

상사기법에 따른 철도차량 축소모델 임계속도 해석

The Stability Analysis of The Scaled Bogie Model with Scaling Methods

*#허현무¹, 김민수¹, 박준혁¹, 유원희¹

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

¹ 한국철도기술연구원 주행추진연구실

Key words : scaling method, bogie, stability

1. 서론

철도차량의 설계과정에서 안정성, 승차감과 같은 동적 특성을 예측하는 방법으로 상사법칙을 적용한 축소모델을 이용하는 방법이 활용되어 왔다. 축소모델을 이용하면 full scale 규모의 차량모델을 대상으로 한 시험과정에서의 대규모의 시험설비 구축, 다양한 시험대차의 제작, 시험조건의 설정 등과 관련된 시험비용 및 시험시간의 증가와 같은 애로점을 해결할 수 있는 장점이 있다. 따라서 영국, 독일, 일본, 프랑스, 이탈리아 등과 같은 철도차량 선진국에서는 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며 신 차량 개발과정에서 유용하게 적용되고 있다.

그러나 full scale 모델에서 축소모델로 상사하는 과정에서는 상사하고자하는 관점에 따라 상사기법이 상이하고 또한 중력, 재질특성과 같은 인자는 상사가 불가한 것이 현실이다. 따라서 본 논문에서는 기존의 축소모델 상사기법에 따른 특성을 분석하고자 철도차량 축소모델을 대상으로 상사기법에 따른 임계속도 해석을 수행하였으며 각 각의 기법에 따른 장단점을 분석하였다.

2. Scaling Method

상사기법에 따른 scaling factor는 축소모델의 용도 및 관점이 동적 거동 분석을 주목적으로 하는가, 혹은 크립이론 검증을 주목적으로 하는가에 따라 상사기법이 상이하다.

MMU의 Iwnicki는 동일 재질을 사용하고 상사의 관점을 진동수에 맞추어 scaling을 시도하였다. IRT의 Pascal은 상사의 관점을 크립이론 검증에 맞추었으며 DLR의 Jaschinski는 동역학해석 tool 검증 목적으로 가속도에 상사의 관점을 맞추어 scaling을 시도하였다. 그러나 중력가속도, 재질특성과 같이 인위적인 축소기법이 적용되지 않는 파라미터가 존재 하고 이로 인한 축소모델의 인자 중에는 상사 기법이 적용되지 않는 인자가 발생하게 된다(1,2,3).

이는 차륜/레일 접촉점에서의 크립 특성 상사에 영향을 미치게 하며 상사기법에 따라 동적특성이 상이할 수 있다. 이에 대한 차선책으로 Jaschinski는 재질의 물성을 변경한 상사 기법을 적용함으로써의 full scale 모델에 근사한 상사기법을 시도하기도 하였다. Table 1은 각 각의 상사기법에 따른 차량 치수, 질량, 스프링 특성, 재질 등과 같은 파라미터를 나타낸다.

Table 1 Comparison of scaling factors

Scaling factor	MMU	IRT	DLR	DLR (modified)
ϕ_l length	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ
ϕ_t time	1	ϕ	$\sqrt{\phi}$	$\sqrt{\phi}$
ϕ_f frequency	1	$1/\phi$	$1/\sqrt{\phi}$	$1/\sqrt{\phi}$
ϕ_v velocity	ϕ	1	$\sqrt{\phi}$	$\sqrt{\phi}$
ϕ_a acceleration	ϕ	$1/\phi$	1	1
ϕ_ρ density	1	1	1	0.6
ϕ_m mass	ϕ^3	ϕ^3	ϕ^3	$\phi^3/2$
ϕ_I inertia	ϕ^5	ϕ^5	ϕ^5	$\phi^5/2$
ϕ_E elasticity	1	1	1	3
ϕ_w weight	ϕ^3	ϕ^3	ϕ^3	$\phi^3/2$
ϕ_F force	ϕ^4	ϕ^2	ϕ^3	$\phi^3/2$
ϕ_k stiffness	ϕ^3	ϕ	ϕ^2	$0.6\phi^2$
ϕ_c damping	ϕ^3	ϕ^2	$\phi^{2.5}$	$0.6\phi^{2.5}$
ϕ_μ friction	1	1	1	1

3. 대차 동역학 모델

Fig. 1과 같이 대차 1량으로 구성된 차륜/레일 접촉조건인 대차 모델에 대한 동역학모델을 구성하였다. 대차 모델의 윤축, 대차프레임은 횡방향과 yaw방향으로만 운동이 허용되며 그 외 운동은 구속된다고 가정하였다. 차륜/레일간의 크립력 계산을 위하여 차륜/레일간 기하학적 접촉특성 해석을 수행하였으며 접촉 타원형상, 접촉타원 장단반경비 결과를 이용하여 크립계수를 산출하였다(4).

