

Twin-disk 시험기를 활용한 열차 속도에 따른 휠과 레일에서 발생하는 진동 특성 연구

Characteristics of Vibrations

at the Wheel and Rail According to Train Speed using a Twin-disk Rig

이 현 옥[†]

Hyun Wook Lee[†]

(Received July 16, 2026 ; Revised August 7, 2026 ; Accepted August 7, 2026)

Key Words : Train Speed(열차속도), Vibration(진동), Wheel-rail Contact(휠-레일 접촉), Twin-disk Rig(트윈-디스크 시험기)

ABSTRACT

Wheel-rail interaction-induced vibrations are inherent to railway vehicles and significantly affect phenomena such as adhesion coefficients, rolling noise, and wear. Although a previous study investigated these vibrations using a twin-disk wheel-rail contact simulator under a single speed condition, the effect of train speed on wheel-rail contact vibration remained unclear. This study extended the aforementioned previous study by conducting experiments at three rotational speeds: 1200 r/min, 1800 r/min, and 2400 r/min, corresponding to approximately 45 km/h, 68 km/h, and 90 km/h, respectively. The experiments involved high-carbon steel specimens with flat-tread wheels and head-profiled rails under dry surface conditions, and vibration was measured during the acceleration, slip, and deceleration phases at each speed. Time-domain moving RMS envelopes and Welch-based power spectral densities were used to characterize the vibration. In the acceleration, rolling/sliding-contact, and deceleration zones, the RMS levels of both wheel and rail vibrations increased monotonically with rotational speed. The peak amplitude in the 1 kHz ~ 2 kHz band also increased markedly with speed for both wheel and rail vibrations across these zones. The peak frequency remained nearly constant (approximately 1290 Hz ~ 1310 Hz) for rail vibration; however, it exhibited larger variability for wheel vibration, particularly in the pure sliding-contact and deceleration zones. In the pure sliding-contact zone, the RMS levels exhibited no monotonic trend, possibly owing to transient motor-control fluctuations and specimen wear during sequential testing. Further verification tests are required to clarify this behavior. These findings extend the understanding of wheel-rail contact vibration established in a previous study by incorporating train speed as an additional influencing factor.

1. 서 론

철도 차량이 궤도를 주행할 때 발생하는 진동은 휠

과 레일 표면의 요철(irregularity) 접촉에 기인하며, 점착계수(adhesion coefficient)^(1~3), 전동소음(rolling noise)^(4~6), 휠-레일 마모(wear)⁽⁷⁾, 스컬 소음(squeal

[†] Corresponding Author ; Member, Korea Railroad Research Institute, Senior Researcher
E-mail : hwlee@krii.re.kr

[‡] Recommended by Editor Jung Woo Sohn
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

noise) 등 접촉면에서 발생하는 다양한 현상에 직간접적으로 영향을 미치는 것으로 알려져 있다⁽⁸⁾. 이러한 현상들은 대체로 열차 속도에 따라 그 양상이 달라지는 것으로 알려져 있어, 속도 조건에 따른 진동 특성 변화를 규명하는 것은 실용적 관점에서 중요한 의미를 갖는다. 따라서 이러한 접촉 현상들을 정량적으로 이해하기 위해서는, 휠과 레일에서 발생하는 진동 특성을 먼저 파악할 필요가 있다.

그러나 실제 철도 차량을 이용한 현장 계측은 비용, 안전성, 재현성 확보의 어려움으로 인해 제약이 크며, 이를 보완하기 위해서는 모사 시험기를 활용한 실험적 접근이 요구된다. 이러한 배경에서 저자는 선행 연구를 통해 twin-disk type 휠-레일 접촉 모사 시험기를 이용하여 차량 주행 동역학에 따른 진동 특성을 규명한 바 있다⁽⁹⁾. 해당 연구에서는 가속 및 감속 구간에서 회전속도(RPM) 변화에 연동하여 진동이 함께 변화하는 경향이 관찰되었으며, 이는 열차 속도가 진동 특성에 유의한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 다만, 이 연구는 단일 속도 조건(1800 r/min)에서 수행되어 속도 의존성을 정량적으로 검증하지는 못하였으며, 열차가 실제 운행 중 경험하는 다양한 속도 범위에서 진동 특성이 어떻게 달라지는지는 아직 규명되지 않았다.

