

화물수송용 철도차량의 주행안정성 향상에 관한 실험적 연구

°함영삼*, 오택열**

Experimental Study on the Improvement of Running Stability for Freight Car

Y.S. Haam, T.Y. Oh

ABSTRACT

This experimental study is the improvement of running stability for freight car. KNR (Korean National Railroad)'s conventional wagons, light bodies running on Barber style bogies with 5-1/2×10 journals, would be considered fundamentally to be a most difficult car to control above 100km/h. From the results of experiment, to permit high speed operation safely, was realized with the resilient side bearing. Also, equipped with resilient side bearing, and elastowedge friction elements to eliminate bolster wedge pocket wear, KNR's wagons can be secure the running stability with lower maintenance requirements than current experience.

1. 서론

차량 고속화에 수반하여 주행안전성 면에서 배 놓을 수 없는 문제로 가장 중요한 탈선의 현상이 있다. 탈선문제는 예로부터 많은 철도기술자에 의하여 연구되어 왔음에도 불구하고 종종 사고가 발생하고 있어 더욱 철도기술자들을 괴롭히고 있다. 이처럼 탈선현상을 연구해서 사고를 방지하는 것의 어려움은 학문적으로는 차륜과 레일간의 접촉 현상이 단순하지 않고 이것이 차량의 복잡한 운동에 지배되는 것이 되어 실제로 차량간에 존재하는 부품과 구조의 차이, 사용에 수반되는 상태의 변화, 궤도의 뒤틀림이나 레일의 형상 및 상태의 영향, 운전조건 등 여러 가지 조건의 결합에서 발생하는 것이기 때문에 때에 따라서는 원인불명으로 처리되는 사고가 발생하는 요인이기도 하다.

그러나 탈선을 야기시키는 기본조건과 이것을

방지하기 위한 기준은 문제의 난이도에 관계없이 명확히 할 필요가 있으며, 이를 잘 관리함으로써 각각 단독으로는 결정적 원인이 아니라 할 지라도 이것이 쌓여 탈선확률을 1/10 또는 1/100로 감소시켜 주행안전성을 확보할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 화물열차의 주행안정성 향상방안으로 기존의 화차에 탄성 사이드 베어링과 후력선 앵치를 설치하여 진동가속도를 측정하였으며 속도 대역별 피크치와 평균치 분석을 통하여 화물 수송용 철도차량의 주행안정성을 확인하고자 하였으며, 나아가 철도차량의 속도향상을 위한 연구개발 방향을 제시하고자 한다.

2. 사이드베어링과 주행안정성

2.1 사이드베어링과 탈선

차량이 궤도 위를 주행할 때 수직력과 횡압이 작용하며, 횡압이 크면 차륜이 탈선하게 된다.

Fig. 2-1과 같이 횡압 Q 가 레일두부에 수평면으로 작용하면 차륜이 레일을 약간 올라탄다. 이 상태에서 차륜과 레일의 접촉점에서 공통접선 $l_1 l_2$ 가 레일면과 이루는 각 δ , 차륜과 레일간의

*한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원

**경희대학교 기계공학과 교수

마찰계수를 μ_w 라 하면, 차륜이 $l_1 l_2$ 면의 마찰력에 의하여 레일면을 러닝오버(Running over)하는 조건은 다음과 같다.

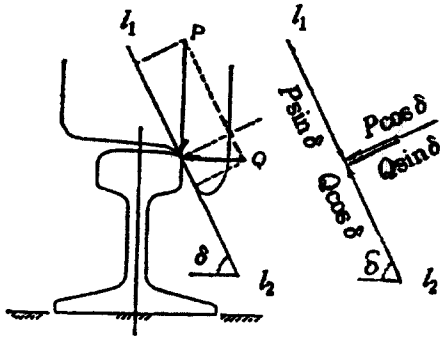


Fig. 2-1 Contact Force of Wheel and Rail

$$Q \cos \delta - P \sin \delta > \mu_w (P \cos \delta + Q \sin \delta) \quad (1)$$

또, 차륜이 $l_1 l_2$ 면의 마찰력에 의하여 슬립오버(Slip over)하는 조건은 다음과 같다.

$$P \sin \delta - Q \cos \delta < \mu_w (P \cos \delta + Q \sin \delta) \quad (2)$$

$\mu_w = \tan \tau$ 라 두고 위의 식들을 정리하면

$$\frac{Q}{P} > \frac{\tan \delta \pm \mu_w}{1 \mp \mu_w \tan \delta} = \tan(\delta \pm \tau) \quad (3)$$

위의 식 (3)을 탈선계수라 한다.

