

시운전 시험을 통한 한국형 고속열차의 승차감 변화추세에 관한 연구

김영국[†] · 목진용 · 김석원 · 박찬경 · 김기환 · 박태원*

Examination on the variation of ride comfort for korean high speed train through on-line test

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

Abstract

In this paper, we introduce the variation of ride characteristics for HSR 350x(Korea High Speed Train project) through on-line test during about 3 years. The concept of term "ride comfort" is equivocal. Generally it is evaluated as the vehicle vibration. The ride comfort for HSR 350x has been assessed by statistical method according to UIC 513R. The testing results show that HSR 350x has no problems from the viewpoint of the comfort ride on the high speed line and conventional line and that 1st and 2nd suspensions play an important role in the ride characteristics for high speed train.

Key Words : Korean high speed train(HSR 350x), statistical method, on-line test, ride comfort, ride index(Nmv)

1. 서 론

세계적으로 20세기 말에 300 km/h 이상의 고속철도가 개발되어 영업운전을 함에 따라 한동안 주춤했던 철도가 다시 르네상스를 맞이하고 있다. 이와 더불어 100년 이상의 역사를 갖고 있는 국내 철도가 2004년 4월 고속철도의 개통으로 한 단계 도약하는 계기가 마련되었고, 고속철도가 서울-부산과 서울-목포의 여행시간을 3시간이내로 단축시킴에 따라 전국은 만나질 생활권이 되어 지역 간의 교류가 보다 원활히 진행될 수 있게 되었다. 미약했던 철도의 국내기술로 인해 고속철도의 개통은 해외로부터 도입된 기술을 통해 이루어졌지만, 고속철도에 대한 독자적인 기술을 확보하기 위해 국가 전략적 사업의 하나로 고속전철기술개발사업(G7)이 1996년부터 시작되어 2002년에는 Fig. 1과 같은 350 km/h급의 7량 1편성인 한국형 고속열차 시제차량이 제작되어 3년여에 걸친 시운전 시험이 진행되고 있다. 2004년 12월까지 총 138회의 시운전시험이 진행되어 Fig. 2에서 보는 바와 같이 44,500 km의 거리를 주

행 완료하였고 개발 열차의 실용화가 가능하도록 신뢰성의 확보를 위해 2005년까지 총 120,000 km의 거리를 주행할 예정이다. 또한, 개발열차에 대한 속도항상이 진행되어 Fig. 3에서 보는 바와 같이 2004년 12월 16일 국내에서 처음으로 350 km/h 주행에 성공하여 일본, 독일, 프랑스 등의 철도 선진국과 같은 수준의 고속열차를 국내에서도 확보하게 되었다. 철도개발 초기에는 시제차량의 기능과 성능이 설계 요구사항고 시운전 시험이 진행되었으며, 현재는 각 장치의 기능과 성능의 만족함의 확인은 물론 신뢰성의 확보 차원에서 시운전 시험이 진행되고 있다. 시운전 시험은 주행성능,

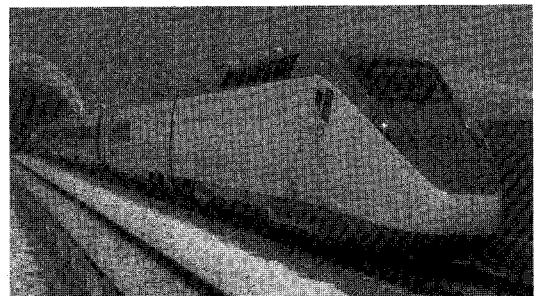


그림 1. 한국형 고속열차 시제차량
Fig. 1. Prototype of Korean high speed train.

한국철도기술연구원(Korea Railroad Research Institute)
*이주대학교 기계공학과(Aiou University Mechanical Department)
[†]Corresponding author: ygkim@krii.re.kr
(Received : January 12, 2005, Accepted : January 21, 2005)

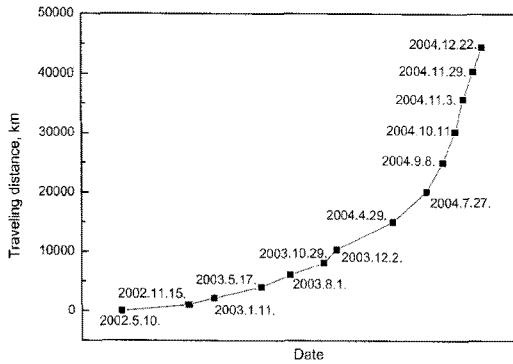


그림 2. 한국형 고속열차의 주행거리 변화
Fig. 2. Variation of traveling distance for HSR 350x.

