

수도권 통근용 전기동차 주행진동성능 실차시험

°최경진*, 이동형**, 문경호**, 이현석***

A Practical Testing on Running Vibration Performance of The Metro Electric Rolling Stock

K. J. Choi, D. H. Lee, K. H. Moon, S. J. Kwon

Key Words : Electric Rolling Stock(전기동차), Running Vibration Performance(주행진동성능), Field Test(현차시험), Empty Car(공차), Secondary Suspension(2차 현가장치)

초 록

본 연구의 목적은 수도권 전동차량의 주행성능을 평가하는 방법으로 진동성능을 비교검토하기 위하여 실차측정하고 분석한 것이다. 전동차량의 제작년도별로 측정대상차량을 샘플링하여 다양한 조건에서 진동을 측정하고 실측데이터를 시간영역의 통계적 방법으로 분석한 결과 제작년도에 따른 영향도 약간 나타났으며 전동차량의 2차 현가장치의 종류에 따른 영향을 발견할 수 있었다. 또한 측정선로구간의 특성에 따른 영향도 비교적 잘 나타나고 있음을 알 수 있었다.

1. 서 론

철도차량의 특징은 금속궤도 위를 금속차륜이 회전하면서 궤도안내 형태로 수송되는 교통수단이다. 수도권 통근전동차는 출퇴근시에 대량수송을 담당하는 교통기관으로 안전성을 유지하는 것은 장거리열차에 못지않은 중요성이 강조되고 있다.

차량의 운동은 차륜과 레일의 동특성¹⁾에 의해 지배되고 차륜과 대차(Bogie) 및 차체의 운동영향이 상호 작용하는 궤도교통의 특성을 가지고 있으며, 이러한 철도차량의 주행안전성을 평가하는 방법으로 차륜과 레일의 접촉면에서의 수직압(vertical force)과 수평압(lateral force)의 비율에 의한 탈선계수를 측정하여 그 비율 0.8이하로 제한하거나 차량운동의 진동가속도를 측정 후 진동성능의 수준을 평가하는 방법 등이 이용되고 있다.²⁾

* 한국철도기술연구원 차량연구부 책임연구원

** 주임연구원, *** 철도청 사무관

본 연구는 전동차의 차량운동에 의하여 발생하는 차체의 좌우방향과 상향방향의 진동을 실차측정하여 주행중에 나타나는 진동성능을 분석하여 차량의 특징과 선로구간에 따른 영향을 평가하였다.

2. 철도차량 주행진동성능 평가

철도차량의 주행에 의한 진동현상은 상하, 좌우, 전후, 로링, 요잉, 피칭 등과 연성(couple)된 요소가 있는데 이를 차량설계에 직접 적용하기에는 많은 실험과 차량주행 시뮬레이터가 필요하게 된다. 따라서, 일본철도에서 적용하는 상하, 좌우진동의 성능평가방법이 궤도와 차량의 동특성을 잘 고려한 분석방법으로 잘 알려져 있다.^{2,3)} 이 방법은 진동가속도를 실차량에서 측정하여 수집하고 선로의 불규칙도, 차량의 운동특성이 고려되도록 시간영역(time domain)에서 일정 선로구간을 차량속도별로 통계적으로 처리하는 기법이고⁴⁾, 측정된 진동가속도 레벨을 데이터분석구간을 100m마다 최대치를 수집하여 차량속도별로 평균하여 일정수준

마다 우수, 양호, 보통, 불량으로 구분하여 평가하게 된다. 한국철도에서도 여객열차의 수준에 따라 기준을 설정하여 적용하고 있으나 속도향상에서의 주행성능을 다루고 있다.^{5,6,7)}

수집하고, 수집된 결과를 다시 5km/h의 속도대역별로 구분하여 그 속도대역에 속하는 값들의 평균 진동가속도를 구하여 속도의 함수로 표현하였다.

