

< 기술논문 >

복합재 철도차량 차체 고유진동수에 대한 해석 및 시험적 연구

김정석[†] · 정종철^{*} · 조세현^{*} · 서승일^{**}
(2005년 7월 27일 접수, 2006년 2월 22일 심사완료)

Analytical and Experimental Studies on the Natural Frequency of a Composite Train Carbody

Jung-Seok Kim, Jong-Cheol Jeong, Sea-Hyun Cho and Seong-Il Seo

Key Words: Tilting Train(틸팅 열차), Composite Train Carbody(복합재 차체), Natural Frequency(고유진동수), Bending Mode(굽힘모드), Experimental Study(시험적 연구)

Abstract

This paper explains analytical and experimental studies to evaluate the natural frequency of a composite carbody of Korean tilting train. The composite carbody with length of 23m was manufactured as a sandwich structure composed of 40mm-thick aluminium honeycomb core and 5mm-thick woven fabric carbon/epoxy face. From the finite element analysis, the 1st bending and 1st twisting natural frequency of the composite carbody were 11.67Hz and 14.4Hz, respectively. In order to verify the analytical results, the natural frequency measuring tests were performed. The measured 1st bending and twisting natural frequencies of the composite carbody were 10.25Hz and 11.0Hz, respectively. Both of these results satisfied the design requirement.

1. 서론

철도차량과 같은 대형 구조물의 경량화는 차량을 구성하는 다양한 부 구조물(subparts)들의 중량을 줄일 수 있는 시너지 효과(synergy effect)를 유발할 수 있다. 예를 들면, 차량의 경량화는 추진 시스템(traction system), 현가장치(suspension), 제동장치(brakes)와 같은 구성품들의 중량감소를 유도할 수 있다. 차체의 경량화를 위해 1990년 후반부터 차체 재료로 각광받고 있는 신소재 복합재료는 금속재에 비해 차체 무게 절감 효과가 크

며, 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 경량전철, 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 스테인리스 또는 알루미늄 적용 차체에 대한 연구⁽¹⁻⁵⁾가 있으며, 복합재를 적용한 경우는 Lee,⁽⁶⁾ Belingardi⁽⁷⁾와

[†] 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원
기존철도기술개발사업단
E-mail : jskim@krii.re.kr
TEL : (031)460-5663 FAX : (031)460-5669
^{*} (주)한국화이바 철도차량사업부
^{**} 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단

Harte⁽⁸⁾의 연구와 같이 전두부나 저속 경량전철에 대한 연구가 있다. Shin⁽⁹⁾ 등은 복합재 틸팅열차 차체에 대한 환경내구성에 대한 연구를 수행한 바 있다.

현재 한국철도기술연구원과 (주)한국화이바가 공동으로 복합재를 적용한 한국형 틸팅열차를 개발 중이다. 이전에 언급한 바와 같이 차량 경량화는 다양한 장점이 있지만 이러한 경량화는 강성저하를 유발하는 경우가 많다. 철도차량의 경우 경량화에 의한 강성저하는 레일에 의해 유발되는 저주파 진동과의 공진문제 때문에 반드시 회피설계를 해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 틸팅 열차용 복합재 적용 차체의 고유진동수를 해석 및 시험적 기법을 이용하여 평가하였다.

2. 틸팅 열차용 복합재 차체의 고유치 해석

2.1 복합재 철도차량 차체의 특성

현재 개발 중인 한국형 틸팅열차의 형상은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 한국형 틸팅열차의 차체는 직조된 CF1263 탄소/에폭시 면재(woven fabric Carbon/Epoxy face)와 알루미늄 허니콤 심재(aluminum honeycomb core)로 구성된 샌드위치 구조로 되어 있다. 차체의 외부스킨(outer skin)은 3.5mm, 내부스킨(inner skin)은 1.5mm의 두께를

가지며 40mm두께의 알루미늄 허니콤이 적용되었다. 또한, 차체 측벽의 창문부위와 지붕구조의 에어컨 설치부분은 하중이 집중되는 부분이다.

