

철도차량의 승차감-진동 평가 시스템 개발

Development of an Evaluation System For Ride Comfort and Vibration On Railway Vehicles

이창환*, 이재근**, 윤성식***, 유완석****

Chang-Hwan Lee, Jae-Kuen Lee, Sung-Sik Yoon, Wan-Suk Yoo

Abstract

In this paper, a new evaluation system was developed for ride comfort test and vibration level test on railway vehicles. Combining two tests carried out by different test equipment separately before, the developed system is capable of ride comfort test and vibration test by one system. Also, the assessment algorithm of ride comfort and vibration was compared and verified by simulation results with VAMPIRE software. With the developed system, the comfort in a passenger coach and the vibration in a freight car were evaluated through field test.

1. 서론

철도차량은 선로 위를 대량으로 여객과 화물을 운반하는 수송수단으로서 점차로 주행안정성 확보와 아울러 다양한 수요자들의 요구를 충족시켜 나가야 하는 실정이다. 특히, 승객이 이용하는 객차의 경우에는 여행시에 느끼는 안락함의 정도를 나타내는 승차감 요소가 중요한 요구사항으로 인식되고 있으며, 화물을 수송하는 화차의 경우에는 다양한 화물의 운반 특성을 고려하여 주행안정성 측면의 진동 특성이 주요한 요구사항으로 부각되고 있다. 이러한 철도차량의 승차감과 진동 성능은 제작 전에 다양한 시뮬레이션 기법을 통하여 일정 수준의 성능을 확보한 후, 요구되는 성능을 검증하기 위한 실차 시험이 이루어지게 된다. 국내에서 적용하고 있는 승차감과 진동 성능은 발주처의 제작 사양서와 관련 규격을 따르고 있으며, 일반적으로 객차의 경우에는 객실 내 좌석에서 승객으로 전달되는 진동 가속도를 측정 후 주파수 대역별로 가중치를 부여한 진동 측면에서의 승차감(Ride Comfort) 수준을 평가하는 방법이 주로 사용되고 있으며, 화차의 경우에는 주행시 차체에서 발생하는 진동 가속도를 통계적 기법을 통한 주행속도별 진동수준을 산출하여 평가하는 방법이 주로 사용되고 있다. 하지만, 기존에는 이러한 성능시험별로 각기 다른 측정 시스템을 개별적으로 적용하여 평가되고 있으며, 분석과 평가 과정에 많은 시간이 소요되고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 객차의 승차감과 화차의 진동 성능시험을 단일 측정 시스템을 이용하여 실시할 수 있도록 하였으며, 측정 결과에 대해서 분석 절차에 대한 일괄처리를 적용하고, 자동으로 평가 레포트가 작성되어질 수 있도록 하였다. 또한, 객차와 화차에 대하여 실차 시험을 통하여 본 시스템의 효율성과 유용성을 입증하였다.

* (주)디자인리미트 중앙연구소 대리, 정회원

** (주)디자인리미트 중앙연구소 과장, 비회원

*** (주)팜테크 기술이사, 비회원

**** 부산대학교 기계공학부 교수, 정회원

2. 승차감 및 진동 평가 방법

2.1 객차 승차감 평가

국내에서는 철도차량에 대한 승차감 평가 방법으로 KS 규격을 적용하고 있다. 본 시스템에서는 규격 내용 중에서 일반적으로 적용하고 있는 ISO 2631 에 의거한 방법을 채택하고 있으며, 측정 방법은 좌석에서의 상하 방향과 수평 방향에 대한 진동가속도를 측정한다. 그리고, 측정된 진동가속도에 대하여 진동에 대한 인체의 감각에 따른 민감도를 보정하기 위해 다음 식 (1)~(3) 과 같은 감각 보정 곡선을 적용한다.

