

다기능성을 갖는 철도 차량용 승차감 측정시스템 개발

김영국[†] · 김석원 · 박찬경 · 김기환 · 박태원*

Development of Ride Comfort Measuring System for Railway with Multi-function

Young-Guk Kim[†], Seog-Won Kim, Chan-Kyeong Park, Ki-Hwan Kim, and Tae-Won Park*

Abstract

Recently, the "ride comfort" problem becomes increasingly important because of today's needs for train speedup. The concept of term "ride comfort" is equivocal. Generally it is defined as the vehicle vibration. There are many studies on evaluation method of ride comfort for railway. But each of them recommends the different assessment method and the different guidance. In general, the evaluation methods defined in the standards, such as ISO 2631 and UIC 513R, and Ride Index suggested by Sperling, have been used in the railroad. But, only one or two methods of these can be evaluated by using the commercial ride comfort measuring system. Therefore, it is necessary to develop the new ride comfort measuring system for railway with multi-function. In this paper, the generalization of "ride comfort" and the design and verification of new ride comfort measuring system for railway with multi-function have been described and the application examples has been introduced.

Key Words : ride comfort, frequency weighting curve, rsm method, Wz method, statistical method

1. 서 론

철도 교통은 다른 교통수단에 비해 승객과 화물을 많이 수송할 수 있을 뿐만 아니라 안전성, 정시성(定時性) 및 환경 친화성 등의 장점을 갖고 있다. 철도를 다른 교통수단과의 경쟁력을 강화시키기 위해서는 열차의 속도 및 여객수송의 품질 향상 등이 필요하다. 특히, 승객이 여객수송의 품질에 대해 최종적으로 평가한다는 점을 감안할 때 승차감을 일정한 수준이상으로 향상시키는 것이 필수적이다. 승차감은 인간이 감정으로 느낄 수 있는 다양한 요소(진동, 소음, 온도, 습도, 조도, 개인 공간, 좌석의 질감, 천장의 높이, 전망, 통풍 등)들이 복합적으로 결합되어 나타나지만, 이러한 제반 요소들을 모두 고려하여 정량적으로 승차감을 평가하는 것은 대단히 어려운 일이다. 일반적으로 철도에서는 측정된 진동가속도를 인간의 등가 감응량으로 정량화시켜

평가하는 방법을 사용하고 있다¹⁾³⁾. 철도의 승차감 평가방법으로 "ISO 2631규격"⁴⁾⁶⁾과 Sperling이 제안한 "승차감 지수(Wz)"¹⁾⁵⁾로 평가하는 Wz 평가법이 오랫동안 주로 사용되어 왔다. 그러나, ISO 2631 규격은 전신진동(whole-body vibration)에 대한 일반적인 사항만을 규정하고 있을 뿐 적용환경에 대해서는 특별히 규정되어 있지 않다. 국제철도협회(International Union of Railways, UIC)에서는 유럽철도연구소(European Rail Research Institute, ERRI)에서 수행한 "ISO규격의 철도환경으로 적용"⁶⁾이라는 연구의 결과⁶⁾를 바탕으로 1995년에 독자적인 철도의 승차감 평가방법 및 평가기준을 규정한 규격을 제정하였으며⁷⁾, 유럽표준위원회(European Committee for Standardization, CEN)에서는 UIC 규격과 동일한 평가방법과 평가기준을 사용한 새로운 철도 승차감의 측정 및 평가방법에 대한 규정을 제정하였다. 국제표준위원회(International Standardization Committee, ISO)에서도 UIC 규격을 바탕으로 철도환경이 적용된 승차감에 대한 새로운 규격(ISO 10025, ISO 2631-4)을 제정하였다. 국내의 경우에는 1985년에 제정된 ISO 2631-1의 8시간 피로능력한계를 기준으로

한국철도기술연구원(Korea Railroad Research Institute)
*아주대학교 기계공학과(Ajou University Mechanical Department)

[†]Corresponding author: ygkim@krii.re.kr
(Received : January 15, 2004, Accepted : July 23, 2004)

표 1. 철도의 상업용 승차감 측정시스템

Table 1. Commercial ride comfort measuring system for railway

Product name Specification	A	B	C	D	E	F
Evaluation method	Wz	ISO/Wz	ISO(RCL)	ISO	ISO	DIN
Analog/diigital	Analog	Analog	Digital	Analog	Analog	Digital
Measuring range	0.5-20 Hz	DC-200 Hz	0-36 Hz	0-1000 Hz	1-1000 Hz	0.2-4000 Hz
No. of measuring channels	2	2	3	3	3	4
Remark	For ride comfort	For ride comfort	For ride comfort	For ride comfort/noise	For ride comfort/noise	For ride comfort/noise

적용한 승차감 레벨^[8]이 철도 운영주체에서 제시하는 철도차량 제작시방에 명기되어 사용되어 왔으며, 2000년에 한국표준규격(Korea Standard, KS)에서도 철도의 승차감 평가에 대한 규정을 제정하였다. 이렇듯 다양한 철도차량의 승차감 평가방법과 평가기준으로 인해 철도의 사용주체에 따라 다른 승차감 평가방법을 적용하고 있었으나 차후에는 평가방법과 평가기준을 명확히 제시하고 있는 UIC 규격이 철도차량의 승차감의 평가에 많이 사용될 것으로 예상된다. 그러나, 일반적으로 사용되고 있는 상용화된 승차감 측정장비는 대부분이 승차감 평가방법으로 표 1에서 보는 바와 가속도의 실효값을 이용하거나 Wz 평가방법을 주로 사용하기 때문에 통계적인 평가방법을 적용하는데 큰 어려움을 겪고 있다.

