

도시형 전동차를 위한 능동조향대차시스템의 적용가능성 고찰

Possibility Investigation of the Active Steering Bogie System for a Urban Railway Vehicle

박준혁*
Park, Joon-Hyuk

유원희**
You, Won-Hee

ABSTRACT

On a conventional rail vehicle, passive primary suspensions stabilize wheelsets in the longitudinal and yaw direction. However, these suspensions reduce the natural curving ability due to the profile of the wheels. Stabilizing and steering of the wheelsets generate the conflict problems in design process. Therefore, most systems are designed to guarantee the stability in spite of decreased curving performance. As a result, severe wear of the wheels and rails occur on tight curves and squeal noise on curving is high. Active steering has been proposed to satisfy stabilizing and steering performance simultaneously. This paper describes the possibility investigation about the application of the active steering bogie for a urban railway vehicle. Vehicles run on an amount of tight curves at mid or low speed in urban railways. Thus, it is important to reduce the wear and squeal noise between wheels and rails. Simulations show that active steering can be reduce the wear and squeal noise significantly compared to conventional systems.

1. 서 론

철도 차량에서 휠셋(wheelset) 차륜의 답면은 구배가 있어 자기 복원력(self-centering)을 가지고 있으며 그에 따라 어떠한 구속도 없는 자유 상태에서의 휠셋은 자기 복원력에 의해 안정한 거동을 보이게 된다. 또한 차륜의 답면 구배는 차륜과 레일의 접촉점에서 좌우 차륜의 반경차를 발생시키며 이 좌우 차륜의 반경차에 의하여 휠셋은 곡선 구간에서 미끄러짐이 없는 순수 구름이 가능하게 된다. 그러나 휠셋의 선속도가 임계속도에 가까워지면 사행진동이 발생하며 불안정한 상태가 된다. 따라서 휠셋은 일차현가장치에 의해 대차 프레임에 지지되며 일차현가장치는 휠셋의 안정성을 높이고 임계속도를 증가시키는 역할을 하게 된다. 그러나 일차현가장치는 기본적으로 휠셋의 거동을 제한하는 역할을 수행하기 때문에 차륜 답면에 의한 자연스러운 조향성능을 낮추게 된다. 그 결과 철도차량은 곡선부 주행시 조향 부족에 의하여 과도한 횡압이 발생하게 되고 차륜/레일의 마모 및 소음을 유발시킨다. 기존의 수동형 일차현가장치를 이용하여 곡선부 주행 성능과 주행 안정성을 모두 만족시킬 수 있는 방법은 매우 어렵기 때문에 휠셋을 강제적으로 조향시킬 수 있는 다양한 방법이 오래전부터 시도되어 왔다 [1]. 철도 시스템의 조향 장치는 크게 세 가지로 분류될 수 있다. 첫째는 차륜 답면에 의하여 자연적으로 발생하는 조향이며 둘째는 링크 구조를 이용한 강제 조향(forced steering), 마지막으로 외부 에너지를 이용한 능동 조향(active steering)이다.

본 연구의 목적은 도시형 전동차를 위한 능동 조향 대차 시스템의 적용 가능성을 고찰하여 향후 도시형 전동차용 대차 시스템을 개발하는데 있어 그 기술적 타당성을 확보하는데 있다.

* 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부, 회원
E-mail : jhpark74@krri.re.kr
TEL : (031)460-5276 FAX : (031)460-5279

