

지하철용 고속전동차의 진동원 및 개선대책
**Vibration sources and its countermeasures of high speed electric trains
for subway**

박기수* 최연선**
Park, Ki-Soo Choi, Yeon-Sun

ABSTRACT

The electric train in the first line subway runs faster in the block from Suwon to Cheonan than the general block. The faster run results in the deterioration of ride quality due to the increase of noise and vibration. To reduce the noise and vibration of the electric train, a running test of the electric train was performed in the block from Suwon to Cheonan. The experimental results show that the sources of the noise and vibration basically comes from the irregularity of the railroad track and the connection part between car body and bogie. The possible countermeasure of the high speed electric train can be the reinforcement of the center pivot to have more flexibility and the frequent maintenance of electric train.

1. 서 론

1호선 전기동차 노선이 수원 - 천안으로 확장됨에 따라 장거리 운행에 따른 사용자 편의를 위해 현재 최고 속도 110 km/h로 운행 중이다. 그러나 기존의 철도차량이 80 km/h로 주행하도록 설계된 상황에서 이러한 고속주행은 차체의 진동과 실내 소음을 크게 유발하며, 승차감 저하 및 철로 주변 거주자의 민원을 야기할 수 있다. 따라서 고속주행에 따른 전동차 소음과 진동을 저감하기 위해 진동원 파악 및 진동저감 대책이 강구되어야 하며, 전동차 진동저감 관련 연구로 국외에서는 주로 철도에 대한 전반적인 이론인 안정성[1], 휠 레일 상호작용 메커니즘[2] 등에 대한 연구가 수행되고 있으며, 국내에서는 현가장치 강성변화, 차체 질량에 따른 응답변화[3],[4], 경량화 차체 개발 등 실험적 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 주행 중 대차와 객차에서 발생하는 진동신호를 측정, 분석한 결과를 통해 철도차량의 진동 발생 원인을 규명하고 대책을 강구하고자 하였다.

2. 주행시험

전기동차의 진동특성을 파악하기 위해 정비 전·후 차량을 대상으로 병점-천안 구간에서 주행시험을 하였다. 정비는 전동차 정비지침서[5]에 의거한 중수선을 기준하였으며, 중수선은 2년 이내 300,000 km 이내의 차량을 대상으로 고도정비검수를 말한다. 교체 부품의 경우 센터피봇 부위의 교체를 중점으로 하였다.

* 성균관대학교

E-mail : haesahwa@skku.edu

TEL : (031)290-7501

**성균관대학교, 정회원

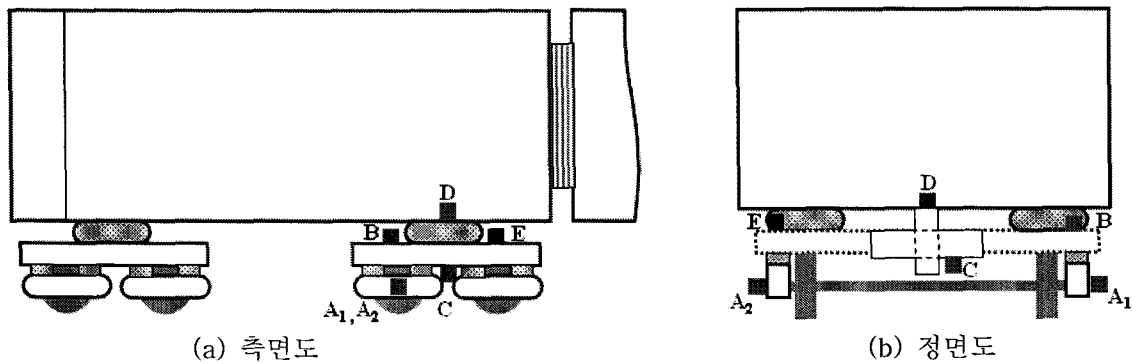
E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7440

그림 1은 센서 부착위치의 개략도를 나타내며, 그림 2는 센서 부착 위치 사진을 나타낸다. 윤축의 진동이 대차, 피봇홀더 및 차체로 전달되는 과정에서 나타나는 진동저감 효과를 파악하고자 좌우 윤축의 차축베어링에서 가속도를 측정하였다. 대차 및 피봇홀더, 차량 바닥, 차량 벽면에는 3축 가속도계를 설치하였으며, 전동차 주행 속도를 측정하기 위해 타코센서를 설치하였다.