본 논문에서는 철도의 다양한 승차감 평가방법에 대해 비교 분석하며, 이를 통해 UIC 규격, ISO 규격 및 Wz 평가방법에서 제시하는 승차감 평가방법으로 철도의 승차감 평가를 할 수 있는 철도의 승차감 측정시스템을 설계하고자 한다.

2. 승차감 평가방법의 분석

철도의 승차감 평가방법으로 통계적인 평가법, 가속도 실효값을 이용한 평가법과 Wz 평가법 이 사용되고 있으며, 이러한 평가방법들은 서로 다른 주파수 보정곡선, 평가지수 및 평가기준을 사용하여 승차감을 평가하고 있다. 특히, 통계적인 평가법은 ISO 및 UIC 규격에서 평가방법으로는 동일하지만, 서로 다른 주파수 보정곡선을 사용하도록 규정하고 있다.

2.1. 평가방법

그림 1은 철도의 승차감을 평가하기 위한 평가 흐름도를 나타낸다. 차체 중앙바닥 및 대차 중앙의 차체바닥에 설치된 3축 가속도센서로 직접 측정되거나 테이

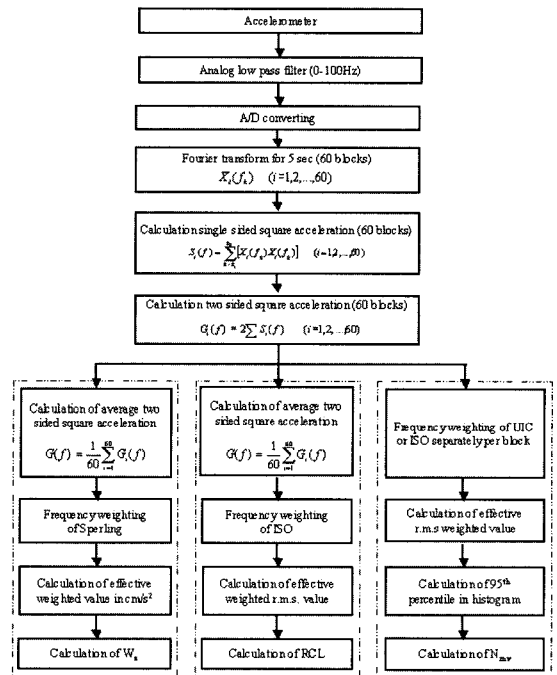


그림 1. 승차감 평가 흐름도
Fig. 1. Processing flow chart of ride comfort evaluation.

프 레코더에 저장된 진동가속도 신호를 저주파 패스필터를 통과시켜 샘플링 동안에 발생할 수 있는 신호외곡에 따른 오차를 제거시킨 후에 디지털 신호로 변환시킨다. 디지털 신호로 변환된 1개 블록(5초 동안 측정 데이터)의 신호에 대해 푸리에변환을 사용하여 주파수 영역으로 변환시킨 후에 해당 평가법이 사용하는 주파수 범위(ISO 규격: 0.5~80 Hz, Wz 평가법: 0.5~30 Hz, UIC 규격: 0.4~80 Hz)에서 각 주파수에 대한 진동가속도의 파워를 구한다. 동일한 방법으로 연속적인 60개 블록에 대해 반복적으로 각 주파수에 대한 진동가속도

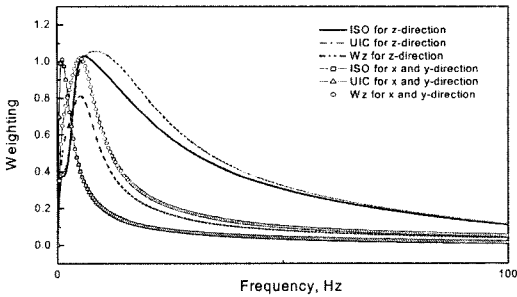


그림 2. ISO, UIC 및 Wz에 대한 주파수 보정곡선
Fig. 2. Frequency weighting curves for ISO, UIC, and Wz.

의 파워를 계산한다. 계산된 60개 블록의 진동파워를 해당 평가법에 따른 주파수 보정을 행한 후에 각 평가법에 따른 평가지수를 구하게 된다.

2.2. 주파수 보정곡선

동일한 크기의 강도를 갖는 진동이 인간에게 작용할 때에 인간이 느끼는 감응은 진동주파수에 따라 차이가 있으며, 이를 함수화시킨 것이 주파수 보정곡선으로 그림 2와 같이 철도의 승차감 평가법마다 서로 다른 주파수 보정곡선을 사용하고 있다. 그림 2에서 선형태(실선, 일점쇄선, 이점쇄선)의 주파수 보정곡선은 수직방향에 대한 것이며, 심볼 형태(□, △, ○)은 수평방향의 주파수 보정곡선이다. 또한, ISO는 실선과 심볼 □로, UIC는 일점쇄선과 심볼 △로, Wz는 이점쇄선과 심볼 ○로 나타내었다.

