

피로시험 및 비파괴 검사를 통한 틸팅열차용 주행장치 프레임의 안전성 평가

Safety Evaluation of Bogie Frame for Tilting Railway Vehicles by Fatigue and Nondestructive Tests

김정석* · 김남포*

Jung-Seok Kim · Nam-Po Kim

Abstract

This paper has performed fatigue and nondestructive test of bogie frame for Korean tilting train. Before the fatigue test, static tests were carried out. From the test, the structural safety was investigated using Goodman diagram. After the static test, the fatigue test were conducted under tilting load conditions. The fatigue test was conducted for 10×10^6 cycles. During the fatigue test, the nondestructive tests using magnetic particle and liquid penetrant were performed at 6×10^6 cycle and 10×10^6 cycle. From the crack detection tests, it was known that there was no fatigue crack in the bogie frame.

Keywords : Tilting Train(틸팅 열차), Tilting Bogie Frame(틸팅주행장치 프레임), Fatigue Test(피로시험), 비파괴 검사(NDT)

1. 서론

틸팅이란 곡선부에서 차체를 곡선 내측으로 기울여서 승객이 느끼는 미보상 횡가속도(uncompensated lateral acceleration)를 저감하여, 곡선을 고속으로 주행하도록 하는 기술이다. 이러한 틸팅기술의 도입은 곡선부 주행속도 증가에 따른 여행시간 단축, 곡선부 승차감향상 및 에너지 절감 등의 장점이 있다[1-4]. 철도차량에서 주행장치(bogie)는 차체의 무게를 지지하고, 직선부에서 주행안정성(running stability)과 곡선부에서 우수한 곡선추종성(curving performance)을 동시에 만족하기 위해 휠세트(wheelset)를 제어하는 기능을 수행한다. 일반 철도차량 주행장치에 대한 피로강도평가에 대한 연구는 몇 가지 사례가 있다[5-6]. 그러나 틸팅차량에 적용되는 주행장치에 대한 연구는 찾아보기 힘들다. 일반적으로 틸팅열차는 급곡선에서의 고속주행과 차체의 틸팅에 따른 하중 재분배에 의해 기존열차와 비교해서 극심한 하중조건에 처하게 된다.

본 연구에서는 한국형 틸팅열차에 적용되는 주행장치 프레임의 정하중 시험을 수행하고 주행장치 프레임의 강도를 평가하였다. 이에 추가하여 틸팅하중조건하에서 10×10^6 cycle 동안의 피로시험을 수행하였다. 피로시험 수행 중 6×10^6 cycle이 완료된 후 액체침투탐상검사를 수행하여 피로균열 발생 여부를 고찰하였다. 또한 10×10^6 cycle이 완료된 후 액체침투탐상검사 및 자분탐상검사를 동시에 수행하여 피로균열 발생유무를 관찰하여 주행장치 프레임의 안전성을 평가하였다.

2. 틸팅차량용 주행장치 프레임

본 연구에서 개발중인 틸팅열차에서 차체(carbody)는 틸팅볼스타(tilting bolster) 상부에 설치된 공기스프링(airspring) 위에 설치되고 차체의 무게는 틸팅볼스타에 의해 일차적으로 지지된다. 이러한 차체의 중량은 볼스타와 주행장치 프레임 사이에 연결된 틸팅링크(tilting link)를 통해 주행장치 프레임의 크로스 빔(cross beam)으로 전달되도록 되어있다. 차체는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 주행장치 프레임과 볼스타 사이에 설치된 틸팅액츄에이터로부터 발생하는 롤모우멘트에 의해 틸팅되어진다.

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원
E-mail : jskim@krii.re.kr
TEL : (031)460-5663 FAX : (031)460-5699
* 한국철도기술연구원 기촌철도기술개발사업단

본 연구에서 개발중인 틸팅열차의 틸팅링크들은 Fig. 2(a)와 같이 틸팅하지 않는 정상적인 운행조건에서는 수직축에 약 23도 정도로 기울어져 있다. 따라서 차체 중량은 y방향과 z방향 분력(F_y 와 F_z)으로 주행장치 프레임에 작용하게 된다.

