

한국형 틸팅열차 한빛200의 진동 특성에 관한 연구[#]

The Study on the Vibrational Characteristics of Korean Tilting Train Hanvit200

김 남 포[†] · 김 정 석* · 박 태 원**

Nam-Po Kim, Jung-seok Kim and Tae-Won Park

(2008년 5월 16일 접수 ; 2008년 7월 17일 심사완료)

Key Words : Tilting Bogie(틸팅 대차), Vibrational Mode(진동 모드)

ABSTRACT

The tilting trains can run on curve track about 30 % faster than conventional train without affecting passenger comfort. As the tilting trains offer the optimum means of providing faster and more comfortable rail service with minimum of environmental disturbance and capital investment, it is widely adopted for commercial operation all over the world. Over several years, the Korea Railroad Research Institute(KRRI) and Ministry of Construction and Transportation(MOCT) have been developing 200 km/h Korean tilting train, Hanvit200. Hanvit200 adopts the pendulum type tilting mechanism and hybrid car body structure, mainly CFRP combined with steel. In this paper the vibrational characteristics of Hanvit200 was investigated through Eigen vector analysis, modal test and main line running test.

1. 서 론

틸팅(tilting)차량이란 곡선궤도에서 차체를 곡선 내측으로 기울여서 원심가속도를 중력가속도 성분으로 상쇄시켜 승객이 느끼는 정상 횡가속도를 저감시킴으로써, 승차감 향상과 아울러 곡선을 고속으로 주행할 수 있는 차량이다. 이러한 틸팅 차량은 곡선궤도가 많은 노선에서 경제적으로 운행시간을 단축할 수 있으며, 곡선 진출입 시의 감가속이 줄어들어 운전성 향상, 승차감향상 및 에너지 절감 등의 장점이 있다⁽¹⁻³⁾. 이와 같은 장점으로 인해 유

럽의 거의 전역 및 일본, 중국, 호주, 미국 등에서 틸팅 차량을 도입하여 성공적으로 운행 중이다. 국내에서도 고속철도 비 수혜지역의 준고속 서비스 제공과 이를 통한 국토의 균형발전과 철도 전반의 효율 향상을 위해 기존노선에 틸팅차량을 적용할 계획으로 건설교통부와 한국철도기술연구원에서 200 km/h 급 한국형 틸팅열차(한빛200)를 개발하여 시험운전 중에 있다. 이 연구에서 개발된 틸팅 대차는 주행장치와 현가장치외에 차체를 경사시키는 틸팅 기구장치와 틸팅 구동장치가 포함되어 있어 일반 대차에 비해 자유도도 높고, 복잡한 구조로 되어있다. 또한 곡선부 고속주행에 따른 횡압 저감을 위해 유연한 요 강성(yaw stiffness) 적용하였고, 유연 요강성에 따른 고속주행안정성(stability)저하를 극복하기 위한 자기 조향장치(stabilizer)를 국내에서 처음으로 적용하였다. 경량화와 저중심 설계를 위해 복합소재와 강재를 혼합한 하이브리드 차체를 국내 최초로 적용하였고, 금속재 차체 대비 약 30%의 중량을 절

[†] 교신저자 : 정희원, 한국철도기술연구원
E-mail : npkim@krii.re.kr
Tel : (031)460-5665, Fax : (031)460-5299