2.3. 평가지수 및 평가기준

UIC 규격, ISO 규격 등에서 규정하고 있는 통계적인 평가방법은 60개 진동가속도의 실효값에 대해 누적빈도가 95%인 실효값을 사용하여 승차감 지수를 계산하기 때문에 그림 1의 철도 승차감 평가 흐름도에서 나타난 바와 같이 60개 블록의 데이터가 반드시 필요하지만, ISO 규격에서 정의되어 있는 실효값을 이용한 평가방법과 Wz 평가방법은 측정구간(또는 시간)에 따라 적당한 블럭수를 선택하여 그 측정구간에 대해 승차감 평가를 할 수 있다.

2.3.1. 실효값을 이용한 평가방법

이 평가방법은 기본적으로 식(1)에 표시된 것과 같이 특정한 시간동안 측정된 진동 가속도의 주파수 보정된 파워 실효값(제곱근) $a_{r.m.s.}$ 를 이용한다. 이 실효값이 그대로 승차감 평가에 이용되거나 실효값으로부터 계산된 평가지수로부터 승차감을 평가하게 된다. 실효

값을 이용한 대표적인 평가지수로는 일본 및 국내에서 사용되는 승차감 레벨(RCL, dB)과 프랑스 국철에서 사용되는 승차감 평가지수가 있는데, 이들은 ISO 2631-1(1985)에 정의된 기준을 사용하고 있다.

$$a_{r.m.s.} = \sqrt{\int_{0.5}^{80} G_i(f)B_i^2(f)df} \quad (i=x,y,z) \quad (1)$$

여기서, G_i : 진동가속도 파워, B_i : 주파수 보정 함수이다.

승차감 레벨은 식(2)와 같이 계산된 실효값($A_{w,rms}$)과 기준가속도($A_{ref} = 10^{-6} \text{ m/sec}^2$) 비의 대수값으로 정의되며, 국내의 평가기준^[2,8]에 따라 승차감 레벨이 113 dB 이상이 되면 열차에 타고 있는 승객은 불편하게 느끼게 된다.

$$RCL = 20\log_{10}(A_{w,rms}/A_{ref}) \quad (2)$$

2.3.2. 통계적인 평가방법

이 평가방법은 x, y, z 방향에 대해 해당 방향에 적합하게 주파수 보정된 60개 블록의 실효값 중에서 누적빈도가 95%인 실효값을 사용하여 식(3)으로부터 승차감 지수 N_{mv} 를 구하여 평가기준^[2,7]에 따라 철도차량의 승차감을 평가하게 된다. 승차감 지수가 4이상이면 승객은 불편함을 느낀다.

$$N_{mv} = 6\sqrt{(A_{wx95})^2 + (A_{wy95})^2 + (A_{wz95})^2} \quad (3)$$

2.3.3. Wz 평가방법

이 평가방법도 실효값을 이용한 평가방법과 마찬가지로 특정한 측정구간에 따라 적당한 블럭수를 선택하여 그 측정구간에서 진동가속도 파워에 대한 평균값을 구한 후 해당 방향에 대해 식(4)에 의해 승차감 지수 Wz를 구하여 평가기준^[2,5]에 따라 승차감을 평가하며, 승차감 지수 3은 승객이 안락함을 느끼는 한계치이다. 이 방법의 적용시 주의해야 할 사항은 진동가속도의 단위를 cm/sec^2 으로 해야 한다는 것이다.

$$Wz_i = \sqrt[6.67]{\int_{0.5}^{80} 2G_i(f)B_i^2(f)df} \quad (i=x,y,z) \quad (4)$$

3. 승차감 측정시스템의 설계

현재 사용되고 있는 상용화된 승차감 측정시스템은 표 1에서 보는 바와 같이 가속도의 실효값이나 Wz 평가방법을 이용하여 철도의 승차감 평가를 할 수 있도록 되어있을 뿐 통계적인 방법을 사용한 철도의 승차감 평가는 불가능하며, 측정된 가속도를 사용하여 상용화된 승차감 측정시스템이 아닌 다른 별개의 작업을

통해 통계적인 방법의 승차감 평가를 행할 수 밖에 없기 때문에 통계적인 방법으로 철도의 승차감 평가를 하기 위해서는 많은 시간이 소요되며, 승차감 평가방법에 대한 지식이 적은 운영주체는 이 방법을 승차감 평가에 적용하기가 어렵다. 따라서, 철도의 승차감을 평가하려는 주체가 철도의 승차감을 앞에서 설명한 모든 승차감 평가 방법으로 손쉽게 평가할 수 있는 다기능을 갖는 승차감 측정시스템이 필요하다. 본 논문에서 1개의 측정시스템으로 철도의 승차감을 가속도 실효값, 통계적인 평가방법인 평가지수와 Wz 평가방법의 Wz로 평가할 수 있도록 설계된 승차감 측정시스템을 개발하였다. 즉, 동일한 1개의 승차감 측정시스템으로 앞에서 설명한 3개의 평가방법으로 철도의 승차감을 평가할 수 있다. 또한, 이 승차감 측정시스템을 이용하여 8채널의 신호들을 취득 및 저장할 수 있도록 설계되어 있기 때문에 이 신호들을 이용하여 다른 용도의 신호

분석으로도 활용할 수 있다.

