

운영 중인 고속열차의 진동저감에 관한 연구

전창성*, 최성훈
한국철도기술연구원 고속열차연구팀

A study on the Vibration Reduction of the Commercial High-speed Train

Chang-Sung Jeon*, Sunghoon Choi

High-speed Railroad Systems Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구는 영업운행 중인 고속열차의 진동 문제를 고찰하고, 이를 개선하기 위하여 진행되었다. 먼저 고속열차의 진동 수준을 알기 위하여 차체 진동가속도에 대한 측정이 수행되었다. 측정결과 운전실이 객차보다 진동이 크며, 열차 후미로 갈수록 진동이 더 커졌다. 운전실 및 객차 모두 수직방향 진동이 횡방향 진동에 비해서 크며, 콘크리트 구간에 비해 자갈궤도에서 진동의 최대값이 크다. KTX-산천 진동 경향과 개선점을 도출하기 위하여 동역학 해석을 수행하였다. 해석결과는 시험결과와 유사하였으며, 객차 양 끝단의 단부객차 상부와 동력차량의 진동을 저감시킬 필요가 있었다. 객차의 진동을 저감하기 위하여 KTX-호남(200호대) 차량은 4가지 개선 설계를 수행하였고, 이 중 KTX-산천에 적용할 수 있는 방법을 해석에 적용하였을 때, 정상구간에서는 2.2%, 분기구간에서는 11% 정도 진동이 감소할 것으로 예상되었다. 동력차량의 진동 저감을 위해 2차 코일스프링의 강성을 감소시키고, 2차 수직댐퍼의 댐핑계수를 증가시키는 방안을 제안하였다. 현가장치의 불량, 오조립 등 성능저하가 차체 및 대차의 진동을 증가시키는 것을 시운전 결과와 해석결과를 통하여 살펴보았으며, 현가장치 올바른 유지보수가 차량 진동을 저감시킴을 알 수 있었다. 차륜 마모에 대한 적절한 관리는 운행 효율 및 차체 진동저감에 중요한 역할을 하며, 현재 차륜 프로파일을 변경하여 차륜 삭정간의 주행거리를 늘리려는 연구가 진행 중이다.

Abstract This study was carried out to investigate and alleviate the vibration problem of commercial high-speed trains. First, the measurement of the carbody vibration was performed, in order to determine the vibration level of the high-speed train. The measurement result showed that the vibration level of the driver cab was higher than that of the passenger car and that the vibration became bigger toward the trailing end of the train. The vertical vibration of the driver cab and passenger car was larger than the transverse vibration, and the maximum value of the vibration in the ballast section was larger than that in the concrete section. A dynamic analysis was carried out to improve the vibration of the KTX-Sancheon train. The results of the analysis showed that it is necessary to reduce the vibration of the driver cab and both ends of the passenger cars. To reduce the vibration of the driver cab, it was recommended that the stiffness of the secondary coil spring be reduced and the damping coefficient of the secondary vertical damper be increased. It was found that the failure of the suspension system could be the origin of the vibration problem of the high-speed train. The proper management of wheel wear plays an important role in the improvement of the operation efficiency and reduction of the carbody vibration of high-speed trains, and research is underway to change the present wheel profile to increase the mileage between wheel turning.

Keywords : Commercial high-speed train, Dynamic analysis, KTX-honam, KTX-sancheon, Vibration reduction

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원(17RTRP-C127546-01)으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Chang-Sung Jeon(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5508 email: csjeon@krii.re.kr

Received September 26, 2017

Revised October 24, 2017

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

1. 서론

국내의 고속철도는 KTX가 서울~부산 구간에 2004년 개통되어 올해로 13년이 되었다. 지난 13년동안 고속철도에 힘입어 국내에 많은 변화가 있었으며, 철도 교통은 전국을 반나절 생활권으로 만들어 국민 생활의 편의에 기여하고 있다. 국내에서 첫 번째로 2004년 4월 운영을 시작한 경부고속철도 구간은 서울~부산간 417.4km를 최고속도 300km/h로 영업 운전하고 있다. 이후 2015년 4월 오송에서 광주송정까지 182.3km의 호남고속철도 1단계 구간이 개통되었다. 또한 2016년 9월 수서고속철도 수서~평택간 61.1km가 개통되어 서울남부권의 주요 장거리 이동을 담당하고 있다. 또한 준고속철도로 경강선(원주~강릉) 120.7km 구간이 건설되어 최고속도 250km/h로 2017년 말 개통 목표로 시운전이 진행되고 있다.