따라서 이러한 부분에는 Fig. 2와 같이 보강과 구성품들의 설치를 편리하게 하기 위해 연강(mild steel)으로 제작된 내부프레임(inner frame)이 삽입되어 복합재 차체부분과 동시성형(co-cured)된다. 본 연구에서 제작되는 복합재 철도차량 차체는 길이가 30m이고 직경이 5m인 대형 오토클레이브를 이용하여 성형하였다. Table 1은 직조된 CF1263 탄소/에폭시의 기계적 물성치를 나타낸 것이다.

위와 같이 성형된 복합재 차체부분은 스테인리스 강으로 제작된 언더프레임(underframe)과 리벳과 본딩을 동시에 적용한 체결법으로 조립된다. 본 차량의 언더프레임은 하중을 감당하는 정도에 따라 Table 2와 같은 다양한 스테인리스 강으로 제작된 용접구조물이다.

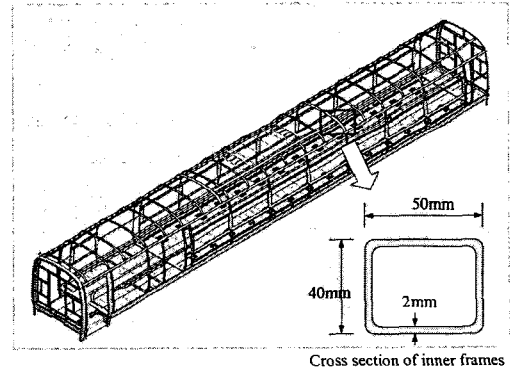


Fig. 2 Steel inner frames

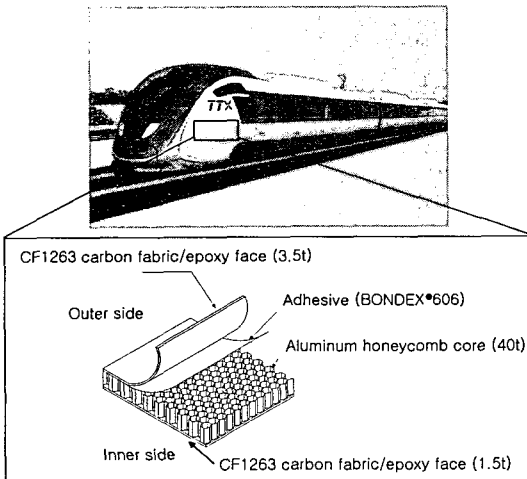


Fig. 1 Tiling train carbody

Table 1 Material properties of CF1263 carbon/epoxy

Mechanical properties	Values
Tensile elastic modulus in direction of warp, E_w (kgf/mm ²)	5550
Tensile elastic modulus in direction of fill, E_n (kgf/mm ²)	4830
Poisson's ratio of warp, ν	0.099
Poisson's ratio of fill, ν	0.07
Density, ρ (kg/m ³)	1600

Table 2 Material properties of stainless steels

Mechanical properties	SMA490B	SUS301L_LT	SS400	SPA-H
Modulus, E (kgf/mm ²)	21000	18300	20000	20000
Yield strength, S (kgf/mm ²)	37	22	25	25
Poisson's ratio, ν	0.3	0.3	0.3	0.3
Density, ρ (kg/m ³)	7900	7900	7900	7900

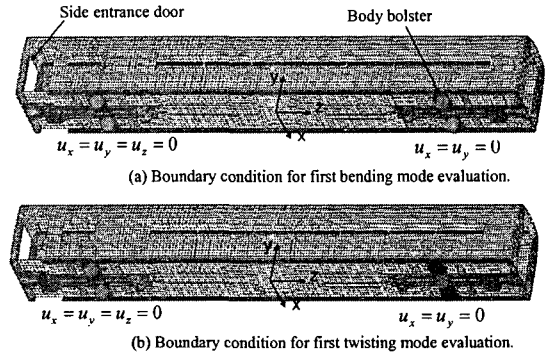


Fig. 4 Boundary condition for the analysis

Fig. 4는 복합재 차체의 굽힘 및 비틀림 고유치 해석에 적용된 경계조건을 나타낸 것이다. 측출 입문부에 위치한 바디볼스터의 공기스프링 설치 위치에서는 $u_x = u_y = u_z = 0$ 와 같은 변위가 구속되고 반대편에 위치한 바디볼스터에서는 $u_x = u_y = 0$ 의 변위가 구속되었다.

