

◆ 특집 ◆ 철도차량 구동장치의 모니터링 기술

고속철도차량 감속구동장치 진동특성 분석

Analysis on the Vibration Characteristics of Reduction Gear Units for High-speed Trains

문경호^{1,✉}, 이동형², 김재철², 지혜영³
Kyung Ho Moon^{1,✉}, Dong-Hyong Lee², Jae Chul Kim², and Hae Young Ji³

- 1 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 (Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute)
- 2 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)
- 3 과학기술연합대학원 철도시스템공학과 (Department of Railway System Engineering, Science & Technology Univ.)

✉ Corresponding author: khmoon@krri.re.kr, Tel: +82-31-460-5211

Manuscript received: 2013.4.19 / Accepted: 2013.6.20

The gear-reduction units of Korean high-speed trains consist of a motor reduction unit, an axle gear box reduction unit, and a tripod joint shaft. A reduction gear unit is a gearbox used to reduce the rotational speed of the input shaft to a slower rotational speed on the output shaft. This reduction in output speed helps to increase torque. Defective reduction gear units in high-speed trains are caused by damage to the gear or by gear fatigue. To diagnose potential problems, it is important to know the vibration characteristics of the reduction gear units. In this study, we analyzed the vibration characteristics of reduction gears under various conditions. The test setup included a full-scale test rig to evaluate reduction gear under both normal and extreme operating conditions.

Key Words: Reduction gear unit (감속구동장치), Fault diagnosis (결함진단), Vibration characteristics (진동특성), High-speed train (고속철도)

기호설명

V = speed of train(km/h)

Z = number of teeth

D = wheel diameter(m)

R = gear ratio

f_m = gear mesh frequency(Hz)

1. 서론

철도차량의 감속구동장치는 빠르게 회전하는 구동모터의 회전력을 출력축인 차륜으로 회전속도를 감속시켜 전달하는 장치이며, 출력속도를 감속

시켜 출력토크를 증대시키는 것이 목적이다. 열차 운행시 고속철도용 감속구동장치에 가해지는 부하가 매우 크기 때문에 기어의 안전성 및 내구성, 각 부품의 신뢰성 등이 매우 중요하다.¹ 철도운영기관은 운행거리, 고장발생횟수 및 보수정비 등을 고려한 신뢰성(Reliability) 및 유지보수성(Maintainability) 분석을 통해 감속구동장치를 관리하고 있다.² 그러나 감속구동장치 구조상 분해하지 않고는 베어링, 기어 등의 손상이나 고장상태를 알 수 없기 때문에 감속구동장치의 손상 상태 및 고장 발생여부 등을 사전에 파악하고 조치를 취할 수 있도록 안전장치가 필요하며, 이러한 안전장치로서 모니터링 시스템이 많이 개발되어지고 있다. 베어링 및

기어에 대한 결함 및 이상여부를 파악하고 분석하는데 있어서 시스템의 특성을 파악하는 것이 중요하며, 시스템의 특성은 진동신호를 이용한 분석방법이 많이 적용되고 있다.^{3,4} 본 연구에서도 감속기 모니터링 시스템 개발에 활용하기 위하여 고속철도용 감속기의 진동을 측정하여 감속기의 진동특성을 파악하고자 한다.

일반산업기계의 감속구동장치와 달리 철도차량의 감속구동장치는 열차가 선로 위를 운행하면서 발생하는 차륜과 레일에 의한 진동이 감속기에도 전달되게 된다. 또한 고속철도차량의 진동특성도 궤도구조에 따라 달라지게 된다.^{5,6} 본 연구에서는 감속구동장치의 진동특성을 파악하기 위하여 실험시험기 및 주행 중 실차에서 감속구동장치의 진동을 측정하여 여러가지 조건에서 감속구동장치의 진동 특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

2. 감속구동장치 구조 및 시험방법

2.1 고속철도용 감속구동장치

국내 고속철도는 KTX와 KTX산천 두 종류가 있다. KTX는 운전실(동력차) 2량에 객실 18량이 편성되어 있으며, 동력차와 동력차의 인접 객차의 대차가 구동대차로서 총 12대의 감속구동장치가 설치되어 있다. KTX산천은 동력차 2량에 객차 8량이 편성되어 있으며, 동력차에만 총 8대의 감속구동장치가 설치되어 있다. 두 고속철도의 감속구동장치의 외형은 약간 다르지만 감속구동장치의 구조는 Fig. 1과 같이 1차 감속장치(Motor Reduction Unit)와 2차 감속장치(Axle Gear Box Reduction Unit),

