대차동특성시험기 상에서의 철도차량 임계속도 해석

Critical Speed Analysis of the Railway Rolling-stock on the Roller-rig

*#허현무[1], 김남포[1], 박준혁[1], 유원희[1]

*# H. M. Hur(hmhur@krri.re.kr)[1], N.P. Kim[1], J. H. Park[1], W. H. You[1]

[1] 한국철도기술연구원 주행추진연구실

Key words : critical speed, roller-rig

1. 서론

철도차량 개발 과정에서 차량의 안정성을 검증하기 위하여 대차동특성시험기(roller-rig)가 활용되고 있다. 대차동특성시험기에는 레일에 상당하는 일정 직경의 궤조륜(roller)이 적용되고 있으며 차륜에 접촉 구름 운동을 발생시킨다.

그러나 대차동특성시험기 상에서의 차량 시험은 일반적인 레일 궤도상에서의 차량 주행조건을 모사한 시험으로서 차륜/레일 접촉 구동조건과는 상이하다. 특히 차륜/레일 접촉조건에 비하여 차륜/궤조륜 접촉조건은 기하학적 접촉특성이 상이하고 그로인한 차량의 임계속도와 같은 동적특성에 영향을 미치게 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 대차동특성시험기 상에서의 차량의 임계속도 특성에 대하여 고찰하고자 한다. 이를 위하여 대차동특성시험기 상에서의 차량 임계속도를 해석하기 위한 동역학 모델을 구성하였으며 차륜/궤조륜 기하학적 접촉특성 해석을 통한 비선형 임계속도 해석을 수행하였다.

2. 해석 모델

Fig. 1과 같이 레일 위를 주행하는 일반적인 차륜/레일 접촉조건과 대차동특성시험기 상의 차륜/궤조륜 접촉조건으로 가정하여 동역학 모델을 구성하였다.

(a) Wheel/rail contact condition

(b) Wheel/roller contact condition

Fig. 1 Simulation model

위 주행조건을 고려하여 동역학 모델을 구성하였다. 우선 윤축은 Fig. 2와 같이 횡방향(y_i)과 요방향(ψ_i)으로만 운동이 허용되며 그 외 운동은 구속된다고 가정하였다. 또한, 차륜/레일, 차륜/궤조륜간의 접촉력은 크리피지(creepage)와 크립력(creep force)관계로 표현하였다.

2개의 대차와 차체는 Fig. 3과 같이 횡방향과 요방향으로만 운동이 허용되며 그 외 운동은 구속된다고 가정하였다. 대차는 횡방향과 요방향, 차체는 요방향 운동만 허용하고 그 외 운동은 구속된다고 가정하였다. 모델의 자유도는 14 자유도이다.

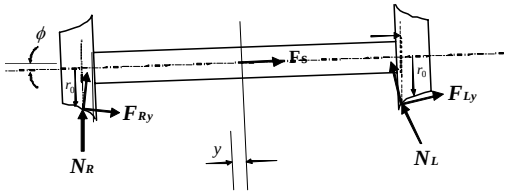


Fig. 2 Wheelset model

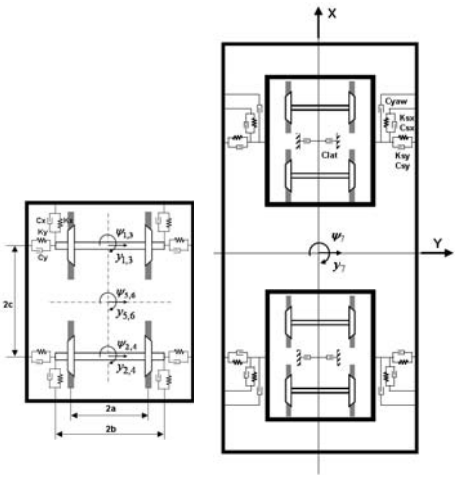


Fig. 3 Vehicle model

동역학모델에 대한 임계속도 해석과정은 Fig. 4와 같다. 먼저 차륜과 레일의 답면형상(profile)을 대상으로 차륜/레일, 차륜/궤조륜간 기하학적 접촉특성(contact geometry)해석을 수행한다.[1] 윤축의 횡변위로 주어지는 초기치를 설정한 후 차륜/레일, 차륜/궤조륜 접촉해석 결과를 이용하여 크립피지, 크립계수, 크립력을 구한다.[2] 운동방정식에 적용하여 초기치에 대한 응답을 구하고 주기해 여부를 판별하여 리미트싸이클(limit cycle)을 구하고 일정 속도 간격으로 상기 과정을 반복하여 리미트싸이클 선도를 구한다.[3] 한편, 크리피지/크립력 계산은 Oldrich Polach의 크립력 계산방법을 사용하였다. Table 2는 임계속도 해석에 적용한 특성치를 나타낸다.

