



FE 해석을 이용한 도시철도 제륜자의 스켈 성향 분석

Squeal Propensity Analysis on Railway Shoe using the FE Analysis

신 희 혁* · 남 재 현* · 강 재 영* · 남 찬 혁** · 안 서 연** · 최 성 진†
HeeHyuk Shin*, Jaehyeon Nam*, Jaeyoung Kang*, Chanhyuk Nam**, Seoyeon Ahn**
and Sungjin Choi†

(Received July 25, 2019 ; Revised August 29, 2019 ; Accepted August 29, 2019)

Key Words : Railway Brake(철도 브레이크), Brake Squeal(브레이크 소음), Rayleigh Damping(레이리 댐핑), Radial In-plane Mode(방사 인플레인 모드)

ABSTRACT

As the wheel-shoe type railway brake has clearance between the wheel and shoe, the contact area changes with variations in pressure. In this study, the squeal propensity for wheel brakes is investigated using a complex eigenvalue analysis dependent on the contact area. An FE model was constructed, with an error of no more than 8 %, by performing a modal test. As the shoe is a composite material, it generally has a very large damping value. Rayleigh damping was obtained by the modal test while the complex eigenvalue analysis was conducted with a damping effect. The results show that dynamic instability was generated by mode-coupling instability and the shoe-type railway squeal noise was 2315 Hz. Furthermore, from the results of the squeal test, this squeal mode is predicted to be radial in-plane mode. Thus, the squeal propensity for the wheel-shoe type suggests that the in-plane mode of the shoe is dominant.

1. 서 론

도시철도차량의 기계적인 제동 시스템은 디스크-패드 타입과 휠-슈 타입 2가지로 구분된다. 철도가 제동 명령을 내리면 마찰재에 압력이 가해지고 회전체와 마찰재 사이에 발생하여 차량이 정지하게 된다. 이때 마찰에 의한 스켈 소음이 발생한다. 스켈 소음은 승객들에게 불쾌감을 조성하기 때문에 조속히 해결할 필요가 있고, 많은 연구가 진행되어 왔다⁽¹⁻⁵⁾.

이중 디스크 타입에 관한 연구는 도시철도차량 및 자동차 시스템에서 다양하게 연구되었다. Sinou et

al.⁽⁶⁾은 TGV 디스크 브레이크 스켈에 대해 속도 의존성에 대한 실험적 분석을 통해 FE model과 스켈 주파수와 비교 분석하였다. Kang et al.⁽⁷⁾은 자동차 패드에 댐핑심을 적용한 이론 모델을 개발하였고, 파라미터 스터디를 통해 인플레인 모드에 대한 댐핑심의 스켈 영향도를 연구하였다. Wang et al.⁽⁸⁾은 철도 브레이크의 마찰 거동 및 소음성능의 영향에 대해 표면 패턴을 이용해 분석하였다. 매끄러운 표면과 그루브 패턴이 미치는 마찰성능을 핀 온 디스크를 이용하여 소음을 측정하고 트라이볼로지 관점에서 비교 분석하였다. Yang et al.⁽¹⁰⁾은 디스크 패드 타입의 철도 브레이크의 각 부품들에 대해서 진동 실험을 수행하고 제동 시 스

† Corresponding Author ; Member, Korea Automotive Technology Institute
E-mail : sjchoi@katech.re.kr
* Inha University
** Korea Automotive Technology Institute

‡ Recommended by Editor Jun Hong Park
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

스킬 소음을 예측하고 비교 분석하였다. Ahn et al.⁽¹³⁾은 제동 부품 중 패드의 기하학적인 관점에서 스킬 영향도를 분석하였다. 패드의 슬롯, 개수를 변경하고 패드의 설계영향인자인 탄성계수, 마찰계수, 접촉강성을 증가시켜 스킬 경향을 보여주었다. Liu et al.⁽¹⁴⁾은 패드 디스크 타입의 브레이크를 접촉압력, 회전속도, 디스크의 두께, 탄성계수의 조건을 변화시키면서 복소수 고유치 해석을 하였고, 위 조건들에 대해서 파라미터 스터디를 하였다. Cha et al.⁽¹²⁾은 틸팅 차량용 휠 제동장치를 유한요소 모델로 만들어 복소수 고유치 해석을 하고 강성에 따른 파라미터 수행하였으며, 실차시험을 진행하여 해석과 비교 분석하였다. 그러나 실제 도시철도의 마찰 메커니즘은 디스크와 패드 조합의 휠-레일, 휠-슈 등 다양한 메커니즘이 존재한다. 패드 타입은 자동차 브레이크와 유사하게 두 개의 마찰재에 가해진 압력에 의해 디스크와의 마찰로 제동되는 시스템이다⁽¹⁷⁾. 반면에 슈 타입은 슈에 수직하게 압력이 가해지며, 휠에 방사방향으로 수직항력이 작용한다. 다른 대표적인 제동 시스템 중 드럼 타입은 슈 타입 브레이크 시스템에 반대 방향으로 수직항력이 작용하며 두 개의 슈가 결합되어 있다⁽¹⁸⁾.