선행연구에서는 단일 속도 조건에서 차량 동역학 및 접촉 조건에 따른 진동 특성을 규명하였으며⁽⁹⁾, 향후 과제로 진동과 열차 속도의 상관관계 규명을 제시한 바 있다. 이 연구는 이를 확장하여 여러 속도 조건(1200 r/min, 1800 r/min, 2400 r/min)에서의 진

동 특성을 비교 분석함으로써, 속도가 휠-레일 접촉 진동에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고자 한다.

2. 본 론

시험기, 시편, 시험 방법 및 데이터 분석 방법은 선행 연구와 동일하며, 이 논문에서는 이를 간단히 요약하여 설명한다. 세부적인 내용은 선행연구를 참고하기 바란다⁽⁹⁾.

2.1 모사 시험기 및 시편

Fig. 1의 시험기는 twin-disk type 휠-레일 접촉 모사 시험기로, 휠 및 레일 디스크의 회전수를 독립적으로 제어할 수 있으며, 엔코더(encoder), 토크 미터(torque meter), 로드셀(load cell)을 통해 회전수, 토크, 인가 하중을 각각 계측할 수 있다. 시편은 고탄소강(SSWQ1R, 지름 200 mm)으로 제작된 편평한 트레드(flat tread) 형상의 휠 디스크와 R15 mm의 헤드 프로파일(head profile) 형상의 레일 디스크로 구성되어 한 점 접촉을 구현하며, 화학적 조성 및 경도는 Table 1과 같다.

2.2 시험 조건, 방법 및 데이터 분석

시험은 건조한 표면 조건에서 1200 r/min, 1800 r/min, 2400 r/min의 세 가지 회전속도 조건으로 수행하였으며, 이는 각각 약 45 km/h, 68 km/h, 90 km/h의 열차 속도(레일 회전속도 기준 선속도)에 상응한다. 시험 방법은 아래와 같다.

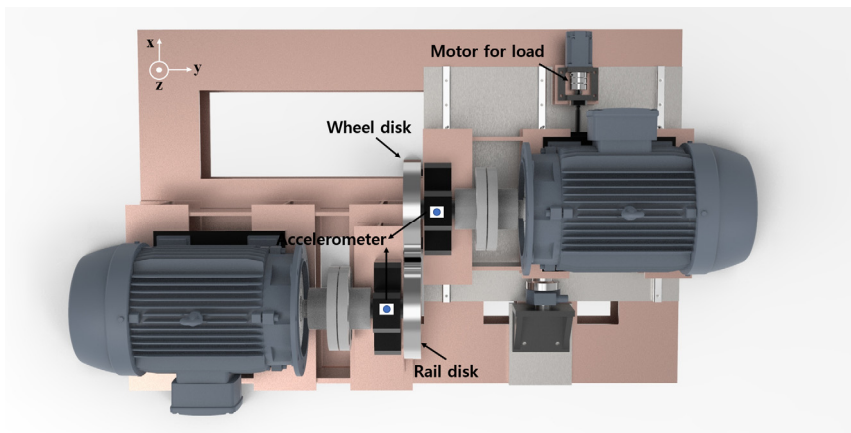


Fig. 1 A twin disk rig and schematics of test set-up

(1) 30초 동안 두 시편의 회전속도를 목표 회전속도까지 증가시킨다(가속구간, accel zone).

(2) 휠 시편의 회전속도는 목표 회전속도 대비 5 % 높은 값까지 120초 동안 선형으로 증가시키고, 레일 시편은 동 시한 동안 목표 회전속도로 고정하여 0 % ~ 5 %의 슬립률을 식 (1)과 같이 형성한다(슬립 구간, slip zone).

$$\text{슬립률(\%)} = \frac{\text{휠 회전속도} - \text{레일 회전속도}}{\text{레일 회전속도}} \times 100 \quad (1)$$

(3) 레일 시편 회전속도는 목표 회전속도로 고정하고, 휠 시편의 회전속도는 10초 동안 목표 회전속도까지 감소시킨 후, 휠과 레일 시편 모두 30초 동안 정지할 때까지 감속시킨다(감속 구간, decel zone).

하중(1445 N), 슬립률(slip rate) 프로파일, 구간 구성은 세 속도 조건에서 모두 동일하게 적용하여, 회전속도 변화가 진동 특성에 미치는 순수한 영향만을 비교하였다. 회전속도 프로파일 예는 Fig. 2에 나타나있다. 진동은 가속도계(PCB 365A33, 민감도 10 mV/g)를 휠 및 레일 베어링 어셈블리에 설치하여 간접 계

측하였으며, 회전속도, 인가 하중은 100 Hz, 진동 데이터는 8192 Hz로 취득하였다. 분석은 하중 인가 방향(x 방향, Fig. 1) 진동 데이터를 대상으로, 구간별 RMS 값을 산출하였으며, 슬립 구간은 구름/미끄럼 접촉에서 순수 미끄럼 접촉이 발생하는 구간으로 세분하여 분석하였다. 참고로, 구름/미끄럼 접촉에서 순수 미끄럼 접촉의 변화는 세 회전속도 모두에서 슬립률 약 1 %에서 발생하였다.

