

철도차량의 퍼지 능동조향제어기의 성능비교

김민수, 유원희
한국철도기술연구원

Comparison of Performance of Fuzzy Active Steering Controller for Railway Vehicles

Min-Soo Kim, Won-Hee You
Korean Railroad Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 철도차량의 능동조향을 위한 고전 PI 제어기 및 퍼지 제어기를 설계하여 그 성능을 서로 비교하였다. 철도차량에서 능동조향은 곡선부 주행 시 발생하는 승차감 저하 및 차륜/레일의 마모와 소음을 줄이고, 고속주행을 위한 조향성능 및 주행안정성을 확보하기 위한 제어기술이다. 논문에서는 차량 1량을 모델로 하여 측정된 휠-레일의 횡변위(Lateral Displacement) 정보를 토대로 휠의 요모멘트를 제어하는 전략을 사용하여 제어기를 설계하였으며, 시뮬레이션을 통해 제어기 응답 특성을 비교하였다.

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. 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.

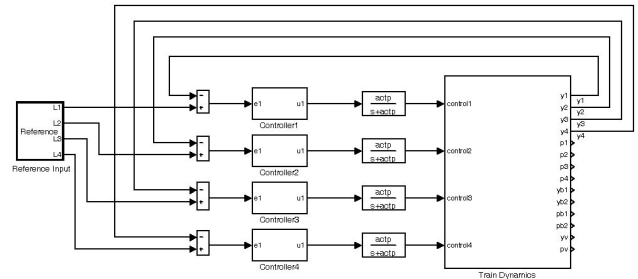
해외에서는 이러한 조향성능을 향상시키기 위해 자기조향방식과 강제조향방식을 도입하고 있으나, 대부분의 자기조향방식은 그 효과가 일반 대차에 비하여 높지 않고, 여러 링크와 조인트로 구성된 강제조향방식 또한 복잡성에 비해 부분적인 조향성능의 개선이라 할 수 있다. 강제조향대차는 차체와 대차간의 상대변위나 윤축과 대차간의 상대변위가 휠셋에 전달되어 조향을 보조하는 방법으로 대차사이의 상대변위나 윤축과 대차사이의 상대변위를 링크 등의 기구학적 구조를 통한 기계적인 방법으로 증폭하고 이 힘을 이용하여 휠셋의 조향을 보조하는 방법이다.

따라서 철도시스템의 고속화 및 친환경화라는 사회적 요구에 부응하고 기존 철도시스템이 갖는 기계적 한계를 극복하기 위하여 능동 제어 기술의 적용을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 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 조향 대차 시스템이다. 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.

2절에서는 고전 PI 조향제어기 및 지능형 퍼지제어기에 대해 살펴보고, 3절 시뮬레이션에서는 차량 1량을 모델링하여 시뮬레이션을 진행하고 결과를 통해 성능비교를 수행하였다.

2. 조향제어기

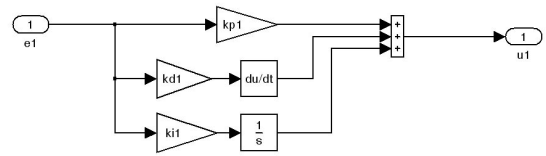
철도시스템의 휠셋이 곡선을 주행하게 되면 내측궤도와 외측궤도 사이로 정의되는 궤간의 반경차에 의하여 내측 차륜보다 외측 차륜의 접선 속도가 더 빨라야 순수구름을 도모할 수 있다. 그러나 기존 철도시스템의 휠셋은 고정 휠셋이기 때문에 내외측 차륜의 회전 속도는 같으므로 결국에는 외측 차륜의 반경이 내측 차륜의 반경보다 커야한다. 따라서 원활한 곡선주행을 하기 위해서는 휠셋이 좌우방향으로 이동하여 차륜 답면구배에 의한 차륜의 회전 반경의 차이가 이루어져야 하며, 그 차이는 기하학적인 계산에 의하여 결정된다. 그림1에는 이러한 조향제어시스템 중에서 측정된 휠-레일의 횡변위 정보를 토대로 휠의 요모멘트를 제어하는 조향제어시스템에 대한 구성도를 나타내었다.



