

철도차량의 승차감-진동 평가 시스템 개발

Development of an Evaluation System for Ride Comfort and Vibration on Railway Vehicles

이창환¹, 유완석²
Chang-Hwan Lee, Wan-Suk Yoo

Keywords : *Ride Comfort(승차감), Vibration Level(진동수준), Evaluation System(평가시스템)*
Sensitivity Weighting Curve(감각보정곡선), Peak-to-Peak Method(전진폭 평가법)

Abstract

In this paper, a new evaluation system was developed for ride comfort test and vibration level test on railway vehicles. These tests are carried out by applying different equipments and test procedures before now. But this developed system is capable of ride comfort test and vibration test by a single integrated system. Also, the evaluation algorithm for the ride comfort was compared and verified by simulation results with VAMPIRE software. With this developed system, the comfort in a passenger coach and the vibration in a freight car were verified by the results in 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 쾌적함의 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 진동성능은 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 발

주치의 제작 사양서와 관련 규격을 따르고 있다. 일반적으로 객차의 경우에는 객실 내 좌석에서 승객으로 전달되는 진동 가속도를 측정된 후 주파수 대역별로 가중치를 부여한 진동 측면에서의 승차감 수준을 평가하는 방법이 주로 사용되고 있으며, 기관차나 화차의 경우에는 주행시 차체에서 발생하는 진동 가속도를 통계적 기법을 통한 주행속도별 진동수준을 산출하여 평가하는 방법이 주로 사용되고 있다.

이와 관련하여, 국내에서는 해외 유수업체에서 판매하는 승차감 전용 측정장비를 사용하여 왔으며, 일부 연구에서는 실용적인 승차감 측정장비[1]에 대한 개발 노력도 있어 왔다.

하지만, 기존의 사용되어온 측정장비들은 주로 객차 승차감 측정에 사용되어 왔으며, 기관차나 화차의 진동 측정을 위해서는 별도의 측정장비를 사용하여 왔으며, 진동 분석의 일괄 처리기능이 미흡하여 분석과 평가 과정에 많은 시간과 노력이 소요되고 있는 실정이었다.

따라서, 본 연구에서는 객차의 승차감과 화차의 진동

¹ 정회원, (주)디자인리미트 중앙연구소 대리

² 정회원, 부산대학교 기계공학부 교수

성능시험을 단일 측정 시스템을 이용하여 실시할 수 있도록 하였으며, 측정 결과에 대해서 일괄 처리되어, 평가 레포트가 자동으로 작성되어 신속한 평가가 이루어질 수 있도록 하였다. 또한, 객차와 화차에 대하여 실차시험을 통하여 본 시스템의 효율성과 유용성을 입증하였다.

2. 승차감 및 진동 평가 방법

2.1 객차 승차감 평가

승차감의 측정 및 평가 방법은 국제적으로 ISO2631[2]과 UIC513R[3]을 혼용하여 사용하고 있는 실정이다. 각 규격에서 제시하고 있는 측정방법과 보정곡선 함수에 의한 가중값은 거의 동일하지만, 평가 기준의 경우에는 각 규격에서 제시하는 방법에 차이가 있다. ISO2631에서는 진동가속도의 실효값을 사용하여 산출된 승차감 레벨로써 승차감의 수준을 나타내며, UIC513R은 승차감 지수를 사용하여 승차감의 수준을 나타내고 있다. 승차감과 관련된 KS규격 [4]에서는 국내의 철도차량에서 주로 적용하고 있는 UIC 와 ISO 평가법을 함께 제시하고 있다. 국내에서 운행되고 있는 객차의 제작 설명서[5]에서 승차감 시험은 KS R 9216 규격 중 ISO 평가법에 의거하여 승차감 레벨로써 승차감 수준을 평가하도록 규정하고 있다.

따라서, 본 평가 시스템에서는 ISO 평가법을 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 Fig. 1과 같이 전후·좌우 방향으로는 W_d , 상하 방향으로는 W_b 의 감각 보정 곡선을 적용한다.

승차감 레벨은 상기와 같이 감각 보정한 진동 가속도의 실효값을 사용하여 다음 식 (1)에 의해 dB 로 계산된다.

