

철도 승차감 평가방법의 비교 및 고찰

김영국* · 구동회** · 나희승* · 박춘수* · 최강윤*

Comparison on Evaluations of Ride Comfort for Railway

Y.K. Kim* , D.H. Koo** , H.S. Na* , C.S. Park* , K.Y. Choi*

ABSTRACT

Recently "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. We performed the ride comfort test in KNR line(Seoul - Kwangju) and simulated the relationship between them. And we compared our results to ERRI's.

1. 서론

철도는 다른 교통수단의 비해 대량수송, 안전성 및 정확성 등의 특성을 갖고 있다. 철도를 다른 교통수단과의 경쟁력을 강화시키기 위해서는 열차의 속도 및 여객수송의 품질 향상 등이 필요하다. 특히, 승객이 여객수송의 품질을 판단하는 최종 평가자라는 점을 감안할 때, 승차감을 일정한 수준이상으로 향상시키는 것은 반드시 필요하다. 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. 철도에서는 신호의 측정 및 정량화가 용이한 진동이나 가속도를 이용하여 인간의 감정을 평가하는 진동승차감이 일반적인 평가방법으로 사용되고 있다.

철도의 진동승차감은 다른 교통수단인 자동차에 비해 아래와 같은 특징을 갖고 있다.

- 궤도와 차량의 상호작용에 진동발생
- 다양한 승객 자세에 대한 반응의 차이
- 승차감 실험장소 및 시간의 제약
- 승차감에 대한 인식 부족

철도분야에서는 승차감의 평가방법으로 "ISO 2631규격" 및 Sperling에 의해 제안된 "승차감 지수(Wz 방법)"가 주로 사용되고 있다. Wz 방법은 철도환경에 대해 규정하고 있으나, ISO 2631 규격은 전신진동(Whole-body vibration)에 대한 일반적인 사항만을 규정하고 있을 뿐 적용환경에 대해서는 규정되어 있지 않다. 또한, 국제철도협회(UIC, International Union of Railways)에서는 앞에서 언급한 바와 같이 특수한 철도환경에 대한 ISO 2631 규격을 적용하려는 연구를 수행하여, 1995년에 독자적인 철도의 승차감 측정 및 평가방법에 관한 규격(UIC 513 R)을 제정하였다.

* 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

** 한국철도기술연구원 차량연구본부

이러한 승차감 평가방법은 각 나라마다 그 적용의 차이를 보이고 있다. 유럽에서는 Wz방법이, 미국, 일본, 프랑스 등에서는 ISO 2631 규격을 바탕으로 하는 승차감 평가를 사용하고 있으며, 앞으로는 승차감 평가에 UIC 513R 규격이 많이 사용될 것으로 예상된다. 국내의 경우는 아직까지 확실한 평가방법이 정립되어 있지 않는 상태로 여러 가지 방법들을 혼용하여 사용하고 있다. 그 예로 기존철도 및 경부고속철도의 경우에는 ISO 2631 규격을 기본으로 사용하고 있으나, G7사업 및 표준 전동차 등에서는 UIC 513R 규격을 적용하려는 노력들을 하고 있다.

본 연구에서는 다양한 평가방법에 대해 호남선에서의 실차시험을 통해 얻어진 측정결과를 토대로 그들 상호관계를 파악하고, 유럽철도연구소에서 제시된 결과들과 비교 분석하고자 한다.

2. 승차감 평가방법의 분석

철도에서는 승차감 평가방법으로는 ISO 2631 규격을 이용한 평가방법, Sperling이 제안한 Wz 방법 및 UIC 513R 규격에 따른 평가방법 등이 사용되고 있음을 이미 앞에서 설명하였다. 이러한 평가방법들은 각각의 다른 특징을 가지고 있다. 이들은 서로 다른 평가지수 및 감각보정곡선을 사용할 뿐만 아니라 다른 기준값을 사용하여 평가하도록 하고 있다. 따라서, 이들 평가방법의 차이점을 비교 분석하고자 한다.

