

축소모델을 이용한 능동 조향대차모델의 안정성 해석

The Stability Analysis for The Active Steering Bogie Model using Scale Model

**허현무¹, 박준혁¹, 김민수¹, 유원희¹, 박태원²

*# H. M. Hur(hmhur@krri.re.kr)¹, J. H. Park¹, M. S. Kim¹, W. H. You¹, T. W. Park²

¹ 한국철도기술연구원 주행추진연구실, ²아주대학교 기계공학과

Key words : scale bogie, critical speed, stability

1. 서론

기존의 passive형 철도차량용 대차는 곡선구간 주행시 윤축의 조향기능 미흡으로 차륜/궤도의 마모, 소음 발생 등의 문제점을 안고 있다. 곡선구간 주행시 이러한 문제점을 극복하기 위하여 능동제어기술을 응용한 능동조향대차에 대한 연구가 진행되고 있다. 능동조향대차는 윤축의 조향기능을 혁신적으로 향상시키기 위하여 능동액추에이터를 이용하고 곡선구간 주행시 공격각을 저감시키고 회전 저항을 저감함으로써 원활한 곡선구간 주행을 도모하는 대차라 할 수 있다.

그러나 원활한 곡선주행성능 향상에 앞서 먼저 선결되어야 하는 기본성능은 설계최고속도까지 안정적으로 주행할 수 있는 기본성능이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 능동조향대차모델 설계안에 대한 안정성을 분석하기 위하여 축소모델을 이용한 비선형 임계속도 해석을 수행하였다. 능동조향대차 설계안에 대한 full scale 동역학 모델을 구성하였으며 축소법칙을 적용한 1/5 scale 동역학 모델을 구성하였다. 동역학 모델에 대한 비선형 임계속도 해석과 축소모델에 대한 시험을 수행하여 임계속도를 평가하였다.

2. 대차 동역학 모델

Fig. 1과 같이 능동조향대차가 주행시험대의 궤조륜상에서 접촉한다고 가정하여 대차 임계속도 해석을 위한 동역학적 모델을 구성하였다. 대차모델의 윤축, 대차프레임은 횡방향, yaw방향으로만 운동이 허용되며 그 외 운동은 구속된다고 가정하였다[1]. 차륜/궤조륜간 크립력 계산을 위하여 차륜/궤조륜간 기하학적 접촉해석을 수행하였으며 크립력계산은 Kalker의 FASTSIM을 수정하여 계산시간을 단축한 Oldrich Polach의 크립력 계산방법을 사용하였다[2,3].

임계속도 해석은 초기 속도에 대하여 윤축의 횡변위로 주어지는 초기치를 설정한 후 차륜/궤조륜 접촉해석 결과를 이용하여 크립피지, 크립계수, 크립력을 구한다. 대차 운동방정식에 적용하여 초기치에 대한 응답을 구하고 주기해 여부를 판별하여 limit cycle을 구하고 일정 속도 간격으로 상기 과정을 반복하여 limit cycle 선도를 구하는 방법을 적용하였다[4]. Table 1은 능동조향대차모델 임계속도 해석에 적용한 full scale, 1/5 scale 모델에 대한 특성치를 나타낸다.

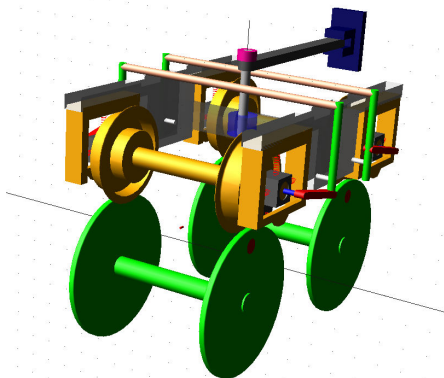


Fig. 1 Active steering bogie model

Table 1 Parameters of the steering bogie model

Parameter	full scale	1/5 scale model
bogie frame length(m)	2.97	1/φ 0.594
bogie frame width(m)	1.97	1/φ 0.394
bogie frame height(m)	0.75	1/φ 0.150
Bogie semi wheelbase(m)	1.05	1/φ 0.210
Wheel radius(m)	0.43	1/φ 0.086
Lateral semi spacing of primary spring(m)	1.1	1/φ 0.22
Mass of wheelset(kg)	1687	1/φ ³ 13.5
Mass of bogieframe(kg)	2150	1/φ ³ 17.2
Yaw moment of inertia of wheelset(kg·m ²)	1,044	1/φ ⁵ 0.334
Yaw moment of inertia of bogieframe(kg·m ²)	3,015	1/φ ⁵ 0.965
Stiffness of primary spring(N/m): x/y	7.47e6/ 8.92e6	1/φ ³ 5.98e4/ 7.14e4
Young's modulus(N/m ²)	2.07e11	1 2.07e11
Gravity(m/s ²)	9.8	1 9.8
Gage(m)	1.435	1/φ 0.287
Flange-back distance(m)	1.354	1/φ 0.2708
Roller radius(m)	0.75	1/φ 0.15
Wheel profile conicity	2/10	1 2/10
Rail profile	60kg	1 60kg