Chen et al.⁽⁹⁾은 휠 레일 조합의 관점에서 스킬 연구를 수행하였다. 휠 레일 조합의 유한요소 모델을 구성하여 마찰계수에 대한 복소수 고유치 해석을 수

Table 1 Material properties of model

Component	Material	Density (kg/m ³)	Elastic modulus(E) (GPa)	Poisson's ratio (ν)
Back plate	Steel	7850	200	0.3
Friction material	composite material	2230	5.16	0.25

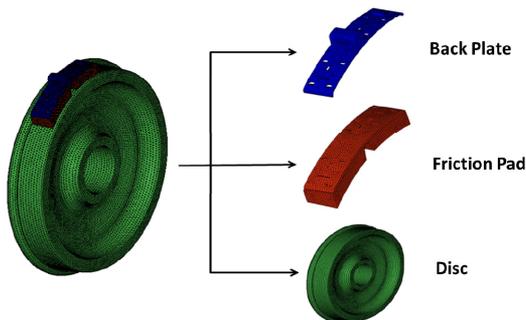


Fig. 1 FE model

행하였으며, 불안정 주파수를 예측하였다. Moon et al.⁽¹¹⁾은 휠의 유한요소 해석을 통해서 스킬 주파수를 예측하였으며, 레일 도유기의 사용이 스킬 소음저감에 미치는 영향을 분석하였다.

위 논문들과 같이 도시철도차량의 다양한 스킬 메커니즘에 대해 많은 연구가 진행되어 왔지만 휠-슈 타입의 브레이크 시스템에 대한 연구는 상대적으로 미미하다. 따라서 이 논문은 실제 모델을 기반으로 휠-슈 타입 브레이크를 구성하여 휠-슈 조합의 마찰 소음 메커니즘에 대해 분석하고자 하였다. 추가적으

Table 2 Correlation of shoe and wheel

Component	Mode Shape	Modal test (Hz)	FEM (Hz)	Error (%)
Shoe		293.57	316.41	7.7
		1801.72	1647.1	8.5
		3072.4	3028.3	1.4
Wheel		466.7	425.57	8.8
		694.93	657.61	5.3
		1009.74	969.09	4.0

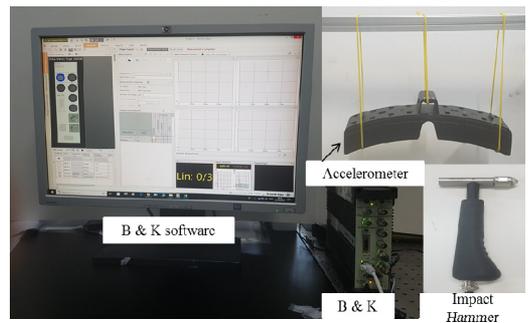


Fig. 2 Modal test set-up

로 모달 테스트를 수행하여 실제 슈의 damping ratio 를 측정하고, 해석 모델에 Rayleigh 댐핑을 적용하였다. 이를 바탕으로 실제 모델을 모사한 휠-슈 타입의 스킵 영향도를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 FEM 해석 모델

Fig. 1에서 보듯이 휠-슈 타입 브레이크 모델은, 휠, 슈, 백 플레이트로 구성되며 휠과 슈 사이에 클리어 런스를 모델링 하였다. 마찰재는 플레이트에 부착되어 있고 제동체결 명령이 내려지면 공기압에 의해 슈에 압력이 가해진다. 이때, 휠과 슈 사이에 마찰력이 발생한다. FE model은 해석의 효율성 증대를 위해 라운드, 앳지, 챔버 등 고유진동수에 영향을 주지 않는 내에서 단순화시켰다. 유한요소 모델은 사면체 요소(C3D4) 356 726개, 노드 79 904개로 구성되었다. 각 단품에 대한 밀도, 탄성계수, 푸아송 비는 Table 1에 나타났다. 탄성계수는 모달 실험의 결과에 의해 보정하였고, 밀도는 3D 모델을 이용하여 계측된 무게를 기준으로 환산하였다.