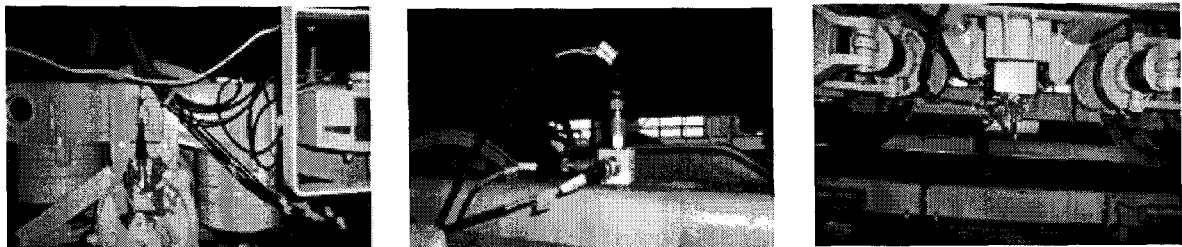
일반적으로 주행응답 평가는 KS R9160[6]을 바탕으로 수행하는데, 속도증가에 따른 가속도 응답 도출 시 측정 구간을 100 m 또는 500 m 마다 구분하고, 각 구간 내의 진동 가속도의 최대 전진폭 (Peak-to-Peak)과 구간 시간 평균 속도를 구한다. 속도는 5 km/h 또는 10 km/h 폭마다 정리하여 최대 전진폭의 평균값을 구하여 절선 그래프로 도시한다.

본 논문에서는 보다 세밀한 결과를 도출하기 위해 3초 간격으로 나누어 각 구역의 최대 전진폭으로 평가하였으며, 속도 등분을 3 km/h로 나누어 응답을 도출하였다.



A: 윤축, B: 대차, C: 피봇홀더, D: 차량바닥, E: 벽면, F: 소음계, G: 타코센서

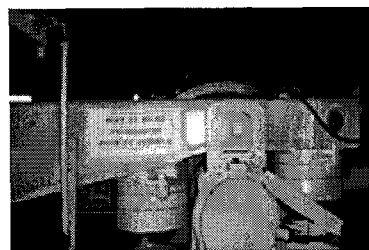
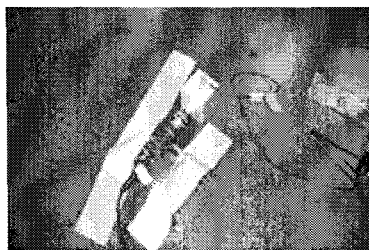
그림 1 센서위치 개략도