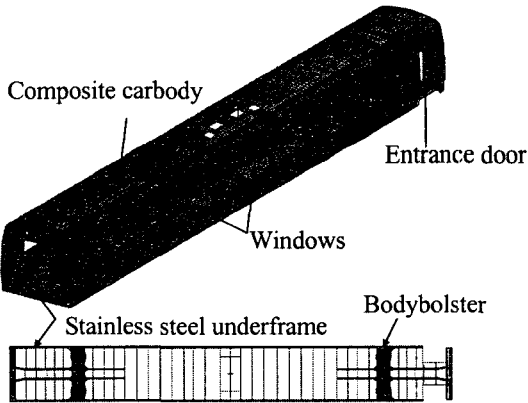


Fig. 3 Finite element modeling of the composite carbody

2.2 유한요소모델링

Fig. 3은 유한요소 해석을 위한 차체의 모델을 나타낸 것이다. 유한요소해석시 복합재 차체부분은 2차원 셸 요소(shell element)를 적용하였고, 창문사이의 내부 프레임들은 빔 요소(beam element)를 적용하였다. 그리고 언드프레임의 보강빔 역시 빔 요소로 모델링하였다. 해석은 유한요소전용 해석프로그램인 ABAQUS를 이용하였고, 해석에 적용된 요소(element)는 S4R 셸 요소와 B31 빔 요소이다. 해석에 적용된 요소수는 37249개이고 절점수는 32955개이다.

2.3 고유치 해석결과

Fig. 5는 해석에서 얻어진 차체의 1차 굽힘 모드를 나타낸 것이다. 이때 1차 굽힘 진동수는 약 11.67Hz 였다. 일반적으로 철도차량은 휠(wheel)과 레일(rail)이 접촉된 상태에서 운행하므로 운행 중 차량과 궤도(track)사이에는 지속적으로 동적인 상호작용(dynamic interaction)을 하게 된다. 특히, 철도차량은 운행 중 궤도에 의해 저주파의 주기적인 운동(natural periodic motion)을 하게 된다. 이러한 운동의 크기(magnitude of the motion)는 차량과 궤도의 상태에 의해 결정되는데 일반적으로 휠과 레일이 마모된 상태에서 증가하게 된다. 이러한 차량의 저주기 운동은 멀미(nausea and travel sickness)를 발생시키는 원인이 되므로 회피설계를 해야 한다. 이러한 이유에서 일반적으로 철도차량 차체의 설계시 차체의 1차 굽힘 진동수(first bending mode)는 10Hz이상 되도록 설계한다.⁽¹⁰⁾ 따라서, 유한요소해석으로 통해 본 연구에서 개발중인 복합재 적용 차체는 공진회피설계가 되었음을 알 수 있었다.

