차륜/레일 접촉특성을 고려한 철도차량의 곡선주행성능 해석

Dynamic Analysis for Railway Vehicle Considering Wheel/Rail Contact in Curve

*신유정[1], 허현무[2], 박준혁[2], #유원희[2]

* Y. J. Shin(yjshin@krri.re.kr)[1], J. H. Park[2], N. P. Kim[2], #W. H. You[2]

[1] 과학기술연합대학원대학교 미래첨단교통시스템공학, [2]한국철도기술연구원 철도시스템연구센터

Key words : Wheel/Rail contact, Railway vehicle, Nonlinear creep force

1. 서론

철도차량의 차륜이 레일 위를 주행할 때, 차륜과 레일의 접촉면에서는 상하, 좌우, 전후방향으로 탄성변형에 의해 힘이 발생한다. 이 힘은 보통 전후방향을 종크립력(Longitudinal creep force), 좌우방향을 횡크립력(Lateral creep force)이라 하며 상하방향에 의한 전달력을 윤중이라 한다. 이러한 차륜과 레일 사이에 작용하는 크립력은 철도차량이 레일 위를 달리다가 정지할 때의 제동력과 차량을 전진시키는 구동력을 전달하는 역할을 담당하고 있으며 다른 한편으로는 차량의 불안정한 진동인 사행동과, 진동승차감, 곡선 통과 성능, 탈선 등에 큰 영향을 미친다.

본 논문에서는 차륜과 레일의 접촉 조건을 1/10, 1/20, 1/40과 같이 하나의 등가 답면구배의 값으로 해석하는 방법과 차륜/레일 간의 기하학적 접촉특성을 고려한 방법으로 철도차량의 곡선부 주행성능 해석을 통해 그 영향을 비교해보고자 한다.

2. 크립력과 철도 차량 운동

강철을 재료로 하는 차륜/레일의 접촉면에서는 각각 탄성변형이 일어나고 이 접촉면은 진행방향으로 탄성 변형된 상태에 있는 점착영역과 접촉하면서도 상호 작용력을 잃어 상대적으로 미끄러진 상태에 있는 슬립영역이 생성된다. 차륜과 레일의 접촉면이 이러한 상태에 있는 미소한 롤링 슬립을 일컬어 크리피지(creepage)라 한다. 곡선을 주행할 때의 차륜은 그 접촉 위치에서 좌우의 회전 반경이 서로 다르기 때문에 종방향으로 비교적 큰 슬립이 발생한다. 이 슬립은 차륜의 회전반경 r_0와 회전 각속도 ω로부터 얻어진 속도 $r_0 \cdot \omega$와 차륜이 레일의 종방향으로 진행하는 속도 V와의 차를 나타내는 것으로 내궤, 외궤의 종방향 크립력에 따라 윤축의 선회 모멘트가 작용하게 된다. 따라서 이와같은 종방향 크립력은 윤축의 선회 성능에 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

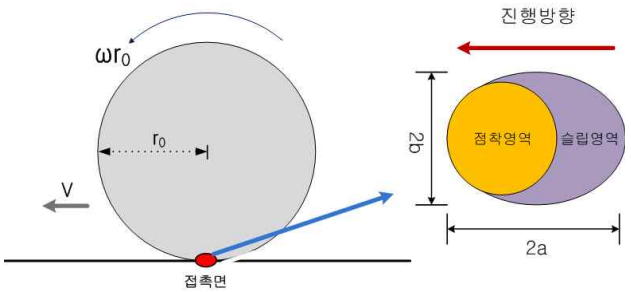

Fig.1 Contact patch of wheel/rail

철도차량의 운동 특성에 큰 영향을 미치는 크립력에 대한 이론적인 연구는 종방향, 횡방향의 슬립과 스핀이 혼재된 3차원적인 비선형 특성을 다룬 Kalker의 이론에 따라 집대성되었다고 할 수 있다. Kalker의 크립력 이론 중에서도 특히 Hertz의 접촉이론에 의해 얻어지는 접촉 형상의 장반경과 단반경의 비, 접촉면 내에 작용하는 크리피지는 접촉타원 중심에서의 값이라고 가정하여 계산한다. 본 논문에서는 차륜/레일 접촉면에 대하여 선형해석의 경우 Kalker의 선형이론에 따른 계수를 이용하여 해석하였으며 비선형 해석은 Polach의 알고리즘을 이용하여 해석하였다.

