

# Twin-disk 시험기를 활용한 차량 동역학에 따른 휠과 레일에서 발생하는 진동 특성 연구

## Characteristics of Vibrations at the Wheel and Rail According to Train Vehicle Dynamics using a Twin-disk Rig

이 현 옥<sup>†</sup>  
HyunWook Lee<sup>†</sup>

(Received September 21, 2023 ; Revised September 27, 2023 ; Accepted October 11, 2023)

**Key Words :** Vehicle Dynamics(차량동역학), Vibration(진동), Wheel-rail Contact(휠-레일 접촉), Twin-disk Rig (Twin-disk 시험기)

### ABSTRACT

Wheel-rail interaction-induced vibrations are inherent to railway vehicles and have a significant impact on various phenomena, including adhesion coefficients, rolling noise, and wear. While research on these vibrations has primarily relied on theoretical approaches due to practical limitations, this study bridges the gap by conducting experimental investigations using the twin-disk type wheel-rail contact simulator at the Korea Railroad Research Institute. The experiments involved high-carbon steel specimens with flat-tread wheels and head-profiled rails. Vibration data were collected during the acceleration, slip, and deceleration phases under dry surface conditions. The results indicated that the vibration magnitudes were influenced by the train vehicle dynamics and contact conditions. Specifically, lower slip conditions, which are typical of acceleration and deceleration, produced higher vibrations. A frequency analysis revealed distinct characteristics between rolling/sliding and pure sliding contact zones. Vibrations in the rolling/sliding contact zone peaked at approximately 1250 Hz, while pure sliding contact led to a significant reduction in vibrations at this frequency. The findings of this study provide valuable insights into the relationship between wheel-rail interactions and vibrations in various operational scenarios, contributing to a better understanding of railway vehicle dynamics.

### 1. 서 론

철도 차량 주행 중 휠과 레일의 표면 조도(roughness)의 접촉으로 휠과 레일에서 진동이 발생한다<sup>(1,2)</sup>. 이렇게 발생한 진동은 점착계수(adhesion coefficient)<sup>(1-3)</sup>,

전동소음(rolling noise)<sup>(4-6)</sup>, 마모(wear)<sup>(7)</sup>, 스켈 소음(squeal noise)<sup>(8)</sup> 등의 휠과 레일 접촉면에서 발생하는 다양한 현상에 영향을 미친다. 따라서, 이러한 다양한 현상들에 대해 잘 이해하기 위해서 우선 주행 중 휠과 레일에서 발생하는 진동 특성을 아는 것이 중요하다.

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Korea Railroad Research Institute, Senior Researcher  
E-mail : hwlee@krii.re.kr

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2023 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Jiyoung Hong

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

휠과 레일에서 발생하는 진동에 관한 연구는 실제 철도 차량을 이용한 현장 실험의 어려움 및 모사 시험기의 부재로 인해 주로 이론적인 접근을 통한 연구가 진행되고 있다. 가속, 감속, 항속, 제동(breaking) 등 다양한 차량 주행 상황에서 휠과 레일의 접촉면은 구름/미끄럼 접촉 및 순수 미끄럼 접촉을 하게 되고 이는 휠과 레일의 진동에 영향을 미칠 수 있다. 이에 대한 실험적 연구 사례는 위에서 언급한 다양한 이유로 인해 극히 드물다.

이 연구에서는 휠-레일 진동 모사 실험에 관한 초기 연구로써 한국철도기술연구원에서 보유하고 있는 차량 주행 동역학을 정밀 모사할 수 있는 twin-disk type의 휠-레일 접촉 모사 시험기(Fig. 1)를 활용하여 차량 주행 동역학(train vehicle dynamics)에 따른 휠과 레일의 진동 발생 모사 시험을 수행하였다. 따라서, 이 연구의 목적은 twin-disk 시험기를 활용한 진동 발생 모사 시험의 가능성을 확인하고, 이를 통해 철도 차량 동역학에 따른 진동 특성을 파악하는 것이다.

