

UIC 및 ISO 규정에 따른 철도 차량용 승차감 측정시스템 개발

Development of ride comfort measuring system for railway vehicles by UIC and ISO standards

김영국*

김석원*

박찬경*

목진용*

최강윤*

Kim, Young-guk Kim, Seog-won Park, Chan-kyoung Mok, Jin-yong Choe, Kang-yoon

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. So users must review whether they can apply it to their system or not. In general, the evaluation methods defined in the standards - ISO 2631, UIC 513 R, and Ride Index suggested by Sperling - have been used in the railroad. The ride comfort measuring system according to the previous mentioned evaluation methods "ride comfort" has developed, verified and utilized in the railways.

1. 서 론

철도가 다른 교통수단과의 경쟁에서 이기기 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 감정적으로 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 있다. 철도분야의 승차감 평가는 ISO, UIC, CEN 등의 규격에 규정되어 있으며, 이들은 통계적인 방법과 실험값으로 철도차량의 승차감을 평가하고 있다. 또한, 이들 규격 이외에 유럽에서 오랜 기간 동안 사용해온 Sperling이 제안한 "승차감 지수"가 철도차량의 승차감 평가에 사용되어 왔다. 이들은 서로 다른 평가방법에 따른 다른 평가 기준을 사용하기 때문에 승차감의 평가주체에 따라 다른 평가방법과 기준을 사용할 수 밖에 없으나, 차후에는 철도차량의 승차감은 평가방법과 평가기준이 명확히 제시된 UIC 규격이 철도차량의 승차감 평가에 많이 사용될 것으로 예상된다. 그러나, 일반적으로 철도차량의 승차감은 상용화된 승차감 측정장비를 사용하며, 이들 대부분은 Table 1에서 보는 바와 가속도의 실험값을 이용하거나 Sperling의 W_z 으로 승차감을 평가하기 때문에 UIC 규격에 따른 통계적인 평가방법을 적용하는 데 큰 어려움이 있다. 본 논문에서는 한국철도기술연구원에서 UIC 규격 및 ISO 규격의 승차감 평가가 가능하도록 개발한 철도차량 승차감 측정시스템을 소개하고자 한다. 또한, 본 승차감 측정시스템은 Sperling이 제안한 평가방법에 따라서도 승차감 평가가 가능하도록 설계되어 있다.

* 한국철도기술연구원 고속전철기술개발사업단

Table 1 Commercial ride comfort measuring system for railway

제품명 상세시방	A	B	C	D	E	F
평가방법	Wz	ISO/ Wz	ISO(승차감 레벨)	ISO	ISO	DIN
계산방법	Analog	Analog	Digital	Analog	Analog	Digital
측정범위	0.5-20Hz	DC-200Hz	0-36Hz	0-천Hz	1-천Hz	0.2-4천Hz
측정 channel수	2	2	3	3	3	4
비 고	승차감 측정 전용	승차감 측정 전용	승차감 측정 전용	승차감/소음 겸용	승차감/소음 겸용	승차감/소음 겸용

2. 철도차량의 승차감 평가방법

차체 중앙바닥 및 대차 중앙의 차체바닥에 설치된 3축 가속도센서로 직접 측정되거나 테이프 레코더에 저장된 진동가속도 신호를 저주파 밴드필터를 통과시켜 샘플링 동안에 발생할 수 있는 신호외곡에 따른 오차를 제거시킨 후에 디지털 신호로 변환시킨다. 디지털 신호로 변환된 1개 블럭(5초 동안 측정 데이터)의 신호에 대해 푸리에변환을 사용하여 주파수영역으로 변환시킨 후에 해당 평가법이 사용하는 주파수 범위(ISO 평가법: 0.5~80Hz, Wz 평가법: 0.5~30Hz, UIC 평가법: 0.4~80Hz)에서 각 주파수에 대한 진동가속도의 파워를 구한다. 동일한 방법으로 연속적인 60개 블럭에 대해 반복적으로 각 주파수에 대한 진동가속도의 파워를 계산한다. 계산된 60개 블럭의 진동파워를 해당 평가법에 따른 Fig. 1의 주파수 보정곡선에 따른 주파수 보정을 행한 후에 각 평가법에 따른 평가지수를 구하게 된다.