Table 2는 full scale 대차 모델에 대한 파라미터와 물성치를 나타낸다. 각 각의 축소기법에 따른 파라미터 물성치는 Table 1의 scaling factor를 곱한 값을 활용하였다.

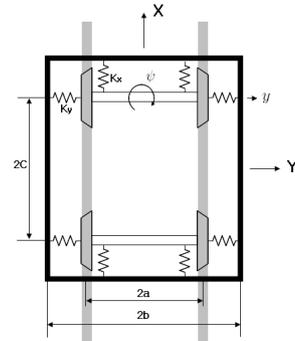


Fig. 1 Scale bogie model

Table 2 Bogie model parameters

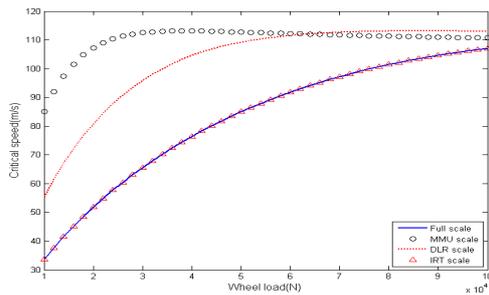
parameter	description	value
m_i	wheelset mass(kg)	1,600
M_b	bogie mass(kg)	2,400
I_i	wheelset moment of inertia(kg m ²)	550
I_b	bogie moment of inertia(kg m ²)	2,100
r_0	wheel radius(m)	0.43
b	half of the primary spring(m)	1.0
c	half of wheel base(m)	1.05
g	gage	1.435
K_x	longitudinal stiffness of spring(N/m)	6.6E6
K_y	lateral stiffness of spring(N/m)	4.8E6
G	modulus of rigidity(N/m ²)	84E9
N	wheel load(N)	10,000 ~ 100,000
λ	wheel conicity	0.05, 0.1, 0.2
	rail profile	60kg

4. 축소대차 임계속도 해석

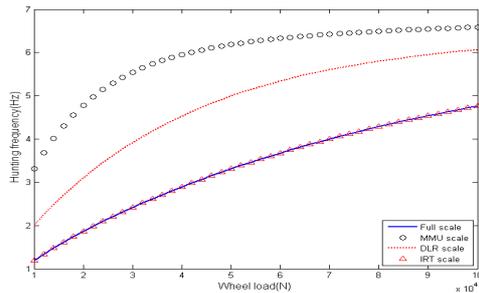
축소기법에 따른 특성 분석을 위하여 full scale 대차모델과 축소 대차모델에 대하여 임계속도 해석을 수행하였다. 축소기법은 차륜/레일간의 접촉면의 상사 특성에 영향을 줌으로 이와 관련된 인자인 차륜의 답면구배(conicity)와 윤중(wheel load) 변화에 대한 해석을 수행하였다. 차륜 답면구배는 0.05, 0.1, 0.2의 경우로 가정하였고 윤중은 10,000N에서 100,000N까지 증가할 때를 가정하여 해석하였다.

Fig. 2 ~ Fig. 4는 축소기법에 따른 임계속도와 사행동 주파수 해석결과를 나타낸다. Fig. 2는 차륜답면구배가 0.05일 때의 결과를 나타낸다. 임계속도 해석결과를 full scale 결과와 비교하면

MMU, DLR의 경우, 윤증이 작은 경우에는 오차가 크나 윤증이 커지면 오차가 작아지는 경향을 보이고 있다. 사행동 주파수는 MMU, DLR 모두 오차가 큰 경향을 보이고 있다. IRT의 축소기법은 full scale과 거의 일치한 결과를 보이고 있다. Fig 3은 답면구배가 0.1일 때의 결과를 나타낸다. 임계속도, 사행동 주파수에 대한 오차는 답면구배 0.05일 때의 경우와 같은 경향을 나타내고 있다. 그러나 오차가 작아지는 경향을 보이고 있으며 윤증이 증가함에 따라 full scale에 근사한 결과를 나타내고 있다. Fig 4는 답면구배 0.2일 때의 해석결과를 나타낸다. 오차의 경향은 이전 결과와 같은 경향을 보이고 있으나 오차의 크기가 가장 작아지는 특성을 보이고 있다. 따라서 차륜의 답면구배가 커짐에 따라 그리고 윤증이 커짐에 따라 full scale모델에 근사한 결과를 보임을 알 수 있다.