** 한국철도기술연구원

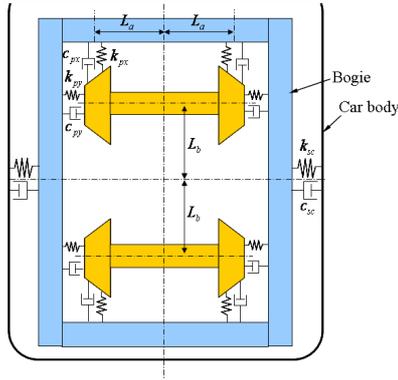


그림1. 반차체 일대차 시스템의 개념도

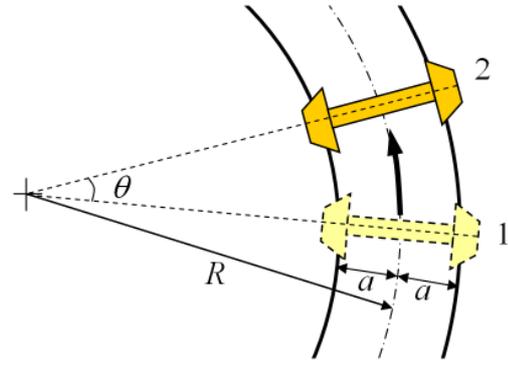


그림2. 단일 휠셋의 곡선부 거동

특히 도시철도 시스템은 그 특성상 급곡선부가 많고 승객의 승하차가 빈번할 뿐만 아니라 소음 등의 환경문제에 대한 사회적 기준이 엄격하다. 그러므로 승객의 도시 철도에 대한 만족도를 높이고 차륜/레일의 마모저감을 통한 유지/보수비용을 절감하여 도시 철도 운영 기관의 운영 수지를 개선하기 위해서도 능동 조향 대차 시스템에 대한 연구는 필요하다. 본 연구는 이를 위하여 대차 시스템의 동역학적 해석을 바탕으로 기존의 대차 시스템과 능동 조향 대차 시스템의 모의실험을 통해 비교 분석하여 도시용 전동차를 위한 능동 조향 대차 시스템 적용 타당성을 검증하고자 한다.

2. 전동차 시스템의 동역학 모델링

2.1 반차체 일대차 시스템의 동역학 모델

차체 및 대차 시스템을 포함한 운동 방정식을 구하기 위해서는 하중에 의한 강성(gravitational stiffness)에 대한 항과 일차현가계에 의한 강성 및 감쇠 항이 고려되어야 한다. 또한 곡선부 주행시 궤도의 캔트에 의하여 발생하는 힘과 원심력도 곡선부 주행을 위한 동역학 모델링에서는 포함되어야 한다. 상기한 항들이 포함된 단일 휠셋의 운동방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다 [2].

$$m_w \ddot{y} + \frac{2f_{11}}{V} \left[\dot{y} + r_0 \frac{\lambda}{a} \dot{y} - V\psi \right] + \frac{2f_{12}}{V} \dot{\psi} + W_A \frac{\lambda}{a} y = F_{sy} + F_{cant} + F_{cent} \quad (1)$$

$$I_{wz} \ddot{\psi} + I_{wy} \frac{V \lambda}{r_0} \dot{y} + \frac{2af_{33}\lambda}{r_0} y - \frac{2f_{12}}{V} \left(\dot{y} + r_0 \frac{\lambda}{a} \dot{y} - V\psi \right) + 2a^2 f_{33} \frac{\dot{\psi}}{V} - a W_A \lambda \psi + 2f_{22} \frac{\dot{\psi}}{V} = M_{sy} \quad (2)$$

여기서 F_{sy} , M_{sy} 는 대차시스템의 일차현가장치에 의한 강성력과 감쇠력을 의미하며 W_A 는 휠셋이 받는 하중, F_{cant} 는 캔트에 의한 힘 그리고 F_{cent} 는 원심력을 나타낸다.

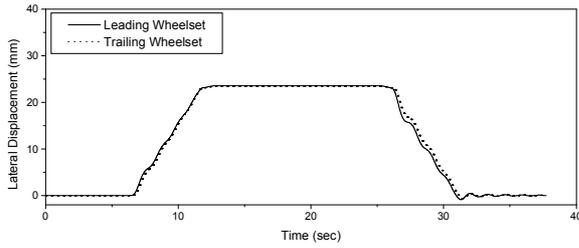
크리프력은 칼커(Kalker)의 선형 크리프 이론에 따른 크리프력으로 표현되었으며 f_{11} , f_{12} , f_{33} 은 칼커 이론에 의한 크리프 계수를 의미한다.

