

여객열차 승차감 평가 및 향상방안 연구

유 원희* · 최 경진* · 고 성순** · 박 규한**

A Study on the Evaluation and Improvement of Riding Comfort for Railway Vehicle

Wonhee You, Kyungjin Choi, Sungsoon Koh, Kyuhan Park

Key Words: Railway Vehicle(철도차량), Riding Comfort(승차감), Temperature(온도), Noise(소음), Illumination(조명), Vehicle Vibration(차량진동), Suspension(현가장치)

Abstract

The riding comfort problem for railway vehicles of conventional line becomes increasingly important under the influence of the opening of Kyungbu high-speed and high-grade railway in 2004. Meaning of the term "riding comfort" of passenger train varies widely. In a narrow sense, the riding comfort means the comfort related to the vehicle vibration. But in a broad sense, the riding comfort means the comfort related to the cabin temperature, noise, illumination, smell, air-conditioning, etc. In this study, the riding comfort in a broad sense is treated and the direction of research for improving the riding comfort is presented.

기호설명

A_w : 감각보정한 진동가속도의 실효치(%)

A_{ref} : 진동의 기준치(10^{-6} %g)

a : 진동가속도의 피크값(cm/s^2)

f : 주파수(Hz)

$F(f)$: 인체의 감도를 고려한 주파수함수

1. 서 론

2004년 경부고속철도가 개통이 되면 고속의 쾌적한 고급차량에 대한 정보가 온 국민에게 알려지면서 기존선을 운행하는 객차(새마을호 또는 무궁화호)에 대한 쾌적성이 문제시 될 소지가 있다. 특히, 곡선부의 반경이 최소 3,000km인 경부고속철도에서의 차량 진동승차감에 비하여 곡선

부의 반경이 최소 400km인 기존선(경부선)에서의 차량 진동승차감은 상당히 차이가 나므로 기존선에서의 차량 진동승차감에 대한 불만이 쇄도할 가능성을 배제할 수 없다.

철도차량의 승차감은 여러 가지로 고려될 수 있다. 즉, 좁은 의미로는 진동승차감을 의미하고 있으나 넓은 의미로는 소음, 온도, 습도, 조명, 의자배치 등 제반 차내 쾌적성에 영향을 주는 모든 인자를 고려한 승차감을 의미한다. 본 연구에서는 기존선 차량의 승차감 향상을 위하여 진동승차감은 물론 차내환경에 영향을 주는 온도, 소음, 조명 등을 포함하여 승객이 느끼는 쾌적성을 조사하였으며, 이로부터 개선방향에 대해 검토하고자 하였다. 또한, 좁은 의미의 승차감인 진동승차감에 대한 실차시험을 통해 현재 운행되고 있는 기존철도차량의 승차감을 평가하고 개선방향에 대해 제시하고자 하였다.

2. 승차감 관련 연구동향

2.1 광의의 승차감 관련 연구동향

* 한국철도기술연구원 차량연구본부

** 철도청 차량본부 객화차과

철도차량에 있어서 광의의 승차감을 연구한 결과를 발표한 국가로는 일본이 있다. 1998년 일본 철도종합연구소(RTRI) 리포트에 발표된 논문에서 스즈끼^[1] 등은 열차이용객을 대상으로 진동, 소음, 온도, 조도, 공기청정도, 차창전망, 차량외관, 차내디자인, 차내청결도, 좌석안락감 등 총 34개 항목을 설정하여 광의의 승차감의 평가지표를 제안하였다. 이들이 제안한 방법 중 간편법을 보면 다음 식과 같다.

$$\text{승차감} = -6.4 \times \text{진동} - 0.012 \times \text{소음} - 0.001 \times \text{조도} + 0.0023 \times \text{의자간격} + 4.6$$

여기서 진동은 좌우진동가속도실효치(ms^{-2})이고 소음은 시간율소음레벨의 50%값이며 평균조도는 룩스(lx)이고 의자간격의 단위는 mm이다.

또한, 이 연구에 의하면 일본인이 느끼는 열차내 승차감에 영향을 미치는 요소들은 아래 표와 같다.