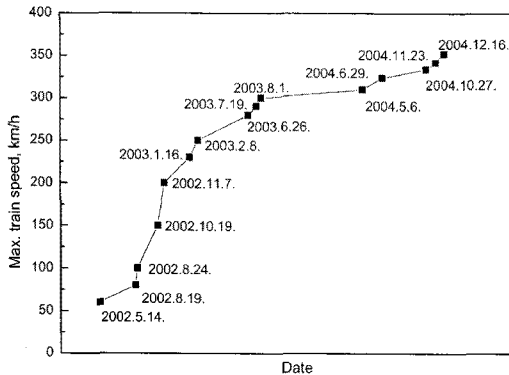


그림 3. 한국형 고속열차의 최고속도 변화
Fig. 3. Variation of max. speed for HSR 350x.

대차주행성능, 차체진동성능, 제동성능 등이 포함된 16 개의 성능(세부시험 45개)을 확인하기 위해 차상 시험(열차 내부, 11개 성능의 31개 세부시험)과 지상 시험(열차 외부, 5개 성능의 14개 세부시험)으로 구분되어 실시되었고, 본 연구에서의 관심사인 승차감 시험은 차체진동성능의 일부로 수행되고 있다.

철도 교통은 많은 장점을 갖고 있음에도 불구하고 휠/레드 접촉(wheel/rail contact), 구동모터(traction motor), 콤프레셔(compressor), 각종 전기접점 등에 의한 기계적인 진동^[2-4]과 이로 인한 소음이 발생된다. 이렇게 발생한 진동은 승객의 승차감을 악화시키고 차량에 장착된 각종 부품과 기기를 파손시키는 원인이 되기도 한다. 또한, 심한 진동은 고속철도 차량의 주행 안전성에 심각한 문제를 발생시킬 수도 있다. 일반적으로 철도차량에 대한 승차감은 차량의 진동 가속도를 측정 한 후 인간의 등가 감응량으로 정량화시켜 평가하는 방법을 사용하고 있으며^[5-8], HSR 350x에 대한 승차감의 평가는 앞으로 가장 많이 사용될 것으로 예상되는 UIC

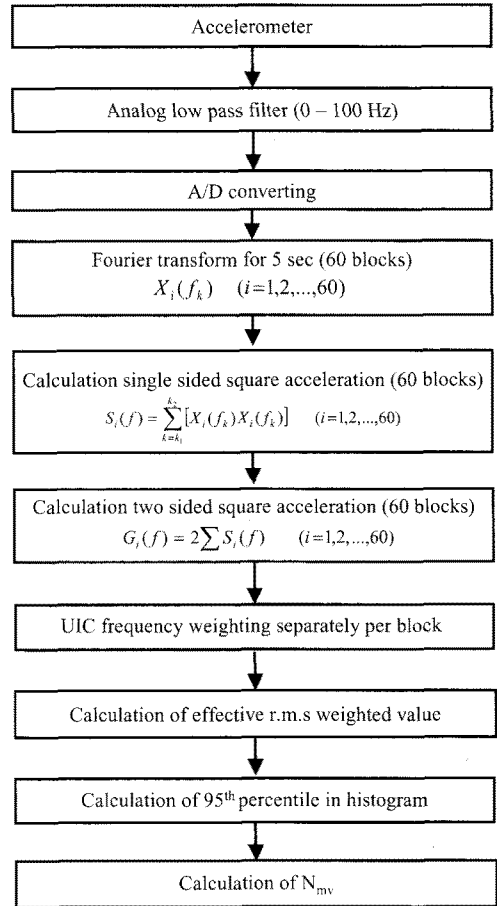


그림 4. UIC 513R에 따른 승차감 평가 흐름도
Fig. 4. Flowchart of ride comfort evaluation according to UIC 513R.

513R 규격에 따른 평가절차와 평가기준을 사용하도록 되어 있다^[1]. 본 논문에서는 3년여에 걸친 시운전 시험을 통한 승차감 시험 결과를 분석하여 그 변화추세를 파악하여 한국형 고속열차 시제차량에 대한 승차감 특성을 평가하고 현가장치가 고속철도 차량의 승차감에 주는 영향을 확인하고자 한다.