## 2. 본 론

### 2.1 모사 시험기 및 시편

한국철도기술연구원에서 보유 중인 연구실 수준에

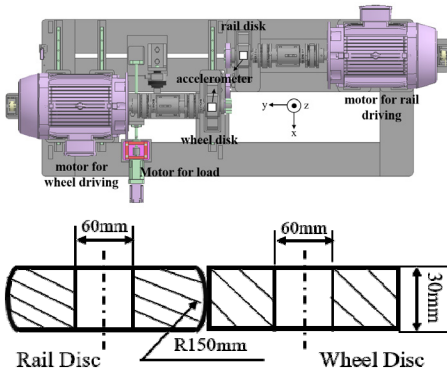


Fig. 1 A twin-disk rig, test set-up and sample disks

Table 1 Chemical composition and hardness of sample disks

	Chemical composition [wt. %]									Hardness [HB]
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Mo	Cr	Ni	
Wheel & rail disk	0.62	0.8	0.25	0.17	0.16	0.07	0.2	0.1	0.04	285

서의 기초 연구가 가능한 twin-disk type 휠-레일 접촉 모사 시험기(Fig. 1)를 활용하여 휠과 레일에서 발생하는 진동 특성 연구를 수행하였다. 모사 시험기는 휠과 레일의 회전수를 독립적으로 제어할 수 있고, 엔코더, 토크 미터, 로드셀을 이용하여 각 시편의 회전수 (rpm), 토크 및 인가 하중을 각각 측정할 수 있다.

휠과 레일 시편은 고탄소강(SSWQ1R)을 이용하여 지름 200 mm의 디스크 타입으로 만들어졌다. 휠 시편은 편평한 트레드(flat tread)를 가지고, 레일 시편은 R150 mm의 헤드 프로파일(head profile)을 가지고 있어 한 점에서 접촉이 발생한다. 시편의 화학적 조성 (chemical composition) 및 경도(hardness)는 Table 1에 나타나 있다.

### 2.2 시험 조건, 방법 및 데이터 분석

회전속도 1800 r/min 및 건조한 표면 조건에서 진동 발생 시험을 시행하였다. 회전속도 1800 r/min은 열차속도(선속도) 약 68 km/h에 상응한다. 1445 N의 하중을 휠 시편에 인가하였고, 동적으로 0% ~ 5%까지 선형으로 변하는 슬립 조건을 인가하였다. 휠과 레일 시편의 회전속도 프로파일은 Fig. 2에 나타나 있다.

시험 방법은 아래와 같다.

(1) 30초 동안 두 시편의 회전속도를 1800 r/min까지 증가시킨다(가속 구간(accel zone)).

(2) 휠 시편은 1890 r/min까지 120초 동안 증가시키고, 레일 시편은 동 시간 동안 회전속도를 1800 r/min으로 고정해 0% ~ 5%의 슬립율(식 (1))을 만든다(슬립 구간(slip zone)).

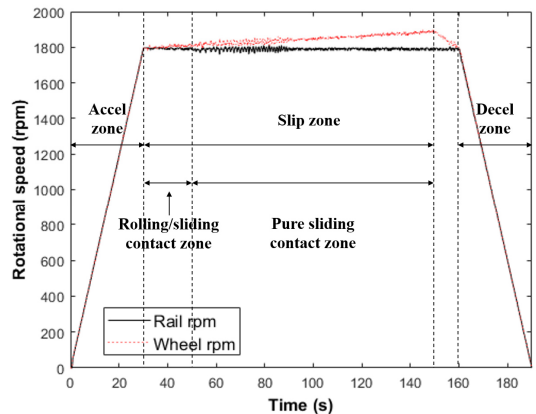


Fig. 2 The rotational speed profile of wheel and rail disks and dynamics/contact zones

(3) 레일 시편 회전속도는 1800 r/min으로 고정하고, 휠 시편의 회전속도는 10초 동안 1800 r/min까지 감소시킨 후, 휠과 레일 시편 모두 30초 동안 멈출 때까지 감속시킨다(감속 구간(decels zone)).

$$\text{slip rate (\%)} = \frac{\text{wheel disk rpm} - \text{rail disk rpm}}{\text{rail disk rpm}} \times 100 \quad (1)$$

가속도계는 10 mV/g의 민감도를 가지는 PCB 사의 365A33 모델을 사용하여 가속도를 측정하였다. 회전체의 특성상 휠과 레일에 직접 설치가 불가능하여 가장 근접하게 측정이 가능한 휠과 레일 베어링 어셈블리에 설치하여 간접적으로 진동을 측정하였다. 이 연구에서는 twin-disk 시험기 데이터인 회전속도, 토크, 인가 하중은 모두 100 Hz, 그리고 진동 데이터는 8192 Hz로 데이터를 취득하였다.

