

◆ 특집 ◆ 레일방식 철도차량의 고속화 기술

## 궤도구조에 따른 고속철도차량의 진동특성 분석

### Analysis on the Vibration Characteristics of High Speed Train according to Track Structure

허현무<sup>1,✉</sup>, 박준혁<sup>1</sup>, 유원희<sup>1</sup>

Hyun Moo Hur<sup>1,✉</sup>, Joon Hyuk Park<sup>1</sup>, and Won Hee You<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-Speed Railroad Systems Research Center, KRRI)

✉ Corresponding author: hmhur@krii.re.kr, Tel: 031-460-5245

Manuscript received: 2012.2.28 / Accepted: 2009.4.27

*To analyze the effect of the track structure on the running performance of the railway vehicle, we studied on the vibration and ride characteristics of the high speed train. As results, vibration and ride level of high speed train on the concrete bed track is more reduced than on the ballast bed track. Peak-peak value of carbody vibration on the concrete bed track at 300km/h is half of the peak-peak value of carbody vibration on the ballast bed track. Ride level on the concrete bed track at 300km/h is same level as that on the ballast bed track at 250km/h. Thus, Vibration and ride performance of the high speed train on the concrete bed track is greatly improved compared with that on the ballast bed track.*

Key Words: High Speed Train (고속철도차량), Vibration Characteristics (진동특성), Ride (승차감), Track Structure (궤도구조)

#### 1. 서론

국내 고속철도는 2004년 개통한 이후로 8년이 지났으며 누적 승객은 3억명을 달성하여 국내 대중교통의 중심으로 자리 잡고 있다. 운용선로는 기존선과 고속선으로 구성된 경부선을 비롯하여 기존선 개량구간인 호남선, 경전선, 전라선에서 운용 중에 있다. 고속철도 전용선로인 고속선은 경부선에서 1단계로 광명~동대구 구간이 먼저 개통되었으며 2단계로 2010년 동대구~부산 구간이 개통된 바 있다. 그리고 오송~목포 구간인 호남 고속선은 2017년 개통을 목표로 현재 건설 중에 있으며 전라선은 220km/h 급 인프라 개량을 거쳐 2012년 상반기 개통을 목표로 시운전 중에 있다. 또한 2020년 전국을 1시간 30분대로 연결할 수

있는 국가기간 교통망 계획을 가지고 있다.

이와 같은 계획이 실현되기 위해서는 고속철도 관련 기술 개발이 수반되어야 한다. 철도의 고속화는 어느 한 분야의 기술발전 만으로는 불가능하고 관련 분야의 총체적이고 융합된 기술 개발이 요구된다. 또한 철도의 속도 향상은 승객의 안전과 쾌적성 확보가 선행되어야 한다. 쾌적성은 여객 수송의 품질을 결정하는 요소로 서비스, 객실 환경, 승차감 등 승객이 편안하게 느낄 수 있는 여러 복합적인 요소로 구성되지만 주행 중 발생하는 진동에 대하여 인체가 느끼는 진동 승차감을 향상시키는 것이 우선 시 되고 있다. 승차감은 차량의 주행성능을 평가하는 최종적인 인자로서 차량 특성, 차량이 주행하는 궤도의 특성, 운용환경 등에 의하여 좌우된다.

따라서 승차감은 철도의 품질을 평가하는 인자로서 매우 중요한 의미를 지니고 있다고 할 수 있다. 승차감을 평가하는 방법은 국내외에서 시험규격으로 구체화되어 있다.<sup>1,3</sup> 국내에선 고속철도차량의 승차감에 관련된 연구가 활발히 진행되어 왔다. 주로 국가연구개발사업으로 개발된 한국형고속철도 시제차량에 대한 승차감 평가 연구가 주를 이루었고 KTX 차량 승차감에 대한 연구도 수행된 바 있다.<sup>4,6</sup> 한편, 고속 전용선으로 구성된 경부고속철도는 1 단계 광명~동대구 구간이 자갈도상궤도구조로 구성되어 있고 2 단계 동대구~부산 구간은 콘크리트 궤도구조로 구성되어 있다. 궤도의 구조는 선형과 더불어 차량의 주행 성능에 미치는 영향이 크다고 할 수 있으며 각 각의 구조에 따라 장단점이 있다. 궤도 유형에 따른 진동특성 비교 연구가 궤도 구성요소인 레일, 침목, 도상에 대하여 수행된 바 있으나 차량 주행성능관점에서 수행된 연구는 없었다.<sup>7</sup> 따라서 본 논문에서는 궤도구조가 차량의 주행성능에 미치는 영향을 분석하고자 궤도구조에 따른 고속철도차량의 진동 특성 및 승차감에 대하여 분석하고자 한다.

