

1차현가장치 변위 및 자이로센서 요율을 이용한 철도차량의 능동조향제어전략

Active Steering Strategy for Railway Vehicles using Displacement of 1st Suspension and Yaw Rate of Gyro

* #김민수, 허현무, 박준혁, 유원희

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

Key words : Active Steering, Lateral Displacement, Yaw rate

1. 서론

차량의 윤축이 곡선을 주행하게 되면 내측궤도와 외측궤도 사이, 즉 궤간에 의한 반경 차에 의하여 내측차륜보다 외측차륜의 접선 속도가 더 빨라야 순수구름을 이끌어 낼 수 있다. 그러나 기존 철도차량의 윤축은 구속되어 있어 내외측 차륜의 회전 속도가 같으므로 결국에는 외측차륜의 반경이 내측차륜의 반경보다 커야 순수구름이 가능하게 된다. 따라서 원활한 곡선주행을 하기 위해서는 윤축을 좌우방향으로 이동시킴으로서 차륜 담면구배에 의한 차륜 회전 반경차가 발생되며, 그 차이는 기하학적인 계산에 의하여 결정된다[1][2].

최근에는 기존철도차량의 형상변화를 최소화하면서 수동(passive) 조향을 뛰어넘는 능동(active) 조향메커니즘 구현과 함께 조향에 대한 제어전략을 적용하여 축소모델을 만들어 시험하거나 실차에 적용하여 시험하는 등 활발히 연구 중에 있다.

좌우차륜의 반경차를 순수구름을 하기 위한 반경차가 유지되도록 제어기를 통해 적절히 제어하는 제어전략인 순수구름을 위한 윤축의 횡변위 제어전략을 위해서는 곡선반경, 담면구배 뿐만아니라 휠-레일 상대변위가 계측되어야한다. 그러나 철도차량의 차량한계 등의 제약조건에 의해 휠-레일 상대변위를 계측하는 것은 현실적으로 어렵다고 볼 수 있다. 따라서 휠-레일 상대변위정보를 추정할 수 있는 인자들을 도출하기위해 축소선로 상에서 축소차량의 주행시험을 통해 데이터를 수집하여 분석함으로써 휠-레일 상대변위에 대한 추정값으로 사용가능한 제어인자들을 도출하였다.

2. 능동 조향의 제어전략

능동조향을 위한 실용적인 제어전략을 수립하기위해 곡선부 축소선로와 축소차량(그림1-(a))을 이용하여 주행시험을 실시하였고, 주행시험과정에서 1차현가장치의 중방향변위 및 횡방향변위를 계측하였다[3]. 1차 현가장치의 중횡방향 변위는 그림1-(b)과 같이 레이저센서를 조향대차 전후 차축에 설치하여 계측하였으며, 계측된 변위값을 그림 2에 나타내었다.



(a) Scaled railway vehicle (b) Sensor systems
Fig. 1 Scaled railway vehicle and its sensor systems

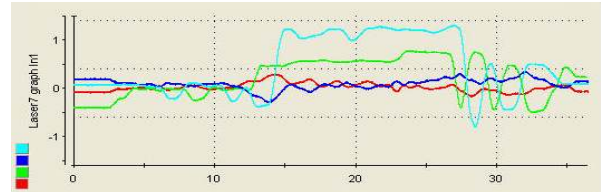


Fig. 2 Lateral and longitudinal displacement of the 1st suspension (red-line: lateral displacement of the trailing axle[v], green-line: longitudinal displacement of the trailing axle[v], blue-line: lateral displacement of the leading axle[v], cyan-line: longitudinal displacement of the leading axle[v])

주행시험을 통해 실시간으로 계측된 자이로의 출력인 요율을 그림 3에 나타내었다.