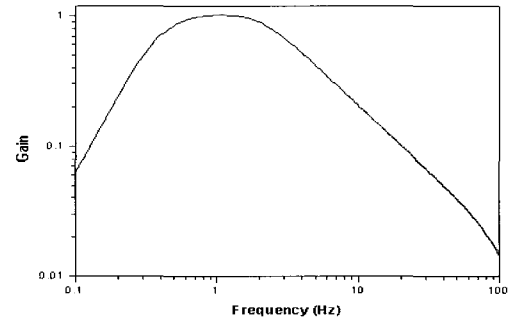
$$L_{eq} = 20 \log \frac{a_w}{a_{ref}} \quad (1)$$

여기서, L_{eq} : 승차감 레벨 (dB)

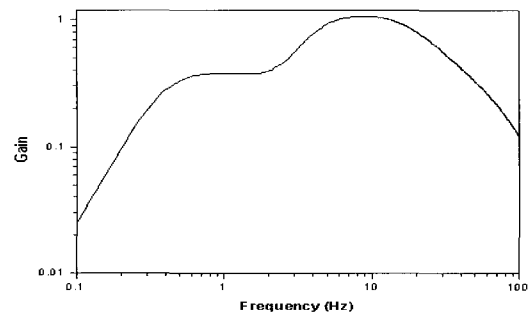
a_w : 감각 보정한 진동 가속도 실효값(m/s²)

a_{ref} : 진동의 기준값 (= 10⁻⁶ m/s²)

이며, 산출된 승차감 레벨(dB) 은 KS 규격에서 제시하는 평가 기준인 Table 1 에 의거하여 평가된다.



(a) W_d 곡선



(b) W_b 곡선

Fig. 1 Weighting Curves

Table 1 Evaluation of Ride Comfort

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

2.2 화차 진동 평가

국내에서 운행되는 화차에 대한 진동 수준은 차체에서 측정된 상하방향과 좌우방향 진동가속도를 전진폭(peak-to-peak) 평가법[6]에 의거하여 평가하며,

다음의 절차에 의한다.

- 1) 고주파 성분을 제거하기 위한 10Hz 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 철도청 화차 제작 사양서에서의 진동 평가 기준에 의거하여, 다음의 Fig. 2 와 같이 주행속도별 평가선도에 의거하여 평가된다.

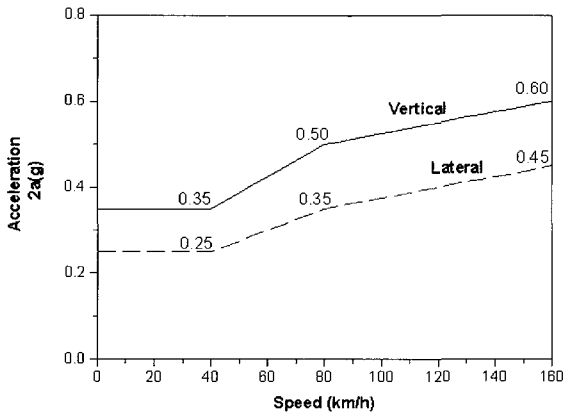


Fig. 2 Assessment Curve of Vibration

3. 단일 시스템의 구성

본 시스템은 단일 시스템으로 객차의 승차감과 화차의 진동 수준에 대한 측정과 평가를 함께 할 수 있도록 구성되어 있다.

2.1 측정 시스템

승차감 및 진동 측정을 위한 측정 시스템의 구성은 다음의 Fig. 3 과 같이, 측정을 위한 가속도계 및 타코센서류와 데이터 획득 및 저장장치, 그리고 데이터 분석 및 평가 레포트를 위한 소프트웨어로 이루어져 있다.

그리고, 측정 시스템의 사양은 Table 2 와 같다.

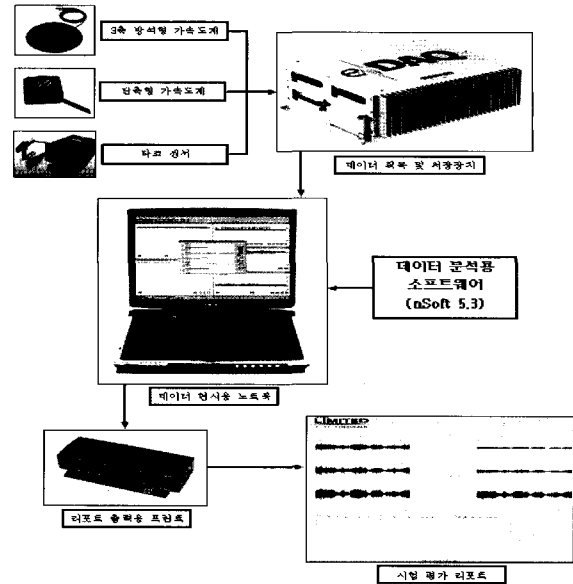


Fig. 3 Layout of Measuring System

Table 2 Specification of Measuring System

구 성 품	모델명	성능 및 사양
1축 가속도계	8305A10	측정범위 : ±10g
방석형 가속도계	356B40	측정범위 : ±10g
타코 센서	ACT-1B	최대 100,000 rpm
데이터 처리장치	e-DAQ	· 최대 2500Hz 샘플링 · 512MB PCMCIA Card
휴대용 컴퓨터	TE2100	· Pentium IV 1.8GHz · 512MB RAM