* 한국철도기술연구원

** 정희원, 아주대학교

[#] 이 논문은 2008 춘계학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

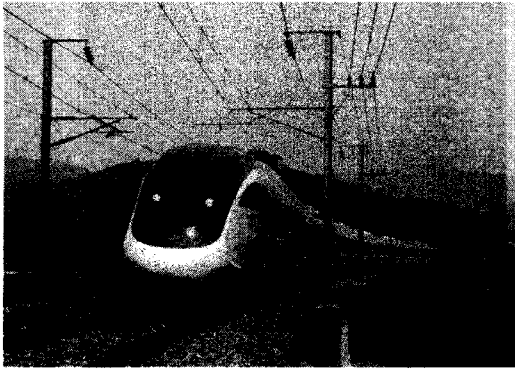


Fig. 1 Overview of Hanvit200

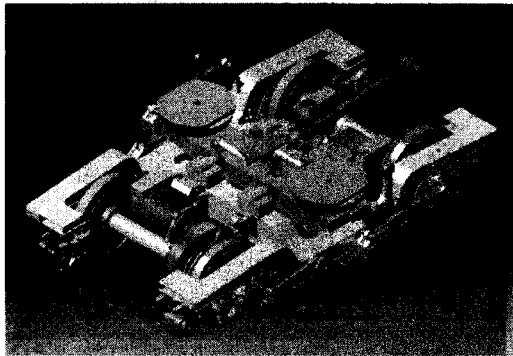


Fig. 2 Overview of tilting bogie

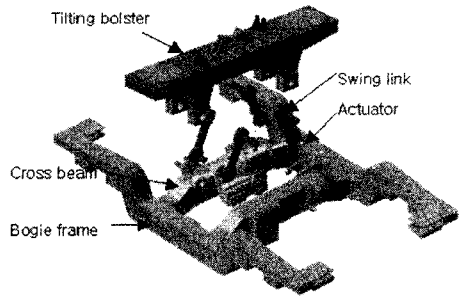


Fig. 3 Tilting mechanism

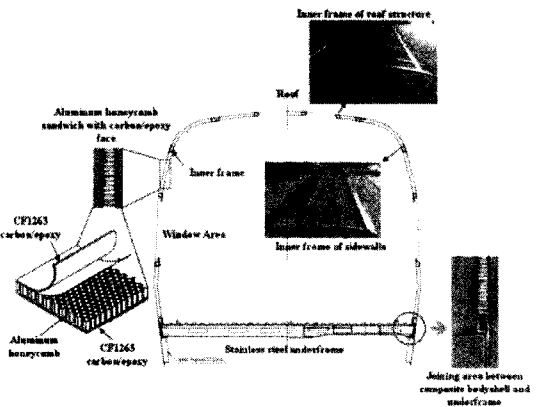


Fig. 4 Structure of car body

감할 수 있었다. 이 논문은 일반 열차와는 다른 특성을 갖고 있는 한국형 틸팅열차의 진동 특성을 해석과 실험을 통해 분석하고, 진동 저감을 위한 방향에 대해 고찰해 본다. 이 논문에서는 직선궤도 주행시의 진동 특성을 다루었으며, 6량 1편성의 한빛 200 차량에서 상대적으로 진동 수준이 높은 M차의 결과에 한정해서 기술된다.

2. 한국형 틸팅열차의 특징

한빛200 차량은 최고설계속도 200 km/h, 곡선주행속도는 일반 열차대비 30% 향상을 목표로 하는 틸팅열차로서 6량 1편성($M_{cp} + M + T + Th + M + M_{cp}$)의 전기동차(EMU) 형식이다. 고속화와 틸팅에 따른 기존선의 궤도부담력을 최소화하기 위해 4량의 구동차에 동력을 분산시켰으며, 차체도 복합소재를 적용하는 등 경량화에 주력하여 최대 축중을 15톤 이내로 설계하였다. Fig. 1에 호남선에 시험운전 중인 한빛 200 열차의 전경을 보여주고 있다. Fig. 2에 이 논문

에서 언급되는 M 차용 틸팅 대차의 전경을 보여주고 있다. Fig. 3에 차체를 경사시키는 틸팅 기구장치와 전기기계식 액추에이터가 대차 내에 어떻게 구성되어있는 지를 보여준다. 틸팅 기구장치는 대차 당 4개의 스윙 링크를 이용하여 틸팅 볼스타와 차체가 같이 경사되도록 안내하는 구조이며, 틸팅 구동원은 틸팅 볼스타와 대차프레임간에 설치된 틸팅 액추에이터이다.

Fig. 4에 하이브리드 차체의 구성을 나타내었다. 그림에서 보듯이 차체의 하부구조(under frame)는 스테인레스 철강으로 제작되었고, 측면(side)은 알루미늄 하니콤 구조와 복합소재를 사용하여 최대의 경량화 효과를 도모하였고, 이 측면과 지붕(roof) 그리고 양 단부는 이음부 없이 일체로 성형함으로써 강도와 강성을 극대화하였다. 일체로 성형된 복합소재부와 금속재의 하부구조를 리벳방식으로 접합함으로써 차체 구조물을 완성하였다.

