

준고속 도시철도의 진동분석 및 저감대책

Vibration Analysis and Mitigable Countermeasures of Semi High-speed Subway Electric Trains

박기수* · 최연선†

Ki-Soo Park and Yeon-Sun Choi

(2008년 7월 2일 접수 ; 2008년 10월 7일 심사완료)

Key Words : Subway Electric Train(지하철 전동차), Center Pivot Bush(센터 피봇 부쉬), Track Irregularity(레일 불균일), Maintenance Effect(정비 효과)

ABSTRACT

Subway electric trains need to be faster for accommodation of long distance passengers. The faster run of the existing trains results in deterioration of ride quality due to noise and vibration. To reduce the noise and vibration of the electric train, a running test of the electric train was performed and an ADAMS/Rail model was set up to verify the running test results. The experimental results show that the sources of the cabin noise and vibration basically comes from the irregularity of the railroad track and the deterioration of the connection part between cabin and bogie. Consequently for mitigation of noise and vibration of the electric train, the redesign of the center pivot with softer stiffness and the minimization of rail irregularity are necessary. the frequent maintenance of the train will lead to better comport.

1. 서 론

서울시 지하철은 1974년 개통 이래 수도권 시민의 중요 교통수단이 되어오고 있다. 친환경 대량수송 수단으로서 지하철은 도로교통을 대체하는 대중교통 수단으로 중요한 위치를 차지하고 있다. 그러나 최근 지하철 광역화와 더불어 기존 전동차로 운행되고 있는 80 km/h 이상의 준고속 주행은 과도한 소음과 진동을 유발하여 승차감을 저하시키고 있다. 이에 기존 전동차의 준고속 주행에 따른 동적 거동을 파악하여 전동차의 진동과 소음을 최소화할 필요가 있다.

전동차의 진동 관련 연구로 Redtenbacher⁽¹⁾는 강

체 대차 프레임과 윤축으로 구성된 대차의 공진 가능성을 연구하였고, Pearce⁽²⁾는 차륜과 레일의 접촉이 대차의 거동에 미치는 영향을 검토하였다. Stassen⁽³⁾은 차량에 대하여 레일 불규칙이 차체의 횡방향 동특성에 미치는 영향을 연구하였다. 박찬경⁽⁴⁾과 강부병⁽⁵⁾은 철도차량 해석 프로그램인 VAMPIRE를 이용하여 고속철도 차량의 동특성을 해석하였다.

이 연구에서는 기존 전동차에 대한 실차 주행시험을 통하여 진동을 측정하고, 측정된 데이터 분석과 전산해석을 통하여 진동저감 방안을 제시하였다.

2. 주행시험

준고속 주행 중 소음 및 진동문제가 발생하는 기존 전동차에 대해 실차 주행시험을 실시하였다. 차량 특성만을 고찰하기 위해 구동모터, 기어 박스, 판토타그래프 등이 장착되지 않은 차량인 전후 제어차량

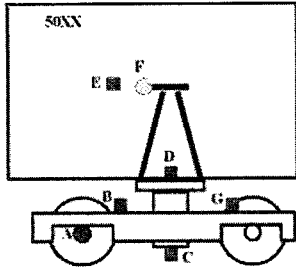
† 교신저자: 정희원, 성균관대학교 기계공학부

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

Tel : (031)290-7440, Fax : (031)290-5349

* 정희원, 성균관대학교 대학원 기계공학부

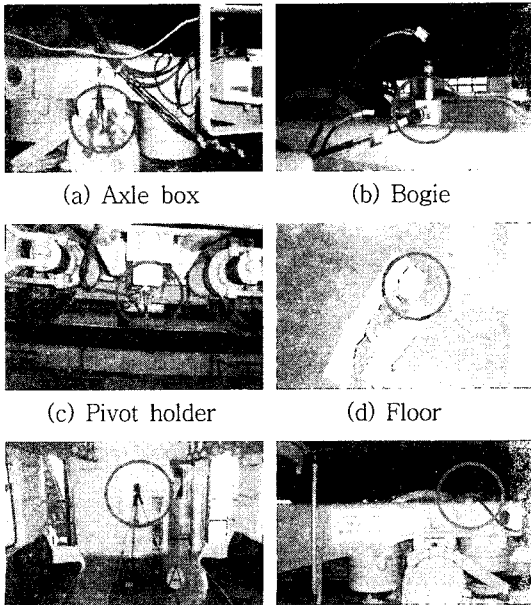
(TC차)을 시험 대상으로 하였다. 고속 주행이 가능한 직선구간을 0~110 km/h의 속도까지 가속과 감속을 반복하며 주행하여 데이터를 수집하였으며, Fig. 1과



A: Axle box, B: Bogie, C: Pivot holder, D: Floor, E: Wall, F: Sound-level meter, G: Taco meter
Fig. 1 Schematic diagram of sensor positions

Table 1 Sensor specification

Equipment	Model
Accelerometer	AC102-1A, 4393
Amp	B&K 2635, CTC PS03
DAQ system	6062E, NI BNC-2110
Taco sensor	SM312LVMHS



(a) Axle box (b) Bogie (c) Pivot holder (d) Floor (e) Sound level meter (f) Tacometer

