

# 독립구동방식 철도차량의 주행성능 개선을 위한 능동제어전략 비교연구

## A Comparative Active Control Study for Improving the Running Performance of Railway Vehicle with Independently Rotating Wheels

조연호\*<sup>†</sup>, 이원상\*, 곽재호\*\*

Yonho Cho\*<sup>†</sup>, Wonsang Lee\*, Jaeho Kwak\*\*

**Abstract** A comparative study of active control strategies to improve running performance by control lateral displacement with new dynamic equation which predicted the dynamic performance of railway vehicle with independently rotating wheels were accomplished. Control strategies which applied with lateral force control, yaw torque control, yaw moment control using left and right torque difference and yaw torque control with yaw angle are used to comparative study and control algorithms are PID, LQR, SMC,  $H_{\infty}$ . The wheel torque control is evaluated to best strategy to improve lateral displacement control. The PID control has good performance on normal track without disturbance, but robust control like SMC,  $H_{\infty}$  have better performance on track with disturbance like track irregularities. The control performance of wheel torque control which verified to best control strategy evaluated on 1/5 small scale roller-rig.

**Keywords** : IRW(Independently Rotating Wheels), Lateral displacement control, Active control, Robust control, Small scale roller-rig

**초 록** 독립 차륜형 차량의 동적 성능을 예측하기 위한 새로운 운동방정식을 이용하여 횡변위 제어를 통한 주행성능 개선 능동제어전략에 대한 비교연구를 수행하였다. 제어방법으로는 횡 방향 횡력제어, 요 방향 토크제어, 좌우 토크차에 의한 요 모멘트 제어와 요각을 줄이는 요토크 제어를 비교 분석하였고, 제어알고리즘으로는 PID, LQR, SMC,  $H_{\infty}$  제어 기법을 적용하여 성능을 비교하고 제어알고리즘간 장단점 분석을 통한 최적의 제어알고리즘을 선정하였다. 횡변위제어를 위해 휠토크제어가 가장 우수함을 입증하였고 외란이 없는 일반트랙에서는 PID제어가 우수하지만, 궤도불규칙도와 같은 외란이 있는 경우 SMC와  $H_{\infty}$ 와 같은 강인제어가 제어성능 확보에 유리함을 확인하였다. 최적제어전략으로 확인된 휠토크제어 성능은 1/5 축소형 주행시험대를 이용하여 제어전략의 유용성을 확인하였다.

**주요어** : 독립구동, 횡변위제어, 능동제어, 강인제어, 축소형 주행시험대

### 1. 서 론

최근 국내에서 도입이 검토되고 있는 트램은 바닥높이를 낮추고 곡선부 주행성능을 향상하기 위해 독립 차륜형 대차를 적용하고 있다. 직진 주행 시에는 강제윤축방식이 주행안정성 확보에 유리하고 급 곡선에서는 독립 차륜형 방식이 우수한 곡선 주행성능을 나타낸다.

† 교신저자: 현대로템주식회사 주행장치개발팀(ycho@hyundai-rotem.co.kr)

\* 현대로템주식회사 주행장치개발팀, \*\* 한국철도기술연구원 도시교통실용화연구팀

본 논문에서는 이러한 현상을 규명하고 독립차륜형 차량의 동적성능을 예측하기 위한 새로운 운동방정식을 이용하여 횡변위 제어를 통한 주행성능 개선 능동제어 전략에 대한 비교 연구를 수행하였다. 국내에서는 아직 저상트램에 적용된 독립회전 차륜방식 철도차량에 대한 운영 및 연구에 대한 사례가 없기 때문에 본 논문에서는 독립 구동 차륜을 적용한 대차를 이용한 철도차량에 대하여 해석을 통해 특징을 분석하고 독립회전 차륜방식의 단점인 복원력 부족과 조향기능 향상을 위해 다양한 능동 제어 기법을 비교 연구하여 가장 효과적인 제어 방법을 제안하도록 하겠다.

## 2. 해석모델 개발

철도차량 동역학 모델로서 가장 널리 알려진 ‘Dynamics of Railway Vehicle Systems - Vijay K. Garg & Rao V. Dukkipait저’의 결과를 참조하여 운동방정식을 도출하였다. 최성규의 논문에 따르면 문헌에 도출된 수식에는 차륜/레일 접촉지점에서의 차량의 진행방향으로 접촉력 성분이 누락되었고, 진행방향 일정 속도와 교란된 변위에 대한 시간 미분치를 혼동함으로써 잘못된 결과가 도출되었음을 지적하고 있어 본 논문에서도 해당 운동방정식 유도에 참고하였다.

