

화물수송용 철도차량 현가장치의 설계변수와 진동성능에 관한 연구

함영삼* · 오택열**

A study on the design parameters and vibration performance of suspension device for freight car

Y.S. Haam, T.Y. Oh

Key Words: Freight car(화차), Suspension(현가장치), Stiffness(강성), Hunting(사행동), Conicity(기울기), Critical Speed(임계속도)

Abstract

As needs for substitution of excessive road-oriented transport by the railroad increase, we proposed the guideline for development of the high speed freight car up to 150km/h through analyzing the critical speed of welded-type freight car employed and investigating the improvement in its maintenance. This study, the proper design parameters of conical rubber spring was determined to meet the vibration performance.

1. 서론

1825년 영국에서 철도가 최초로 운행되었을 때, 제1의 사명은 화물수송이었듯이 철도의 화물수송은 산업경제의 발전과 국민생활의 향상에 크게 기여하여 왔으나 타 교통수단이 발달함에 따라 철도는 쇠퇴를 거듭하여 왔다. 그러나, 최근에는 화석 연료를 동력원으로 하는 타 교통기관의 급속한 증가로 지구환경의 온난화, 대기오염 등 환경문제가 심각한 지경에 이르렀고, 도로교통을 정체시켜 수송원가가 증가되고 수송 지연으로 인해 국제 경쟁력을 약화시키고 있다. 이러한 문제를 해소하기 위해서는 거점간의 수송을 자동차에서 철도로 유도해야 한다는 목소리가 고조되고 있다. 철도 화물수송은 환경 문제나 교통정체 등의 면에서 유리할 뿐만 아니라 동시에

많은 양을 저렴하고 신속하게 운반 할 수 있고 안정되게 수송할 수 있는 큰 장점을 가지고 있으므로 세계각국은 여객수송 뿐만 아니라 화물수송에 있어서도 고속화에 박차를 가하고 있고, 다른 육로 수송수단과 결합하여 화물을 수송하는 복합적인 수송체계를 도입하는 계획이 세계의 주요 국가에서 시작되었고 이미 실용화되어 상업운행에 돌입한 나라도 있다.⁽¹⁾

현재 고속화차라고 부르고 있는 차량은 유럽의 Y25 Bogie를 기본으로 한 용접구조형 대차로서 1993년에 개발된 것인데 110km/h까지의 주행성능에는 문제가 없으나 대차의 분해검수에 투입되는 검수인공과 폐데스탈 방식의 축상 마찰마모부의 재료비 등으로 인한 유지보수비용 증가가 검수 및 속도향상의 제한요소로 작용하고 있다.⁽²⁾

본 연구에서는 화물수송용 철도차량의 성능향상과 고속화를 위하여 코일스프링을 사용하는 현가장치를 코니컬 러버 스프링으로 대체하였을 때 동역학적 설계변수에 따른 차량의 진동성능에 대하여 기술하고자 한다.

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원

** 경희대학교 기계공학과 교수

2. 고무현가장치의 적용가능성

2.1 고무현가장치의 특성

용접구조형 대차는 코일스프링과 건마찰에 감쇠기구를 현가장치로 채택하고 있어 건마찰부의 마모판과 대응부품의 마모로 인해 주기적으로 부품을 교환해 주어야 안전 운행을 확보할 수 있으며, 그 구조가 복잡하여 분해 조립에 많은 인공이 투입되고 있는 실정이다. 또한 적재하중의 변화가 크기 때문에 내외측의 코일스프링의 높이 차이를 두어 두 단계의 스프링 강성을 갖도록 되어 있는 데 공차조건에서 자유상태로 있는 내측 스프링의 움직임으로 인해 금속성 소음까지 발생하고 있다.

기존용접대차의 현가장치는 Fig. 1과 같고 유지보수성을 개선하고, 아울러 차량의 설계속도를 향상하기 위해 적용하고자 하는 고무현가장치의 외형은 Fig. 2와 같다.