$$W_b(f) = \sqrt{\frac{f^4}{f^4 + 0.0256}} \cdot \sqrt{\frac{1 \times 10^8}{f^4 + 1 \times 10^8}} \quad (1)$$

$$W_s(f) = \sqrt{\frac{f^2 + 256}{256}} \cdot \sqrt{\frac{2601123}{0.3969 f^4 + 52787 f^2 + 2601123}} \cdot \sqrt{\frac{0.8281 f^4 - 3.6858 f^2 + 26.126}{0.8281 f^4 - 7.364 f^2 + 104294}} \cdot W_b(f) \quad (2)$$

$$W_d(f) = \sqrt{\frac{f^2 + 4}{4}} \cdot \sqrt{\frac{6.3504}{0.3969 f^4 + 0.8248 f^2 + 6.3504}} \cdot W_b(f) \quad (3)$$

여기서, $W_b(f)$: 대역 필터에 대한 감각 보정, $W_s(f)$: 좌석 상하방향에 대한 감각 보정,
 $W_d(f)$: 좌석 수평방향에 대한 감각 보정

승차감 레벨은 상기와 같이 감각 보정한 진동 가속도의 실효값을 사용하여 다음 식 (4) 에 의해 계산된다.

$$L_{eq} = 20 \log \frac{a_w}{a_{ref}} \quad (4)$$

여기서, L_{eq} : 승차감 레벨 (dB), a_w : 감각 보정한 진동 가속도 실효값 (m/s^2),

a_{ref} : 진동의 기준값 ($= 10^{-6} m/s^2$)

산출된 승차감 레벨은 표1 에 의거하여 평가된다.

2.2 화차 진동 평가

국내에서 운행되는 화차에 대한 진동 수준은 차체에서 측정된 상하방향과 좌우방향 진동가속도를 다음의 절차에 의해 처리된다.

- 1) 고주파 성분을 제거하기 위한 10 Hz 필터링 처리한다.
- 2) 측정구간을 100m 단위로 나누어, 이 구간 내에서 최대치의 전진폭(Peak-to-Peak)을 취하고, 그 때의 주행속도를 획득한다.
- 3) 이를 5km/h 단위의 같은 속도별로 모아서 평균한다.

상기와 같이 통계적으로 처리된 데이터는 그림 1 의 선도에 의거하여 평가된다.

표1 승차감 평가 기준

승차감 레벨	평가
100dB 미만	매우 우수
100dB 이상 105dB 미만	양호
105dB 이상 110dB 미만	보통
110dB 이상 115dB 미만	조금 불편함
115dB 이상 120dB 미만	불편함
120dB 이상 125dB 미만	매우 불편함
125dB 이상	극히 불편함

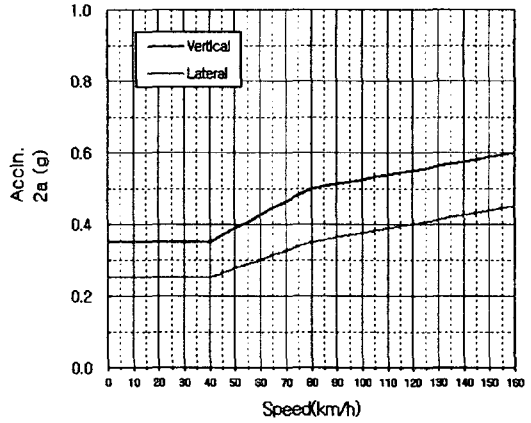


그림 1 진동 평가 선도

3. 시스템 구성

3.1 측정 시스템

승차감 및 진동 측정을 위한 측정 시스템의 구성은 다음의 그림 2와 같다.