A. 윤축

B. 대차

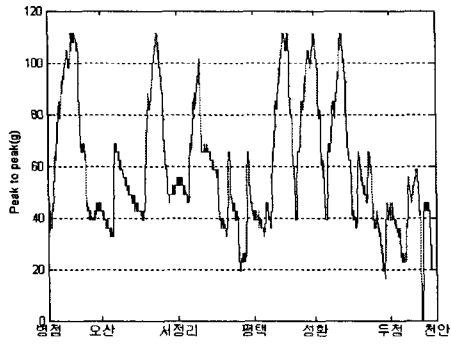
C. 피봇홀더



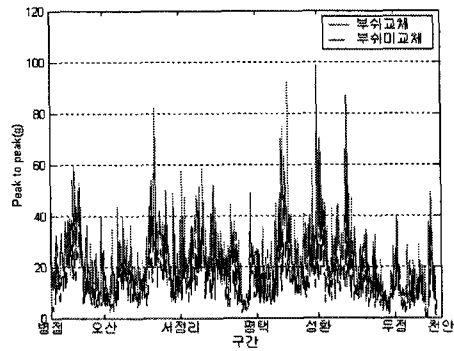
D. 차량 바닥

E. 타코 센서

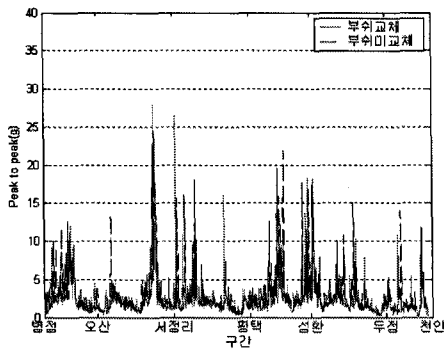
그림 2 측정 사진



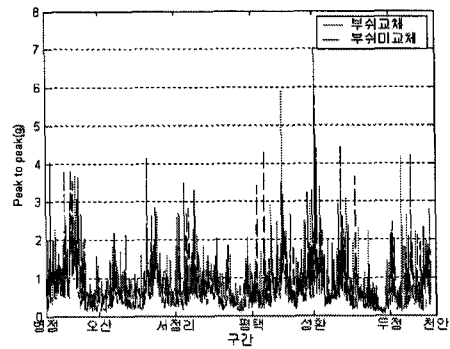
(a) 속도



(b) 윤축



(c) 대차



(d) 객차

그림 3 전 구간 속도 및 위치별 수직 최대 전진폭 응답

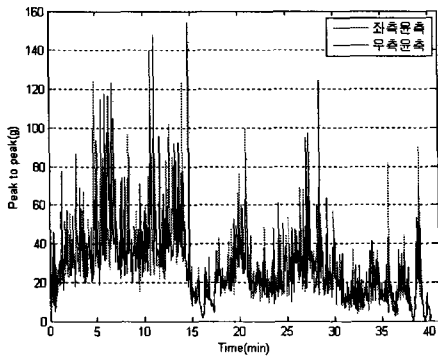
3. 주행시험 결과

그림 3은 시험 구간에 대해 윤축, 대차 및 객차의 수직 응답을 나타낸 것이다. 전체적으로 1차 현가장치에서 대차 진동은 윤축 대비 약 20% 수준으로 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 2차 현가장치에서 대차 대비 약 23%, 윤축 대비 약 4% 수준으로 진동이 감소하였다.

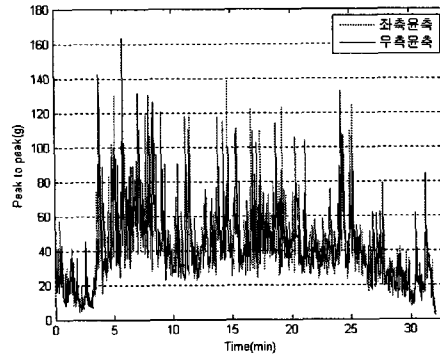
4. 레일 불균일

레일 불균일은 철도차량의 진동응답에 지배적인 역할을 하며, 불균일에 의한 가진 성분이 철도차량 시스템의 진동원인으로 알려져 있다[7]. 그림 4는 각각 상하행선 구간별 윤축 최대 전진폭을 나타내며, 그림 5는 좌우 윤축의 최대 전진폭의 차이를 나타낸다. 윤축의 진동은 차량의 속도에 영향을 받기 때문에 윤축의 진동이 좌우 레일 불균일이라 단정할 수는 없으나, 좌우 윤축의 상하방향 진동 차이 발생은 곡선구간을 포함한 일부 구간에서 좌우 레일에 경사가 있음을 의미한다. 이러한 좌우 레일 가진의 차이가 철도차량의 요잉을 발생시키고, 이는 안정성에도 영향을 미칠 수 있다.

그림 6은 속도별 윤축의 진동 응답을 도시한 그래프이다. 전체적으로 속도가 증가함에 따라 진동 응답이 증가하며, 속도 증가에 따른 가속도 산포 또한 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 레일 상태에 따라 윤축의 진동 응답이 변화함을 뜻하며, 휠과 레일의 연삭 작업을 수행함으로써 레일 불균일에 의한 진동을 저감할 수 있다.

