ITC와 HSC가 적용된 급곡선 주행시스템 성능검증을 위한 동역학 해석

Dynamic analysis to evaluate performance of sharp curve running system with ITC and HSC

조연호*†, 오형식*, 강광호*, 엄경수**

Yonho Cho*†, Hyeongsik Oh*, Gwangho Kang*, Kyongsu Eom* *

Abstract The sharp curve running system which develop for NST(Near Surface Transit) to reduce the lateral force more than 30% during run on the 15mR sharp curve section adopt the ITC(Individual Torque Control) and HSC(Hydraulic Steering-cylinder Control) technology. This paper describe the dynamic analysis results by Simpack software to evaluate the performance of sharp curve running bogie with ITC ad HSC and comparative study results with lateral displacement control and yaw angle control by internal PID control function of Simpack. The running test with real train is prepared. The accuracy of dynamic analysis results is to verify by compare with the running test results.

Keywords **:** NST(Near Surface Transit), ITC(Individual Torque Control), HSC(Hydraulic Steering Control), Sharp curve running bogie, Simpack dynamic analyis

초 록 저심도 도시철도시스템을 위해 개발중인 급곡선 주행시스템은 15mR급곡선 구간 주행 시 횡압을 30%이상 저감하기 위한 개별모터토크제어(ITC: Individual Torque Control) 기술과 유압식 조향실린더 제어(HSC: Hydraulic Steering-cylinder Control) 기술을 적용하고 있다. 본 논문은 ITC와 HSC가 적용된 급곡선 주행시스템의 성능검증을 위해 Simpack을 이용한 동역학 해석을 수행하였으며, Simpack에 내장된 PID제어 함수를 이용하여 횡변위와 요 각 제어 수행한 결과를 비교하여 분석하였다. 실제 시험차량을 통한 성능시험을 준비 중에 있으며 시험결과와의 비교를 통해 동역학 해석모델의 정확성을 검증할 예정이다.

주요어 : 저심도 도시철도, 개별 모터제어, 급곡선 주행대차, 유압식 조향대차, Simpack 동역학 해석

1. 서 론

저심도 도시철도 시스템은 도로를 따라 5m이내의 얕은 깊이로 철도를 부설하기 때문에 도로의 선형을 따라 철도 선형이 결정된다. 따라서 2차선 도로로 부설된 교차로를 주행할 경우 최소곡선 15mR의 급곡선을 빈번하게 운행하게 된다. 급곡선 주행 시 소음 및 마모가 크게 발생하고 큰 횡압에 의해 탈선이 발생할 수 있으므로 이를 감소시키기 위한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 급곡선 주행 시스템의 단점을 극복하기 위해 구동대차와 부수대차에 적용된 ITC와 HSC기술에 대한 해석 결과를 기술하고자 한다.

† 교신저자: 현대로템주식회사 주행장치개발팀(ycho@hyundai-rotem.co.kr)
* 현대로템주식회사 주행장치개발팀, ** 현대로템주식회사 철차연구3팀

ITC(Individual Torque Control)기술은 독립구동 차륜을 적용한 구동대차의 주행 성능개선을 위해 고안된 기술로써 고속 직진 주행 시 횡 복원력 발생을 통한 주행안정성 증대에 관한 연구는 해외 기관에서 연구 중에 있으나 급곡선 주행 시 횡압을 낮추기 위한 연구는 선행 연구 사례가 없다. 좌우 개별모터의 토크제어를 통한 접촉점에서의 횡력 발생 메커니즘은 동일 하지만 횡 변위와 요각을 조합한 횡력과 조향 제어의 조합에 대한 연구를 수행 중이다. HSC(Hydraulic Steering cylinder Control)기술은 유압식 조향 실린더를 이용한 조향대차 개념으로 개발 중인 기술이다. 개념적으로는 개별모터에 의한 좌우 토크 차를 이용한 횡력발생 과 동일하게 유압실린더를 좌우 가변적으로 적용하면 수행이 가능하지만 고주파 제어를 수반한 어려움이 존재하므로 실제 적용에는 조향관점에서 기술을 적용하였다.