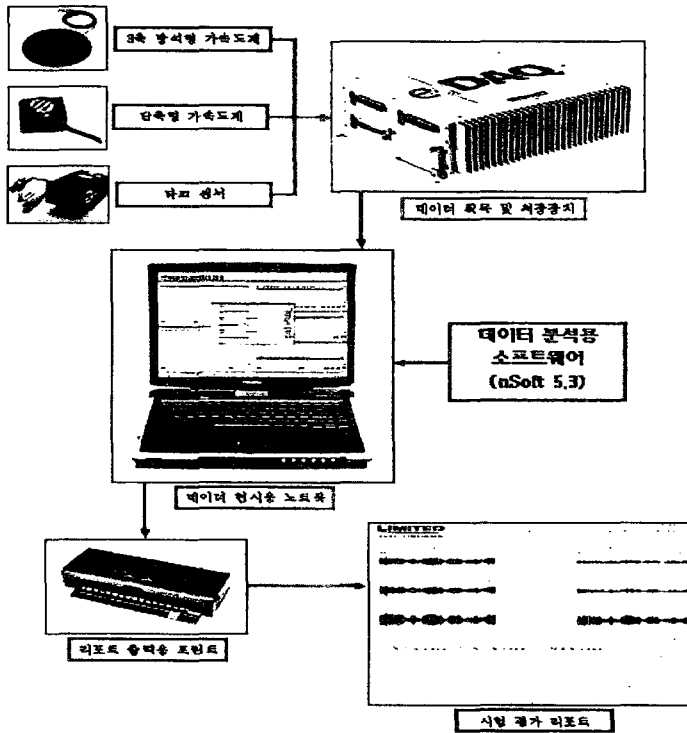


그림 2 측정 시스템의 구성

3.2. 평가 시스템

측정된 진동가속도 데이터를 이용한 승차감 및 진동 평가 방법은 분석용 소프트웨어인 nSoft 에서 제공되는 nCL(nSoft Command Language)을 사용하여 일련의 분석 및 평가 절차에 따라 데이터를 처리하고, 결과에 대한 최종 레포트가 자동생성 되도록 하였다. 평가 시스템에 사용된 알고리즘은 객차 승차감의 경우는 그림 3과 같이, 화차 진동의 경우는 그림 4와 같은 절차에 의거한다.

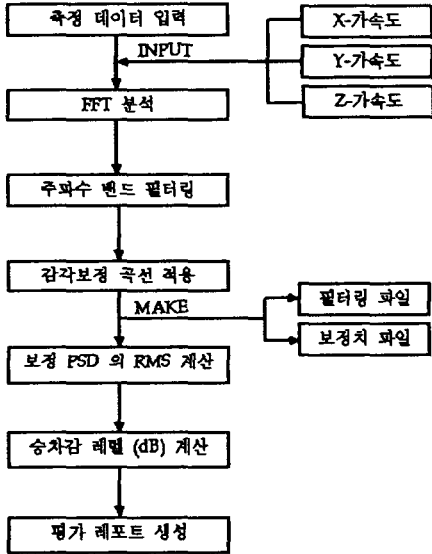


그림 3 객차 승차감 평가 알고리즘

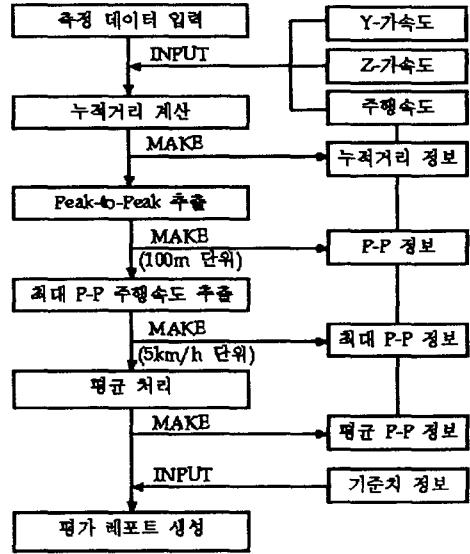


그림 4 화차 진동 평가 알고리즘

3.3 평가 알고리즘 검증

본 시스템에 적용한 평가 알고리즘에 대하여 결과의 검증을 위하여, 임의의 가속도 데이터를 입력값으로 하여 결과를 산출한 후 비교하는 방법을 택하였다. 검증을 위하여 철도차량 동특성 해석 소프트웨어로 알려진 AEA Technology 사의 VAMPIRE 4.30 을 사용하였으며, 검증을 위한 입력 데이터는 VAMPIRE 프로그램을 이용하여 임의의 차량을 모델링한 후, 궤도 조건 및 운행조건을 입력하여 X, Y, Z 방향의 가속도 데이터를 생성하였다.