안전운행을 위한 사이드 베어링의 마찰계수는 식의 단순화를 위하여 서스펜션의 수직운동에 의한 반력만을 고려하여 전부대차에 적용하고 센터 플레이트의 요동지점(hinge point)을 기준으로 한 모멘트방정식으로부터 구한다.⁽¹⁾

(1) 사이드 베어링 유간이 적을 때

직선상에서 차체동요에 따라 차체의 충격력이 자주 볼스터 스프링에 작용되어 좌우동요가 증대되고 곡선상에서 특히 캔트가 심하고 그 완화거리가 짧은 곡선에 들어간 때에는 궤도가 뒤틀려 있는 것과 같은 상태이므로 차체가 궤도에 순용해서 변형되지 않기 때문에 그 지점에서 4륜차의 1륜 또는 보기차에 있어 한쪽대차의 편측 2륜이 다른 차륜의 레벨보다 떨어지고 2차륜의 윤중은 감소되는 현상을 크게 한다. 또한 알맞은 캔트가 붙은 곡선에 적당한 사이드 베어링 유간을 가진 차량이

들어가면 외측 사이드 베어링은 접촉하고 보기 상의 하중은 센터플레이트와 사이드 베어링 간에 균등 분포된다. 그러나 캔트가 너무 높거나 사이드 베어링 유간이 너무 적으면 차체가 반대 방향 즉 곡선 내측방향으로 기울어져 내측 사이드 베어링을 타격하게 되고 하중은 급격히 외측사이드 베어링에서 내측 사이드 베어링으로 옮겨와 외측 궤도를 타고 있는 외측 차륜의 중량은 감소되어 경우에 따라서는 차륜이 궤도로부터 부상되어 차량이 곡선 안쪽으로 탈선 전복하는 수가 있다. 특히 이런 사고는 중심(重心)이 높은 탱크차 등에 많다.

(2) 사이드 베어링 유간이 큰 경우

사이드 베어링 유간이 큰 경우에 캔트가 큰 곡선을 통과할 때는 윤중감소의 영향을 적게 하므로 직접 탈선의 원인이 되지는 않으나 상당속도로 하구배를 달릴 때 좌우동요가 심하게 되고 그 때문에 한쪽 차륜이 부상하여 사고를 일으키는 수가 있다.

(3) 탄성 사이드 베어링

해외에서는 접촉식 또는 탄성 사이드 베어링(이하 탄성 사이드 베어링이라 함)을 널리 사용하고 있으며, 말레이시아의 경우 이와 같은 기술을 도입하여 속도 80km/h에서 100km/h로 속도향상을 이룩한 사례도 소개되고 있다.

AAR M-948⁽²⁾은 대차 사이드 베어링에 대하여 규정하고 있는데 기존 사이드 베어링과 탄성 사이드 베어링을 구분하여 규격화하여 놓고 있다. 여기에는 저널 규격에 따른 수직방향 부담하중은 기존 사이드베어링이나 탄성 사이드베어링이 동일하게 되어 있고, 센터 플레이트, 사이드 베어링, 기타 장치들을 조합하여 탄성사이드 베어링을 사용할 때 탈선계수 및 센터 플레이트와 사이드 베어링간 하중 분담을 규정하고 있다.