□ 실효값을 이용한 평가방법: ISO 규격

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

여기서, G_i : 진동가속도 파워, B_i : 주파수 보정 함수

$$dB = 20 \log_{10}(A_{wrms} / A_{ref})$$

□ 통계적인 평가방법: UIC, ISO, CEN 규격

$$N_{MV} = 6\sqrt{(A_{w0.95})^2 + (A_{w0.95})^2 + (A_{w0.95})^2},$$

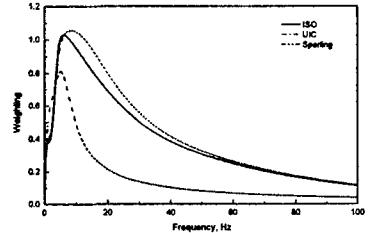
$$N_{MVx} = 6 A_{w0.95}, N_{MVy} = 6 A_{w0.95}, N_{MVz} = 6 A_{w0.95}$$

여기서, 95는 60개 블럭의 실효값 중에서 누적빈도가

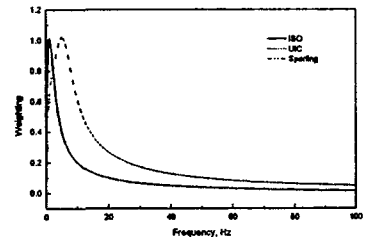
95%인 실효값을 의미

□ Wz 평가방법: Sperling 제안

$$Wz_i = 6.67 \sqrt{\int_{0.5}^{30} 2G_i(f) B_i^2(f) df} \quad (i=x, y, z)$$



(a) For vertical direction



(b) For vertical direction

Fig. 1 Frequency weight curve

3. 승차감 측정시스템

본 승차감 측정시스템은 1개의 측정시스템으로 철도차량의 승차감을 가속도 실효값과 통계적인 평가방법인 평가지수로 평가할 수 있도록 설계되었다. 또한, 이들 방법과 다른 방법인 Sperling의 승차감 지수로도 철도차량의 승차감 평가가 가능하도록 하였다. 즉, 동일한 승차감 측정시스템으로 승차감 평가방법을 적용하여 철도차량의 승차감 평가를 수행할 수 있도록 구성되어 있다.

3.1 승차감 측정시스템의 구성

(1) 하드웨어

하드웨어의 구성은 Fig. 2와 같으며, 도킹스테이션(Docking station)이 장착된 노트북컴퓨터, FFT 보드, 가속도 센서 및 GPS(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 승차감 측정기는 승차감만을 평가할 뿐 철도차량의 주행속도 및 위치 등의 정보를 승차감 측정기로는 직접 파악할 수가 없기 때문에 별도로 설치된 속도센서에 의해 철도차량의 주행속도를 측정하며, 철도차량의 위치는 철도선로 주변에 설치되어 있는 마일 포스트(Mile post)를 목측으로 측정하여 사용하기 때문에 정확한 이동거리의 측정이 어려울 뿐만 아니라 비효율적이다. 본 승차감 측정시스템에서는 이러한 비효율성을 배제하고 정확한 승차감의 평가를 할 수 있도록 GPS나 속도센서를 설치하여 승차감 측정시스템에서 직접 철도차량의 주행속도 및 위치를 승차감과 함께 동시에 확인할 수 있도록 설계되었다. 가속도 측정을 위한 FFT 보드는 LMS DIFA의 제품으로 하드웨어적인 필터링 및 FFT, 앰프(Amplifier) 및 A/D 기능 등의 뛰어난 성능을 갖는 다목적 보드이며, 가속도계는 3차원 시트형이 사용되었다. 철도차량의 주행속도는 GPS에서 제공받거나 속도센서에서 측정된 펄스를 이용한 속도데이터를 이용하였고, 철도차량의 위치는 GPS에서 제공된 경도와 위도 데이터를 이용하거나 속도센서에서의 속도데이터를 적분하여 사용하였다.

노트북컴퓨터는 2개의 ISA 슬롯을 내장하고 있고, FFT 보드는 ISA 슬롯을 통해 컴퓨터와 연결된다. GPS는 컴퓨터와 RS232C 포트로 연결되며, GPS의 데이터를 컴퓨터로 전송하게 된다. GPS와 컴퓨터의 통신은 양방향 통신으로 정확한 데이터의 전송이 이루어지게 된다. 3축 가속도계와 별도의 속도센서는 ICP형으로 I/O BNC 연결박스를 통해 FFT 보드와 연결되며, 가속도계는 FFT보드로부터 20V 2.4mA의 전원을 공급받아 작동된다.