이 연구의 관심사는 철도 차량의 수직 방향 진동이므로 이에 해당하는 x 방향(Fig. 1), 즉 하중 인가 방향의 진동 데이터만 분석을 수행하였다. 진동 데이터는 주행 상황에 따라 가속 구간, 슬립 구간, 감속 구간으로 나누어 root-mean-square (RMS) 값을 계산하였고, 슬립 구간의 경우 점착계수 결과를 활용하여 구름/미끄럼 접촉 구간(rolling/sliding contact zone) 및 순수 미끄럼 접촉구간(pure sliding contact zone)으로 나누어 RMS 값을 계산하였다(Fig. 2). 동적 조건에서 회전체 시험을 하였으므로 전체 시험 구간에서 fast Fourier transform (FFT)을 수행하고, 결과를 시간에 따른 주파수 워터폴(waterfall)로 나타내어 경향을 분석하였다. 또한, 접촉 조건에 따른 주파수 성분의 변화를 확인하기 위하여 각 접촉구간에서 주파수 분석을 수행하였다.

### 3. 결과 및 토론

시간에 따른 휠과 레일 시편의 회전수를 측정된 결과가 Fig. 2에 나타나 있다. Fig. 3에 점착계수 결과가 나타나 있는데 이는 슬립 구간에서(30 ~ 150초 구간) 측정된 토크 및 하중 데이터를 활용하여 계산한 것이다. 구름마찰 시스템(rolling friction system)에서는 슬립이 발생할 때 점착력(adhesion force)이 발생하고, 이때 인가된 하중을 이용하여 식 (2)를 활용하여 점착

계수를 구할 수 있다. 점착계수가 최대값일 때의 슬립율을 기준으로 더 작은 슬립율에서는 구름/미끄럼 접촉 조건이 형성되고, 더 큰 슬립율에서는 순수 미끄럼 접촉 조건이 형성된다. 따라서, 이 연구에서 순수 미끄럼 접촉 조건은 슬립율 약 0.9% 이상부터 발생하는 것을 알 수 있는데 이는 Fig. 2에서 약 52 ~ 150초 구간이다.

$$\text{adhesion coefficient } (\mu) = \frac{\text{disk torque}}{\text{applied load} \times \text{radius of disk}} \quad (2)$$

철도 차량 주행 동역학은 슬립율을 통해 일반적으로 유추할 수 있다. 0.1% 이하의 아주 낮은 슬립율은 주로 직선 레일의 항속 주행 시 발생하고 순수 미끄럼 접촉 조건이 발생하는 높은 슬립율은 주로 곡선 주로 및 정지를 위한 제동 시 발생한다. 따라서, 이 실험에서 인가된 0% ~ 5%의 슬립율 조건은 철도 차량 주행 중에 발생할 수 있는 다양한 주행 조건(예: 가속, 감속, 제동, 곡선 주행, 직선 항속 주행 등)을 시뮬레이션한 것으로 이해할 수 있다.

Fig. 3의 슬립율 약 1% ~ 2.5% 사이에서 큰 움직임이 나타나는데 이는 Fig. 2에서 약 55초 ~ 90초 구간에 나타난 휠과 레일 회전수 진동과 일치하는 구간으로 순수 미끄럼 접촉 시작하는 초기 구간에서 모터가 휠과 레일의 회전속도 차이를 정밀 제어하지 못해서 발생한 것이다. 참고로 이 구간에서의 휠 시편의 회

