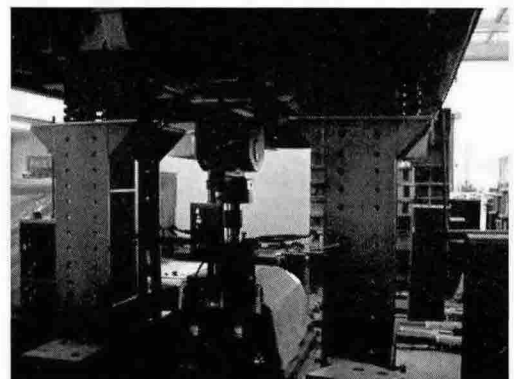


Fig. 2 Supports and hydraulic actuators.

만차시 고유진동수 측정은 Fig. 2와 같이 차체 언드프레임하부에 50톤 용량의 유압액츄에이터 2기를 이용하여 차체를 상하로 가진시켜 측정하였

다. 차체의 고정은 2차현수장치가 설치되는 언드프레임의 4곳에 지지대를 세우고 지지대 상부와 차체는 코일스프링을 이용하여 지지하도록 하였다. 코일스프링은 가진시 차체의 변형을 흡수하게 된다. 시험방법은 액츄에이터의 변위를 $\pm 0.2\text{mm}$ 로 고정하고 액츄에이터의 가진 진동수를 약 0.1Hz/sec 의 간격으로 $2\sim 7\text{Hz}$ 까지 변화시키면서 고유진동수를 측정하게 된다. 가진주파수에 따른 차체의 진동응답을 측정하는 방법으로 액츄에이터의 로드셀에서 측정되는 동하중 신호를 받으며 이를 실시간으로 기록하게 된다. Fig. 3은 시험장치의 설치모습이다.

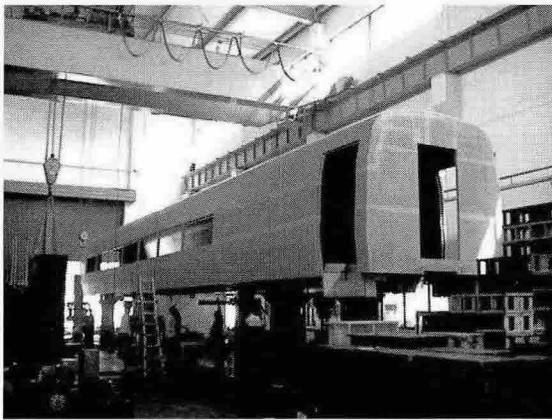


Fig. 3 Setup for fatigue test of composite carbody (side view).

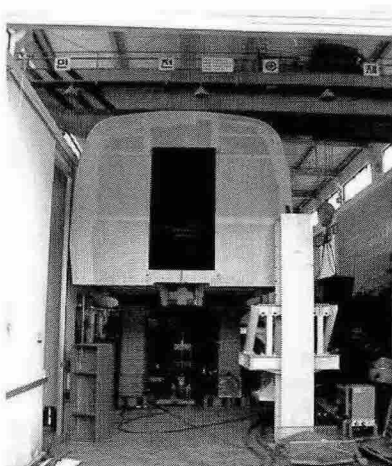


Fig. 4 Setup for fatigue test of composite carbody (front view).

3.2 피로시험절차

이상의 과정을 통해 만차시 차체의 고유진동수가 측정되면 이를 근거로 피로시험을 수행하게 된다. 피로시험절차는 아래와 같다.

- 1) 만차시 고유진동수 측정시험이 완료된 후, 25.25톤의 만차하중(1.0g)을 그대로 유지한다.
- 2) 차체의 에어백 위치에 설치된 코일스프링 사이의 볼스터 위치 2곳에 50톤 용량의 액츄에이터를 각각 설치한다.(Fig. 2 참조)
- 3) 차체의 중앙에 가속도계를 설치한다.
- 4) 만차시 차체의 굽힘 고유진동수와 가까운 대역(약 $4\sim 5\text{Hz}$ 예상)에서 정현파형으로 차체를 가진한다.
- 5) 차체 중앙부에 설치한 가속도계에서 0.2g 의 가속도가 측정되도록 액츄에이터의 변위폭을 조절한다.
- 6) 피로시험 중 차체에 부착된 strain gauge로부터 동용력을 측정한다. Fig. 4 복합체 차체에 부착된 게이지의 위치를 나타낸 것이다.
- 7) 피로시험은 2×10^6 사이클까지 수행한다.

복합체 부위에는 약 20개의 3축게이지가 부착되고 금속재 부위인 언드프레임에는 약 14개의 단축게이지를 부착하였다. 이러한 변형률 게이지는 steel bolck을 적재하면서 단계별로 정적인 변형을 측정하게 되고 이중 취약부위의 게이지에 대해서는 피로시험과정에서 지속적으로 모니터링할 예정이다.

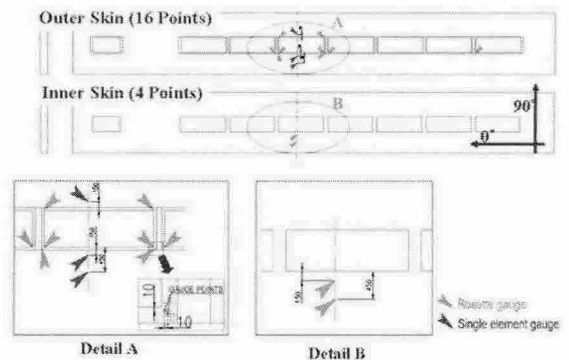


Fig. 5 Location of strain gauges of composite body.