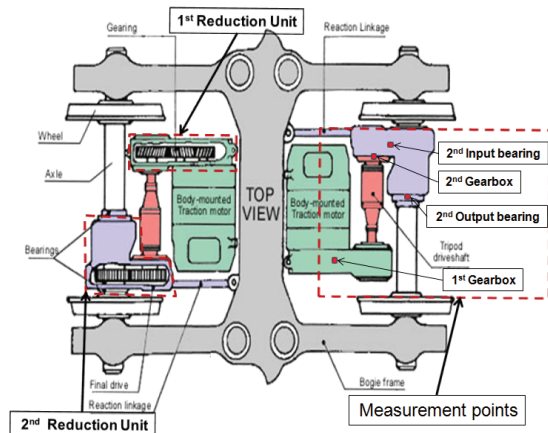


Fig. 1 Reduction gear units for high-speed trains

그리고 두 감속장치의 동력 전달 역할을 수행하는 동력전달축(tripod joint shaft)으로 구성되어 있다. 또한 1차 감속장치는 대차에 고정 되어 있으며, 2차 감속장치는 대차에 링크(reaction linkage)로 지지되어 있고 출력축은 차축에 고정되어 있는 형태이다. 기어의 형태를 보면, 고속으로 회전하는 1차 감속장치는 헬리컬기어를 쓰며, 2차 감속장치는 평기어를 사용하고 있다. 1차의 감속비는 1.89, 2차의 감속비는 1.16이며, 감속기어의 잇수는 Fig. 2와 같다.

2.2 감속구동장치 시험방법

감속구동장치의 진동을 측정하기 위하여 적절한 부착 위치 및 센서의 선정이 중요하다. 계측기의 측정 주파수 범위는 가장 낮은 축의 회전 주파수와 가장 높은 물림 주파수를 측정할 수 있어야 하며, 기어 상자의 진동 측정은 베어링대와 같은 강성이 높은 부분에서 측정하거나 베어링대에서 측정할 수 없는 경우에는 가장 가까운 부착 부분에서 측정하여야 한다.⁷ 고속철도 감속구동장치는 감속기어의 맞물림에 의한 진동뿐 아니라 차륜과 레일에서 발생하는 진동도 같이 포함되므로 진동 측정범위가 커야 하며, 기어와 기어의 맞물림에 의한 주파수의 3배까지 측정해야 하므로 주파수 측정범위도 커야 한다. 이러한 사항을 반영하여

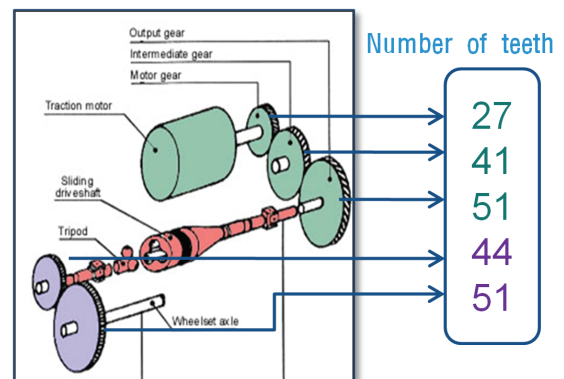


Fig. 2 Number of teeth of reduction gear units

Table 1 Specification of sensors

| Sensor | Model | Operation range |
|---------------|------------|---|
| Accelerometer | 8766A250AB | Range : ±250g, Limit : ±500g Freq. : 0.5~10,000Hz |
| Photo sensor | E3S-AD11 | Sensing distance : 10~20cm |

측정센서를 Table 1과 같이 선정하여 측정에 사용하였다.

