

비선형 크립이론을 이용한 한국형 고속전철의 동특성 해석

Analysis of Dynamic Behaviors for the Korea High Speed Train(KHST) by Using Non-Linear Creep Theory

°박찬경* · 김석원** · 김희선***

C. K. Park, S. W. kim and H. S. kim

Key Words : Railway Dynamics(철도차량 동역학), Suspension(현가장치), Ride Comfort(승차감), Stability(안정성), KHST(한국형 고속철도), Safety(안전성), Multi-body dynamics(다물체 동역학),

ABSTRACT

Dynamic behaviors of the Korean High-speed Train(KHST) have been analyzed to investigate the performance on the stability, the safety and the ride comfort. Multi-body dynamics analysis program using Recursive method, called RecurDyn, have been employed in the numerical simulation. To model the wheel-rail contact, the RecurDyn uses its built-in module which uses the square root creep law. The accuracy of the rail module in RecurDyn, however, decreases in the analysis of flange contact because it linearizes the shape of the wheel and rail. To solve this problem, a nonlinear contact theory have been developed that considers the profiles of the wheel and rail. The results show that the KHST still needs more stability. The problem should be solved by the examinations of module and modeling .

1. 서론

철도차량의 동특성 해석은 주행 안정성 및 안전성, 그리고 안락한 승차감 확보를 위해서 수행되고 있으며 이러한 성능들은 철도차량 설계시에 필수적으로 검토되어야 한다.

철도차량은 여러 질량요소들이 연결되어 하나의 시스템을 구성하고 있기 때문에 동특성 해석에 있어서 많은 노력과 시간이 요구되고 있다. 현재까지 동특성 해석을 위해 널리 사용되고 있는 방법으로는 전체 열차 편성을 1량 또는 3량 수준으로 축소 구성한 모델로 동특성 이론해석을 수행하고 있으며, 이에 따라

전체 열차 편성에 대한 동적 거동을 예측하고 있다. 그러나 이러한 해석은 상업운행에 대한 동적 거동을 완벽하게 모사하지 못할뿐만 아니라 후부의 사행동(hunting)현상을 예측하기 어려우므로 이를 보완하기 위해 고유치 해석을 하고 있다. 하지만 고유치 해석은 선형 해석이기 때문에 현가요소의 비선형성에 대한 응답을 찾기 어렵다는 문제점을 가지고 있다.

현재 국내에서는 프랑스로부터 KTX(경부고속철도차량)을 도입하여 운행할 예정에 있으며 이러한 기술 도입은 핵심기술분야의 전수가 어려워 자체적인 기술 개발이 요구된다.

이러한 요구로 Recursive Method에 의한 다물체 동역학 해석 프로그램을 이용하여 철도연구원과 공동으로 RecurDyn_Rail Module이 개발되었다. RecurDyn_Rail Module은 Square Root Creep Law를 사용함으로써 빠른 해석 시간과 Nonlinear contact Theory에 근사한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 Square Root Creep Law는 Tread contact 해석은 문제가 없으나 Flange contact 해석 시 정확성이 떨어지는 문제점을 갖고 있다. 이를 해결하고 좀 더 정확

* 한국철도기술연구원

E-mail : ckpark@krii.re.kr

Tel : (031)457-1978(531), Fax : (031) 455-4868

** 한국철도기술연구원

*** 한국철도기술연구원

한 해석을 위해 Nonlinear Contact Theory를 이용한 RecurDyn_Rail Module이 필요하게 되었다. 현재 VAMPIRE도 Nonlinear Contact Theory를 사용하고 있으나 자유도 문제 때문에 20량 전체 철도차량 simulation이 불가능한 상태이다. 그러므로 정확한 20량 전체 철도차량 simulation을 위해 Nonlinear Contact Theory를 이용한 RecurDyn_Rail Module을 개발하였으며 이것을 이용하여 한국형 고속철도 (KHST)를 simulation하였다.

wheel profile의 좌표가 rail profile의 좌표보다 작아지면 contact으로 보고 contact되기 시작한 wheel profile point와 마지막으로 contact된 wheel profile point를 check한다.