승차감 측정시스템은 하드웨어(hardware)와 소프트웨어(software)로 크게 구분된다.

3.1. 하드웨어의 구성

3.1.1. 하드웨어

하드웨어의 구성은 그림 3과 같고 이에 대한 상세한 시방은 표 2에 나타나 있으며, 도킹스테이션(docking station)이 장착된 노트북컴퓨터, FFT 보드, 가속도 센서 및 GPS(또는 별도의 속도센서)로 구성된다. 일반적으로 승차감은 진동 가속도로 평가되지만, 진동 가속도의 크기는 철도차량의 주행속도나 궤도의 상태 등에 따라 많은 차이가 있기 때문에 철도차량의 주행속도 및 위치를 알아야 정확한 승차감의 해석 및 평가가 이루어질 수 있다. 그러나, 현재 사용되고 있는 상업용 승차감 측정기는 진동 가속도에 의한 승차감만을 평가할 뿐 철도차량의 주행속도 및 위치 등의 정보를 승차감 측정기로는 직접 파악할 수가 없기 때문에 별도로 설치된 속도센서를 통해 철도차량의 주행속도를, 철도선로 주변에 설치되어 있는 마일 포스트(mile post)를 이용하여 목측으로 철도차량의 위치를 확인하므로 철도차량의 정확한 이동위치의 측정이 어려울 뿐만 아니라 철도차량의 위치와 주행속도를 종합적으로 고려한 승차감의 평가는 어려운 실정이다. 본 승차

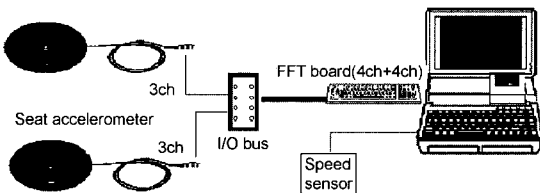


그림 3. 승차감 측정시스템 구성도

Fig. 3. Schematic diagram of ride comfort measuring system.

표 2. 승차감 측정시스템의 상세시방

Table 2. Specifications of ride comfort measuring system

No	Item name	Specification	Remark
1	FFT Board	- Input 4ch - 100 mV~16 V Input - AC, DC, ICP(2.4 mA@20 V) Amp - 90 dB Alising Filter - 16bits ADC - Bandwidth: 5 Hz~80 kHz - Sampling speed: 2x Bandwidth - FFT speed: 5 ms for 1 K	- Amp - Filter - A/D - FFT
2	Accelerometer	- 3축 Seated type - ICP Type - Sensitivity: 1 mV/m/s ²	- Acceleration
3	Notebook with Docking station	- CPU: Pentium MMX 166MHz - Docking station: 15.1"x16.5"x5.4" 2 full-size ISA slot x2	
4	GPS	- Accuracy Velocity: 0.1 m/s - Position: 15 m(placer), 8 m(DR) - Power supply	- Speed and position
5	Odormeter & F/V converter	- 0~2500 Hz/V.P	

감 측정시스템에서는 이러한 비효율성을 배제하고 정확한 승차감의 평가를 할 수 있도록 GPS나 속도센서를 설치하여 승차감 측정시스템에서 직접 철도차량의 주행속도와 위치를 승차감과 함께 동시에 확인하도록 설계되었다.

3.1.2. 샘플링 주파수와 분해능(resolution)의 결정

승차감 측정시스템에 사용된 샘플링 주파수와 분해능은 FFT보드와 이를 설정하는 FFT보드 드라이버에 의해 결정된다. FFT를 수행할 때 샘플링 시간의 잘못된 선정으로 인한 신호왜곡(aliasing)이라는 오차가 발생할 수 있는데, 이는 잘못된 A/D 변환에 의해 원래의 아날로그(analog) 신호가 변형되어 디지털 신호로 바뀌는 현상이다. 본 승차감 측정시스템에 적용한 3개의 승차감 평가방법으로 평가하기 위해 필요한 가장 높은 주파수가 80 Hz이므로 신호왜곡을 피하기 위해서는 최소 2번 이상의 측정 신호샘플링이 필요하지만, 분해능을 좋게 하기 위해서 측정 신호를 5번 샘플링하도록 샘플링 주파수를 400 Hz로 선정하였다. 또한, FFT를 위해 필요한 샘플링 개수를 1024개로 선정하였으며, 이에 따라 샘플링 주파수에 대한 샘플링 개수의 비로 나타내어지는 분해능은 약 0.39 Hz, 즉 샘플링 시간이 0.025 sec가 된다. 따라서, 1024개의 데이터에 대해 FFT를 1번 실행하는 데 필요한 시간은 2.56 sec가 되며, 앞에서 설명한 바와 같이 승차감 평가에 필요한 기본 1블럭(5 sec)은 실제로 1024개의 데이터를 2번 FFT한 5.12 sec에 해당하게 된다.