2. 승차감 특성 평가

철도에서의 승차감 평가는 “ISO 2631규격”과 Sperling이 제안한 “승차감 지수(Wz)”로 평가하는 Wz 평가법이 오랫동안 주로 사용되어 왔으나, 최근에는 국제철도협회(International Union of Railways, UIC)와 국제표준위원회(International Standardization Committee, ISO)에서 UIC 513R x, y, z 방향에 대한 블록의 진동

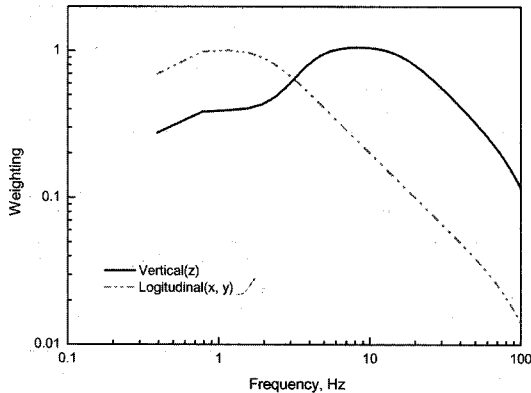


그림 5. UIC 513R에 따른 주파수 보정곡선
Fig. 5. Frequency-weighting curve according to UIC 513R.

가속도 파워를 해당 평가법에 따른 Fig. 5의 주파수 보정곡선을 통한 주파수 보정을 행한 후에 각 방향에 대한 진동 가속도 실효값을 식(1)로부터 구한다.

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

여기서, G_i 는 가속도 파워, B_i 는 Fig. 5의 주파수 보정곡선이다. 통계적인 평가방법은 x, y, z 방향에 대해 식 (1)에 의해 계산된 5초 간격의 진동가속도 실효값 60개(연속 5분 동안)를 이용하며, 이 60개 실효값 중에서 누적빈도가 95%인 실효값($A_{wx95}, A_{wy95}, A_{wz95}$)을 사용하여 승차감 지수 N_{mv} 를 식(2)와 같이 구하며, 이 승차감 지수를 이용하여 철도차량의 승차감을 평가하게 된다.

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

3. 승차감 특성 분석

3.1. 한국형 고속열차 시제차량

한국형 고속열차 시제차량(HSR 350x)은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 7량(동력차 + 동력객차 + 객차 3량 + 동력객차 + 동력차) 1편성으로 구성된다. 대차는 동력차 대차, 동력객차 대차 및 관절형 대차의 3종류로 총 10대의 대차가 7량의 차체를 지지하고 있으며, 이들은 1차 현가 장치와 2차 현가 장치로 구성되어 있다. 이들 현가 장치의 성능은 승객의 승차감을 악화시키는 데에 가장 큰 영향을 주는 휠/궤도 접촉에 의해 발생하는 진동을 감쇄시키는 중요한 역할을 한다. 동력차는 2대의 동력차 대차에 의해 지지되어 있으며, 동력객차는 한쪽

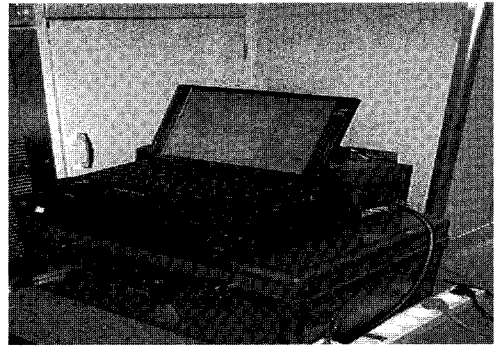


그림 6. 승차감 측정시스템이 이용한 시험전경
Fig. 6. Experimental set-up of measuring system ride comfort test.

이 동력객차 대차가, 다른 쪽은 객차와 연결된 연결부를 관절형 대차가 지지하고 있다. 또한, 객차는 다른 객차와 연결된 연결부를 관절형 대차에 의해 양단이 지지되어 있다. 동력차와 동력객차는 서로 상대적인 운동을 할 때 발생하는 충격을 완충시키는 버퍼(buffer)와 견인력을 전달하는 견인후크(draw hook)로 연결된다. 객차와 객차는 주행 중에 발생하는 객차간의 상대 운동이 허용되도록 고정링(fixed ring)과 이동링(carrier ring)이 조합된 관절형 연결장치로 연결되어 있다^[4].