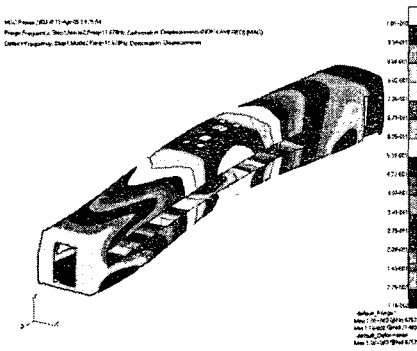


Fig. 5 1st bending mode of the composite carbody

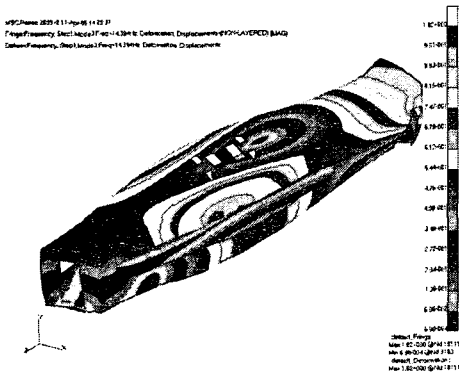
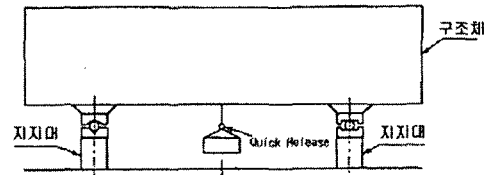


Fig. 6 1st twisting mode of the composite carbody

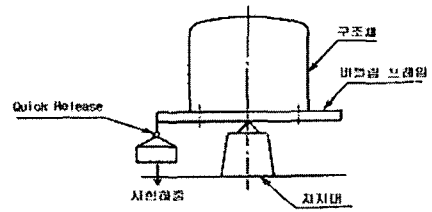
Fig. 6은 해석에서 얻어진 1차 비틀림 모드를 나타낸 것이다. 복합재 차체의 1차 비틀림 진동수는 약 14.4Hz 였다.

3. 고유치 측정 시험

이상의 유한요소해석을 통해서 얻어진 복합재 적용 철도차량 차체의 진동특성을 시험을 통해 규명하였다. 복합재 차체의 고유진동수 측정시험은 JIS(Japanese Industrial Standard) E7105⁽¹¹⁾에 근거하여 수행하였다. JIS E7105에서는 Fig. 7과 같이 1차 굽힘 고유진동수와 1차 비틀림 고유진동수를 측정하는 방법을 정의하고 있다.



(a) Test method for measurement of the 1st bending natural frequency



(b) Test method for measurement of the 1st twisting natural frequency

Fig. 7 Natural frequency measurement methods of JIS E7105

1차 굽힘 고유진동수는 이전에 언급한 바와 같이 승차감과 밀접한 관련이 있기 때문에 필수적으로 측정해야 하는 항목이다. 1차 굽힘 고유진동수의 측정절차는 Fig. 7(a)와 같이 차체 또는 구조체 중앙부 아래에 부하를 가하고 순간적으로 부하를 제거하여 차체에 자유진동을 발생시키는 방법 또는 강제 가진기를 사용하는 방법 중 하나로 한다. 비틀림 고유진동수 역시 Fig. 7(b)와 같이 비틀림 프레임의 한쪽에 부하를 가하고 순간적으로 부하를 제거하여 구조체에 자유진동을 일으키는 방법 또는 강제 가진기를 사용하는 방법 중 하나로 한다. 본 연구에서는 JIS E 7105에 근거하여 차체중앙부 아래에 부하를 가하고 순간적으로 부하를 제거하여 차체에 자유진동을 발생시키는 방법으로 고유진동수를 측정하였다.

3.1 1차 굽힘 고유진동수 측정시험

Fig. 8은 본 연구에서 1차 굽힘 고유진동수를 측정하기 위한 시험장비 구성 및 절차를 나타낸 것이다. 시험을 위한 차체의 지지조건은 Fig. 8과 같이 측출입문부에 위치한 바디볼스타의 공기스프링 설치부에 U 및 V형 블록을 이용하여 원형로울러 상하부에 설치하여 차체의 길이방향과 길이에 수직방향으로의 직선변위를 구속하고 회전

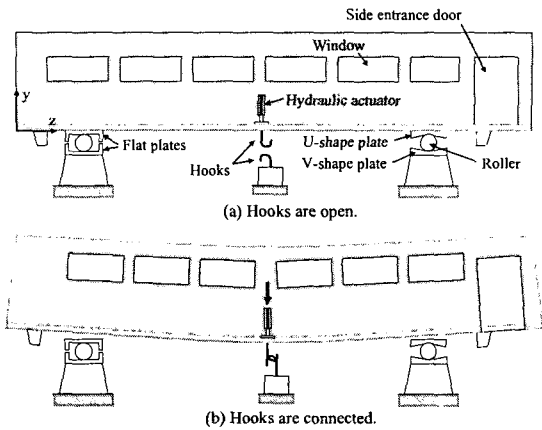


Fig. 8 Test setup for measurement of the 1st bending mode

변위는 허용하도록 하였다. 측출입문 반대편 지지대의 경우에는 평평한 블록을 원형 로울러 상하부에 설치하여 차체의 길이방향으로 변위를 허용하도록 하였다.