2.2 사이드베어링의 마찰계수

차륜은 차축과 억지끼워맞춤되어 있고 답면구배가 존재하기 때문에 불안정한 궤도주행을 하여 "hunt"가 발생한다. 불안정한 주행은 좌우방향 및 주행방향회전형태로 나타난다. 궤도의 기하학적 특수성으로 인해 윤축이 대차 Bolster 및 다른 윤축과 평행을 유지하여야 하므로 "hunt"가 일어나게 되는 것이다. 또한 이것은 Bolster가 윤축과 같이 차체아래에서 전후회전현상을 일으킨다는 것

을 의미하며, 일반적으로 대차 hunting이라는 파괴 현상으로 알려지고 있다. Bolster가 차체아래에서 전후 회전하여 대차 hunting이 일어났을 때 hunting을 조정할 수 있는 가장 효과적인 방법은 회전에 저항하는 구조물을 부착하는 것이다.

비접촉식 사이드베어링은 차체와 접하지 않으므로 Bolster의 회전으로 인한 대차 hunting을 방지할 수 없다. 접촉식사이드베어링은 회전에 대한 저항력이 존재하므로 대차 hunting 방지효과가 크지만 올바른 저항력의 설정이 무엇보다 중요하다. 과도한 저항은 곡선주행시 문제가 될 수 있고 미소한 경우는 hunting 운동을 조절할 수 없다.

저항의 정도는 아래의 두 가지 요인에 의해 결정된다.

- ① 사이드베어링과 마모판사이의 마찰계수
- ② 사이드베어링에 의한 수직력 (초기 하중)

일반적인 마찰계수값은 약 0.4정도로 사이드베어링 덮개와 차체 마모판의 재질에 따라 결정되고 윤활작용이 없다는 게 중요하다. 또한 초기 수직하중은 사이드베어링의 높이에 따라 결정되므로 정확한 높이를 설정하는 것이 중요하다.

실제로 대차 hunting은 차륜 hunting(정확하게는 윤축 hunting)이다. 대차의 윤축이 횡방향 불안정 운동이 없는 직선구간을 주행할 때 차륜과 레일간의 횡방향 상호작용력은 서로 균형을 이룬다(윤축에서 각각의 차륜에 작용하는 횡방향 힘의 성분은 크기는 같고 방향은 반대이다). 횡방향 힘의 성분이 균형을 이루고 있는 한 윤축은 안전하게 주행하게 된다.

열차주행시 차륜과 레일간의 접촉이 연속적으로 변하고 횡력의 균형에 민감하므로 윤축에 작용하는 횡방향 성분은 중요하게 취급된다. 횡력의 불균형은 시스템의 자유도를 연속적으로 변화시킨다. 이러한 횡력의 불균형이 대차의 유효관성력을 초과할 정도로 클 경우 윤축은 횡방향 거동을 하게 된다. 이와 같이 차륜과 레일간의 횡력이 시스템의 안정성을 좌우하게 되므로 불균형 정도와 대차관성력의 크기에 따라 안정성이 복원될 수 있다.

차륜과 레일간 상호작용력의 불균형이 대차관성력을 초과할 경우 윤축에 큰 횡가속도가 발생하여 차륜이 궤도를 벗어나고자 한다. 열차가 궤도를 고속으로 주행하고 차륜과 레일간의 큰 상호작용력의 불균형이 발생하면 레일을 벗어나고자 하는 주기적인 횡방향 병진운동이 일어난다. 윤축의 주기적인 횡방향 좌우진동은 유효대차관성을 초과하

는 차륜/레일의 횡력의 불균형이 존재하는 한 계속 발생하게 된다. 이것이 바로 hunting이다(횡방향 힘의 성분을 통해 윤축의 균형을 복원시키고자 한다).

주기적인 hunting을 방지할 수 있는 방법에는 크게 두 가지가 있다. 첫째로 횡력의 불균형이 대차의 관성력을 초과하지 않도록 새로운 차륜담면형상을 고안하여 횡력을 감소시키는 방법이다. 그러나 새롭게 고안된 차륜담면형상의 경우 정상적인 직선 및 곡선주행이 어렵고 hunting이외의 문제를 야기시킬 수 있다.