국내 고속철도의 지속적 확장으로 고속철도 차량에 대한 수요도 늘어났다. 초기 국내의 고속철도는 프랑스에서 KTX 차량(20량1편성) 일부를 수입하였고, 일부는 국내에서 제작하는 방식으로 46편성 920량을 경부고속철도 구간에 도입하였다. 이 차량을 토대로 한국형 고속열차 시제차량(HSR-350X)을 국내에서 개발하였다. 이 개발 결과를 바탕으로 10량 1편성인 KTX-산천 차량이 양산되었으며, 총 71편성 710량이 경부고속철도, 호남고속철도, 수서고속철도, 경강선용 고속철도 구간에서 운영되고 있다. KTX-산천은 2편성(10량+10량) 중련 운전이 가능해 승객수요에 따른 탄력적 운행이 가능한 장점이 있다.

KTX 도입 당시 철도차량의 횡방향 진동이 발생하여 이에 대한 다양한 연구들이 수행되었다. Kim[1], Lee[2] 등은 KTX 차량의 후미 진동을 해석 및 실험적 방법으로 연구하였으며, 후미 횡진동은 차륜담면 구배의 영향을 많이 받는 것을 확인하였다. 차륜담면 구배를 GV40(1/40)에서 XP55(1/20)로 바꾸었을 때 횡방향 진동이 사라지는 것을 보고하였다. Lee[3], Chang[4] 등은 동역학 소프트웨어인 ADAMS/RAIL을 이용하여 KTX 차량의 사행동 특성에 대해 연구하였으며 후미진동의 원인은 차륜담면 형상과 2차 횡강성에 의한 것임을 확인하였다. Kang[5]은 편성 차량 수에 따른 후미 불안정 진동의 측정결과가 고유 모드 해석 시에 나타난 차체의 불안정 모드의 진동수와 거의 일치하는 것을 확인하였다. Jeon[6] 등은 KTX-산천 차량의 임계속도는 차륜 마모에 따라 감소하며, 이를 향상시키기 위하여 최적화 방법론을 적용

하는 연구를 수행하였다. 그 외에도 KTX의 차륜 담면구배와 레일 특성에 따른 주행거동에 관한 다양한 연구들이 수행되었다[7-9].

KTX-산천은 도입 이후 KTX에 비해 객차의 진동이 많이 발생한다는 민원이 있었다. 이를 해결하기 위한 방안을 도출하기 위하여 본 연구가 시작되었다. 먼저 영업 운행 중인 고속철도 차량의 진동 수준을 파악하기 위하여, KTX 및 KTX-산천 객차 및 운전실에 대한 진동 측정이 실시되었다. 이를 토대로 진동 문제를 수치 해석적으로 고찰하기 위하여 철도차량 동역학 소프트웨어인 VAMPIRE[10]를 이용하여 모사하였다. 수치해석 모델은 시험결과와 비교를 통하여 검증하였다. 이 모델을 이용하여 KTX-산천의 진동 문제를 해결할 수 있는 다양한 방안을 수치 해석적 방법으로 고찰하였으며, 몇 가지 진동 문제를 해결할 수 있는 방안을 제시하였다. 또한 고속열차 운영 중 발생할 수 있는 현가장치의 불량, 오조립 등이 고속철도 차량의 진동에 미치는 영향을 시운전 결과와 수치해석을 통하여 살펴보았다.

2. 본론

2.1 고속열차 진동측정

국내에서 운행중인 고속열차는 KTX(20량 1편성)와 KTX-산천(10량 1편성) 시리즈 등 열차 양쪽에 동력차가 별도로 있는 동력 집중식 고속열차이다. 각 차량에 동력이 분산되어 있는 동력 분산형 고속열차는 시제열차(HEMU-430X)를 거쳐 상용 모델(EMU-250, EMU-320)의 제작이 진행되고 있으며, 2020년 경 도입될 예정이다. Fig. 1은 KTX-산천 세 번째 모델로 SR에서 운행 중인 SRT차량이다. KTX-산천은 10량 1편성의 차량으로 PCI(운전실이 있는 동력차) + 8T(객차, T1~T8) + PC2로 구성되어 있다. 대차는 PC(동력차)용 동력대차(Power Bogie) 4대, 객차 양끝의 단부대차(End Tailer Bogie) 2대, 객차사이의 연결대차(Articulated Bogie) 7대 등 13대로 구성되어 있다. KTX는 20량 1편성으로 동력을 보강하기 위해 양끝 쪽 객차의 반에 동력이 있으며, 총 3량의 동력차가 있다고 볼 수 있다.