일반적인 회전기계는 모터의 진동, 기어의 맞물림에 의한 진동 등 회전기계 자체의 진동만을 분석하여도 기계의 상태 진단이 가능하지만, 철도 차량에 사용되는 감속장치는 차륜/레일에 의한 진동이 크기 때문에 이에 대한 고려가 있어야 한다. 부착위치도 1차 감속장치는 베어링이 기어박스 내에 위치하여 베어링대에 부착할 수 없으며, 단기간의 시험일 경우, 2차 감속장치는 베어링대에 부착할 수 있지만 장기간 상태 감시 및 진단을 위해서 진동센서는 감속장치 케이스에 부착해야만 한다. 이러한 점을 고려하여 측정방법은 실제 주행 중 실차에서 감속구동장치의 진동을 측정하고 분석한 후에 차륜/레일에 의한 진동이 반영되지 않는 실험시험기에서 진동을 측정 및 분석하여 상호 비교하고자 하였다. 실험시험기는 Fig. 3과 같으며 2차 감속장치에서 베어링대 및 기어 케이스에서의 진동 특성 비교 분석하며, 속도 및 부하조건에 따른 감속장치의 진동특성이 어떻게 변하는지를 분석하고자 하였다.

3. 주행상태 감속구동장치 진동특성 분석

3.1 축상 및 대차진동과의 연관성 분석

주행상태에서 감속구동장치에서 측정되는 진동은 모터 및 기어의 맞물림 진동 외에도 고속으로 주행하면서 발생하는 차륜/레일에 의한 진동 및 대차의 진동 등이 감속구동장치의 진동에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 연관성 분석이 필요하다. Fig. 4(a)는 1차 감속장치와 대차 진동에 대한 진동 레벨을 나타내었다. 1차감속기와 대차진동 변

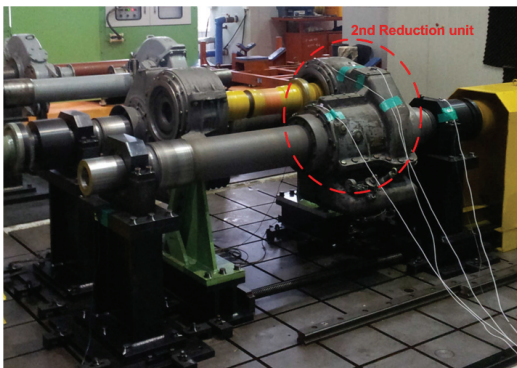
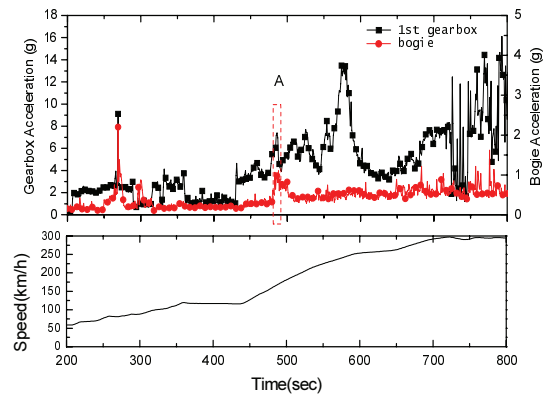


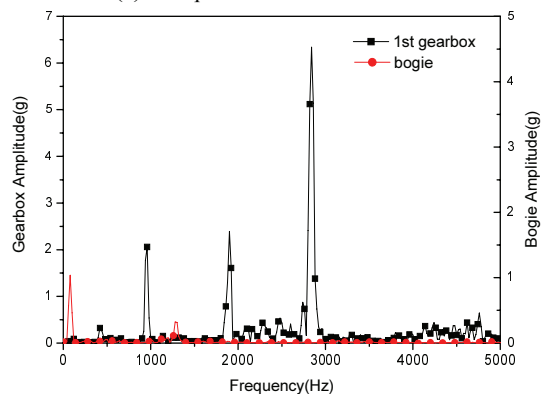
Fig. 3 Test rig for driving gear test

동 추이를 보면, 연관성이 적어 보이나 상세분석을 위하여 진동레벨이 증가하는 사각형박스 A 부위에 대하여 주파수 분석을 하여 Fig. 4(b)에 나타냈다. 주파수 분석결과를 보면, 피크 주파수가 서로 일치하지 않는 것으로 보아 대차의 진동이 1차 감속장치에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다.