2.2. 평가 시스템

측정된 진동가속도 데이터를 이용한 승차감 및 진동 평가 방법은 분석용 소프트웨어인 nSoft[7] 에서 제공되는 nCL(nSoft Command Language)을 사용하여 일련의 분석 및 평가 절차에 따라 데이터를 처리하고, 결과에 대한 최종 레포트가 자동생성 되도록 하였다.

1) 객차 승차감 평가 알고리즘

객차 승차감 평가를 위한 알고리즘은 Fig. 4 와 같다. 승차감 평가의 절차는 측정된 3방향 가속도 신호를 이용하여 1~80Hz 의 주파수 범위에서 FFT 분석과 감각 보정 곡선을 적용시킨 후, RMS 값을 구하여 최종 승차감 레벨을 dB 로 산출하도록 하였으며,

결과에 대한 평가 레포트를 자동 산출토록 하였다.

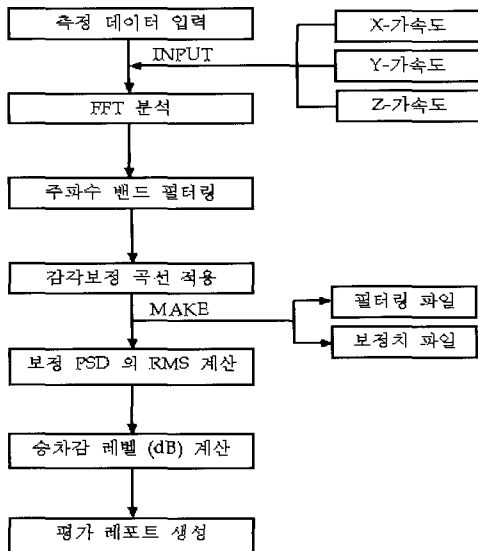


Fig. 4 Flowchart of Ride Comfort Evaluation

2) 화차 진동 평가 알고리즘

화차 진동 평가를 위한 알고리즘은 Fig. 5 와 같다.

진동 평가의 절차는 측정된 가속도 신호와 주행 속도를 이용하여 10Hz 저역통과 필터링을 거치고, 100m 단위로 최대 전진폭을 산출하고, 그 때의 해당 주행속도값을 함께 저장한다. 다음으로 5km/h의 단위로 최대 전진폭의 산출 평균값을 산출하여 시험 결과에 대한 평가 레포트를 자동 산출토록 하였다.

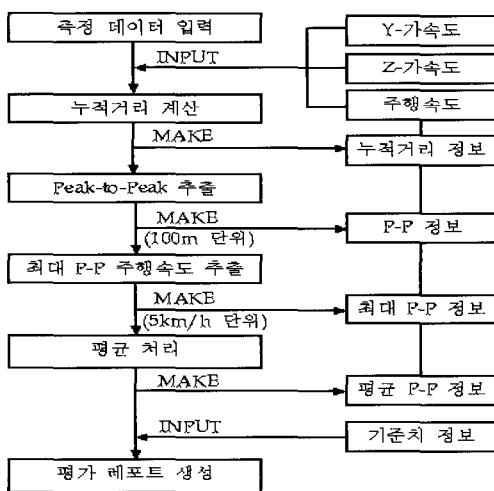


Fig. 5 Flowchart of Vibration Evaluation

2.3 평가 알고리즘 검증

본 시스템에 적용한 승차감 평가 알고리즘에 대한 결과의 검증을 위하여, 임의의 가속도 데이터를 입력값으로 하여 결과를 산출한 후 비교하는 방법을 택하였다. 본 방법을 위하여 철도차량 동특성 해석 소프트웨어로 알려진 AEA Technology 사의 VAMPIRE 4.3[8] 를 사용하였으며, 본 소프트웨어의 승차감 해석시 지원되는 각종 감각 보정 곡선을 사용하여 산출된 승차감 레벨을 비교 검증하였다.