3. 실차 시험방법

주행진동성능 평가를 위하여 대차의 중심부에 해당하는 차체의 바닥상에 가속도계를 설치하였고, 또한 차량의 롤링(rolling)에 의한 경향을 비교하기 위하여 대차의 중심에서 차체 측면과 바닥이 만나는 부위에도 진동가속도계를 설치하였으며, Photo 3-1은 가속도계 설치장면이다. 가속도계에서 스트레인 앰프까지는 4핀 케이블을 이용하여 연결하였다. 속도 및 주행거리를 측정하기 위하여 포토 센서를 설치하였으며, 이 포토센서는 차량이 한번 회전할 때마다 1개의 신호가 발생하도록 되어 있고 이 신호를 이용하여 1회전의 이동거리(πD) 및 시간영역신호를 이용하여 속도(m/s)를 계산할 수 있다. 기록장치로는 테이프 레코더를 이용하였고 신호분석기 또는 PC를 이용하여 분석을 수행하였다. 시험장치의 구성도는 Fig. 3-1 과 같다.

시험선로의 구간은 좌우진동과 상하진동을 금정역↔안산역 선로구간을 왕복운행하면서 측정하였다. 분석방법은 먼저 시간영역에서 100m 구간마다 진동가속도의 최대복진폭(2a)과 그때의 주행속도를

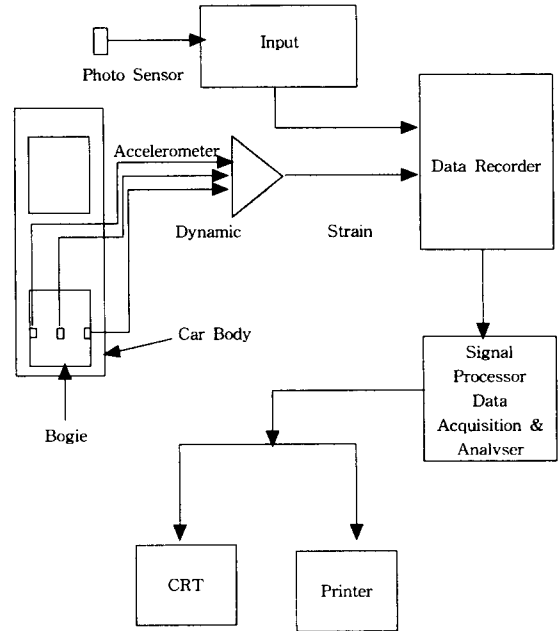


Fig. 3-1 시험장치의 구성도

Table 3-1 시험 대상차량의 특징

제어형식	시험번호	사용년수	시험차량 조건			포토 센서	운행 방향 (구간)
			편성위치	대차 형식	차량 형식		
인버터 제어차	4-18	신조	10량중 10# (5105호)	볼스터 레스	Tc	10량째 (5105호)	안산 방면
	5-30	3년	10량중 10# (2034호)	볼스터 레스	Tc	10량째 (2034호)	금정 방면
저항 제어차	1-17	5년	10량중 10# (1176호)	볼스터	Tc	9량째 (1176호)	안산 방면
	4-9	10년	10량중 10# (1146호)	볼스터	Tc	10량째 (1146호)	안산 방면
	4-4	15년	10량중 10# (1739호)	볼스터	Tc	9량째 (1139호)	안산 방면
	4-11	20년	10량중 10# (1108호)	볼스터	Tc	10량째 (1108호)	안산 방면



Photo 3-1 가속도계 설치장면

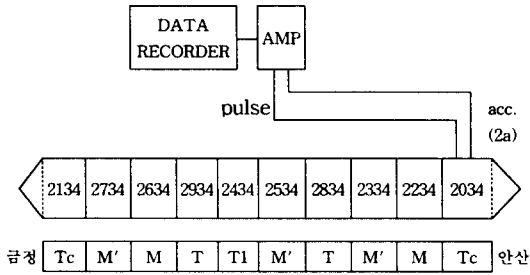


Fig. 3-1 시험열차 편성 및 시험위치(NO 5-30)

전기동차의 실차운행시험은 Table 3-1과 같이 실시하였으며, 제작년도와 2차 현가장치(secondary suspension)의 종류, 시험차량의 편성위치를 정리한 것이며, Fig 3-1 은 시험번호 5-30을 그림으로 나타낸 것이다. 시험차량은 열차편성에서 주행속도에 가장 많은 영향을 나타내는 후부차량을 대상으로 상하, 좌우방향에 가속도계(accelerometer)를 설치하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 운행연도별