Fig. 2 Sensor position

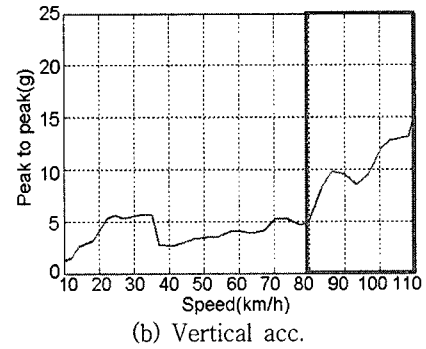
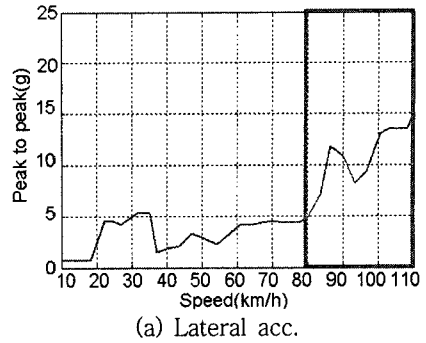
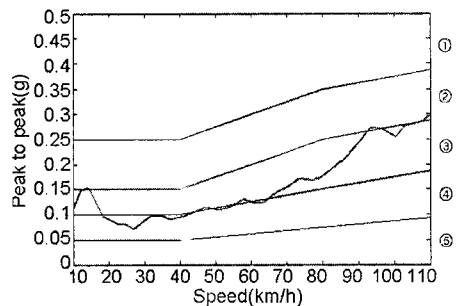
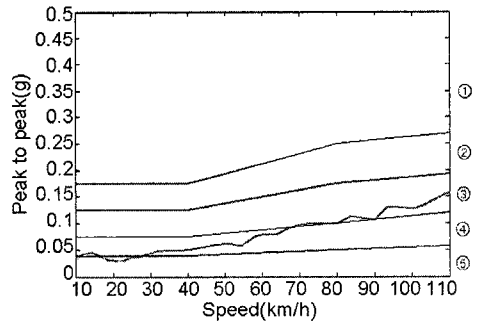


Fig. 3 Accelerations of bogie



- ① Bad, ② Attention, ③ Normality, ④ Fine, ⑤ Excellence

Fig. 4 Accelerations of cabin

Fig. 2, Table 1은 센서 부착 개략도, 센서 위치, 센서 사양을 각각 나타낸다.

국내 철도차량의 주행응답 평가는 일반적으로 KS R9160⁽⁶⁾을 기준으로 하며, 속도증가에 따른 측정구간을 100 m 또는 500 m 마다 구분하여, 각 구간에서 진동가속도의 최대전진폭(peak to peak)을 5 km/h 또는 10 km/h 마다 계산하여 승차감을 평가한다. 그러나 100 m 주행거리로 계산하면 고속주행 시 데이터량이 적어지므로 주행속도에 따라 데이터수를 재계산 하여야 하는 번거로움이 있어, 이 연구에서는 3초 간격으로 나누어 각 구역의 최대전진폭으로 승차감을 평가하였으며, 속도 등분을 3 km/h로 나누어 응답을 계산하였다.

Fig. 3은 실차 주행시험에서의 대차의 속도별 최대전진폭 진동가속도를 나타낸다. 속도증가에 따라 진동레벨이 증가하며, 특히 80 km/h 이상에서 대차 응답이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4는 전동차 주행시험 결과를 도시한 그림으로 횡방향은 70 km/h 이하에서 “양호”하나, 그 이상에서는 “보통” 수준이고, 수직방향은 60 km/h 이하에서는 “양호”하나, 그 이상에서는 “보통” 수준이고, 90 km/h 이상에서는 “주의”로 평가되고 있다. 전체적으로 전동차가 80 km/h 이상의 준고속 주행하는 경우 문제가 있으므로 준고속 주행 시 차량진동을 증가시키는 원인을 찾아 대처방안을 마련하여야 한다.

3. 센터피봇

센터피봇은 대차의 견인력 또는 제동력을 차체로 전달하는 차체하부에 돌출된 구조물이다. 센터피봇 조립부는 센터피봇과 서로 접하는 구조로서 Fig. 5(a)와 같이 대차에 연결되어 있고, 센터피봇과의 충격을 완화하기 위해 Fig. 5(b)와 같이 피봇부쉬가 있다⁽⁷⁾. 조립부 내부에 부쉬는 180 mm의 원통으로 5t 철판과 5t 우레탄으로 구성되어 있다.

차내 소음과 진동의 원인을 규명하기 위해 실내 진동과 소음, 차륜, 피봇홀더(pivot holder), 차량간 연결기에서의 진동에 대한 상관함수(CSD, cross spectral density)분석을 하였다.