검증을 위한 데이터는 VAMPIRE 프로그램을 이용한 임의 차량 모델링과 궤도 조건 및 속도를 입력하여 Fig. 6 과 같이 전후방향(X-방향), 좌우방향(Y-방향), 상하방향(Z-방향) 에 대하여 산출된 가속도 데이터를 사용하였다.

상기 입력데이터에 대하여 VAMPIRE에서 지원하는 ISO 평가법에 의거한 승차감 해석 결과와 본 평가시스템의 결과를 서로 비교한 값은 Table 3 과 같이 나타났으며, 두 승차감 레벨이 거의 동일한 값을 산출함에 따라 본 시스템에 적용된 평가 알고리즘의 유용성을 검증할 수 있었다.

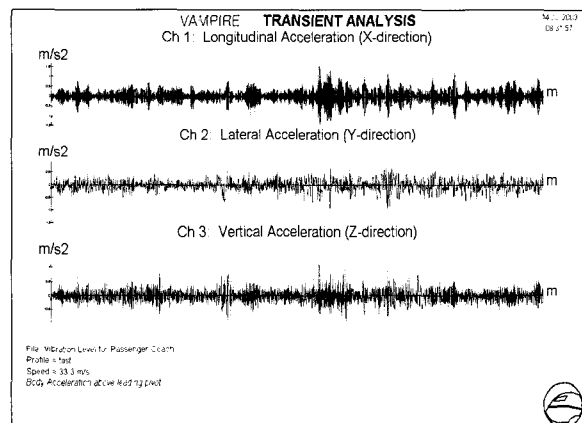


Fig. 6 Random Acceleration Data

Table 3 Comparisons of Analysis Results

승차감 레벨	평가시스템	VAMPIRE	오 차
전후 방향	105.015(dB)	104.959(dB)	0.05(%)
좌우 방향	103.995(dB)	104.027(dB)	0.03(%)
상하 방향	105.471(dB)	105.483(dB)	0.01(%)

그리고, 진동 평가 알고리즘에 대한 결과의 검증 을 위하여, 임의의 가속도 데이터를 입력값으로 하여 평가의 자료로 활용되는 전진폭에 대해서, Fig. 7 과 같이 반주기에 대하여 진동 파형의 값과 평가 시스템 을 통하여 산출된 전진폭의 값을 서로 비교하여 검증하고자 하였다. 비교 결과의 전진폭 산출값이 서로 일치함으로써 전진폭 산출 알고리즘의 정확성을 검증할 수 있었다.

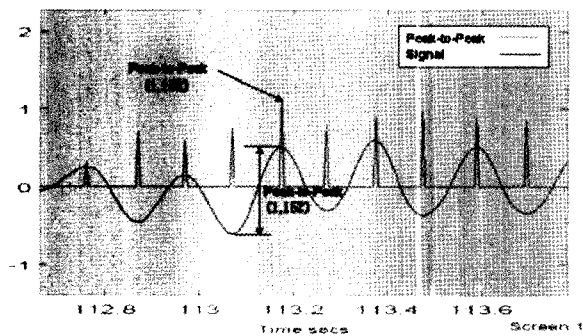


Fig. 7 Comparisons of Peak-to-Peak Value

2.4 평가 시스템 검증

본 평가 시스템에서 측정된 승차감 결과에 대한 검증 을 위하여, ISO 평가법을 적용한 B&K사의 승차감 전용 측정장비를 사용하여 실차시험을 실시하였으며, 동일 구간에서 3회 측정된 결과들의 평균값을 산출하여 Table 4 와 같이 비교하였다. 비교 결과로부터 측정 방향별로 0.5dB 이하의 오차 수준을 보이므로 본 평가 시스템의 결과에 대한 신뢰성을 검증할 수 있었다.

Table 4 Comparisons of Test Results

승차감 레벨	평가시스템	승차감 측정기	오 차
전후 방향	94.9 (dB)	94.5 (dB)	0.4 (dB)
좌우 방향	99.4 (dB)	98.9 (dB)	0.5 (dB)
상하 방향	106.2 (dB)	106.4 (dB)	0.2 (dB)

그리고, 지금까지 진동 평가를 위한 기준이 되는 전용장비가 없는 상황이며, 평가 절차에 대한 일괄 처리 분석이 구축되지 못하여 수작업에 의존하고 있는 상황이다. 따라서, 본 평가 시스템과 전용 측정장 비를 사용하여 상대 비교 측정을 통한 검증은 어려운 상황이며, 본 평가시스템은 진동 평가에 대한 모든

분석과정을 일괄처리 할 수 있게 함으로써, 기존의 분석방법에 비하여 평가의 신뢰도와 효율성을 가지고 있다.