2.1 평가방법

측정된 가속도로부터 승차감을 평가하기 위한 평가 흐름도는 그림1과 같다. 차체 중앙바닥(가장 근접 의자) 및 대차중앙위 차체바닥(가장 근접 의자)에 설치된 3차원 가속도센서로 직접 측정되거나 테이프레코더에 저장되어 있던 가속도 신호를 Low pass filter를 통과시켜 샘플링 동안에 발생할 수 있는 에어리어싱(Aliasing)오차를 제거시킨 후, A/D 변환을 행한다. A/D 변환된 1개 블록(5초 동안 측정 데이터)의 디지털 신호는 푸리에변환을 통해 주파수영역의 신호로 변환된 후에 해당 평가방법에 적합한 주파수 범위(ISO 2631: 0.5~80Hz, Sperling: 0.5~30Hz, UIC 513R: 0.4~80Hz)에서 진동과위를 구한다.

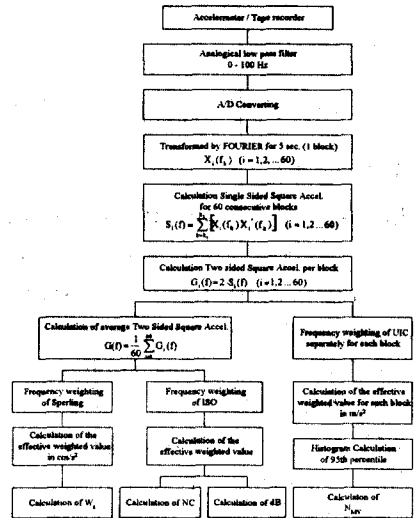


그림1 승차감 평가 흐름도

동일한 방법으로 연속적인 60개 블록의 진동과위를 구한 후에 해당 평가방법에서 추천하는 감각보정곡선 및 평가지수를 이용하여 승차감을 수행하게 된다.

2.2. 감각보정곡선의 비교

각 평가방법마다 서로 다른 감각보정곡선을 사용하고 있다. 감각보정곡선이란 동일 크기의 강도를 갖는 진동에 대해 인간이 느끼는 감정(감각)은 진동 주파수에 따라 차이가 있으며, 이를 함수화한 것을 말한다.

가. ISO 2631 규격

ISO 2631 규격은 1997년 개정이 되었으며, 감각보정특성이 그 전까지 사용되었던 것과는 상당한 차이가 있다. 여기서는 개정된 규격에 대한 감각보정곡선만을 살펴보기로 한다. 그림2는 이 규격에 대한 수평 및 수직방향의 감각보정곡선을 나타내며, 감각보정함수는 아래와 같은 식으로 나타내어진다. 이 감각보정곡선에서 수직방향에 대하여는 4~12Hz(감각보정값 0.9이상)에서, 수평방향에 대하여는 0.6~2Hz(감각보정값 0.9이상)에서 민감함을 알 수 있다.

· 수평(x, y)방향

$$W_x(s) = \frac{40000 \pi^2 s^2}{(s^2 + 1.1 \pi s + 0.64 \pi^2)(s^2 + 282.8 \pi s + 40000 \pi^2)}$$

$$W_A(s) = W_z(s) \times \frac{4\pi(s+4\pi)}{(s^2+6.4\pi s+16\pi^2)}$$

· 수직(z)방향

$$W_A(s) = W_z(s) \times \frac{32\pi(s+32\pi)(s^2+5.56\pi s+25\pi^2)}{(s^2+58.2\pi s+1024\pi^2)(s^2+4.2\pi s+64\pi^2)}$$

나. Wz 평가방법

그림3는 Sperling 제안한 Wz 방법에 대한 감각보정곡선을 나타내며, 감각보정함수는 아래의 식으로 나타내어진다. 이 방법의 경우는 ISO 2631규격 및 UIC 513R규격에서 제시한 감각보정곡선과는 아주 다른 형태의 곡선으로 나타내어지며, 수평 및 수직방향에 대해 공히 3~7Hz 부근에서 민감함을 알 수 있다. 또한, 수직방향과 수평방향에 대한 감각보정곡선의 형태는 같지만, 동일한 진동 주파수에 대해 수평방향의 감각보정값이 수직방향보다 1.25배 크게 되도록 설정되어 있다.