또 다른 방법으로 대차의 저항관성력을 증가시키는 것이 있다. 여기에서는 이를 유효관성이라 하였으며, 유효관성은 횡방향 병진운동에 저항하는 윤축의 질량관성과 주행중인 전체대차에 작용하는 외력의 함수로 되어 있다. 그러므로 차체나 대차의 중량을 높이면 hunting에 대한 저항이 증가된다. 이러한 효과는 공차화차가 임계속도 이상으로 주행하면 영차화차보다 심각한 hunting이 발생한다는 것을 설명하는데 적용된다. 일반적으로 journal size가 작은 대차가 큰 대차보다 심한 hunting이 발생하는 것으로 알려지고 있다.

대차 유효관성중에서 가장 중요한 성분이 회전관성이다. 회전저항관성은 warping 및 squaring과 깊은 함수관계를 가지고 있다. 만일 대차가 "out of square"로 변형되지 않을 정도의 단단한 강체로 제작되었다면 hunting에 대한 저항이 크게 된다. 그러나 상용 3-piece 대차는 강체가 아니고 squaring에 대한 저항이 구속조건이나 주요 성분들과 함수관계를 가지므로 상호표면마찰에 따라 변한다. Column Snubbing System(대차의 수직하중을 무시하는 시스템)에서는 Bolster와 side frames사이에 friction wedge압력이 작용하므로 대차가 squaring moment에 의해 취약하게 된다. 그러므로 hunting에 대한 저항능력을 크게 하려면 수직하중이 일반적인 레벨보다 낮은 snubbing 매커니즘에서의 대차보다는 상대적으로 큰 수직하중이 작용하는 경우가 훨씬 효과적이라는 것이 증명된다. 잔류외력은 대차의 센터피봇과 사이드베어링에 존재한다. 대차의 회전저항모멘트가 발생하는 센터피봇의 마찰력은 대차관성에 효과적인 저항성분이다. 이는 사이드베어링의 마찰과 동일한 효과를 나타낸다. 그러므로 센터피봇과 사이드베어링의 마찰을 증가시키는 방법이 가장 효과적인 유효대차관성을 증가시키는 것으로 차륜/레일간

횡력의 차이로 인한 크리피지(Creepage)와 윤축의 hunting에 대한 대차관성저항능력을 증가시킨다. 센터피봇의 마찰을 증가시키기 위한 방법은 많지 않다. 센터피봇마찰의 감소는 플라스틱재를 사용하는 경우 hunting에 대한 대차의 저항을 감소시킨다고 알려져 있다. 센터피봇 마찰의 중요성을 효과적으로 입증하는 방법은 대차 hunting 주기가 차체상하진폭구간에서 얼마나 자주 발생하는지를 측정하는 것이다. 그러기 위해서는 센터피봇에 작용하는 하중을 정하중 이하로 낮추어야 하므로 대차의 무게를 가볍게 하여야 한다.

요즘에는 사이드베어링에 부착되는 저항체의 위치가 명확하게 되어 있다. 물론 로울러 타입 사이드베어링이나 비접촉사이드베어링은 차체가 센터피봇과 접촉하고 있기 때문에 차체와 대차사이에 저항체가 없다. 저항체를 적절히 부착하는 방법으로 대차와 사이드베어링사이의 상대운동을 막을 수 있도록 수평방향 마찰력이 항상 존재하는 균일 접촉요소의 형태를 사용한다. 이러한 마찰력은 윤축의 hunting을 제어하기 위한 또 다른 대차의 관성저항과 결합한다.

