

상태궤환제어를 이용한 철도차량의 능동조향

김민수, 박준혁, 유원희
한국철도기술연구원

Active Steering of Railway Vehicles using State-Feedback Control

Kim Min-Soo, Joon-Hyuk Park, Won-Hee You
Korea Railroad Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 상태궤환을 이용한 철도차량의 능동조향을 위한 제어기법에 대해 다루었다. 능동조향은 곡선부 주행시 발생하는 승차감 저하 및 차륜/레일의 마모, 소음을 줄이고 고속주행을 위한 조향성능 및 주행안정성을 확보하기 위한 기술이다. 논문에서 사용된 제어 방법은 반대차(Half Bogie) 차량모델을 기초로 측정된 휠-레일의 횡변위(Lateral Displacement)와 요각(Yaw Angle)정보를 토대로 휠에 요모멘트를 제어하였으며 시뮬레이션을 통해 제안한 방법에 대한 성능을 검증하였다.

1. 서 론

도시철도시스템은 도심지역을 통과하기 때문에 곡선부 주행이 높은 비율을 차지한다. 특히 급곡선의 경우, 조향 부족에 의하여 플랜지 접촉을 포함한 차륜/레일의 크리프력에 의하여 마모 및 스킵 소음이 발생되어 승차감 저하 및 유지보수 비용의 증대를 가져온다. 즉, 기존의 도시철도시스템은 조향기능의 부재로 곡선구간에서 매우 심한 소음 및 차륜/레일의 마모를 유발시키고 있다. 아울러 곡선부 소음에 대한 민원은 지속적으로 제기되고 있는 상황이며 차륜/레일의 과도한 마모에 의하여 발생하는 분진 등은 주변을 오염시키는 원인 중에 하나가 되고 있다. 선진국에서는 이러한 기존 철도시스템이 갖는 문제를 해결하기 위한 수단으로 조향대차 개발이 오래전부터 추진되어 왔으며, 일부 기술은 경량전철에, 또 일부 기술은 광역철도시스템에서 곡선부 주행 속도를 높이기 위하여 톨딩시스템과 함께 사용되고 있다. 최근에는 더욱 진보된 조향기법으로서 능동 조향 메커니즘에 대한 개발이 추진되어 상용화를 눈앞에 두고 있는 상황이다.

철도차량의 조향은 윤축에 고정되어 동일 속도로 회전하는 좌우 차륜의 답면형상에 기초하고 있다. 따라서 곡선 주행 시 조향은 좌우 차륜의 반경차를 이용하여 이루어진다. 능동 조향시스템에 대한 연구는 해외에서도 최근여야 가지적인 성과를 내고 있을 정도로 구현하기에는 해결해야 할 많은 난제를 안고 있는 분야이다. 조향 메커니즘에 능동 제어를 이식하고자 하는 아이디어는 1970년대 후반부터 제기되기 시작했으며 본격적인 연구는 1990년대 중반에 들어와서 시작되었다. 그 이전에는 차륜 답면에 의한 조향성능을 보조하여 주는 자기조향대차, 차체와 대차 사이의 상대 변위나, 대차와 윤축의 상대변위를 링크 구조 등을 통해 증폭시켜 조향을 일으키는 강제조향대차 등에 대한 연구 및 개발이 활성화되었다.

본 논문에서는 단일 휠셋의 모델을 토대로 일차현가계를 포함한 대차시스템의 동역학적 모델링을 수립하여 능동 조향 시스템이 없는 자기조향 상태에서의 곡선부 주행성능과 능동 조향 메커니즘을 이용한 곡선부 주행성능을 검토하였다.

2. 조향 메커니즘

2.1 능동조향메커니즘

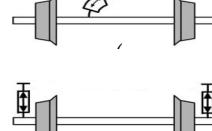
능동 조향대차는 강제조향대차와는 달리 액추에이터를 통해 휠셋에 힘을 전달하여 휠셋의 조향을 도와주는 방법으로 별도의 제어기가 장착되어 곡선반경, 주행속도 등 다양한 환경에서 최적의 조향성능을 낼 수 있도록 고안된 조향대차시스템이다.