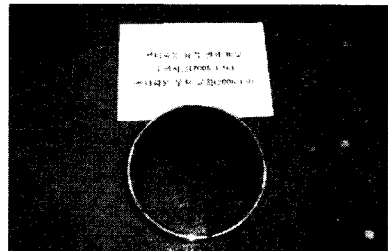
Fig. 6(a)에서 객차 소음과 객차 진동의 CSD를 비교하면 차체소음과 객차의 상하(z) 진동의 관계가 가장 높게 나오며, 약 500 Hz 성분이 상대적으로 가

장 높은 상호 관계가 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(b)의 차체 소음과 대차부 수직진동의 CSD선도를 비교해보면, 피봇 홀더의 상하 진동과 소음의 상관관계가 상대적으로 높으며 주요 주파수 성분은 500 Hz 미만의 성분을 확인할 수 있다. Fig. 6(c)의 차체소음과 대차부 횡진동의 CSD선도에서도 차체소음 대비 피봇홀더의 상관관계가 차체소음 대비 차륜 또는 차량간 연결기의 상관관계보다 상대적으로 높게 나타났다. Fig. 6(d)는 차체진동(z) 대비 대차부 각 부분의 수직진동에 대한 CSD 분석이다. 분석 결과 차체 수직진동 대비 대차부 각 부분의 수직진동에 대한 CSD는 500 Hz 부근에서 피봇 홀더와 가장 높은 관계임을 알 수 있다. 따라서 CSD 분석 결과 차내 소음과 진동의 원인은 피봇홀더에서 기인함을 유추해 볼 수 있다.

센터피봇 부쉬 효과를 보기 위해 ADAMS/Rail⁽⁸⁾을 이용하여 전산해석하였다. Table 2~4는 전산해석에 사용된 물성치를 나타낸다. Fig. 7(a)는 ADAMS/Rail의 대차 모델을 나타내며, Fig. 7(b)는 차체 및 대차를 조립한 모델을 나타낸다. 대차의 1차 현가장치는 원추형 스프링을 재현하기 위해 각 차륜 당 두 개의 현가장치요소를 사용하였고, 감쇠력을 적용하기 위해 수직댐퍼를 채용하였다. 2차 현가장치는 2개의 현가장치 요소와 6개의 댐퍼를 이용하여

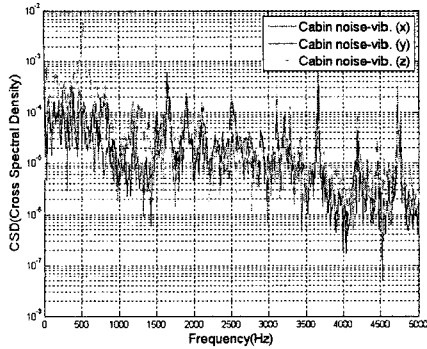


(a) Assembly

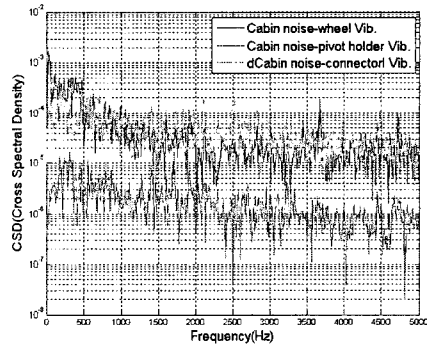


(b) Pivot bush

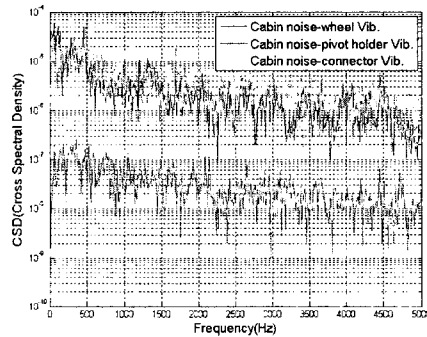
Fig. 5 Center pivot assembly and bush



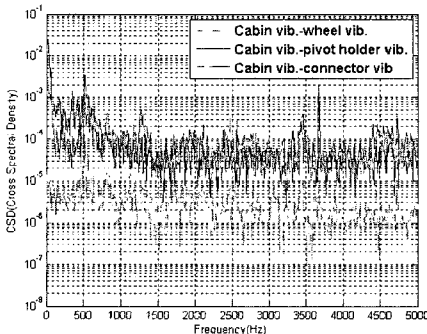
(a) Cabin noise vs. cabin vibration



(b) Cabin noise vs. vertical bogie vibration



(c) Cabin noise vs. lateral bogie vibration



(d) Cabin vibration vs. vertical bogie vibration

Fig. 6 CSD Spectrum

Table 2 Damping properties of the train unit

Element	Part	Damping(Ns/m)
Damper element	1st Vertical	35000
	2nd Longitudinal	6000
	2nd Lateral	6000
	2nd Vertical	50000

Table 3 Inertia properties of the electric train unit

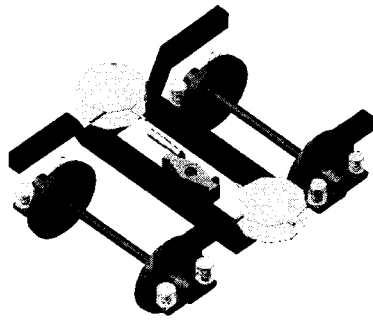
	Mass(Mg)	I_{xx} (Mgm ²)	I_{yy} (Mgm ²)	I_{zz} (Mgm ²)
Cabin	30	520	1070	1050
Bogie	2.17	1.43	1.87	2.19
Wheelset	1.64	0.85	0.13	0.85