4. 실차 시험 적용

4.1 시험 개요

본 시스템의 적용성과 효율성을 검증하기 위하여 실제 열차를 대상으로 시험을 실시하였다. 시험 대상 은 객차의 경우 신조 무궁화 객차로 선정하였으며, 화차의 경우 호퍼카로 하였다. 시험 구간은 경부선에서 동대구-부산 구간에서 측정을 실시하였다.

4.2 객차 승차감 측정 및 평가

시험에 사용된 측정 시스템은 Fig. 8 과 같이 구성되며, 측정은 상대적으로 승차감이 나쁜 대차 상부의 좌석에 3축형 시트 패드 가속도계를 깔고 측정자는 편안한 자세로 앉아서 측정을 하였다.



Fig. 8 Measuring System of Ride Comfort

측정은 전후방향을 X, 좌우방향을 Y, 상하방향을 Z 축으로 정하고, 각 방향으로부터의 진동 가속도를 실시간으로 측정하였다. 측정이 종료된 후, 측정된 데이터에 대한 평가 레포트의 전체 구성은 Fig. 9 와 같으며, 상세 내용은 다음은 같다.

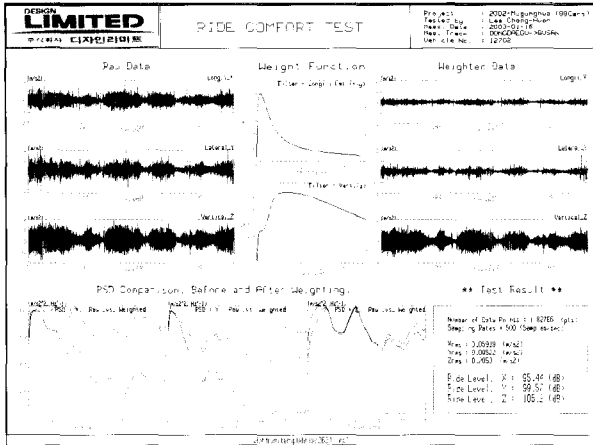


Fig. 9 Layout of Ride Comfort Report

1) 측정 데이터
3축 가속도계를 통하여 측정된 X, Y, Z 방향 데이터를 Fig. 10 과 같이 시간역에 대하여 표시되도록 하였다.

2) 감각 보정 곡선
상부측은 수평방향, 하부측은 수직방향에 대한 감각 보정곡선을 Fig. 11 과 같이 표시되도록 하였다.

3) 감각 보정 데이터
측정 데이터에 주파수별로 감각보정을 적용한 보정 데이터를 Fig. 12 와 같이 표시되도록 하였다.