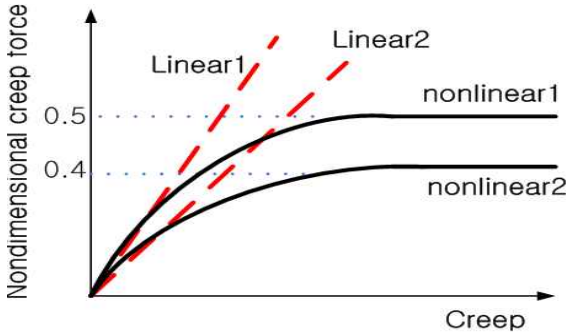

Fig. 2 Creep force applied in the linear and the nonlinear

Fig. 2는 차륜과 레일의 접촉특성에서 크립에 따른 크립력을 계산할 때, 크립이 큰 경우 선형에서의 크립이 비선형성을 고려한 경우에 비해 그 값이 급격하게 커져서 철도차량의 동특성 해석 시 발산하게 하는 원인을 야기시킬뿐만 아니라 해석 결과에 대한 신뢰성도 낮아지게 된다. 차륜/레일의 비선형을 고려한 해석은 접촉면적에 관한 여러 이론과 계산 알고리즘이 있지만 본 논문에서는 Polach가 제안한 알고리즘으로 차륜/레일의 접촉면이 타원이라는 가정하에 스핀크리피지와 접착영역 부분을 고려하여 크립력을 계산하는 방법이다. 이 알고리즘은 기존 Kalker의 비선형 크립력 계산 알고리즘에 비해 빠른 계산 속도를 보이며, 차륜/레일 접촉면에서 종방향과 횡방향 크리피지에 의해 발생하는 접선력(tangential force)은 다음과 같이 나타낸다.

$$F_{px} = -\frac{2\mu N}{\pi}\left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon^2} + \tan^{-1}\varepsilon\right)$$

(N : normal contact force, ε : the gradient of the tangential stress in the area of adhesion, μ : the coefficient of friction)

크리피지의 크기는 다음과 같이 ν로 나타낼 수 있으며 스핀 크리피지(φ)에 의한 영향을 고려한다면 ν_c와 같이 계산되고 그 조건은 다음과 같다.

$$\nu = \sqrt{\zeta_x^2 + \zeta_y^2},\ \nu_c = \sqrt{\zeta_x^2 + \zeta_{yc}^2}$$

$$\zeta_{yc} = \begin{cases} \zeta_y & ;|\zeta_y + \varphi a| \le |\zeta_y| \\ \zeta_y + \varphi a & ;|\zeta_y + \varphi a| > |\zeta_y| \end{cases}$$

(ζ_x : longitudinal creepage, ζ_y : lateral creepage)

그리고 스핀(spin creepage)이나 횡방향 크리피지에 의해 발생하는 모멘트는 전체 시스템에서의 다른 모멘트와 비교하여 작다고 가정하였으며, 스핀에 의한 영향으로 발생하는 횡방향 접선력은 다음과 같이 계산된다.

$$F_{py} = -\frac{9}{16}a\mu NK\left[1 + 6.3\left(1 - e^{-a/b}\right)\right]$$

여기서 K는 tangential stress에 의한 gradient에 의한 값을 나타내며, 최종적으로 크립력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$F_x = F_{px}\frac{\zeta_x}{\nu_c}\quad ,\ F_y = F_{px}\frac{\zeta_y}{\nu_c} + F_{py}\frac{\varphi}{\nu_c}$$