**2. 궤도구조**

철도차량이 주행하는 궤도는 레일과 부속품, 침목, 도상으로 구성된다. 견고한 노반 위에 도상을 두께로 부설하고 그 위에 침목을 일정한 간격으로 부설한 후 침목 위에 레일을 궤간에 해당하는 간격으로 시공한다. 궤도 설계 조건은 열차 충격하중을 견딜 수 있는 재료로 구성될 것, 열차하중을 노반에 균등하게 전달할 것, 차량 동요 및 진동을 억제하고 승차감이 양호할 것, 경제적이고 유지보수 비용이 적을 것 등의 조건이 고려된다. 경부고속철도 고속선 구간은 자갈도상구조와 콘크리트구조로 구성되어 있다. 자갈도상궤도는 1 단계 광명~동대구 구간으로 장대터널인 황학터널 및 화신 5 터널을 제외한 전 구간에 해당되며 콘크리트 궤도는 2 단계 동대구~부산 구간에 해당된다.

**2.1 자갈도상궤도**

자갈도상궤도(ballast bed track) 도상은 Fig. 1 과 같이 자갈로 구성된 궤도구조로 철도 개통 초기부터 사용되어 왔다. 자갈도상은 레일, 침목을 거쳐 전달되는 하중을 널리 분산하여 노반에 전달하고 차량주행에 의한 진동 에너지를 흡수하는 역할을

한다.

자갈도상궤도의 장점은 빗물의 배수성이 용이하다는 점, 소음감쇠가 양호하다는 점, 건설비가 싸다는 점, 궤도틀림의 수정이 비교적 용이하다는 점 등을 들 수 있다. 그러나 단점으로는 도상저항력에 제한이 있는 점, 도상입자의 분쇄로 차륜의 손상이 유발될 수 있다는 점, 유지보수에 애로점이 크다는 점 등을 들 수 있다.<sup>8-10</sup>

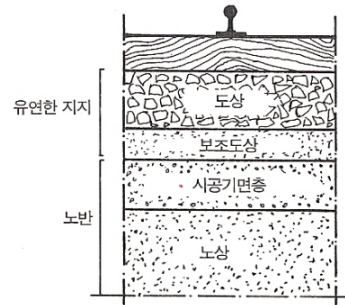


Fig. 1 Structure of the ballast bed track

**2.2 콘크리트궤도**

콘크리트궤도(concrete bed track)는 무도상 궤도(ballastless track) 또는 슬라브궤도 등으로도 불리며 지하철이나 장대 터널 등 보수, 배수가 곤란한 노선에서 Fig. 2 와 같이 콘크리트 도상에 직접 콘크리트 침목을 설치하는 구조이다. 초기 콘크리트 도상은 탄성이 부족하고 레일 이음매의 손상이 적지 않았다. 그 후 탄성 체결장치의 개발, 장대 레일화에 의해 이음매가 없어져 이런 종류의 문제는 해소되었고 현재 활발하게 적용되고 있다.

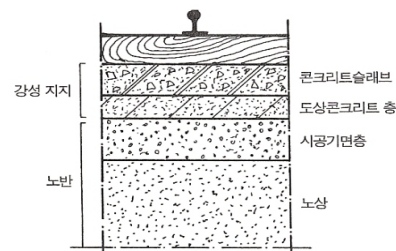


Fig. 2 Structure of the concrete bed track

궤도틀림이 적어 보수가 거의 필요 없다는 점이 최대의 이점이며 최근 지하철에서는 기본 구조로 하고 있다. 콘크리트 도상은 고가교, 터널 등의

콘크리트 구조물에도 사용된다. 궤도강도와 저항력이 상대적으로 높고 서비스수명이 길고 승차감이 양호하다는 점 등의 장점이 있는 반면 건설비가 자갈도상궤도에 비하여 고가라는 점, 시공상 정밀도가 요구된다는 점, 대량수선작업이 어렵다는 점 등의 단점이 있다.