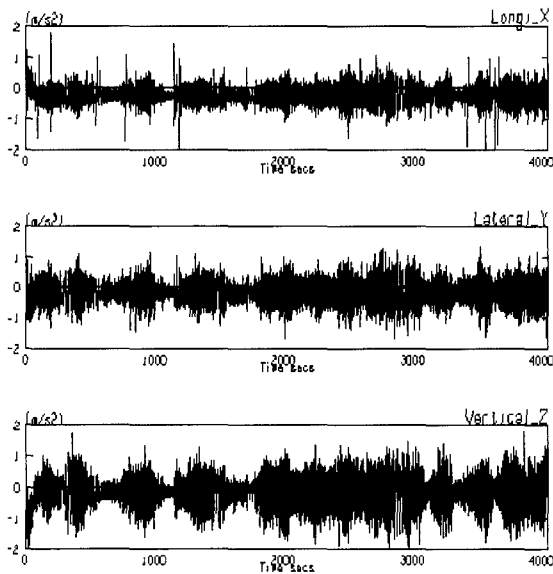


Fig. 10 Raw Signal

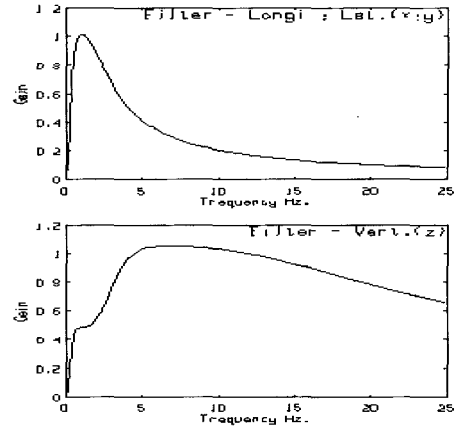


Fig. 11 Weighting Curves

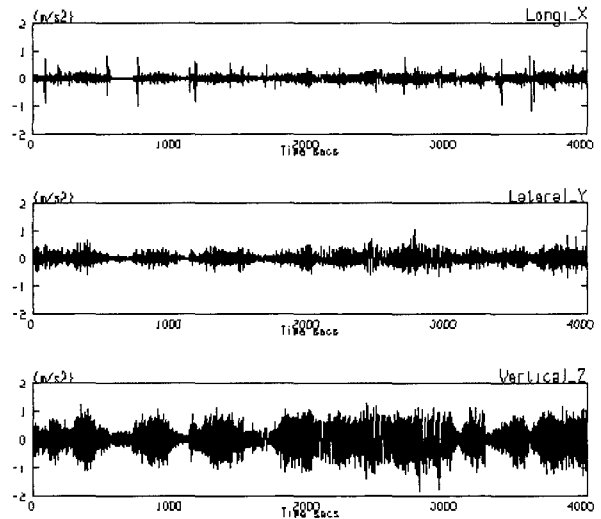


Fig. 12 Weighted Signal

4) PSD(Power Spectral Density) 비교 곡선
감각 보정의 적용 전후의 PSD 곡선을 Fig. 13 과 같이 표시되도록 하였다.

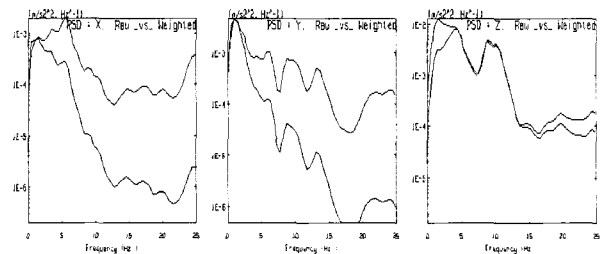


Fig. 13 Comparison of PSD

5) 승차감 레벨 산출 및 평가

각 방향별로 산출된 가속도 실효치와 승차감 레벨 (dB)을 수치화하여 표시한다. 시험 결과로부터, 시험 객차에 대한 승차감 레벨은 상하방향 106.2dB, 좌우방향 99.57dB 로 양호한 승차감 수준을 가지는 것으로 평가되었다.

4.3 화차 진동 측정 및 평가

시험에 사용된 측정 시스템은 화차의 최후부에 연결되는 차장차에 설치하였다. 가속도계는 상대적으로 진동이 심한 대차 상부의 상판에 취부하여 측정하며, 타코센서는 차륜의 회전수를 감지하기 용이한 대차 프레임에 설치하여 측정하였다. 타코센서는 실시간으로 차륜 회전수를 감지하여 주행속도로 환산된 데이터를 출력되도록 하였다. 측정이 종료된 후, 측정된 데이터에 대한 평가 레포트의 전체 구성은 Fig. 14 와 같으며, 상세 내용은 다음과 같다.