철도시스템의 대차시스템은 기본적으로 원추형의 답면구배를 가지고 있는 좌우차륜이 윤축에 고정되어 있고, 일차현가계에 의하여 프레임에 지지되어 있는 구조이기 때문에 많은 장점을 가지고 있지만 아울러 단점 또한 가지고 있다. 일반적인 대차시스템은 저속 구간에서 주행안정성이 확보되지만 속도가 높아질수록 차륜 답면에 의해 발생하는 사행동으로 불안정한 거동을 보이게 된다. 따라서 철도시스템이 고속에서도 주행안정성을 확보하기 위하여 대차시스템의 일차현가계는 강한 강성을 갖도록 설계하고 있다. 그 결과 고속철도시스템에서의 주행안정성은 확보

되지만 곡선 주행성능은 저하되는 문제가 발생하였다. 최근까지는 이러한 문제를 해결하기 위하여 일차현가계를 설계할 때 미세한 조정을 통하여 주행안정성과 곡선 주행성능을 최대한 만족시킬 수 있도록 적절히 조절하였으나, 고속화 및 친환경성, 경제성에 대한 요구 증대에 따라 기존 메커니즘이 한계에 도달했다는 평가를 받고 있다. 능동 조향 대차는 능동 제어 개념을 도입하여 이러한 문제를 해결하고자 개발되고 있는 대차시스템이다.

철도시스템의 조향 메커니즘은 차륜 답면을 이용하여 이루어진다. 좌우 차륜이 윤축에 고정되어 같은 회전 속도를 가지고 회전을 하기 때문에 곡선주행 시에는 좌우 차륜의 반경차를 이용하여 조향이 이루어진다. 따라서 일차현가계가 휠셋을 구속하지 않는다면 자기 조향 메커니즘에 의해 휠셋은 횡압이 최소가 되는 순수구름(pure rolling) 거동을 하면서 자연스럽게 회전을 하게된다. 능동 조향 메커니즘은 일차현가계로 구속되어 있는 휠셋이 순수구름을 할 수 있도록 적절한 제어를 통해 조향을 일으키는 방법으로 크게 아래와 같이 네 가지 방법으로 나눌 수 있다.

- ① 조향운동을 능동 구동장치를 통해 직접 구현
- ② 조향운동을 차륜 답면에 의한 자기조향으로 구현하고 능동 장치는 주행안정성을 담당
- ③ 독립차륜을 이용하는 방법
- ④ 기타



<그림 1> 요트크 방법



<그림 2> 횡방향 액추에이터 방법

2.2 제어전략

철도시스템의 휠셋이 곡선을 주행하게 되면 내측궤도와 외측궤도 사이로 정의되는 궤간의 반경차에 의하여 내측 차륜보다 외측 차륜의 접선 속도가 더 빨라야 순수구름을 도달 수 있다. 그러나 기존 철도시스템의 휠셋은 고정 휠셋이기 때문에 내외측 차륜의 회전 속도는 같으므로 결국에는 외측 차륜의 반경이 내측 차륜의 반경보다 커야한다. 따라서 원활한 곡선주행을 하기 위해서는 휠셋이 좌우방향으로 이동하여 차륜 답면구배에 의한 차륜의 회전 반경의 차이가 이루어져야 하며, 그 차이는 기하학적인 계산에 의하여 결정된다. 능동 조향 메커니즘을 위한 제어 전략은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 제어 전략은 곡선반경에 의해 결정되는 좌우차륜의 반경차를 순수구름을 하기 위한 반경차가 유지되도록 적절한 제어를 통해 제어하는 방법이다. 순수구름을 유도하기 위한 휠셋의 횡방향 변위를 제어하는 방법은 곡선 반경에 대한 정보를 매순간마다 획득하여야 한다. 곡선반경에 대한 정보는 철도의 노선정보를 미리 제어기에 입력하고 곡선부 진입시 궤도에 설치된 센서를 통해 획득한 정보와 조화시켜 사용하는 방법이 널리 쓰이는 방법이며, 이와 동시에 GPS 등을 통하여 획득한 정보와 비교하는 방법과 같은 이중 검지장치를 이용하는 경우가 많다.