3.2. 소프트웨어의 구성

소프트웨어는 비주얼(Visual) C++로 작성되었으며, 프로그램 환경은 LMS DIFA에서 제공된 FFT보드 드라이버가 윈도우 95 환경에서만 작동되기 때문에 기본 프로그램 환경은 윈도우 95로 밖에 할 수 없었다.

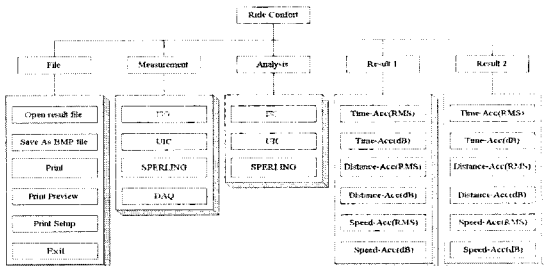


그림 4. 승차감 측정시스템 메뉴 구성도
Fig. 4. Configuration of menu for ride comfort measuring system.

승차감 측정시스템의 프로그램은 그림 4에서 보는 바와 같이 5개의 기본메뉴(File, Measure, Analysis, Result1, Result2)로 구성되어 있다.

File 메뉴는 Result1/Result2에서 사용할 측정이나 분석된 결과를 불러오거나 Result1/Result2에서 측정이나 분석된 결과 그래프를 그림 파일이나 다른 텍스트 파일로 생성시키고, 프린터를 통해 출력하는 기능을 갖는다.

Measure 메뉴는 앞에서 설명한 3개의 승차감 평가방법에 따라 실제 승차감의 시험 및 평가를 하는 기능으로 평가방법에 대한 선택과 그에 따른 필요한 정보의 입력, 시험 및 분석을 행하게 된다. 필요한 정보로는 저장파일의 이름, 사용 가속도 센서의 수량, 센서의 민감도 정보, GPS나 속도센서를 선택여부 및 실효값 계산시간 등이다. Measure 메뉴에서 시험이 종료되면 그림 5에서 보는 바와 같이 확장자에 따라 서로 다른 정보를 갖는 6종류의 파일이 생성된다.

Analysis 메뉴는 Measure 메뉴에서 실제로 측정되어 저장되어 있는 4종류(*.set, *.thm, *.gps, *.fft)의 파일로부터 원하는 다른 승차감 평가방법으로 분석할 수 있도록 되어 있다. 그림 6은 실제로 측정 및 분석이 실행

이름	크기	종류	수행한 날짜
FFT data	1 082KB	FFTFfile	2003-09-25 오전 7:54
	1 082KB	FFTFfile	2003-09-25 오전 7:59
GPS data	0KB	GPS 파일	2003-09-25 오전 7:48
	1KB	OUT 파일	2003-09-25 오전 8:36
Final result	1KB	OUT 파일	2003-10-07 오후 9:21
	1KB	OUT 파일	2003-10-07 오후 8:32
	34KB	RES 파일	2003-09-25 오전 8:38
rms data (5.12 sec)	75KB	RES 파일	2003-10-07 오후 9:21
	75KB	RES 파일	2003-10-07 오후 8:32
Set data	1KB	SET 파일	2003-09-25 오전 7:48
	7 411KB	THM 파일	2003-09-25 오전 7:54
Time data	7 522KB	THM 파일	2003-09-25 오전 7:59

그림 5. 저장된 파일의 정보
Fig. 5. Information for saved files.

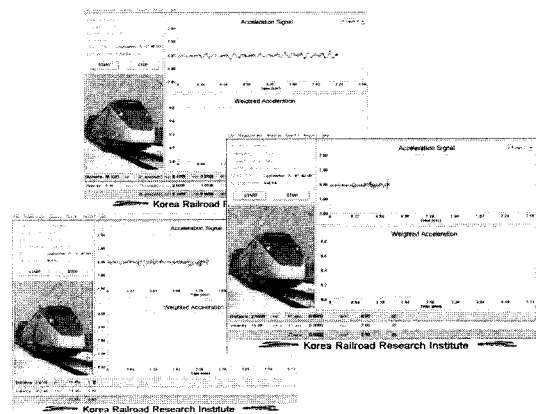


그림 6. 평가방법에 따른 측정과 분석화면
Fig. 6. Measure or analysis display according to test method.

하고 있는 상태로 Measure 메뉴와 Analysis 메뉴의 두 경우 모든 동일한 형태의 화면으로 결과가 나타난다.

Result1/Result2는 승차감의 시험 및 분석이 끝난 후 평가결과를 그래프로 생성하는 기능으로 시간, 거리 및 속도에 대한 5.12 sec 간격의 가속도 실효값을 그래프로 만들 수 있다. 이들 그래프로부터 철도차량의 주행속도와 위치에 대한 승차감 정보를 쉽게 파악할 수 있다.