Table 4 Stiffness properties of the train unit

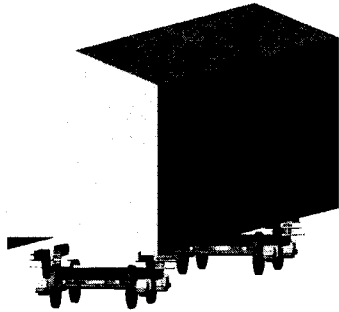
Element	Part	Kx(MN/m)	Ky(MN/m)	Kz(MN/m)
Suspension element	1st vertical	4.90	3.73	0.83
	2nd vertical	0.12	0.15	0.34
	Tram buffer	11.28	0.02	0.21

모델링하였다. Fig. 7(c)는 센터피봇 조립체 모델을 나타내며 Fig. 7(d)는 센터피봇부위의 강성변화 그래프를 나타낸다. 센터피봇홀더와 대차 사이에 2쌍의 피봇홀더 지지 스프링과 1쌍의 스톱퍼, 1개의 횡댐퍼를 각각 현가장치 요소, 범프스탑(bumpstop) 요소, 댐피 요소를 사용하여 모델링하였고, 피봇부위를 부쉬 요소로 사용하였다.

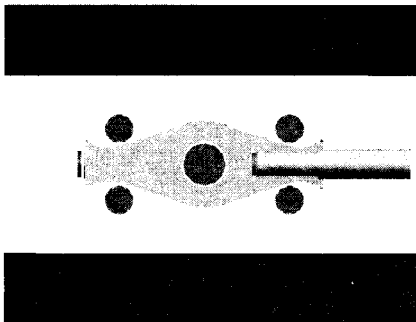
센터피봇 부위의 강성과 감쇠 변화에 따른 주행 응답을 고찰하기 위해 센터피봇 부위의 강성 및 감쇠를 변화시키며 110 km/h 속도까지 응답을 고찰하였다. 일반적으로 센터피봇 부위는 노화됨에 따라 강성은 증가하고 감쇠는 감소하게 된다. 따라서 본 해석에서 강성을 $\pm 10\%$ 씩 증감시키고 감쇠는 $\mp 10\%$ 씩 증감시키며 응답을 고찰하였다. Fig. 8(a)는 대차의 횡방향 진동 가속도 응답 변화를 나타낸다. 강성이 증가하고 댐핑이 감소함에 따라 횡방향 진동 응답이 증가하며, 이는 실험 결과와 유사한 경향을 나타낸다. Fig. 8(b)는 대차의 수직방향 진동 가속도 응답을 나타낸다. 이미 언급한 바와 같이 수직방향