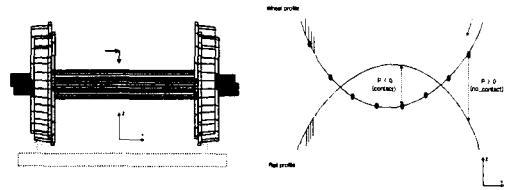


Fig. 2 Wheel/rail contact

2. Wheel / Rail module 개발

2.1 비선형 접촉 방법과 wheel/rail contact table

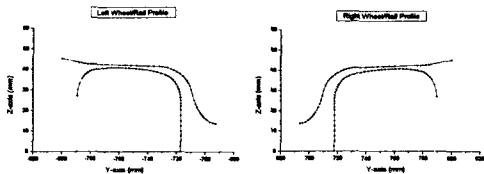


Fig. 1 Wheel/Rail Profile

동역학적으로 nonlinear 형상의 wheel과 rail의 profile을 가지고 contact point를 찾는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라 해석시간도 오래 걸린다. 그래서 여기에서는 wheel과 rail의 lateral 방향의 상대변위에 따른 여러 Hertzian information들을 table로 만들어 이용하는 방법을 택하였다. 이 table을 Wheel / Rail contact table이라 하며 이 table은 wheel profile을 lateral 방향으로 일정 간격 이동시키면서 rail profile과 contact되어지는 지점을 나타낼 뿐만 아니라 wheel / rail contact시 발생하는 여러 가지 force를 계산하는데 필요한 여러 data들을 열거해놓은 table이다.

2.2 Search a contact point

wheel profile을 Y방향으로 일정간격 이동하여 wheel profile의 Y축과 대응되는 rail profile의 Z의 좌표를 찾는다. 그 다음 wheel profile을 Z방향으로 조금씩 내려가며 wheel profile의 Z좌표와 rail profile의 Z좌표를 비교하여

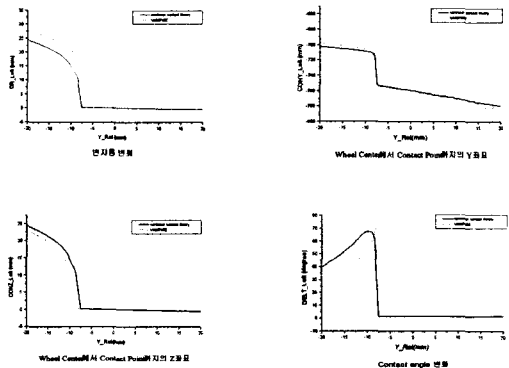


Fig. 3 Wheel/rail contact table

Nonlinear Contact Table을 VAMPIRE의 Contact Table과 비교한 결과 Fig. 3과 같이 유사함을 볼 수 있었다.

3. 작용력 계산

3.1 수직력

Wheel과 Rail의 상대 lateral의 변위를 가지고 nonlinear contact table을 이용하여 contact point 찾아 normal force를 계산한다.

먼저 wheel coordinate에서 본 contact point를 rail coordinate에서 본 좌표를 변환한 다음 Y방향의 좌표를

읽어 rail profile에서 찾아 그에 해당하는 Z방향의 좌표를 읽으면 contact될 때의 rail의 Z방향 좌표가 된다.

wheel coordinate에서 본 wheel profile의 contact point를 rail coordinate로 변화시켜 rail coordinate에서 바라본 wheel profile의 contact point를 구한다.