3. Full scale 대차모델 임계속도 해석

대차 모델의 비선형 임계속도를 구하기 위하여 Fig. 2와 같이 수치해석 흐름도에 따라 수치해석을 수행하였다. 동역학 운동방정식의 해를 구하기 전단계로 먼저 차륜/궤조륜간의 기하학적 접촉해석을 수행하였다. Fig. 3은 차륜/궤조륜간의 접촉점 해석을 수행하여 구한 contact patch를 나타낸다.

먼저 full scale 모델에 대하여 임계속도 해석을 수행하였다. Fig. 4는 윤축횡변위 limit cycle을 나타내는 그림이다. 이 limit cycle 선도로 부터 full scale 대차모델에 대한 임계속도는 45m/s로 해석된다.

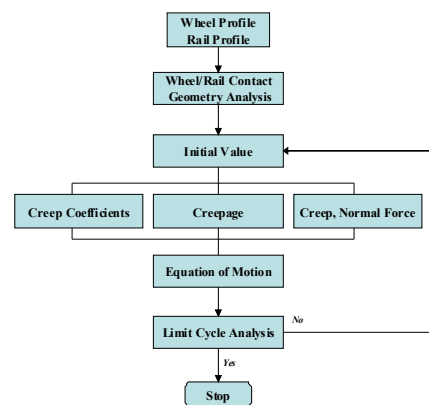


Fig. 2 Flowchart of the critical speed analysis

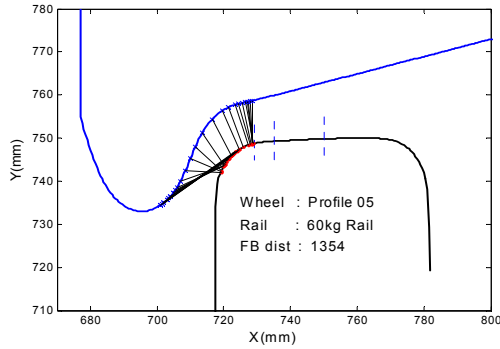


Fig. 3 Wheel/rail contact patch

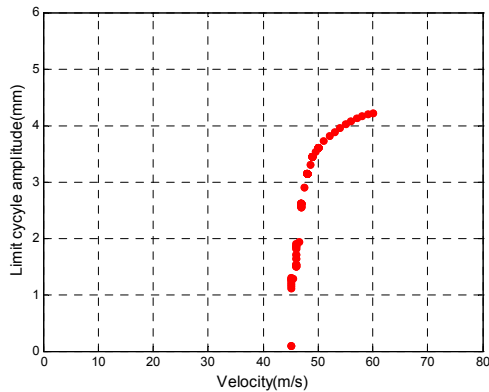


Fig. 4 Limit cycle diagram for full scale model

4. 1/5 scale 대차모델 임계속도 해석

Full scale 대차 모델을 1/5 scale로 축소하는 과정에서 인위적인 축소가 불가한 중력가속도나 탄성계수, 프와송비와 같은 재질 특성치는 축소과정에서 축소를 고려하지 않았다. 따라서 축소를 고려하지 않은 중력가속도와 재질 특성치에 영향으로 이들 인자의 함수인 크립계수에 영향이 미치게 된다. 따라서 축소대차모델에 대한 임계속도 해석은 이러한 축소과정에서의 scale factor에 대한 오차의 영향이 작음하게 된다. 다음은 $1/\varphi$ scale 축소모델에 적용한 scale factor를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \varphi_t &= 1, & \varphi_l &= \varphi, & \varphi_v &= \varphi, & \varphi_a &= \varphi, & \varphi_m &= \varphi^3 \\ \varphi_f &= \varphi^5, & \varphi_k &= \varphi^3, & \varphi_g &= \varphi_E = \varphi_v = 1 \\ \varphi_{K1} &= \varphi_{K2} = \frac{1}{\varphi_E} = 1, & \varphi_{K3} &= \frac{1}{\varphi_l} = \frac{1}{\varphi} \\ \varphi_N &= \varphi^3, & \varphi_{\alpha\beta} &= (\varphi_N \frac{\varphi_{K1}}{\varphi_{K3}})^{2/3} = \varphi^{2.67} \\ \varphi_{f11} &= \varphi_{f33} = \varphi^{2.67}, & \varphi_{f12} &= \varphi^4, & \varphi_{f22} &= \varphi^{5.33} \end{aligned}$$