굽힘 고유진동수 측정시험 순서는 다음과 같다.

- (1) Fig. 8(a)와 같이 4개의 지지대를 이용하여 차체를 4점지지 한다.
- (2) 가속도 센서를 언드프레임에 부착한다.
- (3) 중앙에 위치한 유압 가력기(hydraulic actuator)를 이용하여 Fig. 8(b)와 같이 차체에 굽힘 변형을 가하여 차체에 고정된 후크(hook)와 지지대에 설치된 후크가 체결되도록 한다.
- (4) 유압 가력기의 하중을 제거한다.
- (5) (3)단계에서 체결된 후크의 체결을 순간적으로 해제하여 차체를 진동시켜 굽힘모드를 유발시킨다.
- (6) 가속도 센서를 통해 차체의 가속도를 측정한다.

Fig. 9는 Fig. 8에서 차체와 지지대에 설치된 후크의 역할을 하는 장치를 나타낸 것이다. Fig. 9와 같이 차체 언드프레임에 원공이 존재하는 판을 용접하여 후크역할을 하도록 하였다. 또한 이 판의 원공에 원통형상의 봉을 유압실린더로 삽입하여 체결하고, 봉을 후퇴시켜 체결을 해제하도록 하였다.

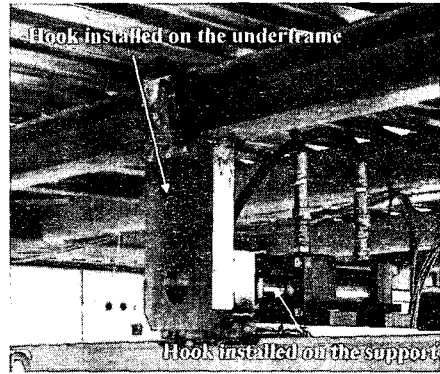


Fig. 9 Hooks installed on the underframe and support



Fig. 10 Location of accelerometers for measurement of the bending frequency

Fig. 10은 굽힘 고유진동수 측정을 위해 설치된 가속도계의 위치를 나타낸 것이다.

3.2 1차 비틀림 고유진동수 측정시험

Fig. 11은 비틀림 고유진동수 측정시험의 시험구성을 나타낸 것이다. 굽힘 고유진동수 측정시험시 차체가 4점 지지된 것과 달리 비틀림 고유진동수 측정 시험시에는 3점 지지조건으로 시험을 수행하였다. 3점 지지조건은 Fig. 11과 같이 측출입문부에 위치한 바디볼스타 중앙부를 롤러 지지대로 지지하여 비틀림 모드가 유발될 수 있도록 한다. 비틀림 고유진동수 측정시험 절차는 다음과 같다.

- (1) 3개의 지지대를 이용하여 차체를 3점지지 한다.
- (2) 가속도 센서를 부착한다.
- (3) 차량 끝단에 위치한 유압 가력기를 이용하여 Fig. 11(b)와 같이 차체에 비틀림 변형을 가하여 차체에 고정된 후크와 지지대에 설치된 후크가 체결되도록 한다.
- (4) 유압 가력기의 하중을 제거한다.
- (5) 차체고정용 후크를 순간적으로 해제하여 비틀림 모드를 유발시킨다.
- (6) 가속도 센서를 통해 차체의 가속도를 측정한다.