속도 조건 간 진동 크기의 시간적 변화를 비교하기 위하여, 가속도 신호에 1초 이동 윈도우(window)를 적용한 이동 RMS 엔벨로프(moving RMS envelope)를 계산하였다. 또한 주파수 특성을 정량적으로 비교하기 위하여, 각 구간별 신호에 대해 Welch 방법 기반의 파워 스펙트럼 밀도(PSD)를 산출하였다. 선행 연구⁽⁹⁾에서는 접촉 조건이 구름/미끄럼 접촉에서 순수 미끄럼 접촉으로 전환될 때 1 kHz ~ 2 kHz 대역에서 진동 크기가 뚜렷하게 변화하는 현상이 관찰된 바 있다. 따라서, 이 연구에서는 이를 근거로 해당 대역 내에서 최대 진폭을 나타내는 주파수와 그 크기를 각각 피크 주파수 및 피크 진폭으로 정의하여 분석하였다.

Table 1 Chemical composition and hardness of wheel and rail 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

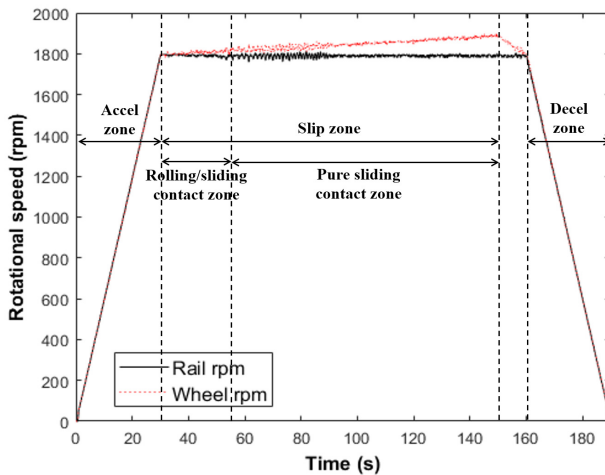


Fig. 2 An example of the rotational speed profile of wheel and rail disks (1800 r/min)

3. 결과 및 토론

세 회전속도(1200 r/min, 1800 r/min, 2400 r/min) 조건에서 측정한 휠 및 레일 진동의 시간 이력(1초 이동 RMS)을 Fig. 3에 나타내었다. 세 조건 모두 가속 구간에서 진동이 점차 증가하다가, 슬립 구간 초반의 구름/미끄럼 접촉 구간에서 가장 큰 진동을 나타낸 후, 순수 미끄럼 접촉으로 전환되면서 진동이 뚜렷하게 감소하는 공통적인 경향을 보였다. 감속 구간에서는 다시 진동이 증가하였다. 전반적으로 회전 속도가 높아질수록 각 구간에서의 진동 수준이 높아지는 경향이 관찰되었다.

구간별 RMS 값을 Table 2에 정리하였다. 가속, 구름/미끄럼 접촉, 감속 구간에서는 회전속도 증가에 따라 RMS 값이 단조적(monotonic)으로 증가하였다. 예를 들어 레일의 구름/미끄럼 접촉 구간 RMS는 1200 r/min에서 9.87 g, 1800 r/min에서 10.57 g, 2400 r/min에서 12.32 g로 증가하였다. 다만 순수 미끄럼 접촉 구간에서는 이러한 단조 증가 경향이 나타나지 않았으며, 2400 r/min 조건의 RMS 값이 1800 r/min 조건보다 낮게 나타났다. 이러한 비단조적 경향에는 여러 요인이 복합적으로 작용했을 가능성이 있다. 슬립 구간 초반에는 모터 제어 특성에 기인한 동요(fluctuation)가 포함되어 있으며, 그 지속시간이 속도별로 상이하여 구간 평균값에 미치는 영향이 조건마다 다를 수 있다. 아울러 세 속도 조건이 동일 시편을 이용하여 순차적

으로 수행되었고, 순수 미끄럼 접촉 구간에서는 매 시험마다 0 % ~ 5 %의 슬립률이 반복 인가된 점을 고려할 때 시편 마모의 영향도 배제할 수 없다. 따라서, 슬립 구간, 특히 순수 미끄럼 접촉 구간에서의 속도 의존성에 대해서는 이 데이터만으로 명확한 결론을 내리기 어려우며, 동요 및 마모 등의 영향을 제어한 추가적인 검증 시험이 필요할 것으로 판단된다.