### 3. 진동특성 시험개요

#### 3.1 시험데이터 계측

궤도구조에 따른 고속철도차량의 진동 및 승차감 특성을 분석하고자 실 차량을 대상으로 한 실차시험을 수행하였다.

시험차량은 10 량 편성인 KTX 산천을 대상으로 하였다. 계측량은 차량의 동적거동 특성을 파악할 수 있는 차량 속도, 대차 및 차체진동가속도로 하였다. 속도는 시험차량의 차륜 주위에 속도센서를 설치하여 주행속도를 계측하였다. 대차진동은 대차프레임 중앙 측면 상단에 가속도센서( $\pm 10G$ )를 취부하여 좌우 및 상하방향 진동을 계측하였다. 그리고 차체진동은 객실 내 차체 바닥에 가속도센서( $\pm 2G$ )를 취부하여 차체의 좌우, 상하방향 진동을 계측하였다. 주행 중 취득한 속도 및 진동가속도 데이터는 시험 후 분석을 위하여 데이터취득장치(data acquisition system)에 저장하였다.

시험구간은 경부고속철도 고속선 구간인 광명~부산 구간으로 하였다. 이 중 자갈도상궤도 구간은 section-1 과 section-2 에 해당하는 광명(22.0km)~동대구(293.1km) 구간이며 콘크리트궤도 구간은 section-3 에 해당하는 동대구(293.1km)~부산(423.8km) 구간이다. Fig. 3 은 시험차량과 시험장치를 나타내며 Table 1 은 시험개요를 나타낸다.

Table 1 Test scheme

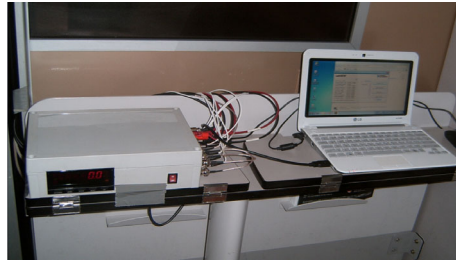
test train	- KTX Sanchun
measurement	- vehicle velocity - bogie acceleration(lateral, vertical) - body acceleration(lateral, vertical)
test equipments	- velocity sensor - accelerometer( $\pm 10G$ , $\pm 2G$ ) - data acquisition system
test section	- section-1: Gwangmyeong~Daejeon - section-2: Daejeon~Dongdaegu - section-3: Dongdaegu~Busan



(a) Test train



(b) Body accelerometer



(c) Data acquisition system

Fig. 3 Test train and test equipments

#### 3.2 시험데이터 분석 방법

계측한 시험데이터에 대한 분석은 진동시험 및 승차감시험에 대한 국내 시험규격을 준용하였다. 진동시험 분석방법은 국내 철도차량 진동시험규격으로 통용되고 있는 도시철도차량성능시험기준 별표 52 의 “소음, 진동 및 승차감시험” 규격을 준용하였다. 속도별로 진동가속도신호의 전진폭(peak-peak)에 대하여 분석하는 기법으로 속도에 대한 진동특성 변화를 용이하게 파악할 수 있는 분석방법으로 다음의 절차에 따른다.

- 저장한 진동가속도 신호를 매 100m 구간으로 나눈다.
- 각 구간 진동가속도의 최대진폭(peak-peak, 2a) 과 그 때의 속도를 구한다.
- 동일 속도마다 진동가속도 최대진폭의 평균치를 구한다.

- 주행속도를 가로축으로 진동가속도를 세로축으로 한 그래프를 그린다. 이 때의 진동가속도는 최대진폭으로 중력단위인 g 로 한다.