Table 1 Influence factor for riding comfort

요인	상세요인	비율(%)	총비율(%)
물리적 요인	진동승차감	15.6	33.5
	소음	9.0	
	공기청정도	8.9	
좌석 요인	좌석안락감	16.7	40.5
	의자간격	9.3	
	크기	7.6	
	청결도	6.9	
시각적 요인	차내디자인	13.6	26.0
	외관	6.5	
	전망	5.9	

이 표로부터 승차감은 물리적인 요인 뿐 아니라 좌석에 관한 요인 및 시각적 요인에 의해 영향을 받음을 알 수 있다. 결국 한국인에 있어서도 이와 같이 철도차량의 승차감에 미치는 요소를 찾기 위한 노력이 필요하다.

2.2 진동승차감 평가기준

철도차량의 진동승차감의 평가방법은 각 국가의 실정에 따라 조금씩 다르게 표현되고 있어 전세계적으로 통일된 평가기준을 갖추지 못한 실정이다. 주로 많이 사용되는 방법으로는 일본

이나 국내에서 주로 적용하고 있는 기준인 ISO기준과 독일, 오스트리아, 스위스 국철 등 유럽에서 주로 이용되고 있는 Ride Index 기준을 들 수 있다.

2.2.1 ISO 기준

ISO2631(Evaluation of human exposure to whole-body vibration)은 진동에 대한 인체반응 조사 결과를 종합하여 허용기준을 체계화한 기준이다. 이 기준은 진동을 기본적으로 다음과 같이 세 종류의 인체노출로 정의한다.

- 인체의 전부 또는 거의 대부분에 동시에 전달되는 진동
- 인간이 지지하고 있는 표면으로부터 전달되는 진동(서있는 사람의 발)
- 머리카 손과 같이 인체의 특정 부위에만 영향을 주는 진동

진동환경에 전신이 노출되는 경우의 평가기준으로서의 ISO 2631은 1~80Hz의 주파수범위 내에서 딱딱한 표면으로부터 인체에 전달되는 진동에 대한 노출의 한계를 수치적인 값으로 제시하고 있다. 진동에 의해 인체가 느끼게 되는 감각 특성은 진동의 강도, 주파수성분, 전달방향과 노출되는 시간 등과 같은 인자들에 의해 영향을 받는다. Fig. 1은 진동주파수에 대한 인체가 느끼는 감각특성을 나타낸 선도이다.

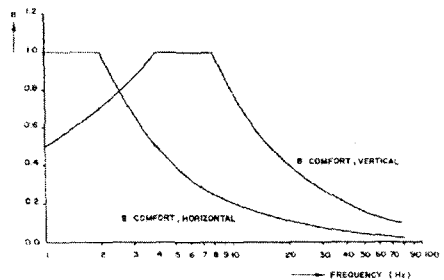


Fig. 1 Human response to whole-body vibration as proposed in ISO 2631

이러한 감각특성을 고려한 진동의 평가레벨을 다음의 3단계로 분류하고 있다.

- (1) 피로-능률 감퇴한계(fatigue-decreased proficiency boundary)

수직방향으로는 인체가 진동주파수 4~8Hz사이에서 가장 민감하여 가속도(rms 기준) 0.315 ms^{-2}

의 크기로 8시간동안 진동을 가하면 피로를 느끼게 되며, 크기가 2.8%로 증가하면 최대 1분 동안 허용된다. 좌우방향의 수평운동은 수직축과는 달리 2Hz이하에서 가장 민감하고 주파수가 증가하면 반응은 약화된다. 그러나 상하방향에 비해 좌우진동이 쉽게 느끼게 됨을 알 수 있다.(Fig. 2, Fig. 3)

(2) 노출한계(exposure limit boundary)

노출한계는 주파수와 노출시간의 함수로서 피로-능률 감퇴한계와 같은 일반적인 형태지만, 최대 안전노출한계는 피로-노출 감퇴한계의 기준에 의해 허용된 값에 2배를 함으로서(6db 증가) 주파수, 진동의 방향, 노출시간이 결정된다.

(3) 안락성 감퇴한계(reduced comfort boundary)

피로-능률 감퇴한계 값들을 3.15로 나눔으로서 얻어진다(10dB 감소).