철도차량의 동특성 해석 순서는 Fig. 3에서 보듯이 윤축의 y방향 변위의 초기값이 입력되면 y변위에 대한 차륜과 레일의

기하학적 접촉특성을 나타내는 요소인 좌우 차륜반경, 접촉각, 롤각, 접촉면적, 접촉 면적의 장반경과 단반경에 대한 비라 결정된다. 그다음 polach의 알고리즘에 의해 차륜/레일 간에 발생하는 접촉력이 계산됨과 동시에 윤축의 운동방정식을 포함한 철도차량의 운동방정식이 계산된다.

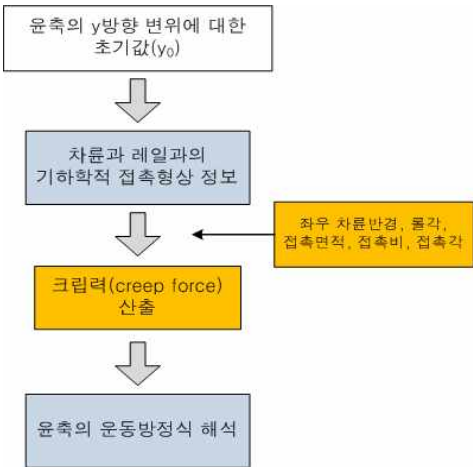

Fig. 3 Dynamic analysis of wheelset (nonlinear creep force)

Fig. 4는 윤축의 y방향 변위에 대한 차륜반경의 변화를 나타낸 것으로 답면구배가 0.25, 0.05, 0.1일 경우를 나타낸 그림이다. 다른 요소들도 윤축의 횡방향 변위에 대해 Matlab & Simulink 프로그램 내에 룩업데이블(Lookup table)로 내재되어 있으며 매 Time step 마다 그에 해당하는 값들을 출력하여 크립력을 계산한다.

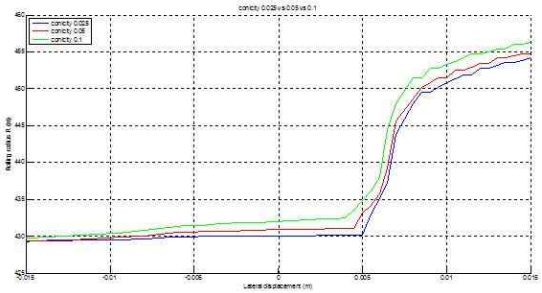

Fig. 4 Radius of wheel by conicity

철도차량의 동역학 해석은 횡방향과 요방향에 대해서 각각 윤축, 대차, 차체로 이루어진 14자유도의 운동방정식을 이용하여 수치해석을 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

3. 해석결과

Fig. 5는 곡선부에서 철도차량의 윤축에 작용하는 원심력과 캔트에 의한 외력을 나타낸 그래프이다.

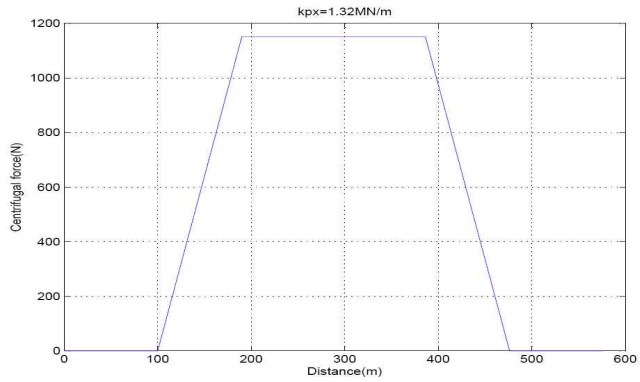

Fig. 5 Centrifugal force and cant

Fig. 6은 직선트랙에서 철도차량이 주행할 때 윤축의 횡방향 운동에 대해 비선형과 선형해석에서의 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 비교적 간단히 수행하는 선형해석에서는 300km/h의 속력에서도 수렴하는 결과를 보이지만 차륜/레일의 접촉특성에 대한 비선형을 고려한 경우에는 이보다 낮은 속도에서 이미 발산했음을 알 수 있다.