3.2. 한국형 고속열차 시제차량에 대한 승차감 특성 분석

승차감을 평가하기 위한 계측시스템은 한국철도기술 연구원에서 개발하여 확보하고 있는 Fig. 6의 승차감 측정시스템^[1]을 사용하였다. 이 승차감 측정시스템은 샘플링 주파수가 400 Hz이고, 2048개의 데이터를 사용하여 DSP에서 푸리에 변환을 수행하기 때문에 2장에서 정의한 1블럭은 실제로 5초가 아닌 5.12초이며, 통계적 방법에 사용된 60개 블럭은 5.12분에 해당한다^[1]. 또한, 이 논문에서 사용된 승차감의 평가 위치는 중간 객차(TT3)의 후단부 차량바닥에서 측정하였다.

3.2.1. 주행속도 분석

Fig. 7은 시제차량의 주행 속도선도와 승차감 평가에 이용된 진동 가속도가 얻어진 구간에 대한 시제차량의 주행속도 변화를 나타낸다. Fig. 7(a)는 2004년도에 실시된 광명-서대원 구간의 주행 속도선도에 대한 한 예이며, Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)와 같은 주행 속도선도에서 승차감 평가를 수행한 5.12분 동안 주행 속도변화가 적은 구간에 대한 주행속도를 통계처리를 수행한 결과로 시운전 시험을 수행한 연도에 따라 구분하여 나타낸 것이다. 여기서 주행속도 변화는 각 연도마다 얻어

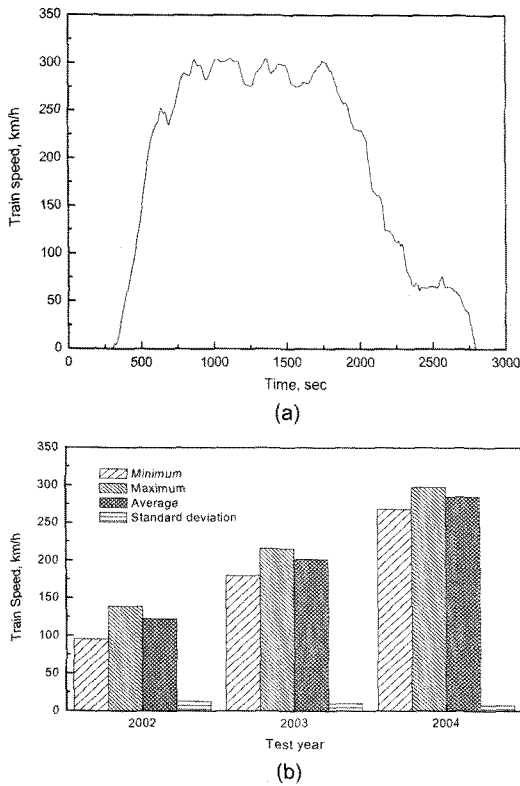


그림 7. 주행속도, (a) 시간에 따른 주행속도 변화, (b) 연간 주행속도에 대한 통계처리 결과
 Fig. 7. Train speed, (a) train speed according to time, (b) statistical result for train speed according to test year.

진 전체 승차감 시험 횟수에 대한 평균을 나타낸 것으로 그 예로써 Fig. 7(b)에서 2002년의 결과는 총 9번의 결과에 대한 평균으로 평균 주행속도는 2002년 122 km/h(표준편차 12.82 km/h), 2003년 201 km/h(표준편차 10.06 km/h) 및 2004년 284 km/h(표준편차 7.68 km/h)로 향상되었으며, 최대 주행속도도 2002년 138 km/h, 2003년 215 km/h(표준편차 10.06 km/h) 및 2004년 297 km/h로 향상되었다. 이는 한국형 고속열차 시제차량이 시간이 지남에 따라 점차적으로 안정화되고 있음을 말해 주는 단적인 예라 할 수 있다.

3.2.2. 시간변화에 따른 승차감 지수 변화 분석

Fig. 8은 시간의 경과에 따른 한국형 고속열차 시제차량에 대한 중간객차에서의 승차감 지수를 나타낸 것으로 (a)는 2003년 이전, (b)는 2004년 1월과 2월, (c)는 2004년 4월 이후의 시운전 시험을 통해 얻어진 승차감 지수이다. 여기서, 심볼 □, △는 측정결과이며, 실선이 이 측정결과로부터 구한 회귀곡선이다. Fig. 9