· 수평(x, y)방향

$$B_x(f) = 0.737 \sqrt{\frac{1.911^2 + (0.25f^2)^2}{(1-0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.0368f^2)^2}}$$

· 수직(z)방향

$$B_z(f) = 0.588 \sqrt{\frac{1.911^2 + (0.25f^2)^2}{(1-0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.0368f^2)^2}}$$

다. UIC 513R 규격

그림4는 UIC 513R 규격의 감각보정곡선을 나타내며, 감각보정함수는 아래의 식으로 구해진다. 이 규격에서 사용되는 감각보정곡선은 ISO 2631규격에 비해 수평방향은 동일한 감각보정곡선을 사용하며, 수직방향에 대하여는 0.6~3Hz, 8~16Hz에 감각보정값이 약간 크지만, 거의 유사한 형태를 갖고 있고 있다. 이 감각보정곡선에서 수직방향에 대하여는 4~16.5Hz(감각보정값 0.9이상)에서, 수직방향에 대하여는 0.6~2Hz(감각보정값 0.9이상)에서 민감함을 알 수 있다.

· 수평(x, y)방향

$$W_x(s) = \frac{40000\pi^2 s^2}{(s^2+1.1\pi s+0.64\pi^2)(s^2+282.8\pi s+40000\pi^2)}$$

$$W_z(s) = W_x(s) \times \frac{4\pi(s+4\pi)}{(s^2+6.4\pi s+16\pi^2)}$$

· 수직(z)방향

$$W_A(s) = W_z(s) \times \frac{32.8\pi(s+32\pi)(s^2+6.25\pi s+25\pi^2)}{(s^2+50.8\pi s+1024\pi^2)(s^2+5\pi s+64\pi^2)}$$

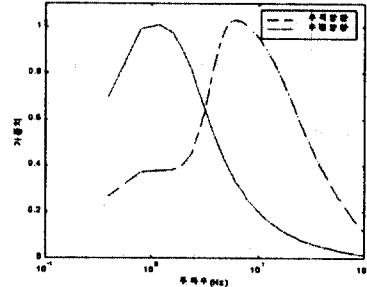


그림2 개정규격의 감각보정곡선

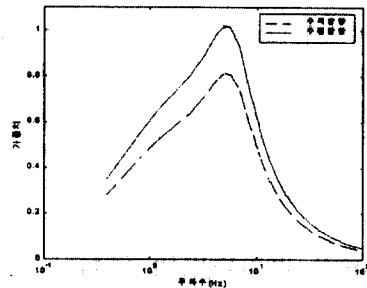


그림3 Sperling 제안 방법

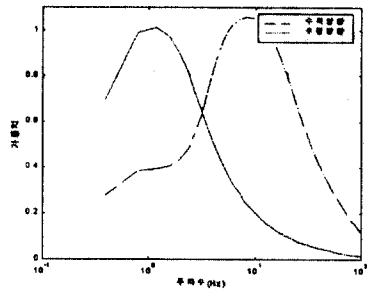


그림4 UIC 513R 규격 감각보정곡선

2.3 ISO 2631 규격을 이용한 평가방법

이 규격에 의한 승차감의 평가는 앞에서 구해진 60개 블록에 대한 진동파워의 평균값을 이용한다. 이때, 반드시 60개 블록의 데이터가 필요한 것은 아니며, 측정구간이나 측정시간에 맞는 적당한 개수의 블록을 선택하여 평균값을 구하면 된다. 계산된 진동파워의 평균값에 해당 방향에 대한 감각보정을 행한 후, 실효값을 구한다. 이 실효값이나 실효값을 이용한 평가지수로 승차감 평가를 행하게 된다.

이 규격을 기본으로 하여 현재 많이 사용되는 승차감 평가인 “승차감 레벨”과 “승차감 평가지수”에 대해 살펴보기로 한다.