고속열차 KTX와 KTX-산천 진동측정 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 측정에 사용된 장비는 선행연구[6]에서 사용한 장비와 동일하며, KTX와 KTX-산천에



Fig. 1. SRT high-speed train

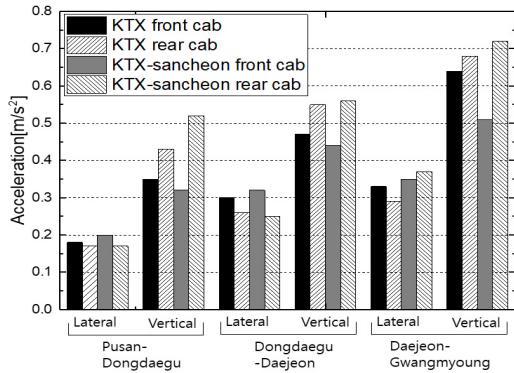


Fig. 2. Vibration measurement results of driver cab

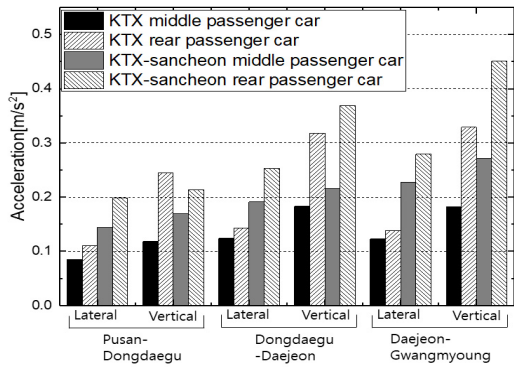


Fig. 3. Vibration measurement results of passenger car

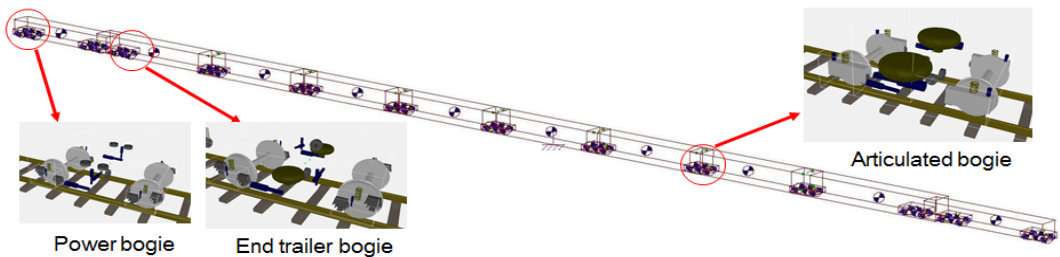


Fig. 4. Analysis model of KTX-sancheon

대해 전후위 운전실, 중간객차 및 후미객차의 진동을 측정하였다. 측정구간은 경부고속철도 부산~광명구간이며 부산~동대구 구간은 콘크리트 도상, 동대구~대전~광명 구간은 자갈도상이다. 측정 신호는 0.4~10Hz의 주파수 필터를 적용한 후 1초 단위로 RMS(Root Mean Square) 값을 도출하고, 구간별 최대값을 표시하였다.

측정결과 운전실이 객차보다 진동이 크며, 열차 후미로 갈수록 진동이 더 커진다. 운전실 및 객차 모두 수직 방향 진동이 횡방향 진동에 비해서 크며, 콘크리트 구간에 비해 자갈궤도에서 진동의 최대값이 크다. 또한 KTX에 비해 KTX-산천 객차의 진동이 좀 더 크다.

2.2 KTX-산천 동역학 해석

앞절의 측정결과를 통하여 KTX 및 KTX-산천 운전실과 KTX-산천 객차의 진동을 저감할 필요가 있었고, 이를 위해 동역학 해석을 수행하였다. 동역학 해석에 사용된 모델은 선행연구[6]에서 사용된 모델과 동일하며 Fig. 4에 나타내었다. 해석에 사용된 휠 프로파일은 현재 고속열차에서 사용하는 XP55(1/20)이며, 일반적인 주행 거동을 보기 위하여 삭제 후 175,562km 주행한 마모된 차륜에서 추출하였다. 선로 프로파일은 경부고속선 상행 KP 38.4km 지점에서 측정한 마모된 UIC60-20 프로파일을 사용하였다. 해석에 사용된 선로 불규칙도는 정상적인 구간에 대해서는 Fig. 5와 같이 일반적인 고속선 선로불규칙도로 VAMPIRE[10] 소프트웨어에서 제공하는 ERRI_low 15km 구간을, 진동을 크게 일으키는 분기기 구간에 대해서는 Fig. 6과 같이 경부고속선 대전~광명 방향 KP 95~92 천안역 부근 3km 직선구간을 사용하였다. 차체 횡방향 및 상하방향 가속도, 대차 프레임의 횡방향 가속도를 해석을 통해 구하였고, 해석구간의 RMS값을 이용하여 평가를 수행하였다.