$$R_w + A_w S_{wc} = R_R + A_R S_{Rc}$$

$$A_R^T * (R_w - R_R) + A_R^T A_w S_{wc} = S_{Rc}$$

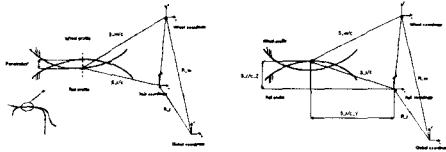


Fig. 4 Wheel/Rail Profile에서의 Contact Point

그러면 rail coordinate에서 본 contact지점에서의 wheel profile의 Z방향 좌표와 rail profile의 Z방향 좌표를 알고 있으므로 그 차, 즉 penetration량을 구하여 normal force를 구할 수 있다. 이것을 실제 normal force라고 하고 contact angle을 이용하여 Y방향과 Z방향의 normal force의 분력을 구한다.

$$Normal\ Force = Stiffness * Penetration$$

$$Normal\ Force_z = Normal\ Force * \cos(contact\ angle)$$

$$Normal\ Force_y = Normal\ Force * \sin(contact\ angle)$$

flange contact이 발생하지 않을 때에는 contact angle이 작아 Y방향의 normal force 분력이 작으나 flange contact이 발생할 때에는 contact angle이 커짐에 따라 Y방향의 normal force 분력도 커져 flange force를 발생시킨다.

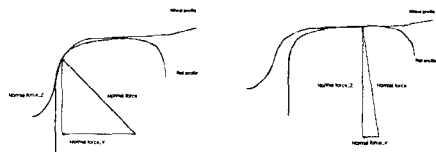


Fig. 5 Flange/Tread Contact시 Normal Force

3.2 크립력

철도 차량이 조향 없이 굴곡이 있는 트랙을 따라 가는

것은 크립에 의해서다. 크립력은 휠과 레일 간 상대 속도에 기인해서 발생하는 힘으로 마찰력의 일종이다. 따라서 이러한 힘들의 크기는 수직 하중의 크기를 넘어설 수 없다. 그래서 creep은 수직 하중에 의해 제한되어지면서 휠과 레일의 상대 위치, 속도의 함수가 된다.

크립피지는 트랙과 휠의 상대 속도로 정의된다. 이상적으로 철도 차량은 트랙의 속도와 일치한다고 가정한다. 트랙에 굴곡이 존재한다든지 외란이 존재하면 트랙과 휠의 상대 속도가 존재하게 되는데, 크립이론에 의해 힘은 상대 속도가 생기지 않는 방향으로 작용하게 한다.

$$\gamma = \frac{V_w - V_R}{V}$$

여기에서는 크립력 계산을 위해 Kalker's Simplified Nonlinear Creep Theory를 이용한다.

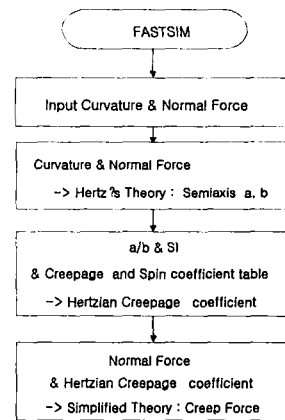


Fig. 6 FASTSIM 순서도

먼저, curvature와 normal force를 가지고 Hertz theory를 이용하여 longitudinal semiaxis 'a'와 lateral semiaxis 'b'를 구한다. Curvature는 wheel profile과 rail profile의 구간을 나누어 정의한다.

이렇게 구한 semiaxes a, b의 비 'a/b'와 wheel과 rail poisson's ratio와 wheel과 rail의 young's modulus로 조합된 SI를 가지고 creepage와 spin coefficient table에서 Hertzian creepage coefficient를 결정하고 다음과 같은 Simplified Theory에 의해 creep force를 구한다.