Fig. 5(a)는 축상진동과 2차 감속장치의 진동레벨을 비교하였다. 1차 감속장치보다 2차 감속장치는 속도와 상관이 높은 것으로 나타났으며, 2차 감속장치의 기어박스, 베어링 진동 및 축상진동은 비슷한 추이를 나타내고 있다. Fig. 5(a)의 사각형 박스 B는 분기기 등을 통과할 때로서 이 때를 제외한 진동레벨의 크기는 기어박스의 진동레벨이 가장 크고 베어링진동, 축상진동의 순으로 나타났다 이를 통하여 차륜과 레일에 의한 진동이 감속기의 맞물림에 의한 진동보다 작다는 것을 알 수 있다. 기어박스의 진동이 베어링 진동보다 높는데 기어 케이스로 진동이 전달되는 과정에서 기



(a) Comparison of vibration level



(b) Frequency analysis of the A region

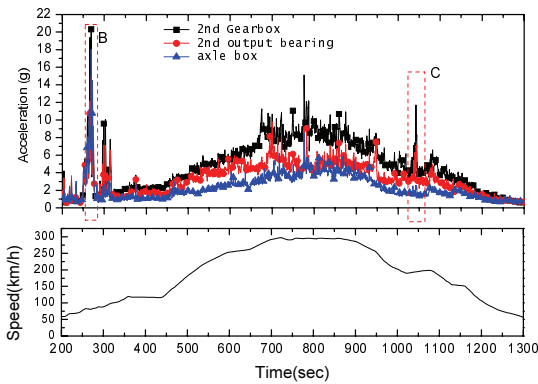
Fig. 4 Results of 1st gearbox and bogie vibration

어 케이스의 진동모드에 의해서 진동이 약간 증폭되는 효과에 기인한 것으로 추정된다. Fig. 5(b)는 분기기 등을 통과할 때의 주파수 분석 결과로서 이로 인하여 축상진동에서 저주파수 진동이 크게 나타나고 있으며, 기어박스 및 베어링도 이러한 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. Fig. 5(c)는 Fig. 5(a)의 점선박스 C 부분을 주파수 분석한 결과이

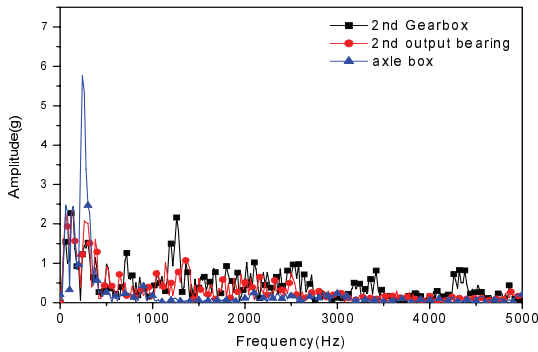
며, 기어박스 진동과 베어링진동의 주파수는 연관성이 높고 축상진동도 어느 정도 연관성을 갖고 있는 것으로 나타났다.

3.2 1차 감속장치 및 2차 감속장치 진동특성

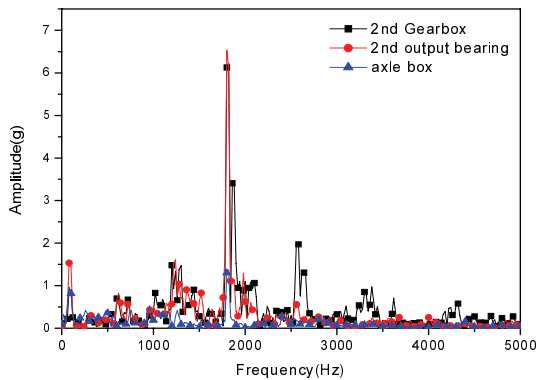
1차 감속장치와 2차 감속장치 진동 특성을 비교하여 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 6(a)에서 분기기 통