철도 시스템의 운동 방정식을 구하는 과정은 여러 문헌 [2, 3]에 상세히 언급되어있기 때문에 본 연구에서는 간단하게 표현하도록 하고 자세한 수식은 참고문헌을 참조하도록 한다. 그림1과 같은 일대차 반차체 시스템에 대한 대차시스템의 운동 방정식은 식(3), (4)와 같이 표현될 수 있다.

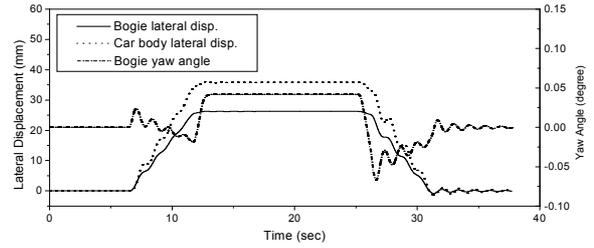
$$m_b \ddot{y}_b = -F_{sy} + F_{bcant} + F_{bcent} - F_{csy} \quad (3)$$

$$I_{bz} \ddot{\psi}_b = -M_{sz} \quad (4)$$

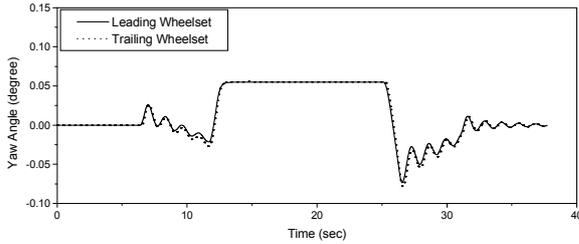
$$m_v \ddot{y}_v = F_{csy} + F_{vcant} + F_{vcent} \quad (5)$$



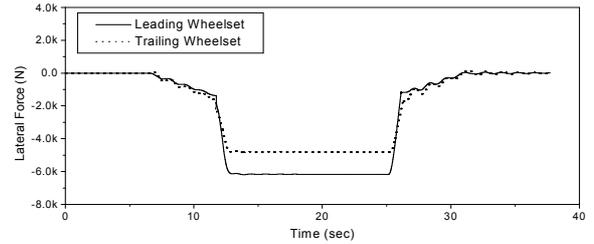
(a)



(a)



(b)



(b)

그림3. 일반 대차시스템의 곡선부 주행 모의실험: (a) 휠셋의 횡변위, (b) 휠셋의 요(yaw)각도

그림4. 일반 대차시스템의 곡선부 주행 모의실험: (a) 대차, 차체의 횡변위 및 요각도, (b) 횡압

전동차 시스템의 반차체에 대한 운동방정식은 식 (3), (4)와 유사하게 표현될 수 있으며 본 논문에서는 일대차 반차체 시스템으로 가정하였으므로 차체의 요운동은 고려되지 않고 횡방향 운동만 고려하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

2.2 곡선부 횡압 및 소음을 저감시키기 위한 조건

휠셋이 곡선부를 주행하는 경우에는 내외측 레일의 곡선반경의 차이에 의하여 외측 레일을 구르는 차륜의 선속도가 내측 레일을 구르는 차륜보다 더 빨라야 하므로 휠셋은 곡선부 주행시 외측으로 이동하여 차륜 담면구배에 의한 좌우 차륜의 반경차이를 이용하여 외측 차륜의 선속도를 높게 된다. 이와 같은 현상은 휠셋이 구속이 없는 자유 운동 상태에서는 자연스럽게 발생하여 곡선반경의 차이에 맞는 횡변위가 일어나게된다. 따라서 휠셋의 좌우차륜이 순수구름을 하게 되며 휠셋이 받는 횡압은 최소가 된다.