차체가 +8도 틸팅할 경우에는 Fig. 2(b)와 같이 곡선외측에 위치한 링크는 수직축과 기울어진 각도가 45도로 증가되고 곡선내측에 위치한 링크는 5도로 감소하게 된다. 따라서, 외측방향에 위치한 틸팅링크브라켓에 부과되는 하중인

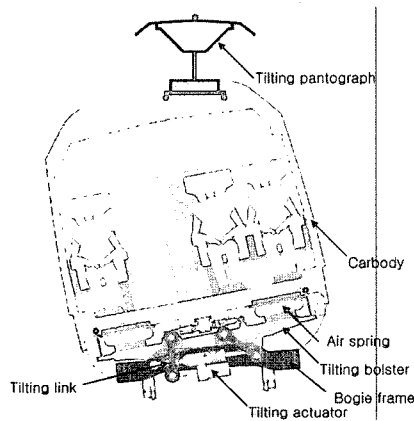
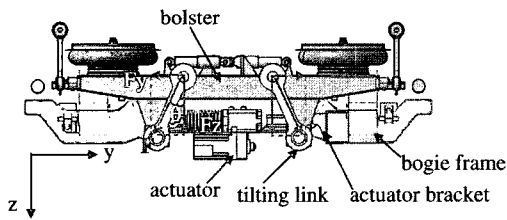
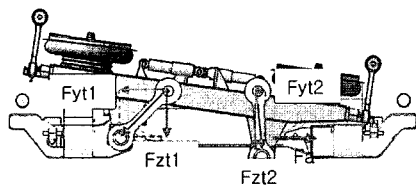


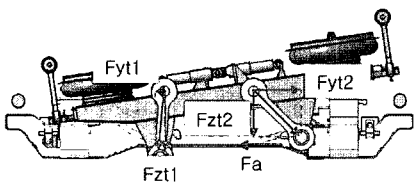
Fig. 1. Illustration of the tilting train



(a) Normal position of the carbody



(b) +8 degrees tilted position of the carbody



(c) -8 degrees tilted position of the carbody

Fig. 2. Tilting link arrangement according to carbody tilting.

F_{zt1} 과 F_{yt1} 은 증가하고, 내측에 위치한 브라켓에 부과되는 하중 F_{zt2} 와 F_{yt2} 는 감소하게 된다. 그리고 차체가 틸팅될 경우에는 차체를 틸팅시키기 위한 틸팅액츄에이터 하중, F_a 가 발생하게 된다. 차체가 -8도 틸팅할 경우에는 Fig. 2(c)와 같이 +8도의 경우와는 반대 양상을 보인다.

Fig 3은 틸팅열차용 주행장치 프레임의 형상을 나타낸 것이다. 주행장치 프레임은 용접구조물로 단면은 사각형 박스 (rectangular box)형태를 이루고 있으며 제동장치 브라켓, 틸팅액츄에이터 브라켓 및 요뎀퍼 브라켓이 용접되어 설치되는 두 개의 사이드 프레임과 견인전동기 브라켓, 구동기어 브라켓, 견인링크 브라켓 및 틸팅링크 브라켓이 용접되어 설치되는 두 개의 크로스 빔으로 구성된다. 크로스 빔과 사이드 프레임의 내부에는 수직 보강판이 용접되어진다.

3. 정하중 시험

본 정하중 시험에서는 Fig. 4와 같이 수직방향으로 100톤 용량의 액츄에이터 2조와 좌우방향으로 50톤 용량의 액츄에이터 2조를 설치하여 틸팅링크 브라켓에 작용하는 수직

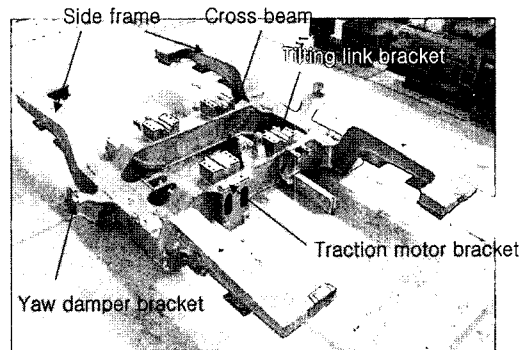


Fig. 3. Configuration of the bogie frame

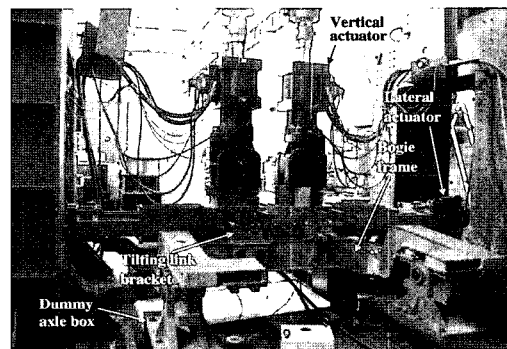


Fig. 4. Test setup for the static and fatigue test

및 좌우분력을 구현하였다. 또한 틸팅시 발생하는 틸팅액츄에이터의 하중을 구현하기 위해 틸팅액츄에이터 브라켓에 25톤 용량의 액츄에이터 1조를 설치하였다.