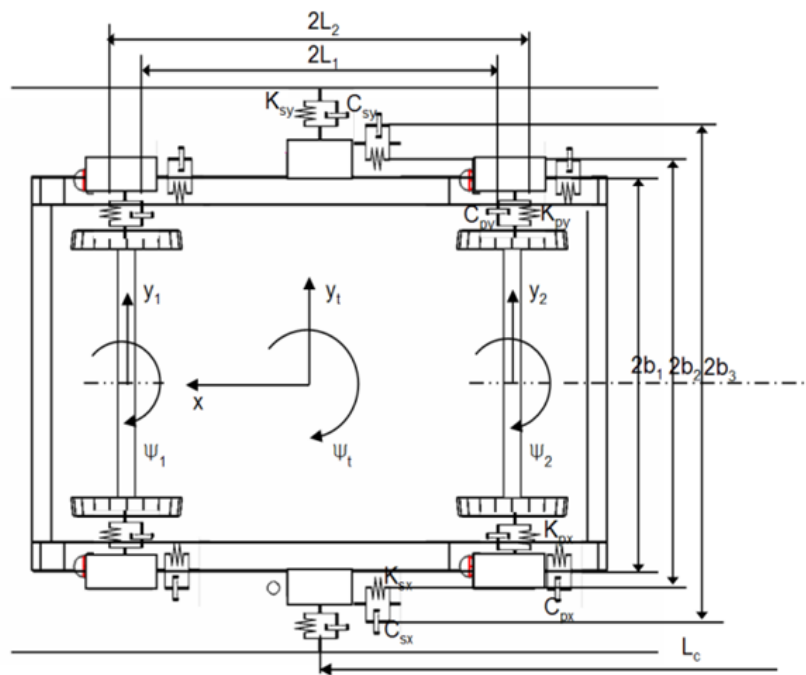


Fig. 1 Bogie model for comparative study

독립구동 윤축은 강제윤축과 횡방향 운동방정식은 동일하며 요방향 운동방정식에 양쪽 휠의 회전 자유도에 의한 모멘트 발생 식만 추가된다. 아래 수식은 독립구동 윤축을 적용한 대차의 선형 운동방정식 이다.

$$\begin{aligned}
m_w \ddot{y}_1 &= \left(-\frac{w\lambda}{a} - 2K_{py}\right)y_1 + \left(\frac{-2f_{11}}{v} - \frac{-2f_{11}r_0}{v} \frac{\lambda}{a} - 2C_{py}\right)\dot{y}_1 \\
&+ 2f_{11}\psi_1 - \frac{2f_{12}}{v}\dot{\psi}_1 + 2K_{py}y_b + 2C_{py}\dot{y}_b + 2K_{py}L_1\psi_b + 2C_{py}L_2\dot{\psi}_b
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
I_{wz} \ddot{\psi}_1 &= -2a \frac{\lambda}{r_0} f_{33} y_1 + \left(\frac{2f_{12}}{v} - I_y \frac{v}{r_0} \frac{\lambda}{a} + 2f_{12} \frac{r_0}{v} \frac{\lambda}{a}\right)\dot{y}_1 + (-2f_{12} + a\lambda w - 2K_{px}b_1^2)\psi_1 \\
&+ (-2a^2 \frac{f_{33}}{v} - \frac{2f_{22}}{v} - 2C_{px}b_1^2)\dot{\psi}_1 + f_{33}a \frac{r_0}{v} \dot{\theta}_{1L} - f_{33}a \frac{r_0}{v} \dot{\theta}_{1R} + 2K_{px}b_1^2\psi_b + 2C_{px}b_1^2\dot{\psi}_b
\end{aligned} \tag{2}$$

$$I_{w1} \ddot{\theta}_{1L} = f_{33}\lambda y_1 + r_0 f_{33} \frac{a}{v} \dot{\psi}_1 - f_{33} \frac{r_0^2}{v} \dot{\theta}_{1L} \tag{3}$$