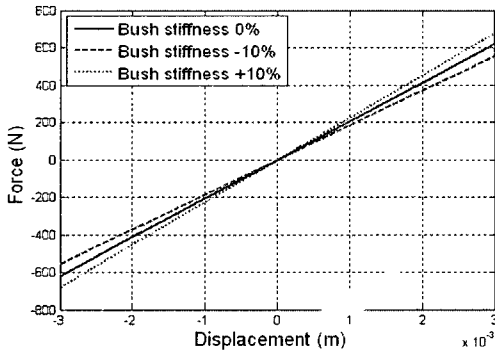
(a) Bogie



(b) Assembly

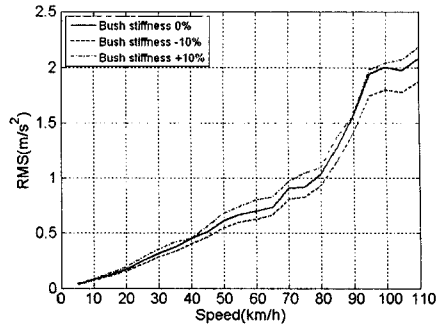


(c) Pivot assembly

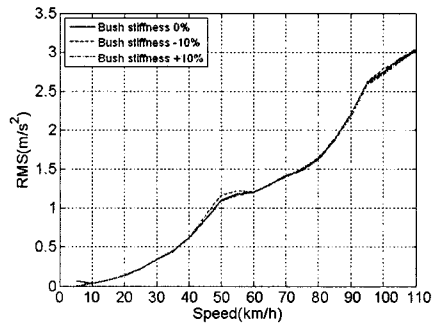


(d) Bush stiffness

Fig. 7 ADAMS/Rail model

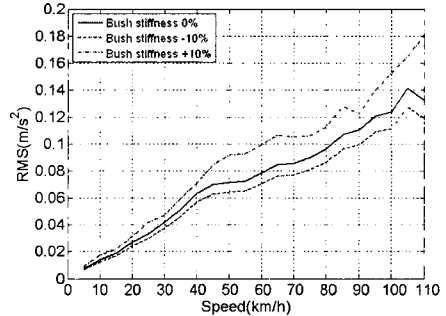


(a) Lateral

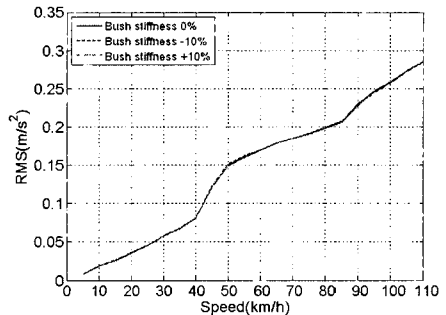


(b) Vertical

Fig. 8 Bogie vibration with center pivot stiffness variation

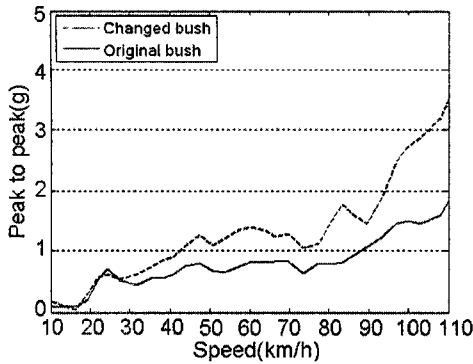


(a) Lateral

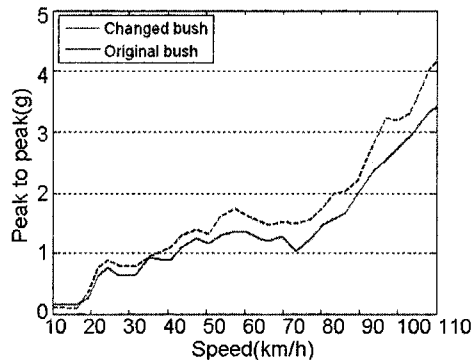


(b) Vertical

Fig. 9 Cabin vibration with center pivot variation

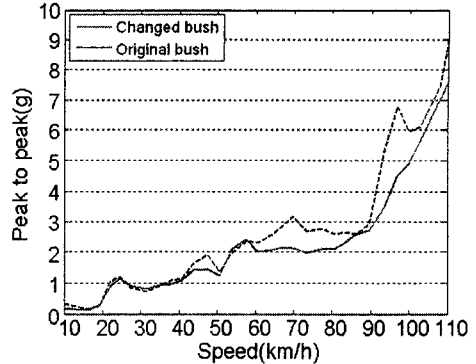


(a) Lateral

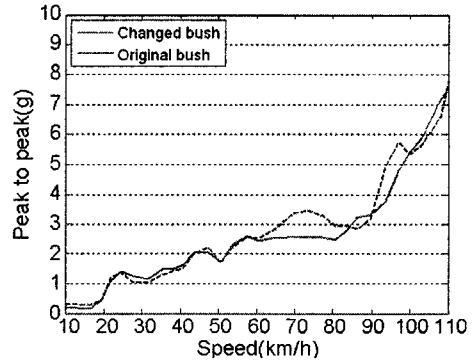


(b) Vertical

Fig. 10 Accelerations of pivot holder



(a) Lateral



(b) Vertical

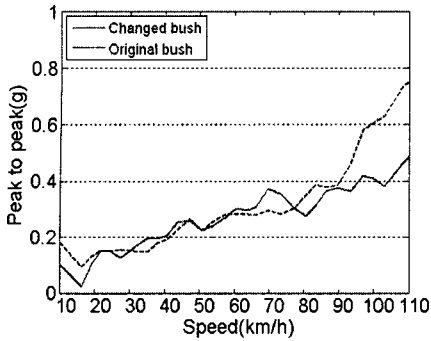
Fig. 11 Accelerations of bogie

응답 변화는 거의 없음을 확인할 수 있는 바, 차체와 대차가 피봇홀더와 피봇으로 체결되어 있기 때문이다. Fig. 9(a)는 차체의 횡방향 진동가속도로 대체적으로 피봇홀더 부위의 강성 변화에 따른 변화 추이가 대차 응답 변화와 유사한 것을 확인할 수 있다. 그러나 대차와 마찬가지로 Fig. 9(b)의 차체 수직응답의 변화는 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

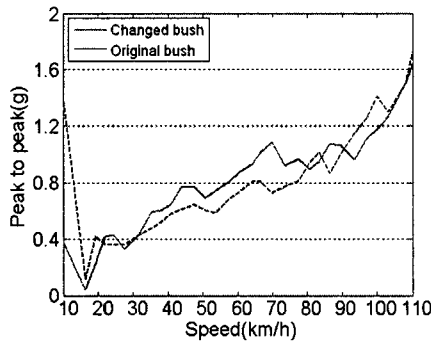
센터피봇 부위 효과를 검증하기 위해 센터피봇의 부위를 교체하여 시험하였다. 신품 부위는 노후된 부위에 비해 충분한 연성을 갖고 있기 때문에 강성이 낮고 감쇠는 높아진다. Fig. 10은 속도별 피봇홀더의 최대전진폭을 나타낸다. 고속에서 상하 방향의 개선 효과는 적으나, 횡방향 개선 효과가 있으며, 특히 고속구간에서 큰 진동저감 효과를 확인할 수 있다. Fig. 11은 대차의 응답으로 피봇홀더의 응답과 유사한 경향을 보이는데, 이는 피봇홀더와 대차가 직접 연결되어 있기 때문에 피봇홀더의 특성이 피봇 지지고무를 통해 대차에 직접 전달되기 때문이다. 횡방향으로는 피봇홀더가 10 mm 정도의 간극이 있

어 피봇과 피봇홀더의 상대 변위가 10 mm를 초과하지 않으면 부위의 영향은 없다. 좌우 진동 변위가 10 mm를 초과하는 경우 과도 변위에 대한 억제는 스톱퍼(stopper)나 지지 고무가 수행하게 되며, 피봇홀더에 부착된 부위는 충격에 의한 진동을 저감시켜주는 기능만 수행한다. 그러나 부위 사용연한이 증가함에 따라 부위는 압축되어 높은 강성을 갖는 반면 연성은 낮아져 충격을 충분히 흡수할 수 없게 된다. 따라서 고속 구간에서의 진동 억제를 위해 피봇홀더 부위를 교체하거나 신품처럼 유지하는 것이 피봇과 피봇홀더 사이의 충격을 저감시키는데 효과적이다.