4. 승차감 측정시스템의 검증

승차감 측정시스템은 앞에서 설명한 바와 같이 하드웨어와 소프트웨어가 합쳐져 작동해야하기 때문에 이들 중 하나라도 잘못되면, 측정된 철도차량의 승차감 결과는 쓸모가 없게 되므로 설계된 승차감 측정시스템에 대한 검증이 필요하다. 이를 위하여 다음과 같은 3가지 방법으로 개발된 승차감 측정시스템의 하드웨어와 소프트웨어에 대해 검증하였다.

4.1. 검증 1: 정현파 입력신호에 대한 실효값의 분석을 통한 검증

최대 진폭 A를 갖는 정현파 신호에 대한 실효값은 $0.707 \times A$ 가 되므로 이로부터 승차감 시스템의 하드웨어가 올바르게 작동하고 있는지를 판단할 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 FFT보드에서 내장된 DSP(digital signal processor)를 통해 FFT가 이루어지며, 이를 이용하여 가속도의 실효값이 계산되기 때문에 실효값의 분석으로 앰프 및 A/D 변환기 등의 하드웨어의 작동상태의 확인이 가능하다.

실제로 진폭이 2(A=2)인 정현파 신호의 주파수를 2, 4, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 및 80 Hz로 변경하면서 입력 신호에 대한 각각의 실효값을 계산하였다. 그

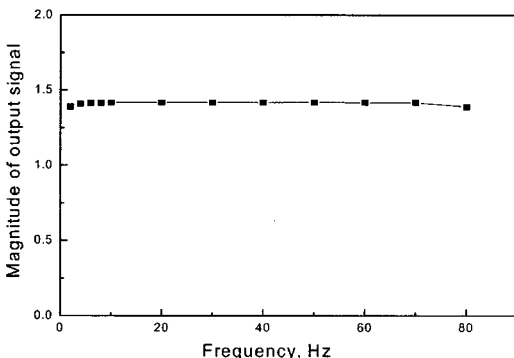


그림 7. 정현파 입력 신호에 대한 실효값
Fig. 7. r.m.s. value for sinusoidal input signal.

림 7은 각 입력 신호에 대해 개발 승차감 측정시스템을 통해 실효값 결과를 나타낸 것으로 각 입력 신호에 대해 실효값은 1.389~1.419로 거의 일정하며 진폭이 2인 정현파 신호의 실효값 1.414와 거의 일치한다. 이것으로부터 승차감 측정시스템의 하드웨어, 즉 가속도 센서에 20 V, 2.4 mA전원을 공급하는 앰프, A/D 변환기, 저주파 밴드패스 필터 및 FFT가 정상적으로 작동되고 있음을 알 수 있다.

4.2. 검증 2: 정현파의 입력신호에 대한 주파수 보정곡선의 비교를 통한 검증

주파수가 다른 정현파의 입력신호에 대해 승차감 측정시스템에서 승차감 평가방법에 따라 계산된 5.12 sec 동안의 실효값과 W_z 를 통해 계산된 주파수 보정곡선 w_i 를 식(5)과 식(6)에서 구할 수 있다.

□ 실효값을 이용하는 경우

$$w_i = \frac{\sqrt{2}a_{r.m.s.}}{A} \quad (i = 2, 4, 6, 8, 10, \dots, 80) \quad (5)$$

□ W_z 를 이용하는 경우

$$w_i = \frac{\sqrt{2 \times W_z^{6.67}}}{100 \times A} \quad (i = 2, 4, 6, 8, 10, \dots, 80) \quad (6)$$

그림 8은 검증 1에서 사용한 동일 정현파 입력 신호에 대해 승차감 측정시스템을 통해 계산된 5.12 sec 동안의 주파수 보정곡선과 실제로 사용중인 주파수 보정곡선을 함께 나타낸 한 예로 심볼(○, □)은 검증을 위해 계산된 주파수 보정곡선이며, 실선과 점선은 각 평가방법에서 제시한 주파수 보정곡선이다. 검증을 위해 계산된 주파수 곡선이 ISO 규격에서 제시한 주파수 보정곡

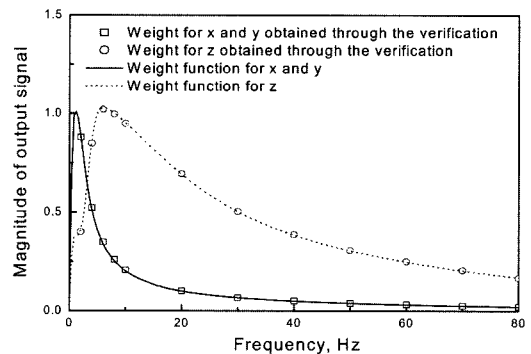


그림 8. ISO에 대한 주파수 보정곡선의 비교
Fig. 8. Comparisons of frequency weighting curve for ISO.