$$I_{w1} \ddot{\theta}_{1R} = -f_{33}\lambda y_1 - r_0 f_{33} \frac{a}{v} \dot{\psi}_1 - f_{33} \frac{r_0^2}{v} \dot{\theta}_{1R} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
m_w \ddot{y}_2 &= \left(-\frac{w\lambda}{a} - 2K_{py}\right)y_2 + \left(\frac{-2f_{11}}{v} - \frac{-2f_{11}r_0}{v} \frac{\lambda}{a} - 2C_{py}\right)\dot{y}_2 \\
&+ 2f_{11}\psi_2 - \frac{2f_{12}}{v}\dot{\psi}_2 + 2K_{py}y_b + 2C_{py}\dot{y}_b - 2K_{py}L_1\psi_b - 2C_{py}L_2\dot{\psi}_b
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
I_{wz} \ddot{\psi}_2 &= -2a \frac{\lambda}{r_0} f_{33} y_2 + \left(\frac{2f_{12}}{v} - I_y \frac{v}{r_0} \frac{\lambda}{a} + 2f_{12} \frac{r_0}{v} \frac{\lambda}{a}\right)\dot{y}_2 + (-2f_{12} + a\lambda w - 2K_{px}b_1^2)\psi_2 \\
&+ (-2a^2 \frac{f_{33}}{v} - \frac{2f_{22}}{v} - 2C_{px}b_1^2)\dot{\psi}_2 + f_{33}a \frac{r_0}{v} \dot{\theta}_{2L} - f_{33}a \frac{r_0}{v} \dot{\theta}_{2R} + 2K_{px}b_1^2\psi_b + 2C_{px}b_1^2\dot{\psi}_b
\end{aligned} \tag{6}$$

$$I_{w2} \ddot{\theta}_{2L} = f_{33}\lambda y_2 + r_0 f_{33} \frac{a}{v} \dot{\psi}_2 - f_{33} \frac{r_0^2}{v} \dot{\theta}_{2L} \tag{7}$$

$$I_{w2} \ddot{\theta}_{2R} = -f_{33}\lambda y_2 - r_0 f_{33} \frac{a}{v} \dot{\psi}_2 - f_{33} \frac{r_0^2}{v} \dot{\theta}_{2R} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
m_b \ddot{y}_b &= 2K_{py}y_1 + 2C_{py}\dot{y}_1 + 2K_{py}y_2 + 2C_{py}\dot{y}_2 \\
&+ (-4K_{py} - 2K_{sy})y_b + (-4C_{py} - 2C_{sy2})\dot{y}_b
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
I_b \ddot{\psi}_b &= 2K_{py}L_1y_1 + 2C_{py}L_2\dot{y}_1 + 2K_{px}b_1^2\psi_1 + 2C_{px}b_1^2\dot{\psi}_1 - 2K_{py}L_1y_2 - 2C_{py}L_2\dot{y}_2 \\
&+ 2K_{px}b_1^2\psi_2 + 2C_{px}b_1^2\dot{\psi}_2 + (-4K_{py}L_1^2 - 4K_{px}b_1^2 - 2K_{sx}b_2^2)\psi_b \\
&+ (-4C_{py}L_2^2 - 4C_{px}b_1^2 - 2C_{sx}b_3^2)\dot{\psi}_b
\end{aligned} \tag{10}$$

### 3. 능동제어 전략 비교 연구

플렌지 접촉유무와 궤도불규칙도 유무에 따라 트랙1부터 트랙4가를 정의하여 해석을 수행하였다. 해당 트랙조건별로 횡력제어와 요토크제어, 휠토크제어 그리고 요각을 줄이는 요각제어와 휠조향제어를 PID제어기를 적용하여 비교해석을 수행하였다. 아래 그림은 불규칙도와 플렌지 접촉이 없는 트랙1조건과 궤도불규칙도와 플렌지 접촉을 고려한 트랙4조건에서의 해석 결과이다.