Fig. 12는 차체의 진동 응답을 나타낸 것으로 고속주행 시 부위를 교체한 차량에서 횡방향의 진동응답이 매우 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 교체한 부위가 센터피봇과 센터피봇홀더의 충격을 감소시키기 때문이다. 따라서 구형 전동차의 부위의 교체는 고속주행에 따른 진동응답 감소에 효과적임을 알 수 있다.



(a) Lateral



(b) Vertical

Fig. 12 Accelerations of cabin

4. 레일 불균일

레일 불균일은 궤간이 규정된 치수를 벗어나 있는 상태로서 궤도틀림에 의해 발생한다. 궤도틀림은 열차 주행에 의한 반복하중으로 레일 지반이 변형하고 침하하기 때문이다. 이러한 궤도틀림에 의해 발생하는 레일 불균일은 철도차량의 진동응답에 지배적인 역할을 하며, 불균일에 의한 가진 성분이 철도차량의 주요 진동원인으로 알려져 있다⁽⁹⁾.

Fig. 13은 측정 구간에서의 좌우윤축 수직 진동 가속도의 최대진폭을 나타낸다. 윤축 진동은 차량의 속도에 영향을 받으므로 윤축 진동의 크기가 모두 레일 불균일에 의한 결과라고 단정할 수는 없으나, 레일 불균일도는 곧바로 윤축의 진동을 유발한다. 특히 좌우 윤축의 진동 차이는 좌우 레일에 고저 차이가 있음을 의미하며, 이러한 고저 차이에 의해 차체의 롤링 또는 요잉 등이 발생할 수 있다.

Fig. 14는 속도별 윤축의 진동응답을 나타낸다. 속도가 증가함에 따라 진동응답이 증가하며, 속도 증

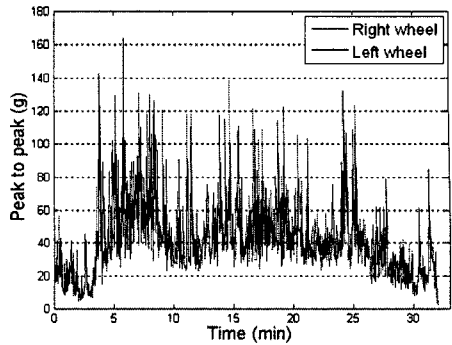


Fig. 13 Acceleration of axle bearing(experiment)

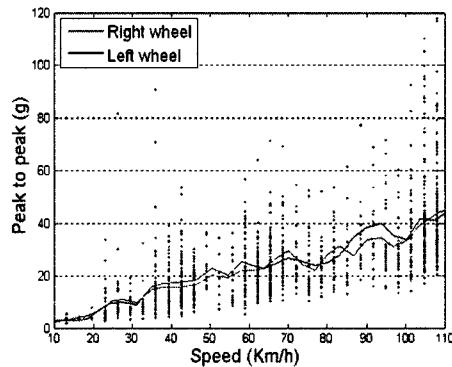
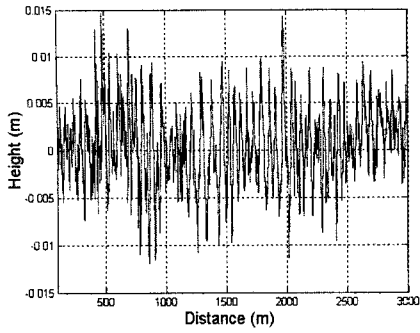


Fig. 14 Acceleration of axle bearing vs. speed (experiment)

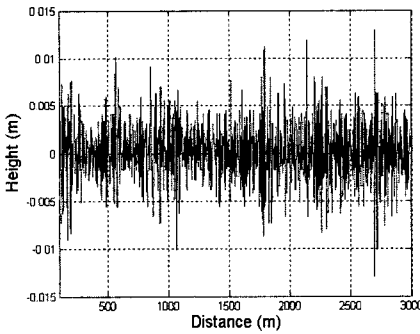
가에 따른 가속도 산포 또한 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 레일 상태에 따라 윤축의 진동응답이 변화함을 뜻한다. 따라서 휠의 불균일을 연삭을 통해 제거하거나, 레일의 틀림을 줄여 차량진동을 저감시켜야 한다.

레일 불균일의 변화에 따른 철도차량의 응답 변화를 비교하기 위해 두 종류의 레일 불균일도를 갖는 직선 트랙을 생성하였다. Fig. 15(a)와 (b)는 각각 ADAMS/Rail에서 제공하는 ERII(European Railway Research Institute) 실측 데이터와 경부선 실측 데이터의 시간 응답을 나타낸다. 대체적으로 레일 상하변위의 크기는 거의 비슷한 수준인 것을 확인할 수 있다.