가. 승차감 레벨(dB)

ISO 2631 규격에 근거한 승차감 레벨에 의한 승차감 평가방법은 일본 구국철의 「승차감기준에 관한 연구위원회」에서 제안된 것으로 일본 및 국내에서 많이 사용되고 있다. 승차감 레벨은 감각보정 후 계산된 실효값을 기준가속도 $10^{-5}m/s^2$ (국내의 경우 $10^{-6}m/s^2$)에 대한 대수값으로 정의된다.

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

x, y, z의 각 방향에 대해 승차감 레벨을 구하여 평가기준에 만족되는지 여부를 확인한다.

나. SNCF 승차감 평가지수(NC)

프랑스 국철(SNCF)에서는 ISO 2613 규격을 이용하여 규정한 승차감 평가지수를 사용하고 있다. x, y, z 각 방향에 대해 승차감 평가지수를 구하거나 합성 승차감 평가지수를 구해 평가를 행한다. 우선, 감각보정된 실효값을 구한 후에 아래의 방법으로 승차감 평가지수를 구한다.

$$a = \sqrt{(1.4a_{ux}^2 + 1.4a_{uy}^2 + a_{uz}^2)}$$

x, y, z 각 방향에 대해 평가를 하고자 할 때에는 a가 아래와 같이 된다.

$$a = 1.4a_{ux}, \quad a = 1.4a_{uy}, \quad a = a_{uz}$$

$$Z_1 = \log a$$

$$Z_2 = \frac{-0.6667 Z_1^2 + 1.6667 Z_1 - 0.084396}{Z_1 - 0.7033}$$

$$\text{승차감 평가지수 (NC)} = 10^{Z_2} \text{ (시간)}$$

2.4 Wz 평가방법

Wz 평가방법도 ISO 2631 규격에 의한 방법과 마찬가지로 진동파위의 평균값을 구한 후에 해당 방향에 대한 적합한 감각보정을 행해야 한다. 이 방법에 의한 승차감지수는 아래의 식과 같다.

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

승차감 지수를 x, y, z의 각 방향에 대해 구한 후, 평가기준에 만족되는지를 확인한다. 이 평가방

법에서는 측정된 가속도의 단위를 cm/s^2 으로 계산하여야 된다.

2.5 UIC 513R 규격에 의한 평가방법

이 규격에 의한 승차감의 평가는 앞에서 구해진 60개 블록에 대해 1개 블록마다 해당 방향에 적합한 감각보정을 행한 후, 해당신호의 실효값을 구한다. 이 60개의 실효값 중에서 x, y, z 방향에 대해 누적빈도가 95%인 실효값을 구하고, 이 값을 이용하여 승차감 지수를 구한다. 이규격에서 제시된 승차감지수를 구하는 식은 아래와 같다.

$$N_{MV} = 6 \sqrt{(a_{wz95})^2 + (a_{wy95})^2 + (a_{wx95})^2}$$

$$N_{MVx} = 6 a_{wx95}$$

$$N_{MVy} = 6 a_{wy95}$$

$$N_{MVz} = 6 a_{wz95}$$

3. 실험결과 분석

3.1 실차시험

3개의 승차감 평가방법의 관계를 비교분석하기 위하여 호남선(서대전-장성)과 부곡-대전간에서 승차감 시험을 실시하여 x, y 및 z축에 대한 진동 가속도를 측정하였다.

· 시험대상열차

PMC + 6T + PMC(시험용 새마을 열차)

· 측정기기

실차시험에 사용된 측정기기는 당연구소에서 G7과제의 일환으로 개발된 철도용 측정시스템(그림 5)이 사용되었으며, 그 구성은 Docking station이 장착된 노트북컴퓨터, FFT board, 가속도 센서 및 GPS 등이며, Hardware 특성은 표1과 같다.

