

국내 철도차량 감속기 진동특성분석

Vibration Characteristics Analysis of Reduction Unit for Railway Vehicles

지해영* · 김재철† · 이동형** · 문경호** · 이강호*

Hae-Young Ji, Jae-Chul Kim, Dong-Hyung Lee, Kyung-Ho Moon and Kang-Ho Lee

Key Words : Reduction unit(감속기), Vibration characteristics(진동특성), Railway vehicle(철도차량), Diagnosis(진단)

ABSTRACT

Reduction unit is one of the most important components for railway vehicle because torque of motor must be transmitted to wheels of vehicle by reduction unit. However, According to advanced studies, it has been often broke down due to the damage, fatigue and wear of gear. To solve this problem, defect diagnosis methods of gear have been mainly using the vibration diagnosis technology through vibration waveform and frequency analysis. However, We should know vibration characteristics of normal state reduction unit prior to defect diagnosis. So in this paper, We had analyzed vibration characteristics of reduction unit in order to utilize monitoring system development. Comparison of targets is the vibration characteristics of normal state reduction unit about Electric Multiple Unit(EMU) and the High-speed trains(KTX, KTXⅡ).

1. 서 론

기 호 설 명

- f_m : 기어 물림주파수(Hz)
- F_c : 파고율(Crest factor)
- D : 피크값
- β_2 : Kurtosis
- μ_4 : 4차 모멘트
- s : 표준편차
- Z : 기어잇수
- V : 열차속도(km/h)
- N : 회전 각속도(rpm)
- R : 기어비
- d_r : 윤축의 직경(m)

철도차량의 감속기는 구동모터의 회전력을 차륜에 전달하는 장치이며, 운행 시 감속기에 가해지는 부하가 매우 크기 때문에 기어의 안전성 및 내구성, 각 부품의 신뢰성 등이 매우 중요하다⁽¹⁾. 하지만 감속기 내부의 기어의 접촉피로손상에 의해 고장이 발생하고 있으며, 이러한 이유로 이상진단을 통해 조기에 파손유무를 발견하여 손상으로 인한 경제적 손실과 피해를 미연에 방지하기 위해 모니터링 시스템이 필요한 실정이다. 이러한 기계의 이상진단방법으로 진동신호를 이용한 측정 및 분석기술이 선행연구 등을 통해 많이 발전해오고 있으나^{(2) (3)}, 모니터링 시스템을 이용한 진동진단을 위해서는 먼저 정상상태의 진동신호를 알고 있어야 한다. 그러므로 본 논문에서 진동진단을 위한 시스템을 구축하기에 앞서 국내의 철도차량별 정상상태 감속기의 진동특성을 파악함이 목적이다.

감속기의 기어박스 내부는 기어의 물림형태로 구

† 교신저자; 정회원, 한국철도기술연구원
E-mail : jckim@krri.re.kr
Tel : 031) 460-5206, Fax : 031) 460-5020
* 과학기술연합대학원대학교(UST) 철도시스템공학
** 한국철도기술연구원

성되어 있으며, 기어박스 내부에서 기어 및 베어링 진동특성을 파악하여 분석하는 방법⁽⁴⁾ 등의 기술이 존재하고 있다. 하지만 감속기의 진동특성을 파악하기 위해서는 기어박스 외부에서 진동특성을 파악할 수밖에 없으므로, 본 논문에서는 기어박스 외 베어링 케이스 외부에서의 진동신호를 측정하여 진동신호의 데이터 통계분석방법 중 무차원 파라미터인 파고율(Crest factor)과 Kurtosis를 이용한 시간영역분석⁽⁵⁾과 기어 물림주파수(f_m)와 Order분석을 통한 주파수 분석을 실시함으로써 전동차(EMU) 및 고속철도차량(KTX, KTXⅡ)을 대상으로 진동특성을 파악하였다. 또한 고속철도차량(KTXⅡ)이 터널구간 내 콘크리트도상과 자갈도상을 주행 시 도상에 따른 감속기에 미치는 진동특성 비교분석을 실시하였다.

2. 진동특성분석

2.1 전동차 감속기 진동특성

전동차용 감속기의 진동특성을 파악하기 위하여, Driving gear 모의 시험장비에 전동차용 감속기를 설치하여 측정을 실시하였다. 센서부착위치는 출력축인 기어를 지지하는 베어링 기어케이스에 전후(X), 좌우(Y), 상하(Z)방향으로 가속도센서를 부착하였고, 회전 rpm은 축 지지대에 Photo센서를 부착하여 측정하였다. 아래 Figure 1에 측정상황을 나타내었다.