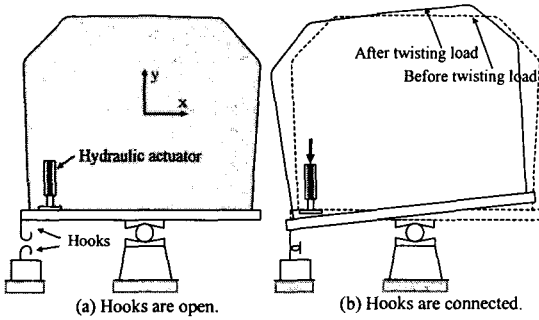


Fig. 11 Test setup for measurement of the 1st twisting mode



Fig. 12 Location of accelerometers for measurement of the twisting frequency

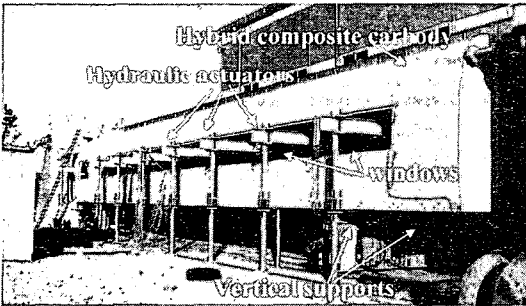


Fig. 13 Test setup for the natural frequency measuring test

Fig. 12는 비틀림 고유진동수 측정을 위해 설치된 가속도계의 위치를 나타낸 것이다.

Fig. 13은 복합재 차체의 고유진동수 측정시험을 위한 시험장치 셋업을 나타낸 것이다.

4. 결 과

Fig. 14는 굽힘 고유진동수 측정시험을 통해서

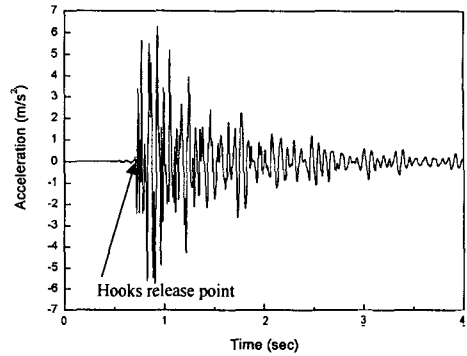


Fig. 14 Acceleration history measured from the bending mode measurement test

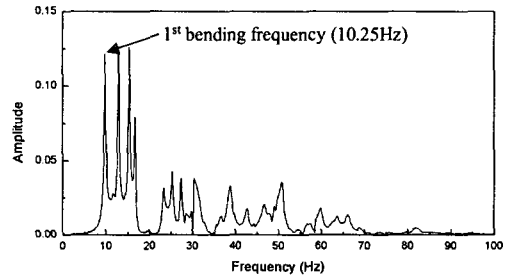


Fig. 15 Natural frequency of the 1st bending mode of the composite carbody

측정된 4번 가속도계로부터 측정된 가속도의 시간영역 데이터이다. Fig. 14에서 알 수 있듯이 차체와 지지대에 설치된 후크가 체결된 후 약 1.7초 시점에서 체결을 해제하여 차체의 진동을 유발하였다. 측정된 시간영역 데이터를 FFT분석을 통해 1차 굽힘 고유진동수를 Fig. 15와 같이 얻었다. 시험을 통해 얻어진 1차 굽힘 고유진동수는 약 10.25Hz 였다. 이것은 해석에서 계산된 값 11.67Hz와 약 12.2%정도의 오차를 보였다.

Fig. 16은 비틀림 고유진동수 측정시험을 통해서 측정된 2번 가속도계의 가속도의 시간영역 데이터이다. Fig. 16에서 알 수 있듯이 차체와 지지대에 설치된 후크가 체결된 후 약 1.2초 시점에서 체결을 해제하여 차체의 진동을 유발하였다. 측정된 시간영역 데이터를 FFT분석을 통해 1차 비틀림 고유진동수를 Fig. 17과 같이 얻었다. 시험을 통해 얻어진 1차 비틀림 고유진동수는 약 11.0Hz 였다. 이것은 해석에서 계산된 값 14.4Hz와 약 23.6%정도의 오차를 보였다.

