

철도차량의 능동조향 제어법칙 설계 및 실시간 PILS 검증 Design and PILS Verification of Active Steering Control of Railway Vehicles

*#김민수, 박준혁, 허현무, 유원희

*#M. S. Kim(ms_kim@krri.re.kr), J. H. Park, H. M. Hur, W. H. You

한국철도기술연구원

Key words : Active Steering Control, Railway Vehicle, PILS

1. 서론

기존 전동차는 차륜의 답면구배를 이용한 자기조향(Self-steering)이 담당하고 있다. 그 결과 곡선구간에서 심각한 소음의 발생과 차륜/레일의 과도한 마모가 유발되고 있다. 기존 철도의 휠셋(Wheelset)은 좌우차륜이 한 축에 고정되어 있고 좌우차륜의 답면은 원추형의 구배 구조이기 때문에 어느 정도 자기조향 및 주행안정성 확보가 가능하였다. 그러나 주행안정성과 조향성능은 서로 대비되는 설계 특성 때문에 기구학적으로 이 두 조건을 동시에 만족시킬 수는 없다. 따라서 대부분의 철도시스템에서는 주행안정성을 중심으로 설계되어 조향성능은 떨어질 수밖에 없다.

해외에서는 이러한 조향성능을 향상시키기 위해 자기조향방식과 강제조향방식을 도입하고 있으나, 대부분의 자기조향방식은 그 효과가 일반대차에 비하여 높지 않고, 여러 링크와 조인트로 구성된 강제조향방식 또한 복잡성에 비해 부분적인 조향성능의 개선이라 할 수 있다. 강제조향대차는 차체와 대차간의 상대변위나 윤축과 대차간의 상대변위가 휠셋에 전달되어 조향을 보조하는 방법으로 대차사이의 상대변위나 윤축과 대차사이의 상대변위를 링크 등의 기구학적 구조를 통한 기계적인 방법으로 증폭하고 이 힘을 이용하여 휠셋의 조향을 보조하는 방법이다.

따라서 철도시스템의 고속화 및 진환경화라는 사회적 요구에 부응하고 기존 철도시스템이 갖는 기계적 한계를 극복하기 위하여 능동 제어 기술의 적용을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 능동 조향대차는 강제 조향대차와는 달리 액추에이터를 통해 휠셋에 힘을 전달하여 휠셋의 조향을 도와주는 방법으로 별도의 제어가 장착되어 곡선반경, 주행속도 등 다양한 환경에서 최적의 조향성능을 낼 수 있도록 고안된 조향 대차시스템이다.

능동조향을 위해서는 좌우 차륜의 반경차를 이용하여 순수구름(Pure Rolling)이 발생하도록 횡방향 변위를 제어하거나, 전후 휠셋의 상대각을 제어하여 공격각(Angle of Attack)을 동일하게 함으로써 전후 휠셋에 횡압(Lateral Force)을 균등하게 분배하는 방법이 사용된다.

본 논문에서는 철도차량의 능동조향을 위한 제어법칙 설계 및 실시간 PILS(Processor-In-the-Loop-Simulation) 검증에 대해 다루었다. 철도차량에서 능동조향은 곡선부 주행시 발생하는 승차감 저하 및 차륜/레일의 마모, 소음을 줄이고, 고속주행을 위한 조향성능 및 주행안정성을 확보하기 위한 제어기술이다. 논문에서는 차량 1 량을 모델로 하여 측정된 휠-레일의 횡변위(Lateral Displacement) 정보를 토대로 휠의 요모멘트를 제어하는 전략을 사용하였으며, PILS를 구축하여 실제 철도차량에 탑재되는 능동 조향제어기의 신뢰성을 입증하였다.

PILS 구축은 실제 실험에서 나타나는 인명이나 재산손실의 위험성 및 고가의 비용이 소요되는 정밀하고 복잡한 시스템의 개발 및 시험을 위한 시스템으로 항공 및 차량산업에서 검증방법으로 사용되고 있다. 더 나아가 HILS(Hardware-In-the-Loop-Simulation) 시스템을 구성하여 여러 센서와 액추에이터, 제어컴퓨터로 이루어지는 통합 시스템의 제어시스템을 구축하고 안정성 평가 및 시스템의 각 요소에 대한 신뢰성을 평가할 수 있는 기초자료로 활용

가능하게 된다.