2. ITC와 HSC적용 차량

시험차량은 급곡선 주행시스템 개발 기술의 검증을 위해 제작중인 3량 2대차 구성의 시험 플랫폼을 활용한다. 아래 그림은 제작 중인 시험차량의 구성도로써 선두차체에는 구동대차가 적용되고 후미차체에는 부수대차가 적용된다. 구동대차의 성능개선을 위해 ITC기술이 적용되고 부수대차에는 HSC기술이 적용될 예정이다.

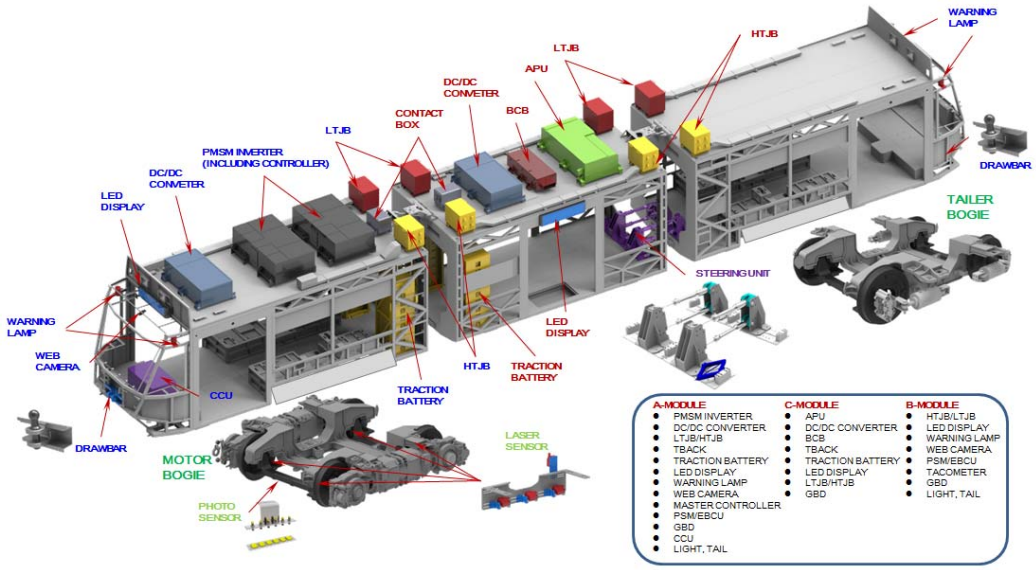

Fig. 1 Test vehicle configurations and arrangement scheme

개발 기술의 실차 적용성을 높이기 위해 ITC와 HSC성능을 극대화 시키기 위한 신규 대차 설계 및 제작을 수행하지 않고 기존에 운행되고 있는 대차에 신규 개발기술을 적용시키기 위한 연구로 방향을 결정하였다. 본 연구에 사용된 대차는 현재 해외에 수출하여 운행 중인 실제 트램 대차에 ITC와 HSC를 적용하기 위한 일부 개조를 수행한 상태로 적용된다.

Items	M bogie	T bogie
Track gauge	1,435 mm	
Maximum design speed	80 km/h	
Min. horizontal curve radius	15 m	
Wheel set type	Portal axle with IRWs	
Wheel base	1,800 mm	
Wheel Diameter (new/worn)	640 / 560 mm	
Primary Susp. distance	1,190 mm	
Secondary Susp. distance	1,244 mm	

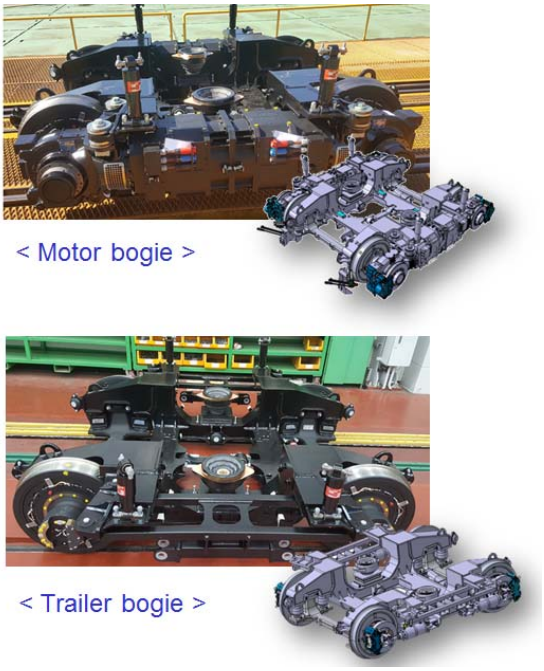

Fig. 2 Specifications of Bogies for ITC and HSC technique

3. 성능검증 위한 동역학 해석

ITC와 HSC적용 성능개선효과를 검증하기 위해 Simpack 프로그램을 이용한 동역학 해석을 수행하였다.