(a) Comparison of vibration level

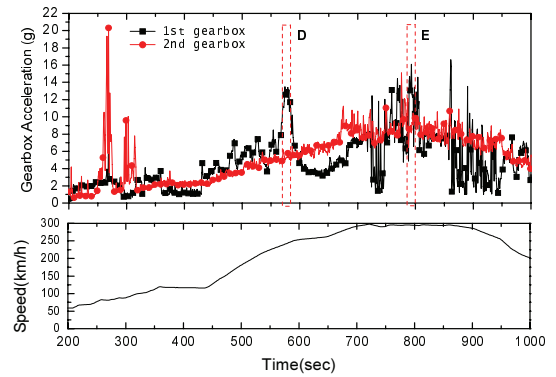


(b) Frequency analysis of the B region

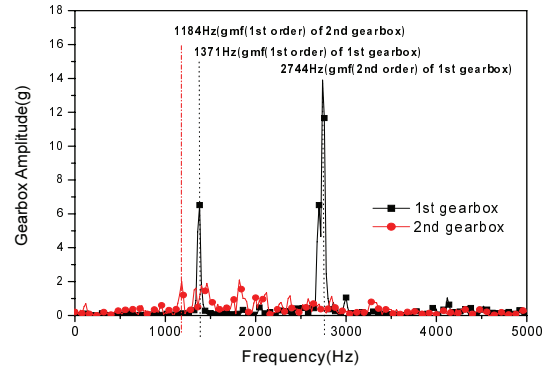


(c) Frequency analysis of the C region

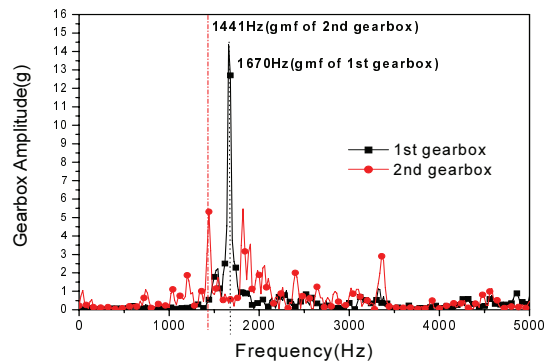
Fig. 5 Results of 2nd gearbox and axle box vibration



(a) Comparison of vibration level



(b) Frequency analysis of the D region



(c) Frequency analysis of the E region

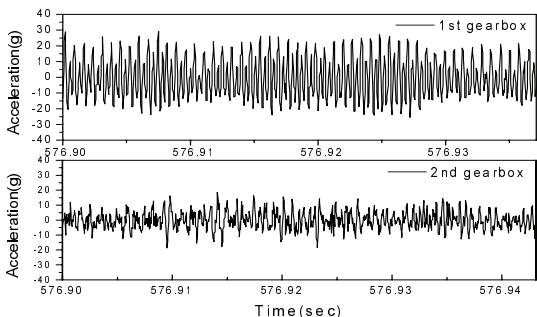
Fig. 6 Results of 1st and 2nd gearbox vibration

과 등 선로에 의한 영향을 많이 받는 구간에서는 2차 감속장치의 진동이 크고 고속에서의 진동레벨의 변동은 1차감속기가 큰 것으로 나타났다. Fig. 6(a)에서 1차 감속장치의 변동이 큰 부분인 D와 E 구간에 대하여 주파수 분석을 하여 Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)에 나타났다. 2차 감속장치의 맞물림 주파수 (gear mesh frequency)는 식 (1), 1차 감속장치의 맞물림 주파수는 식 (2)를 적용하여 구할 수 있다.

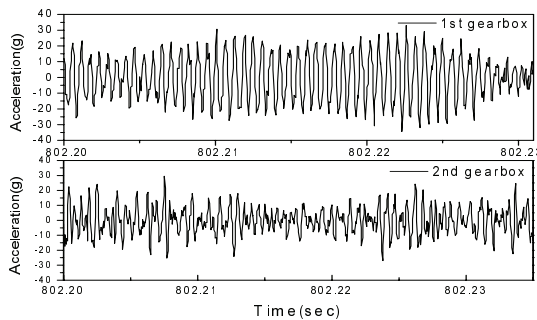
$$f_{m2} = Z_2 \times \frac{V/3.6}{\pi \times D} \tag{1}$$

$$f_{m1} = Z_1 \times \frac{V/3.6}{\pi \times D} \times R \tag{2}$$

맞물림 주파수는 2차 감속장치보다 1차 감속장치에서가 더 뚜렷하게 나타나고 있다. 1차 감속장치에서 속도 241.5km/h로 운행한 D 구간은 2차 맞물림 주파수가 크게 나타나고 있고 속도 294km/h로 운행한 E 구간은 1차 맞물림 주파수가 크게 나타나고 있다. D 구간과 E 구간에서 출력축 1 회전에 대한 1차 감속장치와 2차 감속장치의 진동 파형을 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에 나타났다. D 구간에서 1



(a) Vibration in one cycle of the D region



(b) Vibration in one cycle of the E region

Fig. 7 Results of gearbox vibration in one cycle

차 감속장치가 맞물림 주파수의 2배의 진동이 크게 나타났는데 Fig. 7(a)도 기어 잇수의 2배인 102개의 파형이 뚜렷하게 나타났다. 1차 맞물림 주파수가 크게 나타난 E 구간의 경우도 기어 잇수인 51개와 일치하는 파형을 관찰할 수 있다. 그러므로 1차 감속장치는 2차 감속장치보다 맞물림 주파수 등 기어의 특성이 잘 반영되며, 감속장치의 회전속도 및 가속부하에 따라 1차 맞물림 주파수가 커지는 영역과 2차 맞물림 주파수가 커지는 영역이 존재함을 알 수 있다.