Fig. 5는 주행장치 프레임 상부에 부착된 스트레인 게이지의 부착위치를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 유한요소해석 결과에 근거하여 약 25개의 응력집중부에 스트레인 게이지를 부착하였다.

Table 1은 틸팅 주행장치 프레임에 부과되는 대표적인 하중을 나타낸 것이다. Table 1에서 알 수 있듯이 틸팅하지 않은 상태에서 틸팅링크 브라켓에 부과되는 하중은 y방향과 z방향 분력으로 나타내었다. 횡방향 하중(lateral force)은 운행 중 횡방향 진동에 의해 발생하는 하중이다. 비틀림 하중(twisting force)은 5%의 궤도 비틀림에 의해 발생하는 변위를 대차의 1차현수장치에 스프링 계수로 곱하여 하중으로 환산한 값이다. +8도와 -8도 틸팅시 발생하는 하중은 이전

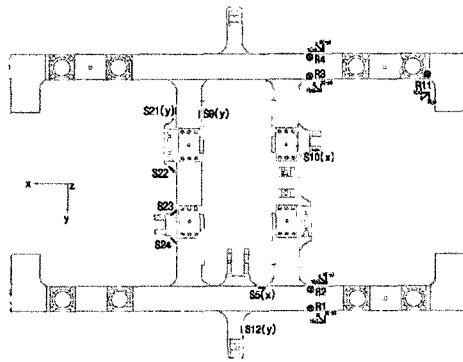


Fig. 5. Location of strain gauges

Table 1. Application loads for the bogie frame

Load case		Value(kgf)
Forces imposed on tilting links	Fz	12,320
	Fy	5,357
Lateral		7,288
Twist		460
+8degrees tilting	Fzt1	11,757
	Fyt1	12,051
	Fzt2	7,105
	Fyt2	436
-8degrees tilting	Fa	7,500
	Fzt1	7,755
	Fyt1	-558
	Fzt2	11,500
	Fyt2	-11,481
	Fa	-7,500

에 언급한 바와 같이 좌우측 틸팅링크 브라켓에서 하중의 변화가 발생하므로 수직 및 횡방향 분력으로 표기하였다.

3.1 시험결과

Fig. 6은 정하중 시험시 Fig. 4의 시험장치에서 수직방향 및 좌우방향 유압 액츄에이터에 부과된 하중이력이다. 하중은 0% → 70% → 100% 순으로 증가시키고 2단계에 걸쳐 하중을 부과하였다. 첫 번째 하중부과 단계에서 부과되는 하중은 시험지그 및 하중 액츄에이터의 안정화를 위한 것이다. 따라서, 본 연구에서는 두 번째 하중단계에서 변형률을 측정하였다.

이상의 시험을 통해서 얻어진 응력은 ERRI B 12/RP 17 [7]에 근거한 절차에 따라 평균응력과 응력진폭을 계산하여 Fig. 7과 같이 Goodman선도로 표현하였다. Fig. 7은 틸팅하중조건에서의 피로강도를 평가한 것이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 시험을 통해서 얻어진 주행장치 프레임의 응력은 모두 용접선(welding line) 아래에 분포하여 피로안전도를 만족하고 있음을 알 수 있다.