Figure 1. Driving gear test for reduction unit

rpm에 따른 진동특성을 알아보기 위하여 rpm을 647rpm(100km/h)까지 증가시킨 후 다시 저감시켜 시간계열분석방법인 파고율분석과 Kurtosis 분석을 실시하였다.

파고율과 Kurtosis를 도출하기 위한 식을 Equation (1)과 (2)에 나타내었다.

$$F_c = \frac{D}{D/\sqrt{2}} \quad (1)$$

$$\beta_2 = \frac{\mu_4}{s^4} \quad (2)$$

그래프 상에 파고율과 Kurtosis 레벨을 표현하기에 잡음성 데이터 제거와 매끄러운 연속성 데이터 표현을 위해 Curve fitting 방법 중 평활화(Smoothing) 처리기법을 사용하여 나타내었다.

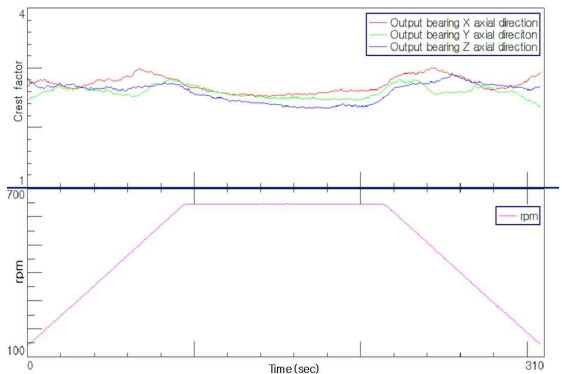


Figure 2. Crest factor analysis of EMU reduction unit

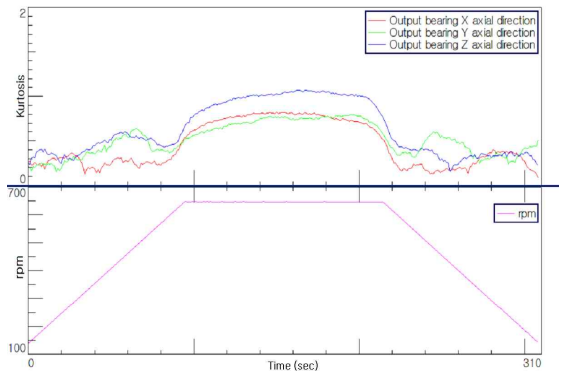


Figure 3. Kurtosis analysis of EMU reduction unit

전동차의 정상상태 감속기의 출력축 베어링부의 파고율과 Kurtosis를 분석한 결과 파고율값이 rpm의 변화와 상관없이 2.5~3사이의 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 그리고 Kurtosis 분석결과는 1.5이하의 레벨의 값으로 나타나는 것을 알 수 있으며, 최고속도에서 정속을 유지할 때 베어링부의 상하(Z)진동에 따른 Kurtosis값이 전후(X), 좌우(Y)진동보다 대체적으로 약간 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

다음은 정상상태 전동차용 감속기의 출력축 베어

링부의 주파수분석을 실시한 결과로써, 최고속도 (647rpm) 100km/h에 도달하기까지의 가속구간의 Order분석결과를 Figure 4에 나타내었으며, 최고속도유지구간(647rpm)에서의 기어 물림주파수(f_m)를 Figure 5에 나타내었다.

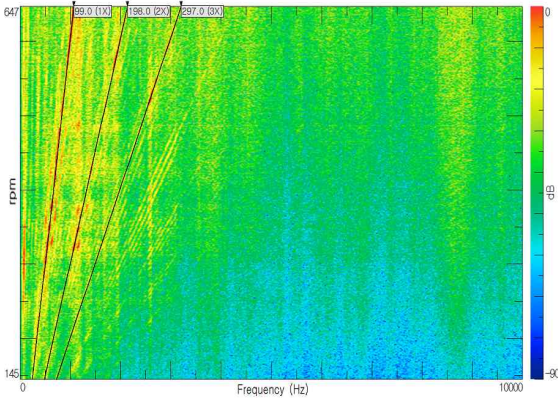


Figure 4. Order analysis of EMU reduction unit during acceleration

전동차용 감속기 출력측 기어 잇수가 99이므로 Order분석결과 Figure 4에서처럼 1차 Order값이 99가 나타난 것을 알 수 있으며, 2차, 3차 Order값 또한 1차 Order 배수와 일치하는 것을 알 수 있다.

