철도차량 운전실 승차감에 관한 연구

A Study on the Ride Comfort in the cabin room of Railway Vehicle

최은미† 김영국* 김종봉**
Choi, Eun-Mi Kim, Young-Guk Kim, Jong-Bong

ABSTRACT

There are many studies on the ride comfort for the train from the viewpoint of passenger. But there are only a few studies on the ride comfort for engineers in the locomotive.

The railway has the track conditions, such as irregularities, rail joints, turnout, level crossing, transition curves and super-elevation ramps, which cause vibrations. Generally, the ride comfort for the train is evaluated by using the vibrations.

In this study, vibration accelerations have been measured in the cabin rooms of locomotives, such as DL(Diesel-electric Locomotive), DHC(Diesel Hyduralic Car) and NEL(New-Electric Locomotive) when running on the Kyoungbu conventional line. And then, their ride comforts has been analyzed and evaluated by statistical method according to UIC 513R.

1. 서 론

1.1. 연구배경 및 목적

전 세계적으로 많은 국가들이 겪고 있는 석유에너지로 인한 심각한 환경오염문제와 교통정체 문제 그리고 점차 고갈되어가는 에너지원으로 인한 비용증가문제로 인해 프랑스, 독일, 일본 등의 이른바 철도 선진국에서는 일찍부터 대체 교통수단으로 철도교통을 주목하고 연구・개발하고 있다. 철도 교통은 안전성, 정시성(定時性) 및 환경 친화성 등의 측면에서 다른 교통수단보다 많은 장점을 가지고 있다. 철도 교통이 다른 교통수단보다 좀 더 경쟁력을 강화하기 위해서는 열차의 속도 및 여객수송의 품질 향상에 대한 연구가 중요하다. 특히 여객수송의 품질을 향상시키기 위해서는 승객의 승차감을 일정한 수준이상으로 향상시키는 것이 필수적이기 때문에 그동안 여객수송의 관점에서 승객을 위한 철도차량의 승차감 평가에 관한 연구는 꾸준히 계속 되어왔다. 하지만 승객이 아닌 항상 철도차량을 운행하는 승무원의 관점에서의 철도차량 승차감에 대한 연구는 아직까지 미비한 실정이다.

국내 철도는 경부선과 호남선 및 기타 여러 운행선로 등을 포함한 전국 80개 노선에 3391.6Km의 거리를 운행하고 있으며 이 중 일반철도는 운행선이 3,1512Km, 1일 열차의 운행횟수는 473회에 달한다.(2007.10.1 기준) 고속철도보다 상대적으로 긴 운행시간과 많은 운행횟수, 그리고 운행속도나 운행조건 상 상대적으로 좋지 않은 환경에서 운행되는 기존선 일반 철도차량의 경우 운전실의 승차감이 승무원에게 많은 영향을 끼치게 되므로 열차의 안전운행을 책임질 승무원의 작업공간인 운전실에서의 승차감 평가는 반드시 수행되어야 한다. 국내 철도의 여건

† 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 석사과정
E-mail : em-choi@hanmail.net
TEL : (02)795-0035
* 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원
** 정회원, 서울산업대학교 자동차공학과, 조교수

상 모든 구간을 운행하는 철도 차량의 운전실 승차감을 측정하기에는 무리가 있으므로 철도차량의 운행이 가장 빈번한 기존선 경부선(수원-천안)을 운행하는 철도차량(디젤전기기관차(DL, Diesel-electric Locomotive), 새마을 동차(DHC, Diesel Hyduralic Car or PP, Push-Pull), 신형전기기관차(NEL, New-electric Locomotive))의 운전실을 대상으로 국내 기존선의 경부선(수원-천안)을 상하방향으로 주행 시 발생하는 진동가속도를 측정하고, 그 결과를 UIC 513R 규격에서 제시하는 통계적 방법에 의한 승차감 평가방법을 이용하여 운전실 승차감을 분석 및 평가하였다.