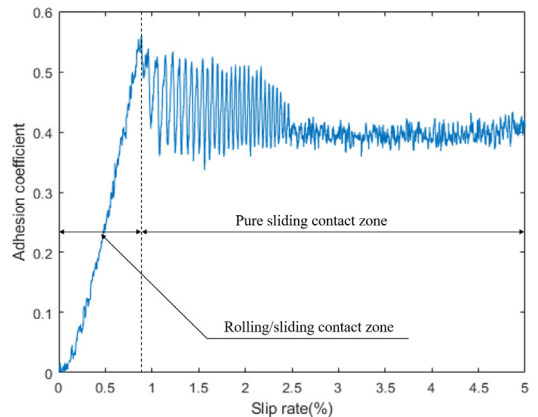
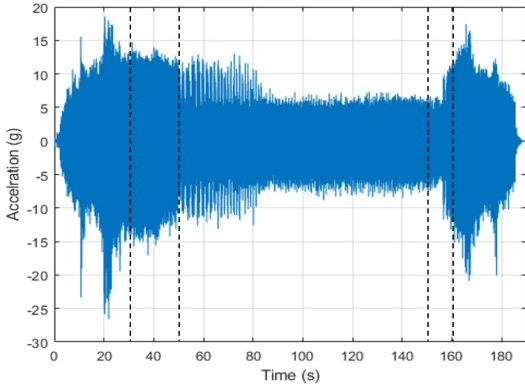
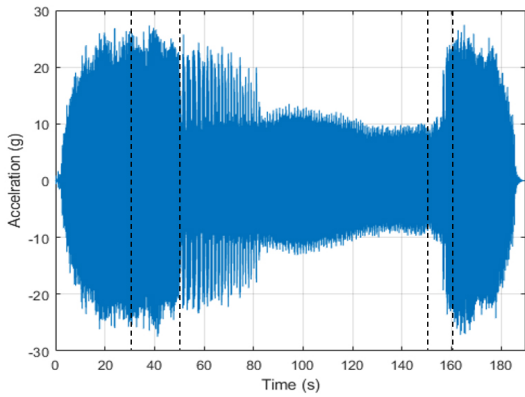


Fig. 3 Adhesion coefficient

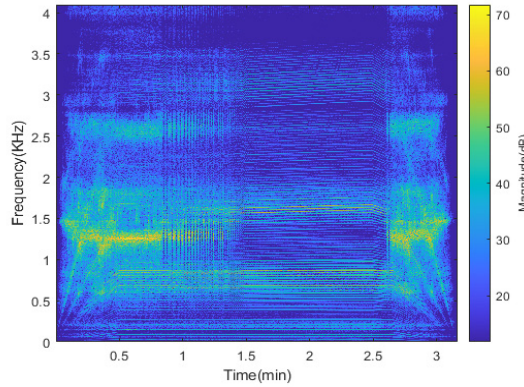


(a) Vibration at the wheel

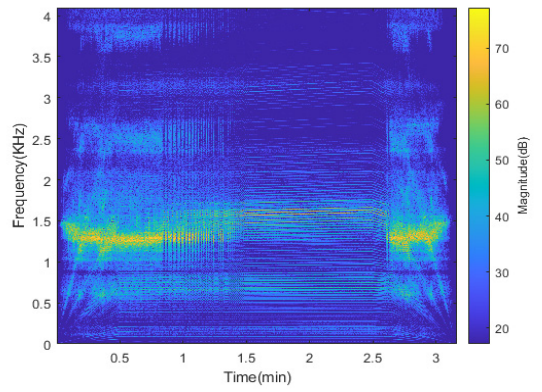


(b) Vibration at the rail

Fig. 4 Vibration results



(a) Wheel



(b) Rail

Fig. 5 Waterfall results of FFT

Table 2 RMS values [g] of wheel and rail vibration

	Accel	Decel	Slip zone	
			Rolling/sliding	Pure sliding
Wheel	3.9	3.7	5.1	2.3
Rail	8.0	8.1	9.9	4.5

전수는 레일 시편 회전수에 비해 약 18 r/min ~ 35 r/min 이 높은 구간이다.

휠과 레일 베어링 어셈블리에서 측정된 가속도를 시간의 함수로 나타낸 결과가 Fig. 4에 각각 나타나 있고, Table 2에는 각 구간에서 계산된 가속도의 RMS 값들이 나타나 있다. 전체 구간에서 레일 시편의 진동이 휠 시편의 진동에 비해 약 2배 정도 높은 RMS 값을 보였다. 레일에서 더 높은 진동(가속도) 값이 나타난 결과는 시험기의 구조 특성에 기인하는 것으로 판