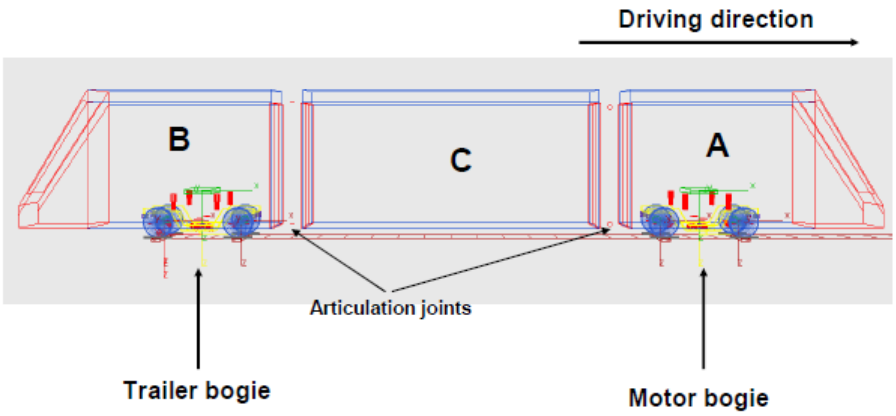

Fig. 3 Dynamic analysis model with ITC & HSC by Simpack software

HSC의 경우 수동 유압 조향 시스템의 단점을 개선하기 위해 능동식 유압 조향 시스템을 추가하였지만 수동식 유압 조향 성능 확보를 위해 반드시 차체 관절 실린더가 선행 되어야 하므로 차량의 시험 주행은 한 방향으로만 수행하도록 설정하였다. 시험 조건은 AW0(공차조건), AW2(좌석승객+1평방미터당 4인 입석), AW4(좌석승객+1평방미터당 8인 입석)을 기준으로 수행하고 최소곡선 15mR에서 횡 가속도 한계치에 마진을 고려한 15km/h로 설정하였다.

곡선 주행 시 비보상 횡 가속도는 EN14363에서 정의하고 있는 1.1m/s^{2}을 기준으로 아래 표와 같이 곡선 반경 별로 제한된다. 표준궤간인 1,435mm를 기준으로 아래와 같은 관계식을 사용하여 Table. 1의 곡선반경에 대하여 캔트영향을 고려한 제한속도를 확인할 수 있다. 트램의 경우 캔트가 없는 경우가 대부분이므로 실제 주행속도는 이보다 낮게 설정된다.

$$a_q = \frac{v^2}{R} - \frac{u}{1500} \cdot g \Rightarrow v = \sqrt{\left(a_q + \frac{u}{1500} \cdot g \right) \cdot R} \qquad (1)$$

Table.1 Correlation between radius, velocity and cant (a_q=1.1 m/s^2)

Radius [m]	Velocity [km/h]	Cant [mm]	Cant deficiency [mm]
15	20	150	165
25	25,85	150	165
50	36,55	150	165
100	51,7	150	165
120	56,6	150	165
150	63,3	150	165
250	80,0	137	165
350	80,0	51	165
500	80,0	0	165
600	80,0	0	165
800	80,0	0	165
1000	80,0	0	165

해석수행을 위해 아래그림과 같이 최소곡선 15mR에 대한 선형 설계를 수행하고 ERRI-Low 궤도불규칙도를 적용한 시험 트랙을 적용하였다.