3.3 선로 및 운행조건에 따른 진동특성

속도 변동이 없이 일정한 속도로 운행한 구간에 대하여 1차 감속장치와 2차 감속장치의 진동 수준을 비교하여 Fig. 8에 나타났다. 속도에 따른 진동 수준을 다시 직선으로 추세선을 그린 결과를 보면, 1차 감속장치보다 2차 감속장치의 진동 수준이 높다는 것을 알 수 있었다.

일반적으로 가속시에 모터에 부하가 더 많이 걸린다. 이에 대하여 감속구동장치에 미치는 영향을 파악하기 위하여 가속 및 감속구간에서 감속장치의 진동수준을 비교하였다. Fig. 9(a)는 1차 감속장치에 대하여 가감속시 진동 수준을 비교한 것으로 1차 감속장치는 특정 회전속도에서 진동이 증가하는 경향이 있어서 가속에 의한 부하 변동의 영향은 잘 나타나지 않았다. Fig. 9(b)는 2차 감속장치에 대한 가감속시 진동 특성으로 가속시가 감속시보다 진동이 높게 나타나고 있다.

궤도구조에 따른 진동 특성을 파악하기 위하여 콘크리트궤도인 황학터널과 자갈도상궤도인 금호터널에서 감속장치의 진동을 비교하였다. Fig. 10(a)는 1차 감속장치의 진동 수준, Fig. 10(b)는 2차 감속장치의 진동 수준을 비교한 것으로 콘크리트 궤