두 번째 방법은 전후 휠셋의 상대각을 제어하는 방법이다. 이 방법은 두 휠셋의 공격각을 똑같이 하여 원심력에 의하여 휠셋이 받는 횡압을 전후 휠셋이 균형있게 받게 하는 방법이다. 두 휠셋의 공격각을 같게 하는 방법은 두 휠셋이 지나는 곡선과 두 휠셋의 축거가 이루는 각과 두 휠셋의 상대각을 일치시키는 방법이다. 이 방법 역시 곡선반경에 대한 정보가 지속적으로 획득 가능하여야 하는 방법이다.

3. 대차시스템 모델링

이론적으로 휠셋의 기하학적 중심이 궤간 중심과 일치하여 구르는 경

우에는 휠셋은 궤도위에서 직선운동을 하게 된다. 그러나 현실적으로는 궤도의 불규칙이나 차량 및 궤도의 제조 공정상의 미세한 오차 등에 의하여 휠셋의 중심과 궤간의 중심이 서로 일치하지 않는 경우가 일반적이다. 이 경우 휠셋은 차량의 답면구배에 의하여 좌우차륜이 같은 회전 속도를 가지고 있음에도 불구하고 접촉점 부위에서의 접선 속도가 다르게 되며 크리프력이 발생하여 휠셋의 사행진동이 일어나게 된다.

휠셋의 질량을 m , z 축에 대한 회전 관성모멘트를 I_z 라 하면 휠셋의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m\ddot{y} + \frac{f_2}{V}\dot{y} - f_2\psi = 0 \quad (1)$$

$$I_z\ddot{\psi} + \frac{f_1 a^2}{V}\dot{\psi} + \frac{f_1 \lambda a}{r_0}y = 0 \quad (2)$$

휠셋의 운동방정식은 휠셋의 기구학적 거동을 기초로 유도하였기 때문에 수식이 간단하지만 시스템의 하중에 의한 영향이 고려되지 못하였다. 휠셋은 그 자체 하중 뿐만 아니라 일차현가계 및 이차현가계를 통하여 대차시스템과 차체의 하중을 지지하게 되는데 하중이 클수록 에너지 효율 측면에서는 나빠지지만, 휠셋의 안정성 측면에서는 좋아진다. 그 이유는 하중 강성(Gravitational Stiffness)에 의한 복원력이 존재하기 때문이다. 이 복원력도 차량의 답면구배가 원추형이기 때문에 발생하는 것으로 휠셋에 좌우 횡변위가 일어나면 원추 답면이 궤도와 접촉되는 접촉점에서, 하중에 의한 반력이 휠셋을 궤도의 중심으로 복원시키는 작용을 하게 된다. 따라서 대차시스템을 모델링하는 경우에는 휠셋이 받는 하중에 의한 복원력도 고려하여야 한다.

식 (1) 및 (2)는 독립적인 단일 휠셋의 거동을 해석한 식이기 때문에 여기에 하중에 의한 강성에 대한 항을 추가하여야 할 뿐만 아니라 일차현가계에 의한 강성 및 감쇠 항도 추가하여야 한다. 또한 곡선부 주행시 궤도의 캔트에 의하여 발생하는 힘과 원심력도 곡선부 주행을 위한 동역학 모델링에서는 포함되어야 한다. 상기한 항들을 휠셋의 운동방정식에 추가하고 좀 더 정확한 운동방정식을 구하면 식 (1), (2)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$m_w \left(\ddot{y}_{w1} + g\theta_{c1} - \frac{V^2}{R_1} \right) + \left(\frac{2f_{11}}{V} + r_0 \frac{\lambda}{a_1} + 2c_{py} \right) \dot{y}_{w1} + 2k_{py} y_{w1} - 2f_{11} \dot{\psi}_{w1} + \frac{2f_{12}}{V} \dot{\psi}_{w1} + W_A \frac{\lambda}{a_1} y_{w1} - 2c_{py} y_b - 2k_{py} y_b - 2c_{py} I_b \dot{\psi}_b - 2k_{py} I_b \psi_b = 0 \quad (3)$$