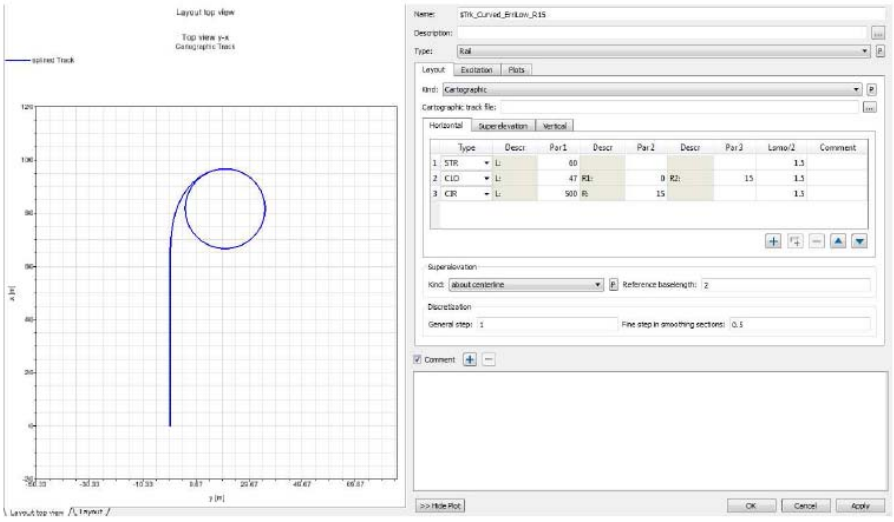

Fig. 4 Track layout curve R=15m with 47m transient curve and 60m straight track at the beginning

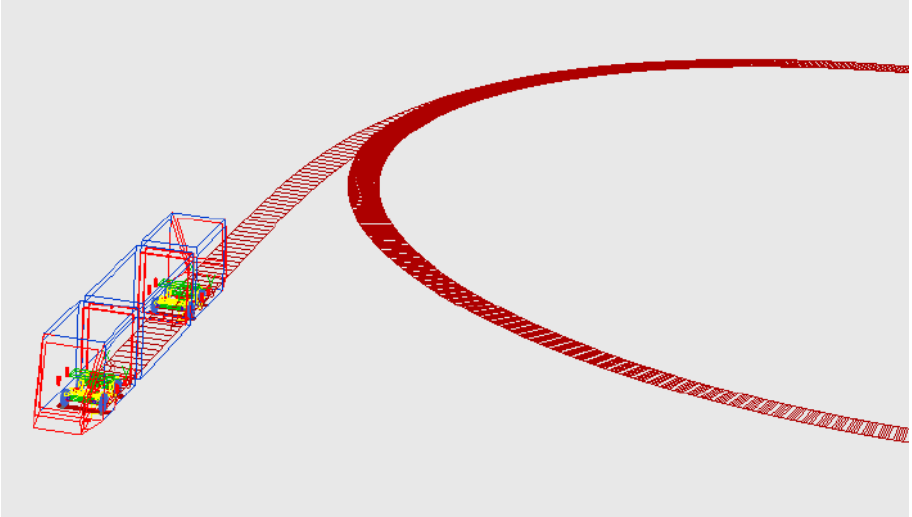

Fig. 5 Dynamic analysis on curved track with 15mR

4. 해석 결과

ITC와 HSC적용 성능개선효과를 확인하기 위해 ITC만 적용한 해석과 HSC만 적용한 해석을 각각 수행하였다. 본 논문에서는 P제어기만을 적용한 해석을 수행하였고 게인튜닝은 시행착오를 통한 최적 값을 찾는 방법을 사용하였다. 또한 조향 제어 및 횡 제어에 1차현가장치의 종 방향과 횡 방향 강성이 크게 영향을 미치므로 강성 값 변화에 따른 결과를 확인하였다. 해석결과는 주행안정성 확인을 위한 탈선계수와 곡선 추종성 및 마모성능 확인을 위해 횡압과 마모지수 위주로 비교평가를 실시하였다. 15mR을 각종 제어가 수반되지 않고 주행 할 경우 8,000N 이상의 마모지수가 계산되고 탈선계수도 0.56이상 발생한다. 해석결과 1차현가장치의 강성변화에 따라 큰 차이를 나타내었으며 1차현가 강성이 약할 경우 제어 효과가 크게 발생함을 확인하였다.

Table. 2는 ITC만 적용한 구동대차의 해설결과를 정리한 표이다. 비 제어 시 7,700N의 마모지수는 제어 시 최대 6,000까지 감소되어 22% 개선효과를 확인 하였다. 탈선계수의 경우 비 제어 시 0.56에서 제어 시 0.4로 감소되어 29% 감소효과를 확인하였다.