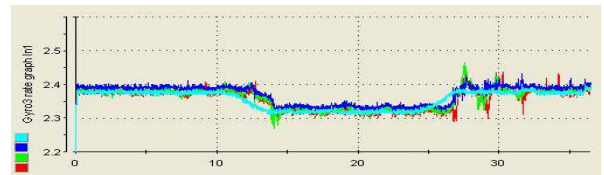
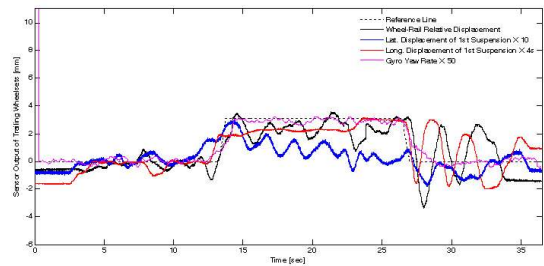
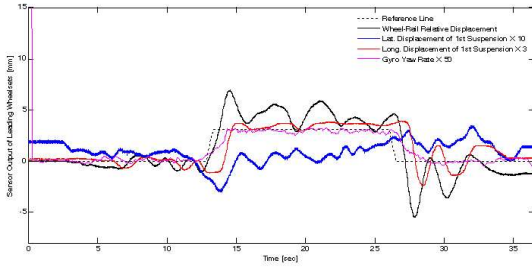


Fig. 3 Yaw rate of gyro (red-line: yaw rate of the trailing axle[v], green-line: yaw rate of the leading axle[v], blue-line: yaw rate of steering bogie[v], cyan-line: yaw rate of carbody[v])

휠-레일 상대변위정보를 추정할 수 있는 인자들을 도출하기위해 수행된 주행시험으로부터 여러 가지 센서를 부착하여 휠-레일 상대변위에 대한 추정값으로 사용가능한 요소를 분석하였다. 그림 4에는 여러 센서들의 출력에 적절한 상수배를 곱한 결과를 나타내었다. 즉, 순수구름을 위한 횡변위 기준선, 휠-레일 상대변위, 1차 현가장치의 중횡변위 출력, 그리고 자이로 센서의 출력인 요율을 상호 비교하였다.



(a) trailing axle



(b) leading axle

Fig. 4 Comparison of sensor signals(lateral & longitudinal displacement of the 1st suspension and yaw rate of gyro)

그림 4에서 알 수 있듯이 자이로의 요율은 순수구름을 위한 기준선과 유사한 출력 특성을 보여주고 있다. 단, 여기에서 자이로 출력은 저역통과필터 및 256 샘플의 이동평균을 취해 잡음 영향을 제거하였으며 또한, 바이어스 값을 제거하여 기준점을 0으로 설정한 후에 일정 상수배를 취한 결과이다. 그리고, 1차 현가장치의 종방향 변위는 기준선 및 휠-레일 상대변위와 유사한 출력 특성을 보여주고 있어 본 논문에서는 현차에서 계측하기 힘든 휠-레일 상대변위 정보를 대체하여 사용할 수 있는 실용적인 제어인자로 1차 현가장치의 종-횡방향 변위 및 자이로 출력의 1차결합식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} \hat{L}_i &= a_i L_{iLat,1st} + b_i L_{iLong,1st} + c_i (\Psi_i - bias_i) + k_i \\ &= a_i L_{iLat,1st} + b_i L_{iLong,1st} + c_i \Psi_i + d_i \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)의 상수값은 최적화과정을 통해 결정되어질 상수값이다.

3. 시험 및 결과

유전자알고리즘(GA: Genetic Algorithms)을 이용하여 파라미터 최적화를 수행하였다[4]. 최적화를 위한 목적함수(Objective Function)는 휠-레일 상대변위와 식 (1)로 주어지는 추정값에 대한 평균제곱오차(MSE)로 설정하였으며, 이를 최소화시키는 최적의 파라미터를 찾도록 하였다. 그 결과, 세대별 목적함수의 감소 추이를 로그스케일로 표시하여 최적화 과정을 그림 5.6에 도시하였으며, 최적화를 통해 얻은 계수를 표 1에 나타내었다.