4.1.1 상하진동 성능

인버터 전동차량에서 96년도에 제작되어 현재 길들이기 운행중인 신조차량의 경우는 대차의 구조가 유지보수에 용이하게 설계되어 있으나, Fig. 4-1의 측정결과에서 나타나고 있는 것과 같이 양호 및 보통구간에 속하며 특히 속도대역 75~80km/h 에서 가장 높은 진동가속도값을 나타내고 있다. 우측에서 측정한 결과는 속도대역 85~90km/h 에서 진동이 비교적 높은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

사용기간 3년인 인버터차량은 Fig. 4-2에서 보는 것과 같이 운행속도의 증가에 의하여 일정하게 증가하는 경향을 나타내고 좌우로링에 의한 영향이 속도대역 95~100km/h에서 크게 나타나고 있다.

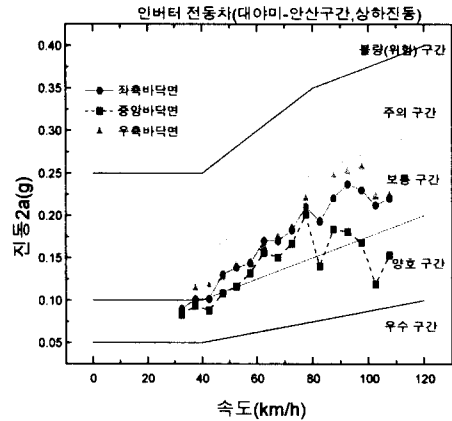


Fig. 4-1 인버터차량(신조차) 속도별 상하진동

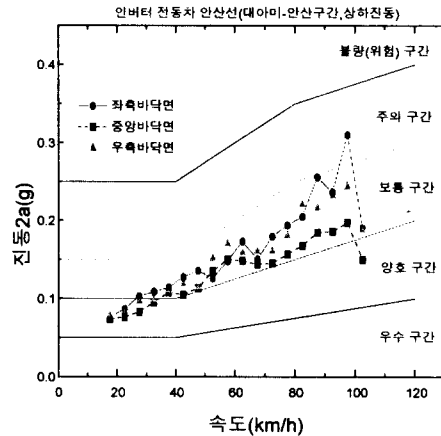


Fig. 4-2 인버터(3년운행)차량 속도별 상하진동

저항제어 전동차는 5, 10, 15, 20년을 사용한 차량중에서 선정하여 측정하였으며, 5년사용 전동차의 경우 비교적 안정적인 경향을 나타내고 있으나 10년, 15년, 20년운행차량의 경우에는 진동레벨이 증가하고 있는 경향을 보인다.

좌우측에 설치한 상하진동 측정결과에서는 로링에 의한 영향에서 보면 더욱 뚜렷하게 증가하고

있는 경향을 알 수 있다.

상하진동의 결과는 주행성능에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 그러나, 비교적 저속차량인 수도권 전동차량의 수준으로 볼 때 선로조건 및 차량속도에 의한 영향도 있지만 장거리 여객열차에 비하면 비교적 높게 나타나는 것으로 분석되고 있다.

4.1.2 좌우진동

인버터 전동차량은 Fig. 4-5~6에서 보는 것과 같이 96년도에 제작되어 현재 길들이기 운행중인 신조차량의 경우 속도대역 95~100km/h에서 보통 구간에 들고 있으나 진동이 높은 경향을 보이고 있다.