3. 한국형 틸팅열차의 진동 특성

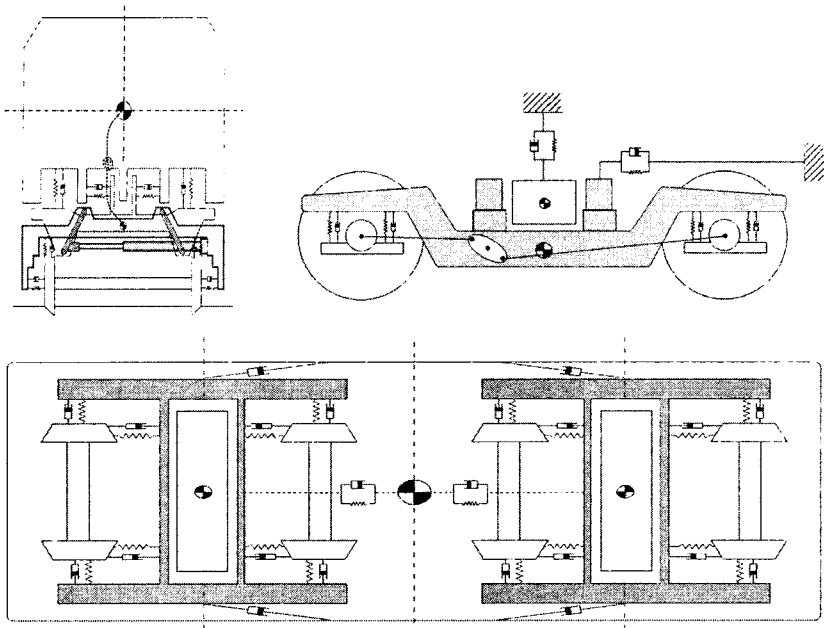


Fig. 5 Multi-body dynamic model

Table 1 Mass properties(M car tare)

Mass	Description	Value
Car body	Mass (ton, Mg)	30.6
	Roll moment of inertia (Mg-m ²)	52
	Pitch inertia(Mg-m ²)	1600
	Yaw inertia(Mg-m ²)	1767
	Height of COG(m)	1.7
Bogie frame	Mass (ton, Mg)	4.217
	Roll inertia (Mg-m ²)	1.8
	Pitch inertia(Mg-m ²)	3.8
	Yaw inertia(Mg-m ²)	4.2
	Height of COG(m)	0.55
Tilting bolster	Mass (ton, Mg)	1.343
	Roll inertia (Mg-m ²)	0.42
	Pitch inertia(Mg-m ²)	0.03
	Yaw inertia(Mg-m ²)	0.43
	Height of COG(m)	0.6
Wheel-set	Mass (ton, Mg)	1.818
	Roll & yaw inertia	1.3
	Height of COG(m)	0.43

Table 2 Suspension properties(M car tare)

	Description	Value
Dimension	Distance between bogie pivot	15.9
	Wheelbase (m)	2.6
	Wheel radius (m)	0.43
Primary suspension	Kx (MN/m)	1.92
	Ky (MN/m)	3.72
	Kz (MN/m)	1.21
	Czeq (MN/m/s)	0.017
	Steering torsional stiffness (MN-m/rad)	8.1
Secondary suspension	Width (m)	2.05
	Air spring Kx (MN/m)	0.17
	Air spring Ky (MN/m)	0.17
	Air spring Kz (MN/m)	0.6
	Equivalent damping of air spring (MN/m/s)	0.2
	Anti-roll bar (MN-m/rad)	1.26
	Yaw damper Cyaw (MN/m/s)	0.17
	Lateral damper Cy (MN/m/s)	0.03
	Width of air spring	1.75

3.1 고유치 해석

차량을 동역학적 수치해석 모델로 변환하는 데 있어, 해석의 목적에 맞도록 단순화하고 가정을 하였다. 차량 간 구조적 특성 상 차량과 차량 간에는 상