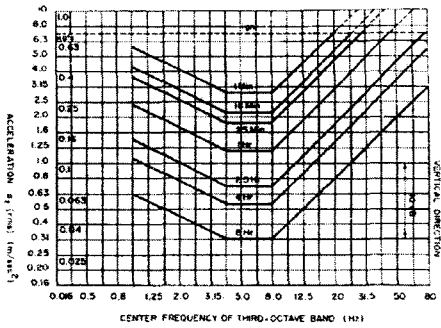


Fig. 2 The fatigue-decreased proficiency boundary for vertical vibration

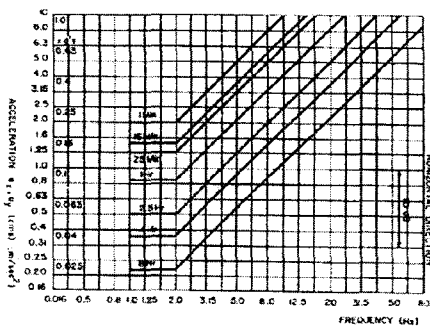


Fig. 3 The fatigue-decreased proficiency boundary for lateral vibration

한편, 국내에서 적용하고 있는 진동승차감 기준은 ISO 2631에 기초한다. 이 기준을 적용하기

위한 진동승차감 레벨은 인체가 느끼는 감각필터로 보정된 진동가속도를 거리에 따라 누적평균하여 실효치를 구하고 진동기준치와 대수비를 취하여 다음과 같이 나타낸다.

$$Leq(dB) = 20 \log \frac{A_w}{A_{ref}}$$

여기서, A_w 는 감각보정한 진동가속도의 실효치(%)를 나타내며, A_{ref} 는 진동의 기준치(10^{-6} %s)를 나타낸다.

Table 2는 국내에서 철도차량의 승차감 평가시 적용하고 있는 진동승차감 기준이다.

Table 2 Riding comfort limit in Korea

등급	진동승차감(dB)	평가구분
A	103미만	우수
B	103~108	양호
C	108~113	보통
D	113~118	불량
E	118이상	극히 불량

현재, 철도청에서 차량설계시 적용하고 있는 진동승차감 설계기준은 상하진동승차감 110dB, 좌우진동승차감 105dB를 적용하고 있다.

2.2.2 Ride Index기준

유럽 여러 나라 사용하고 있는 Ride Index도 또한 그 나라의 실정에 맞게 조금씩 다르게 표현한다. 여기서는 주로 많이 사용되고 있는 Sperling Ride Index에 의한 승차감 평가방법을 소개한다. 이 지수는 1977년 Sperling에 의해 소개된 이후 철도차량의 진동승차감을 평가하기 위하여 사용되었으며, 진동가속도의 크기, 주파수를 측정하여 다음 식과 같이 무차원수 W_z 로 변환한 값이다.

$$W_z = 0.896 \left(\frac{a^2}{f} \times F(f) \right)^{1/10} : \text{Ride Comfort}$$

여기서, a 는 진동가속도의 피크값(cm/s^2)을 나타내며 f 는 주파수(Hz), $F(f)$ 는 인체의 감도를 고려한 주파수함수이다. 주파수함수 $F(f)$ 는 주파수만의 함수가 아니라 진동에 방향에 관련된 함수이기도 하며, 수직방향의 주파수는 다음과 같다.

$$F(f) = \begin{pmatrix} 0.325f^2 & 0.5 \leq f \leq 5.9 \\ 400/f^2 & 5.9 \leq f \leq 20 \\ 1 & 20 \leq f \end{pmatrix} \text{ (Hz)}$$

또한, 수평방향의 주파수합수는 다음과 같다.

$$F(f) = \begin{pmatrix} 0.8f^2 & 0.5 \leq f \leq 5.4 \\ 650/f^2 & 5.4 \leq f \leq 26 \\ 1 & 20 \leq f \end{pmatrix} \text{ (Hz)}$$

Table 3은 Ride Index에 의한 진동승차감 판정 기준을 나타낸다.