Rail위를 wheel이 c의 circumferential velocity를 갖고 v의 속도로 직진 주행을 한다. 이때, contact point에서의

두 속도는 반대 방향이 될 것이며 그 합 s 는 rigid slip이라고 정의한다. 보통 $|s| \ll v$ 이고 $|s| \approx 0.001v$ 가 된다.

$$s = v + c = v[(\zeta_x - \zeta_{sp})i + (\zeta_y + \zeta_{sp}x)j]$$

ζ_x : longitudinal creepage
 ζ_y : lateral creepage
 ζ_{sp} : spin creepage

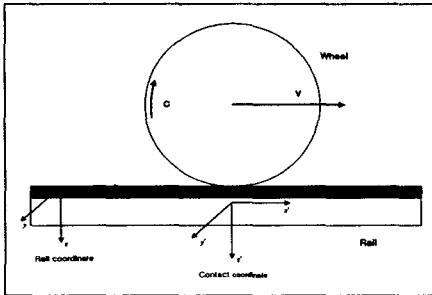


Fig. 7 Rail위를 굴러가는 Wheel

이렇게 wheel이 rail위를 contact되어 진행할 때는 Hertz's theory에 따라 elliptical한 contact area를 만들면서 진행하는데 그때 wheel과 rail사이에는 normal pressure Z 가 작용한다.

$$Z(x, y) = (3N/2\pi ab)\sqrt{1 - (x/a)^2 - (y/b)^2}$$

N : total normal force
 a, b : the semiaxes of the contact ellipse

한편, 압축과 마찰력 때문에 wheel과 rail 모두 변형이 일어나고 wheel velocity c 와 rail velocity $-v$ 를 가진 contact point부근에서는 $(-v, 0)$ 의 속도로 미끄러진다. 여기서 true slip w 를 정의할 수 있다.

그리고 Coulomb's law에 의해 $P = (X, Y)$ 를 contact point에서 wheel이 끌리는 마찰력이라 하면 다음과 같이 정의된다.

$$|P| = |(X, Y)| \leq fZ$$

$$P = -fZw/|w|$$

이렇게 $P = (X, Y)$ 를 구하고 contact area를 따라 적분을 하게 되면 x, y 방향의 creep force가 나오게 된다.

$$(F_x, F_y) = \iint_{\text{contact}} (X, Y) dx dy$$

F_x = longitudinal Creep Force
 F_y = lateral Creep Force

4. 차량 모델링

4.1 시스템 편성

해석용 시스템 편성 모델은 Fig. 8과 같이 동력차 2량, 동력객차 2량, 객차 16량의 총 20량 고정편성으로 되어 있다. 동력차와 동력객차의 전위 대차는 일반적인 2축대차 형식이며, 객차와 연결되는 동력객차 후위부터는 관절대차 형식으로 되어 있다.

여기에서 2축대차 형식이란 2량의 객차를 연결하는데 2개의 대차를 사용하는 형식이며 관절대차 형식은 2량의 객차를 연결하는데 1개의 대차를 사용하는 형식을 의미한다.