2. 승차감 평가방법 및 평가기준

2.1. 승차감 평가방법 및 평가기준

철도분야의 승차감은 다양한 평가방법으로 각종 규격에서 제시하고 있으며, 그 종류 중 가속도 실효값 이용방법, 가속도 신호의 통계적 평가방법, Sperling이 제안한 Wz 방법 등이 주로 사용되고 있다. 이 중 본 연구에서는 UIC 513R 규격에 따라 운전실의 평균승차감을 측정하고 평가하였다. Fig. 1은 철도차량에 대한 승차감의 평가지수를 계산하는 흐름도를 나타낸 것이다. 운전실 차체 중앙바닥 및 의자 중앙에 설치된 3축 가속도 센서로 측정된 가속도 신호를 저주파 밴드 필터를 통과시켜 샘플링 동안에 발생할 수 있는 신호왜곡에 따른 오차를 제거시킨 후에 디지털 신호로 변환시킨다. 디지털 신호로 변환된 1개 블록(5초 동안 측정 데이터)의 신호에 대해 퓨리에 변환을 사용하여 주파수 영역으로 변환시킨 후에 필요한 주파수 범위(0.4~80Hz)에서 각 주파수에 대한 진동가속도의 파워를 구한다. 동일한 방법으로 연속적인 60개 블록에 대해 각 주파수에 대한 진동 가속도의 파워를 계산하고, 계산된 60개 블록의 진동 파워에 대해 주파수 보정을 행한 후에 실효값 (Root mean square)을 구한다. 60개 진동 가속도의 실효값에 대한 누적빈도가 95 %일 때의 실효값을 사용하여 승차감 지수를 계산하게 된다.

UIC규격에 의한 평가는 x, y, z 방향에 대해 해당 방향의 적합한 주파수 보정이 완료된 60개 블록의 실효값 중에서 누적빈도가 95%인 실효값을 사용하여 식(1)로 부터 승차감 지수를 구한 후, Table 1의 평가기준에 따라 승차감을 평가하게 된다.

$$N_{MV} = 6\sqrt{(A_{wx95})^2 + (A_{wy95})^2 + (A_{wz95})^2} \cdots (1)$$

Table 1 UIC evaluation scale

Ride index(N)	Ride comfort
~ 1	Very comfortable
1 ~ 2	Comfortable
2 ~ 4	Medium
4 ~ 5	Uncomfortable
5 ~	Very uncomfortable

2.2. 주파수 보정곡선

동일 크기의 강도를 갖는 진동이 인간에게 작용하였을 때에 인간이 느끼는 감응은 진동주파수에 따라 차이를 나타내며, 이를 함수화 시킨 것이 주파수 보정곡선이다. Fig.2는 수직 방향 및 수평방향에 대한 주파수 보정곡선으로 수직방향은 4~16.5 Hz에서, 수평방향은 0.6~2 Hz(주파수 보정치 0.9이상)에서 가장 민감함을 알 수 있다.