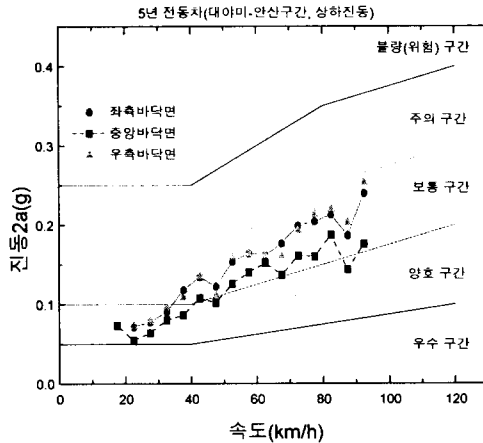


Fig. 4-3 저항제어(5년)차량 속도별 상하진동

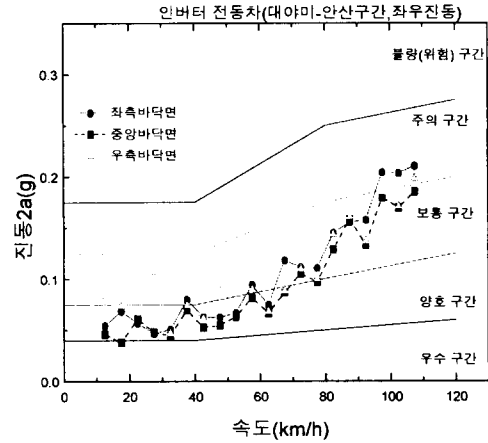


Fig. 4-5 인버터제어차량(신조차) 속도별 좌우진동

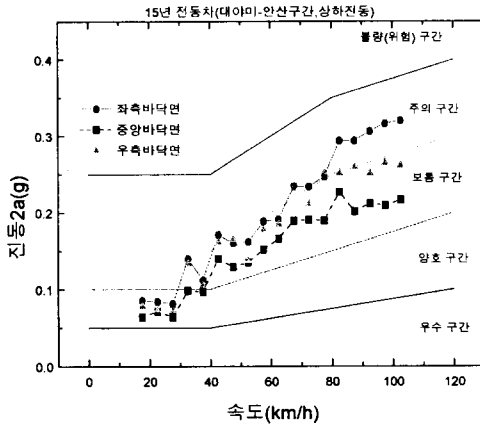


Fig. 4-4 저항제어(15년)차량 속도별 상하진동

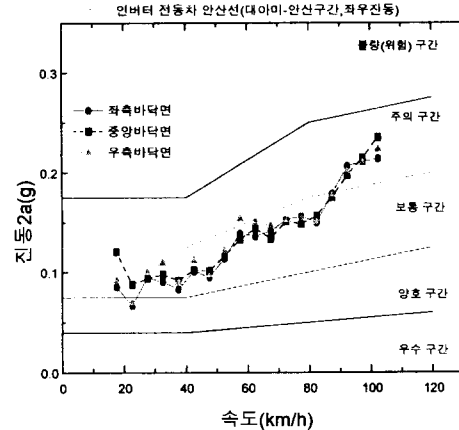


Fig. 4-6 인버터제어(3년)차량 속도별 좌우진동

Fig. 4-6과 같이 3년사용 차량의 경우 저속대역에서도 높은 경향을 보이고 있으며 특히 속도 85km/h 이상 대역에서는 주의구간에 들고 있어 사용년수와 관계없이 좋지 않은 결과를 나타내고 있다. 좌우진동이 높은 결과는 볼스타레스 대차에 사용되는 공기스프링이 공차시에는 영차시에 비해 강성이 약해지는 특성에 기인하는 것으로서 승객이 탑승시에는 감소될 것으로 판단된다. 다만, 공차의 주의구간에 분포는 개선할 필요가 있으므로 공기스프링의 횡강성(lateral stiffness)을 증대하는 방안을 검토해 볼 필요가 있다.

저항제어 전동차량은 Fig. 4-7~9에서 보는 것과 같이 5년, 10년, 15년사용 차량의 경우는 사용년수에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으나 모두 보통구간에 들고 있고, 인버터차량에 비하면 낮게 나타나며 주행성능은 문제가 없는 것으로 판단된다.