그림2와 같이 휠셋이 곡선 레일에서 이동할 때 순수구름을 일으키기 위한 횡변위 y 가 발생한다고 하면 횡변위 y 에 의해 내외측 차륜이 시간 t 동안에 이동한 거리는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

내측 차륜:

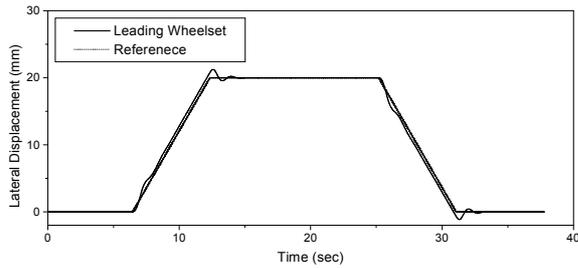
$$(R-a)\theta = (r_0 - \lambda y)\omega t, \therefore \theta = \frac{(r_0 - \lambda y)\omega t}{(R-a)} \quad (6)$$

외측 차륜:

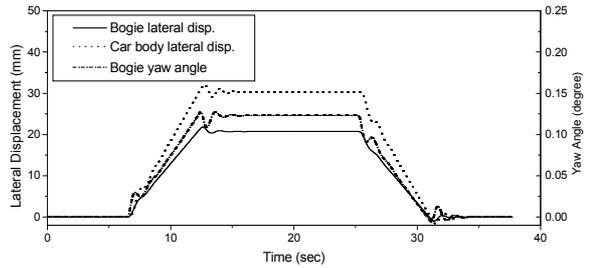
$$(R+a)\theta = (r_0 + \lambda y)\omega t, \therefore \theta = \frac{(r_0 + \lambda y)\omega t}{(R+a)} \quad (7)$$

시간 t 에 대해서 이동 각도 θ 는 내외측 차륜에 상관없이 같아야하므로 식 (6), (7)에 의해 순수구름을 위한 횡변위 y 는 다음과 같이 정의된다.

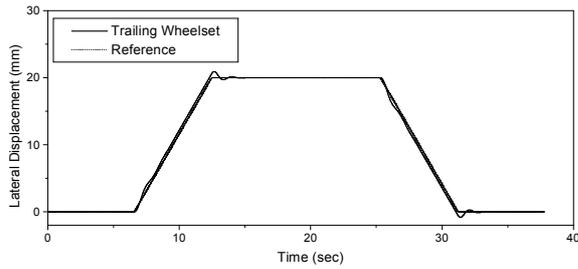
$$y = \frac{ar_0}{\lambda R} \quad (8)$$



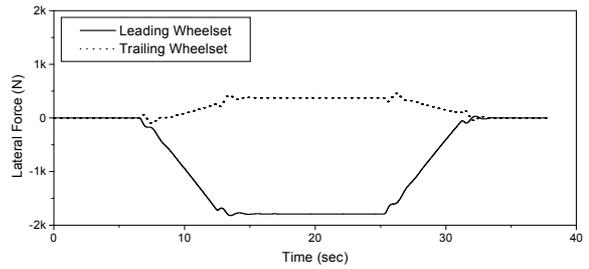
(a)



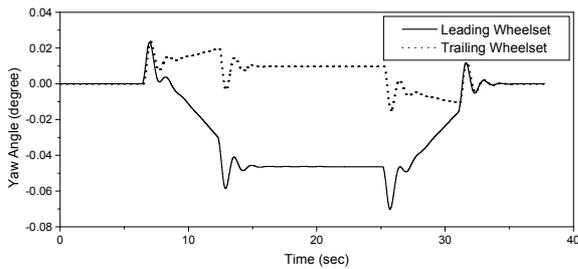
(a)



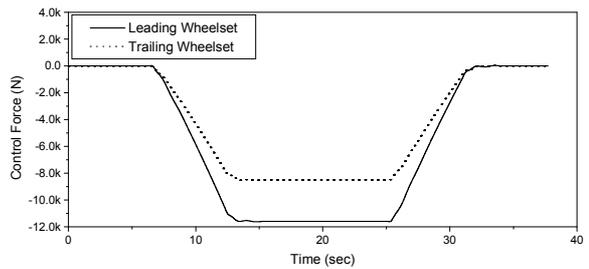
(b)