단된다. 이 연구에서 사용된 twin-disk 시험기는 레일 구동 모터는 고정되어 있고, 휠 구동 모터의 경우 하중 인가를 위하여 LM guide에 얹혀 있는 구조로 되어 있다. 따라서, 발생한 진동으로 인해 휠 구동 모터가 LM guide를 따라 선형 운동을 하게 되는데, 이에 따라 진동으로 측정된 가속도가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 4를 보면 가속 및 감속 구간에서 나타난 휠과 레일의 가속도 값이 유사함을 알 수 있다. 슬립 구간에서는 순수 미끄럼 접촉구간에 비해 구름/미끄럼 접촉구간에서 휠과 레일 모두 두 배 이상의 RMS 값을 나타내었다. 네 구간 중 순수 미끄럼 접촉구간에서 가장 작은 RMS 값을 나타내었는데, 이는 감속 구간에 비해서도 50% 이상 작은 값이다. 이를 통해 가감속 및 직선 주행 등 낮은 슬립율이 나타나는 주행 조건에서 더 높은 진동이 발생함을 알 수 있다.

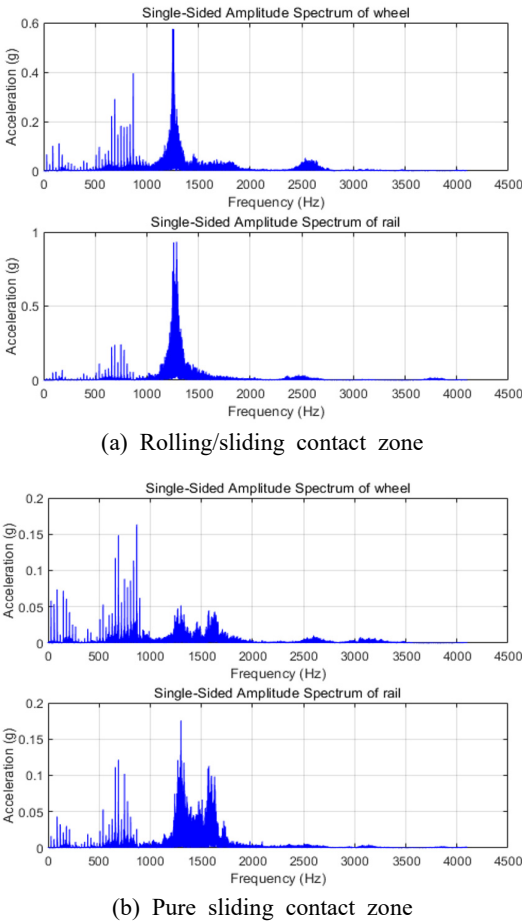


Fig. 6 FFT results at different contact zones

가감속 구간을 확인해 보면 RPM이 증가 또는 감소함에 따라 진동이 증가 및 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5를 보면 가감속 구간에서 RPM에 의한 오더 진동 값이 변화하는 것을 확인할 수 있는데, 이를 통해 차량의 속도 또한 진동에 영향을 미칠 수 있음을 유추해 볼 수 있다. 따라서, 향후 연구에는 진동과 열차속도와의 상관관계에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 주파수를 워터폴로 나타낸 결과이다. Fig. 5에 나타나 있듯이 휠 및 레일 모두 비슷한 경향을 보였다. 가속 및 구름/미끄럼 접촉구간에서는 약 1200 Hz ~ 1300 Hz에서 가장 높은 진동이 나타났다. 약 1분경부터는 순수 미끄럼 접촉 조건이 발생하면서 가장 높은 진동 값이 나타나는 주파수가 증가하여 약 1500 Hz 인근으로 이동했다가 감속 영역에서는 다시 1200 Hz ~ 1300 Hz로 돌아오는 경향을 나타내었다. 여기서 가속

및 감속 구간은 모두 구름/미끄럼 접촉 조건에 해당한다. 따라서, 가장 높은 진동 값이 나타나는 주파수는 구름/미끄럼 접촉 조건에서는 1.2 kHz ~ 1.3 kHz에서, 그리고 순수 미끄럼 접촉 조건에서는 1.5 kHz에서 발생하는 것으로 알 수 있는데, 이를 통해 접촉 조건이 진동에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