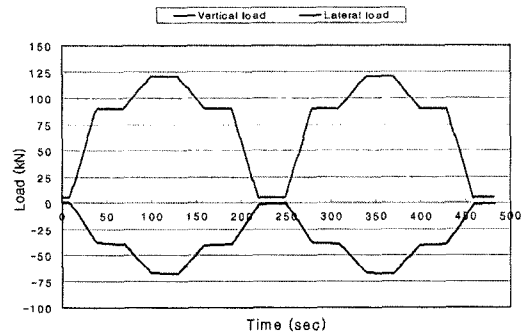


Fig. 6. Histories of the vertical and lateral load

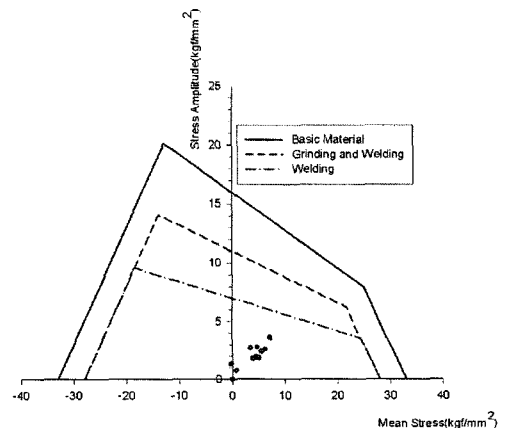


Fig. 7. Goodman diagram of bogie frame under tilting condition

4. 피로시험

본 연구에서 틸팅 주행장치 프레임에 대한 피로시험을 수행하였다. 틸팅 주행장치에 대한 피로시험 절차는 규격화된 기준이 없다. 따라서, 본 연구에서는 UIC615-4[8]에서 규정하고 있는 피로시험절차를 참고하여 차체 틸팅에 의한 하중 조건하에서 피로시험을 수행하였다.

틸팅 주행장치의 피로시험 절차는 Fig. 8과 같은 3단계로 수행하였다. 틸팅 주행장치는 일반 주행장치와 달리 곡선부에서 차체가 틸팅하게 되고 이때 주행장치 프레임에 부과되는 하중조건 역시 Fig. 2에 전술한 바와 같이 바뀌게 된다. 그리고, Table 1에서 알 수 있듯이 차체가 틸팅시 발생하는 하중(F_{z1} 과 F_{y1} 의 합력, F_{z2} 과 F_{y2} 의 합력)의 합력이 틸팅하지 않은 상태에서의 하중(F_y 과 F_z 의 합력)에 비해 크기 때문에 피로시험 역시 차체의 틸팅조건에 대해 적용하였다.

틸팅조건에서는 차체를 틸팅시키기 위한 틸팅액츄에이터 하중이 사이드 프레임에 용접되어 있는 액츄에이터 브라켓에 부과된다. 따라서 액츄에이터 하중(A)을 피로시험의 전 단계에 걸쳐 일정하게 부과되는 정적하중(static force)으로 고려하였다. 그리고, 틸팅시 주행장치 프레임에 적용되는 틸팅하중은 차체 무게에 의한 정적 하중(static force), 차체의 틸팅에 의한 주행장치 프레임 좌우측에서의 하중 재분배 및 기준차량 대비 곡선부 고속주행에 따른 초과 횡가속도 효과가 고려된 하중을 준정적 하중(quasi-static force)으로 고려하였다. 시험절차는 1 단계에서 6×10^6 cycle까지 반복하중을 부가하고 PT검사를 통해 균열발생여부를 관찰하였다. 1단계에서 균열이 발생하지 않을 경우에는 정하중(static load)은 동일하게 부과하고 준정적하중과 동하중을 120% 증가시켜서 2단계(step 2)를 2×10^6 cycle 수행하였다. 2단계 시험 후 준정적하중과 동하중을 140%로 증가시켜서 3단계(step 3)를 2×10^6 cycle 수행하고 PT 및 MT검사를 수행하여 최종적으로 균열발생여부를 관찰하였다.

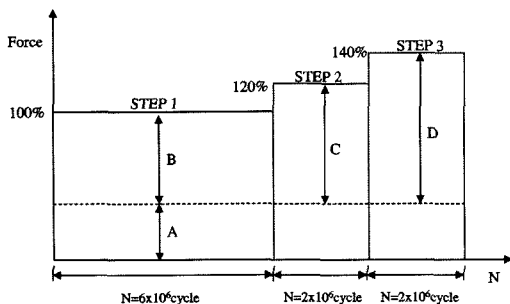


Fig. 8. Definition of fatigue test steps

Fig. 9와 10은 피로시험을 위해 주행장치프레임의 틸팅링크 브라켓에 부과된 준정적 수직하중(F_{z1} 과 F_{z2})과 좌우하중(F_{y1} 과 F_{y2})의 이력과 동하중(F_{y1} 과 F_{z1})의 이력을 나타낸 것이다. 준정적하중의 파형들은 스텝함수형태로 표현되는데 이것은 틸팅차량의 곡선부 주행조건에 상응하는 것으로 차체의 ± 8 도 틸팅을 의미한다. 각 준정적하중의 단일 스텝에 대해서 동하중은 UIC기준[7]에 근거하여 20사이클로 중첩하였다. 또한 수직 및 좌우방향 준정적하중과 동하중의 주파수는 각각 동일하게 설정하였다. 동하중은 수직방향의 경우 $\pm 0.2g$, 좌우방향의 경우 $\pm 0.25g$ 를 적용하였다.