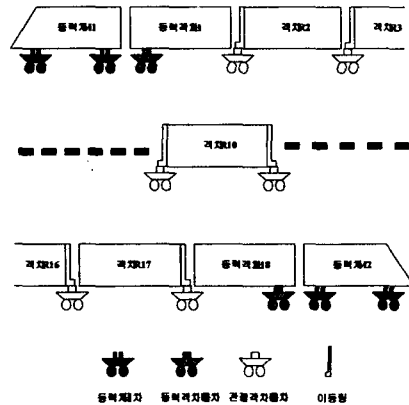


Fig. 8 해석용 시스템 편성

Table 1 강체질량 및 관성 모멘트

	형상 (mm)	질량 관성 모멘트 (norm=2)			
		Loc	Iyy	Izz	
동력차 (F1, P2)	차체	53.922	58.89	1180.45	1143.9
	대차	2.4479	1.308	2.128	3.227
	휠셋	2.182	1.2655	0.179	1.2655
동력객차 (R1)	차체	43.0911	56.43	1632.3	1628.1
	대차	2.7413	2.531	2.561	4.781
	휠셋	2.51	1.5515	0.219	1.5515
동력객차 (R1B)	차체	42.5722	59.9	1552.55	1545.2
	대차	2.7413	2.531	2.561	4.781
	휠셋	2.51	1.5515	0.219	1.5515
공명형 객차	R2	22.673	29.486	943.882	943.882
	R3	22.688	29.756	851.980	851.980
	R4x	22.325	28.014	830.713	830.713
	R6	22.194	28.943	825.838	825.838
	R9	19.939	25.688	741.521	741.521
	R10	22.366	28.366	840.797	840.797
	R11	22.194	28.943	825.838	825.838
	R1y	22.369	29.102	833.234	833.234
	R17	22.105	28.728	822.527	822.527
	대차	3.018	2.09	3.2	3.79
	휠셋	2.104	1.03	0.0237	1.03

고속전철은 저속이나 고속에서 사행동을 일으키며 레일의 불규칙성에 의해 고속전철의 주행을 저해하는 운동을 하게 된다. 이런 운동 현상을 현수장치를 통해 저감시킴으로써 주행 안정성, 안전성을 증대시키며 안락한 승차감을 얻을 수 있다.

고속전철의 현수장치는 크게 휠셋과 대차를 연결하고 지지하는 1차 현수장치와 대차와 차체를 연결하고 지지하는 2차 현수장치로 구성된다.

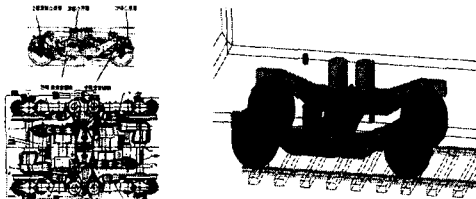


Fig. 9 동력차 대차

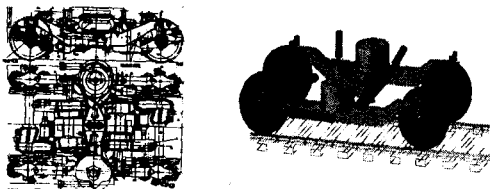


Fig. 10 동력객차 대차

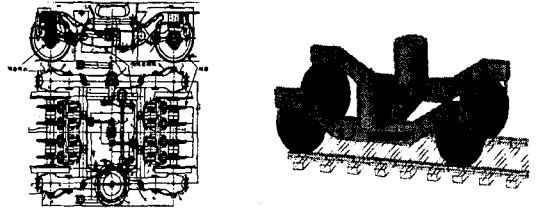


Fig. 11 객차 대차

5. 동적 거동 해석

5.1 Test Bogie

프로그램의 신뢰성을 확인하기 위하여 두 개의 wheel과 하나의 대차로 이루어진 test bogie를 만들어 simulation 후 VAMPIRE와 비교하였다.

다음은 Test Bogie를 가지고 10m/s로 주행하면서 front wheel의 center에 10KN의 impulse를 가하였을 때의 결과이다.

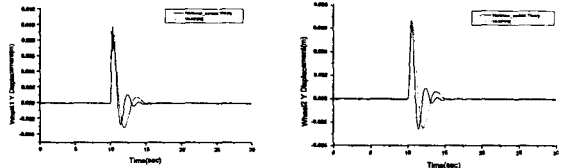


Fig. 12 Wheel displacement

다음의 결과는 Test Bogie를 10m/s로 curvature 0.1(1/km), cant 50(mm)의 곡선rail을 주행한 결과이다.