2.2 모달 테스트

각 단품은 물성치 보정을 위해 모달 테스트가 수행되었다. 모달 테스트는 Fig. 2와 같이 자유 경계 조건

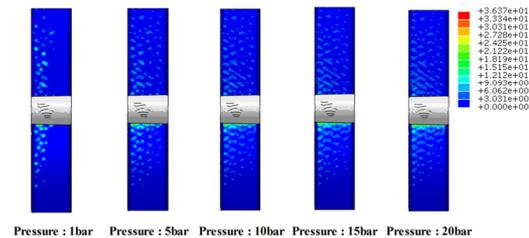


Fig. 3 Contact area distribution for pressure

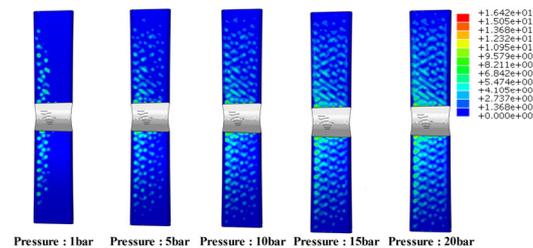


Fig. 4 Contact area distribution with wheel rotation for pressure

을 모사하였고, 1축 가속도계를 이용하여 주파수 응답함수가 계측되었다. 측정결과 293.57 Hz, 1801.72 Hz, 3072.4 Hz에서 기본 주파수가 나타났으며, 각각 1차, 2차, 3차 굽힘모드로 모달 해석을 통해 예측하였다. 모달해석은 측정된 고유진동수의 결과를 검증하는 독립적인 방법을 제공하며, 복소수 고유치 해석의 선행해석이다. 모달테스트와 모달해석을 통해 얻어진 고유진동수는 약 8% 오차에서 복소수 고유치 해석을 수행하였다.

2.3 접촉상태 분석

슈와 휠 사이에는 클리어런스를 모델링 하였기 때문에 이상적인 접촉이 되지 않는다. 따라서 압력 변화에 대한 실제 접촉압력의 분포를 예측할 수 있으며, 압력을 1 bar ~ 20 bar까지 변화시켜 접촉압력 분포를 확인하였다. 정하중 결과는 Fig. 3에서 보여준다. 1 bar의 압력을 가해졌을 때, 접촉면적은 전체면적의 약 20%이며, 압력이 증가할수록 접촉면적이 증가한다. 20 bar에서는 접촉면적이 전체면적의 약 80% 이상 나타났다. Fig. 4는 1 bar ~ 20 bar까지 압력변화 후 가한

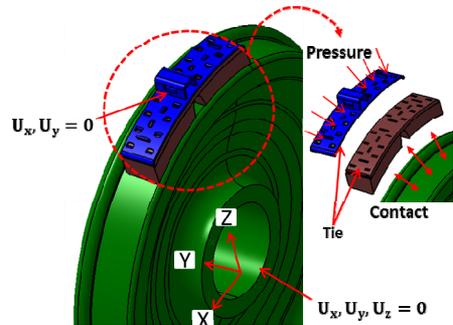


Fig. 5 Boundary condition

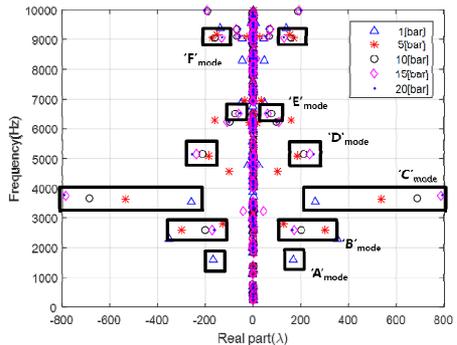


Fig. 6 Real parts of eigenvalues with respect to pressure ($\mu_0 = 0.4$)

후 휠의 회전을 적용한 결과이다. 회전을 적용하면 접촉압력은 디스크의 회전방향으로 집중된다. 따라서 접촉압력에 대한 복소수 고유치 해석을 수행하여 접촉압력에 대한 스컬 경향성을 파악할 수 있다.