접촉 조건에 따른 진동의 변화를 확인하고자 접촉 조건에 따른 주파수의 변화를 확인하였고, 이는 Fig. 6에 나타나 있다. 두 접촉 조건의 휠과 레일 모두에서 1000 Hz 이하에서 30 Hz 성분의 사이드밴드(sideband)가 나타나는데, Wang and Lee<sup>(9)</sup>에 따르면 이는 회전체에서 슬립 발생할 시 나타나는 특징이다. 구름/미끄럼 접촉구간에서는 휠과 레일 모두에서 약 1250 Hz 인근에서 가장 높은 진동 값이 발생하였는데, 순수 미끄럼 접촉 조건에서는 이 주파수에서의 진동 값이 현저히 낮아졌다. Fig. 4에 나타난 순수 미끄럼 접촉구간에서의 낮은 진동 값은 약 1250 Hz 성분의 진동이 감소한 것이 가장 큰 이유라고 판단된다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 휠-레일 접촉 모사 시험기를 활용하여 휠과 레일에서 발생하는 진동을 간접 측정하여, 휠과 레일에서 발생하는 진동의 모사 시험 가능성을 확인하였다. 또한, 차량 동역학 및 접촉 조건에 따른 진동 발생 특성을 확인해보았다. 이 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) Twin-disk 시험기를 활용한 휠 및 레일 진동 발생 모사 시험 및 진동 발생 특성 연구는 가능한 것으로 판단된다. 특히, 다양한 인자의 영향에 대한 상대 비교 연구 등에 유용하게 활용할 수 있는 것으로 기대된다.
- (2) 휠과 레일에서 발생하는 진동 크기 및 특성은 가속, 감속, 브레이킹 등 다양한 차량 동역학의 영향을 받는다.
- (3) 휠과 레일에서 발생하는 진동 크기 및 특성은 휠과 레일의 접촉 조건인 구름/미끄럼 접촉 및 순수 미끄럼 접촉 조건의 영향을 받는다.

#### 후 기

이 논문은 한국철도기술연구원 기본사업인 “철도



시설의 폐기물 발생 저감 및 재자원화 기술 개발 (PK2302C2)의 연구 결과를 활용하여 작성되었음.

## References

(1) Lee, H. W., Sandu, C. and Holton, C., 2012, Dynamic Model for the Wheel-rail Contact Friction, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 50, No. 2, pp. 299~321.

(2) Lee, H. W., Sandu, C. and Holton, C., 2012, Stochastic Analysis of the Wheel-rail Contact Friction Using the Polynomial Chaos Theory, *Journal of Tribology*, Vol. 134, No. 3, 031601.

(3) Lee, H. W., 2018, Estimation of Adhesion Coefficient Using Dynamic Adhesion Model, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 21, No. 4, pp. 331~341.

(4) Jang, S. and Ryue, J., 2013, Study on the Rolling Noise Model Using an Analysis of Wheel and Rail Vibration Characteristics, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 16, No. 3, pp. 175~182.

(5) Thompson, D., 2009, *Railway Noise and Vibration: Mechanics, Modelling and Means of Control*, Elsevier, Oxford, UK.

(6) Shin, H. H., Nam, J., Kang, J., Nam, C., Ahn, S. and Choi, S., 2019, Squeal Propensity Analysis on Railway Shoe Using the FE Analysis, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 29, No. 5, pp. 624~631.

(7) Zhai, W., Jin, X., Wen, Z. and Zhao, X., 2020, Wear Problems of High-speed Wheel/Rail Systems: Observations, Causes, and Countermeasures in China, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 72, No. 6, 060801.

(8) Shin, H., Nam, J., Choi, S. and Kang, J., 2019, Numerical Investigation on Rail Brake Squeal, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 289~294.

(9) Wang, P. and Lee, C.-M., 2019, Fault Diagnosis of a Helical Gearbox Based on an Adaptive Empirical Wavelet Transform in Combination with a Spectral Subtraction Method, *Applied Science*, Vol. 9, No. 8, 1696.



**HyunWook Lee** received his M.S. degree in the department of Biomedical Engineering from Virginia Tech (USA) in 2007 and Ph.D. degree in the Department of Mechanical Engineering from Virginia Tech (USA) in 2010. He is now working as a senior research in the Transportation Environmental Research Department of Korea Railroad Research Institute and as an associate professor in the Transportation System Engineering of University of Science Technology. He has interests on the various phenomena at the contact of rolling friction systems, such as vibration, wear, friction, rolling noise, and airborne wear particles.