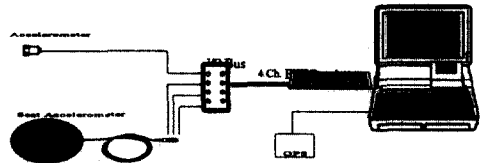


그림5 승차감 측정시스템의 구성도

표1 승차감 측정시스템 Hardware 특성

순번	품명	Specification	용도
1	FFT Board	- Input 4ch - 100mv~16V Input - AC, DC, ICP(24mA@20V) Amp - 90dB Aliasing Filter - 16bits ADC - Bandwidth: 5Hz~80kHz - Sampling speed 2x Bandwidth - FFT speed 5ms for 1K	- Amp - Filter - A/D - FFT
2	I/O Connector Box		
3	가속도계	- 3축 Seated type - KP Type - Sensitivity: 1mV/m/s ²	- 가속도 측정
4	Notebook with Docking Station	- CPU: Pentium MMX 166MHz - Docking station: 15.1"x16.5"x5.4" 2 full-size ISA slot x2	
5	GPS	- Accuracy Velocity: 0.1m/s - Position: 15m(placeholder)(DR) - Power supply	- 위치 및 속도측정

3.2 측정 결과

실차시험을 사용한 철도용 승차감 측정시스템은 시간 및 주파수에 대한 진동가속도 데이터를 동시에 저장할 수 있으며, 그 자체에서 ISO 2631 규격에 따른 승차감레벨(dB), Wz 방법으로 구한 승차감지수(Nmv) 및 UIC 513R에서 제시한 승차감지수(NC)를 구할 수도 있다. SNCF 평가지수(NC)는 진동가속도데이터로부터 계산하였다. 실차시험의 결과로 50sets의 x, y, z축 및 합성 승차감 평가결과를 얻었으며, 표2에 z축(수직방향)에 대한 결과의 일부를 나타낸다. 그림6은 표2의 Dataset 10에 대한 파워스펙트럼밀도를 나타낸 것이다. 호남선 측정 결과는 많은 구간에서 승차감이 나쁜 것으로 나타나고 있다.

표2 승차감 평가 결과

Dataset	속도	dBz	NCz	Nmvz	Wzz
1	115.75	114.48	4.05	5.48	3.24
2	102.23	115.42	3.45	6.56	3.35
3	92.42	115.66	3.3	5.47	3.37
4	90.48	112.85	5.27	4.37	3.11
5	94.98	113.6	4.68	4.4	3.18
6	101.11	112.29	5.74	3.67	3.02
7	89.32	110.54	7.39	3.03	2.97
8	94.00	111.61	6.34	3.42	2.95
9	94.45	112.02	5.97	3.54	2.99
10	120.29	113.89	4.47	4.6	3.13

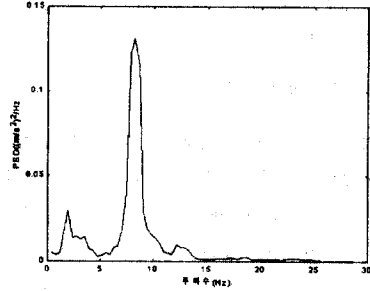


그림6 수직방향 파워스펙트럼밀도(Dataset 10)

3.3 평가방법간의 상호관계 분석

실차시험에서 얻어진 50sets의 승차감 평가결과를 기본 데이터로 하여, UIC 513R 규격에 의한 승차감지수(Nmv)를 다른 방법에 의한 승차감지수(dB, NC 및 Wz)로 나타내고자 한다. 또한, 유럽철도연구소(ERRI)에서 SNCB(벨기에), SNCF(프랑스), BR(영국) 및 PKP(프랑스)의 노선에서 시험결과를 바탕으로 제시한 연구결과와 비교하고자 한다. 승차감 평가방법의 상호관계는 50 sets의 데이터를 Curve fitting하여 얻었다. 그림7, 그림8 및 그림9는 승차감 평가방법의 상호관계를 나타내며, 그들의 관계식은 표3과 같다. 유럽철도연구소의 실차시험 결과에서도 알 수 있는 바와 같이 각 국의 노선 및 차량 상태에 따라 결과가 약간의 차이가 있다. 호남선에서의 실차시험으로 얻어진 승차감 평가방법 상호관계는 유럽철도연구소의 결과와 거의 일치한다. 수직방향의 Nmv - dB는 유럽철도연구소에서는 수행하지 않았기 때문에 호남선 결과만을 제시하였다.