대차 hunting을 제어하여 주행속도를 향상시키고자 사이드베어링에 부착하는 저항체의 크기는 1971년 STUCKI Company의 시험으로 검토되기 시작되었다. 이러한 시험에서 0.5~0.7ton 정도의 마찰저항이 가해지면 약 100km/h의 속도를 유지할 수 있도록 마찰저항이 대차와 차체를 효과적으로 제어할 수 있음을 보여주었다. 원래의 사이드베어링은 비금속 덮개가 있고 직접 사이드베어링 마모판과 접촉하였다. 비금속 탄성요소와 차체 사이드베어링 마모판간의 마찰계수는 0.22~0.25이므로 2.5~2.7ton 정도의 초기수직하중이 작용하여야 한다. 이렇게 하면 사이드베어링에서 큰 저항이 발생하여 열차의 경량화와 속도향상을 꾀할 수 있으므로 1985년 이후 규격화되었다. 높은 초기하중을 가할 수 있는 탄성블록의 제작은 실용화되기 어려워서 여전히 사이드베어링과의 공간에 맞추어 설계하고 있다. 그러므로 새롭고 실용적인 설계를 위해 금속덮개를 부착하고 있다. 차체 사이드베어링 마모판과 접촉하는 금속덮개 사이의 마찰계수가 0.4~0.45이므로 2.5~2.7ton의 초기압축하중이 가해지면 마찰저항이 1~1.2ton으로 증가한다. 이러한 마찰저항의 증가는 hunting을 억제하여 130km/h이상의 주행속도 향상을 꾀할 수 있게 해준다.

3. 실차시험

3.1 시험방법

- (1) 시험항목 : 차체 및 축상의 진동가속도
- (2) 시험차종 : 추강대차 화차 및 용접대차 화차
- (3) 시험장비 : 시험에는 다음과 같은 장비를 Fig. 3-1과 같이 구성하였다.

- Signal Processor DP7100, 16ch, 1set
- Tape Recorder SIR-1000, 32ch, 1set
- Dynamic Strain Amplifier, 2set(20ch)
- Speed & Distance Meter, 1set
- Digital OscilloGraphic Recorder, 24ch, 1set
- Oscillo Scope, 1set
- Vibration Accelerometer, 5G 10ea
10G 10ea

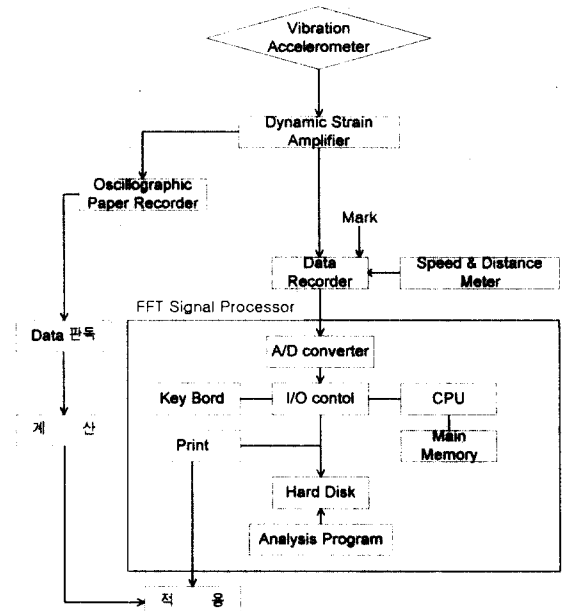


Fig. 3-1 Block Diagram of Measuring System

(4) 적용부품

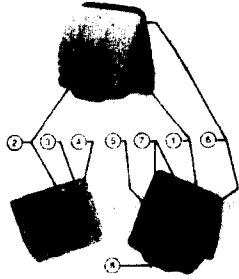
화차의 주행안정성 향상을 위하여 다음과 같은 4가지 부품(Fig. 3-2)을 적용하였다.

- Roller 형식 탄성 Side Bearing
- Roller 없는 형식 탄성 Side Bearing
- Friction Wedge
- Stabilizer

3.2 열차편성 및 운영



Side Bearing



Friction Wedge



Stabilizer

Fig. 3-2 Applied Parts

시험열차편성은 부품간의 개선효과 및 기존차와의 비교를 위하여 다음과 같이 편성하였다.