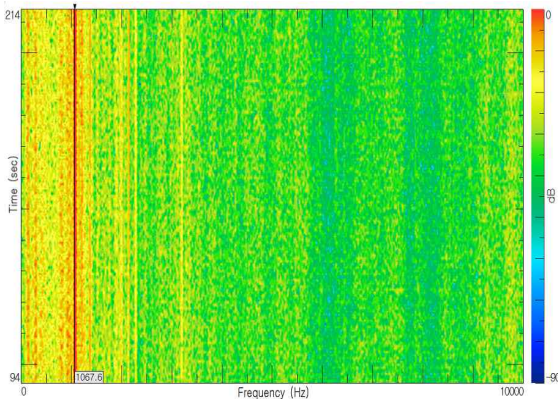


Figure 5. Gear mesh frequency of EMU unit at 647rpm

최고속도 정속구간의 기어 물림주파수의 이론식은 다음 Equation (3)을 이용하여 도출할 수 있다.

$$f_m = Z \times \frac{N}{60} \quad (3)$$

Equation (3)에 의해 도출된 결과를 Figure 5에 표현하였으며, 기어 물림주파수가 시험결과와 일치하는 것을 알 수 있으며, 정상상태의 전동차용 감속기의 진동신호의 주파수특성을 알 수 있다.

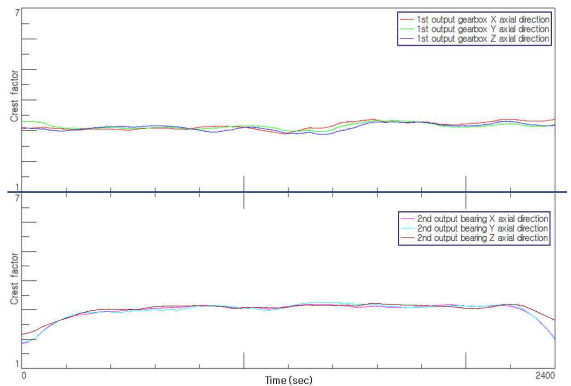
2.2 고속철도차량 감속기 진동특성

고속철도차량의 감속기 진동특성분석을 위해 국내 고속철도차량인 KTX, KTXII 차량을 대상으로 감속기의 진동특성을 비교분석하였다.

진동측정은 실차를 대상으로 이루어 졌으며, 고속철도차량의 감속기는 1차측 감속기와 2차측 감속기로 구성되어있다.

1차 출력측 기어박스과 2차 출력측 베어링에 각각 3축방향 가속도 진동을 측정하였으며, 측정지역 중 고속철도차량의 운행최고속도인 약 300km/h로의 운행이 가능한 광명역~대전역까지의 결과를 다음과 같이 비교분석하였다.

단, KTX차량 측정 시는 300km/h운행이 가능하였으나, KTXII 측정 시 296km/h의 속도가 해당 구간 중 최고속도이었다.



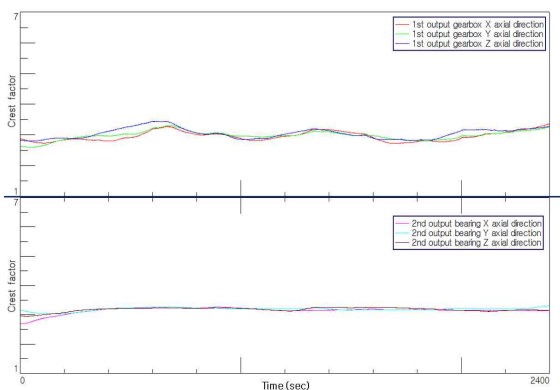


Figure 6. Comparison of the crest factor analysis between KTX and KTXII reduction unit while passing the Kwangmyung to the Daejeon station (up : KTX, down : KTXII)