Table 3 Comfort evaluation by Ride Index

Ride Index	평가구분
1	느낌이 거의 없음
2	진동을 약간 느낌
2.5	느끼지만 불편하지 않음
3	크고 불규칙한 진동(허용가능)
3.25	매우 불편함
3.5	극도로 불편하고 장시간 참을 수 없음
4	장시간 노출시 위험함

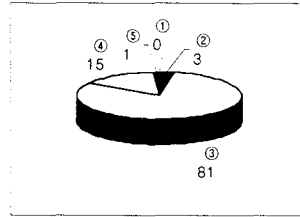
3. 차량승차감 설문조사 및 시험

2000년 11월부터 최근에 이르기까지 새마을호 열차와 무궁화호 열차를 이용하는 승객들을 대상으로 광의의 승차감에 대한 설문조사 및 진동승차감에 대한 측정을 실시하여 향후 철도차량의 승차감 향상을 위한 방향을 제시하고자 하였다.

3.1 광의의 승차감 설문조사

광의의 승차감에 대한 승객들의 반응을 조사하기 위하여 546명의 영업중인 차량(새마을 216량, 무궁화 330량)이 조사되었다. 대상노선은 54%가 경부선이었으며, 호남선, 전라선, 장항선을 비롯하여 7개 주요 간선이 선택되었다. 또한 응답에 응해준 승객 중 남자가 59%, 여자가 41%였으며, 연령은 20~50세가 전체의 82%가 되었다. 다음은 광의의 승차감에 영향을 주는 각각의 요소에 대한 설문조사 결과를 보여준다.

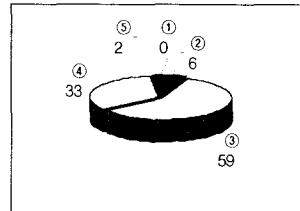
3.1.1 객실내 온도



- ① 너무 춥다
- ② 약간 춥다
- ③ 적절하다
- ④ 덥다
- ⑤ 너무 덥다

객실내 온도에 대하여 승객들의 반응은 대체로 적절하다는 반응을 보여 객실내 온도조절이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

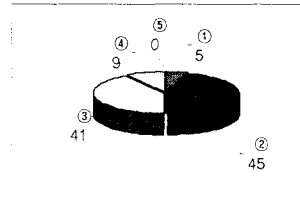
3.1.2 객실내 습도



- ① 너무 습하다
- ② 약간 습하다
- ③ 적절하다
- ④ 건조하다
- ⑤ 너무 건조하다

객실내 습도는 대체로 적절하다는 반응이 59%에 달하고 있으나 건조하다는 의견도 33%를 차지하여 승객들이 습도에 대하여 느끼는 정도가 다양함을 알 수 있다.

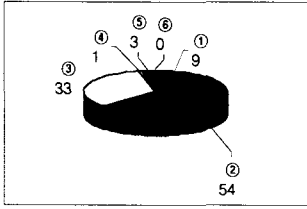
3.1.3 객실내 소음



- ① 너무 시끄럽다
- ② 약간 시끄럽다
- ③ 보통이다
- ④ 조용하다
- ⑤ 아주 조용하다

객실내 소음에 대하여 승객들은 다소 불만족하게 느끼는 것으로 나타났다. 약 50% 정도의 이용객들이 시끄럽게 느끼는 것으로 나타났다. 이러한 원인으로서는 열차가 가지고 있는 고유의 소리(전동음, 기계류음, 삐걱거리는 소리 등)에 의한 것이라기보다는 승객들간의 대화나 아이들 소리 또는 핸드폰 사용시의 소리 등과 같은 객실 내부의 승객들 스스로에 기인하는 원인이 65%로 나타나 승객들 스스로가 서로를 위한 노력이 필요함을 알 수 있었다. 참고로 승객이 없는 상태에서 새마을호와 무궁화호 객실내 소음은 65dBA 이하로서 상당히 조용한 환경을 유지하고 있다.

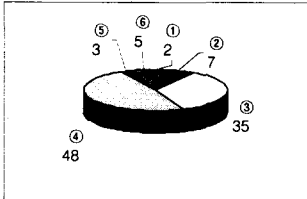
3.1.4 진동



- ① 너무 심하다
- ② 약간 심하다
- ③ 보통이다
- ④ 진동이 없다
- ⑤ 편안하다
- ⑥ 무응답

차량의 진동에 대한 사항은 곧 진동승차감과 직결되는 사항이므로 매우 중요하다. 차량의 진동에 대하여 승객들의 반응은 63% 이상이 진동이 심하다고 느끼고 있는 것으로 나타났다. 차량 진동에 대한 원인은 차량자체의 진동도 문제이지만 선로에 의한 원인도 매우 크므로 이 부분에 대한 검토가 필요하며 승차감 향상을 위한 차량의 개선작업이 필요하다.