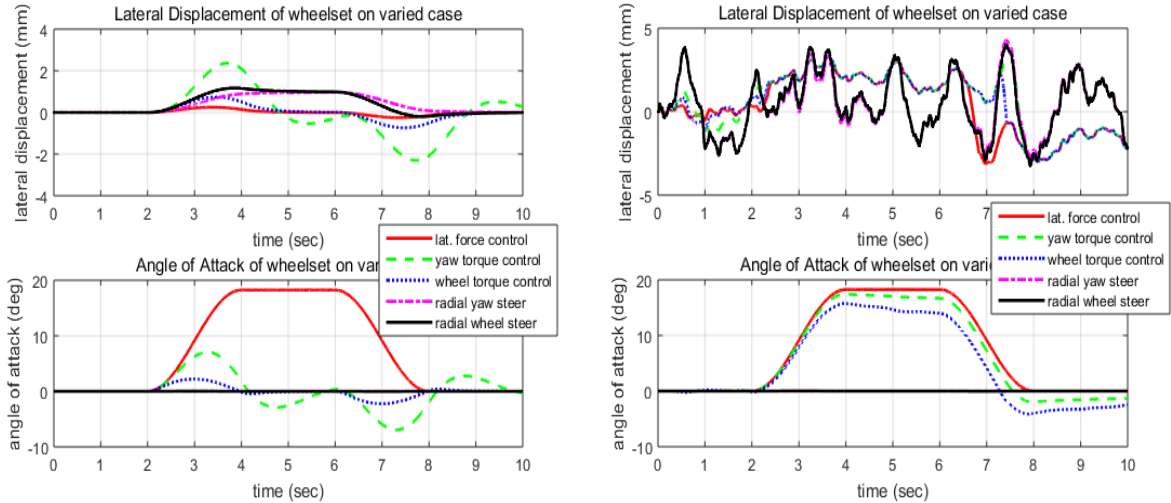


Fig. 2 Control strategy comparative study result graphs with wheelset model (Left: track 1, Right: track 4)

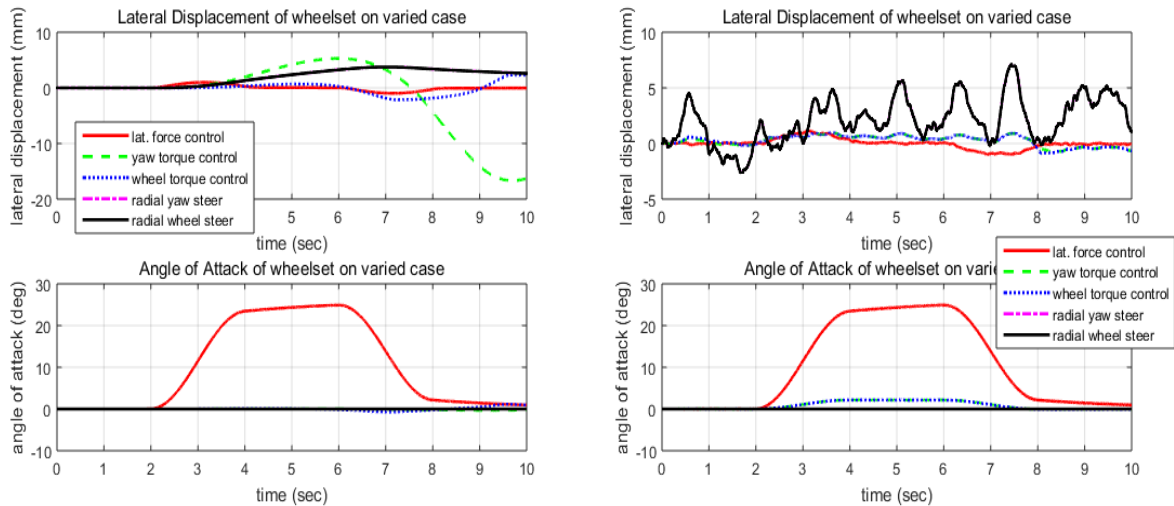


Fig. 3 Control strategy comparative study result graphs with bogie model (Left: track 1, Right: track 4)

휠셋모델 대비 대차모델의 횡변위와 요각이 크게 발생하고 있음을 확인 할 수 있으며, 횡력제어의 경우 횡변위를 효과적으로 줄이지만 상대적으로 큰 요각을 발생시킨다. 조향제어의 경우 요각을 효과적으로 줄이지만 횡변위가 발생한다. 휠토크나 요토크 제어의 경우 횡변위와 요각을 동시에 제어하고 있으며 독립구동 차량의 경우 휠토크제어가 보다 효과적인 제어가 가능함을 확인하였다. 이러한 경향은 궤도불규칙도가 존재하는 트랙4조건에서도 확인된다. 아래그림은 독립구동 대차모델에 대하여 횡력제어와 휠토크제어를 적용한 경우 4가지 제어방식에 따른 제어성능을 트랙2와 트랙4에 대하여 비교한 결과이다. 강인제어기가 외란에 대하여 우수한 제어성능을 확보할 수 있음을 확인 할 수 있다.