3.3.1 승차감 평가 알고리즘 검증

상기의 가속도 데이터를 입력값으로 하여 VAMPIRE 에서 ISO 승차감 보정 곡선을 적용한 해석 결과와 본 평가시스템에서 산출된 결과를 서로 비교하였으며, 결과는 표 2 와 같다. 결과로부터 승차감 레벨에서 미소한 오차를 가짐에 따라 본 시스템에 적용된 평가 알고리즘의 유용성을 검증할 수 있었다.

표2 승차감 레벨 (dB) 비교

승차감 레벨	평가시스템	VAMPIRE	오 차
X 방향	105.015(dB)	104.959(dB)	0.05(%)
Y 방향	103.995(dB)	104.027(dB)	0.03(%)
Z 방향	105.471(dB)	105.483(dB)	0.01(%)

3.3.2 진동 평가 알고리즘 검증

본 평가 시스템에 적용하고 있는 가속도 데이터에 대한 전진폭(Peak-to-Peak) 산출 알고리즘을 이용하여 반주기 신호에 대하여 전진폭을 구한 결과는 그림 5와 같으며, 반주기로부터 구한 전진폭 결과는 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

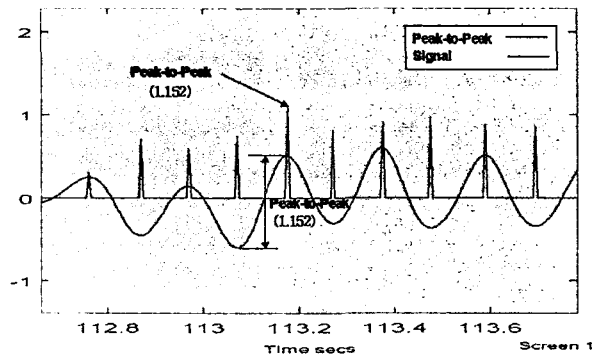


그림 5 전진폭 산출 결과

4. 실차 시험 적용

4.1 시험 개요

본 시스템의 적용성과 효용성을 검증하기 위하여 실제 열차를 대상으로 시험을 실시하였다. 시험 대상은 객차의 경우 신조 무궁화 객차로 선정하였으며, 화차의 경우 무개화차로 선정하였다. 시험 구간은 경부선에서 동대구-부산 구간으로 하여 측정을 실시하였다.

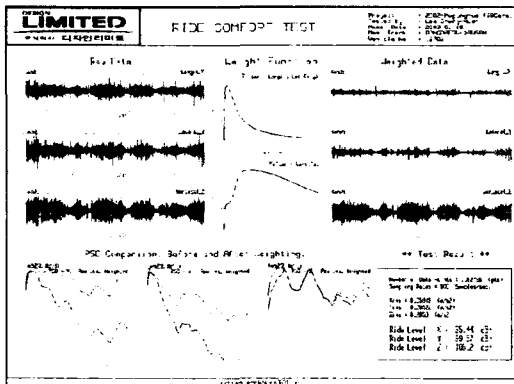


그림 6 객차 승차감 평가 리포트

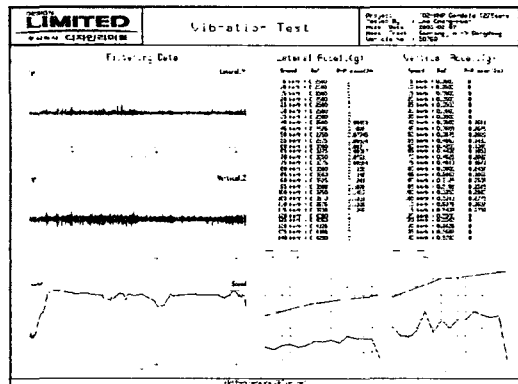


그림 7 화차 진동 평가 리포트

4.2 객차 승차감 측정 및 평가

측정은 상대적으로 승차감이 나쁜 대차 상부의 좌석에 시트 패드형 3축 가속도계를 깔고 측정자는 편안한 자세로 앉아서 측정하였다. 측정은 전후방향을 X, 좌우방향을 Y, 상하방향을 Z 축으로 정하고, 각 방향으로부터의 진동 가속도를 실시간으로 측정하였다. 측정된 데이터에 대한 평가 레포트의 전체 레이아웃은 그림 6과 같으며, 출력 상세내용은 다음과 같다.