승차감시험 분석방법은 한국산업규격인 KS R 9216 “철도차량 - 승차감 측정 및 평가방법”을 준용하였다. 이 규격은 국외 철도규격인 UIC 513R Guideline for evaluation passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles 과 EN 12299 Railway applications -Ride comfort for passengers-Measurement and evaluation 규격 그리고 ISO 2631 Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration 을 기초로 도출된 국내 승차감 시험규격으로 국내 철도차량 승차감 시험규격으로 통용되고 있다.<sup>1-3</sup> Fig. 4 는 승차감 분석방법 흐름도를 나타낸다.

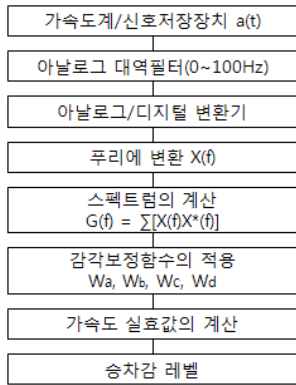


Fig. 4 Flow chart of ride analysis

4. 진동특성 분석결과

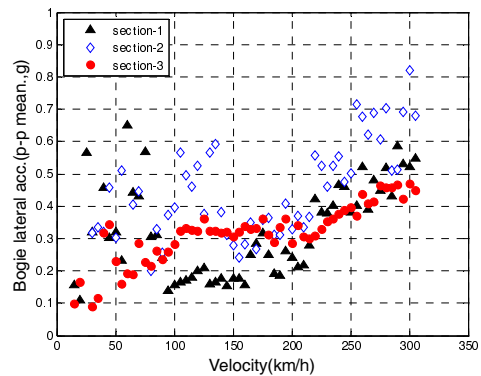
4.1 전진폭 분석결과

Fig. 5 는 속도에 따른 전진폭 분석 결과로서 자갈도상궤도 구간과 콘크리트궤도 구간에 대하여 비교한 분석결과이다. Fig. 5(a)와 Fig. (b)는 각각 대차 좌우방향, 상하방향 진동가속도에 대한 분석 결과이다. 속도 150km/h 이하의 대역에서는 연결선 및 역 통과 등으로 인하여 편차가 다소 있으나 전반적으로 전 속도대역에서 자갈도상궤도 구간인 section-1 과 section-2 에 비하여 콘크리트궤도 구간인 section-3 구간에서의 진동이 저감됨을 볼 수 있다.

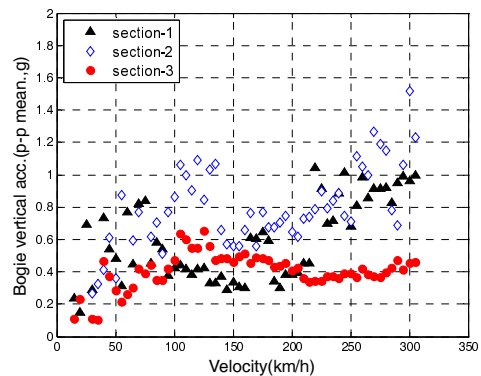
특히 속도 200km/h 이상 고속대역에서는 section-1 과 section-2 에 비하여 section-3 구간에서의 진동이 크게 저감됨을 볼 수 있다. 속도

300km/h 에서 대차 좌우진동의 전진폭 최대값이 자갈도상궤도에서 0.82g 인 반면 콘크리트궤도에서는 0.47g 로 크게 저감되고 있다. 대차 상하방향 전진폭 최대값은 자갈도상궤도에서 1.52g 인 반면 콘크리트궤도에서는 0.46g 로 크게 저감되고 있다.