Table.2 Summary of y, yaw p-controller gain factors for different primary stiffness for Tγ and Y/Q (ITC)

		Combination of				
Parameter	Primary Stiffness Cxy [kN/mm]	Δy gain factor	Yaw ψ gain factor	Parameter value	Parameter value at origin Cxy	Parameter value without control
Tγ [N]	0,05	70.000	70.000	6.900	> 100.000	7.700
	0,10	70.000	70.000	6.000	> 100.000	
	0.5	20.000	50.000	6.700	8.300	
	1,50	200.000	20.000	6.900	6.800	
	3,00 / origin	200.000	20.000	6.800	-	
Y/Q [-]	0,05	100.000	70.000	0,45	0,57	0,56
	0,10	100.000	70.000	0,42	0,57	
	0.5	100.000	70.000	0,40	0,57	
	1,50	70.000	50.000	0,40	0,40	
	3,00 / origin	70.000	50.000	0,40	-	

Table. 3은 HSC만 적용된 부수대차에 다한 해석결과를 정리한 표이다. 비 제어 시4,500N의 마모지수는 제어 시 최대 210까지 감소되어 95% 개선효과를 확인 하였다. 탈선계수의 경우 비 제어 시 0.77

에서 제어 시 0.42로 감소되어 45% 감소효과를 확인하였다.

Table.3 Summary of y, yaw p-controller gain factors for different primary stiffness for Tγ and Y/Q (HSC)

		Combination of				
Parameter	Primary Stiffness Cxy [kN/mm]	Δy gain factor	Yaw ψ gain factor	Parameter value	Parameter value at origin Cxy	Parameter value without control
Tγ [N]	0,05	-	-	-	-	4.500
	0,10	all variations, except 5.000.000 and 10.000.000	1.000.000	660-680	3.800-3.900	
	0.5	all variations, except 5.000.000 and 10.000.000	10.000.000	210	1.120-1.140	
	1,50	all variations, except 5.000.000 and 10.000.000	10.000.000	360-380	1.120-1.140	
	3,00 / origin	all variations, except 5.000.000 and 10.000.000	10.000.000	1.120-1.140	-	
Y/Q [-]	0,05	-	-	-	-	0,77
	0,10	all variations, except 5.000.000 and 10.000.000	10.000.000	0,44	0,80	
	0.5	all variations, except 5.000.000 and 10.000.000	10.000.000	0,42	0,80	
	1,50	all variations, except 5.000.000 and 10.000.000	10.000.000	0,43	0,80	
	3,00 / origin	all variations, except 5.000.000 and 10.000.000	all variations	0,75-0,80	-	

구동대차에 적용된 ITC기술과 부수대차에 적용된 HSC 기술에 의해 마모지수와 탈선계수가 30%이상 감소 가능함을 확인 할 수 있었다. 곡선 주행 시 제어특성을 비교한 결과 마모지수의 경우 횡 변위 제어대비 요각 제어 시 감소 효과가 크게 발생하였고 탈선계수의 경우 ITC적용 시 요각에 대한 효과에 의한 변화가 크게 발생하였다. 반면 횡 변위 제어의 경우 곡선 주행 시 제어효과가 크게 나타나지 않음을 확인하였다.

휠셋의 횡방향 복원력 보상을 위한 횡 변위 제어의 경우 마모지수와 탈선계수 모두 제어를 통한 개선효과가 큼을 확인하였다. 본 연구에서는 휠/레일 접촉 시 마찰계수를 0.4로 고정하여 실시하였으나 ITC의 경우 휠/레일 접촉특성을 이용한 횡력 발생 메커니즘을 사용하므로 휠/레일 마찰특성에 대한 실제적인 고려를 위해 마찰계수를 달리해 가며 제어특성을 확인해 볼 필요가 있으며 실차 주행 시험에서도 마찰특성을 변화해 가며 주행특성 개선 효과를 확인해 볼 예정이다.

본 연구를 통해 개발된 ITC와 HSC기술은 시험차량을 통한 주행성능 개선효과 검증과 실차 적용 시험을 지속적으로 수행한 후 기존 대차에 적용하여 주행성능 개선에 기여할 것으로 기대된다.