(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(Aliasiling)이라는 오차가 발생할 수 있는데, 이는 잘못된 A/D 변환에 의해 원래의 아날로그(Analog) 신호가 변형되어 디지털 신호로 바뀌는 현상이다. 즉, 샘플링 주기가 너무 긴 경우에는 아날로그 신호의 고주파 성분을 제대로 샘플링하지 못해 고주파 신호가 저주파 신호로 변형되게 된다. 이러한 에일리어싱 오차를 줄이기 위해서는 샘플링 주기를 가장 높은 주파수의 신호를 최소 2번 이상 샘플링을 할 수 있도록 해야 한다. 1주기동안 가장 높은 주파수의 신호를 가능하면 많이 샘플링하면 할수록 아날

로그 신호와 거의 동일한 디지털 신호를 얻을 수 있어 정확한 결과를 얻을 수 있지만, 그에 수반되는 비용문제도 고려되어야 한다. 사용된 3개의 승차감 평가방법의 가장 높은 주파수가 80Hz이므로 이 주파수의 신호를 최소 2번 샘플링하기 위한 최소 샘플링 주파수는 160Hz가 된다. 따라서, 샘플링 주파수를 1주기동안 가장 높은 주파수의 신호를 최소 5번 샘플링할 수 있도록 하기 위해 400Hz로 선정하였으며, Bandwidth는 샘플링 주파수의 1/2인 200Hz가 된다.

또한, 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, FFT를 1번(1024개의 데이터) 실행하는 데 필요한 시간은 2.56 sec가 되며, 앞에서 설명한 승차감 평가에 기본 1블럭(5초)은 실제로 1024개의 데이터를 2번 FFT한 5.12 sec에 해당한다.

(3) 소프트웨어

소프트웨어는 비주얼(Visual) C++로 작성되었으며, 프로그램 환경은 FFT보드 드라이버가 윈도우 95 환경에서만 작동되기 때문에 기본 프로그램 환경은 윈도우 95로 할 수밖에 없었다.

Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 승차감 측정시스템 프로그램의 기본메뉴는 File, Measure, Analysis 및 Result1/Result2로 구성되어 있다. File 메뉴는 Result1과 Result2에서 사용한 측정이나 분석된 결과를 입력하거나 Result1과 Result2에서 작성된 그래프를 그림 파일이나 다른 텍스트 파일을 생성시키고, 프린터를 통해 출력하는 기능을 갖는다. Measure 메뉴는 앞에서 설명한 3개의 승차감 평가방법에 따라 실제 승차감의 시험 및 평가를 하는 기능으로 평가방법의 설정 및 그에 따른 및 필요한 정보를 Fig. 4와 같이 입력하게되며, 시험이 종료되면 Fig. 5에서 보는 바와 같이 6종류의 파일이 생성된다. xxx.set 파일은 Measure 메뉴에서 입력된 모든 정보들을, xxx.thm과 xxx.fft는 시간과 주파수에 대한 측정된 가속도 정보를, xxx.gps 는 GPS의 데이터 정보를, aaa.res는 5.12 sec 간격의 가속도 실효값을, aaa.res.out는 최종적인 출력값, 즉 필요구간의 가속도 실효값이나 승차감 지수 등을 저장한다. 앞에서 언급한 철도차량의 주행속도와 위치를 얻기 위한 GPS나 속도센서를 선택 여부도 Measure 메뉴에서 입력한다. Analysis menu는 Measure 메뉴에서 실제 측정되어 저장된 4종류의 파일(*.set, *.thm, *.gps, *.fft)로부터 원하는 다른 승차감 평가방법으로 분석이 가능하도록 한다. Fig. 5의 저장 파일로부터 알 수 있는 바와 같이 수정한 날짜가 다른 4개 파일은 Analysis menu를 실행시킨 후에 생성된 승차감 평가결과를 나타내는 파일들이다. Fig. 6은 실제 Measure menu와 Analysis menu를 실행하고 있는 상태로 두 경우가 동일한 화면으로 나타난다. Result1/Result2는 승차감의 시험 및 분석이 끝난 후 평가결과를 그래프로 생성하는 기능으로 Fig. 7에서 보는 바와 같이 시간, 거리 및 속도에 대한 5.12 sec 간격의 가속도 실효값을 그래프로 만들 수 있다. 이 결과부터 철도차량의 주행속도와 위치에 대한 승차감 정보를 쉽게 확인할 수 있다.