표 3. 가속도 실효값의 최종결과 비교

Table 3. Comparisons of final results according to r.m.s method

	Time	X1-rms	Y1-rms	Z1-rms
Measurement	307.2	0.0288	0.0347	0.0634
	614.4	0.0310	0.0287	0.0670
	921.6	0.0348	0.0395	0.1398
	1228.8	0.0361	0.0250	0.0825
	1536.0	0.0303	0.0201	0.0615
	1843.2	0.0279	0.0450	0.1308
Calculation	307.2	0.0288	0.0347	0.0634
	614.4	0.0310	0.0287	0.0670
	921.6	0.0348	0.0395	0.1398
	1228.8	0.0361	0.0250	0.0825
	1536.0	0.0303	0.0201	0.0615
	1843.2	0.0279	0.0450	0.1308

선과 잘 일치함(그림에는 생략하였으나 UIC 규격과 Wz의 경우도 잘 일치)을 알 수 있으며, 이것은 승차감 측정시스템에서 5.12 sec 동안의 실효값과 Wz를 계산하는 알고리즘이 문제가 없음을 입증해 주는 것이다.

4.3. 검증 3: 최종적인 실효치 및 승차감 지수의 비교를 통한 검증

실제로 주행중인 철도차량에서 개발 승차감 측정시스템으로 승차감을 측정하면 그림 5와 같은 파일이 생성되며, *.res 파일은 5.12 sec 간격의 가속도 실효값이나 Wz가 저장된 파일로 이미 검증 2를 통해 검증된 것으로 이 값들을 이용하여 원하는 구간에 대한 가속도 실효값과 Wz 및 통계적 방법의 승차감 지수를 계산(이하, 계산값으로 표기)한 후에 이 계산결과와 실제 승차감 시험을 통해 얻어진 그림 5에서 *.res.out 파일의 최종 결과(이하, 측정값으로 표시)를 비교 분석하고 두 경우의 결과가 일치한다면 원하는 구간에 대한 승차감 평가방법의 최종결과를 계산하는 알고리즘의 문제가 없는 것으로 판단할 수 있다. 표 3은 두 결과를 비교한 예(가속도 실효값 이용)로 x, y 및 z 방향에 무관하게 계산치와 측정치가 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 이로부터 원하는 구간에 대한 승차감 지수의 최종결과를 얻는 알고리즘이 문제가 없는 것으로 판단된다.

5. 승차감 측정시험 실제 적용사례

앞의 검증과정을 통해 입증된 승차감 측정시스템을 그림 9와 같이 실제 철도차량에 장착하여 기존선로를

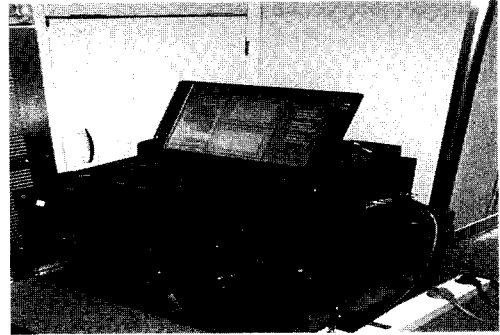


그림 9. 승차감 측정시스템이 이용한 시험전경
Fig. 9. Experimental set-up of measuring system ride comfort test.

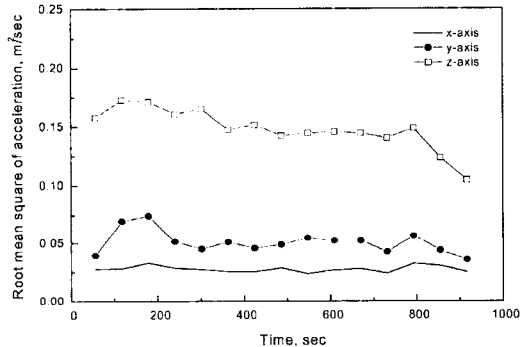


그림 10. 평균주행속도 285.6 km/h에서의 경부 고속철도에 대한 가속도 실효값(61.44 sec)
Fig. 10. r.m.s. acceleration (61.44 sec) at 285.6 km/h in high speed line (KTX).

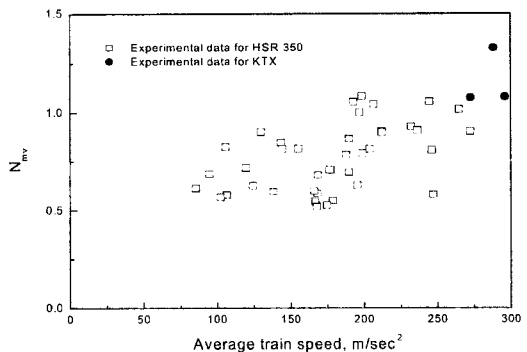


그림 11. 통계적 방법에 따른 승차감 지수
Fig. 11. Ride indices according to statistical method.

운행하는 새마을열차와 기존선로 및 고속선로를 운행하는 경부고속철도(KTX)와 한국형 고속철도(HSR350x)에 대한 많은 승차감 측정을 수행하였다. 그림 10과 11은 고속철도에 대해 승차감 평가를 행한 결과의 일

부를 나타낸 것으로^[10,11] 그림 10은 가속도 실효값으로 철도의 승차감을 평가한 경우로 경부고속철도가 고속선을 평균속도 285.6 km/h로 주행하는 경우에 약 60 sec 간격으로 측정된 가속도 실효값이다. 그림 11은 통계적인 방법으로 경부고속철도와 한국형 고속철도 승차감을 측정된 결과로 심볼(●)은 경부고속철도의 승차감 측정결과이며, 심볼(□)은 한국형 고속철도의 승차감 측정결과이다. 그림 10과 11에서 살펴 본 실제 측정결과로부터 경부고속철도와 한국형 고속철도는 고속선로를 운행할 때에 승차감을 평가하면 승객이 매우 안락하게 느낄 것으로 판단된다.