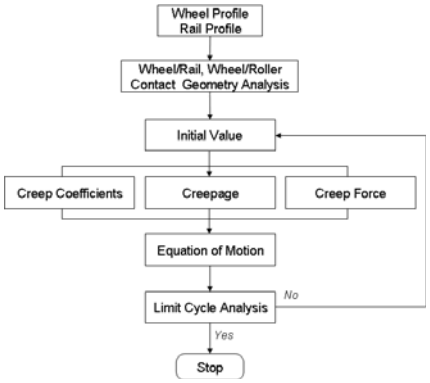


Fig. 4 Flowchart of the critical speed analysis

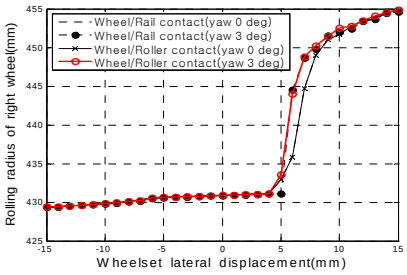
Table 2 Properties of the Vehicle model

Parameter	Property
Lateral semi spacing of primary spring(m)	1.0
Mass of wheelset(kg)	1,600
Mass of bogieframe(kg)	2,400
Mass of car-body(kg)	28,000
Yaw moment of inertia of wheelset(kg㎡)	550
Yaw moment of inertia of bogieframe(kg㎡)	2,100
Stiffness of primary spring(N/m): x/y	6.6E6/4.8E6
Stiffness of secondary spring(N/m): x/y	0.167E6/0.167E6

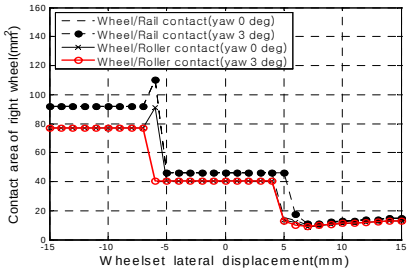
Damping of primary spring(Ns/m): x/y	100/100
Damping of secondary spring(Ns/m): x/y	100/100
Damping of lateral damper(Ns/m)	0.1E6
Damping of yaw damper(Ns/m)	0.1E6
Half of the distance between bogie-frame center	7.0
Bogie semi wheelbase(m)	1.05
Lateral semi spacing of primary spring(m)	1.0
Lateral semi spacing of secondary spring(m)	1.0
Lateral semi spacing of yaw damperg(m)	1.3
Gage(m)	1.435
Flange-back distance(m)	1.354
Wheel radius(m)	0.43
Roller radius(m)	0.688
Wheel profile	1/20 profile
Rail, roller profile	60kg rail
Wheel load(N)	48,000

3. 해석 결과

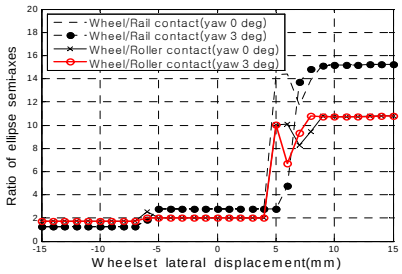
임계속도 해석에 앞서 차륜/레일, 차륜/궤조륜 접촉조건에 대한 기하학적 접촉특성 해석을 수행하였다. Fig. 5는 접촉 파라미터 해석결과를 나타낸다.