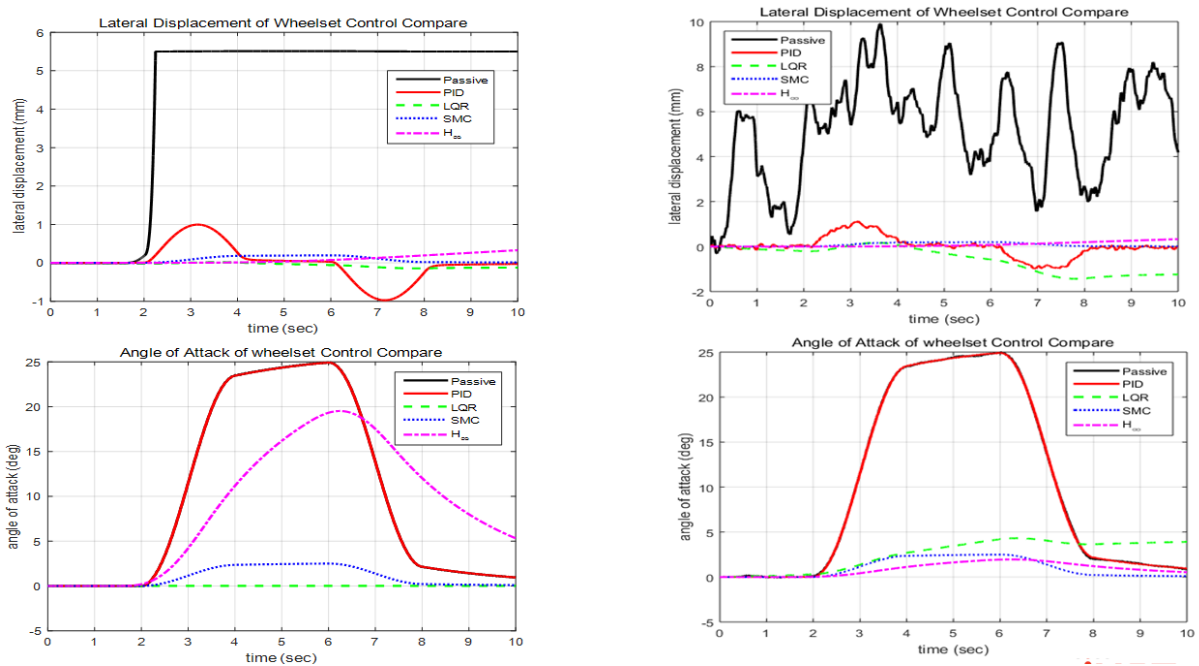
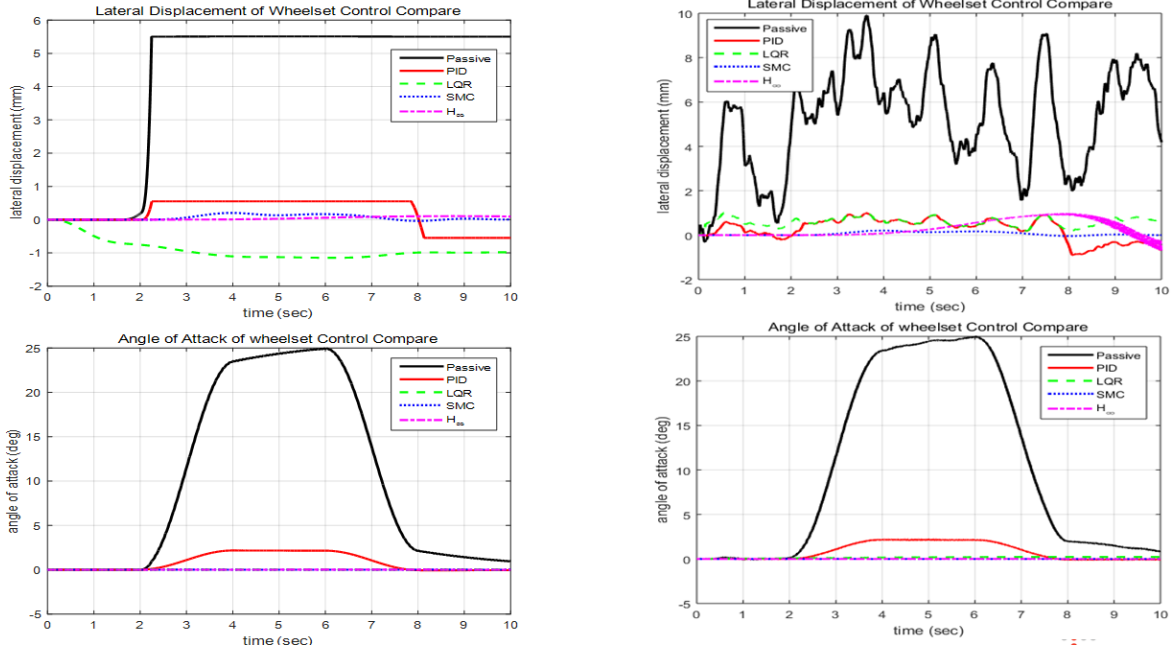