- ① 탄성 Side Bearing(roller 형식)+Friction Wedge
- ② 탄성 Side Bearing(roller 형식)+Stabilizer
- ③ 탄성 Side Bearing(roller 형식)
- ④ 탄성 Side Bearing(roller 없는 형식)
- ⑤ 기존 컨테이너차량

4. 시험결과

4.1 평가기준

AAR(Association of American Railroad)에서는 헌팅에 대하여 최소임계속도 70mph(112.7km/h)에서 최대 좌우방향 진동가속도는 1.5g, Standard Deviation 0.26으로 규정하고 있다.

국내의 진동가속도 평가기준은 객차와 기관차에 대하여 상하방향과 좌우방향을 구분하여 철도차량의 진동 측정방법에 따라 사용하고 있다⁽³⁾.

4.2 컨테이너 화차

AAR의 헌팅에 관한 좌우진동기준에 본 시험결과를 적용해 보면 대부분이 한계치 이내에 들고 있지만, 단지 ISB-12 사이드베어링과 Stabilizer를 조합하여 설치한 차량이 공차 110km/h에서 좌우방향 진동가속도가 1.5g를 초과하여 1.94g를 나타내고 있다.

국내의 기관차에 대한 진동가속도 평가기준을 적용하여 속도별 진동가속도를 평가한 결과는 Fig. 4-1~4와 같다.

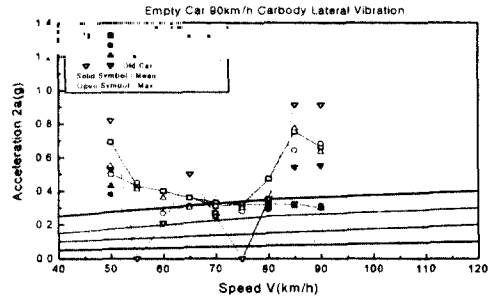


Fig. 4-1 Empty Car 90km/h Carbody Lateral

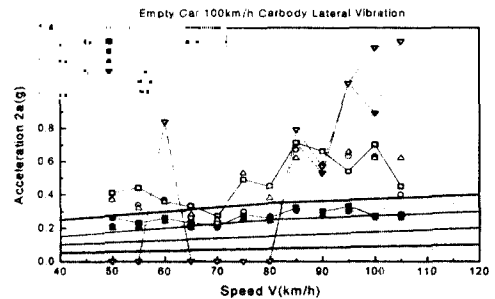


Fig. 4-2 Empty Car 100km/h Carbody Lateral

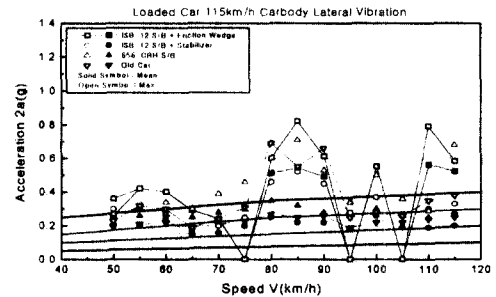


Fig. 4-3 Loaded Car 115km/h Carbody Lateral

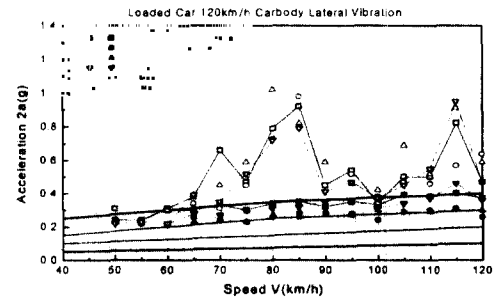


Fig. 4-4 Loaded Car 120km/h Carbody Lateral

4.3 벌크시멘트 화차

태백선 쌍룡-태백간의 차체진동가속도를 측정 한 결과는 Fig. 4-5~6과 같다.