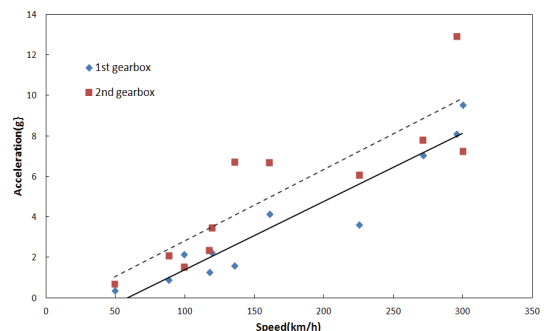


Fig. 8 Vibration level at the constant speed

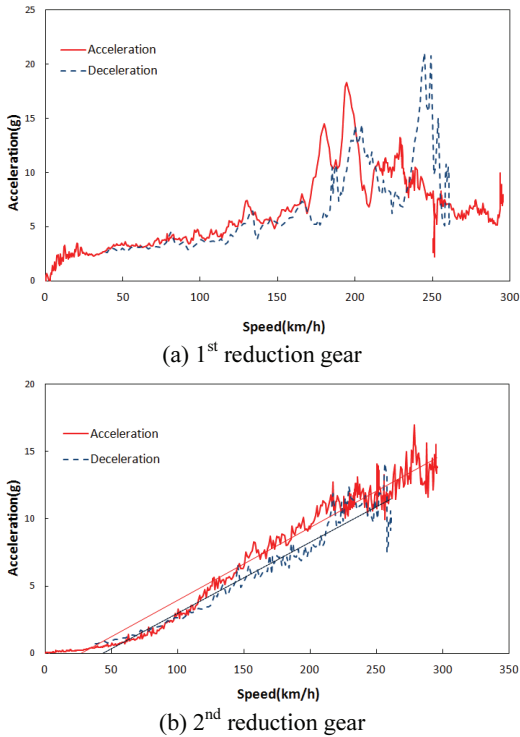


Fig. 9 Comparison of acceleration and deceleration

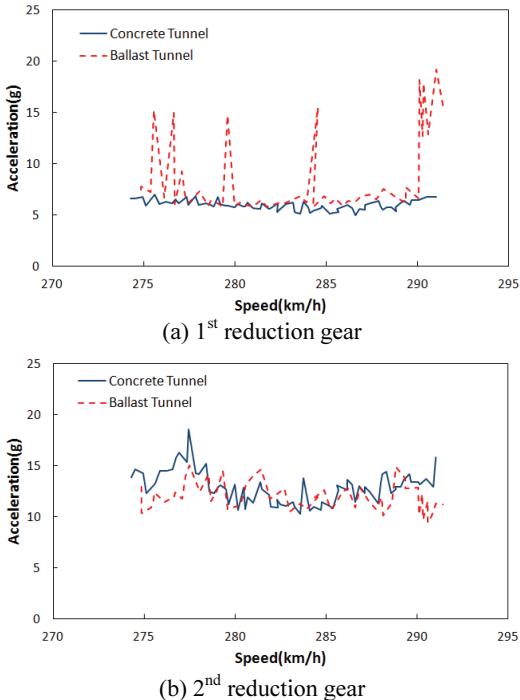


Fig. 10 Comparison of concrete and ballast tunnel

도와 자갈도상 궤도 모두 비슷한 수준을 유지하고 있다. 자갈도상에서 중간에 가끔 튀는 부분은 상세 분석 결과, 약 0.2초의 순간적인 변동이 몇 번 발생하여 진동 수준을 높인 것이며, 주파수 분석에서도 맞물림 주파수의 최대역 주파수 성분에서 순간적으로 크게 나타난 것으로 파악됐다.

4. 시험기에 의한 감속구동장치 진동특성 분석

속도 변화 및 토크 변화에 따른 감속구동장치의 진동 특성을 파악하기 위하여 실물 시험기를 이용하여 2차 감속장치의 진동을 측정하였으며, 진동센서는 감속장치 케이스인 기어박스과 입력축 베어링 및 출력축 베어링에 부착하여 측정하였다. 측정결과인 Fig. 11(a)를 보면, 입력축 베어링은 254 km/h 지점(F 지점)에서 진동이 커지고 있으며, 출력축 베어링은 274 km/h 지점(G 지점)에서 커지고 있다. 기어 케이스에서는 양쪽 베어링 진동이 모

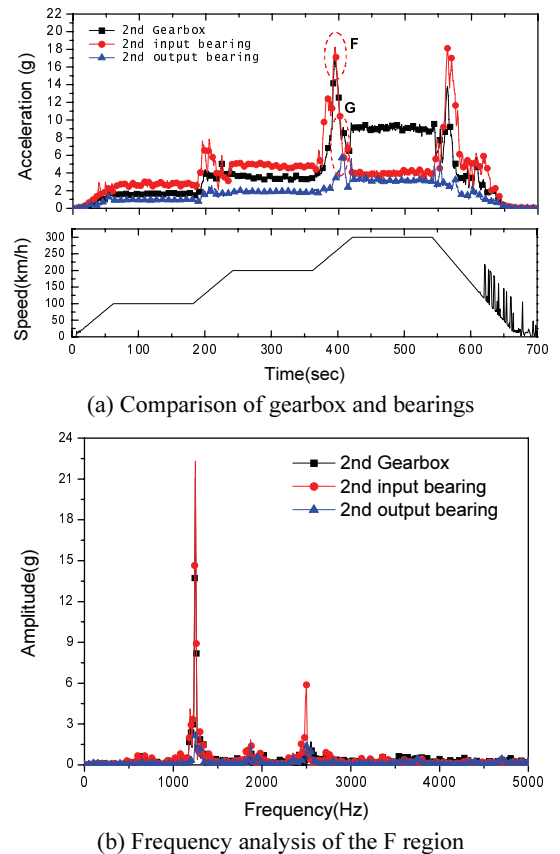


Fig. 11 Results of reduction gear test using test rig

두 관측되는 것으로 나타났다. Fig. 11(b)는 F 지점에 대하여 주파수 분석을 한 결과로서 차륜과 레일의 진동에 의한 영향을 받는 실차시험 결과와 달리 1차 맞물림 주파수 1,245Hz와 2차 맞물림 주파수인 2,490Hz가 뚜렷하게 나타나고 있다.

Fig. 12는 토크 변화에 따른 감속장치의 기어케이스 진동 수준의 변화를 나타낸 그림이다. 속도가 커짐에 따라 진동 수준도 커지고 있지만 토크 변화에 따른 진동 수준은 300km/h정속 주행에서는 무부하시가 가장 크고 1,000토크일 때가 가장 작게 나타나고 있다. 이와 같이 일반적인 상황에서는 토크변동에 따른 영향이 없지만 감속장치 진동 모드와 관련이 있는 것으로 추정되는 254km/h지점에서는 토크가 커짐에 따라 진동 수준도 올라가고 있다. 그러므로 진동 모드에 해당되는 회전속도에서 토크의 영향에 따라 진동 수준도 증가함을 알 수 있다.