Fig. 4 Lateral force control comparative study results with bogie model (Left: track 2, Right: track 4)



**Fig. 5** Wheel torque control comparative study results with bogie model (Left: track 2, Right: track 4)

제어전략 비교연구를 통해 독립구동 방식 철도차량의 횡변위 제어를 위해서는 좌우 휠에 적용되는 토크를 개별 제어하는 휠토크 제어방식이 가장 유용함을 확인하였다. 휠토크제어의 유용성을 입증하기 위해 1/5스케일의 축소형 독립구동 대차를 제작하여 각 휠에 구동 모터를 적용하여 모터구동에 의한 주행대 시험이 가능하도록 구성하고 레이저센서로 측정한 횡변위를 제어기에 입력한 후 횡변위를 줄이기 위한 좌우 모터의 개별토크제어를 수행하였다. 개별 휠토크제어를 통해 외란에 대하여 빠른 횡변위 복원력과 5도로 기울어진 시험대에서도 치우침이 없이 중심으로 복원되는 힘이 발생함으로써 횡변위 제어가 효과적으로 이루어지고 있음을 확인하였다.



**Fig. 6** 1/5 small scale roller rig to evaluate individual wheel torque control strategy

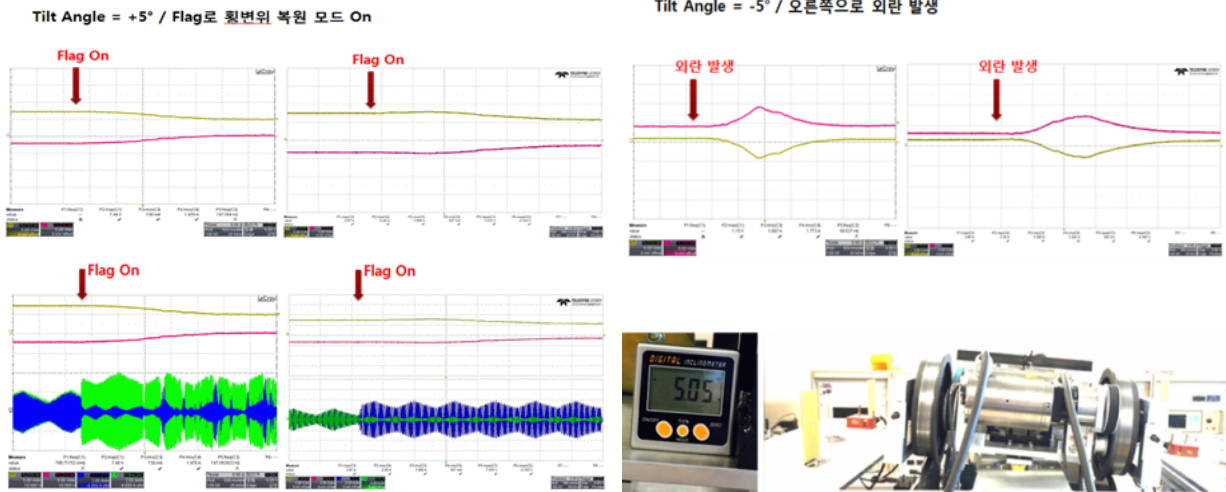
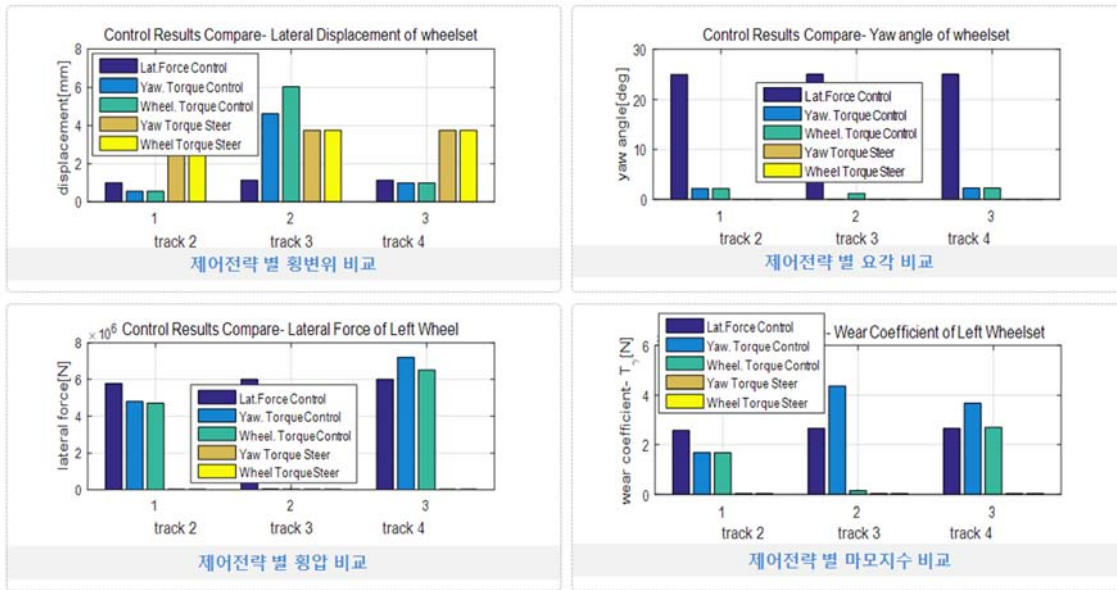