(b)



(c)



(c)

그림5. 능동 조향대차 시스템의 곡선부 주행 모의실험: (a)전륜의 횡변위, (b)후륜의 횡변위, (c) 휠셋의 요각

그림6. 능동 조향대차 시스템의 곡선부 주행 모의실험: (a)대차, 차체의 횡변위 및 요각, (b) 횡압, (c) 제어입력

3. 전동차 시스템의 곡선부 주행 모의실험

3.1 일반 대차시스템에 대한 곡선부 주행 모의실험

전동차 시스템의 일반대차에 의한 곡선부 주행성능과 능동 조향대차에 의한 곡선부 주행성능을 모의 실험을 통해 비교하기 위해서 본 연구에서는 100m의 직선주로와 약 90m의 완화곡선, 약 200m의 원곡 선을 갖는 레일에 전동차가 시속 55, 65, 75km/h로 이동한다고 가정하였다. 따라서 총 이동 거리는 약 500m이며 원곡선의 곡선반경은 250m이다. 본 연구에서 사용한 도시형 전동차시스템의 사양은 도표 1 과 같다. 도표 1에 나타나 있는 파라미터 값들은 실제로 측정된 데이터는 아니지만 여러 문헌을[3, 4, 5] 참고하여 설정한 것으로 실제 값과 큰 차이가 없을 것으로 판단되며 주행 성능을 추정해 볼 수 있 다는 점에서 충분히 타당성을 가진다.

그림3은 전동차가 55km/h로 곡선부 주행시 자기 조향에 의해 발생하는 횡변위 및 그때의 요변위를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 원곡선에 진입하였을때에 플랜지 접촉이 발생하는 것 을 확인할 수 있다. 이는 차륜과 레일의 급격한 마모를 일으키는 원인이 된다.

그림4(a)는 곡선부 주행시 발생하는 대차 및 차체의 횡변위 및 요변위를 나타낸 것이다. 주곡선부 진입시 플랜지 접촉에 의한 충격 때문에 대차 및 차체에 진동이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림4(b) 는 전후 휠셋에 작용하는 횡압을 나타낸 것으로 플랜지 접촉에 의하여 매우 큰 횡압이 발생하는 것을

도표 1. 모의실험을 위한 도시전동차 시스템 사양

명칭	사양
휠셋의 질량	1.64 (ton)
축하중	8.8 (ton)
휠셋의 roll, pitch, yaw 관성모멘트	1.124, 0.0225, 1.124 (ton-m ²)
대차 질량	3.82 (ton)
대차의 yaw 모멘트	1.0 (ton-m ²)
반차체 질량	21 (ton)
휠셋의 공칭 반경	0.43 (m)
궤간	1.435 (m)
답면구배	1/20 (0.05), 1/10 (0.1)
윤축의 길이	1.97 (m)
축거(in same bogie)	2.1 (m)
1차 현가장치의 종방향 강성 계수	1600 (kN/m)
1차 현가장치의 횡방향 강성 계수	960 (kN/m)
1차 현가장치의 종방향 감쇠 계수	0
1차 현가장치의 횡방향 감쇠 계수	0
2차 현가장치의 횡방향 강성 계수	200 (kN/m)
2차 현가장치의 횡방향 감쇠 계수	10 (kN·s/m)
횡방향 크립 상수	2212 (kN)
횡방향, 스핀 크립 상수	3.12 (kN-m ²)
스핀 크립 상수	16 (N)
종방향 크립 상수	2563 (kN)
곡선 반경	250 (m)
플랜지 공극	8 (mm)
궤도 슬랙(slack)	30 (mm)
궤도의 횡강성 계수	15000 (kN/m)
궤도의 횡감쇠 계수	150 (kN·s/m)
캔트각	about 3.3°

확인할 수 있다. 특히 전동차의 동적 거동을 이끄는 전륜(leading wheel)에 걸리는 횡압이 6000 N 이상으로 상당히 크다.