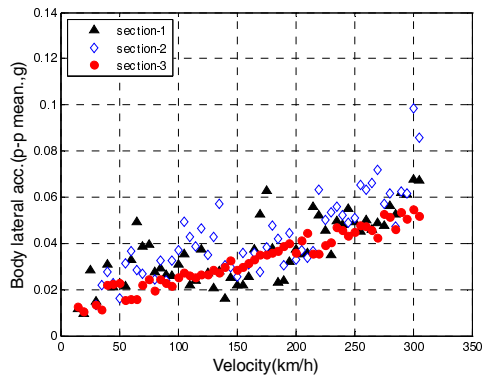
Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)는 각각 차체 좌우방향, 상하방향 진동가속도에 대한 분석결과이다. 전 속도 대역에서 자갈도상궤도 구간인 section-1 과 section-2 에 비하여 콘크리트궤도 구간인 section-3 구간에서의 진동이 큰 폭으로 저감됨을 볼 수 있다. 자갈도상궤도에서의 진동이 속도에 따라 편차가 크게 산포되는 경향을 보임에 비하여 콘크리트궤도에서의 진동은 점진적으로 증가하는 안정된 경향을 보이고 있다. 속도 300km/h 에서 차체 좌우진동의 전진폭 최대값이 자갈도상궤도에서 0.1g 인 반면 콘크리트궤도에서는 0.05g 로 1/2 수준으로 저감되고 있다. 차체 상하방향 전진폭 최대값도 자갈도상궤도에서 0.082g 인 반면 콘크리트궤도에서는 0.04g 로 크게 저감되고 있다.



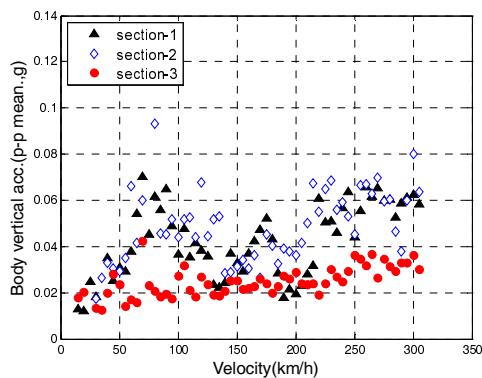
(a) Bogie lateral acceleration



(b) Bogie vertical acceleration



(c) Body lateral acceleration



(d) Body vertical acceleration

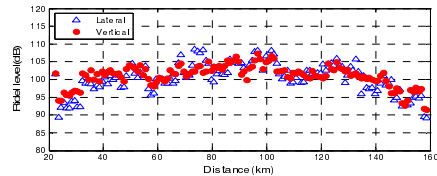
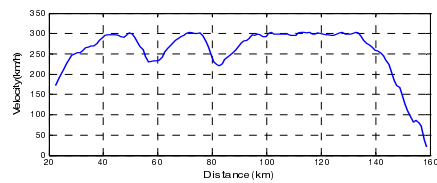
Fig. 5 Results of vibration analysis

### 4.2 승차감 분석결과

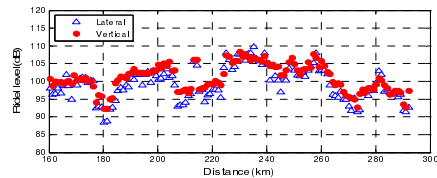
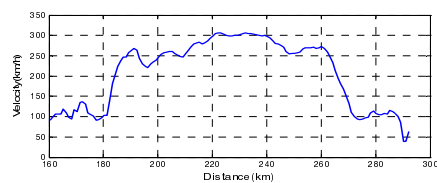
Fig. 6 은 시험구간에 대한 1km 거리 단위로 분석한 승차감 분석결과이다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 자갈도상궤도 구간인 section-1 구간과 section-2 구간에 대한 좌우 및 상하방향 승차감 분석결과를 나타낸다. Fig. 6(c)는 콘크리트궤도 구간인 section-3 구간에 대한 승차감 분석결과를 나타낸다.

그리고 Fig. 7 은 각 구간에 대하여 분석한 승차감 최대값, 최소값, 평균값을 정리한 표이다. Fig. 7(a)에서와 같이 좌우방향 승차감은 section-1 구간의 경우 최대 108.5dB, 최소 89.1dB, 평균 100.4dB 이며 section-2 구간의 경우에는 109.8dB, 최소 88.41dB, 평균 99.4dB 이었다. 반면 section-3 구간의 경우에는 최대 100.2dB, 최소 82.0dB, 평균 95.0dB로서 section-1, section-2 구간에 비하여 최대값은 8.3~9.6dB, 평균값은 4.4~5.4dB 정도 큰 폭으로 저감되는 특성을 보이고 있다.