1) 측정 데이터

3축 가속도계를 통하여 측정된 X, Y, Z 방향 데이터를 그림 8과 같이 시간역에 대하여 나타낸다.

2) 감각 보정 곡선

그림 9와 같이 상부측은 수평방향, 하부측은 수직방향에 대한 감각 보정곡선을 주파수 영역에 대하여 나타낸다.

3) 감각 보정 데이터

측정 데이터에 주파수별로 감각 보정을 적용한 보정 데이터를 그림 10과 같이 나타낸다.

4) PSD(Power Spectral Density) 비교 곡선

감각 보정을 적용 전, 후의 PSD 비교 곡선을 그림 11 과 같이 나타낸다.

5) 승차감 레벨 산출 및 평가

각 방향별로 보정된 가속도 실효치와 승차감 레벨은 그림 12 와 같이 나타낸다. 현재 철도청에서 객차에 적용하고 있는 승차감 기준은 상하방향 110dB, 좌우방향 105dB 이하로 규정하고 있으며, 대상 차량에 대한 승차감 레벨은 상하방향 106.2dB, 좌우방향 99.22dB 로 나타남에 따라 양호한 승차감 수준을 가지는 것으로 평가되었다.

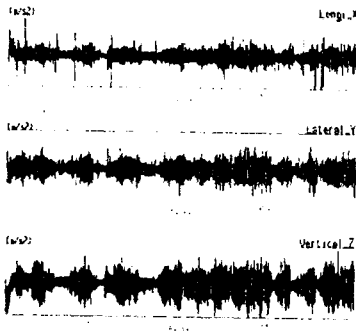


그림 8 측정 데이터

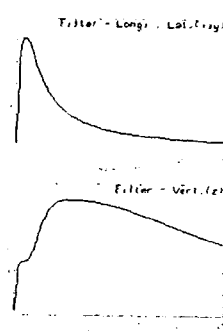


그림 9 감각보정곡선

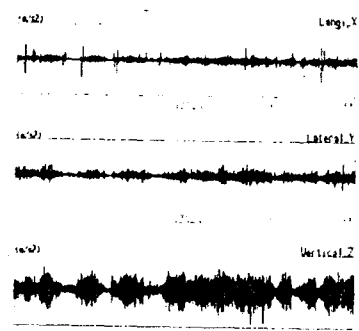


그림 10 감각보정 데이터

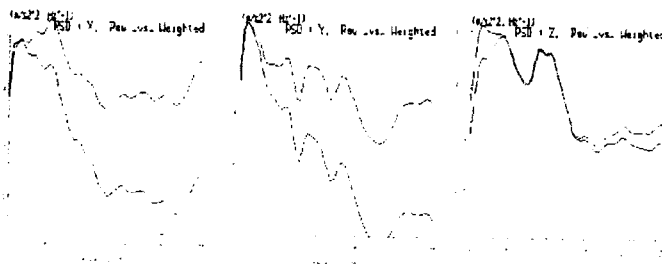


그림 11 PSD 비교 곡선

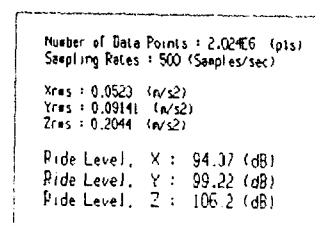


그림 12 승차감 레벨 산출

4.3 화차 진동 측정 및 평가

측정은 상대적으로 진동이 심한 대차 상부의 차체 바닥면에서 좌우방향을 Y, 상하방향을 Z 축으로 정하고, 각 방향으로부터의 진동 가속도를 실시간으로 측정하였으며, 타코센서는 실시간으로 차륜 회전수를 감지하여 주행속도로 환산된 데이터를 출력하도록 하였다. 측정된 데이터에 대한 평가 레포트의 전체 레이아웃은 그림 7과 같으며, 출력 상세내용은 다음과 같다.