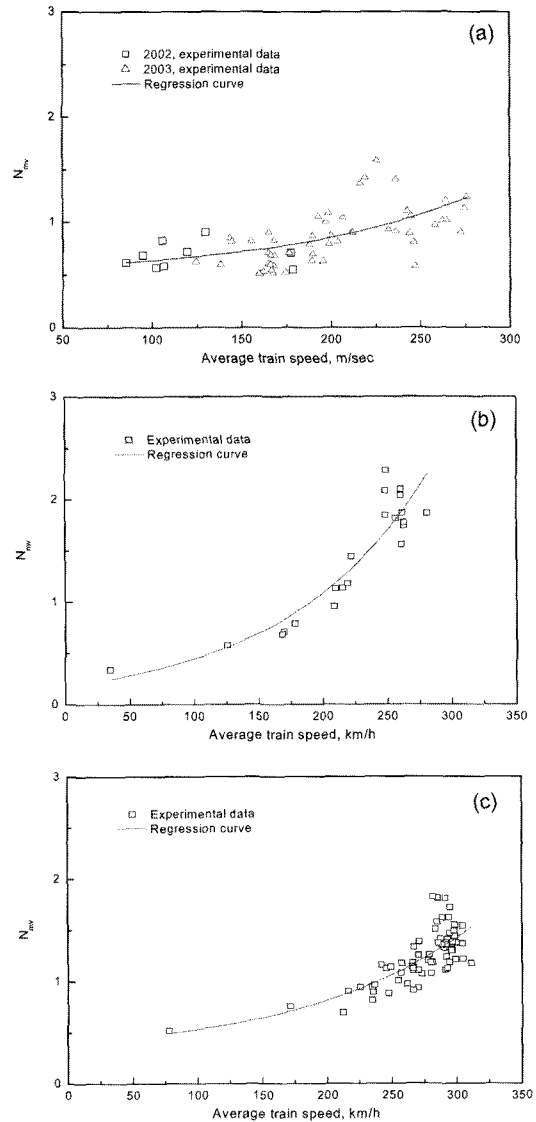


그림 8. 시간에 따른 승차감 지수의 변화, (a) 2003년 이전, (b) 2004년 1월 - 2월, (c) 2004년 4월 이후
 Fig. 8. Ride index variation according to time, (a) before 2003, (b) Jan. 2004 - Feb. 2004, (c) after Mar. 2004

는 Fig. 8에서 구해진 승차감 지수에 대한 회귀곡선을 비교한 것이다. 2003년 이전의 결과에서는 평균 주행속도 275 km/h까지 승차감 지수를 구할 수 있었으며, 승차감 기준인 UIC 513R에 따른 “Deluxe rolling stock”의 기준치 2이내를 만족하고 있다. 그러나, 2004년 1월과 2월에 수행된 시운전 시험에 대한 승차감 결과는 Fig. 8(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 평균 주행속도 250 km/h 이하에서도 승차감 기준을 초과하고 있다.

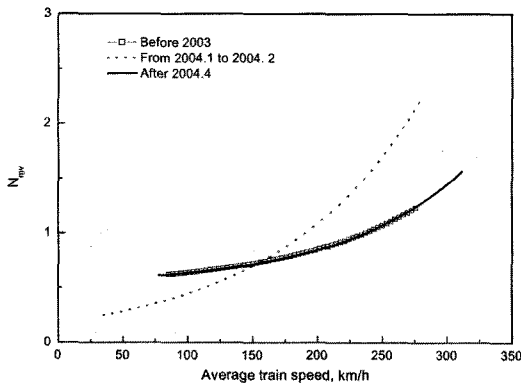


그림 9. 시간에 따른 승차감 지수의 변화 비교
Fig. 9. Comparison of ride indices variations according to time.

이러한 현상은 기존선 구간(경부선과 호남선)에서 시운전 시험을 수행한 후에 발생하였기 때문에 기존선 운행에 따른 영향을 크게 받을 수 있는 댐퍼류에 대해 점검한 결과, 댐퍼류들이 제성능을 발휘하지 못함을 확인하였다.

즉, 국내에서 제작된 댐퍼들이 초기에는 제성능을 발휘하였으나, 장시간 사용에 따라 제성능을 발휘할 수 없다는 한계성을 드러냈다. 따라서, 모든 댐퍼류를 외국의 K사 제품으로 교환한 후에 시운전 시험이 다시 수행되었으며, 그 결과가 Fig. 8(c)로 승차감 지수가 승차감 기준을 만족하고 있다. 또한, Fig. 9에서 보는 바와 같이 2003년 이전에 수행된 승차감 평가는 비록 평균속도는 275 km/h이하에서 이루어졌지만, 승차감 기준을 만족하는 댐퍼류가 교체된 후인 2004년 4월 이후의 승차감 평가 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 이는 국내 제작분인 초기의 댐퍼와 교체된 외국제품이 초기에는 거의 동일한 성능을 갖지만, 내구성에는 문제가 있다는 것을 말해준다.