고무현가장치는 철도차량용 1차현가장치 또는 축스프링용 현가장치로 개발된 것으로 금속과 고무가 다수의 층으로 일체 성형된 코니컬형 고무스프링과 유압식 감쇠장치가 일체로 조밀하게 구성되어 있고 금속-고무의 다층 고무스프링은 상하방향의 큰 변위를 허용할 수 있어 안락한 승차감을 제공할 수 있으며, 전후 및 좌우방향으로는 상대적으로 큰 강성을 부여할 수 있어 차량의 주행안정성을 향상시킬 수 있다. 일반적으로 감쇠장치는 스프링과 병렬로 설치되어 공진주파수 영역에서는 진동을 감쇠시켜 진동전달을 감소시키지만 그 이상의 고주파대의 진동에 대해서는 진동이 스프링보다는 감쇠장치를 통해 전달이 되는 경향이 있기 때문에 오히려 진동전달을 증가시킨다는 단점이 있다.

고무현가장치에는 유압식 감쇠장치가 스프링 역할을 하는 고무와 직렬로 설치되어 있어 공진주파수대의 진동을 감쇠시키고 그 이상의 고주파대의 진동에 대해서도 고무의 내부감쇠를 통해 감쇠시키기 때문에 우수한 진동전달 차단효과가 있다.

고무스프링과 일체로 된 감쇠시스템은 상하의 유압실 사이에 throttle hole을 두어 유체가 이 hole을 이동하며 진동 에너지를 감쇠시키도록 되어 있고 마찰부나 시일(seal)이 없기 때문에 수명기간동안 보수가 필요 없다는 특징이 있다.

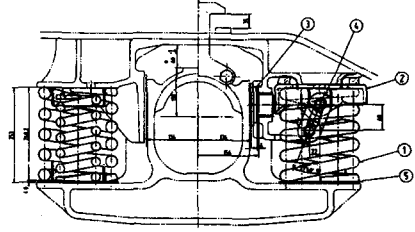


Fig. 1 Coil spring suspension

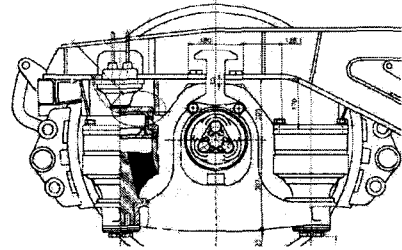


Fig. 2 Hydraulic spring suspension

2.2 고무현가장치의 적정설계변수 선정

차량의 동역학적 성능 요구조건인 현팅에 대한 안정성, 탈선에 대한 안전성을 만족시키기 위한 고무현가장치의 동역학적 설계변수를 선정하기 위하여 용접대차의 제원과 고무현가장치의 특성을 수학적 모델에 반영하여 VAMPIRE(Vehicle dynAmics Modelling Package In a Railway Environment)라는 철도차량 전용 동역학 해석 프로그램을 사용, parametric study를 통하여 적정 설계변수를 도출한 결과는 Table 1과 같다.⁽³⁾

여기서 전후 및 좌우의 스프링 강성치는 차량이 주행하는 동적인 조건에서의 동적 스프링강성(dynamic stiffness)을 의미하며, 상하방향 강성치는 정적 스프링강성(static stiffness)을 의미한다.

3. 임계속도 해석

3.1 해석모델

철도차량은 주행하기 시작하면 사행동(蛇行動)이라고 하는 자려진동(self-excited-vibration)이 발생한다. 이는 철도차량의 원추형 차륜형상에서 비롯된 거동으로, 주행속도가 증가되어 일정속도에 다다르면 차체와 대차가 자연스럽게 횡방향 진동

Table 1 Design parameters of hydraulic spring

항 목	하중 조건	적정 설계변수	관련 성능
상하방향 스프링 강성 [MN/m]	공차조건	0.65 이하	완화곡선 윤증감소량
	만차조건	1.5 이하	
유체식 감쇠		손실각 25~50.	전반적 성능
상하방향 변위제한 (축상고)	공차/만차 최대하중 간 변위	60 mm 이내	차량 구조물간 간섭
고무현가장치 최대 부담하중	최대하중 조건	55550 N	고무내구수 명
전후, 좌우방향 스프링 강성 [MN/m]	공차조건	2.0~3.0	임계속도 및 탈선안전도
	만차조건	5.0~10.0	

이 시작되고 상당 댐핑력(equivalent damping force)이 저하되어 주기적인 횡진동이 발생하게 되는 헌팅(hunting)현상이 발생하게 된다. 이 헌팅이 발생하기 시작하는 속도를 임계속도(critical speed)라 하며 이는 차량이 동역학적 측면에서 안전하게 주행할 수 있는 한계속도를 의미한다.