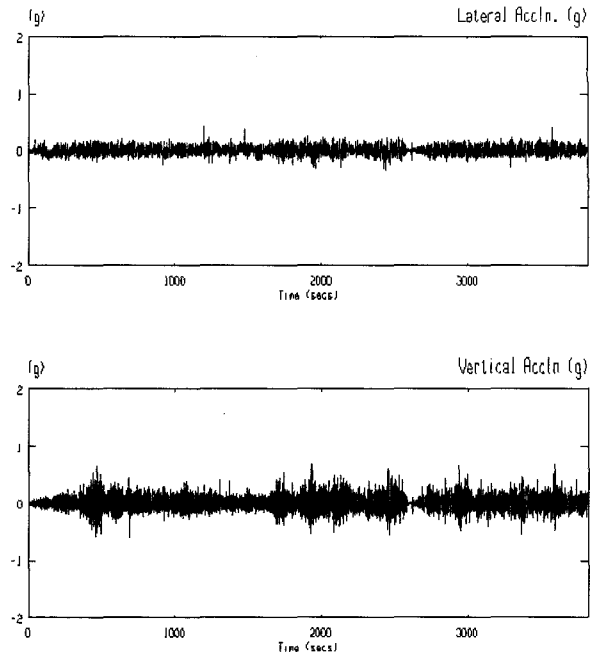


Fig. 15 Filtering Signal

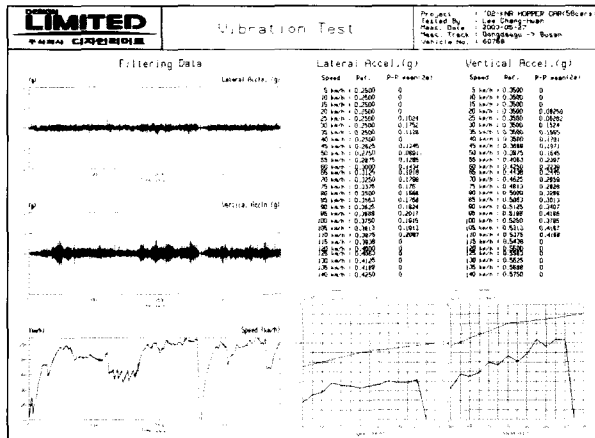


Fig. 14 Layout of Vibration Report

1) 필터링 데이터 및 주행속도 선도

상부에는 측정된 좌우 및 상하방향 데이터를 10Hz 저역 통과필터 처리된 데이터를 Fig. 15 와 같이 표시되고, 하부에는 시험차의 주행속도를 Fig. 16 과 같이 시간역 선도로 표시되도록 하였다.

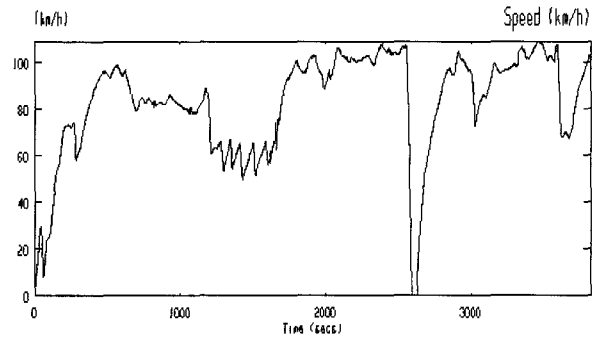


Fig. 16 Speed Curve

2) 진동평가 데이터 및 평가 선도

상부에는 주행속도별로 좌우 및 상하 방향 진동의 전진폭에 대한 기준치와 산출치를 Fig. 17 과 같이 함께 표시되도록 하였으며, 하부에는 평가의 용이성을 위하여 평가 데이터에 대한 평가선도를 Fig. 18 과 같이 표시되도록 하였다.

Lateral Accel.(g)			Vertical Accel.(g)		
Speed	Ref.	P-P mean(2σ)	Speed	Ref.	P-P mean(2σ)
5 km/h	: 0.2500	0	5 km/h	: 0.3500	0
10 km/h	: 0.2500	0	10 km/h	: 0.3500	0
15 km/h	: 0.2500	0	15 km/h	: 0.3500	0
20 km/h	: 0.2500	0	20 km/h	: 0.3500	0.08259
25 km/h	: 0.2500	0.1024	25 km/h	: 0.3500	0.06282
30 km/h	: 0.2500	0.1752	30 km/h	: 0.3500	0.1524
35 km/h	: 0.2500	0.1128	35 km/h	: 0.3500	0.1655
40 km/h	: 0.2500	0	40 km/h	: 0.3500	0.1701
45 km/h	: 0.2625	0.1245	45 km/h	: 0.3688	0.1971
50 km/h	: 0.2750	0.08911	50 km/h	: 0.3875	0.1645
55 km/h	: 0.2875	0.1285	55 km/h	: 0.4063	0.2485
60 km/h	: 0.3000	0.1434	60 km/h	: 0.4250	0.2329
65 km/h	: 0.3125	0.1918	65 km/h	: 0.4438	0.2445
70 km/h	: 0.3250	0.1788	70 km/h	: 0.4625	0.2359
75 km/h	: 0.3375	0.176	75 km/h	: 0.4813	0.2828
80 km/h	: 0.3500	0.1568	80 km/h	: 0.5000	0.3298
85 km/h	: 0.3550	0.1768	85 km/h	: 0.5050	0.3013
90 km/h	: 0.3625	0.1824	90 km/h	: 0.5125	0.3407
95 km/h	: 0.3588	0.2017	95 km/h	: 0.5188	0.4186
100 km/h	: 0.3750	0.1915	100 km/h	: 0.5250	0.3795
105 km/h	: 0.3613	0.1913	105 km/h	: 0.5313	0.4187
110 km/h	: 0.3875	0.2087	110 km/h	: 0.5375	0.4158
115 km/h	: 0.3638	0	115 km/h	: 0.5438	0
120 km/h	: 0.4000	0	120 km/h	: 0.5500	0
125 km/h	: 0.4063	0	125 km/h	: 0.5563	0
130 km/h	: 0.4125	0	130 km/h	: 0.5625	0
135 km/h	: 0.4188	0	135 km/h	: 0.5688	0
140 km/h	: 0.4250	0	140 km/h	: 0.5750	0