Fig. 16은 속도 증가에 따른 레일 가진 주파수를 워터폴 다이어그램으로 도시한 것이다. ERII 실측 레일 불균일도의 경우 전체적인 가진 주파수가 1 Hz 미만의 영역에서 발생하는 반면, 경부선 실측 레일 불균일도의 경우 5 Hz 대역까지 고른 주파수 분

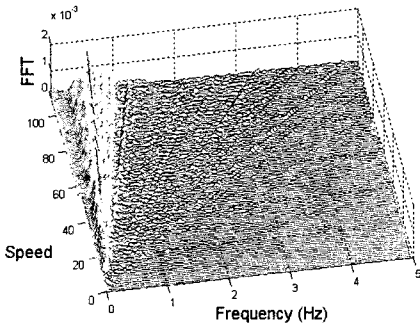


(a) ERRI

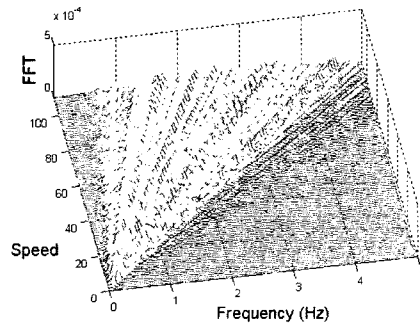


(b) Kyung-bu line

Fig. 15 Rail irregularity

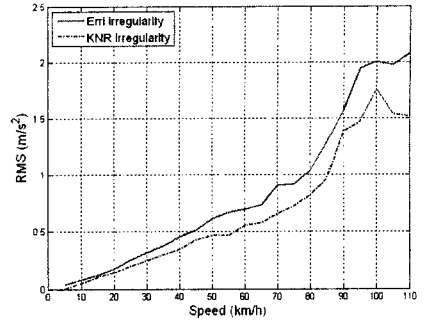


(a) ERRI

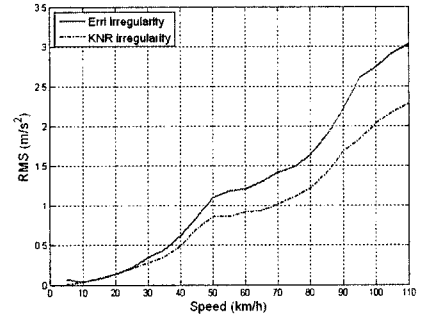


(b) Kyung-bu line

Fig. 16 Waterfall diagrams for rail different

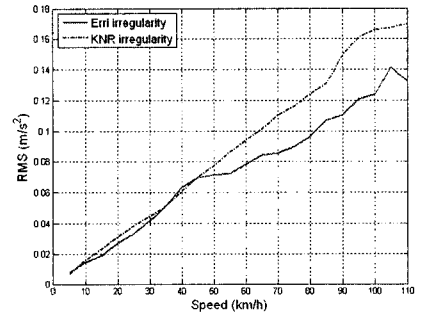


(a) Lateral

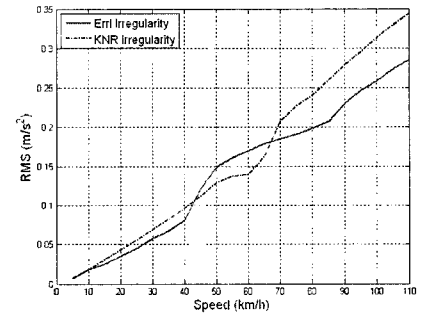


(b) Vertical

Fig. 17 Accelerations of bogie with different rail irregularity

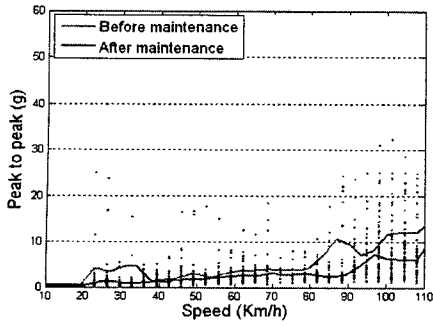


(a) Lateral

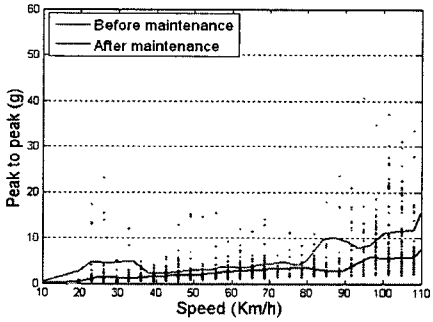


(b) Vertical

Fig. 18 Accelerations of cabin with different rail irregularity

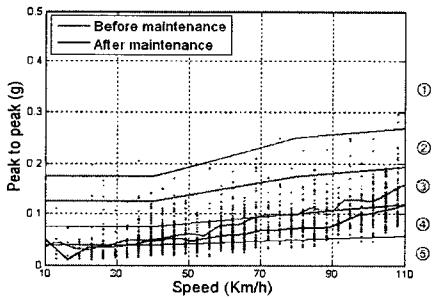


(a) Lateral acc.