임계속도 예측을 위한 차량모델은 질량요소, 스프링요소, 감쇠요소, 마찰요소, 변위제한요소 및 차륜과 레일간의 접촉요소로 구성하였다.

모델링에 사용된 좌표계는 오른손 좌표계로 차량의 길이방향을 x축, 좌우방향을 y축, 상하방향을 z축으로 설정하였으며, 하중조건은 주행특성이 불안정한 공차조건, 스프링요소는 코일스프링과 코니컬 러버 스프링으로 구분하였으며, 차륜은 직경 860mm, 답면구배 1/20을 적용하였고, 레일은 국내선로에 일반적으로 적용하는 50kgN 레일형상으로 모두 신품을 기준으로 하였다(Fig. 3). 임계속도 해석을 위한 궤도모델은 이상적인 직선선형과 불규칙도가 없는 궤도조건을 사용하는데 초기에만 차량을 횡방향으로 가진시키기 위하여 불규칙도를 주고 이후에는 이상적인 궤도로서 Fig. 4와 같이 모델링하였다.

화차의 일반적인 헌팅모드는 차체가 요방향으로, 또는 윤축, 대차가 차체와 동일 위상으로 횡

방향 병진운동하는 고유진동수 영역인 1.0~2.5Hz 사이의 저주파수대역에서 발생한다. 임계속도는 차량속도, 차륜/레일간 마찰계수 및 기하학적 형상 등에 영향을 받는다. 특히, 차륜/레일간 유효답면구배(equivalent conicity)는 큰 영향을 미치며, 차체의 요방향 고유진동수와 주행장치의 기구학적 고유진동수 간의 공진도 임계속도에 영향을 미친다.

본 해석에선 현용 고속화차의 임계속도 예측을 위하여 비선형 과도응답해석을 수행하였다. 임계속도해석은 일정속도로 주행중인 차량에 횡방향 외란을 부여한 후, 차량모델 각 요소의 횡방향 거동의 시간감쇠를 파악하여 계의 안정성을 분석하는 기법이다.

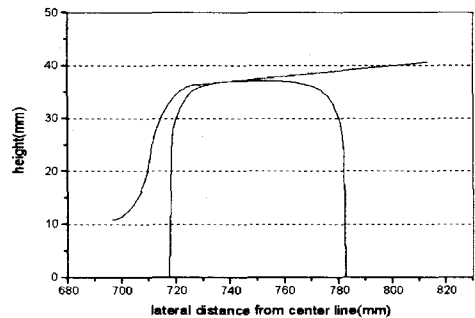


Fig. 3 Profile of 1/20 wheel & 50kgN rail

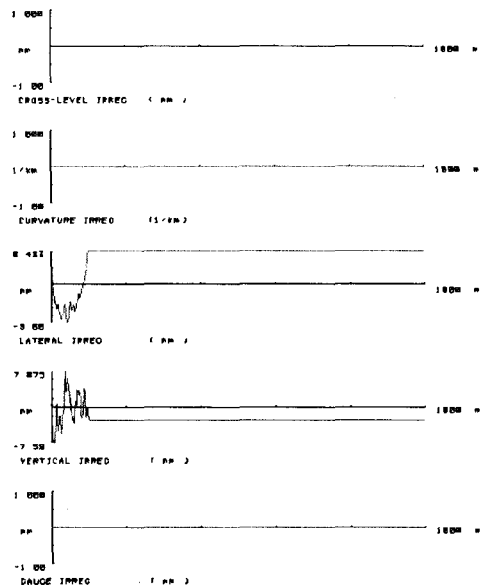


Fig. 4 Track model for analysis

3.2 해석결과

기존의 코일스프링 현가장치와 고무현가장치 대차의 임계속도 해석은 속도 30m/s부터 일정간격으로 속도를 증가시켜 가면서 전위 윤축의 횡변위 거동을 파악하였는데 해석결과는 Fig. 5 및 Fig. 6과 같다.

해석결과, 기존의 코일스프링을 사용하는 대차는 주행속도 38m/s(137km/h)까지의 외란에 의한 윤축 횡변위는 시간에 따라 안정적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 40m/s(144km/h)에서의 윤축횡변위는 시간에 따른 감소특성을 보이지 않는 불안정한 특성을 보이고 있다. 따라서, 기존의 코일스프링을 적용한 고속화차의 임계속도는 약 137km/h 대역으로 예측할 수 있다.