하, 좌우 및 롤 등의 동역학적 힘의 전달이 크지 않기 때문에, 1량만을 분리하여 모델링 하였고, 차체를 포함한 모든 질량요소를 강체로 간주하였다. 차량과 레일의 접촉 크리이프 이론은 고유치 해석에는

Table 3 Natural frequencies and mode

Mode No.	Mode shape	Frequency [Hz]	Damping [%]	
1	Car body ROLL (caused by tilting mechanism)	0.14	20.3	
2	Car body YAW	0.79	48.0	
3	Body lateral + ROLL	0.81	28.6	
4	Var body BOUNCING	1.22	12.8	
5	Car body PITCH	1.45	14.1	
6,7	Bogie YAW	Velocity 30 m/s	1.77	27.2
		50 m/s	2.60	19.3
		80m/s	3.43	9.3
8,10	Tilting bolster ROLL	5.0	51.0	
11,12	Bogie frame BOUNCING	8.5	23.5	
15,16	Bogie frame PITCHING	10.8	4.7	
19,20	Bogie frame ROLL	12.9	9.2	
21,22	Bogie frame LATERAL	13.1	29.4	

Kalker's linear creep law⁽⁴⁾를 적용하였다. 질량 요소는 차체 1개, 전·후위 대차 후레임 2개, 전·후위 탈팅 볼스타 2개, 조향 레버 4개, 윤축세트 4개로 총 13개로 잡았고, 각 질량 요소간을 적절한 현가장치 요소로서 모델링하였다. Fig. 5는 다물체 동역학 모델을 보여주고 있고, Table 1과 Table 2에 차량 편성 중 M차의 공차조건에 대한 질량요소와 현가요소의 특성치가 나타내었다.

이상과 같은 다물체 동역학 모델을 수립하고, VAMPIRE라는 철도차량 전문 상업용 S/W를 이용하여 고유치/고유벡터 해석을 실시하였고 그 결과가 Table 3에 나타나 있다. 대부분의 모드가 주행속도에 영향을 받지 않지만 대차후레임의 YAW 모드만이 속도에 따라 고유진동수가 변화하며, 속도 증가에 따라 감쇄비가 저하되는 것으로 나타났다. 이것은 철도차량이 갖는 고유한 특성으로 이 대차후레임 YAW 모드의 감쇄가 음으로 변화하는, 즉 안정성이 상실되는 속도를 임계속도라 한다⁽⁵⁾. 여기에서 차량과 레일간의 유효 답면구배는 0.1을 적용하였다.

일반 차량에선 볼 수 없는 매우 낮은 주파수의 ROLL 모드가 나타나는 데, 이는 탈팅 기구장치에 의해 차체와 탈팅 볼스타가 탈팅 회전중심을 축으로 ROLL방향으로 회전하는 모드이다(Fig. 6).

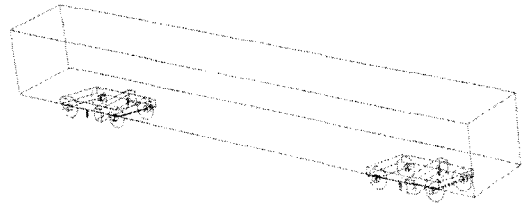


Fig. 6 Car body ROLL mode

Table 4 Results of M car body modal test

Mode No.	Mode shape	Frequency [Hz]	Damping [%]
1	Car body bouncing	1.32	13
2	Car body pitching	1.7	16
3	Body 1st bending	8	4
4	Body diagonal bending	7	3
5	Body 2nd bending	9	3

Table 5 Results of bogie modal test

Mode No.	Mode shape	Frequency [Hz]	Damping [%]
1	Bogie frame bouncing	7.45	17.8
2	Bogie frame pitching	8.1	9.3
3	Bogie frame rolling	11.1	5.1
4	Bogie frame bending	14.2	10.1