$$I_w \ddot{\psi}_{w1} + \left(\frac{2a_1^2 f_{33}}{V} + \frac{2f_{22}}{V} + 2c_{px} I_a^2 \right) \dot{\psi}_{w1} + (2k_{px} I_a^2 - a_1 W_A \lambda + 2f_{12}) \psi_{w1} + \left(I_{wy} \frac{V \lambda}{r_0 a_1} - \frac{2f_{12}}{V} - r_0 \frac{2\lambda f_{12}}{a_1 V} \right) \dot{y}_{w1} + \frac{2a_1 f_{33} \lambda}{r_0} y_{w1} - 2c_{px} I_a^2 \dot{\psi}_b - 2k_{px} I_a^2 \psi_b = 0 \quad (4)$$

$$m_w \left(\ddot{y}_{w2} + g\theta_{c2} - \frac{V^2}{R_2} \right) + \left(\frac{2f_{11}}{V} + r_0 \frac{\lambda}{a_2} + 2c_{py} \right) \dot{y}_{w2} + 2k_{py} y_{w2} - 2f_{11} \dot{\psi}_{w2} + \frac{2f_{12}}{V} \dot{\psi}_{w2} + W_A \frac{\lambda}{a_2} y_{w2} - 2c_{py} y_b - 2k_{py} y_b + 2c_{py} I_b \dot{\psi}_b + 2k_{py} I_b \psi_b = 0 \quad (5)$$

$$I_w \ddot{\psi}_{w2} + \left(\frac{2a_2^2 f_{33}}{V} + \frac{2f_{22}}{V} + 2c_{px} I_a^2 \right) \dot{\psi}_{w2} + (2k_{px} I_a^2 - a_2 W_A \lambda + 2f_{12}) \psi_{w2} + \left(I_{wy} \frac{V \lambda}{r_0 a_2} - \frac{2f_{12}}{V} - r_0 \frac{2\lambda f_{12}}{a_2 V} \right) \dot{y}_{w2} + \frac{2a_2 f_{33} \lambda}{r_0} y_{w2} - 2c_{px} I_a^2 \dot{\psi}_b - 2k_{px} I_a^2 \psi_b = 0 \quad (6)$$

$$m_b \left(\ddot{y}_b + \frac{g(\theta_{c1} + \theta_{c2})}{2} - \frac{(R_1 + R_2) V^2}{2R_1 R_2} \right) + 2(2c_{py} + c_{sc}) \dot{y}_b + 2(2k_{py} + k_{sc}) y_b - 2c_{py} \dot{y}_{w1} - 2k_{py} y_{w1} - 2c_{py} \dot{y}_{w2} - 2k_{py} y_{w2} - 2c_{sc} \dot{y}_v - 2k_{sc} y_v = 0 \quad (7)$$

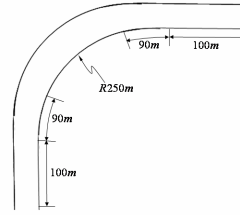
$$I_b \ddot{\psi}_b + 2(c_{py} I_b^2 + 2c_{px} I_a^2) \dot{\psi}_b + 2(k_{py} I_b^2 + 2k_{px} I_a^2) \psi_b - c_{py} I_b \dot{y}_{w1} - k_{py} I_b y_{w1} - 2c_{px} I_a^2 \dot{\psi}_{w1} - 2k_{px} I_a^2 \psi_{w1} + c_{py} I_b \dot{y}_{w2} - k_{py} I_b y_{w2} - 2c_{px} I_a^2 \dot{\psi}_{w2} - 2k_{px} I_a^2 \psi_{w2} = 0 \quad (8)$$

$$m_v \left(\ddot{y}_v + \frac{g(\theta_{c1} + \theta_{c2})}{2} - \frac{(R_1 + R_2) V^2}{2R_1 R_2} \right) + 2c_{sc} \dot{y}_v + 2k_{sc} y_v - c_{sc} \dot{y}_b - k_{sc} y_b = 0 \quad (9)$$