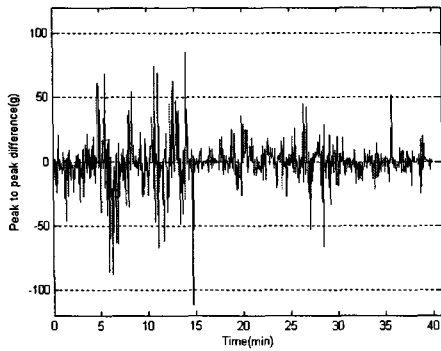


(a) 하행 구간

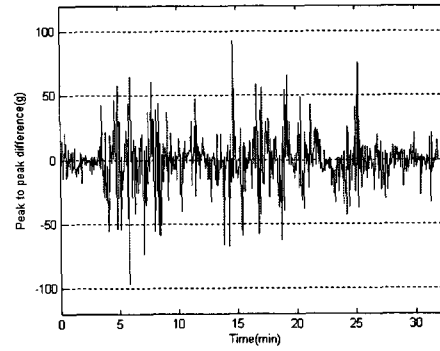


(b) 상행 구간

그림 4 윤축 상하방향 최대 전진폭

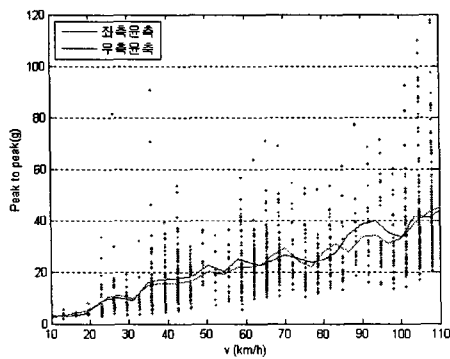


(a) 하행 구간

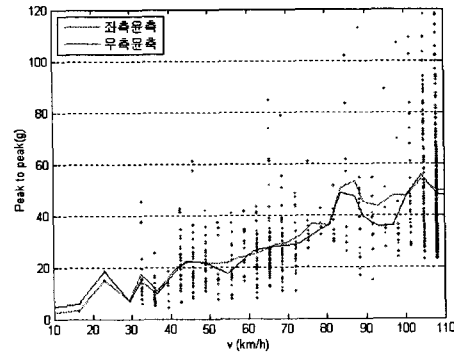


(b) 상행 구간

그림 5 좌우 윤축 최대 전진폭차



(a) 하행 구간



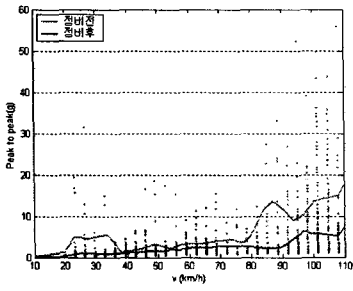
(b) 상행 구간

그림 6 윤축 상하방향의 속도별 최대 전진폭

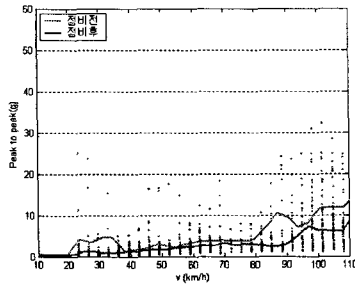
5. 정비효과

정비 여부에 따른 전기동차의 주행응답을 파악하고자 대차와 객차의 가속도를 측정하였다. 일반적으로 대차 및 객차의 모드 변위는 시스템 응답보다 무시할 정도로 작으므로 대차 및 객차의 한 지점에 3축 가속도계를 설치하여 응답을 측정하였다.

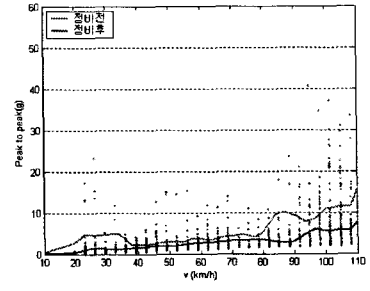
그림 7은 정비 전후의 대차 3축 가속도 응답으로서 정비 후 응답이 진행 방향과 좌우, 상하방향에서 진동저감 효과가 큰 것을 확인할 수 있다. 특히 정비 차량의 80 km/h 이상의 고속주행 구간에서 진동



(a) 진행방향 진동

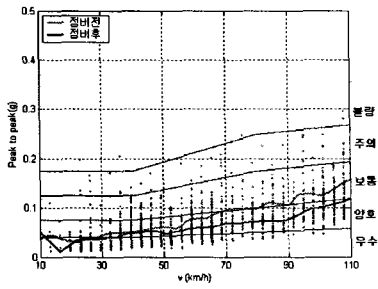


(b) 좌우방향 진동

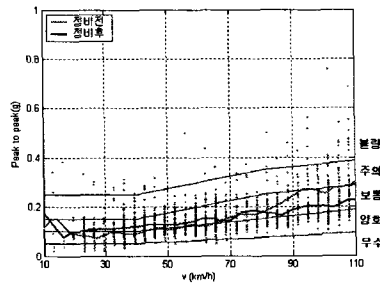


(c) 수직방향 진동

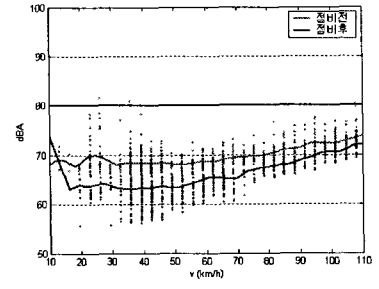
그림 7 중정비효과 - 대차



(a) 좌우방향 진동



(b) 수직방향 진동



(c) 소음

그림 8 정비효과 - 객차

응답이 매우 감소하는 것을 확인할 수 있는바, 전기동차의 고속주행 시 진동 응답은 정비를 통해서 충분히 감소할 수 있음을 알 수 있다.