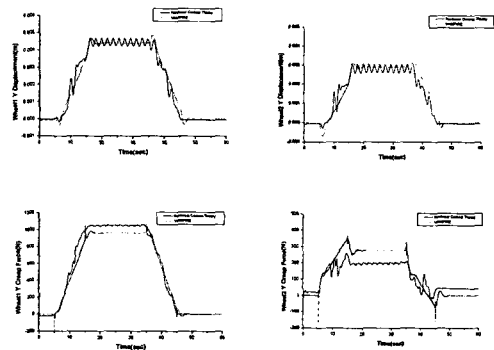


Fig. 13 Wheel displacement & Creep force

VAPIRE와 결과를 비교했을 때 Nonlinear Contact Theory가 변화가 심한 이유는 VAPIRE의 현가 장치 요소들보다 Recurdyn의 현가 장치 요소들이 더 민감하기 때문으로 보인다. 그 밖의 magnitude와 경향은 유사함을 보이고 있다.

보가 필요하다.

지금까지 20량 철도차량의 simulation은 불가능하였다. 하지만 이번 module의 개발을 시작으로 하여 20량 철도차량의 동적 거동해석이 가능하게 되었으나 더 많은 연구를 통해 안정성과 신뢰성을 확보가 요구된다.

5.2 G7 한국형 고속전철

후 기

다음은 97.2m/s impulse주행의 결과이다.

본 연구는 G7 고속전철 기술개발 사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

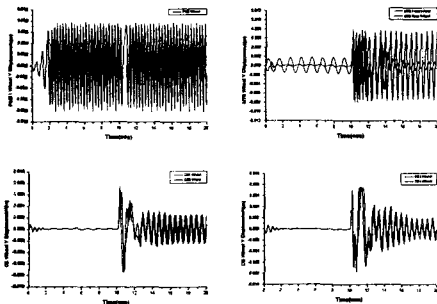


Fig. 14 Wheel displacement

동력차 대차의 경우 직진주행, impulse후 주행 모두 안정화가 되지 않으며 동력객차 대차의 경우는 직진주행 시 어느정도의 수렴을 하나 impulse후 앞 동력객차 대차는 발산, 뒤 동력객차 대차는 수렴을 보였다. 그리고 객차대차는 직진주행 시 수렴을 보이다 impulse후 진동 형태를 보이고 있다.

참 고 문 헌

6. 결론

Square Root Creep Law를 이용한 module로서 빠른 해석과 비교적 정확한 해석이 가능하였다. 하지만 Flange contact해석 시 정확성이 떨어지는 문제와 wheel과 rail의 형상을 선형화 시켜 해석함으로써 실제와는 차이가 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 실제 wheel/Rail profile을 이용한 Nonlinear Contact Theory를 개발하여 Flange contact시의 문제점 해결과 실제와 더욱 유사한 simulation이 가능하게 되었다.

Nonlinear Contact Module을 이용하여 한국형 고속전철(KHST)을 simulation한 결과 안정성이 확보되지 않았다. module과 modeling에 대한 검토를 통하여 안정성 확

1. J. J. KALKER, Survey of Wheel-Rail Rolling Contact Theory.

Vehicle System Dynamics 5 (1979) pp.317-358

2. 박찬경, 김기환, 홍진완, 심태웅, "Vampire를 이용한 경부고속철도차량의 동적안정성 해석", 철도학회 춘계학술대회 논문집, 1998, pp510~pp516

3. 박찬경, 박기준, 박준서, 배대성, "철도차량 동특성 해석을 위한 휠/레일 상호작용의 선형모델링 연구", 철도학회 춘계학술대회 논문집, 1998, pp517~pp524

4. 경부고속철도건설공단, "경부고속철도 기술이전 자료"

5. International Union of Railway, UIC 518 "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour", 1995

6. Vijay K. Garg, Rao V.Dukkipati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems". ACADEMIC PRESS, 1984

7. Rao V.Dukkipati, Joseph R Amyot, "Computer-Aided Simulation in Railway Dynamics", MARCEL DEKKER Inc., 1988

8. British Rail Research, "VAMPIRE User Manual"

9. 한국철도기술연구원, "전동차설계 파라미터 민감도 해석 및 시스템 최적화연구", 1997