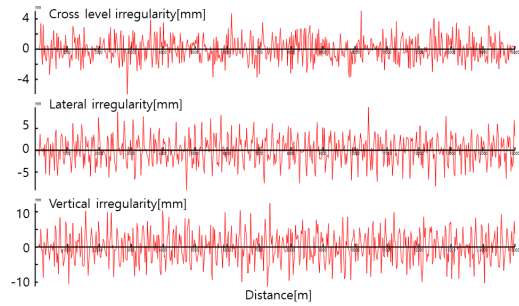


Fig. 5. Normal track irregularity(ERRI_low)

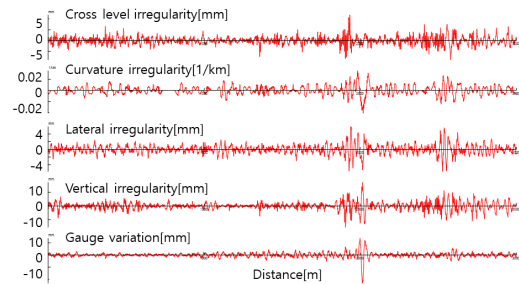


Fig. 6. Track irregularity for crossing

KTX-산천 초기 100호대 모델에 대해 상기의 정상구간(Normal)과 분기기구간(Crossing)을 300km/h의 속도로 주행하였을 때의 차체 좌우 및 상하방향 가속도 RMS 값을 Table 1에 나타내었다. 정상구간보다 분기기구간에서 가속도 값이 크며, 좌우방향보다는 상하방향의 차체 가속도 값이 크다. 정상구간 해석결과 앞 질의 측정값과 유사하게 동력차량(PC1, PC2)의 차체 가속도값이 크며, 중간객차(T5 Rear)보다 후미객차(T9 Rear)의 가속도가 크다. 또한 객차 양끝단의 단부대차(End trailer bogie) 상부(T2 Front, T9 Rear)의 차체 좌우방향 가속도가 크다. 상기의 결과로 단부대차 상부 및 동력차량의 진동개선 필요성이 있다.

KTX-산천 100호대 영업운행 이후 차체진동에 대한 민원이 발생하여 200호대 KTX-호남 차량에서는 차체 진동문제를 개선하기 위하여 4가지 개선설계를 수행하였다. 먼저 객차 양쪽 끝 단부대차 상부의 횡방향 진동을 개선하기 위해 단부대차 횡댐퍼 댐핑계수를 KTX-산천 대비 50% 감소하였고(Case 2), 객차 전체의 진동을 개선하기 위해 차간 안티롤 댐퍼 댐핑계수를 50% 증가시켰고(Case 3), 객차 및 단부대차의 요댐퍼 댐핑계수를 34% 증가시켰으며(Case 4), 또한 객차대차의 요댐퍼 방

Table 1. KTX-sancheon simulation results

Indices		Acceleration RMS[m/s ²]			
		Carbody Lateral [Criteria : 0.5 m/s ²]		Carbody Vertical [Criteria : 0.75 m/s ²]	
		Normal	Crossing	Normal	Crossing
PC1	Front	0.155	0.371	0.374	0.737
	Rear	0.159	0.398	0.501	0.809
T2	Front	0.154	0.511	0.166	0.487
	Rear	0.107	0.611	0.152	0.580
T3	Front	0.110	0.553	0.160	0.622
	Rear	0.095	0.431	0.178	0.522
T4	Front	0.101	0.473	0.182	0.480
	Rear	0.101	0.426	0.205	0.489
T5	Front	0.103	0.419	0.209	0.516
	Rear	0.111	0.468	0.213	0.543
T6	Front	0.110	0.449	0.213	0.563
	Rear	0.114	0.394	0.193	0.518
T7	Front	0.115	0.455	0.190	0.540
	Rear	0.113	0.359	0.185	0.435
T8	Front	0.115	0.371	0.191	0.544
	Rear	0.122	0.325	0.184	0.512
T9	Front	0.121	0.336	0.184	0.481
	Rear	0.151	0.292	0.269	0.367
PC2	Front	0.153	0.364	0.381	0.732
	Rear	0.158	0.389	0.510	0.809

향을 변경하였다(Case 5). 상기의 경우에 대하여 정상구간 및 분기기구간을 300km/h로 주행하였을 때 차체 가속도 RMS값을 Table 2에 정리하였다. KTX-산천(Case 1)에 비해 KTX-호남(Case 6)차량은 차체 횡가속도에 있어 정상구간은 2.47%, 분기기구간은 10.59% 개선되는 해석결과를 보이며, 차체 상하방향 가속도나 대차 횡방향 가속도에서는 큰 차이가 없다. KTX-호남에 적용한 방법 중 안티롤 댐퍼 댐핑계수 증가(Case 3)와 객차대차 요댐퍼 방향 변경(Case 5)은 큰 효과가 없어서, 이를 제외하고 단부대차 횡댐퍼 댐핑계수 감소(Case 2)와 요댐퍼 댐핑계수 증가(Case 5)를 KTX-산천에 적용하였을 때(Case 7) KTX-호남 차량과 유사한 경향을 보임을 해석적으로 확인하였다.