3.2 진동 모드 시험

한빛200 차량의 고유진동수, 진동 모드 및 감쇄 특성을 검증하기 위해 modal test를 실시하였다. 5호차(M차) 차체와 대차를 대상으로 현가장치에 의한 강체 모드와 구조체의 탄성 모드 함께 측정하였으며, impact hammer, 가속도 센서(Wilcoxon: 731A, 0.1~400 Hz)와 FFT Analyser(B&K 3560)를 사용하였다. 차체의 모드 시험 결과가 Table 4에 대차의 모드 시험 결과가 Table 5에 나타나있다. 또한 Fig. 7에서 Fig. 13까지 진동 모드 형태를 보여주고 있다. 차체 모드에서는 현가장치에 의한 강체 모드, 일반적인 1차 bending, 2차 bending, twist의 탄성 모드가 나타났고, 독특한 형태의 diagonal bending 탄성 모드가 7 Hz대로 나타났다(Fig. 13). 대차 모드는 대부분 강체 모드이나 대차후레임의 torsional bending 탄성 모드가 비교적 낮은 주파수대에서 나타났다(Fig. 15).

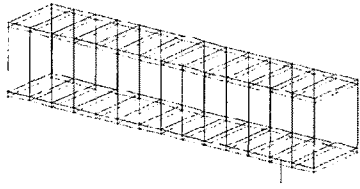


Fig. 10 Mode No. 1

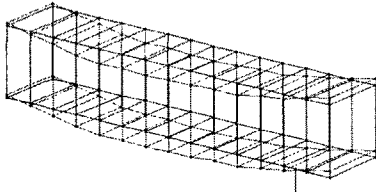


Fig. 11 Mode No. 3

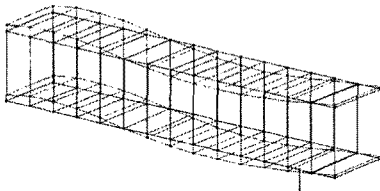


Fig. 12 Mode No. 5

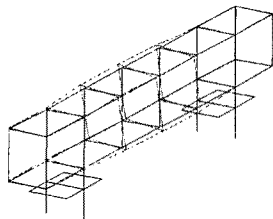


Fig. 13 Mode No. 4

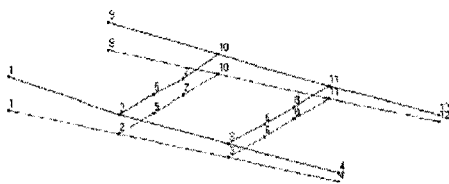


Fig. 14 Mode No. 1

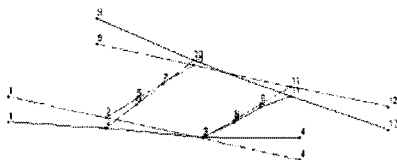


Fig. 15 Mode No. 4

4. 본선 진동측정 결과

호남선 구간을 매주 왕복하며, 차량의 각종 성능 시험이 진행 중에 있다. 선로 조건이 양호한 호남선의 무안-함평역 구간을 증속시험 구간에서 최고속도인 180 km/h까지 단계적 증속 시험이 실시되었다. 속도 증가에 따른 주행안전성은 대차와 차체의 진동 가속도를 이용하여 UIC 518⁽⁶⁾ 규격에 따라 분석 평가되었다. UIC 518의 simplified method에 따른 허용기준은 다음과 같다.

가. 안전성 기준

- 대차 횡 가속도 : 10.44 m/s^2 이하(10 Hz low pass filter 적용)
- 차체 횡 가속도 : 3 m/s^2 이하(6 Hz low pass filter 적용)
- 차체 상하 가속도 : 3 m/s^2 이하(0.4~4.0 Hz band pass filter 적용)

나. 주행거동 기준

차체 상하/횡 가속도(0.4~10.0 Hz band pass filter 적용) : 최대값 기준 2.5 m/s^2 이하

RMS값 기준 횡 방향 0.5 m/s^2 , 상하방향 0.75 m/s^2 이하

증속 시험구간은 반경 2000 m 곡선과 직선 그리고 반경 2000 m 곡선으로 되어있으며, 상하 및 좌우방향 그리고 궤간에 대한 틀림량이 Fig. 16과 같다. 차량의 진동은 이와 같은 궤도왜란에 대한 차량의 동역학적 응답이다.