휠 진동의 피크 진폭은 레일과 마찬가지로 전 구간에서 회전속도 증가에 따라 단조적으로 증가하는 경향을 보였다. 다만, 피크 주파수는 레일 대비 속도 조건 간 산포가 크게 나타났으며, 특히 순수 미끄럼 접촉 및 감속 구간에서는 1158 Hz ~ 1570 Hz까지 큰 폭으로 변화하였다. 이에 Table 3, Table 4 및 Fig. 4, Fig. 5에는 휠과 레일 결과를 함께 제시하고, 이후 논의는 주파수 안정성이 상대적으로 높은 레일 결과를 중심으로 서술하되 휠과의 비교를 포함하였다.

구간별 FFT 스펙트럼을 속도 조건별로 비교한 결과, 대표적으로 구름/미끄럼 접촉 구간에서의 스펙트럼을 Fig. 6에 나타내었다. 세 속도 조건의 스펙트럼은 전체적인 형상과 주요 피크의 위치가 서로 뚜렷하게 구분되지 않았으며, 가속, 순수 미끄럼 접촉, 감속 구간에서도 이와 유사하게 속도 조건 간 뚜렷한 차이가 관찰되지 않았다. 즉, 이러한 전반적인 주파수 분석 방식만으로는 속도의 영향을 확인하기 어려웠다.

반면, 선행 연구⁹⁾에서 접촉 조건 변화에 따라 진동 크기가 뚜렷하게 달라지는 것으로 관찰된 1 kHz ~ 2 kHz

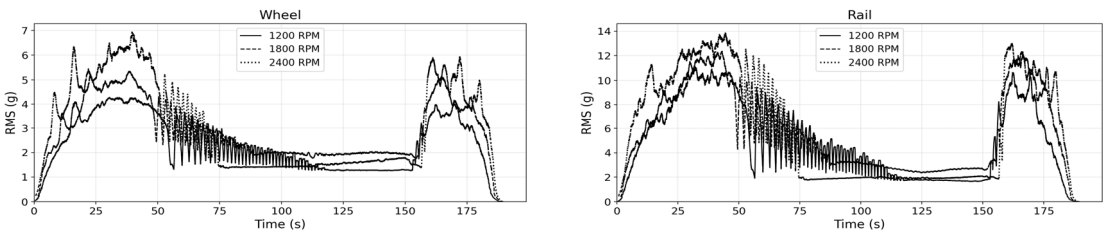


Fig. 3 Time history of wheel and rail vibration (1 s moving RMS) at three rotational speeds

Table 2 RMS values (g) of wheel and rail vibration at three rotational speeds

Zone	Wheel RPM			Rail RPM		
	1200	1800	2400	1200	1800	2400
Accel	2.95	3.52	4.29	6.55	6.91	8.99
Rolling/sliding	3.97	4.52	5.82	9.87	10.57	12.32
Pure sliding	1.90	2.29	2.02	3.83	4.14	3.94
Decel	2.86	3.67	4.24	6.51	8.52	9.21

대역에서 피크 주파수 및 피크 진폭을 추출하여 비교한 경우에는 속도에 따른 경향이 뚜렷하게 나타났다. 휠 및 레일 진동에 대한 분석 결과를 Table 3, Table 4 및 Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다. 전 구간, 전 속도 조건에서 레일의 피크 주파수는 약 1290 Hz ~ 1310 Hz로 거의 일정하게 나타난 반면, 휠의 피크 주파수는 특

히 순수 미끄럼 접촉 및 감속 구간에서 1158 Hz ~ 1570 Hz까지 상대적으로 큰 폭으로 변화하였다. 반면 피크 진폭은 휠과 레일 모두 전 구간에서 회전속도가 높아질수록 뚜렷하게 증가하였다. 이는 해당 대역의 진동 특성이 속도와 무관하게 유지되는 가운데, 속도 증가에 따른 에너지 유입 증가가 진동 크기의 증가로

