

## 고속열차 객차의 임계속도 향상에 관한 연구

전창성

한국철도기술연구원 고속열차연구팀

### A Study on Critical Speed Enhancement of High-speed Train Passenger Car

Chang-Sung Jeon

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

**요약** 국내에 고속열차가 도입된 지 12년이 지났고, 국내기술로 개발된 KTX-산천도 운행한지 6년 정도 되었다. 호남선 고속철도의 개통으로 현재 국내 고속선로의 수송용량은 거의 포화상태가 되었고, 이에 따라 수송용량을 증대하기 위하여 열차의 운행속도를 높이는 연구 등 다양한 연구가 수행되고 있다. 본 연구는 그 중 일부로 KTX-산천 고속열차의 운행속도를 350km/h로 높이기 위하여 열차의 임계속도를 향상시키기 위해 수행되었다. KTX와 KTX-산천 영업운행 차량에서 측정된 차륜마모 데이터를 이용하여 KTX-산천 편성 모델에 대한 동역학해석을 수행하였고, KTX-산천 영업차량에서 측정된 진동가속도 측정결과와의 비교를 통하여 해석결과의 타당성을 검증하였다. 고속열차의 운행속도 향상을 위하여 열차의 임계속도 향상을 목표로 대차 주요 현가장치 파라미터에 대한 최적화 연구를 수행하였다. 민감도 분석을 통해 최적화를 위한 주요 현가장치 파라미터를 선정하였고, 반응표면분석법에 의해 2차 회귀 모형 함수를 추정하였다. 2차의 목적함수를 최소화시키는데 있어서 효율적인 성능을 발휘하는 SQP 방법을 사용하여 최적화를 수행한 결과 KTX-산천의 임계속도가 9.4%정도 증가함을 확인하였다. 최적화된 현가장치 파라미터는 KTX-산천 영업속도를 300km/h에서 350km/h로 향상시키기 위한 신규대차 설계 시 반영될 예정이다.

**Abstract** Over 12 years have passed since the first commercial operation of a Korean high-speed train. Since then, the transport capacity of the high-speed lines has become almost saturated. Therefore, studies have been carried out to increase the operating speed of the trains in order to increase their transportation capacity. This study was carried out to improve the critical speed of the KTX-Sancheon, Korean high-speed train, in order to increase its operating speed. A dynamic analysis of the KTX-Sancheon train was performed using the contact data obtained from the wheel wear profiles that were measured from a KTX-Sancheon train in commercial operation. The analysis results were verified by comparing them with the measurement acceleration data obtained from KTX-Sancheon. The suspension parameters were optimized to improve the operation speed. The critical speed of KTX-Sancheon was increased by 9.4% after the optimization by the response surface method. The optimized suspension parameters are expected to be used for the new bogie design to increase the operating speed of KTX-Sancheon from 300km/h to 350km/h.

**Keywords** : Conicity, Critical speed, High-speed train, KTX-sancheon, Optimization

### 1. 서론

국내에 고속열차 KTX가 도입된 지 12년이 지났고, 국내기술로 개발된 KTX-산천도 운행한지 6년 정도 되

었다. 현재 고속선로의 수송능력은 거의 포화상태가 되었고, 이에 따라 수송력을 증가시키기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 그 중 하나로 300km/h인 KTX-산천 차량의 영업속도를 350km/h로 향상시키기 위한 차

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK1601A)의 연구비 지원으로 수행되었음.

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

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

Received October 13, 2016

Revised (1st November 9, 2016, 2nd December 5, 2016)

Accepted December 8, 2016

Published December 31, 2016



Fig. 1. Analysis model of KTX-sancheon

량의 핵심부품 개선에 관한 연구가 국가연구개발사업으로 진행되고 있다. 주요 내용은 추진성능 및 효율향상 연구, 주행저항 저감을 위한 공력성능 개선, 주행안정성 확보를 위한 임계속도 향상에 관한 연구 등이다. 본 연구는 KTX-산천 차량 편성의 임계속도를 향상시켜 속도 향상 시 주행안정성을 확보하기 위해 진행된 연구의 일부이다.