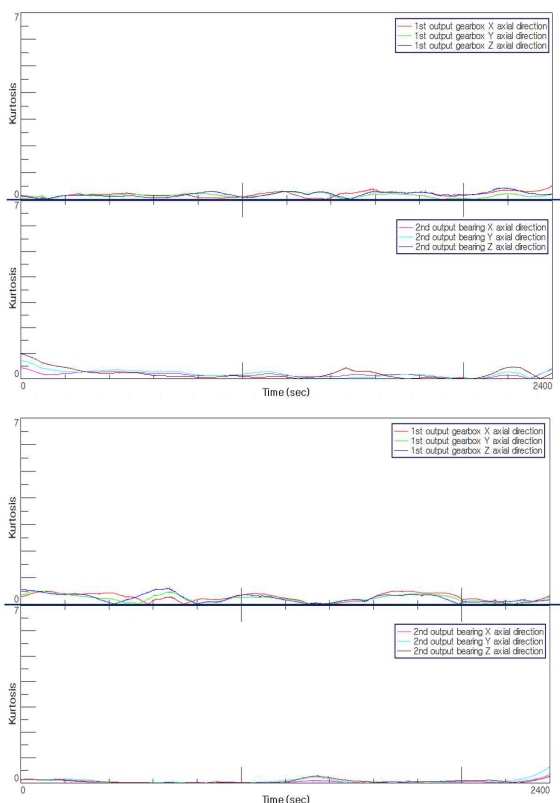


Figure 7. Comparison of the kurtosis analysis between KTX and KTXII reduction unit while passing the Kwangmyung to the Daejeon station (up : KTX, down : KTXII)

시간영역분석방법 중 파고율과 Kurtosis분석을 동일구간을 대상으로 실시한 결과 Figure 6과 같이 KTX와 KTXII 감속기에서의 진동특성 중 파고율값이 2레벨로 나타남을 알 수 있으며, Kurtosis값은 Figure 7의 결과와 같이 KTX와 KTXII 모두 1레벨 이하에서 나타남을 알 수 있었다.

이러한 결과를 통해 기어진동의 특성분석인 파고율레벨과 kurtosis레벨은 열차 속도와 크게 상관없이 정상상태의 경우 일정한 레벨의 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

다음은 광명역~대전역까지 실제 운행속도 중 최고속도(KTX차량은 300km/h, KTXII차량은 296km/h) 유지구간에서 기어 물림주파수분석결과를 Figure (8), (9)에 나타내었다.

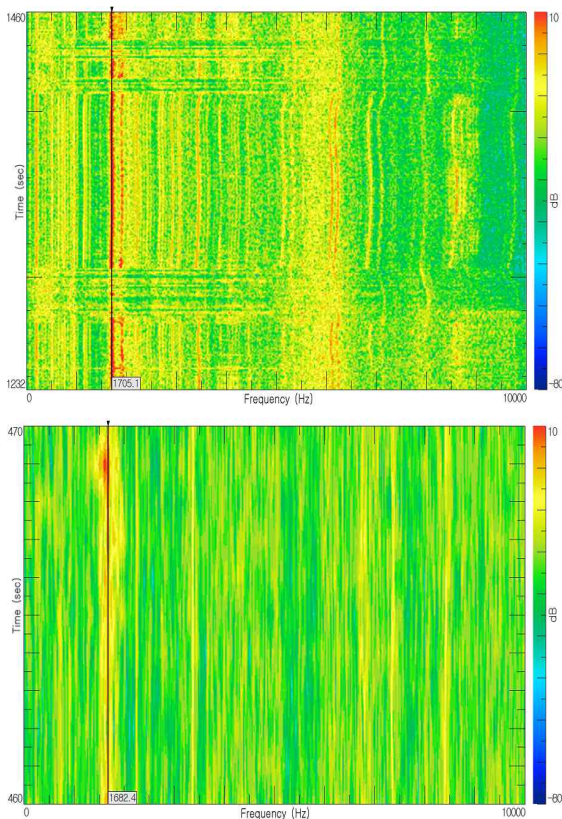


Figure 8. Comparison of the gear mesh frequency analysis about 1st output gearbox between KTX and KTXII reduction unit while passing the Kwangmyung to the Daejeon station (up : KTX, down : KTXII)