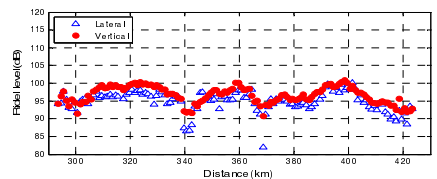
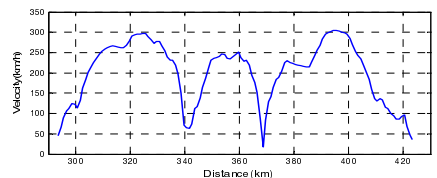
상하방향 승차감은 Fig. 7(b)에서와 같이 section-1



(a) section-1



(b) section-2



(c) section-3

Fig. 6 Ride level for test sections

구간의 경우 최대 107.3dB, 최소 91.5dB, 평균 101.0dB 이며 section-2 구간의 경우에는 108.3dB, 최소 92.3dB, 평균 101.0dB 이었다. 반면 section-3 구간의 경우에는 최대 100.9dB, 최소 90.7dB, 평균

96.6dB 로서 section-1, section-2 구간에 비하여 최대 값이론 6.4~7.4dB, 평균값이론 4.4dB 정도 크게 저감되는 특성을 보이고 있다.

그리고 Fig. 8 은 속도와 승차감과의 관계를 나타내는 분석결과이다. 좌우방향, 상하방향 모두 자갈도상궤도 구간의 section-1, section-2 의 승차감레벨에 비하여 콘크리트궤도 구간 승차감인 section-3 의 승차감레벨이 크게 저하하고 있다. 좌우방향, 상하방향 모두 콘크리트궤도 구간 속도 300km/h 대역에서의 승차감레벨이 자갈도상궤도 구간 속도 250km/h 대역에서의 승차감레벨과 등가의 수준을 보이고 있음을 알 수 있다.

따라서 자갈도상궤도 구간에 비하여 콘크리트궤도 구간에서의 차량 진동 특성 및 승차감이 크게 개선된 것으로 평가된다. 또한 속도에 따른 진동 특성 및 승차감레벨이 자갈도상궤도 구간에 비하여 콘크리트궤도 구간이 균일한 특성을 보이고 있다. 이러한 결과는 앞서 기술한 바와 같이 콘크리트궤도가 자갈도상궤도에 비하여 진동 승차감측면에서 우수하다는 궤도구조 특성에서 비롯된 결과로 볼 수 있다.

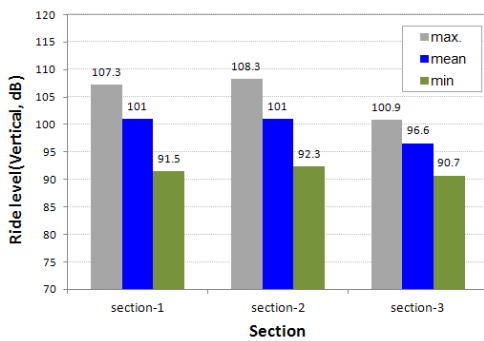
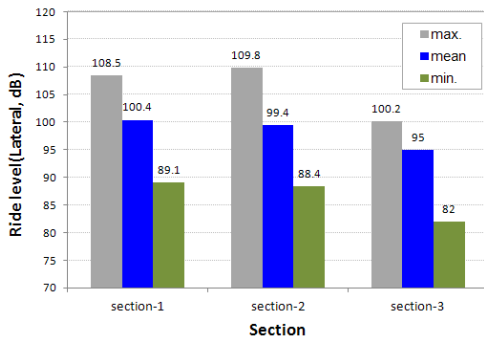
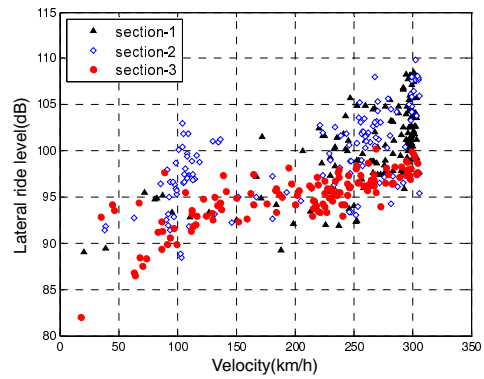
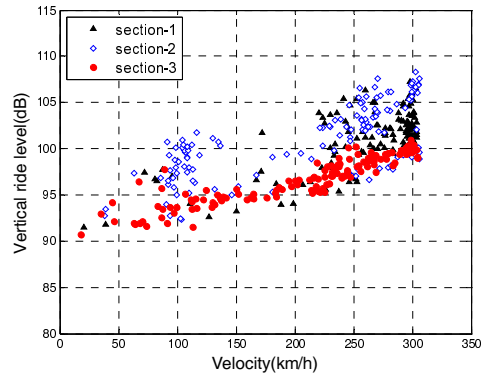