Fig. 7 Wheel torque control test results about lateral disturbance reduction and slope track running condition

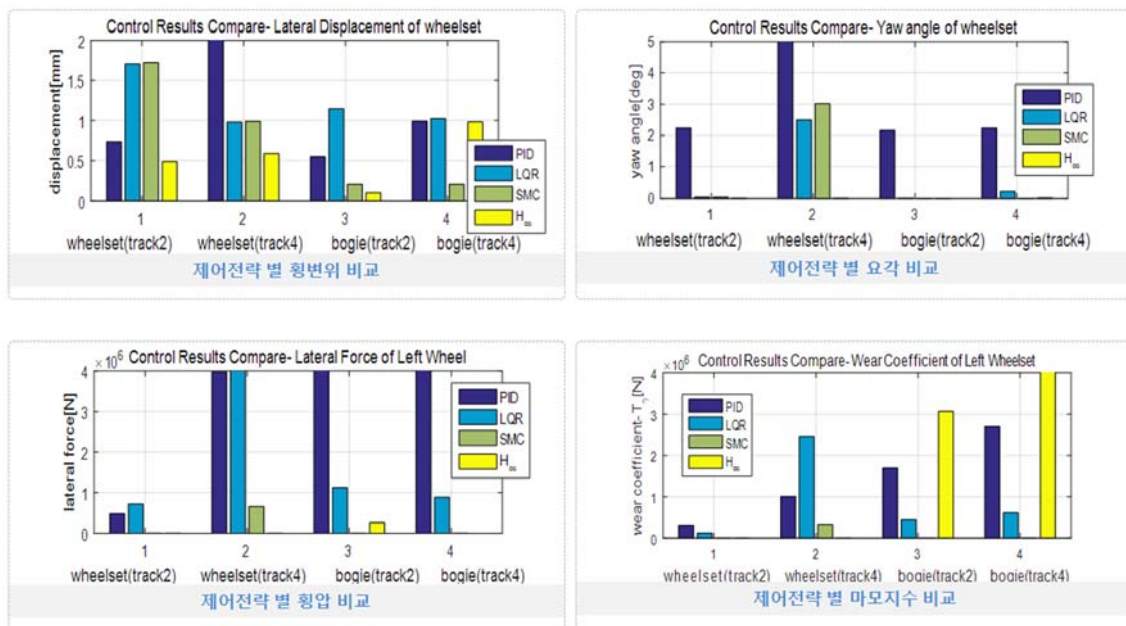
#### 4. 결론

횡압과 마모 관점에서는 조향제어가 우수하지만 횡변위가 발생하므로 급곡선 주행성능 개선을 위해서는 요토크나 휠토크제어가 우수한 제어성능을 나타낸다. 휠셋모델과 대차모델에 대하여 각각 비교해석을 수행하였으며, 대차모델의 제어성능이 우수함을 확인하였다. 휠셋 모델 대비 대차질량의 영향으로 횡변위와 요각이 크게 발생하지만 제어를 통해 안정적인 거동이 가능함을 확인하였다. 횡력제어와 요토크제어의 비교를 통해 요토크제어 및 휠토크제어의 경우 횡변위 발생을 억제하며 동시에 요각을 함께 제어하므로 제어성능이 우수함을 확인하였다. 궤도불규칙도와 같은 외란이 존재할 경우 강인제어기의 적용을 통해 보다 우수한 제어성능이 확보됨을 확인하였다. 아래 그림은 제어전략과 제어방법에 따른 횡변위, 요각, 횡압, 마모지수의 최대값을 막대그래프로 나타내어 비교한 결과이다. 독립구동 철도차량의 경우 다양한 트랙조건에서 횡력제어나 조향제어 대비 휠토크제어가 우수한 성능을 발휘하고 있음을 확인하였다. 제어방법으로는 강인제어기의 성능이 우수함을 확인 할 수 있다.

**Fig. 8** Bar graphs of control strategy comparative study (lateral displacement, yaw angle, lateral force, wear index)



**Fig. 9** Bar graphs of control method comparative study (lateral displacement, yaw angle, lateral force, wear index)





## 후 기

본 연구는 국토교통부 저심도 도시철도시스템 기술 개발 과제의 지원으로 수행되었습니다

## 참고문헌

- [1] S. Choi (2007), "Corrected equations of motion for a wheel-axle set negotiating an arbitrarily changing radius curve", Proceedings of the 2007 Korean Society for Railway, pp. 935-947.
- [2] S. Choi (2007), "Corrections to the conventional equations of motion of a wheel-axle set on a tangent track", Proceedings of the 2007 Korean Society for Railway, pp.922-934.
- [3] Y.Cho and J.Kwack (2012), "Development of a New Analytical Model for a Railway Vehicle Equipped with Independently Rotating Wheels", IJAT, Vol.13, No.7, pp. 1047-1056.
- [4] R. V. Dukkipati and S. Narayana Swamy (1992), "Independently Rotating Wheel Systems for Railway Vehicles-A State of the Art Review", Vehicle System Dynamics 21, pp. 297-330.