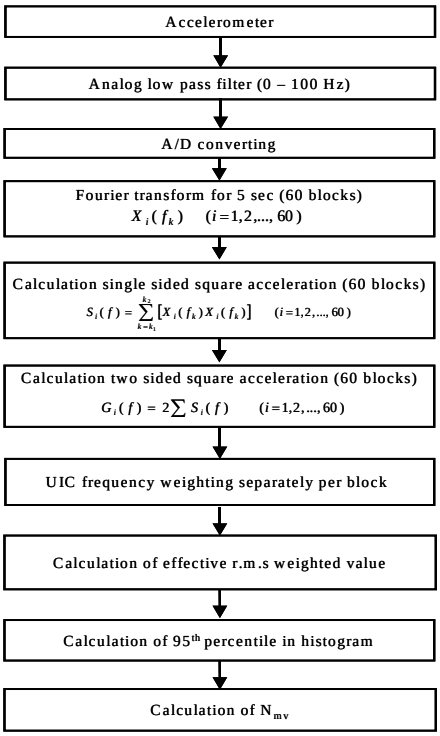

Fig. 1 Flow chart of the ride comfort evaluation procedure for railway vehicles

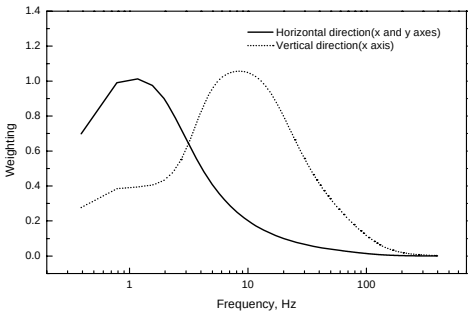

Fig. 2 UIC frequency weight function

3. 승차감 측정 평가 및 분석

3.1. 승차감 측정 계측시스템

승차감을 평가하기 위한 계측시스템은 한국철도기술연구원에서 이미 개발하여 확보하고 있는 Fig. 3의 승차감 측정시스템을 사용하였으며, 차체 진동특성을 파악하기 위해 사용된 센서는 의자와 운전실 중앙에 설치할 3축 가속도계가 사용되었다. 이에 대한 자세한 사양은 Table2와 같다.

Fig. 3 Experimental set-up for ride comfort test

Table 1 Specifications of ride comfort measuring system

No.	Item	Specification	Function
1	FFT Board	- Input 8ch - 100mv-16V Input - AC, DC, ICP Amp - 90dB Aliasing Filter - 16bits ADC - Bandwidth: 5Hz-80kHz - Sampling speed : 2x Bandwidth - FFT speed: 5ms for 1K	- AC amp. - DC amp. - ICP amp. - Filter - A/D converter - FFT analyzer
2	Accelerometer	- 3-axis seated type - ICP Type - Sensitivity: 1mV/(m/s^2)	

3.2. 승차감 측정 결과 분석

3.2.1. 디젤전기기관차(DL, Diesel-electric Locomotive)

현재 국내 철도 영업선에서 운행하는 디젤전기기관차는 크게 4400, 7000, 7100, 7200, 7300, 7400, 7500호대 7종류 정도로 분류할 수 있으나 측정구간이 경부선(수원-천안)이므로 디젤전기기관차의 종류 중 가장 운행이 빈번한 7300호대와 7400호대를 중심으로 승차감을 측정하였다. DL7300호대와 7400호대는 7400호대 디젤 전기기관차는 약간의 차이가 있지만 그 밖의 제원은 모두 동일하다. 두 종류의 차량운행 시 승차감의 차이가 있는지 비교해보기 위해 두 종류의 운전실 승차감 측정을 하였다. 디젤기관차 7400호대가 경부선(천안-수원)을 최대 133.6km/h, 최소 124.7km/h, 평균 129.2km/h의 속도로 주행하고 있을 때 아래의 Fig. 4는 운전실의 의자에서 측정된 가속도 신호로 측정치를 Fig. 5는 약 5 sec 간격으로 계산된 가속도 신호의 실효치를 나타낸 것으로 수직방향의 가속도 신호가 다른 방향보다 크므로 승차감의 좋고 나쁨은 수직 방향의 가속도에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