2.4 복소수 고유치 해석

휠-슈 타입의 스컬 경향을 분석하기 위해 복소수 고유치 해석을 수행하였다. 복소수 고유치 해석은 부분공간을 투사하는 방법을 적용한다⁽¹⁵⁾. 복소수 고유치 문제를 풀게 되면 고유값은 실수부와 허수부로 얻어진다. 여기서 허수부는 시스템의 고유진동수를 의미하며 그에 상응하는 실수부는 시스템의 안정성을 판별하는 기준이 된다. 만약 실수부가 양수이면, 불안정 모드를 의미하며 복소수 고유치 해석을 통해 시스템의 동적 불안정성을 표현할 수 있다.

Fig. 5은 복소수 고유치 해석에 수행된 모델의 구속 조건을 보여준다. 마찰재와 백 플레이트는 tie 조건을

적용하였고 휠과 마찰재는 마찰접촉 모델을 적용하였다. 또한 휠의 회전축은 X, Y, Z 방향에 대하여 변위를 구속하였고, 백 플레이트의 캘리퍼 연결부는 Z 방향을 제외한 X, Y 변위를 구속하였다. 압력은 백플레이트 면에 대하여 수직으로 작용한다.

Fig. 6은 0 Hz ~ 10 000 Hz까지 수행한 복소수 고유치 해석결과이다. 1000 Hz ~ 10 000 Hz사이 에 불안정 실수부가 광범위하게 나타나고 주요 불안정모드를 ‘A’, ‘B’, ‘C’, ‘D’, ‘E’, ‘F’로 정의하였다. 각 모드형상은 Fig. 7에서 보여준다. 불안정 모드 형상을 확인해 본 결과 ‘A’, ‘C’, ‘F’는 슈의 변형이 지배적인 모드이며, 슈의 진동 모드에 의해 스컬 경향이 발생한