Fig. 11과 12는 Fig. 9와10에서의 틸팅에 의한 준정적하중과 동하중을 조합한 최종적인 피로하중이력으로 피로시험시 부과된 것이다. Fig. 11과 12에서 $Fz1$ 과 $Fz2$ 는 아래와 같은 의미를 갖는다.

$$F_{z1} = F_{zt1} + F_{zd}$$

$$F_{z2} = F_{zt2} + F_{zd}$$

$$F_{y1} = F_{yt1} + F_{yd}$$

$$F_{y2} = F_{yt2} + F_{yd}$$

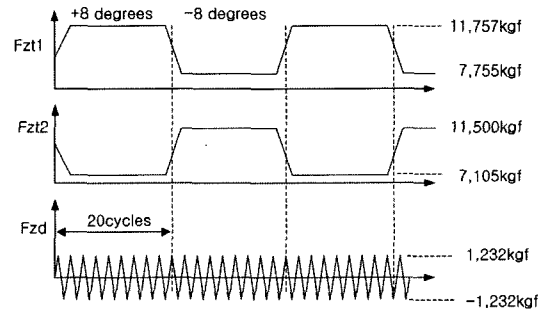


Fig. 9. Load histories of vertical components imposed on the tilting link brackets

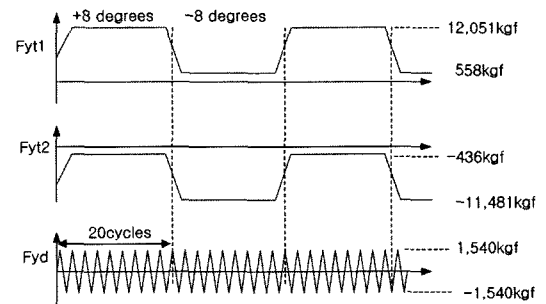


Fig. 10. Load histories of lateral components imposed on the tilting link brackets

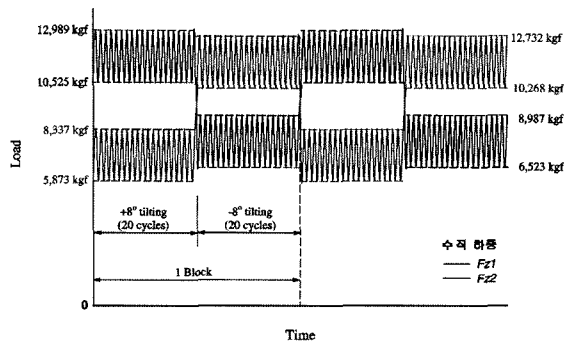


Fig. 11. Combined load histories with vertical quasi-static and dynamic loads.

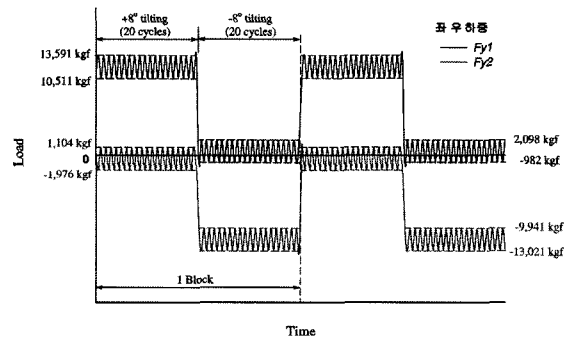
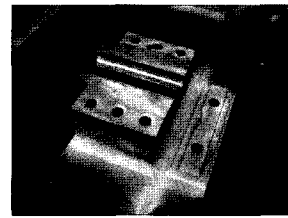


Fig. 12. Combined load histories with lateral quasi-static and dynamic loads.