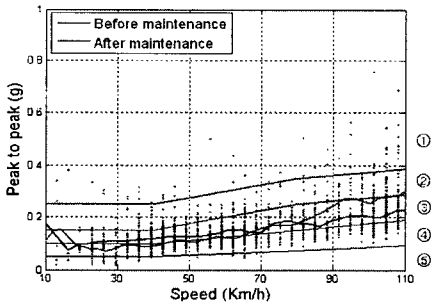


(b) Vertical acc.

Fig. 19 Heavy maintained bogie



(a) Lateral acc.



(b) Vertical acc.

- ① Bad, ② Attention, ③ Normality,
- ④ Fine, ⑤ Excellence

Fig. 20 Heavy maintained cabin

포를 갖고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 17과 18은 각각 ERRI 실측 레일데이터와 경부선 실측 레일데이터를 갖는 트랙 가진에 대한 대차 및 차체의 응답을 비교한 것이다. 동일 차량임에도 불구하고 레일 불균일의 종류에 따라 다른 응답 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 15에서 보인 바와 같이 유사한 크기를 갖는 레일 불균일 일지라도 가진 주파수영역이 다르기 때문이다.

5. 정비효과

도시철도 차량은 제작 시 “도시철도차량의 성능시험에 관한 기준⁽⁶⁾”을 만족하여야 한다. 또한 내구 주행기간이 경과한 후 해당 경과시간에 따라 일정수준의 정비를 받게 되어있다. 따라서 차량 정비에 따른 영향을 고찰해 볼 필요가 있다.

정비효과에 따른 철도차량의 거동 특성을 분석하기 위해 중정비를 받은 차량에 대해 차량 주행시험을 수행하였다. 중정비는 전동차를 차체와 대차로 분리하고 각 부품을 점검, 교체하는 대대적인 정비, 보수작업이며, 이 시험차량은 차륜삭정, 센터피봇부쉬 교체, 2차 현가장치 교체 등의 보수작업이 이루어졌다. 데이터 수집은 대차 및 차체 한 지점에 3축 가속도계를 설치하여 응답을 각각 측정하였다.

Fig. 19는 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 응답이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있는 바, 이는 준고속 주행에 따른 전동차의 높은 진동응답은 정비를 통해 충분히 감소시킬 수 있음을 뜻한다.

Fig. 20은 정비 전후 차체의 좌우 및 수직 진동 응답을 나타낸다. 대차의 진동과 마찬가지로 중정비를 받은 차량의 차체 진동이 준고속 영역에서 현저한 감소 효과가 있음을 확인할 수 있다. 전체적으로 정비 이전과는 달리 정비 후 모든 평가기준을 만족하고 있는 것을 확인할 수 있다.

6. 결 론

구형 전동차로 80 km/h 이상의 속도로 준고속 주행을 하는 경우, 진동과 소음이 급격히 커져 승차감

이 크게 저하됨에 따라 실차주행시험 및 전산해석을 통해 진동을 저감시키기 위해서는 다음과 같은 조치가 필요함을 이 연구를 통해 알 수 있었다.

(1) 차량의 진동과 소음은 센터피봇과 상관관계가 높게 나오는 바 차체와 대차의 상하진동에 의한 충격가진을 완화하기 위해서는 센터피봇 부위의 연성을 늘려야 한다.

(2) 레일 불균일은 윤축을 직접 가진시키고 대차 및 차량 진동의 주요 원인이므로 레일 불균일은 최소화되어야 한다.

(3) 철도차량에 대한 중정비 전후의 시험결과는 승차감에 차이를 보이고 있는 바, 기존차량을 이용한 준고속 주행을 위해서는 중정비를 보다 자주 할 필요가 있다.

후 기

이 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 07차세대고속철도A01)과 한국철도공사의 협조로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Redtenbacher, F. J., 1855, "Die Gesteze des Locomotiv - Baues", Verlag von Friedrich Bassermann, Mannheim.

(2) Pearce, T. G. and May, B. J., 1969, "A Study

of the Stability and Dynamic Response of the Linear Induction Motor Test Vehicle", FRA-RT-76-25, Office of High Speed Ground Transportation.

(3) Stassen, H. G., 1967, "Random Lateral Motions of Railway Vehicle", Delft, Ph. D. Dissertation.

(4) Park, C.-K., Kim, K.-H., Hong, J.-W., Shim, T.-W., 1998, "Analysis of the Dynamic Stability for the K-TGV Using Vampire Program", Proceedings of the KSR Spring Conference, pp. 510~516.

(5) Kang, B.-B., Kim, Y.-W. and Wang, Y.-Y., 2003, "Dynamic Analysis of KTX Vibration at the Tail of the Train", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 6, No. 2, pp. 102~108.

(6) Korea Industrial Standards Commission, 2002, "Vibration Characteristics of Railway Rolling Stock -measuring Methods", Korean Standards Association, KS R 9160.

(7) Ministry of Construction&Transportation, 2000, "Standard of the Performance Test for EMU", Ministry of Construction&Transportation 2000-126.

(8) MSC Soft, 2005, "Road Map to ADAMS/Rail Documentation".

(9) Heumann, H., 1937, "Lauf der Drehgestell - Radsatze in der Geraden", Organ Fortschr. Eisenb. -wes, pp. 149~137.