3.2 능동 조향 대차시스템에 대한 곡선부 주행 모의실험

제어기는 휠셋의 횡변위가 일차현가장치의 강성을 이기고 순수구름을 하기위한 필요 횡변위에 도달하도록 제어를 수행한다. 그러나 1/20의 답면구배를 갖는 휠셋이 곡선반경 250m에서 순수구름을 하기 위해서는 약 25.2mm의 횡변위가 필요하지만 슬랙(slack)을 둔다하여도 이 정도의 횡변위에서는 플랜지 접촉이 필연적으로 일어난다. 따라서 본 연구에서는 목표 횡변위를 20mm로 하여 약간의 조향부족을 허용하면서 플랜지 접촉이 일어나지 않도록 모의실험을 수행하였다.

그림5는 능동 제어를 통하여 휠셋의 횡변위를 20mm로 제어한 결과를 나타내고 있다. 이때 제어기로는 PID 제어기를 사용하였으며 그림에서 볼 수 있듯이 간단한 제어 알고리즘으로도 제어가 잘되는 것을 확인할 수 있다. 그림6(a)는 능동조향시에 발생하는 대차 및 차체의 동적 거동을 나타낸 것이다. 플랜지 접촉에 의한 영향이 없기 때문에 자기 조향의 경우보다 더 안정적이고 부드러운 거동을 하는 것을 확인할 수 있다. 그림6(b)는 능동조향의 경우에 전후 휠셋에 작용하는 횡압을 나타낸 것이다. 일반 대차의 경우에 비하여 횡압이 월등히 감소한 것을 확인할 수 있다. 특히 전륜의 횡압이 2000N 미만으로 일반 대차 보다 약 60% 이상 감소된 것을 볼 수 있으며 후륜은 약 400N으로 일반 대차에 비해 거의 횡압이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

그림6(c)은 능동 조향에 필요한 제어 입력을 나타낸 것으로서 최대 약 12000N 정도이다. 이는 휠셋

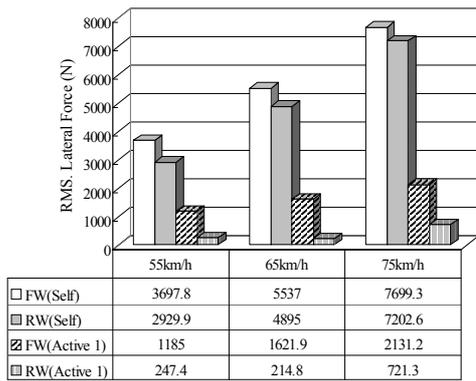


그림7. 일반대차와 능동 조향대차의 횡압 RMS값 비교

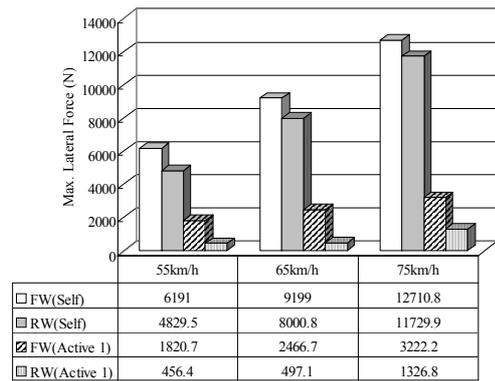


그림8. 일반대차와 능동 조향대차의 횡압 최대값 비교

이 플랜지 접촉이 일어나지 않도록 제어기가 강하게 구속하기 때문인 것으로 판단되며 이에 따라 1/20의 답면 구배를 갖는 차륜으로 곡선반경 250m의 급곡선을 원활히 주행하기 위해서는 다소 큰 제어 입력이 필요할 것으로 판단된다.