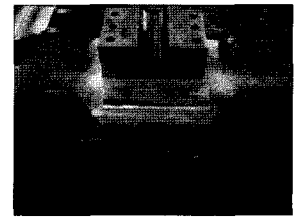
4.1 피로균열검사

주행장치 프레임에 대한 균열검사는 일차적으로 제작이 완료된 직후 자분탐상검사(magnetic particle testing : MT)를 수행하여 균열이 존재하지 않음을 확인하였다. 피로하중에 의한 균열검사는 피로시험의 100% 하중이 부과되는 1단계 (6×10^6 cycle)가 완료된 후 액체침투탐상검사(liquid penetrant testing : P)에 의해 균열발생검사를 실시하였다. 또한 피로 시험 완료(10×10^6 cycle) 후 액체침투탐상검사 및 자분탐상 검사를 적용한 균열검사를 실시하였다. Fig. 13은 6×10^6 cycle 과 10×10^6 cycle 후 주행장치 프레임에 대한 PT검사 결과를 나타낸 것이다. 검사결과 피로균열은 발생하지 않았다.

Fig. 14는 10×10^6 cycle 후 수행된 MT검사를 수행한 후 주행장치 프레임을 나타낸 것이다. 이전에 수행한 PT검사와 동일하게 MT검사결과에서도 균열은 발견되지 않았다. 이상의 시험을 통해 개발 중인 틸팅 주행장치 프레임은 구조안 전성을 확보하고 있음을 알 수 있었다.

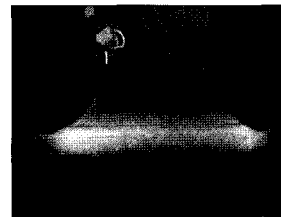


After 6×10^6 cycles.

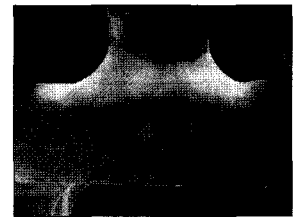


After 10×10^6 cycles.

(a) Tilting link bracket.



After 6×10^6 cycles.



After 10×10^6 cycles.

(b) Crossing region between sideframe and cross beam.

Fig. 13. Photograph of liquid penetrant test after 6×10^6 and 10×10^6 cycles.



Fig. 14. Photograph of magnetic particle test after 10×10^6 cycles.

5. 결론

본 연구에서는 현재 개발중인 틸팅 주행장치 프레임의 피로강도 평가를 위한 정하중 시험, 피로시험 및 비파괴 검사를 수행하였다. 이를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 틸팅 주행장치 프레임에 대한 정하중 시험을 통해 주행 장치 프레임의 응력집중부에서의 응력을 측정하고 Goodman 선도를 통한 피로강도평가 하였다. 측정된 모든 응력값은 Goodman선도의 용접선 아래에 위치하였고 이를 통해 주행장치 프레임은 피로안전도를 만족함을 알 수 있었다.
- (2) 기존 주행장치 프레임에 비해 복잡한 하중조건을 받는 틸팅열차용 주행장치 프레임에 적합한 피로하중을 도출 하기 위해 차체 틸팅에 따른 하중의 재분배 및 틸팅역추

에이터에 의한 하중을 고려하였다. 또한 틸팅링크에 의해 발생하는 하중을 수직 및 좌우방향하중으로 분리하여 부과하였다.

(3) 피로시험은 10×10^6 cycle 동안 수행되었으며 6×10^6 cycle 과 10×10^6 cycle 후 수행된 비파괴 검사를 통해 피로균열 발생하지 않았음을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. A. Elia, "Fiat Pendolino : Development, Experiences and Perspective," Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol.212, Part F, pp.7-17, 1998.
2. B. H. Hubber, "The Bogie-Based Tilt Option-Simplicity and Flexibility," Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol.212, Part F, pp.19-32, 1998.
3. J. T. Pearson, R. M. Goodall and I. Pratt, "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, 1998.
4. F. Cheli, G. Diana and F. Resta, "Numerical Model of a Tilting Body Railway Vehicles Compared with Rig and on Track Tests," Vehicle System Dynamics, Vol.35, No.6, pp.417-442, 2001.
5. S. Dietz, H. Netter and D. Sachau, "Fatigue Life Prediction of a Railway Bogie under Dynamic Loads though Simulation," Vehicle System Dynamics, 1998, 29, 385-402.
6. C Oyan, "Structural Strength Analysis of the Bogie Frame in Taipei Rapid Transit Systems." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail & Rapid Transit, 1998, 212(3), 253-262.
7. UIC Code 615-4 : Motive Power Units Bogies and Running Gear Bogie Frame Structure Strength Tests (1994).
8. European Rail Research Institute B 12/RP 17, 7th edition, 1993.