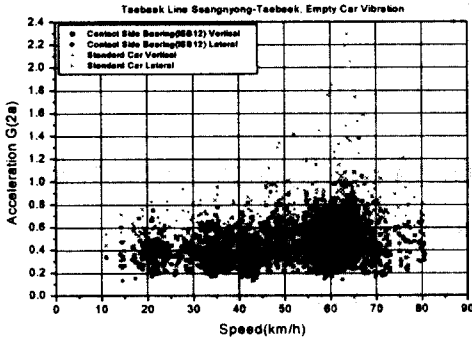


Fig. 4-5 Empty Car Carbody Vibration

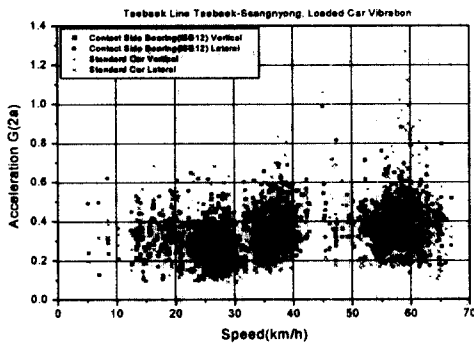


Fig. 4-6 Loaded Car Carbody Vibration

4.4 용접구조형 대차 호퍼차

영동선 흥전-통리간의 차체진동가속도를 측정 한 결과는 Fig. 4-7~8과 같다.

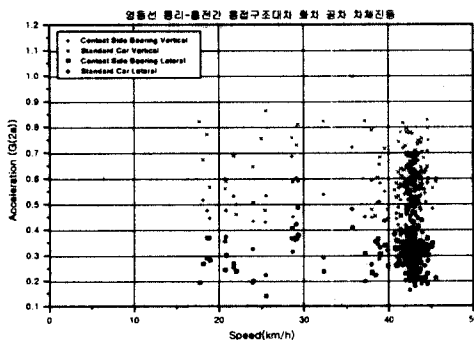


Fig. 4-7 Empty Car Carbody Vibration

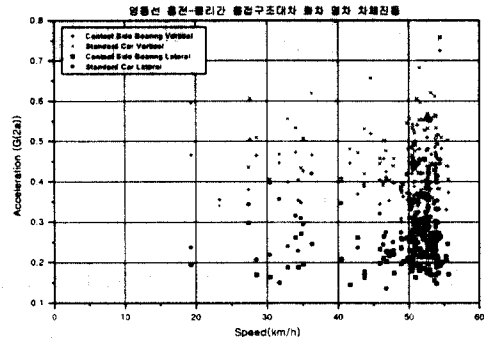


Fig. 4-8 Loaded Car Carbody Vibration

5. 결론

화차의 주행안정성 향상을 위하여 탄성 사이드 베어링 및 Stabilizer, Friction Wedge 등 부품을 운행화차에 적용해 본 결과 속도향상 가능성을 확인할 수 있었으며, 시험결과는 다음과 같다.

- (1) 로울러가 있는 탄성 사이드 베어링과 로울러가 없는 탄성 사이드 베어링을 기존차와 비교해 볼 때 로울러가 있는 탄성 사이드 베어링이 직선선로 보다는 곡선선로에서 효과가 있었다.
- (2) Friction Wedge는 차량진동에 미치는 영향은 거의 없었으며, 우수한 내마모성으로 인하여 유지보수성이 양호할 것으로 판단된다.
- (3) Stabilizer는 공차 상하진동과 영차 좌우진동에는 효과가 있었으나 공차 110km/h 좌우진동에서 AAR기준인 최대 1.5g를 초과하는 값을 나타냈다.
- (4) 용접구조형 대차에서 기존의 접촉식 사이드베어링보다 탄성 사이드베어링의 진동성능이 우수하게 나타났다.
- (5) ISB-12 탄성사이드 베어링은 영차보다는 공차에서, 상하방향진동보다는 좌우방향진동을 개선하는데 보다 유리한 것으로 나타났다.

6. 참고문헌

- (1) 곡선궤도에서 궤도 및 차량의 진동이 궤도이탈에 미치는 영향, 정승준, 석사학위논문, 1997
- (2) AAR M-948, Association of American Railroads, Mechanical Division, Specification for Truck Side Bearing, 1979
- (3) 철도차량의 진동측정방법, 철도기술연구소, VOL23, NO1, pp 190~195, 1989,