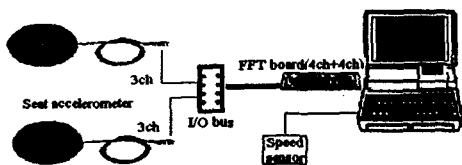


Fig. 1 Schematic diagram of ride comfort measuring system



Fig. 2 Software of ride comfort measuring system

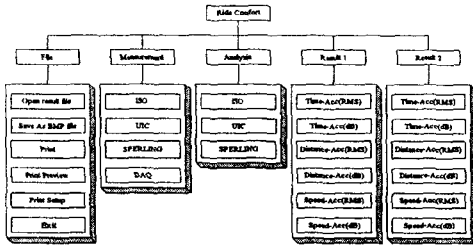


Fig. 3 Configuration of menu of ride comfort measuring system

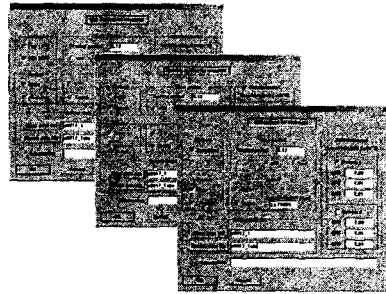


Fig. 4 Information data Input according to test method

FFT data	k0925_30.ft	1,082KB	FFTfile	2003-09-25 오전 7:54
	k0925_31.ft	1,082KB	FFTfile	2003-09-25 오전 7:59
GPS data	k0925_3.gps	0KB	GPS 파일	2003-09-25 오전 7:48
	k0925_3.so.res.out	1KB	OUT 파일	2003-09-25 오전 8:38
Final result	k0925_3.pe.res.out	1KB	OUT 파일	2003-10-07 오전 9:21
	k0925_3.ic.res.out	1KB	OUT 파일	2003-10-07 오전 8:32
rms data (5.12 sec)	k0925_3.so.res	34KB	RES 파일	2003-09-25 오전 8:38
	k0925_3.pe.res	35KB	RES 파일	2003-10-07 오전 9:21
Set data	k0925_3.ic.res	35KB	RES 파일	2003-10-07 오전 8:32
	k0925_3.set	1KB	SET 파일	2003-09-25 오전 7:48
Time data	k0925_30.thm	7,411KB	THM 파일	2003-09-25 오전 7:54
	k0925_31.thm	7,522KB	THM 파일	2003-09-25 오전 7:59

Fig. 5 Information for saved files

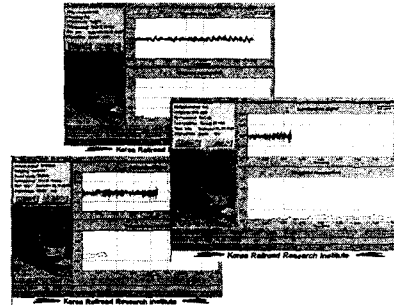


Fig. 6 Measure or Analysis display according to test method

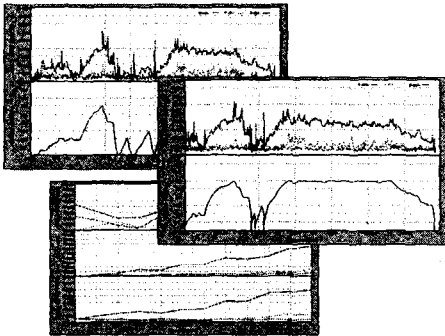


Fig. 7 Result1/Result2 display according to test method

3.2 승차감 측정시스템의 검증

승차감 측정시스템은 하드웨어(Hardware)와 소프트웨어(Software)로 구분되어 있기 때문에 이 둘 중 하나라도 잘못되면, 측정된 철도차량의 승차감 결과는 쓸모가 없게 되므로 승차감 측정시스템에 대한 검증이 필요하다. 승차감 측정시스템에 대해 아래의 3경우로 순차적으로 진행하면서 하드웨어와 소프트웨어를 검증하였다. 검증을 통해 성능이 입증된 승차감 측정시스템을 실제적으로 기존철도 및 고속철도에 적용하여 철도차량의 승차감 평가에 사용하고 있다.