2.3 동력차량의 진동저감

Fig. 2의 측정결과와 Table 1의 해석결과에서 알 수 있듯이 KTX-산천 동력차(PC1, PC2)의 차체 진동가속도는 객차에 비해 크며, 이는 동력차량에 취부된 설비의 고장을 가속시키며, 운전자의 피로를 상승시킨다. 이에 동력차의 진동을 개선하기 위한 연구를 수행하였다. KTX-산천의 동력차량과 동력대차는 2차 코일스프링, 2차 수직댐퍼 및 2차 횡댐퍼 등으로 연결되어 있고, 전동기 및 모터감속기는 차체에 취부되어 있다. Fig. 2의 측

Table 2. Simulation results of several cases

Indices		Acceleration RMS[m/s ²]						
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Carbody Lateral	Normal	0.124	0.122	0.124	0.123	0.125	0.121	0.121
	Ratio[%]	-	1.67	0.00	1.09	-0.60	2.47	2.27
	Crossing	0.412	0.391	0.414	0.379	0.414	0.369	0.365
Carbody Vertical	Normal	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.243
	Ratio[%]	-	-0.08	-0.02	-0.06	0.14	-0.07	-0.15
	Crossing	0.573	0.571	0.572	0.574	0.566	0.564	0.571
Bogie Lateral	Normal	0.289	0.292	0.289	0.284	0.289	0.286	0.287
	Ratio[%]	-	-0.98	-0.03	1.83	-0.02	0.95	0.66
	Crossing	3.129	3.117	3.109	3.100	3.113	3.104	3.107
	Ratio[%]	-	0.38	0.63	0.92	0.50	0.77	0.68

※ Simulation cases

- Case 1 : KTX-sancheon, Case 2 : End trailer bogie lateral damping 50%, Case 3 : Anti-roll damping 150%, Case 4 : Trailer car yaw damping 134%, Case 5 : yaw damper direction change, Case 6 : KTX-honam(Case 2+Case 3+Case 4+ Case 5), Case 7 : KTX-sancheon proposal(Case 2+ Case 4)

Table 3. Simulation results of driver cabs

Indices			Acceleration RMS[m/s ²]						
			Case 1	Case 2		Case 3		Case 4	
				Value	Ratio[%]	Value	Ratio[%]	Value	Ratio[%]
Carbody Lateral [Criteria : 0.5 m/s ²]	PC1	Front	0.155	0.134	13.5	0.152	1.9	0.131	15.5
		Rear	0.159	0.134	15.7	0.158	0.6	0.133	16.4
	PC2	Front	0.153	0.132	13.7	0.150	2.0	0.130	15.0
		Rear	0.158	0.134	15.2	0.157	0.6	0.133	15.8
Carbody Vertical [Criteria : 0.75 m/s ²]	PC1	Front	0.374	0.215	42.5	0.281	24.9	0.166	55.6
		Rear	0.501	0.327	34.7	0.421	16.0	0.277	44.7
	PC2	Front	0.381	0.216	43.3	0.278	27.0	0.166	56.4
		Rear	0.510	0.328	35.7	0.422	17.3	0.276	45.9

※ Simulation cases

- Case 1 : KTX-sancheon, Case 2 : Secondary coil spring lateral & vertical stiffness 50%, Case 3 : Secondary vertical damping 200%, Case 4 : Case 2 + Case 3

정결과 횡방향보다는 상하방향 진동 개선이 필요하였고, 이에 2차 코일스프링 탄성계수 및 2차 수직댐퍼 댐핑계수를 변경하여 해석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

2차 코일스프링은 제작 시 횡방향과 상하방향 강성이 연관되어 동시에 증가 또는 감소하게 제작된다. 이를 고려하여 2차 코일스프링 횡방향과 상하방향 강성을 50% 감소하였을 때(Case 2), KTX-산천(Case 1)대비 차체 횡가속도는 약 14%, 상하가속도는 약 39% 정도 개선된다. 2차 수직댐퍼 댐핑계수를 200% 증가시켰을 때(Case 3) 차체 상하가속도는 약 21% 정도 개선되며, 두가지 경우를 모두 적용하였을 때(Case 4) 차체 횡방향 가속도는 약 15%, 상하가속도는 약 50% 정도 개선되는 해석결과를 보인다. 이때 대차 횡가속도는 약 4% 정도 증가하였으며, 동력차의 전동기가 차체 하부에 설치되므로 대차

와의 변위를 고려한 결과 차체 진동 감소로 인하여 변위 폭의 감소가 예측되었다. 이 결과를 토대로 동력차의 진동정감을 위해 2차 수직댐퍼 댐핑계수 증가 및 2차 코일스프링 강성을 감소시키는 시도를 해 볼 수 있다.