5. 결론

감속구동장치의 진동특성을 파악하기 위하여 실물시험기 및 주행 중 실차에서 감속구동장치의 진동을 측정하여 분석하였다. 실차시험에서 대차의 진동과 1차 감속장치와의 상관성이 없지만 축상진동과 2차 감속장치는 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 2차 감속장치보다 차륜에 의한 진동의 영향이 적은 1차 감속장치가 기어의 맞물림 주파수 등 기어의 진동 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다. 선로 및 운행조건에 따른 진동 특성을 보면, 평균적인 진동 수준은 1차 감속장치보다 2차 감속장치가 높은 것으로 나타났으며, 콘크리트

궤도와 자갈도상 궤도에서 1차 및 2차 감속장치의 진동이 비슷하게 나타나고 있으므로 궤도 조건에 따른 영향은 작은 것으로 나타났다. 실물시험 결과에서 기어박스의 진동은 입력측 및 출력측 베어링의 진동을 모두 반영하고 있음을 알 수 있었다. 일반적인 상황에서 토크 변동이 진동 수준에 영향을 미치지 않지만 진동 모드에 해당하는 회전속도에서는 토크의 영향에 따라 진동 수준도 증가함을 알 수 있었다.

본 연구 결과는 정상상태의 감속장치 진동특성을 분석한 결과이며, 후속 연구로서 결함상태의 감속장치를 입수하여 실물시험을 수행할 예정이다. 향후 정상상태와 결함상태의 진동특성 결과를 비교하면 감속구동장치 모니터링 시스템에 반영될 진단기준이 마련될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받은 ‘고속열차용 감속기 모니터링 시스템 기술개발’ 과제의 일환으로서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Moon, K. H., Lee, D. H., Kim, J. C., Jee, H. Y., and Lee, K. H., “A comparison of vibration characteristics of the reduction gearbox for the KTX and electric motor coach,” Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 1273-1274, 2012.
2. Jung, D. W., Lee, Y. Y., and Kim, E. S., “A study of maintenance measures of the KTX decelerator,” Proc. of the Korean Society for Railway Spring Conference, pp. 1191-1197, 2009.
3. Park, K. H., Jung, S. J., Wee, H., Lee, G. S., and Cho, S. H., “A Study on the Fault Detection of Auto-transmission Using the Vibrational Characteristics of Roller Bearings,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 268-273, 2009.
4. Ji, H. Y., Lee, K. H., Kim, J. C., Lee, D. H., and Moon, K. H., “Analysis of Vibration Characteristics for the Fault Diagnosis of High-speed Railway Reduction,” J. of Korean Society for Railway, Vol. 16, No. 1, pp. 26-31, 2013.

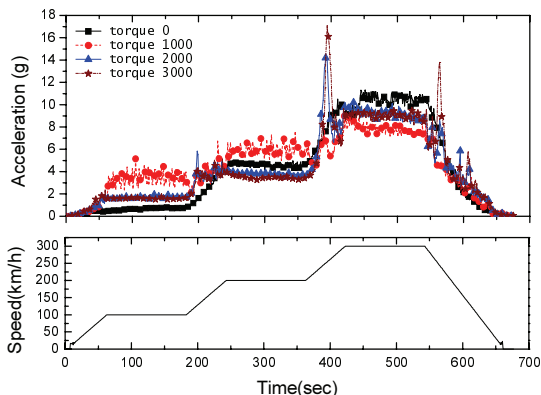


Fig. 12 Results according to torque variation

5. Hur, H. M., Park, J. H., and You, W. H., "Analysis on the Vibration Characteristics of High Speed Train according to Track Structure," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 29, No. 6, pp. 593-599, 2012.
6. Kim, M. C. and Jang, S. Y., "Characteristics of Vibration of Track and Vehicle Body According to Type of Track in Tunnel of High-Speed Railway Lines," J. of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 1D, pp. 125-132, 2006.
7. KS B ISO 8579-2, "Acceptance code for gears - Part 2: Determination of mechanical vibrations of gear units during acceptance testing," 2007.