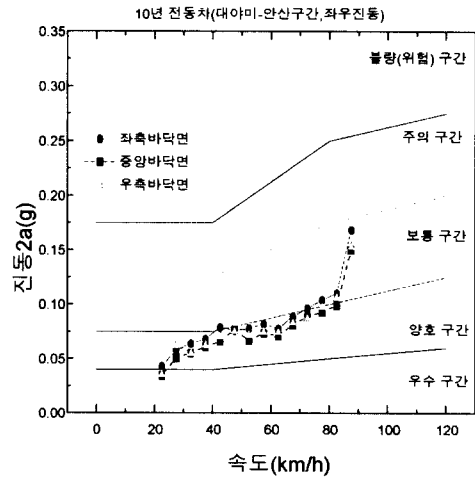


Fig. 4-8 저항제어(10년)차량 속도별 좌우진동

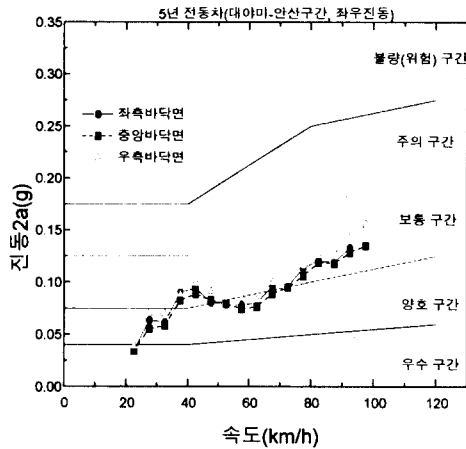


Fig. 4-7 저항제어(5년)차량 속도별 좌우진동

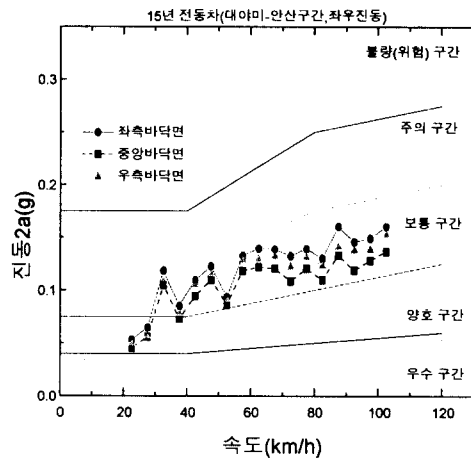


Fig. 4-9 저항제어(15년)차량 속도별 좌우진동

4.2 선로조건과 운행속도

진동은 속도의 함수이지만 선로조건 및 외적인 요인에 의해서 영향을 받기 때문에 선로 및 운전 조건에 따라 측정구간이 다를 때는 다른 결과를 초래할 수도 있다.

특정 선로위치와 운행조건의 관계를 검토하기 위하여 시간영역으로 전구간을 분석하여 나타낸 결과는 상하진동 Fig. 4-10, 좌우진동 Fig. 4-11과 같으며 차량의 속도가 진동에 큰 영향을 미치는 것으로 나타나고 있으며, 그림에서 높은 속도에서도 낮은 진동 발생 및 저속에서도 선로의 조건(포인트, 레일이음부, 궤도비틀림 및 지반의 불안정 등)에 의한 영향 등이 비교적 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

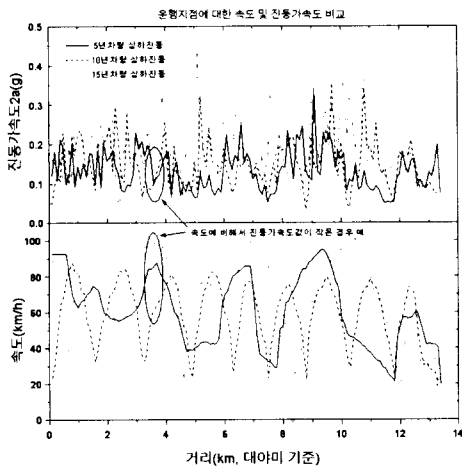


Fig. 4-10 선로 및 차량속도에 의한 상하진동 비교 (대야미-안산)

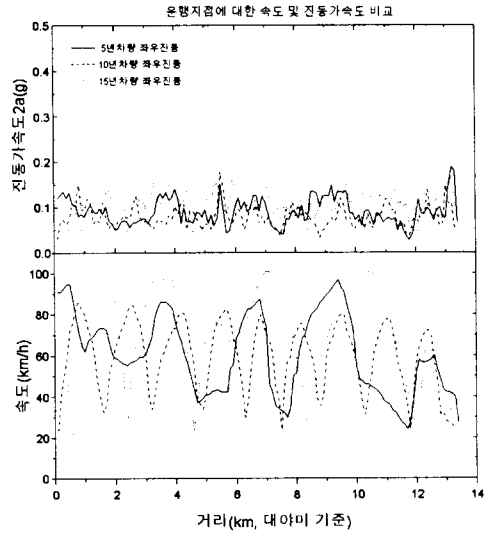


Fig. 4-11 선로 및 차량속도에 따른 좌우진동 비교 (대야미-안산)

