

능동조향대차의 제어전략을 위한 곡선부 주행특성 연구

An Experimental Researches on the Curving Behavior for the Control Strategy of Active Steering Bogies

*#김민수, 허현무

*#M. S. Kim(ms_kim@krii.re.kr), H. M. Hur
한국철도기술연구원

Key words : Active Steering, Control Strategy, Railway Vehicle

1. 서론

도시철도시스템은 도심지역을 통과하기 때문에 곡선부 주행에 따른 차륜의 마모 및 소음이 중요한 문제로 대두된다. 특히 급곡선의 경우, 조향부족에 의한 플랜지 접촉 및 차륜/레일의 크리프력에 의한 마모와 스킵 소음이 발생되어 승객의 승차감 저하 및 운영처의 유지보수 비용 증대를 가져온다.

기존 차량의 휠셋(Wheelset)은 좌우차륜이 한 축에 고정되어 있고, 좌우차륜의 답면은 원추형의 구배 구조로 되어 있기 때문에 어느 정도 자기조향 및 주행안정성 확보가 가능하다. 그러나 주행안정성과 조향성은 서로 대비되는 설계 특성에 의해 기구학적으로 이 두 조건을 동시에 만족시킬 수는 없다. 따라서 대부분의 철도시스템에서는 주행안정성을 중심으로 설계되어 조향성은 떨어질 수밖에 없다. 즉, 철도시스템의 휠셋이 곡선을 주행하게 되면 내측차륜과 외측차륜 사이로 정의되는 궤간의 반경차에 의하여 내측차륜보다 외측차륜의 접선 속도가 더 빨라야 순수구름을 도출할 수 있게 된다. 그러나 기존 철도시스템의 휠셋은 고정 휠셋이기 때문에 내외측 차륜의 회전 속도는 같으므로 결국에는 외측차륜의 반경이 내측차륜의 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. 해외에서는 이러한 조향성을 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 상대변위나 윤축과 대차사이의 상대변위를 링크 등의 기구학적 구조를 통한 기계적인 방법으로 증폭하고 이 힘을 이용하여 휠셋의 조향을 보조하는 방법이다.

휠-레일의 횡변위 정보를 얻기 위해서는 휠셋에 거리측정 센서를 취부하여 레일과의 상대거리를 측정해야 하는데, 이는 차량한계에 의한 제약 때문에 현실적용이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 휠-레일의 상대변위를 대체할 수 있는 정보를 얻기 위해 보다 측정이 용이한 전-후륜의 종방향(longitudinal) 및 횡방향(lateral)에 대한 변위를 측정하였으며, 측정된 신호들 간의 상호 관계를 분석하여 조향 제어전략에 활용하고자 한다.

2절에서는 조향제어시스템에 대해 살펴보고, 3절에서는 축소조향대차를 이용하여 진행된 실험결과를 통해 휠셋의 횡/종변위를 이용한 제어전략 수립의 가능성에 대해 검토하였다.

2. 조향제어시스템

일반적으로 기존 전동차는 차륜의 답면구배를 이용한 자기조향(Self-steering)에 의해 곡선부를 주행하고 있다. 그 결과 곡선구간에서 심각한 소음의 발생과 차륜/레일의 과도한 마모가 유발되게 된다. 따라서 철도시스템의 고속화 및 친환경화라는 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 조향대차시스템이다. 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 방법 등이 사용된다.

그림1에는 이러한 조향제어시스템 중에서 측정된 휠-레일의 횡변위 정보를 토대로 휠의 요모멘트를 제어하는 능동조향 제어전략에 대한 구성도를 나타내었다.

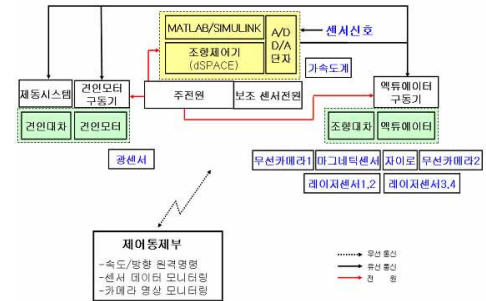


Fig. 1 Block diagram of active steering control systems

능동 조향대차 곡선주행 특성시험을 위한 시험시스템에 대한 전체 구성은 그림 2와 같다. 즉, 본 연구의 목적인 조향제어전략 수립을 위한 기초데이터 수집을 위해 실험에 사용된 1/5 축소조향대차는 제어통제부, 조향제어기부, 전원부, 견인모터부, 조향대차부, 그리고 각종 센서부로 구성되어 있으며, 계측에 사용된 센서시스템은 Omron 변위센서로서 휠-레일 상대변위를 계측하기 위한 4개의 변위센서가, 그리고 1차 허가장치의 변위를 계측하기 위한 별도의 변위센서가 4개가 사용되었다. 차량의 속도제어 및 데이터 수집은 dSPACE DS1103 PPC Controller Board를 이용하였다.