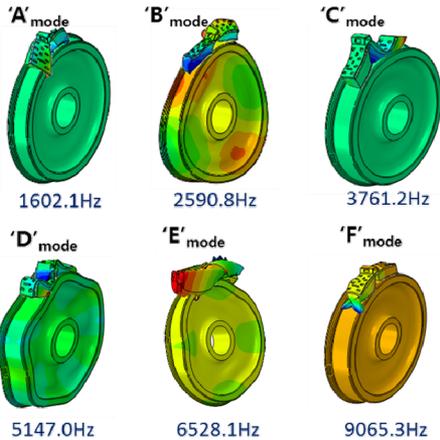


Fig. 7 Unstable mode shape corresponding to each frequency

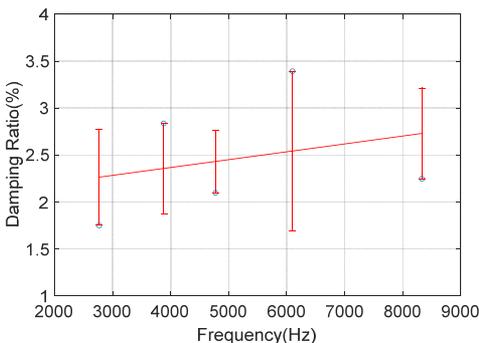


Fig. 8 Damping ratio

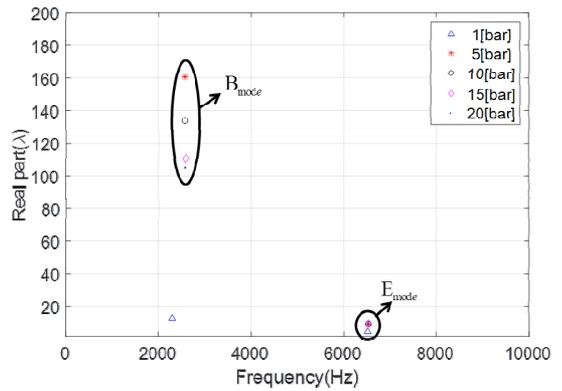


Fig. 9 Real parts of eigenvalues with rayleigh damping effect

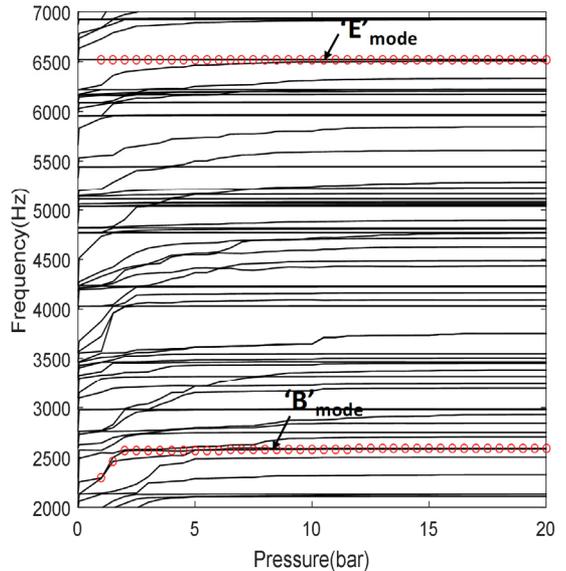


Fig. 10 Frequency variation with respect to pressure

것을 암시한다. 반면에 ‘B’, ‘D’, ‘E’는 휠의 진동모드가 지배적으로 나타났다. 마찰재는 소음, 방열 등의 문제로 복합소재로 구성되어 있고 구조적인 댐핑이 상당히 크다^(16,17). 그러나 일반적인 복소수 고유치 해석은 모드연성에 의한 스킬 불안정성 초점을 두기 때문에 구조적인 댐핑효과를 무시한다. 이 연구는 실제 시스템에서 발생할 수 있는 스킬 경향을 분석하고자 구조댐핑을 계측하고 댐핑효과를 반영한 복소수 고유치 해석을 진행하였다.

2.5 레일리 댐핑

구조댐핑을 반영하기 위해 비연성된(decoupled) 시스템으로 가정하고 댐핑행렬을 질량 댐핑행렬과 강성 댐핑행렬의 합으로 표현할 수 있다. 구조 댐핑을 해석적으로 반영하기 위한 레일리 댐핑은 아래와 같이 표현된다.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \tag{1}$$

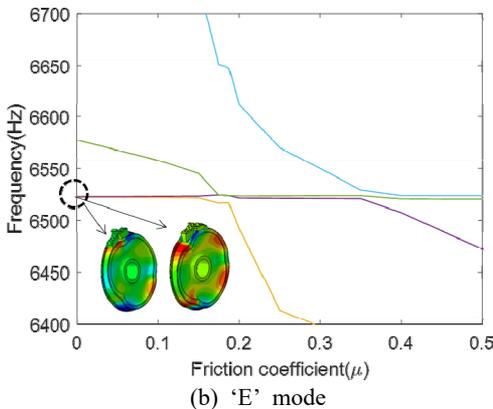
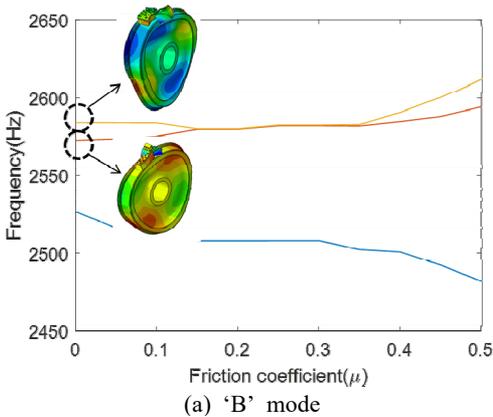


Fig. 11 The locus of eigenvalue with respect to friction coefficients at 20 bar

여기서 [C]는 댐핑행렬 $\alpha[M]$ 은 질량 댐핑행렬 $\beta[K]$ 는 강성 댐핑행렬이다. 댐핑행렬이 반영된 homogeneous 미분방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \tag{2}$$

[M], [C], [K]는 각각 질량행렬, 댐핑행렬, 강성행렬을 나타낸다. 여기서 모드해석을 수행하기 위해 해를 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\{x\} = [\gamma]\{q\} \tag{3}$$

$[\gamma]$ 은 정규화된 고유벡터이며, $\{q\}$ 는 모달 좌표이다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하여 풀면, 각각의 모드로 분리된 진동 방정식을 표현할 수 있다.

$$[I]\{\ddot{q}\} + 2\xi \text{diag}[\omega_n]\{\dot{q}\} + \text{diag}[\omega_n^2]\{q\} = 0 \tag{4}$$