Fig. 17 Evaluation Data of Vibration

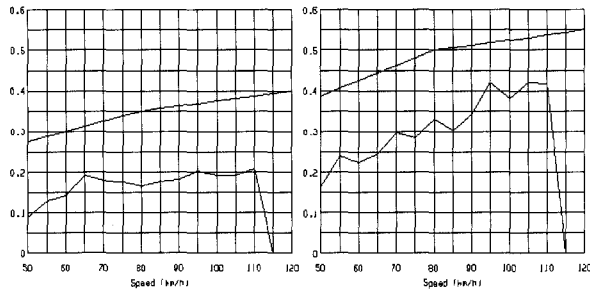


Fig. 18 Evaluation Curve of Vibration

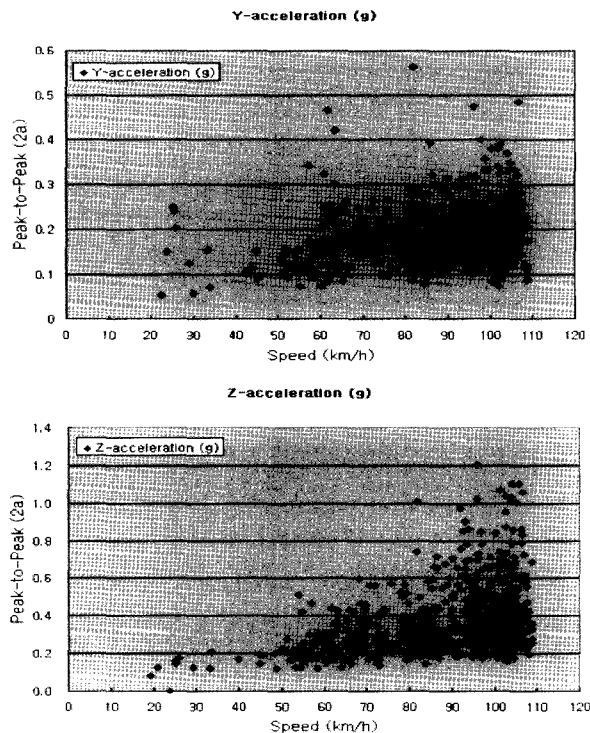


Fig. 19 Distribution Graph of P-P data

또한, 본 평가시스템을 통하여 주행속도별 전진폭의 분포를 자동 산출할 수 있도록 하였으며, 결과는 Fig. 19 와 같다. 시험결과로부터, 시험차량의 진동수준은 속도별로 상하, 좌우 방향 모두 기준치 이내로 양호하게 평가되었다.

5. 결론

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 구성함으로써, 시스템 및 데이터 분석의 단일성을 확보하였다.
- 2) 기존의 승차감과 진동시험을 위하여 각기 다른 측정장비를 사용하여 왔던 불편함을 줄이고, 현장에서 손쉽게 시험결과에 대한 평가 레포트를 통하여 분석이 가능하게 하였다.
- 3) 승차감과 진동 시험 결과에 대하여 복잡한 분석 절차를 일괄 처리하여 평가레포트를 자동 생성시키게 함으로써 시험에 대한 평가를 용이하게 하였다.
- 4) 평가시스템에 대하여 이론적인 검증과 실차시험을 통하여 유용성을 검증할 수 있었다.
- 5) 본 평가시스템을 활용하여 다양한 기준에 의거하여 승차감 및 진동을 평가할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

1. 김영국 외 3인, "철도용 승차감 측정시스템 개발", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 120-125, 1999.
2. Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1 : General requirements, ISO 2631-1, 1997.
3. Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles, UIC Code 513R, 1995.
4. 철도차량-승차감 측정 및 평가방법, KS R 9216, 2000.
5. 무궁화호객차 제작설명서, 철도청, 2001.
6. 호퍼차 제작설명서, 철도청, 2001.
7. nSoft Version 5.3 User Manual, nCode, 2003.
8. VAMPIRE Version 4.3 User Manual, AEA Technology, 2003.