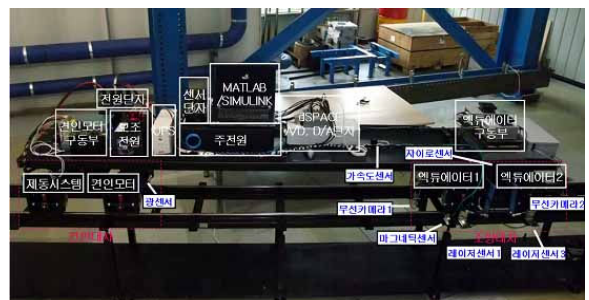


Fig. 2 The 1/5 scaled testbed for the active steering control system

3. 실험결과

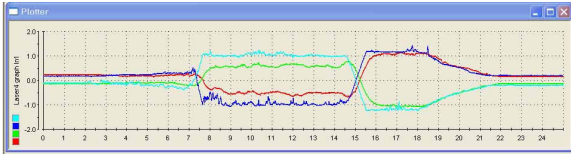
실험에 사용된 곡선부 선로는 캔트가 없는 R20 곡선이며, 직선부(6.41m)-곡선부(14.30m)-직선부(9.41m)로 총 30.11m의 길이로 구성되어 있다. 곡선주행 특성시험은 차량이 2 m/s의 곡선부를 이동할 때, 조향기능을 사용하지 않은 상태에서 데이터를 수집하였으며 휠/레일의 상대변위와 1차 서스펜션의 종-횡방향 변위와 서로 비교하였다.

레이저변위센서는 차륜/레일의 상대변위를 측정하기 위해 조향대차 전-후륜에 좌우에 각각 4개가 설치되어 있다. 전륜의

내측이 1번이고 외측이 2번이며, 후륜의 내측차륜이 3번이고 외측이 4번이다.

조향대차 전후륜의 중심선은 좌우측 레이저 센서 변위의 평균값으로 계산하였다.

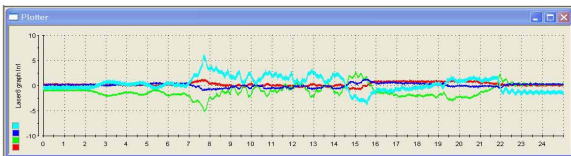
$$L_{center1} = \frac{L_2 - L_1}{2}, \quad L_{center2} = \frac{L_4 - L_3}{2} \quad (1)$$



(a) Lateral displacement between wheel and rail with four laser sensors

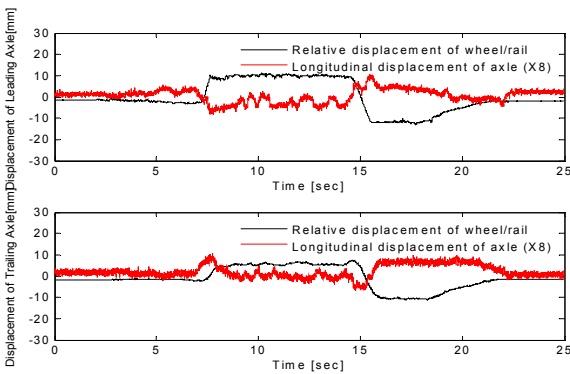


(b) Center line of the lateral displacement (green-line: leading axle, red-line: trailing axle)

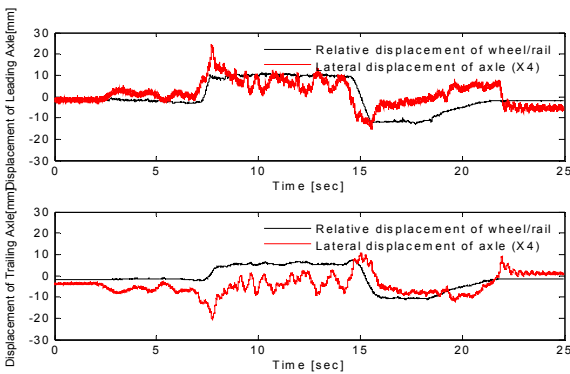


(c) lateral/longitudinal displacements of the leading/trailing axle

Fig. 3 Experimental results: acquisition data from dSPACE



(a) Relative displacement between wheel and rail, and longitudinal displacement of each 1st suspension