Table 3 Peak frequency of wheel and rail vibration in the 1 kHz ~ 2 kHz band

Zone	Wheel frequency [Hz]			Rail frequency [Hz]		
	1200	1800	2400	1200	1800	2400
Accel	1262	1264	1258	1288	1290	1298
Rolling/sliding	1302	1266	1244	1302	1292	1294
Pure sliding	1326	1570	1158	1310	1298	1298
Decel	1466	1460	1254	1302	1294	1288

Table 4 Peak amplitude of wheel and rail vibration in the 1 kHz ~ 2 kHz band

Zone	Wheel amplitude [g]			Rail amplitude [g]		
	1200	1800	2400	1200	1800	2400
Accel	0.22	0.28	0.43	0.80	0.82	1.22
Rolling/sliding	0.41	0.50	0.85	1.39	1.54	1.74
Pure sliding	0.13	0.16	0.25	0.37	0.39	0.48
Decel	0.24	0.27	0.35	0.70	0.90	0.99

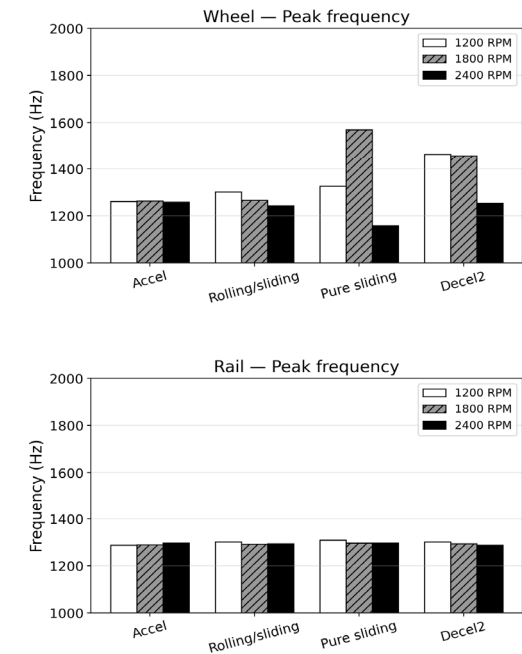


Fig. 4 Peak frequency of wheel and rail vibration in the 1 kHz ~ 2 kHz band

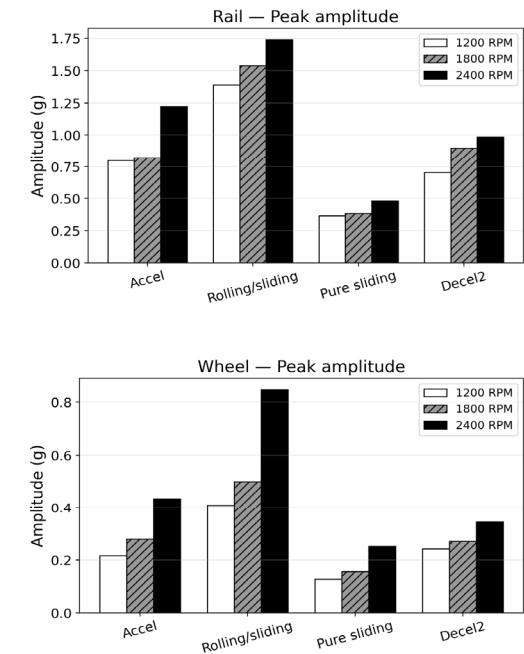


Fig. 5 Peak amplitude of wheel and rail vibration in the 1 kHz ~ 2 kHz band

나타난 것으로 판단되며, 이러한 경향은 휠과 레일 채널 모두에서 공통적으로 관찰되었다.

다만, 휠 진동의 경우 순수 미끄럼 접촉 구간에서는 접촉 초기(슬립률 1%~2.5% 부근)에 모터가 회전속도를 정밀하게 추종하지 못해 발생하는 일시적 동요가 구간 초반에 포함되어 있어, 다른 구간에 비해 피크 주파수의 속도별 경향이 상대적으로 불규칙하게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 동요는 세 속도 조건 모두에서 공통적으로 관찰되었으나, 그 지속 시간은 회전속도가 낮을수록 길게 나타났다. 슬립률은 상대적인 값인 반면 모터 제어는 절대 회전수 차이를 기준으로 이루어지므로, 회전속도가 낮을수록 동일한 슬립률에 해당하는 절대 회전수 차이가 작아져 상대적으로 정밀한 제어가 어려워지기 때문으로 판단된다. 감속 구간에서도 휠 피크 주파수의 산포가 유사하게 크게 나타났으나, 이 구간은 슬립 제어와 무관하게 두 시편이 함께 감속하는 구간이므로 위와 동일한 메커니즘으로 설명하기는 어려우며, 그 원인은 이 연구의 범위에서 명확히 규명하지 못하였다.