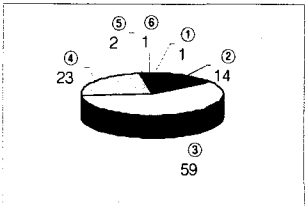
3.1.5 좌석의 등판 안락감



- ① 매우 불편하다
- ② 불편하다
- ③ 보통이다
- ④ 편하다
- ⑤ 매우 불편하다
- ⑥ 무응답

좌석의 등판에 대하여 대부분의 승객들은 보통 이상으로 편안하다고 느끼고 있음을 알 수 있다.

3.1.6 차내디자인



- ① 매우 불편하다
- ② 불편하다
- ③ 보통이다
- ④ 편하다
- ⑤ 매우 편하다
- ⑥ 무응답

차내 디자인에 대하여 승객들의 반응을 조사해 본 결과 85% 이상의 승객들이 보통 이상으로 만족하는 것으로 나타났다.

이 외에도 조명, 좌석의 색상, 머리 받침, 좌판, 팔 받침, 발 받침 등에 대한 반응도 조사해 본 결과 상당히 만족하는 것으로 나타났다 또한 객실내부의 청결상태, 냄새, 화장실 청결상태 등에 대한 반응도 만족하게 나타났으며, 객실내 환기상태 또한 75% 이상의 승객들이 보통 이상으로 만족하는 것으로 나타났다.

3.2 진동승차감에 대한 분석

Table 1에서 언급한 일본인의 경우 진동승차감, 좌석안락감 및 차내디자인이 광의의 승차감에 미치는 영향이 가장 크다. 한편, 앞에서 본 바와 같이 국내에서 새마을호와 무궁화호 차량 이용객에 대한 설문조사 결과 좌석안락감 및 차내디자인은 별 문제가 없는 것으로 파악되었으나, 진동승차감은 다소 개선의 여지가 있는 것으로 조사되고 있다. 따라서 본 연구에서는 진동승차감을 나쁘게 하는 요인을 별도로 검토해 보았다.

3.2.1 경부선 진동승차감 측정결과

경부선 대전-부산 구간에서의 진동승차감을 측정하였다. 진동승차감은 ISO 2631 기준을 만족하는 B&K 2512 Human-Response Vibration Meter를 사용하였으며, 측정은 경부선의 무궁화호 정차역을 기준으로 역과 역 사이의 구간 진동승차감을 측정하였다. 측정결과를 요약적으로 정리해 보면 다음과 같다.

Table 4 Riding Comfort in Kyungbu line

차종	차호	치수	상하승차감	좌우승차감
새마을	S1	23.0×3.0	좋음	좋음
무궁화	M1	23.5×3.2	좋음	좋음
무궁화	M2	23.5×3.2	보통	좋음
무궁화	M3	21.0×3.0	좋음	기준 초과
무궁화	M4	21.0×3.0	매우좋음	기준 초과

이 표를 보면 무궁화호 일부 차량에서 좌우방향 진동승차감이 기준을 초과함을 알 수 있다. 이는 동일 측정구간에서 나타난 결과이므로 차량이 가지고 있는 동특성 문제로 볼 수 있다. 그러나 차량만이 문제는 아니며 일부 구간에서는 차량에 무관하게 승차감이 나쁜 구간이 존재한다. 이는 선로상태(노반 또는 궤도의 문제)가 문제있는 부분이므로 선로의 유지보수가 필요하다.

3.2.2 차량진동이 나쁜 구간의 선로상태 판별

다음 그림은 특정 구간에서의 새마을 MAN대차의 상하방향 및 좌우방향의 진동수준을 나타내고 있다. 이 그림을 보면 대차의 진동이 다른 구간에 비하여 뚜렷이 크게 나타나는 구간이 존재한다. 이 그림에서는 좌측역 기점 3.9~4.8km 구간 및 8.9~11km 구간, 14~15.2km 구간의 선로

조건이 좋지 않은 것으로 판단된다. 그러므로 이 구간에서의 차량의 진동승차감 향상을 위한 선로의 유지보수 작업이 필요하다.