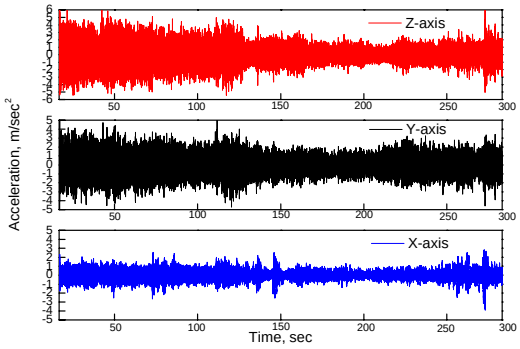

Fig. 4 Acceleration at 129.2km/h Original signal

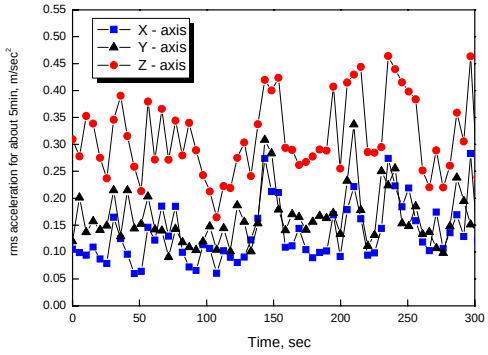

Fig. 5 Acceleration at 129.2km/h Root mean square signal

Fig. 6은 DL 7300호대와 7400호대가 경부선(수원-천안)을 평균속도 100km/h와 130km/h로 상하방향으로 주행 시 평균 승차감 지수를 나타낸 것이다. 이를 통해 보면 디젤전기기관차는 기종과 상하방향, 운행속도와 관계없이 비교적 비슷한 Medium의 승차감 지수(Ride index(N) : 2~4)를 나타내고 있음을 알 수 있다.

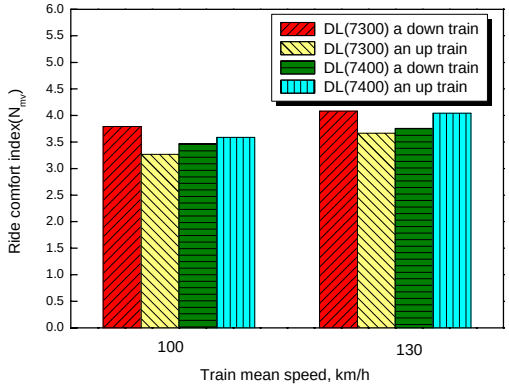

Fig. 6 Ride comfort of Diesel-electric Locomotive(DL)

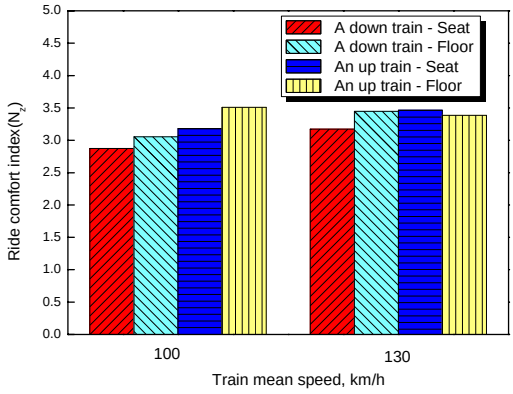

Fig. 7 Relation between seat and floor(Z-axis)

Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 승차감의 좋고 나쁨은 수직 방향의 가속도에 의해 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 이번엔 운전실의 의자와 바닥은 어떠한 차이가 있는지 알아보기 위해 디젤전기기관차의 상하방향(수원-천안간) 운행 시 의자와 바닥의 승차감 지수를 Z축(수직방향)의 가속도 지수를 통해 비교해 보았다. Fig. 7은 상하방향 운행 시 의자와 바닥의 Z축 가속도를 비교한 것이다. Fig. 7을 보면 상하방향 모두 바닥에서의 Z축의 가속도가 의자에서의 Z축 가속도보다 좋지 않은 것을 알 수 있다. 이를 통해 바닥에서의 평균 승차감 지수가 의자에서의 평균 승차감 지수보다 좋지 않을 것으로 예측할 수 있다.

3.2.2. 새마을 동차(DHC, Diesel Hyduralic Car or PP, Push-Pull)

새마을 동차(DHC, Diesel Hyduralic Car)는 초기에 도입된 차량은 6량 1편성이었으나 이후 출력증강을 통해 8량 1편성으로 도입되었다. 1987년 도입 차량의 내구연한 20년에 해당하는 2007년부터 차례로 퇴역할 예정이다. 모두 128량이 제작 되었다.