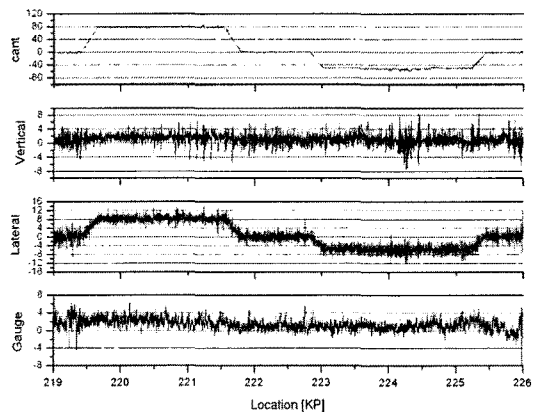


Fig. 16 Track data of test section

Fig. 17은 저널박스, 대차 후레임 및 차체(대차 상부)에서 계측된 상하방향 진동 가속도의 시간 이력을 나타내며, Fig. 18은 저널박스, 대차 후레임 및 차체(대차 상부)에서 계측된 횡방향 진동 가속도의

시간 이력을 나타낸다.

Fig. 19에서 Fig. 24까지는 가속도 방향별로 저널박스, 대차후레임, 차체 가속도의 주파수 분석 결과를 보여주고 있다.

증속 시험 구간에서의 UIC 518 기준에 의한 측정 결과가 Table 6에 나타나 있다. 이 결과는 다수의 측정결과 중 170 km/h로 주행 한 경우의 결과로서 대차 횡가속도가 허용 기준에 가장 근접하고 있음을 알 수 있다.

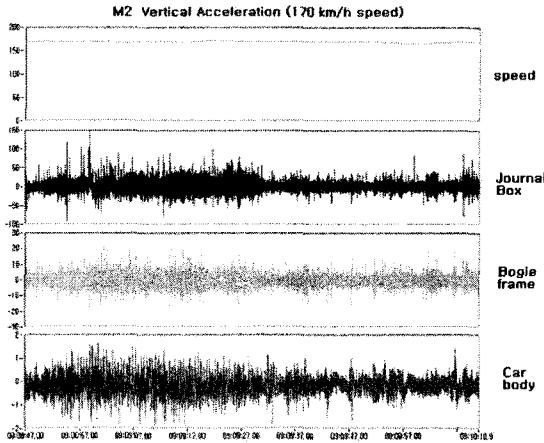


Fig. 17 Time history of vertical vibration

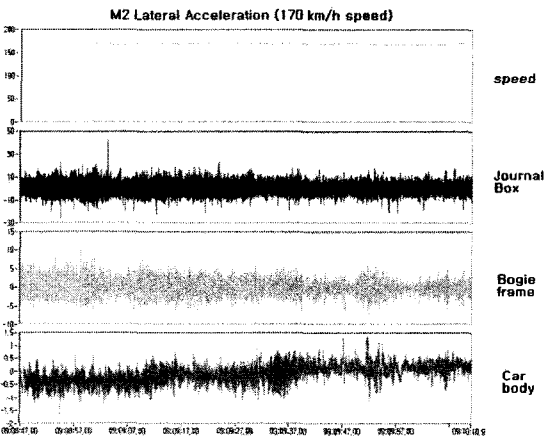


Fig. 18 Time history of lateral vibration

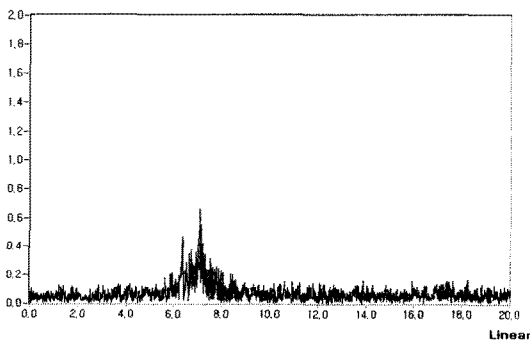


Fig. 19 Journal box(lateral)