그림 8은 정비 전후 객차의 좌우 및 수직 진동 응답과 실내소음을 나타낸다. 대차의 진동과 마찬가지로 중정비 차량의 객차 진동도 고속주행 영역에서 현저한 진동 감소 효과가 있음을 확인할 수 있으며, 모든 속도 영역에서의 실내소음은 감소하였다.

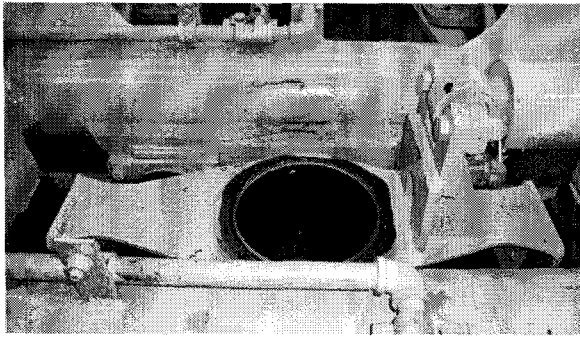
6. 센터피봇

센터피봇 부위의 교체 여부에 따른 진동응답 변화를 확인하기 위해 센터피봇 부위 교체 시험을 수행하였다. 이를 위해 센터피봇 지지부에 3축 가속도 센서를 설치하여 응답을 측정하였다.

그림 9는 구형 센터피봇 장치의 형상을 나타낸 것이다. 구형 센터피봇 장치[8]는 지지부 관통구와 피봇이 서로 접하는 구조로 되어 있으며, 두 개 요소 사이의 충격을 완화하기 위해 그림 9 (b) 와 같이 충격 완화용 부위가 있다.

교체된 부위는 180 mm의 원통으로 5 mm두께의 철판과 내부에 5 mm 우레탄으로 구성되어 있으며, 교체 부품은 이미 사용하고 있는 부품에 비해 충격하중에 의한 손상이 적으므로 충분한 연성과 감쇠성을 확보하고 있다고 볼 수 있다.

그림 10은 전동차 주행 속도에 따른 센터피봇의 속도별 최대 전진폭을 나타낸다. 고속에서 전후, 상하 방향의 개선 효과는 적으나, 좌우 방향으로의 개선 효과가 있음을 알 수 있다. 특히 100 km/h 이상의 속도에서 큰 진동저감 효과를 확인할 수 있는데, 이는 센터피봇과 피봇홀더는 전후, 좌우 방향으로 자유도가 구속되어 있으나 상하 방향으로의 구속되어 있지 않으므로 부위 교체 효과가 미미한 것이다.