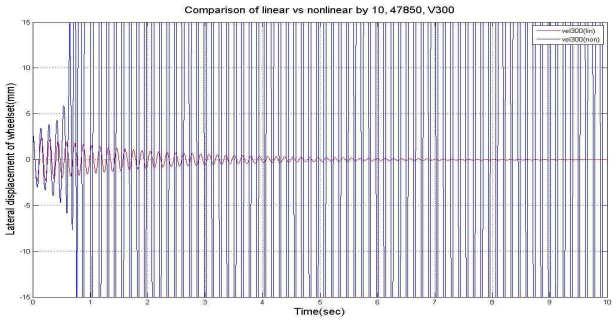

Fig. 6 Lateral displacement of wheelset on tangent track

Fig. 7 ~ Fig. 8은 철도차량이 반경 300m인 곡선부를 주행할 때 차륜과 레일 사이의 작용하는 Lateral 방향의 크립력과 윤축의 변위를 나타낸 그래프이다. 곡선부 주행의 경우, 선형해석에서는 곡선반경이나 답면구배에 따라 다르긴 하지만 비교적 낮은 속도인 50km/h이하에서 발산함을 확인하였으며 차륜과 레일의 비선형성을 고려한 해석 결과는 다음과 같다.

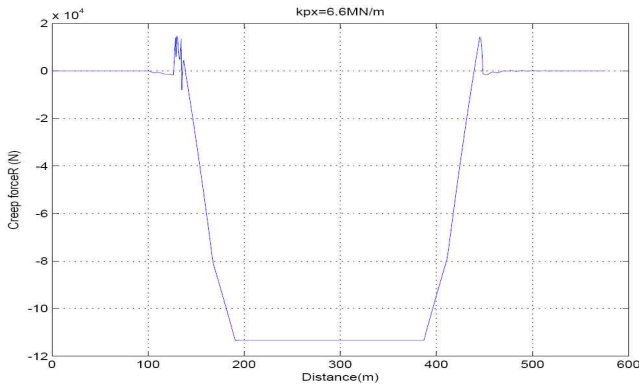

Fig. 7 Lateral creep force of wheel/rail in curve

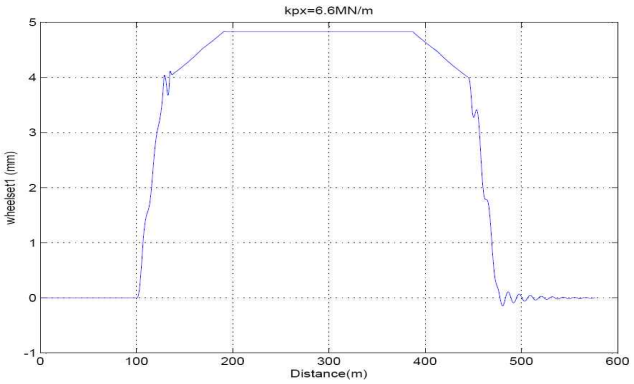

Fig. 8 Lateral displacement of wheelset in curve

4. 결론

철도차량의 설계 파라미터 변경을 위하여 동특성 해석을 하고자 할때 직선에서는 선형과 비선형 해석의 임계속도에서 큰 차이를 보이긴 하지만 그보다 낮은 중저속에서 파라미터 변화에 따른 특성을 파악하는 것에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나 급곡선부에서는 임계속도가 낮으므로 Kalker의 선형이론에 따른 크립력보다는 가급적 차륜과 레일사이의 비선형성을 고려하여 해석하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. OLDRICH POLACH, "A fast wheel-rail forces calculation computer code", IAVSD, 1999.
2. 유원희, 허현무, 박준혁 외, “도시형 친환경 열차대차시스템 개발”,한국철도기술연구원, 2007.