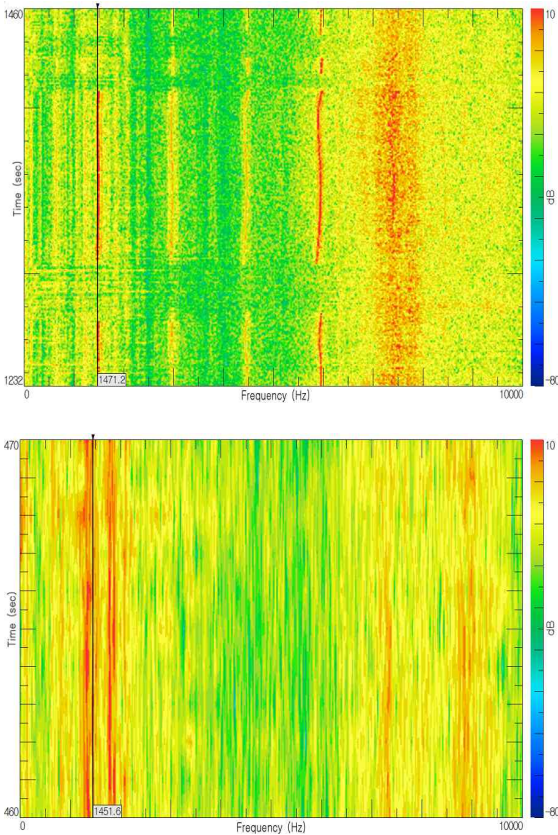


Figure 9. Comparison of the gear mesh frequency analysis about 2nd output bearing between KTX and KTX II reduction unit while passing the Kwangmyung to the Daejeon station (up : KTX, down : KTX II)

고속철도용 감속기에서의 기어잇수는 51, 출력축 기어와 입력축 기어의 기어비는 1.159(51/44), 차륜의 직경은 0.92m이므로 각각 1차, 2차 출력축 감속기의 기어 물림주파수의 이론식을 Equation (4), (5)에 나타내었다.

$$f_m = Z \times \frac{V/3.6}{\pi \times d_r} \times R \quad (4)$$

$$f_m = Z \times \frac{V/3.6}{\pi \times d_r} \quad (5)$$

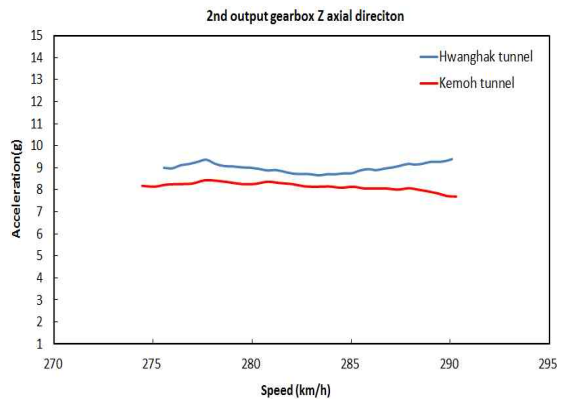
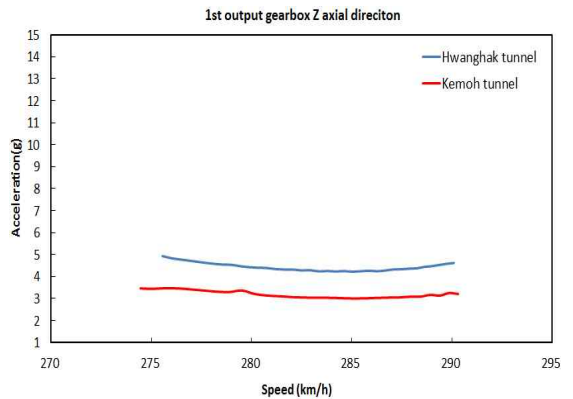
위 Equation (4), (5)에 실제측정 시 운행차량의 속도를 대입한 결과를 Figure 8, 9의 주파수 좌표에

표현하였다. 그 결과 이론적인 계산결과와 분석결과가 일치하는 것을 볼 수 있으나, KTX II 차량의 2차 출력축 감속기 베어링부의 주파수분석 결과에서는 이론식에 의한 기어 물림주파수의 특성이 확연히 나타나지는 않았다.

이러한 이유는 윤축 및 side-band 주파수 영향 때문이라고 사료된다.

다음은 고속철도차량(KTX II)이 터널 내 자갈도상과 콘크리트도상에서 가속주행 시 감속기에 미치는 진동특성이 어떠한 차이가 있는지 비교분석하였다.