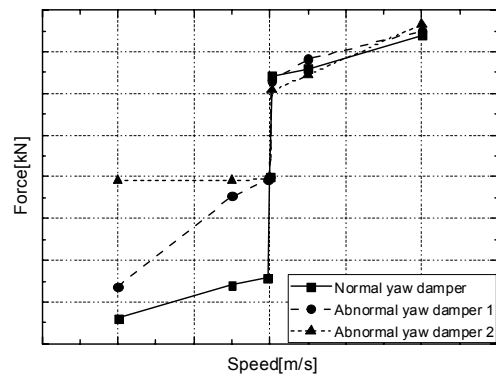


Fig. 7. Yaw damper damping coefficient for power car

2.4 현가장치 성능저하

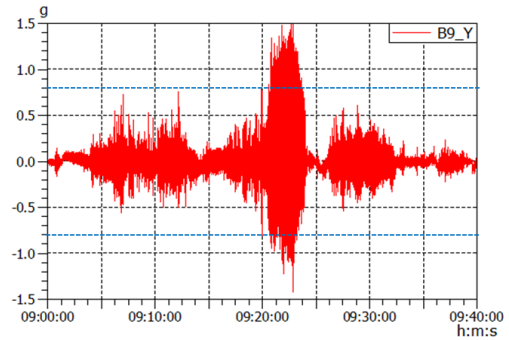
고속열차 차체의 중심축을 기준으로 좌우방향으로 회전하는 요방향 진동은 차량의 승차감을 저해하는 중요한 요소이다. 이를 억제하기 위하여 차체와 대차사이에 안티 요댐퍼를 설치하게 되는데 오랜 운행 또는 다른 요인으로 인하여 성능이 저하되는 경우가 있어 유지보수가 중요하다. 안티 요댐퍼 성능저하시의 차량 진동을 검토하기 Fig. 7과 같이 동력차량의 요댐퍼 이상품에 대한 동역학 해석을 수행하였다. Fig. 7의 요댐퍼 이상품은 운행시 문제가 있었던 제품의 사후 시험 결과인데 정상품에 비해 인장 시는 정상 작동하나, 압축 시 댐퍼의 기능을 상실하였다. 동력차 모델은 별도로 구성하였고, 요댐퍼는 과도한 진동을 억제하기 위한 장치이므로 Fig. 6의 분기기구간의 선로불규칙도를 이용하였다. 해석결과는 Table 4에 나타내었다. 정상품에 비해 이상품을 장착한 대차의 횡가속도는 12.9~19.5% 정도 커지고, 대차 횡가속도도 1.3~3.8% 증가하였다. 차체 상하가속도는 요댐퍼 이상품에 대해 크게 영향을 받지 않았다.

KTX-산천 105호 편성의 시운전 중 9번 대차에서 대차현탕이 발생하여 기준치(0.8g)를 초과하는 이상진동이 Fig. 8(a)와 같이 측정되었다. 이후 차륜 삭정만 실시하고 동일한 구간을 주행하였을 때 이상진동이 Fig. 8(b)와 같이 사라졌다. 이 부분을 검토하기 위하여 시운전 후 9번 대차의 요댐퍼와 횡댐퍼에 대한 댐퍼 특성시험을 실시하였는데, 요댐퍼는 Fig. 9와 같이 기준치를 조금 벗어난 정상품과 거의 유사한 이상품이었고, 횡댐퍼는 대차 중정비 후 조립시 상하방향 조립이 잘못되어 Fig 10과 같이 인장시 댐퍼의 기능을 상실한 상태였다. 이에 대해 정상구간에서 VAMPIRE를 이용한 동역학 해석을 수행한 결과 9번 대차 횡가속도 RMS값은 전체적으로 16% 정도 증가하였으며, 요댐퍼로 인해 4%, 횡댐퍼 취부 오류로 인해 12% 정도 증가하였다.

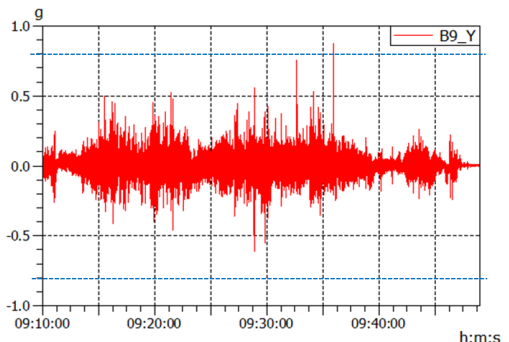
차륜마모의 영향을 살펴보기 위하여 요댐퍼 및 횡댐퍼 이상 상태에서 마모차륜과 신조차륜에 대한 해석을 수행하였다. 마모차륜 해석에 사용된 선로 불규칙도는 Fig. 11과 같이 초기 가진만 가진다. 9번 대차 횡방향 가속도 해석결과는 Fig. 12와 같다. 175,562km 주행한 마모 차륜 형상을 적용한 대차 횡가속도 해석 결과는 신조차륜(0km) 형상을 적용한 해석결과에 비해 가속도 최대값이 크다. 이는 앞에서 차륜 삭정 시 이상진동이 없어지는 시운전 결과를 설명한다.