Fig. 8은 새마을 동차의 경부선(수원-천안)을 평균속도 100km/h와 130km/h로 상하방향으로 주행 시 평균 승차감 지수를 나타낸 것이다. 이 그래프를 통해 보면 새마을 동차는 상하방향, 운행속도와 관계없이 비교적 비슷한 Medium의 승차감 지수(Ride index(N) : 2~4)를 나타내고 있음을 알 수 있다. 하지만 새마을 동차의 승차감 지수는 디젤전기기관차의 승차감 지수 결과보다 현저히 낮은 수치를 나타내고 있다. 이를 통해 새마을 동차가 디젤전기기관차보다 승차감이 나을 것이라는 추측을 할 수 있다.

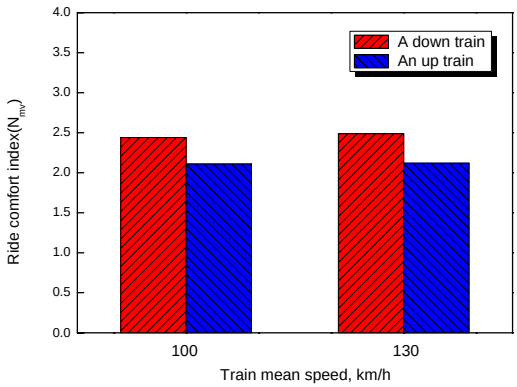

Fig. 8 Ride comfort of Diesel Hyduralic Car(DHL)

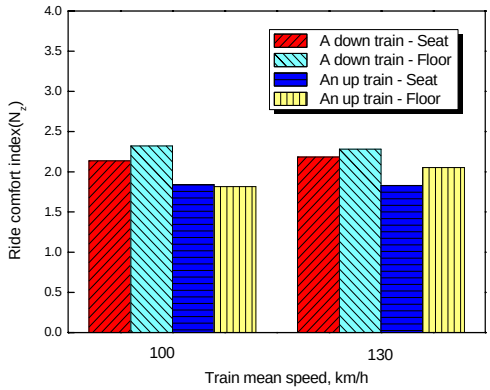

Fig. 9 Relation between seat and floor(Z-axis)

새마을 동차의 상하방향 운행 시 의자와 바닥의 승차감 지수를 Z축(수직방향)의 가속도 지수를 통해 비교해 보았다. Fig. 9는 상하방향 운행 시 의자와 바닥의 Z축 가속도를 비교한 것이다. 이를 보면 상하방향 바닥에서의 Z축의 가속도와 의자에서의 Z축 가속도보다 약간 높음을 알 수 있다. 이를 통해 바닥에서의 승차감과 의자에서의 승차감은 비교적 근소한 차이가 날 것으로 예측할 수 있다.

3.2.3. 신형전기기관차(NEL, New-electric Locomotive)

8200호대 전기 기관차는 한국철도공사 소속 8100호대 전기 기관차의 개선형이다. 전차선에서 공급받은 전류를 정류하여 객차 공급 허용 전류인 440V로 객차에 전력을 공급할 수 있도록 하는 SIV가 장착되어 발전차를 견인할 필요가 없으며, 최대 12대의 객차까지 전력을 공급할 수 있는 차량이다. 최고속도는 150 km/h이나 간단한 설계 변경만으로도 220 km/h까지 증속하는 것이 가능하다. 이러한 장점 때문에 기존선의 고속화와 에너지 절감 차원에서 유리한 면을 가지고 있다.