아울러 고무현가장치를 적용하였을 때의 임계속도는 155km/h까지 안정적임을 볼 수 있다.

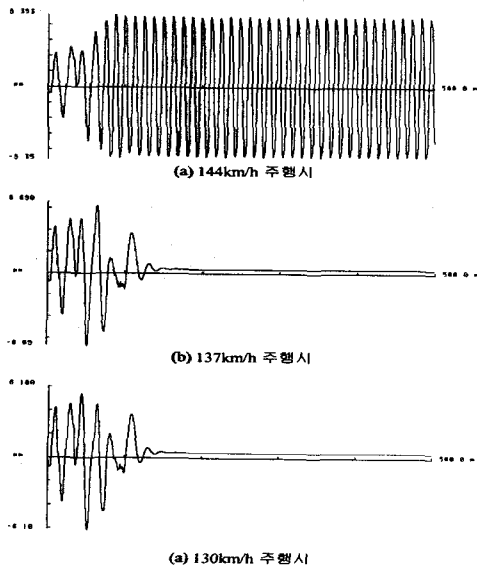


Fig. 5 Analysis result for critical speed of conventional suspension

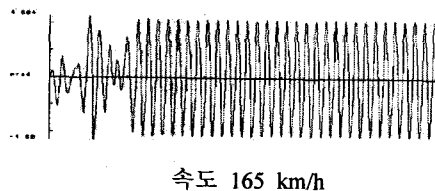


Fig. 6 Analysis result for critical speed of hydraulic spring suspension

4. 실차시험

4.1 개요

이론해석에서 설정한 설계변수가 동역학적 요구성능을 만족시키는지에 대하여 진동가속도 실차시험을 통하여 검증하였다.

시험항목으로는 속도별로 차체, 대차, 축상 등의 상하 및 좌우방향 진동가속도를 대상으로 하였으며, 진동측정데이터는 측정구간을 100m 단위로 나누어 이 구간 내에서 최대치의 전진폭(Peak to Peak)을 취하여 그 때의 속도를 읽고, 이를 5km/h 단위의 같은 속도별로 모아서 평균하였다.

측정은 경부선 사상-삼랑진 구간에서 100km 이상으로 하였으며, 차체진동에서 고주파 진동을 제거하기 위한 필터는 10hz로 하였다.

이때 사용된 측정장비는 다음과 같다.

- Signal Processor DP7100, 16ch, 1set
- Tape Recorder SIR-1000, 16ch, 1set
- Dynamic Strain Amplifier, 14ch, 1set
- Speed & Distance Meter, 1set
- Digital Oscillo Graphic Recorder, 24ch, 1set
- Oscillo Scope, 1set
- Vibration Accelerometer, 14ea

4.2 시험결과

영·공차의 속도별/차량위치별 진동가속도 분석결과는 Fig. 7~14와 같다.

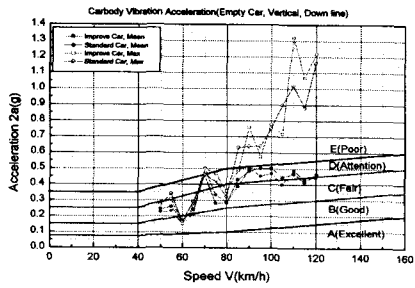


Fig. 7 Empty car Vertical Vibration(carbody)

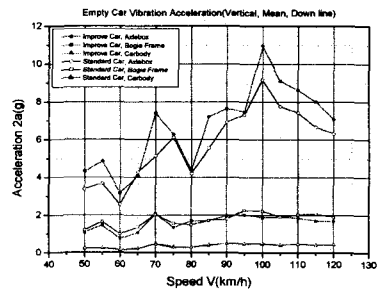


Fig. 11 Empty Vertical Vibration(position)

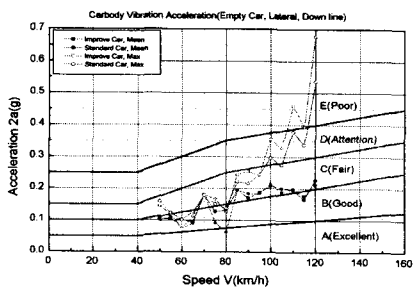


Fig. 8 Empty car Lateral Vibration(carbody)