- [5] R. M. Goodall and Hong Li (2000), "Solid Axle and Independently Rotating Wheelsets - A Control Engineering Assessment of Stability", Vehicle System Dynamics 33, pp. 57-67.
- [6] M. Gretschel and L. Bose (2002), "A New Concept for Integrated Guidance and Drive of Railway Running Gears", Control Engineering Practice 10, pp. 1013-1021.
- [7] T. X. Mei, Z. Nagy, R. M. Goodall and A. H. Wickens (2002), "Mechatronic Solutions for high speed railway vehicles", Control Engineering Practice 10, pp. 1023-1028
- [8] T. X. Mei and R. M. Goodall (2003), "Practical Strategies for Controlling Railway Wheelset Independently Rotating Wheels", ASME 125, 354-360..
- [9] T. X. Mei and R. M. Goodall (2001), "Robust Control for IRW on a Railway Vehicle Using Practical Sensors", IEEE Transactions on Control System Technology 9, 4, pp. 599-607.
- [10] A. Saitoh and K. Tanifuji (2002), "Comparison of Curving Characteristics of Rail Vehicle with Independently Rotating Wheels between Steering Methods", JSME 11th Proceedings of transportation conference 02-50, pp. 139-142.
- [11] R. Obata, K. Tanifuji, H. Soma and T. Masuda (2006), "Curving Performance of a Rail Vehicle with Independently Rotating Wheels by Torque Difference Control", JSME. C, 72, 716, pp. 50-56.
- [12] Bemhard KURZECK and Luciano VALENTE (2011), "A novel mechatronic running gear: concept, simulation and scaled roller rig testing", 9<sup>th</sup> WCRR Proceedings.
- [13] B. Liang and S. D. Iwnicki (2007), "An Experimental Study of Independently Rotating Wheels for Railway Vehicles", IEEE Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 2282-2286.
- [14] T. X. Mei and H. Li (2008), "Control Design for the Active Stabilization of Rail Wheelsets", Journal of Dynamic Systems Measurement and Control 130, 0110021-9.