Fig. 10은 신형전기기관차가 경부선(천안-수원)을 최대 105.7km/h, 최소 92.4km/h, 평균 99.1km/h의 속도로 주행하고 있을 때 운전실의 의자에서 측정된 가속도 신호로 약 5 sec 간격으로 계산된 가속도 신호의 실효치를 나타낸 것이다. 좌우 방향과 수직 방향의 가속도 신호가 전후 방향보다 크므로 승차감의 좋고 나쁨은 좌우 방향과 수직 방향의 가속도에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 일반적으로 승차감에 많은 영향을 미치는 z축의 가속도 수치에 못지않게 y축의 가속도 수치가 좋지 않다. 이로 인해 평균 승차감이 저하될 것으로 예측할 수 있다.

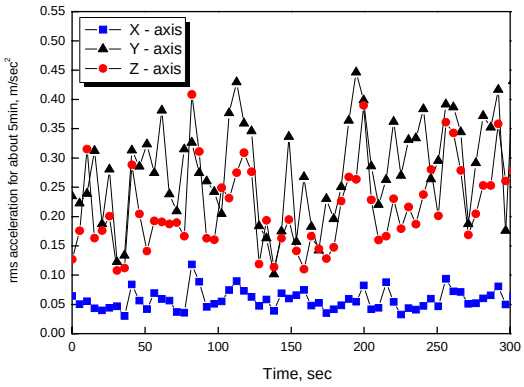

Fig. 10 Acceleration at 99.1km/h Root mean square signal

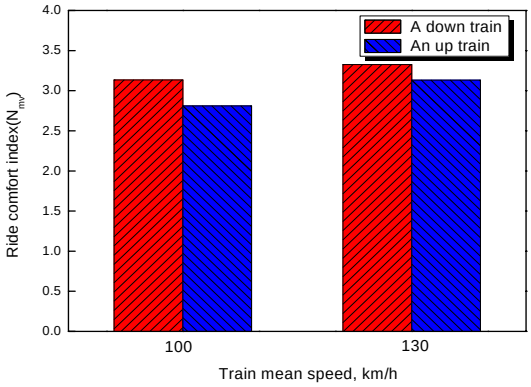

Fig. 11 Ride comfort of New-electric Locomotive(NEL)

Fig. 11은 신형전기기관차가 경부선(수원-천안)을 평균속도 100km/h와 130km/h로 상하방향으로 주행 시 평균 승차감 지수를 나타낸 것이다. Fig. 11를 통해 보면 신형전기기관차 또한 상하방향, 운행속도와 관계없이 비교적

비슷한 Medium의 승차감 지수(Ride index(N) : 2~4)를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12~13는 상하방향 운행 시 의자와 바닥의 Y축과 Z축의 가속도를 비교한 것이다. 다른 차종에 비해 일반적으로 승차감에 많은 영향을 미치는 Z축의 가속도 수치보다 Y축의 가속도 수치가 좋지 않았고 이로 인해 평균 승차감이 저하됨을 확인할 수 있었다. 이는 상대적으로 가벼운 차체의 중량과 의자 등의 차량제원에서 오는 차이라고 추측할 수 있다.

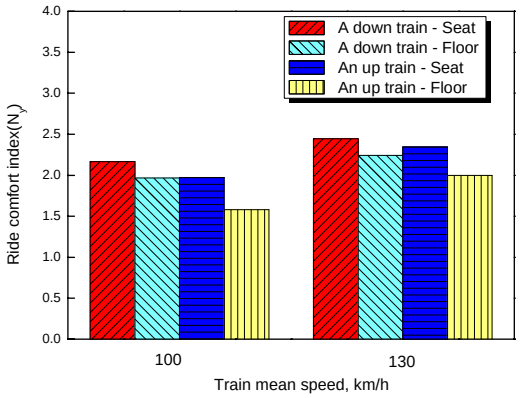

Fig. 12 Relation between seat and floor(Y-axis)