6. 결 론

철도교통에 대한 승객의 다양한 요구가 있으며, 이들 중에서도 여객수송의 품질 향상에 대한 요구는 날이 증가하고 있고, 이를 달성하기 위해 승차감의 향상이 절실하다. 승차감의 향상과 더불어 승차감에 대한 정확한 평가가 필요하며, 이러한 승차감의 평가는 시간이 흐름에 따라 점차적으로 변화하는 추세이다. 그러나, 기존에 사용되고 있는 상용화된 승차감 측정장치로는 이러한 추세를 따를 수 없으므로 각종 승차감 평가방법으로 철도차량의 승차감을 측정 및 평가할 수 효율성을 갖는 승차감 측정시스템의 개발이 필요하다. 그러나, 아무리 효율성을 갖는 승차감 측정시스템을 잘 설계하였더라도 그에 대한 성능 측, 하드웨어와 소프트웨어의 성능이 검증이 되지 않으면, 실제 운행중인 철도에 적용할 수가 없다. 본 연구에서는 새롭게 설계된 승차감 시스템에 대해 다양한 방법의 검증을 통해 유용한 시스템임을 입증하였고, 이를 토대로 실제 철도의 승차감 측정 및 평가에 적용하였기 때문에 국내에서도 이 승차감 측정시스템을 사용하여 철도의 승차감을 다양한 평가방법으로 효율적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 내용은 건설교통부에서 시행한 고속철도기술개발사업 및 철도청에서 시행한 철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

참고 문헌

- [1] 김영국 등, “철도용 승차감 측정시스템 개발”, *추계 학술대회 논문집*, 한국소음진동공학회, 1999.
- [2] 김영국 등, “철도 승차감 평가방법의 상호관계 분석”, *소음진동공학회논문집*, 제12권, 제3호, 한국소음진동공학회, 2002.
- [3] Suzuki, H., “Research trends on riding comfort evaluation in japan”, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 212, Part F, 1998.
- [4] ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, 1997.
- [5] Garg, V. K., *et al.*, “Dynamics of railway vehicle systems”, Academic Press, 1984.
- [6] European Rail Research Institute, “Application of ISO standard to railway vehicles”, B153/RP21, 1993.
- [7] International Union of Railways, “Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles”, UIC Code 513R, 1994.
- [9] 철도차량 승차감 측정방법, 철도기술연구보 vol. 23, no. 1, 1989.
- [10] 김영국 등, “시운전 시험을 통한 한국형고속전철 차체진동 특성의 분석 및 평가”, *한국철도학회논문집*, 제6권, 제4호, 한국철도학회, 2003.
- [11] 김영국 등, “시운전 시험을 통한 한국형 고속전철 차체진동 특성의 분석 및 평가”, *한국철도학회논문집*, 제6권, 제4호, 한국철도학회, 2003.
- [12] 김영국 등, “국내 고속철도 차량의 승차감에 대한 고찰”, *추계학술대회 논문집*, 한국소음진동공학회, 2003.

김 영 국

- 『센서학회지 제13권 제3호 p.251』 사진 참조
- 1984년 2월 아주대학교 기계공학과 졸업(학사)
- 1986년 8월 한국과학기술원 생산공학과 졸업(공학석사)
- 2003년 8월 아주대학교 기계공학과 졸업(공학박사)
- 현 한국철도기술연구원 책임연구원

김 석 원

- 『센서학회지 제13권 제3호 p.251』 사진 참조
- 1987년 2월 서울대학교 조선공학과 졸업(학사)
- 1989년 2월 동 대학원 조선공학과 졸업(공학석사)
- 현 한국철도기술연구원 책임연구원



박 찬 경

- 1987년 2월 한양대학교 기계설계학과 졸업(학사)
- 1989년 2월 동 대학원 기계설계학과 졸업(공학석사)
- 2004년 2월 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사)
- 현 한국철도기술연구원 선임연구원
- 주관심분야 : 철도차량 동역학, 철도차량 시험 평가, 각종 센서 및 인터페이스



김 기 환

- 1984년 2월 단국대학교 기계공학과 졸업(학사)
- 1991년 2월 RWTH Aachen 일반기계공학과 졸업(공학석사)
- 1996년 2월 동 대학원 수송기계과 졸업(공학박사)
- 현 한국철도기술연구원 수석연구원
- 주관심분야 : 철도차량 동역학, 철도차량 시험평가

박 태 원

- 『센서학회지 제13권 제3호 p. 251』 사진 참조
- 1977년 2월 서울대학교 기계설계학과 졸업(학사)
- 1982년 2월 University of Iowa 기계공학과 졸업(공학석사)
- 1985년 2월 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사)
- 현 아주대학교 기계 및 산업공학부 교수