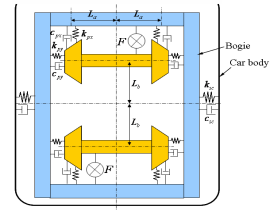
4. 시뮬레이션

곡선구간에서의 승차감 저하 및 차륜/레일의 마모감소를 위해 완화곡선을 둔다. 완화곡선의 길이는 차량의 고정축거리로 3점 지지에 의한 차륜탈선의 위험이 없도록 하고 주행차량이 받는 단위 시간당 캔트량의 변화와 캔트부족량의 변화 또한 승차감이 떨어지지 않는 범위내에서 일

정한 값 이상이 되도록 정한다. 시뮬레이션에서는 R=250인 원곡선에 3차 포물선을 갖는 약 90m의 완화곡선을 고려하였으며, 이 구간에서 전동차가 시속 55km/h의 속도로 주행한다고 가정하였다. 그림3은 시뮬레이션에서 사용된 곡선구간의 개략도이며, 차체와 대차는 그림 4에 나타내었다. 이차현가장치는 차체의 하중을 지지함과 동시에 대차로부터 전달되는 진동을 감소시키는 역할을 하며, 이차현가장치에 의해 차체가 좌우운동만 고려하였다.

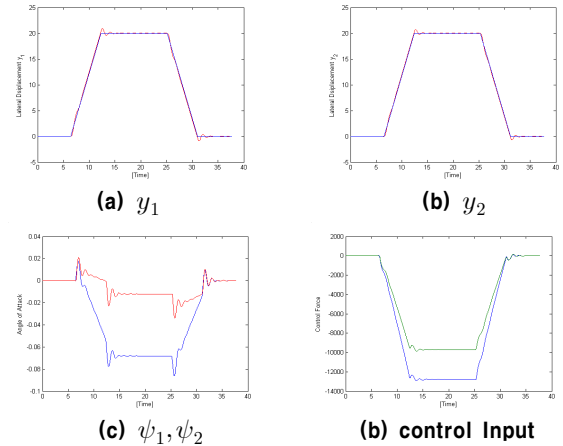


<그림 3> 곡선구간



<그림 4> 조향시스템

그림 5는 완화곡선이 있는 경우에 반차체 일대차시스템의 곡선부 주행에 관한 시뮬레이션 결과이다. 플랜지 접촉이 휠셋의 원활한 조향을 방해하기 때문에 요(yaw)각, 즉 공격각과 횡압이 예측되는 것을 볼 수 있으며 완화곡선과 직선구간이 만나는 천이구간에서 휠셋 및 대차의 요각이 급격하게 흔들리는 것을 확인할 수 있다.



<그림 5> 시뮬레이션 결과

5. 결론

본 논문에서는 250mR 곡선반경에 대한 도시철도 차량의 능동조향에 의한 곡선주행성능에 대해 살펴보았다. 시뮬레이션 결과, 횡변위 정보를 토대로 휠셋의 요 모멘트 제어를 통해 휠셋의 횡압 및 차체의 횡각속도를 저감하여 차륜/레일의 마모 및 소음을 줄이고 승차감을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 차후 연구과제로는 차륜 답면구배의 변화 및 차량 하중의 변화에도 강한 능동조향 제어기의 설계 및 검증이 추가로 진행되어야 할 것으로 보인다.

[참고 문헌]

- [1] A. Matsumoto, Y. Sato, "Multibody Dynamics Simulation and Experimental Evaluation for Active-Bogie-Steering Bogie", Int'l Symposium on Speed-Up and Service Technology for Railway and Maglev Systems, 2006
- [2] T.X. Mei, T.M. Goodall, "Recent Development in Active Steering of Railway Vehicles", Vehicle System Dynamics, 2003
- [3] Katsuya Tanifuji, "Active Steering of a Rail Vehicle with Two-Axle Bogies based on Wheelset Motion", Vehicle System Dynamics, 2003
- [4] John T pearson, Roger M Goodall, "An Active Stability System for a High Speed Railway Vehicle", Electronic systems and control division research, 2003
- [5] Yoshihiro Suda, Takefumi Miyamoto, "Active Controlled Rail Vehicles for Improved Curving Performance and Response to Track Irregularity", Vehicle System Dynamics Supplement, 2001
- [6] J. Pérez, R. M. Goodall, "Control Strategies for Active Steering of Bogie-based Railway Vehicles", Control Engineering Practice, 2002