정현파의 입력신호에 대한 실효값의 분석

정현파의 입력신호에 대한 주파수 보정곡선의 비교를 통한 검증

최종적인 실효치 및 승차감 지수의 비교를 통한 검증

(1) 정현파의 입력신호에 대한 실효값의 분석을 통한 검증

식(1)과 같은 정현파 신호에 대한 실효값은 $0.707 \times A$ 가 된다는 사실은 공학을 하는 엔지니어들은 누구나 알고 있는 사실이며, 이것으로부터 승차감 시스템의 하드웨어가 올바르게 작동하고 있는지를 판단할 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 FFT보드에서 내장된 DSP(Digital signal processor)에서 FFT가 이루어지기 때문에 실효값의 분석을 통해 앰프 및 A/D 등의 하드웨어의 작동상태의 확인이 가능하다.

$$y = A \times \sin(\omega \times t) \quad \text{----- (1)}$$

실제로 Fig. 8 및 Fig. 9에서 보는 바와 같이 크기가 $2(A=2)$ 인 정현파 신호의 주파수를 2, 4, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 및 80 Hz로 변경한 입력 신호에 대해 각각의 실효값을 계산하였으며, Fig. 10은 그 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10에서 볼 수 있는 바와 같이 모든 입력 신호에 대하여 실효값이 1.414로 일정함을 알 수 있으며, 이것으로부터 승차감 측정시스템의 하드웨어는 정상적으로 작동됨을 알 수 있다.

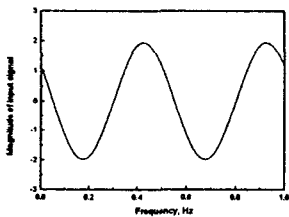


Fig. 8 Sinusoidal input signal with 2 Hz frequency

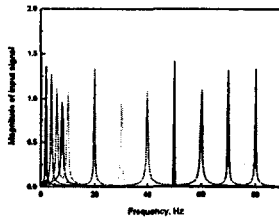


Fig. 9 FFT result for Sinusoidal input signal from 2 Hz to 80 Hz

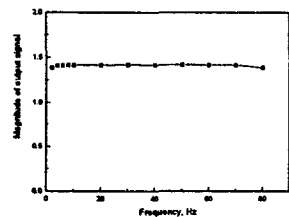


Fig. 10 r.m.s. for sinusoidal input signal from 2 Hz to 80 Hz

(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 얻어진 주파수 보정곡선은 식(2)과 식(3)에서 구할 수 있고, 이 주파수 보정곡선과 Fig. 1의 주파수 보정곡선이 일치하면 소프트웨어상의 5.12 sec 동안의 실효값과 W_z 를 계산하는 알고리즘은 문제는 없는 것으로 판단할 수 있다.

실효값을 이용하는 경우

$$w_i = \frac{\sqrt{2} a_{r.m.s.}}{A} \quad (i=2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 \text{ Hz}) \quad \text{----- (2)}$$

W_z 를 이용하는 경우

$$w_i = \frac{\sqrt{2 \times W_z^{6.67}}}{100 \times A} \quad (i=2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 \text{ Hz}) \quad \text{----- (3)}$$

Fig. 11은 검증 (1)의 경우와 동일한 정현파 입력신호에 대해 승차감 측정시스템을 통해 5.12 sec 동안 계산된 주파수 보정곡선과 Fig. 1과 같은 실제의 주파수 보정곡선을 함께 나타낸 것으로 3개의 승차감 평가방법 모두 주파수 보정곡선이 잘 일치하므로 승차감 측정시스템의 소프트웨어 중에서 5.12 sec 동안의 실효값과 W_z 를 계산하는 알고리즘이 문제가 없음을 입증해준다.