ω_n 는 n 번째 고유진동수, ξ 는 damping ratio이다. 선형 변환이므로 댐핑행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

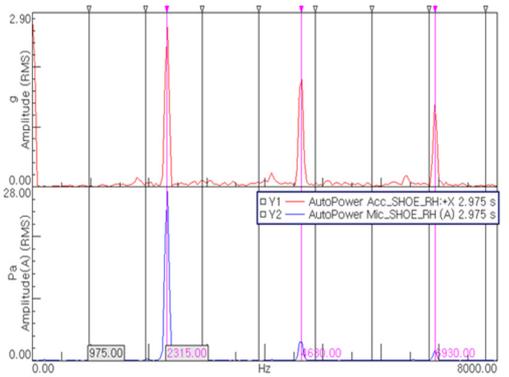
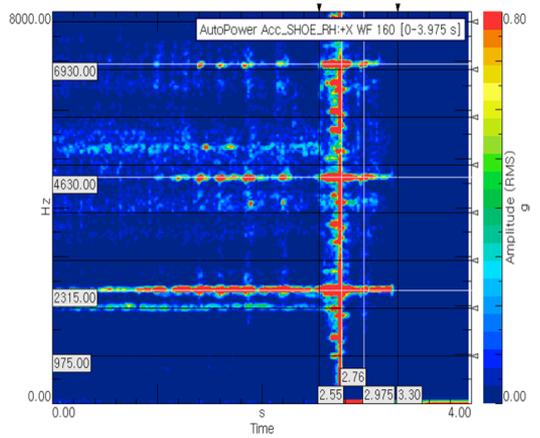


Fig. 12 Experimental results

$$\begin{aligned}
 2\xi\omega_1 &= \alpha + \beta\omega_1 \\
 2\xi\omega_2 &= \alpha + \beta\omega_2 \\
 &\vdots \\
 2\xi\omega_n &= \alpha + \beta\omega_{2n}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Fig. 8은 2000 Hz ~ 9000 Hz까지 발생된 패드 모드의 damping ratio를 모달실험을 통해 계측된 결과이다. 계측된 결과를 식 (5)에 대입하여 연산하면, $\alpha = 84.372$, $\beta = 5.34 \times 10^{-6}$ 를 얻을 수 있다. 계산된 α , β 를 FE 패드 모델에 적용하여 레일리 댐핑 효과가 반영된 복소수 고유치 해석을 수행하였다.

해석결과 Fig. 9에서 보듯이 패드 변형이 지배적인 모드 ‘A’, ‘C’, ‘F’와 5개의 노달라인을 가진 방사방향 in-Plane ‘D’ 모드는 구조댐핑에 의해 양의 실수부가 사라졌다. 그러나 ‘B’모드(2585 Hz)와 ‘E’모드(6523 Hz)는 구조 댐핑이 적용되어도 불안정한 양의 실수부가 발견되었다. ‘B’ 모드는 3개의 노달라인을 가지는 방사 방향의 in-plane 모드이며, ‘E’ 모드는 3개의 노달라인을 갖는 원주 방향의 in-plane 모드이다. 즉, 패드에 의한 불안정성은 실제 구조댐핑이 포함되면, 안정화되어 동적 불안정성을 발생시키지 못한다. 반면에 in-plane 모드는 휠-슈 타입에서 발견될 수 있는 주요 스컬 모드 임을 암시하며, 주요 스컬 모드에 대해 접촉압력 변화에 따른 파라미터 해석을 수행하였다. 결과는 Fig. 10에서 보여준다.

‘B’모드(2585 Hz)는 0 bar ~ 5 bar 구간에서 압력이 커질수록 주파수가 증가하고, 실수부의 크기가 줄어든다. 반면에 ‘E’모드(6523 Hz)는 압력이 증가해도 주파수 변화없이, 불안정 실수부의 크기가 증가한다. 이는 방사 방향 모드가 원주방향의 모드보다 Z 방향의 변위가 크게 발생하기 때문에 압력 변화에 상대적으로 민감함을 보여준다. 반면에 ‘E’모드는 원주방향 변위가 우세하기 때문에 접촉압력에 대한 모드 변화는 거의 없다.