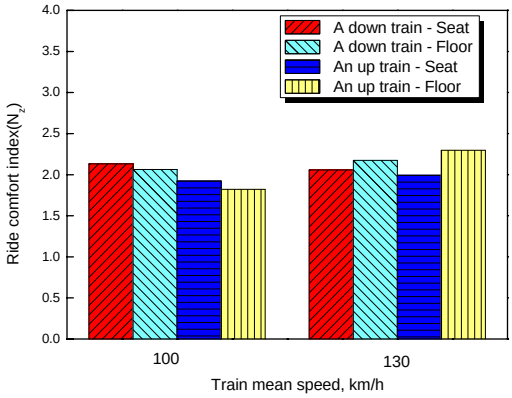

Fig. 13 Relation between seat and floor(Z-axis)

3.2.4. 승차감 평가 결과와 설문조사와의 비교

앞서 디젤전기기관차와 새마을 동차, 신형전기기관차의 운전실의 승차감을 평가하기 위해 운행속도별, 방향별 등의 측정치를 비교하여 분석해 보았다. 그렇다면 실제 승무 시 승무원들이 느끼는 승차감은 진동가속도를 측정하여 평가한 운전실의 승차감 결과와 얼마나 일치하는지 한국철도공사 서울지사 용산기관차 승무사업소의 승무원을 대상으로 설문조사하였다. Fig. 14~16는 그 결과를 나타낸 것이다. 디젤전기기관차의 경우 실제 승무 시 승차감이 측정 평가한 승차감보다 좋지 않은 결과를 보이고 있으며, 새마을 동차와 신형전기기관차는 좀 더 나은 것으로 나타나고 있다.

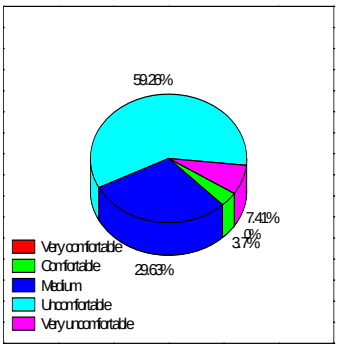

Fig. 14 A survey about ride comfort of Diesel-electric Locomotive(DL)

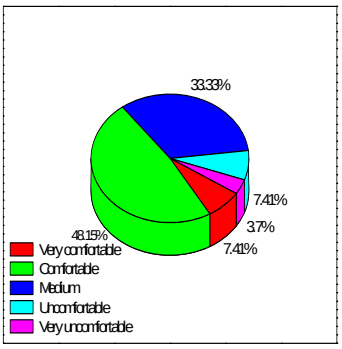

Fig. 15 A survey about ride comfort of Diesel Hyduralic Car(DHL)

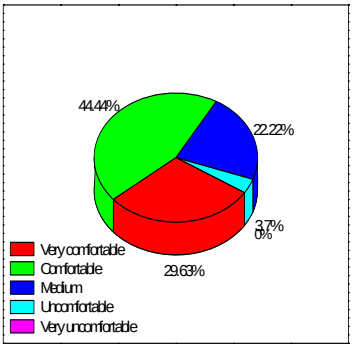

Fig. 16 A survey about ride comfort of New-electric Locomotive(NEL)

4. 결 론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 디젤전기기관차 7300호대와 7400호대로 운행 시 종류와 상하방향, 운행속도와 관계없이 비교적 비슷한 승차감 지수를 나타내고 있다는 것을 평가결과로 확인할 수 있었다. 그러므로 다양한 종류의 디젤전기기관차 운전실의 승차감을 말할 때는 종류와 방향, 운행속도를 굳이 분류하여 나타내지 않아도 됨을 알 수 있었

다.

(2) 디젤전기기관차의 운전실 승차감 지수는 UIC 513R의 통계적 방법에 의한 평가기준에 의해Medium(Ride index(N) : 2~4)임을 확인할 수 있었다. 하지만 Uncomfortable(Ride index(N) : 4~5)에 가깝기 때문에 개인차로 인해 불편함을 느낄 수 있다고 판단된다.