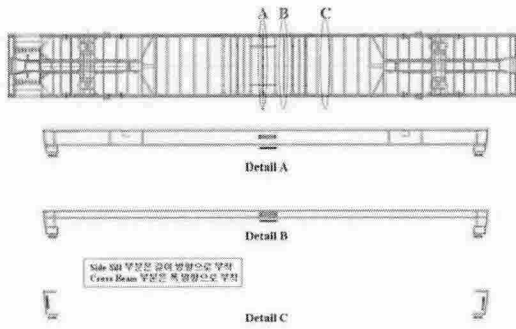


Fig. 6 Location of strain gauges of steel underframe.

3.3 비파괴 검사

피로시험중 중 피로균열발생을 관찰하기 위해 취약부위에 수시로 육안으로 관찰하고 복합재 부위는 X-ray 또는 C-scan을 이용하여 균열, 층간 분리 및 섬유파단을 관찰할 예정이다. 특히 복합재 차체부분의 경우 구조해석이나 정하중 시험에 의하면 창문모서리 부위에서 응력집중이 발생하므로 이러한 부위에 대해 균열발생을 관찰할 예정이다. 복합재 부분에서의 균열 발생 및 성장을 고찰하기 위해 steel block을 적재하기 전에 창문모서리 부위와 같은 응력집중부에 대해 X-ray촬영을 수행하였다. 이후 피로시험 수행중 균열이 관찰되거나 육안관찰이 되지 않을 경우 40만 사이클 수행이후에 다시 X-ray촬영을 수행하여 균열발생을 고찰할 예정이다. Fig. 7은 복합재 차체 창문모서리 부의 X-ray영상이다.

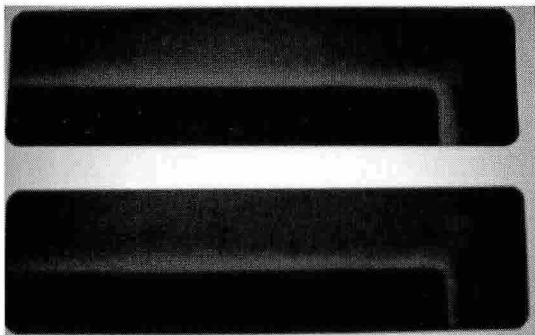


Fig. 7 X-ray images around windows.

언더프레임과 같은 금속재 부분은 육안 및 PT(Dye Penetration Test) 시험을 수행하여 균

열발생여부를 검사할 예정이다. 언더프레임의 경우 용접구조물이기 때문에 용접부에 대해 집중적으로 PT검사를 수행할 예정이다. 복합재 차체와 금속재 언더프레임의 접합부의 경우 내부에서 발생하는 균열에 대한 검사가 사실상 불가능하다. 따라서 피로시험이 종료된후 복합재 차체와 언더프레임을 해체하여 내부균열발생을 고찰할 예정이다.

3.4 파괴 시험

2x10⁶사이클의 피로하중시험을 수행한 후에도 균열이 발생하지 않는 경우에는 가속도 진폭을 단계적으로 증가시켜 균열 발생, 진진하도록 시험을 진행한다. 시험중에는 균열의 발생여부를 수시로 확인한다.

4. 결론

본 연구에서는 현재 개발중인 한국형 틸팅열차에 적용되는 복합재 철도차량 차체에 대한 피로 내구성 검증을 위한 피로시험절차에 대한 연구를 수행하였다. 본 시험절차에서는 피로시험시 부과되는 하중의 주기를 결정하기 위해 만차상태에서의 차체의 고유진동수를 결정하고 이에 근거하여 피로시험시 피로하중의 주기를 결정하였다. 또한 피로시험중 균열발생을 관찰하기 위해 X-ray 및 염료침투기법을 적용할 예정이다.

참고문헌

- (1) H. Y. Jeon and R. W. Sung, "A Study on the Structural Analysis and Test of an Electric Carbody," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 12, 1998, pp. 28-36.
- (2) Y. S. Kim, S. H. Park, N. U. Beak and D. S. Kim, "Development on the Aluminum Carbody for Rubber-Tired AGT Vehicle," Proceedings of the 2003 Spring Conference & Annual Meeting of Korean Society of Mechanical Engineering, 2003, pp. 1118-1123.

- (3) S. C. Yoon, K. S. Baik, S. T. Kwon and M. Y. Kim, "Structure Analysis of Body Structure for Electric Multiple Unit," Proceedings of the 2004 Autumn Conference & Annual Meeting of Korean Society of Precision Engineering, 2004, pp. 1335-1338.
- (4) J. D. Chung, J. K. Kim, S. C. Yoon and J. S. Pyun, "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, 2004, pp. 1525-1528.
- (5) J. D. Chung, J. K. Kim, J. S. Pyun, W. K. Kim and Y. K. Hong, "On Study the Safety Assessment of Accident Electric Multiple Unit," Proceedings of the 2004 Autumn Conference & Annual Meeting of Korean Society of Precision Engineering, 2004, pp. 1105-1108.
- (6) Y. S. Lee, J. H. Kim, H. C. Lee, K. N. Kil and B. J. Park, "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, 2000, pp. 92-99.
- (7) G. Belingardi, M. P. Cavtorta and 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.
- (8) A. M. Harte, J. F. Mcnamara and I. D. Roddy, "A Multilevel Approach to the Optimization of a Composite Light rail Vehicle Bodyshell," Composite Structures, Vol. 63, 2004, pp. 447-453.