Fig. 7 Results of ride analysis



(a) Lateral



(b) Vertical

Fig. 8 Relation between velocity and ride level

5. 결론

궤도구조가 차량의 주행성능에 미치는 영향을 분석하고자 궤도구조에 따른 고속철도차량의 진동 및 승차감 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다.

대차 및 차체 진동 분석결과, 자갈도상궤도구간에 비하여 콘크리트궤도 구간에서의 진동이 크게 저감되었다. 속도 300km/h 에서 차체 좌우진동의 전진폭 최대값은 자갈도상궤도에서 0.1g 인 반면 콘크리트궤도에서는 0.05g 로 1/2 수준으로 저감되고 있다. 차체 상하방향 전진폭 최대값도 자갈도상궤도에서 0.082g 인 반면 콘크리트궤도에서는 0.04g 로 크게 저감되고 있다.

승차감은 좌우방향, 상하방향 모두 자갈도상궤도 구간에 비하여 콘크리트궤도 구간에서의 승차감레벨이 크게 저하하고 있다. 콘크리트궤도 구간 속도 300km/h 대역에서의 승차감레벨이 자갈도상궤도 구간 속도 250km/h 대역에서의 승차감레벨과 등가의 수준을 보이고 있다.

따라서 자갈도상궤도 구간에 비하여 콘크리트 궤도 구간에서의 차량 진동 특성 및 승차감이 크게 개선되었다고 평가된다. 이러한 결과는 진동 승차감측면에서 콘크리트궤도가 자갈도상궤도에 비하여 우수하다는 특성에서 기인한 결과로 추론된다. 그러나 콘크리트궤도 구간 개통 이후 운용 기간이 아직 오래되지 않은 만큼 향후 장기간에 걸친 진동 승차감에 대한 모니터링 연구가 필요할 것으로 판단되며 본 연구결과가 향후 300km/h 이상 급 고속화 연구에 기초로 활용될 것으로 기대한다.

### 참고문헌

1. KS R 9216, "Railway rolling stock - Test and evaluation method for passenger comfort," 2000.
2. UIC 513 R, "Guideline for evaluation passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles," 1994.
3. BS EN 12299, "Railway applications - Ride comfort for passengers - Measurement and evaluation," 2009.
4. Kim, Y. G., Kim, S. W., Park, C. K., Kim, K. H., and Park, T. W., "Analysis on the Characteristics of the Ride Comfort for High Speed Trains on the High Speed Line/Conventional Line," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 999-1006, 2004.
5. Hwang, H. S., Kim, S. W., Park, C. K., Mok, J. Y., Kim, K., W., and Kim. Y. G., "Discussion for Ride Evaluation of High Speed Train by using Inferential Statistics," J. of Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 6, pp. 543-549, 2008.
6. Kim, Y. G., Park, C. K., and Kim, K. H., "Evaluation of Ride Comfort for Railway Vehicle according to EN Standard," Proc. of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 1557-1558, 2011.
7. Lee, C. W., Ham, Y. S., and Kim, J. C., "Vibration Characteristics of High-speed Railway Lines on the Type of Track," Proc. of Korean Society for Railway Spring Conference, pp. 332-336, 2011.
8. Baek, N. W. and Lee, S. J., "Terminology and Explanation of Railroad Technology," Goldenbell, 2004.
9. Seo, S. B., "Railway Engineering 2nd edition," BG Book Gallery, pp. 58-59, 2004.

10. Lee, J. D., "Introduction of Railway Engineering," Nohae Publishing, pp. 64-68, 2004.