Fig. 4-12는 좌우진동이 비교적 크게 나타나는 3년 운행한 안산선 인버터차량을 분석한 그림이며 여기에서도 속도에 따라 좌우진동이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4-12의 아래에 있는 그림은 90km/h 이상 속도에서의 곡률 및 구배를 나타내고 있다. 좌우진동의 최고점은 9.7km 지점이지만 출발점 및 키로정표가 측정상의 오차가 있으므로 이러한 오차를 고려한다면 9.6~9.8km지점으로 범위로 볼 수 있고 이 지점은 안산에서 출발시 하구배에서 상구배로 변하는 지점이며 곡률은 없음을 알 수 있다.

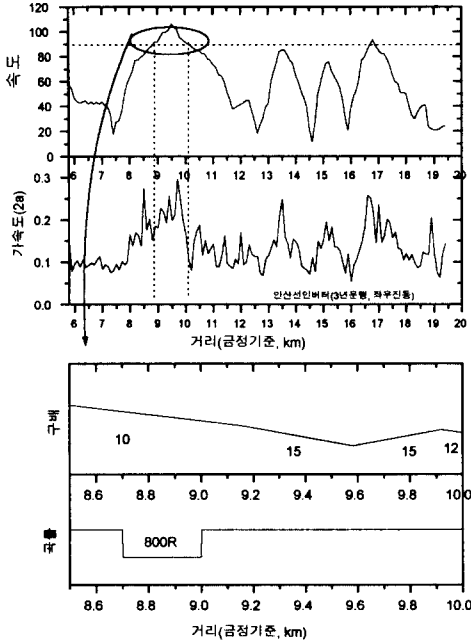


Fig. 4-11 안산선 인버터전동차 좌우진동 분석

5. 종합토의

본 연구에서는 수도권 통근용 전기동차에 대하여 최근 제작차량과 5년, 10년, 15년, 20년 사용연도별 차량진동측면에서 실차주행시험하고 분석 및 비교평가를 수행하였으며, 비교적 저속용 철도차량에 있어서도 진동성능의 중요성을 알 수 있었다.

진동성능 평가에 있어서 비교적 '보통구간'에 속하는 성능을 유지하고 있으나, 사용연수 및 높은 속도구간에서는 '주의구간'에 속하는 경향도 나타나고 있다. 15년 사용주기에 2차 현가장치인 coil spring 의 적기 교환이 필요함을 알 수 있었으며 주행진동성능 평가는 신차량 제작시 또는 주기적으로 표본차량을 선정하여 일정기간마다 실시할 필요가 있다. 주행진동성능 판단기준은 일본 전차에 적용하는 수준과 한국철도의 장거리 여객차량에 적용하는 수준을 동일하게 적용하는 것이 타당

하다.

좌우진동에서 공기스프링은 횡강성이 저하할 수 있으므로 차량의 동특성해석을 통하여 개선할 필요가 있으며, 로링에 의한 영향은 95~100Km/h 주행속도에서 크게 나타나고 있고, 상하진동은 사용연수에 의한 진동저하현상이 증가하는 추세에 있다.

선로와 차량속도에 의한 진동영향은 속도증가에 영향이 크므로 선로제한속도와 차량제한속도를 최적으로 유지할 필요가 있다.

후기

본연구는 철도청의 연구비 지원으로 수행되었으며 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Gray, V.K., Dynamics of railway vehicle systems, Toronto, ACADEM PRESS, 1984, p103~105,
- 2) 黄重嚴, "走行安全性の評價とその測定法", 鐵道のための試験法・計測法, pp1-4, 1971
- 3) 三芳功達, "車輛振動の測定および判定法", pp 100-107, 1971
- 4) 최경진, "철도차량 진동의 주파수 특성에 관한 연구, 연세대학교, 1987, p9~11
- 5) "철도차량의 주행안전성 평가방법", 鐵道技術研究報, Vol.23, No.1, pp 198-204, 1989
- 6) "客車振動加速度 測定調査 研究", 鐵道技術研究報, Vol.19, pp 129-182, 1985
- 7) 철도기술연구보, 1992, "열차의 주행저항에 관한 연구," 제26권 제1호, pp 138-157.