2. 조향제어

능동 조향대차는 강제 조향대차와는 달리 액추에이터를 통해 휠셋에 힘을 전달하여 휠셋의 조향을 도와주는 방법으로 별도의 제어가 장착되어 곡선반경, 주행속도 등 다양한 환경에서 최적의 조향성능을 낼 수 있도록 고안된 조향 대차시스템이다. 철도시스템의 조향 메커니즘은 차륜 답면을 이용하여 이루어진다. 좌우 차륜이 윤축에 고정되어 같은 회전 속도를 가지고 회전을 하기 때문에 곡선주행시에는 좌우 차륜의 반경차를 이용하여 조향이 이루어진다.

철도시스템의 휠셋이 곡선을 주행하게 되면 내측궤도와 외측궤도 사이로 정의되는 궤간의 반경차에 의하여 내측 차륜보다 외측 차륜의 접선 속도가 더 빨라야 순수구름을 도모할 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 좌우 방향으로 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 곡선반경에 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 감지장치를 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 분배되도록 하는 것이다. 이 방법 역시 곡선반경에 대한 정보가 지속적으로 획득 가능하여야 하는 방법이다.

3. PILS 시스템구축

PILS(Processor-In-the-Loop-Simulation)는 다양한 하드웨어/소프트웨어로 결합된 철도차량의 조향제어시스템의 핵심부품인 능동 조향제어기의 성능을 검증하기 위해 구현된 모의실험을 의미한다. 부품의 개발단계뿐만 아니라 실제 운행 과정에서 부품에 대한 성능 검증은 막대한 비용 및 안전 문제가 발생하기 때문에 PILS 나 HILS 를 통해 모의실험을 수행함으로써 시간과 비용을 절감할 수 있게 된다. 그러므로 조향제어기의 성능검증을 위한 PILS 시스템은 모델링된 철도차량의 동특성을 실시간 시뮬레이션컴퓨터를 통해 실시간으로 운동을 재현하고 가상의 센서신호를 제어기 입력으로 사용하여 적절한 제어입력을 연산한다. PILS의 블록선도는 그림 1 과 같이 구성되며, 차량의 동특성 모델은 그림 2 와 같다.

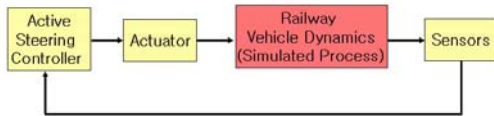


Fig. 1 Block diagram of active steering controller in railway vehicles for PILS

RCP(Rapid Control Prototyping) 및 실시간 동특성 해석을 담당하는 실시간 시뮬레이션 컴퓨터는 다양한 I/O 를 갖는 단일보드로 구성된 dSPACE DS1103 PPC 를 사용하였다.

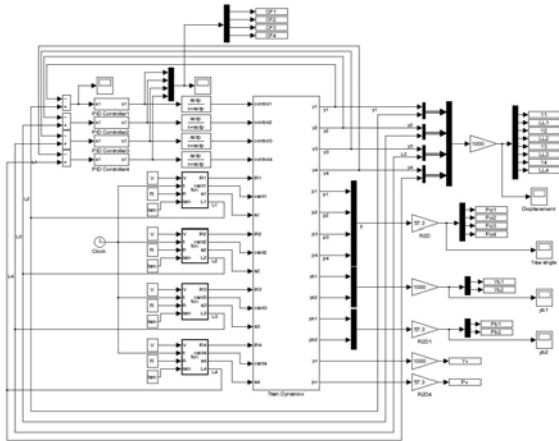


Fig. 2 MATLAB/SIMULINK block diagram for active steering railway vehicle

4. 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션 환경은 곡선반경이 150mR 인 곡선부를 등가 담면구배가 0.3 인 차량 1 량이 55km/h 로 주행하도록 모델링하였다. 철도차량의 능동조향을 위한 제어전략은 순수 구름을 유도하기 위한 휠셋의 횡방향 변위를 제어하는 방법을 사용하였으며 조향제어기는 고전 PI 제어기를 설계하여 실시간 PILS 를 수행하였다.