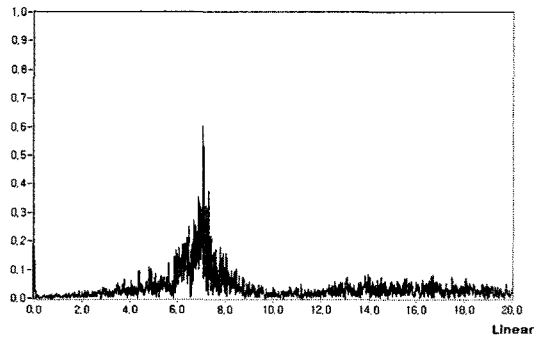


Fig. 20 Bogie(lateral)

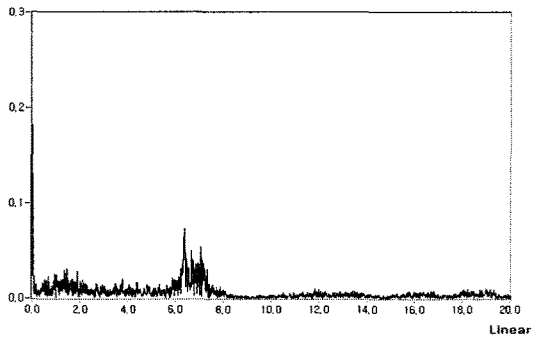


Fig. 21 Body(lateral)

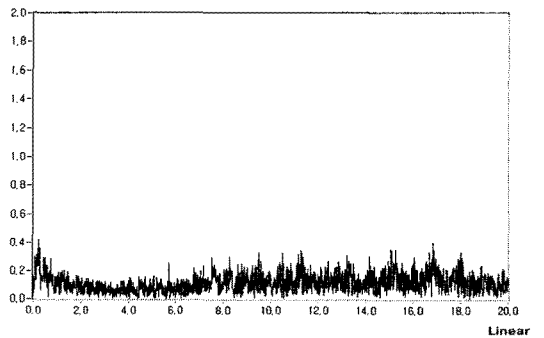


Fig. 22 Journal box(vertical)

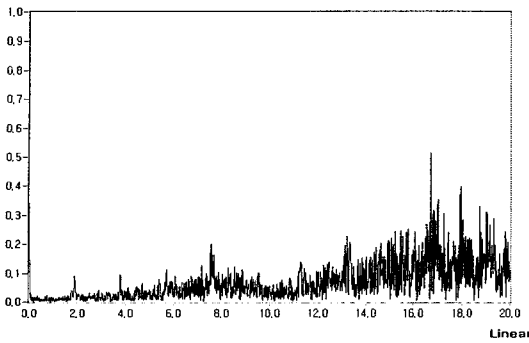


Fig. 23 Bogie(vertical)

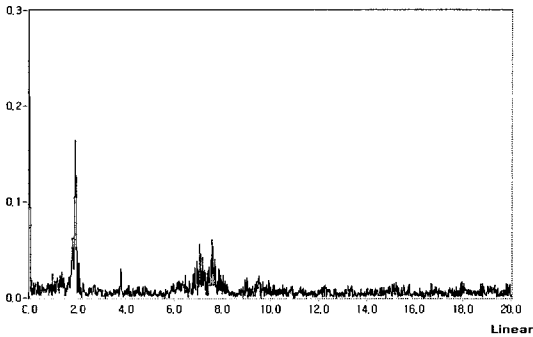


Fig. 24 Car body(vertical)

Table 6 Measure results of M car(170 km/h)

	Safety			Dynamic behavior			
	Bogie lateral	Body lateral	Body vertical	Body lateral		Body vertical	
Allowable limit	10.12	3	3	Max	RMS	Max	RMS
Measured	7.45	1.59	1.80	1.06	0.35	1.63	0.62

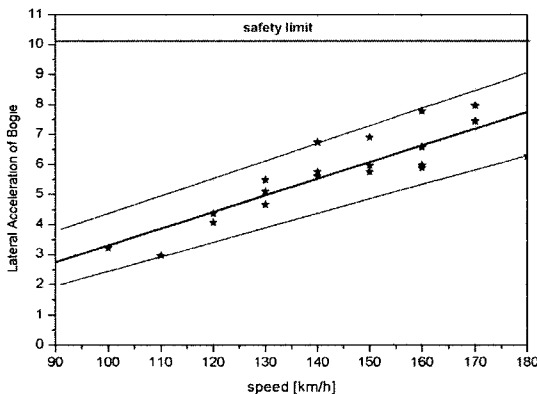


Fig. 25 Lateral acceleration of bogie versus speed

여러 가속도 수치 중 허용기준에 가장 가까운 대차 횡진동 가속도를 속도별로 계측하여 나타낸 것이 Fig. 25에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 틸팅열차는 증속시험 구간에서 최고속도 180 km/h까지는 허용 기준 이내로서, 주행안전성이 확보되는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