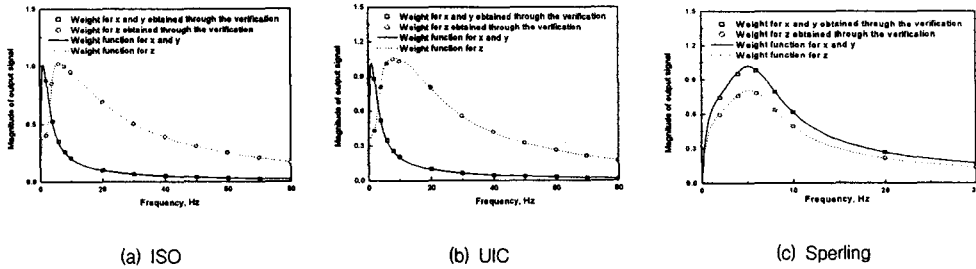


Fig. 11 Comparisons of frequency weighting curve

(3) 최종적인 실효치 및 승차감 지수의 비교를 통한 검증

실제적으로 철도차량이 주행중에 승차감 측정시스템으로 승차감을 측정하면 Fig. 5와 같은 파일이 생성된다. 앞에서 설명한 바와 같이 aaa.res 파일은 5.12 sec 간격의 가속도 실효값이나 W_z 가 저장된 파일로 이미 검증 (2)를 통해 검증된 것이며, 이 값들을 이용하여 원하는 구간의 실효값과 W_z 및 통계적 방법의 승차감 지수를 계산(이하, 계산값으로 표기)한 후에 이 결과와 aaa.res.out 파일의 최종 결과(이하, 측정값으로 표기)가 일치하면 원하는 구간에 대한 승차감 평가방법의 최종결과를 계산하는 알고리즘의 문제가 없는 것으로 판단할 수 있다. Table 2는 두 결과를 비교한 것으로 모든 평가방법에 대해 x, y 및 z 방향에 무관하게 계산치와 측정치가 잘 일치하므로 원하는 구간에 대한 승차감 지수의 최종결과를 얻는 알고리즘이 문제가 없는 것으로 판단된다.

(4) 실제 승차감 측정 시험

앞의 검증과정을 거쳐 입증된 승차감 측정시스템을 Fig. 12와 같이 실제 철도차량에 장착하여 기존선(경부선, 호남선)과 고속선에서 이미 많은 승차감 측정을 행하였으며, Fig. 7는 그 한 예로 경부 고속철도 차량이 서울에서 대전까지 고속선로로 주행했을 때의 승차감 측정결과를 보여준 것이다.

Table 6 Comparisons of final results of ride comfort indices

Method	Time	Measurement			Calculation		
		Xrms	Yrms	Zrms	Xrms	Yrms	Zrms
r.m.s. method	307.2	0.0288	0.0347	0.0634	0.0288	0.0347	0.0634
	614.4	0.0310	0.0287	0.0670	0.0310	0.0287	0.0670
Statistical method	307.2	0.2403	0.3644	0.6870	0.2406	0.3642	0.6870
	614.4	0.2306	0.2699	0.6719	0.2304	0.2700	0.6720
Sperling method	307.2	1.3058	1.4185	1.5322	1.3058	1.4185	1.5322
	614.4	1.3243	1.4287	1.5829	1.3243	1.4287	1.5829



Fig. 14 Experimental set-up of measuring system for ride comfort

4. 결론

철도교통이 다른 교통수단에 대해 경쟁력을 더욱 강화를 위해 여객수송의 품질 향상에 대한 요구는 증가하고 있고, 이를 달성하기 위한 승차감의 향상이 절실한 실정이다. 승차감을 향상시키기 위해 철도차량에 대한 정확한 승차감의 측정 및 평가를 행하여야 하지만 승차감의 평가방법이 시간이 흐름에 따라 점차적으로 변화하는 추세이다. 그러나, 기존에 사용되고 있는 상용화된 승차감 측정장치는 이러한 추세를 따를 수 없는 실정이므로 각종 승차감 평가방법으로 철도차량의 승차감을 측정 및 평가할 수 효율성을 갖는 승차감 측정시스템이 필요하다. 또한, 국내의 경우는 철도 승차감의 측정 및 평가방법이 1개의 방법으로 표준화되어 있지 못한 상태로 사용주체에 따라 다양한 방법으로 승차감을 실시하고 있다. 따라서, 승차감 측정 및 분석에 대한 다양한 요구를 만족할 수 있는 승차감 측정장치로 본 시스템이 설계 및 검증되었기 때문에 이를 사용하여 국내에서도 효율적으로 승차감의 측정 및 평가를 행할 수 있도록 하였다.

후기

본 내용은 건설교통부의 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

참고문헌

1. ISO 2631-1: Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: General requirements, 1985.
2. ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, 1997.
3. ISO 2631-3: Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 3: Evaluation of human exposure to whole-body z-axis vertical vibration in the frequency range 0.1~0.63Hz, 1985.
4. UIC 513 R: Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles, 1994
5. CEN DRAFT prENV 12299: Railway applications ride comfort for passengers measurement and evaluation, 1997
6. Dynamics of railway vehicle systems, pp68-76, V.K.Carg, 1984, Academic Press
7. 김영국 등, 2002, "철도 승차감 평가방법의 상호관계 분석", 소음진동공학회논문집, 제12권, 제3호, 한국소음진동공학회.
8. Suzuki, H., 1998, Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 212 Part F.