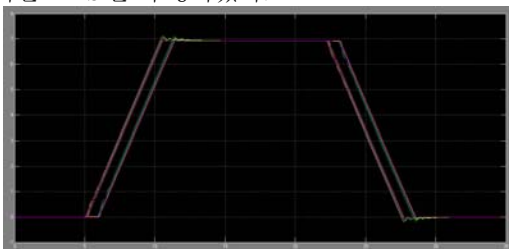


Fig. 3 Lateral displacement of leading & trailing wheelsets of each bogie for active steering railway vehicle

그림 3 에는 PILS 수행한 결과로서 능동 조향제어기에 의해 조향되는 전후대차 및 전후 휠셋의 횡변위(Lateral Displacement)를 나타내었으며, 그림 4 에는 요각(Yaw Angle)을 각각 나타내었다.



Fig. 4 Yaw angle of leading & trailing wheelsets of each bogie for active steering railway vehicle

그림 5 및 그림 6 에는 전후대차의 횡변위와 요각을 각

각 나타내었다.

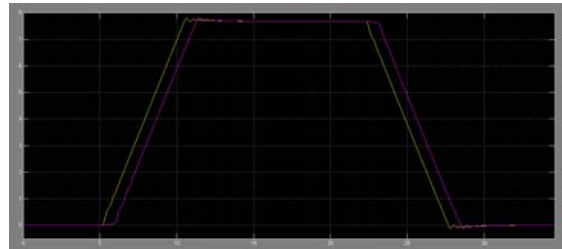


Fig. 5 Lateral Displacement of leading & trailing bogies of active steering railway vehicle

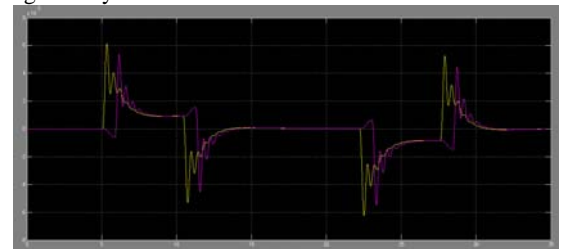


Fig. 6 Yaw angle of leading & trailing bogies of active steering railway vehicle

5. 결론

본 논문에서는 철도차량의 능동조향을 위한 제어법칙 설계 및 실시간 PILS(Processor-In-the-Loop-Simulation) 검증에 대해 다루었다. 철도차량에서 능동조향 기술은 곡선부 주행 시 발생하는 승차감 저하, 차륜/레일의 마모 및 소음을 줄이고, 고속주행을 위한 조향성능 및 주행안정성을 확보하기 위한 제어기술이다.

논문에서 차량 1 량에 대한 MATLAB/SIMULINK 모델을 구축하였고, dSPACE DS1103 PPC 제어보드를 이용하여 실시간 해석을 수행하였다. 이 때 사용된 제어법칙은 휠-레일의 횡변위(Lateral Displacement) 정보를 토대로 휠의 요모멘트를 제어 방식이며 조향제어기는 PI 제어기를 사용하였다. 차량시스템에 대한 PILS 를 구축하여 실제 철도차량에 탑재될 능동 조향제어기에 대한 실시간 시뮬레이션을 수행함으로써 제안한 제어법칙 및 제어기의 실시간 성능을 검증하였다.

참고문헌

1. Garg V. K. and Rukkipati R. V., "Dynamics of Railway Vehicle Systems," Academic press, 1994.
2. Mei. T. X. and Goodall T. M., "Recent Development in Active Steering of Railway Vehicles," Vehicle System Dynamics, 2003
3. Katsuya Tanfuji, "Active Steering of a Rail Vehicle with Two-Axle Bogies based on Wheelset Motion," Vehicle System Dynamics, 2003.
4. Yoshihiro Suda, Takefumi Miyamoto, "Active Controlled Rail Vehicles for Improved Curving Performance and Response to Track Irregularity," Vehicle System Dynamics Supplement, 2001.
5. Shuiwen Shen and Mei T. X., "Active Steering of Railway Vehicles: A Feedforward Strategy," European Control Conference, 2003.
6. Pérez J. and Goodall R. M., "Control Strategies for Active Steering of Bogie-based Railway Vehicles," Control Engineering Practice, 2002.
7. M.S. Kim, Y. S. Byun, J. H. Park, W. H. You, "Active Steering Control of Railway Vehicles using Liner Quadratic Gaussian(LQG)," The 2007 International Conference on Mechatronics and Information Technology(ICMIT), 2007.