한국형 틸팅열차의 수치해석 및 진동 모드시험, 본선의 주행시험 결과를 토대로 진동 특성을 파악해 보았다. 일반열차와는 다른 부분인 틸팅 기구장치와 하이브리드 차체 구조에 기인한 다음과 같은 독특한 진동 모드가 존재하는 것을 확인하였다.

가. 틸팅 기구장치에 의해 매우 낮은 하중심 롤 진동 모드가 존재하며, 틸팅 시스템이 활성화되어 틸팅 액추에이터가 이 틸팅 기구 움직임을 억제하기 전까지는 이 모드가 유효하다.

나. 진동 모드시험에서 차체 단면이 평행사변형 형태로 변형하는 7 Hz의 탄성진동 모드가 발견되었다. 이는 하이브리드 차체구조의 연결 특성에 기인된 독특한 형태의 모드이다.

진동 측정결과를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

가. 180 km/h까지 속도 증가에 따라 진동가속도가 현격하게 증가하지 않았으며, 주행안전성 측면에서 비교적 양호한 결과를 얻었다.

나. 일반적으로 대차후레임의 pitching 모드가 차체의 1차 bending 모드와 공진이 잘 발생하는 데, 이 차량의 경우에도 8 Hz 부근으로 두 모드의 고유진동수가 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 차체의 상하 진동가속도에서 8 Hz 성분이 미미한 것으로 보아 진동의 전달 경로에서 decouple되어 있는 것으로 판단된다.

다. 대차 및 차체 횡진동 가속도에 7 Hz 성분이 두드러지는 데, 이는 외란에 의해 차체의 diagonal bending이 발생되고 이 진동이 역으로 질량이 적은 대차후레임을 횡방향으로 흔들며 발생하는 것으로 추정된다.

라. 승객이 느끼는 진동가속도 수준은 좌우보다 상하방향이 높으며, 상하방향 진동은 1.7~2 Hz 부근에

진동에너지가 집중되어 있다. 이는 차체 bouncing 및 차체 pitching 고유진동수에 해당하는 것으로 일반 차량의 특성과 유사하게 나타난 것이다. 그러나 2차 현가장치의 감쇄가 다소 부족한 것으로 판단되며, 향후 진동 개선을 위해서는 이에 대한 보완이 필요하다고 할 수 있다.

후 기

이 연구는 국토해양부가 지원하며 현재 진행형인 한국형 틸팅열차 신뢰성 평가 및 운용기술 연구의 일환으로 추진되었다. 관계자 여러분께 감사を 드린다.

참 고 문 헌

- (1) Elia, A., 1998, "Fiat Pendolino : Development, Experiences and Perspective", Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 212, Part F, pp. 7~17.
- (2) Hubber, B. H., 1998, "The Bogie-based Tilt

Option- Simplicity and Flexibility", Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 212, Part F, pp. 19~32.

- (3) Pearson, J. T., Goodall, R. M. and Pratt, I., 1998, "Control System Studies of an Active Anti-roll Bar Tilt System for Railway Vehicles", Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 212, Part F, pp. 43~60.

- (4) Kalker, J. J., 1980, "Review of Wheel/Rail Rolling Contact Theories", Applied Mechanics Division of ASME, Vol. 40, pp. 77~92.

- (5) Kim, N.-P., Kim, J.-S. and Park, T.-W., 2007, "A Study on the Critical Speed of Korean Tilting Train Hanvit200", Journal of Korean Railway Society, Vol. 10, pp. 1~7.

- (6) UIC code 518 OR 2003, "Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of View of Their Dynamic Behavior-safety-track fatigue-ride Quality".