<그림 1> 조향제어 시스템

2.1 PI 제어기

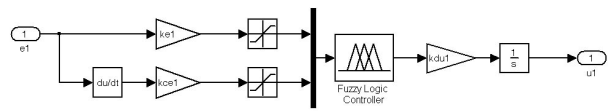
그림1의 조향제어시스템 중에서 전위대차의 전후 휠셋 및 후위대차의 전후 휠셋에 대한 횡변위 정보를 기초로 하는 제어기부를 그림2와 같은 고전 PI제어기로 구성하여 성능을 비교하였다. 이때 사용된 제어이득은 P이득이 3500000, I이득이 17500000이며, 휠셋 4축 모두에 동일한 값을 갖는 제어기를 사용하였다.



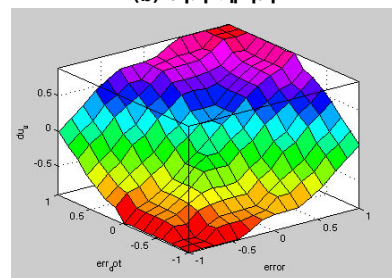
<그림 2> 고전 PI 제어기

2.2 PI형 퍼지 제어기

그림3과 같은 PI형 퍼지제어기를 사용하여 제어기부를 설계하였으며, 사용된 규칙은 서보제어에 사용되는 일반적인 47가지 규칙을 적용하였다. 이때 사용된 정규화이득은 kp는 10000을, kce는 1500을 각각 사용하였고, 출력이득 kdu는 4550을 사용하였다. 이 값 또한 휠셋 4축 제어기 모두에 동일하게 사용하였다.



(b) 퍼지 제어기

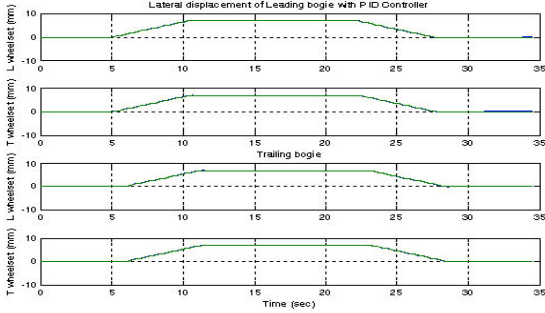


(b) 제어평면

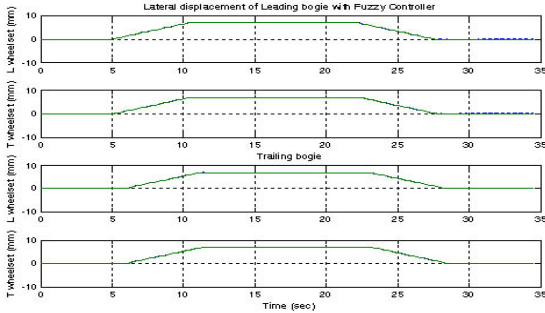
<그림 3> 퍼지 제어기 구조 및 제어평면

3. 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션에서는 R=150인 원곡선에 3차 포물선을 갖는 완화곡선을 고려하였으며, 이 구간에서 전동차가 시속 60km/h의 속도로 주행한다고 가정하였다. 또한 등가답면구배는 0.3을 가정하였다. 이차현가장치는 차체의 하중을 지지함과 동시에 대차로부터 전달되는 진동을 감소시키는 역할을 하며, 이차현가장치에 의해 차체가 좌우운동만 고려하였다. 그림 4 및 그림5는 PI제어기 및 퍼지 제어기에 대한 수행한 완화곡선이 있는 경우의 1차체 2대차시스템의 곡선부 주행에 관한 시뮬레이션 결과 중 횡변위를 각각 나타내었다.