대상은 황학터널(콘크리트도상)과 금오터널(자갈도상) 내에서 비슷한 속도로 가속주행 시 상하방향 진동가속도레벨을 비교분석하였다.



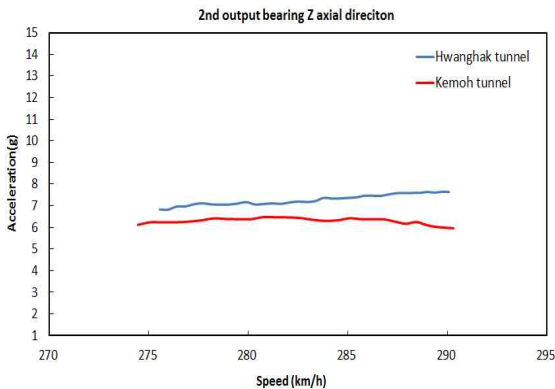


Figure 10. Acceleration characteristics analysis for comparison passing the ballast bed tunnel and the concrete tunnel

Figure 10에 나타난 결과와 같이 1차, 2차측 감속기의 상하방향 진동특성은 황학터널(콘크리트도상) 가속주행 시 진동레벨이 금오터널(자갈도상) 가속주행 시의 진동레벨보다 약 1~2g차이로 더 크게 나타났다.

3. 결 론

국내 철도차량인 전동차, 고속철도차량(KTX, KTXⅡ)의 감속기를 대상으로 진동특성을 파악한 결과는 다음과 같다.

기어의 이상진단을 위한 시간영역분석 방법인 파고율(Crest factor)분석과 Kurtosis 분석을 실시한 결과 정상상태 감속기의 파고율값은 2~3레벨수준으로 나타났으며, Kurtosis값은 1.5이하로 나타난 것을 알 수 있었다. 또한 기어 물림주파수분석과 Order분석을 통해 이론식의 결과와 비교해봄으로써, 정상상태에서의 감속기 진동신호에 따른 주파수특성을 파악할 수 있었다. 그리고 터널구간 중 콘크리트도상과 자갈도상을 가속주행 시 1차, 2차 감속기 모두 콘크리트 도상이 1~2g정도의 레벨로 더 높게 나타난 것을 알 수 있었으며, 이러한 이유는 콘크리트 슬라브 궤도에 적용된 방진패드와 자갈도상의 레일패드 및 자갈에 의한 동특성 차이에서 기인하는 것으로 알려져 있으며⁽⁶⁾, 이러한 영향이 윤축과 가까운 감속기에도 영향을 미치는 것으로 사료된다.

이러한 정상상태의 감속기의 진동특성 결과를 기

반으로 차후 감속기 내 기어의 이상진단을 위한 모니터링 시스템 개발에 도움이 될 수 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원의 지원을 받은 ‘고속열차용 감속기 모니터링시스템 개발’과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Moon, K. H., Lee, D. H., Kim, J. C., Ji, H. Y. and Lee, K. H., 2012, A Comparison of Vibration Characteristics of the Reduction Gearbox for the KTX and Electric motor coach, Korean Society for Precision Engineering Annual Spring Conference, pp. 1273~1274.
- (2) Yoo, J. H., Yoon, J. H., Kim, S. K. and Lee, J. M., 1995, Automatic Diagnosis of Defects in Roller Element Bearings, Journal of Korean Society for Noise and Vibration Engineering Vol. 5, No. 3, pp. 353~360.
- (3) Park, K. H., Jung, S. J., Wee, H., Lee, K. S. and Jo, S. H., 2009, A Study on the Fault Detection of Auto-transmission Using the Vibration Characteristics of Roller Bearings, Journal of Korean Society for Noise and Vibration Engineering Vol. 19, No. 3, pp. 268~273.
- (4) Kim, H. S. and Lee, S. K., 2002, Bearing Fault Diagnostics in a Gearbox, Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Autumn Conference, pp. 611~616
- (5) Toyota Toshioh, 1991, Diagnosis Method of Rotating Machinery, Japan Plant Maintenance Society, pp. 48~49.
- (6) Kim, M. C. and Jang, S. Y., 2006, Characteristics of Vibration of Track and Vehicle Body According to Type of Track in Tunnel of High-Speed Railway Lines, Journal of Korean Society of Civil Engineering, Vol. 26, No. 1D, pp. 125~132.