Table 4. Simulation results of abnormal yaw dampers

Indices		Acceleration RMS[m/s ²]				
		Normal	Front bogie abnormal		Both bogie abnormal	
			Value	Ratio[%]	Value	Ratio[%]
Carbody	Front	0.456	0.515	-12.9	0.545	-19.5
	Lateral	0.496	0.471	5.0	0.574	-15.7
Carbody	Front	0.773	0.766	0.9	0.760	1.6
	Vertical	0.888	0.888	0.0	0.881	0.7
Bogie	Front	2.971	3.086	-3.8	3.077	-3.5
	Lateral	4.852	4.918	-1.3	4.917	-1.3



(a) Before wheel turning



(b) After wheel turning

Fig. 8. Bogie acceleration of KTX-sancheon

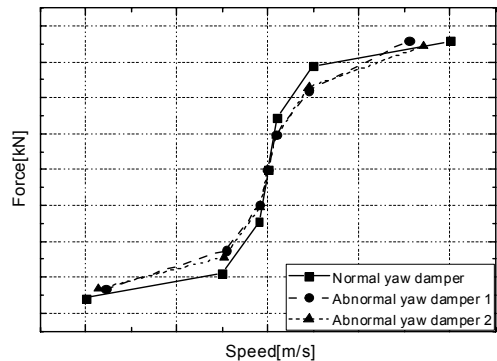


Fig. 9. Yaw damper damping for passenger car

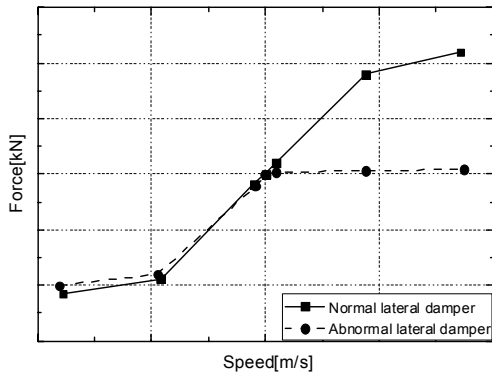


Fig. 10. Lateral damper damping for passenger car

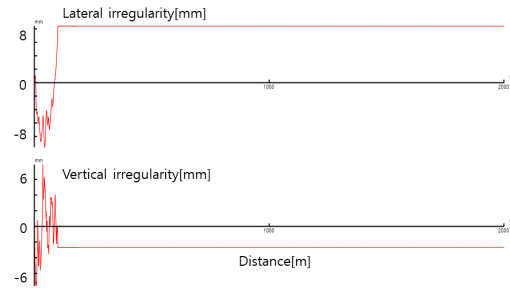


Fig. 11. Stability analysis track

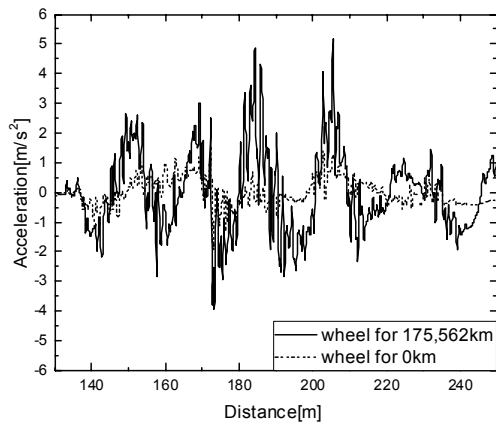


Fig. 12. Bogie acceleration according to wheel wear

이상의 결과에서 요댐퍼 및 횡댐퍼 등의 현가장치 성능저하에 따라 차체 및 대차 진동가속도가 커짐을 알 수 있고, 현가장치의 올바른 유지보수가 고속열차의 진동을 저감시킬 수 있다. 차륜마모 또한 진동에 영향을 주며 유지보수 비용과 차량 진동 정도를 보아가며 적절히 관리하는 것이 중요하다. 주행거리에 따른 차륜 마모 정도를

적게 하기 위하여 현재 일부 KTX-산천 차량에 XP55(1/20) 휠 프로파일 대신 GV40(1/40) 프로파일을 적용하여 시운전이 진행 중이다. GV40 프로파일은 XP55에 비해 마모 측면에서 유리하나, 초기 KTX 도입 시 겨울철에 공기스프링의 횡방향 강성 증가로 13~14번 차량의 횡진동을 유발하여 XP55 프로파일로 변경되었다[1~2]. KTX-산천은 10량 1편성 차량으로 GV40 프로파일 적용 시 현재까지 특별한 횡진동 문제가 발생하지 않았다. 향후 겨울철 시운전 및 중련운전 결과를 보고 확대 시행 여부를 결정할 예정이다.