(3) 디젤전기기관차의 운행 시 상하방향 모두 바닥에서의 Z축의 가속도가 의자에서의 Z축 가속도보다 좋지 않은 것을 측정치로 확인할 수 있었다. 이를 통해 바닥에서의 평균 승차감 지수가 의자에서의 평균 승차감 지수보다 좋지 않을 것으로 판단된다.

(4) 새마을 동차의 운전실 승차감 지수는 UIC 513R의 통계적 방법에 의한 평가기준에 의하며 방향 및 운행속도와 관계없이Medium(Ride index(N) : 2~4)임을 알 수 있었다. 새마을 동차의 승차감 지수는 디젤전기기관차의 승차감 지수 결과보다 나은 결과를 나타내고 있으며, Comfortable(Ride index(N) : 1~2)에 좀 더 가까운 것을 알 수 있었다. 이를 통해 새마을 동차가 디젤전기기관차보다 승차감이 나을 것임을 알 수 있었다.

(5) 새마을 동차의 상하방향 운행 시 의자와 바닥의 승차감 지수를 Z축(수직방향)의 가속도 지수를 통해 비교해 보면 바닥에서의 Z축의 가속도와 의자에서의 Z축 가속도보다 약간 높음을 알 수 있다. 이를 통해 바닥에서의 승차감과 의자에서의 승차감은 큰 차이가 없을 것으로 판단된다.

(6) 신형전기기관차 운전실 승차감 지수는 상하방향, 운행속도와 관계없이 비교적 비슷한 Medium(Ride index(N) : 2~4)임을 알 수 있었다. 또한, 신형전기기관차는 다른 차종에 비해 일반적으로 승차감에 많은 영향을 미치는 z축의 가속도 수치보다 y축의 가속도 수치가 좋지 않았고 이로 인해 평균 승차감이 저하됨을 확인할 수 있었다.

(7) 실제 승무 시 느끼는 승차감을 설문조사하여 진동가속도를 측정하여 평가한 운전실의 승차감 평가 결과와 비교해 본 결과 디젤전기기관차의 경우 실제 승무 시 승차감이 측정 평가한 승차감보다 좋지 않은 결과를 보이고 있으며, 새마을 동차와 신형전기기관차는 좀 더 나은 것으로 나타나고 있다. 이는 차량의 노후와 운전실의 의자 등으로 추측할 수 있으나 정확한 원인은 좀 더 신중히 검토해야 할 것이다.

참고문헌

(1) 김영국 등, 2002, “신경회로망 모델을 이용한 철도 현가장치 설계변수 최적화”, 소음진동공학회논문집, 제12권, 제7호, 한국소음진동공학회.

(2) Garg, V. K., et al., 1984, Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press.

(3) Cleon, L. M., et al., 1996, Evaluation of Passenger Comfort in Railway Vehicles, Journal of Low Frequency Noise and Vibration , Vol. 15, No. 2.

(4) International Union of Railways, 1994, Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in relation to Vibration in Railway Vehicles, UIC Code 513R.

(5) Suzuki, H., 1998, Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 212 Part F.

(6) 김영국 등, 1999, 철도용 승차감 측정시스템 개발, 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회.

(7) 김진기 등, 2001, "인체진동을 고려한 국내의 대중 교통 수단의 진동 환경 평가에 관한 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제11권, 제7호, pp. 267~274.

(8) Y.G. Kim, et al., 2003, "Correlation of Evaluation Methods of Ride Comfort for Railway Vehicles", Proc. Instn. Mech. Engrs(IMechE), Vol. 217 Part F, pp. 73~88.

(9) 김영국 등, 2004, “UIC 513R에 따른 통계적 방법을 이용한 고속철도 차량의 승차감 분석 및 평가”, 한국철도학회논문집, 제7권, 제4호, pp. 332~338

(10) 김영국 등, 2003, “시운전시험을 통한 한국형 고속전철 차체진동 특성의 분석 및 평가”, 한국철도학회논문집, 제6권, 제4호, pp. 286~293.