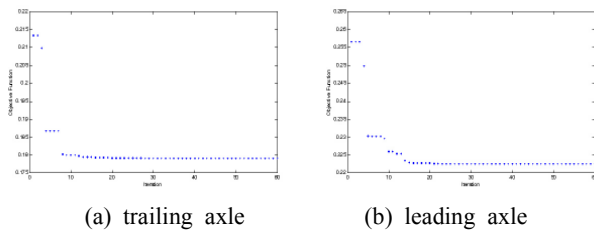


Fig. 5 Variation of the objective function: GA optimization

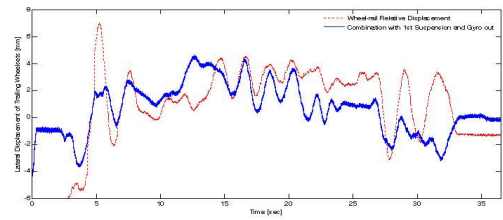
Table 1 Results of the parameter optimization

		a	b	c	d
최적 파라미터	후류	11.7834	1.2825	1.3969	-4.7624
	전류	-11.3812	2.7055	1.3288	-3.3293

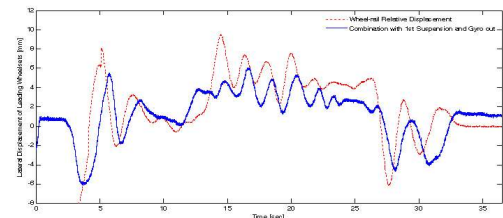
추정된 상대변위 \hat{L}_i 는 최적 계수(a_i, b_i, c_i, d_i)와 센서출력과의 1차결합 형태로 주어지는데, 후류의 종방향 1차 현가장치의 변위인 a_1 과 전류의 종방향 1차 현가장치의 변위인 a_2 의 부호가 반대인 이유는 1차 현가장치의 종방향 변위센서의 위치가 서로 대칭구조로 설치되어 있고 또한 상수부인 d_1 과 d_2 의 값 및 센서의 바이어스값이 고려되어 나타난 것으로 여겨진다.

1차 현가장치 종횡방향 변위 및 자이로의 출력인 요율을 조합하여 최적 계수(표 1의 계수)를 적용하여 휠-레일 상대변위에 대한 추정(Estimation) 성능을 비교분석하여 그림 6에 도시하였

다.



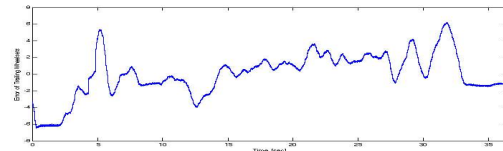
(a) trailing axle



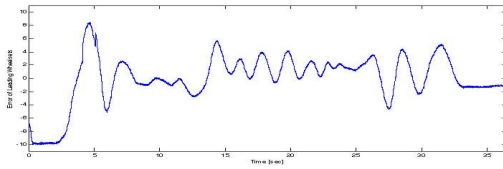
(b) leading axle

Fig. 6 Comparison of wheel-rail lateral displacement with the proposed sensor combination signals

또한 휠-레일 상대변위와 추정된 상대변위(1차 현가장치 종횡방향 변위 및 자이로 요율의 조합)의 차로 정의되는 오차를 그림 7에 나타내었다.



(a) trailing axle



(b) leading axle

Fig. 7 Error signals between wheel-rail lateral displacement and the proposed sensor combination signals

4. 결론

본 논문에서는 현차에서 계측하기 힘든 휠-레일 상대변위 정보를 대체할 수 있는 실용적인 제어인자로 축소모델을 이용한 실험데이터에 기초하여 1차 현가장치의 종-횡방향 변위 및 자이로 출력의 1차결합식을 제안하였다. 제안한 1차 현가장치 종-횡방향 변위 및 자이로의 출력인 요율을 조합에 기초한 휠-레일 상대변위 추정값을 이용하여 능동 조향제어시험을 수행하였으며 그 결과를 분석하였다.

참고문헌

1. Simon Iwnicki, *Handbook of Railway Vehicle Dynamics (Eds)*, Taylor&Francis, 2006.
2. J. Pérez, R. M. Goodall, "Control Strategies for Active Steering of Bogie-based Railway Vehicles," *Control Engineering Practice*, 2002.
3. 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.
4. D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in search, Optimization and machine Learning*, Addison Wesley Publishing Company, 1989.