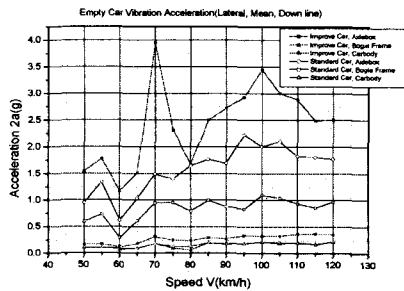


Fig. 12 Empty Lateral Vibration(position)

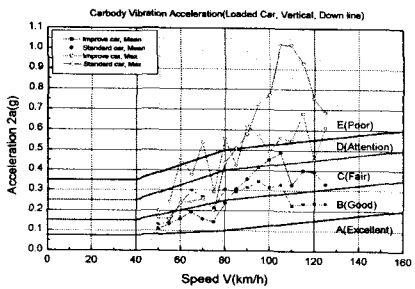


Fig. 9 Loaded car Vertical Vibration(carbody)

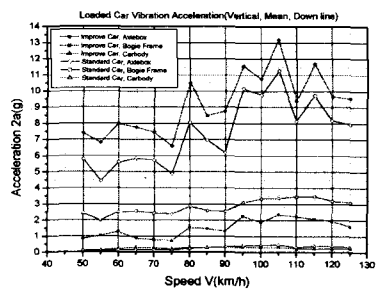


Fig. 13 Loaded Vertical Vibration(position)

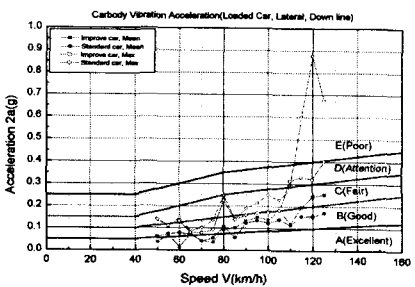


Fig. 10 Loaded car Lateral Vibration(carbody)

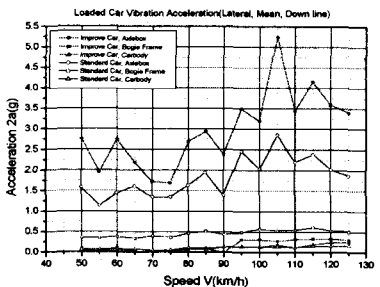


Fig. 14 Loaded Lateral Vibration(position)

5. 결론

화물수송용 철도차량의 성능향상과 고속화를 위하여 코일스프링을 사용하는 현가장치를 코니컬 러버 스프링으로 대체하였을 때 동역학적 설계변수에 따른 차량의 진동성능에 대하여 이론해석과 실차시험을 통하여 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Conical Rubber Spring을 적용하여 기존의 Coil Spring 대차와 진동가속도값을 비교해 보면 전체적으로 비슷한 수준을 나타냈다.

2. 공차 조건에서의 차체상하진동은 기존의 Coil Spring 대차가 약간 양호한 것을 볼 수 있었다.

3. 영차 조건에서의 차체상하진동은 Conical Rubber Spring이 약간 양호한 것을 볼 수 있었다.

4. 대차 프레임 위치에서의 좌우진동은 Conical Rubber Spring이 매우 우수한 것으로 나타났다.

5. 축상 위치에서는 축상 구조의 차이로 인하여 Conical Rubber Spring을 적용한 차량의 진동값이 전반적으로 높게 나타났다.

6. 시간축으로 보면 Conical Rubber Spring을 적용한 차량의 진동이 보다 빨리 감쇠되어 RMS 값은 전반적으로 우수하였지만 일부 취약 궤도부(분기기, 교량)에서는 순간 최대값이 높게 나타났다.

7. 개선차의 공차조건 상하방향 진동을 개선하기 위해서는 스프링상수를 낮추는 것이 효과적이다.

8. 개선차의 주파수분석결과를 볼 때 4Hz와 11Hz 대역의 진동성분이 개선되도록 Hydraulic Damper의 Orifice Hole을 조정하는 것이 필요하다.(특히 4Hz 대역)

참고문헌

- (1) 日本機械學會, 1996, “鐵道車輛のグイナミクス”, 電氣車研究會
- (2) 함영삼 외, 2000, “고속화차 개발사양 제시 및 핵심장치 개발(1단계)”, 한국철도기술연구원
- (3) 김남포 외, 2000, “화차대차용 고무현가장치 적정 설계변수 선정에 관한 연구, 한국철도기술연구원