3. 결론

본 연구는 영업운영 중인 고속열차의 진동 문제를 고찰하고, 이를 개선하기 위하여 진행되었다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1. 고속열차의 진동 수준을 알기 위하여 차체 진동 가속도에 대한 측정이 수행되었다. 측정결과 운전실이 객차보다 진동이 크며, 열차 후미로 갈수록 진동이 더 커졌다. 운전실 및 객차 모두 수직방향 진동이 횡방향 진동에 비해서 크며, 콘크리트 구간에 비해 자갈궤도에서 진동의 최대값이 크다. 또한 KTX에 비해 KTX-산천 객차의 진동이 좀 더 컸다.
2. KTX-산천 진동 경향과 개선점을 도출하기 위하여 동역학 해석을 수행하였다. 해석결과는 시험결과와 유사하였으며, 객차 양 끝단의 단부객차 상부와 동력차량의 진동을 저감시킬 필요가 있었다. 객차의 진동을 저감하기 위하여 KTX-호남(200호대) 차량은 4가지 개선 설계를 수행하였고, 이 중 KTX-산천에 적용할 수 있는 방법을 해석에 적용하였을 때, 정상구간에서는 2.2%, 분기구간에서는 11% 정도 진동이 감소할 것으로 예상되었다. 동력차량의 진동저감을 위해 2차 코일스프링의 강성을 감소시키고, 2차 수직댐퍼의 댐핑계수를 증가시키는 방안을 제안하였다.
3. 현가장치의 불량, 오조립 등 성능저하가 차체 및 대차의 진동을 증가시키는 것을 시운전 결과와 해석결과를 통하여 살펴보았으며, 현가장치 올바른 유지보수가 차량 진동을 저감시킬 수 있었다. 차륜 마모에 대한 적절한 관리는 운행 효율 및 차

체 진동저감에 중요한 역할을 하며, 현재 차륜 프로파일을 변경하여 차륜 삭정간 주행거리를 늘리려는 연구가 진행 중이다. 이에 대한 연구 결과는 향후 보고할 예정이다.

References

- [1] J. C. Kim, C. W. Lee, "A Study on Lateral Vibration at the Tail of Train for KTX," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 17-22, 2005.
- [2] C. W. Lee, J. C. Kim, K. H. Moon, "The Analysis on the Carbody Vibration of Wheel Profiles for KTX," Proceedings of the Korean Society for Railway Spring Conference, pp. 730-733, 2003.
- [3] S. I. Lee, Y. S. Choi, "Running Stability Analysis on the Tail car of KTX," Proceedings of the Korean Society for Railway Spring Conference, pp. 19-24, 2005.
- [4] J. K. Chang, S. I. Lee, Y. S. Choi, "Dynamic Characteristics of the KTX on Wheel Conicity," Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference (III), pp. 22-27, 2003.
- [5] B. B. Kang, "Dynamic Analysis of Unstable Vibration of KTX," Proceedings of the 2010 IEEE/ASME Joint Rail Conference, pp. 1-9, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1115/JRC2010-36127>
- [6] C. S. Jeon, "A study on Critical Speed Enhancement of High-speed Train Passenger Car," Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society, vol. 17, no. 12, pp. 603-610, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.12.603>
- [7] J. K. Jang, S. I. Lee, Y. S. Choi, "Dynamic Characteristics of the KTX on Wheel Conicity," Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference, pp. 12-27, 2003.
- [8] J. W. Kim, H. I. Jung, D. S. Kim et al., "Comparison of KTX Traveling Vibration Characteristics on Gyeong-bu High Speed Railway," Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference, pp. 862-866, 2013.
- [9] I. Y. Choi, J. H. Um, M. C. Kim, "Analysis of the Influence of Track Alignment on Ride Comfort and Safety of KTX," Journal of the Korean Society for Railway, vol. 16, no. 2, pp. 110-116, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.2.110>
- [10] Resonate Group Limited. VAMPIRE Pro V6.40 users' manual, 2017.

전 창 성(Chang-Sung Jeon)

[정회원]



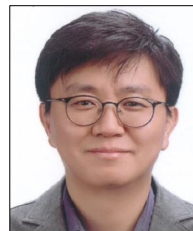
- 1998년 2월 : 서울대학교 대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2015년 2월 : 아주대학교 대학원 기계공학과 (기계공학박사)
- 2000년 1월 ~ 2004년 7월 : 부산 네트워크스 주임연구원
- 2005년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도차량 동역학, 기계공학

최 성 훈(Sunghoon Choi)

[정회원]



- 1990년 2월 : KAIST 기계공학과 (기계공학학사)
- 1995년 7월 : Northwestern University (기계공학박사)
- 1995년 3월 ~ 2000년 7월 : 삼성 종합기술원 책임연구원
- 2000년 9월 ~ 2002년 10월 : KAIST 기계공학과 연구교수
- 2002년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도차량 소음진동, 기계공학