4. 결 론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 시간의 경과에 따른 주행속도의 변화를 분석한 결과, 한국형 고속열차 시제차량이 시간의 경과에 따라

점차적으로 안정화되고 있음을 확인할 수 있다.

(2) 시간의 경과에 따른 승차감 특성을 분석한 결과, 승차감 특성의 변화는 별로 변화가 없음을 확인할 수 있었으며, 단지 국내 댐퍼류의 내구성 문제 때문에 일시적으로 승차감이 기준을 만족하지 못하는 경우가 발생하였다. 이는 1차 및 2차 현가장치의 댐퍼류가 승차감에 큰 영향을 줄을 승차감 특성의 평가를 통해 다시 확인할 수 있었다.

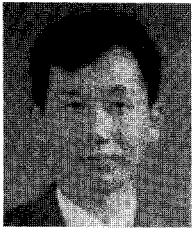
(3) 댐퍼류의 이상이 발생한 경우를 제외하고 한국형 고속열차 시제차량의 승차감은 UIC 513R에 제시된 "Deluxe rolling stock"의 승차감 기준인 2보다 작은 범위로 양호한 승차감 특성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

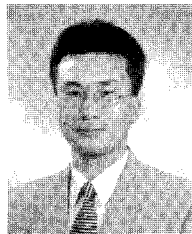
참고 문헌

- [1] G7 고속전철 시제차량 기본사양, 한국철도기술연구원, 1998.
- [2] 김영국 등, "철도 승차감 평가방법의 상호관계 분석", 소음진동공학회논문집, 제12권, 제3호, 2002.
- [3] Suzuki, H., "Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan", *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, vol. 212 Part F, 1998.
- [4] 김영국 등, "시운전 시험을 통한 한국형고속전철 차체진동 특성의 분석 및 평가", 한국철도학회논문집, 제6권, 제4호, 2003.
- [5] 김영국 등, "다기능성을 갖는 철도 차량용 승차감 측정시스템 개발", 센서학회지, 제13권, 제5호, pp. 369-377, 2004.
- [6] International Union of Railways, Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in relation to Vibration in Railway Vehicles, UIC Code 513R, 1994.
- [7] ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, 1997.
- [8] 김영국 등, "국내 고속철도 차량의 승차감에 대한 고찰", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 2003.



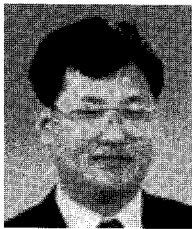
김 영 국

- 1984년 2월 아주대학교 기계공학과 졸업 (학사)
- 1986년 8월 한국과학기술원 생산공학과 졸업(공학석사)
- 2003년 8월 아주대학교 기계공학과 졸업 (공학박사)
- 현 한국철도기술연구원 책임연구원



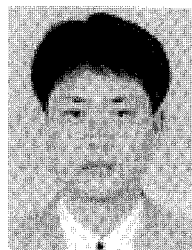
목 진 용

- 1984년 2월 아주대학교 기계공학과 졸업 (학사)
- 2000년 2월 아주대학교 기계공학과 졸업 (공학석사)
- 현 한국철도기술연구원 책임연구원
- 주관심 분야 : 판도그래프 동역학 해석 및 시험평가, 철도차량 시험평가, 각종 센서 및 인터페이스



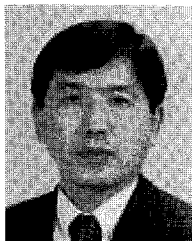
김 석 원

- 1987년 2월 서울대학교 조선공학과 졸업 (학사)
- 1989년 2월 동 대학원 조선공학과 졸업 (공학석사)
- 현 한국철도기술연구원 책임연구원



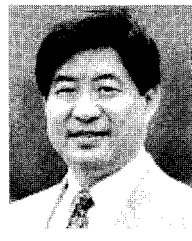
박 찬 경

- 1987년 2월 한양대학교 기계설계학과 졸업(학사)
- 1989년 2월 동 대학원 기계설계학과 졸업(공학석사)
- 2004년 2월 동 대학원 기계공학과 졸업 (공학박사)
- 현 한국철도기술연구원 선임연구원



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



박 태 원

- 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