그림7은 전동차가 55, 65, 75km/h의 속도를 가지고 곡선반경 250m의 급곡선부를 지나갈 때 휠셋에 작용하는 횡압의 RMS 값을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 능동 조향에 의한 횡압저감 효과가 매우 클 것으로 판단된다. 특히 곡선부 주행 속도가 높을수록 횡압저감 효과는 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 그림8은 횡압의 최대값을 비교한 것으로 RMS 값과 마찬가지로 능동 조향의 횡압저감 효과를 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 도시형 전동차를 위한 능동 조향 대차 시스템의 타당성을 고찰하기 위하여 급곡선부 주행에 대한 모의실험을 통해 능동 조향의 성능을 평가하였으며 그 적용 가능성을 확인하였다. 도시철도 시스템은 그 특성상 곡선부 주行的 빈도가 높으며 특히 급곡선부를 주행하여야 하는 경우도 많다. 따라서 곡선부 주행에 따른 차륜/레일의 마모가 상당히 많이 발생하여 운영기관의 유지/보수비용을 증가시키는 큰 원인이 되고 있다. 또한 최근에는 쾌적하고 정숙한 친환경적인 도시 철도 시스템에 대한 사용자의 요구가 높아지고 있어 곡선부 주행시 발생하는 스킵 소음에 대한 민원도 꾸준히 증가하고 있다. 이와 같은 현상은 전동차가 곡선부를 주행할 때 조타 과다 또는 조타 부족에 의하여 횡압이 급격히 늘어나기 때문이며 능동 조향 대차를 통해 적정한 조향을 수행하면 횡압을 최소화하여 곡선부 마모 및 소음을 저감시킬 수 있다.

일대차 반차체를 이용한 모의실험 결과 능동조향 기법을 이용하면 횡압을 최소화시킬 수 있을 것으로 예측된다. 특히 1/20의 답면 구배를 사용하는 경우 급곡선 주행시 플랜지 접촉이 발생하여 급격한 차륜/레일의 마모가 일어날 수 있는데, 능동조향을 통해 플랜지 접촉을 피하고 원활한 조향 성능을 얻을 수 있다. 그러나 기존 차륜의 답면 구배는 순수구름을 하기위해서는 다소 작기 때문에 횡압 저감에는 한계가 있다. 따라서 횡압을 최소화하기 위해서는 능동조향 대차 시스템과 함께 차륜 답면의 개선도 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 선형화된 휠셋의 운동 방정식을 사용하였으며 크리프 계수 또한 접촉 부위에 상관없이 일정한 값으로 가정하였다. 그리고 플랜지 접촉의 경우 차륜 플랜지와 레일의 마찰력은 무시하였으며 레일의 불규칙도는 없다고 가정하였다. 그러므로 실제 상황과는 다소 차이가 있을 것으로 예측되나 기존 대차시스템에 대한 능동 조향대차 시스템의 우수성을 입증하는데에는 무리가 없다. 또한 능동 조향 대차시스템의 개념 확립 및 목표 성능지표 수립시 본 연구 결과를 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 비선형 지배 방정식을 이용하여 이대차 일차체 시스템에 관한 능동 조향대차 시스템의 성능을 평가함으로써 도시형 능동 조향대차 시스템을 개발하기 위한 기본 자료로 활용하고자

한다.

참고문헌

1. Mei, T. X., Goodall, R. M.(2003), “Recent Development in Active Steering of Railway Vehicles,” *Vehicle System Dynamics*, Vol. 39, No. 6, pp. 415-436.
2. R. V. Dukkipati(2000), *Vehicle Dynamics*, CRC Press.B5(182×257mm)
3. S. Lee, Y. Cheng(2005), “Nonlinear Analysis on Hunting Stability for High-Speed Railway Vehicle Trucks on Curved Tracks,” *Journal of Vibration and Acoustics*, ASME, Vol. 127, pp. 324-332.
4. A. Matsumoto, *et al*(2005), “Multibody Dynamics Simulation and Experimental Evaluation for Active-Bogie-Steering Bogie,” *Proceedings of International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems*, pp. 103-107.
5. J. Pérez, J. M. Busturia, R. M. Goodall(2002), “Control strategies for active steering of bogie-based railway vehicles,” *Control Engineering Practice*, 10, pp. 1005-1012.