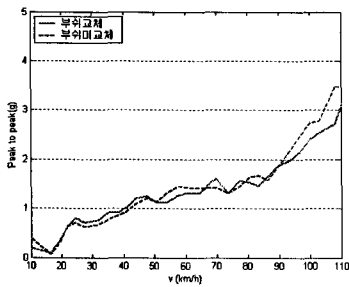


(a) 구형 센터피봇 장치

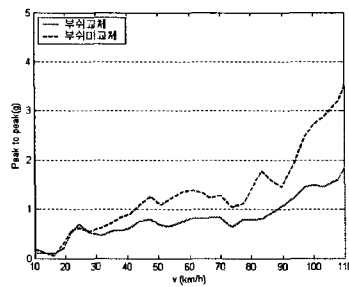


(b) 센터피봇 부서

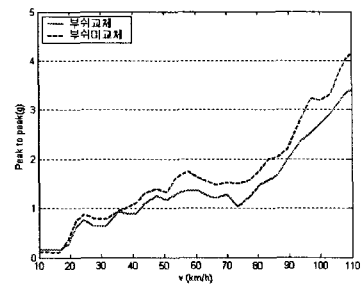
그림 9 구형 센터피봇 장치 및 센터피봇 부서



(a) 전후방향



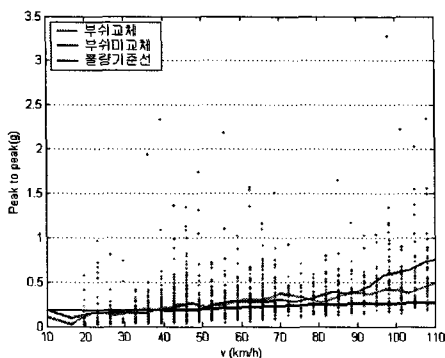
(b) 좌우방향



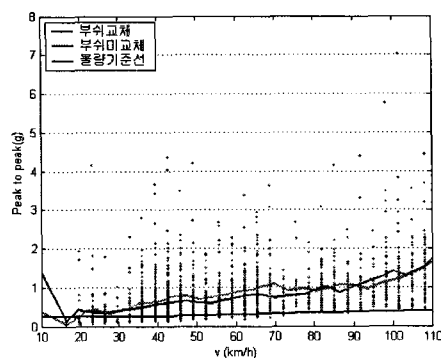
(c) 상하방향

그림 10 정비 전후 피벗홀더의 속도별 최대 전진폭

전후 방향으로 부서 교환 효과가 작은 것은 부서의 강성보다 피벗홀더와 대차를 연결하는 스프링 강성에 더 큰 영향을 받기 때문이다. 좌우 방향으로의 피벗 홀더가 10 mm 정도의 간극이 있어 피벗과 피벗홀더의 상대 변위가 10 mm를 초과하지 않는 한, 피벗 부서가 피벗의 좌우방향 진동에 영향을 미치지 않게 된다. 좌우 진동 변위가 10 mm를 초과하는 경우 과도 변위에 대한 억제는 스톱퍼나 지지 고무가 수행하게 되며, 피벗 홀더에 부착된 부서는 충격에 의한 진동을 저감시켜주는 역할을 한다. 따라서 피벗 홀더 부서를 교체하거나 신품처럼 유지하는 것이 피벗과 피벗 홀더 사이의 충격소음을 저감시키는데 효과적이다. 그리고 그림 11은 객차의 진동 응답을 나타낸 것으로 고속주행 시 센터피봇 부서를 교체한 차량에서 좌우방향의 진동응답이 매우 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 교체한 센터피봇 부서가 센터피벗과 피벗 홀더와의 충격을 감소시키며, 구형 전기동차의 센터피봇 부서의 교체는 고속주행에 따른 진동응답 감소에 효과적임을 알 수 있다.



(a) 좌우방향 진동



(b) 상하방향 진동

그림 11 정비 전후 객차의 속도별 최대 전진폭

7. 결 론

주행시험을 통하여 철도차량의 센터피봇 부쉬, 레일 불균일, 정비효과에 대해 진동유발 영향도를 분석한 결과 레일 불균일에 의한 가진이 철도차량 응답에 큰 영향을 미친다는 사실을 실차 주행시험을 통해 검증하였다. 정비 여부에 따른 진동응답 결과를 통하여 노후 차량에 대한 정비를 수행할 때 철도차량의 진동응답 개선 효과가 큰 것을 확인할 수 있다. 센터피봇 부쉬 교체 시 상하와 전후 진동저감 효과는 미미하나, 좌우 진동저감효과는 상당히 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 센터피봇 부쉬가 좌우 충격 진동을 상당히 감소시키기 때문이다. 따라서 레일 또는 휠의 연삭이나 정비를 통하여 진동저감 효과가 있으며, 센터피봇 부쉬의 교체 수행 시 상당한 진동저감 효과가 있었다.

감사의 글

주행시험에 협조해 주신 철도공사 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. D. Y. Zheng and S. C. Fan (2002), "Instability Of Vibration Of A Moving - Train-and-rail Coupling System," *Journal of Sound and Vibration*, 255(2), pp. 243-259
2. C. Andersson and T. Abrahamsson (2002), "Simulation of Interaction Between a Train in General Motion and a Track," *Vehicle System Dynamics* 2002, Vol. 38, No. 6, pp. 433-455
3. 최경진, 장동욱, 유원희, 권영필 (2001) "여객차량 현가장치의 강성비 변화에 의한 진동 실험," 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp.1110-1115.
4. 최경진, 장동욱, 유원희, 김완두 (2001) "여객차량의 질량비 변수가 상하진동에 미치는 영향," 한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회논문집, pp.1293-1299.
- 5.
6. 산업표준심의회 (2002) "철도차량의 진동 특성 - 측정 방법", 한국 표준 협회, KS R 9160
7. X. S. Jin, Z. F. Wen and K. Y. Wang (2005) "Effect of track irregularities on initiation and evolution of rail corrugation," *Journal of Sound and Vibration*, Volume 285, pp. 121-148
8. 오형식, 2005, 철도차량용 중심피봇 장치, 등록특허공보, 0581185