Fig. 11은 ‘B’ 모드, ‘E’ 모드에 대한 모드연성 메커니즘을 표현한 그림이다. 접촉 압력 20 bar에서 0 ~ 0.5까지 마찰계수를 변화시켜 해석을 수행하였다. 만약 마찰계수가 0이면 시스템은 독립적으로 표현되기 때문에 불안정 모드의 평형상태 모드를 추적할 수 있다. ‘B’모드의 경우 2550 Hz 근방에 인접한 슈의 인플레인 모드가 마찰계수가 증가하면서 하나의 모드로 합쳐져 모드연성 불안정성을 발생시킨다. 이 모드는 3개의 노달라인을 가진 원주 방향 인플레인 모드 임을 예측하였다. 또한 ‘E’ 모드도 ‘B’ 모드와 유사하게

6500 Hz 근방의 인접한 디스크 인플레인 모드에 의해 불안정성이 발견되었지만, 상대적으로 실수부의 크기가 매우 작다.

Fig. 12는 실제 도시철도차량에서 발생하는 마찰 소음을 계측한 결과이다. 마찰 소음의 기본 주파수는 약 2315 Hz에서 발견되며, 4630 Hz, 6930 Hz는 기본 주파수의 고차 하모닉 주파수이다. 즉, 실제 차량에서도 2315 Hz 근방에서 마찰 소음이 발생하고 있으며, FEM 해석결과 이 불안정 모드는 휠의 3개의 노달라인을 가지는 방사 방향 인플레인 모드임을 예측할 수 있다. 따라서 3개의 노달라인을 가지는 방사방향 in-plane 모드는 휠-슈 조합의 브레이크 시스템에서 마찰소음을 발생시키는 주요 모드임을 예측하였다.

3. 결 론

이 연구는 실제 휠-슈 타입의 도시철도차량 제동시스템을 모사하여 스컬 소음을 예측하였다. 휠과 슈 사이에 클리어런스를 모델링하여 제동 시 발생하는 접촉압력을 실제와 가깝게 표현하였다. 또한 모달테스트 및 해석을 통해 오차 8% 근방에서 신뢰성을 확보하였으며, 압력 변화에 대한 도시철도차량의 동적 불안정성에 대해 예측하였다. 추가적으로 실험을 통해 damping ratio를 계측하고, FEM 해석에 반영하여 실제와 유사한 조건으로 동적 불안정성을 예측하였다. 결과는 다음과 같다.

- (1) 실제 접촉면적은 압력이 증가할수록 접촉면적이 증가하고, 회전에 의해 슈의 시작 부분에서 가장 높은 접촉압력을 갖는다.
- (2) 구조댐핑이 반영되지 않으면, 1602 Hz, 3761.2 Hz, 9065.3 Hz와 같이 슈 모드에서 불안정한 양의 실수부가 발견되지만, 실제 구조댐핑을 반영하면 슈에 의한 불안정 모드는 안정화 된다.
- (3) ‘B’ 모드(2585 Hz)와 ‘E’ 모드(6423 Hz)는 구조댐핑이 반영되고 불안정한 양의 실수부를 발견시키며, 이 불안정 모드는 슈의 인플레인 모드임을 예측하였다.
- (4) 실험결과 2315 Hz에서 휠과 슈 사이의 마찰 소음이 발생하였다.
- (5) 불안정한 모드 중 3개의 노달라인을 가지는 방사 방향 인플레인 모드 ‘B’(2585 Hz)는 양의 실수부가 가장 크며, 실험 결과와 매우 유사성을 가지는 스컬 모드이다.

(6) 휠-슈 타입에서 슈의 인플레인 모드는 스켈 경향을 발현시키는 주요한 모드이다.

후 기

이 논문은 국토교통과학기술진흥원 철도기술연구사업의 연구비지원(19RTRP-B109166-05)으로 수행되었습니다.