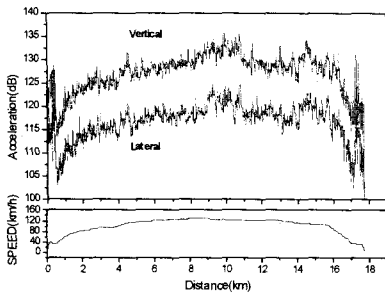


Fig. 4 Bogie vibration of Saemaetul car

3.2.3 차량의 유지보수 검토

차량에 대한 진동승차감의 문제는 대체로 상당히 까다롭다. 같은 종류의 대차를 사용한 차량이라 하더라도 크기(길이 및 폭)에 따라 진동특성이 달라지게 되고, 그에 따라 최적설계가 이루어져야 한다. 그러나 최적설계가 이루어지더라도 1차 및 2차 현가장치의 특성에 따라 차량의 진동특성이 많이 바뀌게 된다. 특히 고무제품이 많이 사용되고 있는 철도차량에서 고무제품에 대한 유지보수 문제는 매우 중요한 사항이다. 기본적으로 정비를 시행하고 나면 차량의 진동승차감은 좋아지게 된다. 따라서 고무제품의 내구연한에 맞추어 차량의 정비를 시행하면 진동승차감이 좋아질 것은 당연한 이치이다. 그러나 고무제품의 내구연한에 맞추어 유지보수를 시행하면 그만큼 비용이 증가되고 경제성이 떨어지게 된다. 따라서 고무제품의 내구연한을 연장시키고 품질이 오랫동안 유지되도록 연구개발이 필요하다.

한편, 이러한 유지보수와는 별도로 앞서 언급한 바와 같이 차량의 최적설계가 이루어지지 않아 진동승차감이 나빠진 경우도 있다. 다음 그림은 이러한 전형적인 예를 보여주고 있다. A와 B는 같은 종류의 대차를 사용하는 차량으로서 A 차량이 가지고 있는 차륜마모의 문제점을 해결하기 위해 개선대책을 세운 차량이다. 그 결과 마모에 대한 문제도 해결하고 좌우방향 진동승차감도 좋아졌으나, 상하방향의 진동승차감이 상대적으로 나빠진 것을 보이고 있다. 따라서 이 부분을 해결하기 위한 연구가 필요하다.

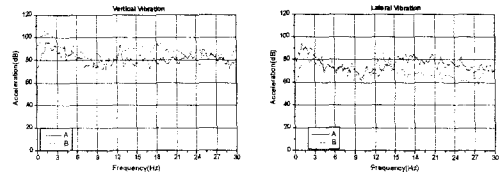


Fig. 4 Carbody vibration of Mugunghwa car

4. 결론

국내 새마을호와 무궁화호 객차의 승차감 향상을 위한 방안을 마련하기 위해 철도이용객을 대상으로 설문조사를 실시하고, 차량의 진동승차감을 측정하여 철도이용객에 대한 서비스를 향상시키고 쾌적한 승차감을 제공할 수 있는 방안을 연구해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 객실내 온도, 조명, 습도, 차내디자인, 좌석의 안락감, 객실내부 청결상태 및 환기상태, 냄새, 화장실 청결상태 등에 대한 승객들의 반응은 만족한 수준이었다.
- (2) 객실내 소음에 대한 불만족도가 50% 수준이었으나, 그 원인은 핸드폰 사용, 대화, 어린이 노는 소리 등 대부분 승객들 스스로에 원인이 있기 때문에 승객들 서로를 위한 노력이 필요하다.
- (3) 차량의 진동승차감에 대한 불만족도가 가장 높았다. 이를 해결하기 위한 방안으로 선로의 유지보수, 차량의 고무현가장치 부분의 유지보수 및 차량 자체에서의 구조적인 해결방안이 마련되어야 한다.

후기

본 연구를 위해 같이 힘써주신 철도청 차량본부 관계자님들께 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) H. Suzuki and H. Shiroto, "Comfort Evaluation Index in the Passenger Room of Train", RTRI Report Vol.12, No.6, '98.6
- (2) H. Takai, "Changes in Evaluation Methods for Riding Comfort", RTRI Report Vol.9, No.8, '95.8