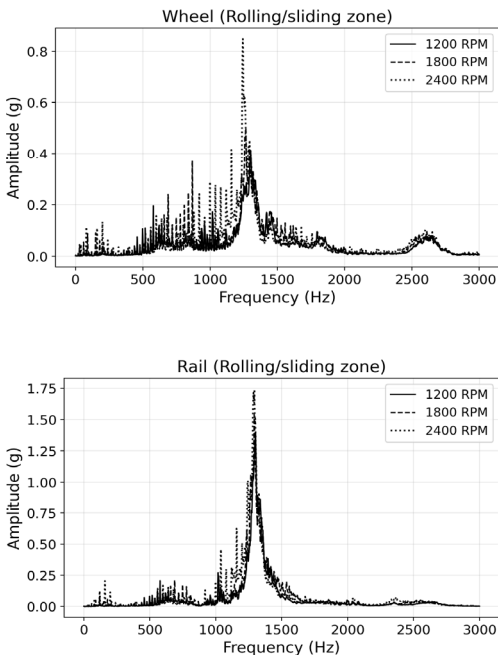


Fig. 6 FFT spectra of wheel and rail vibration at three rotational speeds (rolling/sliding zone, representative case)

4. 결 론

이 연구에서는 twin-disk 시험기를 활용하여 세 가지 회전속도(1200 r/min, 1800 r/min, 2400 r/min) 조건에서 휠-레일 접촉 진동 발생 시험을 수행하고, 열차 속도가 진동 특성에 미치는 영향을 확인하였다. 이 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

(1) Twin-disk 시험기를 활용하여 열차 속도 조건에 따른 휠-레일 접촉 진동 특성을 비교, 분석하는 것이 가능함을 확인하였다.

(2) 가속, 구름/미끄럼 접촉, 감속 구간에서는 회전속도가 높아질수록 휠 및 레일 진동의 RMS 값이 모두 단조적으로 증가하였다. 또한 피크 진폭 역시 휠 및 레일 모두 전 구간에서 속도 증가에 따라 뚜렷하게 증가하였다. 다만 피크 주파수는 레일의 경우 약 1290 Hz ~ 1310 Hz로 속도와 무관하게 안정적으로 유지된 반면, 휠의 경우 특히 순수 미끄럼 접촉 및 감속 구간에서 상대적으로 큰 폭으로 변화하여 레일 대비 낮은 안정성을 보였다.

(3) 순수 미끄럼 접촉 구간에서는 회전속도에 따른 단조적 경향이 나타나지 않았다. 이 구간은 접촉 초기 모터의 회전속도 제어 특성에 기인한 일시적 동요의 영향을 받았을 가능성이 있으며, 동일 시편을 이용하여 순차적 시험 수행에 따른 마모 영향도 배제할 수 없다. 따라서, 순수 미끄럼 접촉 구간에서의 속도 의존성에 대해서는 이 연구의 결과만으로 명확한 결론을 내리기 어려우며, 이러한 요인을 고려한 추가적인 검증 시험이 필요한 것으로 판단된다.

다만, 이 연구에서는 시험기의 고유진동수 정보를 확보하지 못한 관계로, 관찰된 1290 Hz ~ 1310 Hz 대역 진동이 어떤 에너지원(휠-레일 접촉 또는 시험기 구조 동특성 등)에 의해 주도적으로 발생하였는지는 확정 짓기 어렵다. 향후 연구에서는 고유진동수 정보를 확보하고 이를 바탕으로 보다 다양한 분석을 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

이 연구에서 확인된 속도-진동 관계는 향후 철도 차량의 실제 운행 조건에서 속도별 진동 수준을 예측하거나, 차상 진동 모니터링 시스템의 이상 진동 판별 기준을 마련하는 데 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 속도-진동-마모 간 상관관계를 정량적으로 규명하는 후속 연구의 기반이 될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 한국철도기술연구원 기본 사업인 ‘인공지능 기반 차륜레일 마모 관리 및 저소음화 기술 개발 국제공동연구(PK26613A0)’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 Science, Oxford, United Kingdom.

(6) Shin, H., Nam, J., Kang, J., Nam, C. and Ahn, 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) Lee, H. W., 2023, Characteristics of Vibrations at the Wheel and Rail According to Train Vehicle Dynamics using a Twin-disk Rig, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 33, No. 6, pp. 685~690.