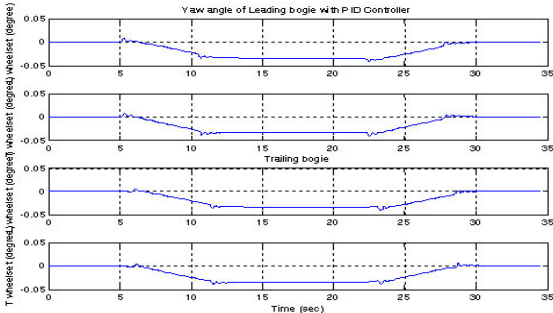


〈그림 4〉 PI제어기의 횡변위

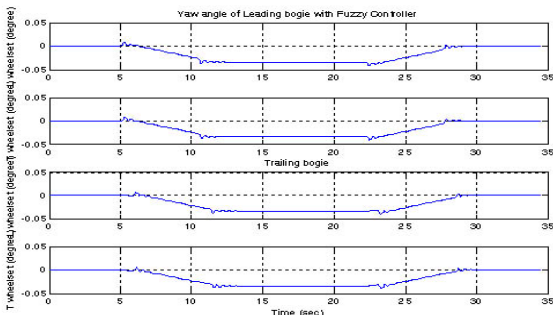


〈그림 5〉 퍼지제어기의 횡변위

그림6 및 그림7에는 각각의 제어기에 대한 요각을 각각 나타내었다.



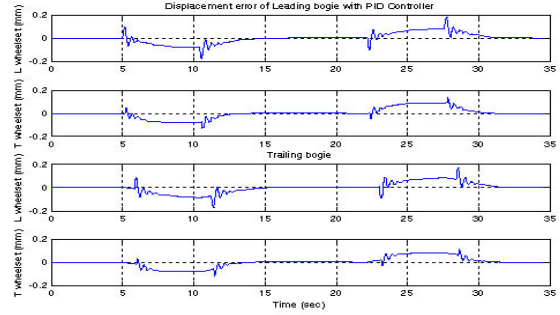
〈그림 6〉 PI제어기의 요각



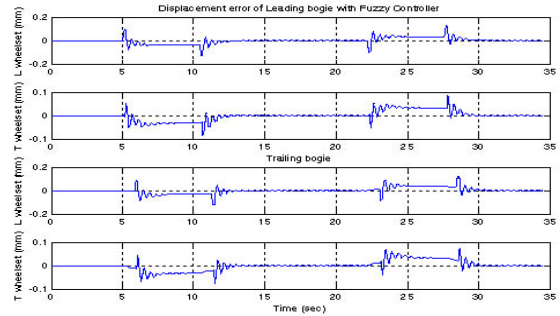
〈그림 7〉 퍼지제어기의 요각

그림8 및 그림9에는 기준값과 각 휠셋의 횡변위의 차인 오차를 각각 나타내었으며, 표1에는 PI제어기 및 퍼지제어기의 횡변위에 대한 절대오차를 계산하여 나타내었다.

차압을 계산하여 나타내었다.



〈그림 8〉 PI제어기의 횡변위 오차



〈그림 9〉 퍼지제어기의 횡변위 오차

〈표 1〉 횡변위 절대오차함 비교

	PI제어기	퍼지제어기
전위대차 전위휠셋 y1	1932.7	998.9
전위대차 후위휠셋 y2	1849.5	857.9
후위대차 전위휠셋 y3	1897.4	999.6
후위대차 후위휠셋 y4	1820.3	868.6

4. 결 론

본 논문에서는 철도차량의 능동조향을 위한 제어법칙 설계 및 고전 PI제어기와 퍼지 제어기 간의 성능비교에 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. 차량 1량에 대한 MATLAB/SIMULINK 모델을 구축하여 R=150인 급곡선에서 등속도로 주행하도록 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 사용된 제어법칙은 휠-레일의 횡변위 정보를 토대로 휠의 요모멘트를 제어하도록 하는 방식이다.

[참 고 문 헌]

- [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] 김민수, 박준혁, 유원희, "상대회환제어를 이용한 철도차량의 능동조향", 2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2007.
- [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.