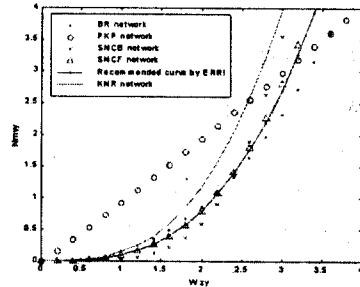


그림7 수직방향 Nmv - Wz 관계

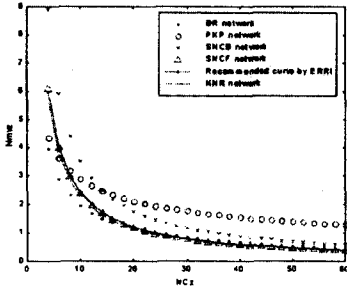


그림8 수직방향 Nmv - NC 관계

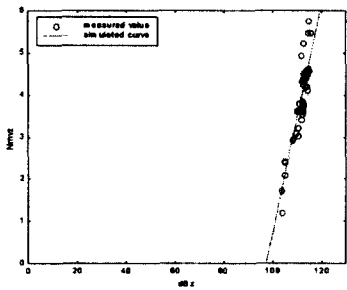


그림9 수직방향 Nmv - dB 관계

표3 승차감 평가방법의 상호관계식

	상관관계식
$Nmvz=f(dBz)$	$6.896 \times dBz^{(0.469)} - 59.085$
$Nmvt=f(dBt)$	$6.943 \times dBt^{(0.498)} - 69.066$
$Nmvy=g(Wzy)$	$0.089 \times Wzy^{(3)}$
$Nmvz=g(Wzz)$	$0.147 \times Wzz^{(3)}$
$Nmvy=h(NCy)$	$17.940 \times NCy^{(-1)}$
$Nmvz=h(NCz)$	$22.632 \times NCz^{(-1)}$
$Nmvt=h(NCt)$	$19.090 \times NCt^{(-1)}$

4. 결론

다른 교통수단과의 경쟁력을 더욱 강화를 위해 여객수송의 품질 향상에 대한 요구가 증가하고 있고, 이를 달성하기 위한 승차감의 향상이 절실한 실정이다. 국내의 경우 철도 승차감의 평가가 표준화 되어 있지 못한 상태로 사용주체에 따라 다양한 방법으로 승차감을 실시하고 있다. 따라서, 승차감 평가방법간의 상호관계를 알 수만 있으면, 상호 관계의 변환에 따른 효율적인 승차감 평가가 가능할 것

으로 판단된다. 다만, 앞에서도 언급한 바와 같이 선로와 차량의 상태에 따라 그들 상호 관계가 변할 수 있기 때문에 다양한 노선(경부선, 중앙선, 고속선로 등)에서의 실차시험을 통해 많은 승차감 데이터를 확보하여, 그들을 바탕으로 종합적인 상호관계식을 얻어야 할 필요가 있다.

후 기

본 연구개발은 선도기술개발(G7)사업중 고속전철기술개발사업의 연구과제로 수행되었습니다.

[참고문헌]

- 1) ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, 1997.
- 2) ORE: Final reports, B153/RP 18, 1989.
- 3) ORE: Application of ISO standard 2631 to railway vehicles, B153/RP 21, 1993.
- 4) UIC 513 R: Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles, 1994
- 5) 乗り心地管理基準の研究経緯, 鐵道技術研究資料, Vol. 38, No. 3, pp127-134, 1981
- 6) Griffin, M. J: Handbook of Human Vibration, Academic Press, 1990.
- 7) Dynamics of railway vehicle systems, pp68-76, V.K.Carg, 1984, Academic Press
- 8) 철도차량 승차감 측정방법, 철도기술연구보 Vol. 23, No. 1, 1989