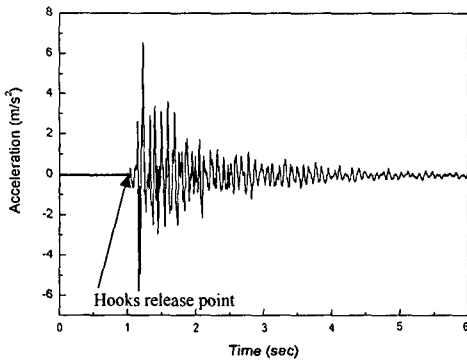


Fig. 16 Acceleration history measured from the twisting mode measurement test

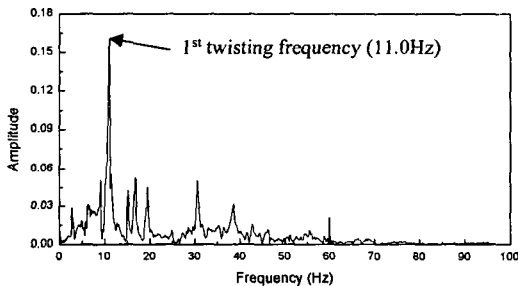


Fig. 17 Natural frequency of the 1st twisting mode of the composite carbody

이상의 시험을 통해서 얻어진 복합재 차체의 1차 굽힘 고유진동수는 10.25Hz로 설계요구조건인 10Hz이상조건을 만족하고 있었다.

5. 결론

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

(1) 유한요소해석을 통한 복합재 철도차량 차체의 고유치 해석에서 1차 굽힘 고유진동수는 약 11.67Hz이고 1차 비틀림 고유진동수는 약 14.4Hz였다.

(2) 해석을 통해 얻어진 복합재 차체의 진동특성을 검증하기 위해 차체에 해당 진동모드를 유발하도록 변형을 가한 후 변형을 순간적으로 제거하여 차체의 자유진동을 발생하도록 장치를 고

안하였다.

(3) 고유진동수 측정시험에서 얻어진 1차 굽힘 고유진동수와 1차 비틀림 고유진동수는 각각 약 10.25Hz와 11.0Hz였다. 해석결과와는 굽힘고유진동수의 경우에는 약 12.2%의 오차를 보였고 비틀림 고유진동수의 경우에는 약 23.6%의 오차를 보였다.

(4) 해석과 시험을 통해서 얻어진 복합재 차체의 1차 굽힘 고유진동수는 각각 11.67Hz와 10.25Hz로 설계요구조건인 10Hz이상 조건은 만족하였다. 따라서 궤도에서 유발되는 저주파 진동에 대한 회피설계가 되었음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Jeon H. Y. and Sung R. W., "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) Kim Y. S., Park S. H., Beak N. U. and Kim D. S., "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) Yoon S. C., Baik K. S., Kwon S. T. and Kim M. Y., "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) Chung J. D., Kim J. K., Yoon S. C. and Pyun J. S., "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) Chung J. D., Kim J. K., Pyun J. S., Kim W. K. and Hong Y. K., "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) Lee Y. S., Kim J. H., Lee H. C., Kil K. N. and Park B. J., "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) Belingardi G., Cavtorta M. P. and Duella R., "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) Harte A. M., Mcnamara J. F. and Roddy I. D., "A Multilevel Approach to the Optimization of a Composite Light rail Vehicle Bodysell," *Composite Structures*, Vol. 63, 2004, pp. 447~453.
- (9) Shin K. B. and Han S. H., "Evaluation of Static Stability of Hybrid Carbody Structures of Korean Tilting Train eXpress Including Degradation Effects of Composite Materials under Ground Environments," *Transactions of the KSME A*, Vol. 28, No. 6, 2004, pp. 807~815.
- (10) Wennhage P., *Structural-Acoustic Optimization Sandwich Panels*, Royal Institute of Technology, 2001.
- (11) Japanese Industrial Standard (JIS) E 7105, *Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock*, 1994.