(a) Rolling radius of right wheel



(b) Contact area of right wheel



(c) Ratio of ellipse semi-axes of right wheel

Fig. 5 Contact parameters

Fig. 5 (a)에서와 같이 구름반경 해석결과를 보면 플랜지 접촉 발생이전인 윤축 횡변위가 5㎜ 이내에서는 모두 근사함을 알 수 있다. 그러나 윤축 횡변위가 5㎜가 넘어서면 윤축의 요각이 3°일 경우가 0°에 비하여 커짐을 알 수 있다. 이는 윤축의 요각으로 인하여 0°일 때 비하여 레일이나 궤조륜에 먼저 접촉함을 의미한다. 또한 윤축 요각이 0°인 경우에는 차륜/레일, 차륜/궤조륜 접촉조건 모두 동일함을 알 수 있다. 이는 3차원 접촉문제가 아닌 2차원 단면에서의 접촉문제와 동일함으로 레일, 궤조륜 모두 동일한 레일의 단면형상으로서 같은 결과를 보인다. 그러나 요각이 부여되면 플랜지 접촉영역인 5㎜ 부근에서 차이를 보이고 있으며 그 이후에는 미소한 차이를 보임을 알 수 있다. (b)는 접촉점에서의 접촉 타원면적을 나타낸다. 차륜/레일조건에 비하여 차륜/궤조륜간 조건이 접촉면적이 감소하고 있음을 나타내고 있다. 이는 Hertz 접촉이론을 적용한 접촉면적 계산과정에서 레일의 길이방향 반경이 무한대임에 비하여 궤조륜은 유한 반경이기 때문에 비롯된 결과라 할 수 있다. (c)는 접촉 타원 상에서 장반경과 단반경간의 비로서 차륜/레일 접촉에 비하여 작아짐을 보이고 있다. 이는 타원의 형상이 차륜/레일 접촉조건의 좁고 긴 타원형상에서 차륜/궤조륜 접촉조건에서는 유한 반경의 궤조륜의 영향으로 원형에 가까운 형상으로 변화함을 의미한다.

Fig. 6은 임계속도 해석결과를 나타낸 그림으로서 윤축 횡변위에 대한 리미트싸이클 선도를 나타낸다. 차량이 레일 위를 주행하는 일반적인 차륜/레일 접촉 조건의 경우 임계속도는 81m/s로 해석되었다. 즉 81m/s 이하에선 어떤 초기값에도 시스템이 안정적으로 수렴하는 반면 그 이상의 속도에서는 초기값에 따라 불안정한 거동을 나타냄을 의미한다. 반면, 대차동특성시험기 상에서의 차륜/궤조륜 접촉 조건에서는 임계속도가 62m/s로서 차륜/레일 접촉 구동조건에 비하여 저하하는 특성을 보이고 있다. 이는 접촉 파라미터 해석에서 언급한 바와 같이 궤조륜상에서 접촉특성이 반영된 결과라 할 수 있다.

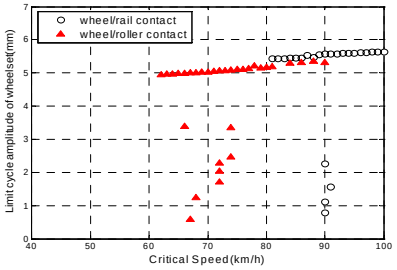


Fig. 6 Result of critcal speed analysis

4. 결론

대차동특성시험기 상에서의 차량의 임계속도 특성에 대하여 해석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

차륜/레일 접촉조건에 비하여 차륜/궤조륜 접촉조건은 접촉면적과 접촉타원의 장단반경간의 비가 작아짐을 나타냈다. 이는 레일의 길이방향 반경이 무한대임에 비하여 궤조륜은 유한 반경이기 때문에 비롯된 결과라 할 수 있다. 이로 인하여 차륜/레일 접촉 조건에 비하여 대차동특성시험기 상에서의 임계속도 시험조건을 모사한 차륜/궤조륜 접촉조건인의 경우에는 임계속도가 저하하는 경향을 보였으며 이는 차륜/궤조륜 접촉조건의 특성에 기인한 결과로 볼 수 있다.

따라서 상기 결과는 대차동특성시험기 상의 철도차량 임계속도 시험평가 단계에서 차량의 성능 한계를 판정함에 있어서 고려되어야 할 점이라고 생각되며 향후 실차규모의 실험도 추진될 계획이다.

참고문헌

1. 허현무, "차륜/궤조륜 기하학적 접촉특성에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 제9권 제5호, pp.618～623, 2006
2. Oldrich Polach, "A Fast Wheel/Rail Forces Calculation Computer Code", Vehicle System Dynamics, pp.728～739, 1999
3 J. Zeng, W. H. Zhang, H. Y. Dai, X. J. Wu, Z. Y. Shen, "Hunting Instablity Analysis and H$^{\infty}$ Controller Stablilizer Design for High Speed Railway Passenger Car", Vehicle System Dynamics, pp.655～668. 1998