(b) Relative displacement between wheel and rail, and lateral displacement of each 1st suspension

Fig. 4 Experimental results: comparison of relative displacement and 1st suspension displacement

그림 3에는 dSPACE를 통해 수집된 주행데이터를 보여주고

있다. 그림 3-(a)에는 측정된 휠-레일의 상대변위를, 3-(b)에는 식(1)에 의해 계산된 중심선을, 3-(c)에는 1차 현가장치의 종횡방향 변위 각각 나타내었다.

그림 4에는 휠-레일의 상대변위와 1차 현가장치의 종횡방향 변위와의 관계를 나타내었는데, 그림 4(a)에는 휠-레일 상대변위와 8배 증폭한 1차 현가장치의 종방향 변위값을, 4(b)에는 상대변위와 4배 증폭한 1차 현가장치의 횡방향 변위값을 각각 나타내었다. 분석 결과, 휠-레일 상대변위와 1차 현가장치의 횡방향 변위는 유사한 동특성을 보여 주고 있다. 그러나 그 변위의 변동폭이 미미하여 외란이 많은 실차 운행조건에서는 외란 및 잡음의 영향을 고려하여야하며, 이를 능동 조향제어전략 수립을 위한 계측신호로 사용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

4. 결론

본 논문에서는 철도차량의 능동 조향제어전략 수립을 위해 축소조향대차에 변위센서를 설치하여 곡선부 주행 실험을 진행하였고 이를 통해 수집된 주행 데이터를 분석하였다. 철도차량에서 능동조향기술은 곡선부 주행 시 발생하는 승차감 저하, 차륜/레일의 마모 및 소음을 줄이고, 고속주행을 위한 조향성능 및 주행안정성을 확보하기 위한 제어기술이다. 견인대차 및 조향대차로 구성된 차량 1량에 대한 1/5 축소모델을 이용하여 주행하였고 레이저 변위센서 및 dSPACE를 이용하여 데이터를 수집분석하였다.

참고문헌

1. Simon Iwnicki, *Handbook of Railway Vehicle Dynamics (Eds)*, Taylor&Francis, 2006.
2. A. Matsumoto, Y. Sato, "Multibody Dynamics Simulation and Experimental Evaluation for Active-Bogie-Steering Bogie," *Int. Symposium on Speed-Up and Service Technology for Railway and Maglev Systems*, 2006.
3. J. Pérez, R. M. Goodall, "Control Strategies for Active Steering of Bogie-based Railway Vehicles," *Control Engineering Practice*, 2002.
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. Katsuya Tanifuji, "Active Steering of a Rail Vehicle with Two-Axle Bogies based on Wheelset Motion," *Vehicle System Dynamics*, 2003.
6. M. Athans, "The role and use of the stochastic Linear-Quadratic-Gaussian problem in control system design," *IEEE Trans. on AC*, 16(3), 1971.
7. T.X. Mei, T.M. Goodall, "Recent Development in Active Steering of Railway Vehicles," *Vehicle System Dynamics*, 2003.
8. Yoshihiro Suda, Takefumi Miyamoto, "Active Controlled Rail Vehicles for Improved Curving Performance and Response to Track Irregularity," *Vehicle System Dynamics Supplement*, 2001.
9. S.Y. Lee and Y. C. Cheng, "Nonlinear Analysis Hunting Stability for High-Speed Railway Vehicle Trucks on Curved Tracks," *Vehicle System Dynamics Supplement*, Vol.127, 2005.
10. Gretschel M. and Jaschinski A., "Design of an Active Wheelset on a Scaled Roller Rig," *Vehicle System Dynamics*, Vol.41 No.5, 2004, pp. 365-381.
11. Min-Soo Kim, Yeun-Sub Byun, Hyun-Moo Hur, "Design of Active Steering Controller of the Scaled Railway Vehicle," *INTERNATIONAL JOURNAL OF CIRCUITS, SYSTEMS and SIGNAL PROCESSING*, Vol.2 No.3, 2008.
12. Min-Soo Kim, Joon-Hyuk Park, Won-Hee You, "Construction of Active Steering System of the Scaled Railway Vehicle," *INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMS APPLICATIONS, ENGINEERING & DEVELOPMENT*, Vol.2, No.4, 2008.