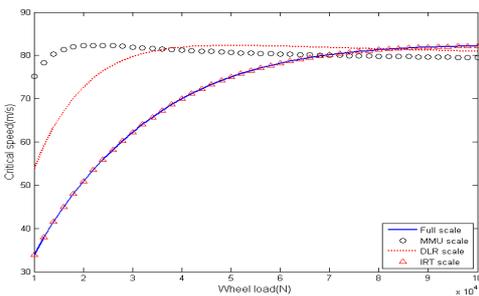


(a) critical speed

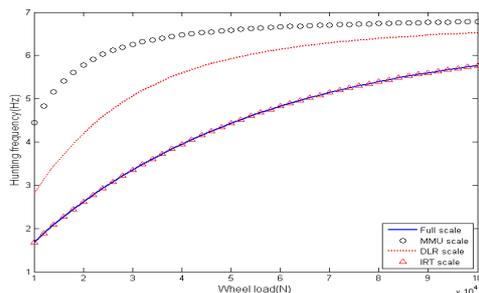


(b) hunting frequency

Fig. 2 Hunting analyses for scaling methods($\lambda=0.05$)

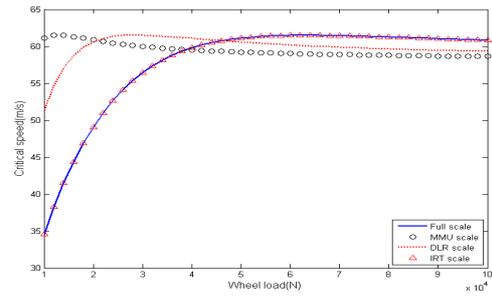


(a) critical speed

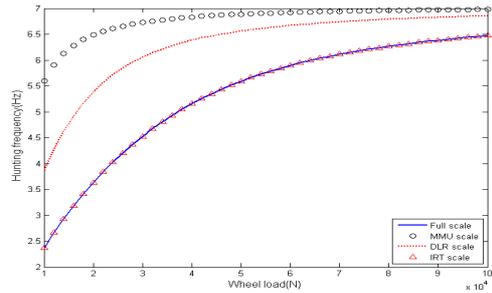


(b) hunting frequency

Fig. 3 Hunting analyses for scaling methods($\lambda=0.1$)



(a) critical speed



(b) hunting frequency

Fig. 4 Hunting analyses for scaling methods($\lambda=0.2$)

5. 결론

축소모델 상사기법에 따른 특성을 분석하고자 철도차량 축소 대차모델을 대상으로 상사기법에 따른 임계속도 해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

차륜의 답면구배가 커짐에 따라 그리고 윤증이 커짐에 따라 축소기법에 따른 오차가 작아지는 경향을 보이고 있다. 실물 대차모델에 대한 해석결과와 비교하면 MMU와 DLR의 축소기법이 오차가 크음을 알 수 있다. 반면 IRT의 기법은 실물 모델 결과와 가장 근사한 결과를 나타내고 있다.

이는 IRT의 축소기법이 크립이론 검증용으로 실물 모델과 가장 근사한 크립특성을 구현하기 때문이라 할 수 있다. 반면 속도에 대한 scaling factor가 "1"이므로 축소모델 윤축의 선속도가 실물과 같아 구현하기가 용이하지 않고 그럼으로써 축소모델 활용의 장점을 충분히 살리지 못하는 약점을 갖고 있다고도 볼 수 있다.

따라서 이에 대한 후속 연구로서는 실물 축소 주행시험대를 이용한 검증 및 보완 연구가 계획되고 있으며 또한 다양한 메커니즘이 적용된 축소 차량모델에 대한 동적 거동특성 분석 연구도 수행 될 계획이다.

참고문헌

1. Simon Iwnicki, "Handbook of Railway Vehicle Dynamics", CRC Press, 1996
2. H.M. Hur, et al, "A Study on The Scale Model of Roller Rig for Bogie Testing", Proceedings of the KSPE Spring Annual Meeting. pp. 841-842, 2007
3. N. Bosso, A. Gugliotta, A. Soma, "Dynamic Identification of a 1/5 Scaled Railway Bogie on Rolling Rig", Sc. and Tech. Bull. of the "Aurel Vlaicu" Univ. Arad, Mech. Eng. Vol. 2, No.1, pp. 5-15, 2006
4. V.K. Garg, R.V. Dujkipati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press, 1984