1) 필터링 데이터 및 주행속도 선도

그림 13과 같이 상부에는 측정된 좌우 및 상하방향 데이터를 10Hz Low Pass 필터링 처리한 데이터를, 하부에는 주행속도 선도를 시간역에 대하여 나타낸다.

2) 진동 평가 데이터 및 평가 선도

그림 14와 같이 상부에는 주행 속도별로 좌우 및 상하 방향 진동의 전진폭에 대한 기준치와 산출치를, 하부에는 평가의 용이성을 위하여 평가 데이터를 평가 기준선과 함께 그래프로 나타낸다.

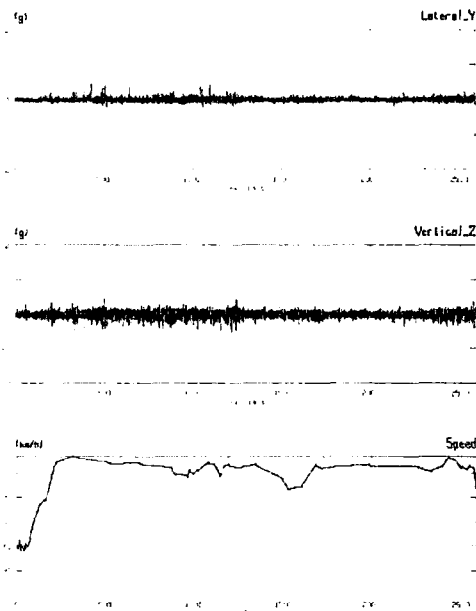


그림 13 필터링 데이터와 주행속도

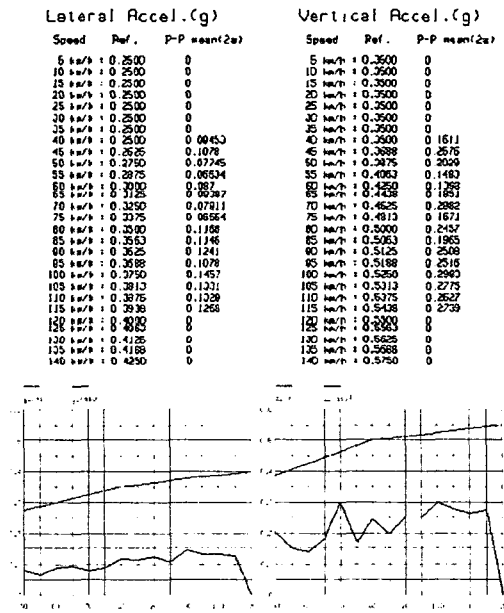


그림 14 진동평가 데이터 및 선도

5. 결 론

본 연구에서는 단일 시스템을 이용하여 객차의 승차감과 화차의 진동에 대한 측정 및 평가를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 단일 시스템으로 객차의 승차감과 화차의 진동을 측정 및 평가할 수 있도록 함으로써 시스템 및 데이터의 단일성을 도모할 수 있었다.
- 2) 시험 결과에 대한 분석 절차를 일괄 처리하여, 평가 레포트를 자동 생성시키게 함으로써, 시험 결과에 대한 분석 및 평가가 용이하게 하였다.

- 3) 평가 시스템에 대하여 이론적인 검증과 실제 시험을 통하여 유용성을 검증할 수 있었다.
- 4) 본 평가시스템을 이용하여 각종 승차감 평가 기법 및 진동 성능 분석 방법을 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

향후에는 본 평가 시스템에 UIC 승차감 모듈을 추가시킴으로써, UIC 승차감 규격을 적용하고 있는 도시철도차량에 대하여 평가 시스템의 활용성을 검토할 예정이다.

참고문헌

1. 철도차량-승차감 측정 및 평가방법, 한국산업규격 KS R 9216, 2000
2. 철도차량의 진동 특성-측정방법, 한국산업규격 KS R 9160, 1993
3. VAMPIRE Version 4.3 User Manual, AEA Technology, 2003
4. nSoft Version 5.3 User Manual, nCode, 2003