References

- (1) Nam, J. H. and Kang, J. Y., 2014, Investigation of Friction Noise with Respect to Friction Curve by Using FEM and Its Validation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 28~34.
- (2) Kang J. Y., 2017, Finite Element Algorithm Reproducing Hip Squeak Measured in Experiment. Journal of Sound and Vibration, Vol. 393, pp. 374~387.
- (3) Goo, B. C., 2013, Analysis of Unstable Vibration Modes due to KTX Brake Disc/Pad Interaction, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 16, No. 4, pp. 253~261.
- (4) Kim, H. S., You, Y. H., Yoon, C. J. and Kim, S. Y., 2007, Study on the Braking Noise Reduction of KTX, KORAIL, Report KORI-Technology-Yong-06-06.
- (5) Goo, B. C. and Kim, J. C., 2016, Complex Eigenvalue Analysis of Railway Wheel/Rail Squeal, International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 8, No. 1, pp.1~12.
- (6) Sinou, J. J., Loyer, A., Chiello, O., Mogenier, G., Lorang, X., Cocheteux, F. and Bellaj, S., 2013, A Global Strategy Based on Experiments and Simulations for Squeal Prediction on Industrial Railway Brakes, Journal of Sound and Vibration, Vol. 332, No. 20, pp. 5068~5085.
- (7) Kang, J. Y., 2012, Finite Element Modeling for the Investigation of In-plane Modes and Damping Shims in Disc Brake Squeal, Journal of Sound and Vibration, Vol. 331, No. 9, pp. 2190~2202.
- (8) Wang, D. W., Mo, J. L., Liu, J. X., Ouyang, H., Zhu, M. H. and Zhou, Z. R., 2017, Improving Tribological Behaviours and Noise Performance of Railway Disc Brake by Grooved Surface Texturing, Wear, Vol. 376~377, pp. 1586~1600.
- (9) Chen, G. X., Xiao, J. B., Liu, Q. Y. and Zhou, Z. R., 2014, Complex Eigenvalue Analysis of Railway Curve Squeal, Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, pp. 433~439.
- (10) Yang, Y. J., Kim, S. K. and Park, Y. I., 2004, Study on the Phenomena of Brake Squeal Noise in Rail Vehicle, Proceedings of the KSR Conference, pp. 49~54.
- (11) Moon, K. H., You, W. H. and Kim, J. C., 2003, A Study on the Squeal Noise for Subway, Journal of the Korean Society for Railway, pp. 103~108.
- (12) Cha, J. K. and Park, Y. I., Analysis on the Squeal Noise of Wheel Brake System for Tilting Train, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 98~105.
- (13) Ahn, S. Y., Nam, C. H., Choi, S. J., An, D. K., Seo, K. S. and Kim, N. K., 2019, Study on Parameter Optimization of Brake Pad for Squeal Noise Reduction for Urban Rail Vehicle Brake, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 22, No. 1, pp. 1~10.
- (14) Liu, P., Zheng, H., Cai, C., Wang, Y. Y., Lu, C., Ang, K. H. and Liu, G. R., 2007, Analysis of Disc Brake Squeal Using the Complex Eigenvalue Method, Applied Acoustics, Vol. 68, pp. 603~615.
- (15) ABAQUS Analysis User's Manual, Ver. 6.14.
- (16) Brunel, J. F., Dufrenoy, P. and Demilly, F., 2004, Modelling of Squeal Noise Attenuation of Ring Damped Wheels, Applied Acoustics, Vol. 65, pp. 457~471.
- (17) Shin, H. H., Nam, J. H., Choi, S. J. and Kang, J. Y., 2019, Numerical Investigation on Rail Brake Squeal, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 3, pp. 289~294.
- (18) Huang, J., Krousgrill, C. M., and Bajaj, A. K., 2006, Modeling of Automotive Drum Brakes for Squeal and Parameter Sensitivity Analysis, Journal of Sound and Vibration, Vol. 289, No. 1~2, pp. 245~263.



Heehyuk Shin received the B.S. degree in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University. He is currently a M.S candidate in Inha University and one of the members in Dynamic System and Vibration Lab. His research interest is the simulation and experiment of friction noise and disc vibration.



Jaehyeon Nam received the B.S. and M.S. degree in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University. He is currently a Ph.D. candidate in Inha

University and one of the members in Dynamic System and Vibration Lab. His research interest is the simulation and experiment of friction noise and disc brake squeal.



Seoyeon Ahn is a Researcher of the Korea Automotive Technology Institute and is responsible for the CAE analysis and R&D of chassis design.



Jaeyoung Kang is a professor in the Department of Mechanical Engineering, Inha University. He received his Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Purdue University in 2008. His research interests include

friction noise, structural vibration and nonlinear dynamics.



Sungjin Choi graduated the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Ajou University. He is currently an director of vehicle-platform R&D center in KATECH. His research interest is the vehicle dynamics and chassis design.



Chanhyuk Nam completed the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Korea University. He is currently a senior-researcher of vehicle-platform R&D center in Korea Automotive Technology Institute. His

research interest is the vehicle dynamics and chassis design.