Fig. 5는 축소대차모델의 임계속도 해석결과에 대한 타당성 검증에 위하여 축소대차모델 시제를 제작하였으며 시험시스템을 구축하였다. Fig. 6은 1/5 축소대차모델에 대한 비선형 임계속도 해석 및 시험결과를 나타내는 그림으로서 윤축회변위 limit cycle을 나타낸 그림이다. 1/5 scale 대차모델에 대한 임계속도 해석결과는 약 9.5m/s로 해석되었으며 시험을 통한 임계속도 시험결과는 약 10.1m/s로 평가되었다. 이러한 축소모델에 대한 해석 및 시험결과로부터 시험결과가 해석결과에 비해서는 조금 높지만 매우 근사한 결과를 나타내었다고 볼 수 있다. 따라서 full scale 대차모델로부터 축소모델로 축소하는 상사과정, 축소모델에 대한 동역학 모델 구성 및 수치해석 과정은 충분한 타당성이 확보되었다고 판단된다. 따라서 이러한 결과로부터 full scale

대차 모델에 대한 임계속도는 해석결과로부터 약 45m/s대역으로 평가된다.

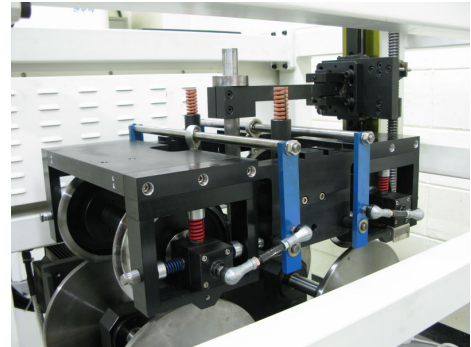


Fig. 5 Critical speed test 1/5 scale model

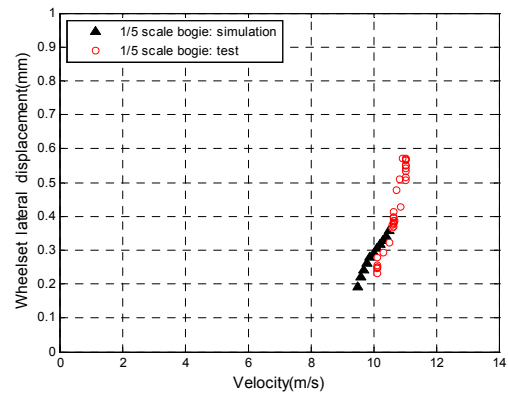


Fig. 6 Limit cycle diagram for 1/5 scale model

5. 결론

능동조향대차모델 설계안에 대한 안정성을 분석하기 위하여 축소모델을 이용한 비선형 임계속도 해석을 수행하였다. 능동조향대차 설계안에 대한 full scale 동역학 모델을 구성하였으며 축소법칙을 적용한 1/5 scale 동역학 모델을 구성하였다. 동역학 모델에 대한 비선형 임계속도 해석과 축소모델에 대한 시험을 수행하여 임계속도를 평가하였다.

축소모델을 이용한 임계속도 해석결과와 축소대차모델 시제를 이용한 시험결과를 비교하여 볼 때 매우 근사한 결과를 나타내었으며 이로부터 축소모델 이용에 따른 타당성을 확인할 수 있었다. 위의 결과로부터 축소모델을 이용한 full scale 모델의 임계속도 해석이 가능할 것으로 보이며 대차 설계단계에서 다양한 메커니즘이 적용된 대차 모델에 대한 설계안 검증 분야에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 허현무 외, "1/5 스케일 축소대차 모델 임계속도에 관한 연구", 한국철도학회논문집 제10권 제6호, 2007
2. H.M. Hur, "A Study on the Characteristics of the Wheel/Roller Contact Geometry", J. of KSR, Vol.9, No.5, 2006
3. Oldrich Polach, "A Fast Wheel/Rail Forces Calculation Computer Code", Vehicle System Dynamics, pp.728~739, 1999
4. J. Zeng, W.H. Zhang, H.Y. Dai, X.J. Wu, Z.Y. Shen, "Hunting instability analysis and H^∞ controlled stabilizer design for high speed railway passenger car", Vehicle System Dynamics, pp.655~668, 1998