철도차량의 차륜은 원통형이 아닌 원추형으로 답면구배를 가지고 있으며, 이것에 의해 차축이 레일의 한쪽 편으로 치우쳤을 경우 올바른 위치로 되돌리는 복원력을 주며(자기조향), 곡선 통과를 원활하게 하는 기능이 있다. 차륜의 답면구배에 의한 자기조향 기능은 윤축에 좌우방향의 운동을 일으키는 원인이 되며, 심할 경우 경우 사행동을 일으키게 된다. 철도 차량의 사행동은 공진현상 중 하나로 주로 직선부를 고속으로 주행할 경우 차체나 대차, 차축들이 연직축 둘레방향으로 회전진동을 일으키는 현상이며, 궤도나 차체에 손상을 준다. 사행동이 일어날 때의 속도를 임계속도(Critical speed)라 한다[1].

철도차량의 차륜과 레일은 자중 때문에 탄성변형이 발생하며, 타원형의 접촉면(Contact patch)을 형성한다. 이 접촉면에 형성된 접촉력에 의해 열차는 움직이게 된다. 열차의 진행방향으로 힘이 작용할 때(추진 또는 제동) 접촉면의 접선속도와 열차의 속도는 차이가 발생하며, 이 비율을 크리피지(Longitudinal creepage)라고 하고, 이때 나타나는 힘을 크립력(Creep force)이라 한다. 이때 좌우방향으로도 힘이 작용하게 되며, 이는 열차의 사행동을 일으키는 힘이라고 할 수 있다. 열차의 속도가 높아질수록 이 힘은 커지고 사행동이 발생할 가능성은 높아지게 된다[2].

차륜 마모와 철도차량 진동의 상호 관계에 대한 다양한 연구가 진행되었다. Hur[3]등은 고속철도차량의 안정성 및 효율적 유지보수를 위하여 영업중인 고속철도차

량을 대상으로 차륜의 마모 특성 분석을 위한 실험적 연구를 수행하였는데, 측정된 차륜의 등가담면구배는 0.4 미만임을 확인하였다. Hur[4]등은 전동차 차륜에 대한 마모 특성과 차륜의 마모가 차량 진동특성에 미치는 영향을 분석하였는데, 차륜 삭정 후 주행 초기(30,000km 이하)에는 차륜 치수 및 등가담면구배 변화가 심한 직립 마모 특성을 보이고 있음을 확인하였다. 또한 누적주행거리가 증가함에 따라 차륜의 마모가 진전되고 그에 따른 차체의 진동 수준은 증가하는 경향을 보이고 있음을 확인하였다.

본 연구에 이용된 차륜마모 형상 측정에 관한 내용은 저자 등의 다른 연구에서 발표하였는데, Jeon[5]등은 KTX 와 KTX-산천 차량의 주행거리에 따른 차륜마모형상을 측정하였고, 누적주행거리에 따라 차륜담면구배(Conicity)는 증가함을 확인하였다. 또한 차륜마모데이터를 이용하여 KTX-산천 동력차의 임계속도 향상을 위한 연구를 수행하였는데, 최적화 결과 동력차의 임계속도는 34.1% 향상되었다.

본 연구에서는 KTX-산천 객차의 주행안정성과 승차감 향상을 위하여 KTX-산천 해석모델을 작성하고 실궤도 불규칙도를 이용한 해석을 수행하였다. 이를 영업운행 열차에서 측정된 진동가속도와 비교하여 해석의 정확도를 검증하였다. 또한 고속열차의 임계속도에 영향을 미치는 인자들에 대한 연구를 수행하였고, 최적화를 통하여 임계속도를 향상시키는 방안을 제시하였다.

## 2. 본론

### 2.1 모델링

본 연구에서는 철도차량 동역학해석 프로그램인 VAMPIRE[6]를 이용하여 Fig. 1과 같이 KTX-산천 10

량 1편성을 모델링하였다. KTX-산천에 사용된 대차는 동력대차, 단부대차, 객차대차 등 3종류이며, 이 중 객차에 사용된 단부대차와 객차대차를 Fig. 2에 나타내었으며, 현가장치 물성치는 제조사에서 제공한 값을 사용하였다. 궤도모델은 Fig. 3(a)와 같이 수평방향과 수직방향의 초기 불규칙도만 가진다. 특정 속도에서 초기에 가진이 주어졌을 때, 차량이 Fig. 3(b)와 같이 안정되는지 또는 불안정해지는지에 따라 임계속도가 결정된다. Fig. 3(b)는 차륜담면구배가 0.187일 때의 해석 결과의 예이며, 106m/s의 속도에서는 외부 불규칙에 의해 휠셋의 변위가 시간이 지남에 따라 수렴하나, 107m/s의 속도에서는 발산한다. 따라서, 임계속도는 106m/s이라고 볼 수 있다.

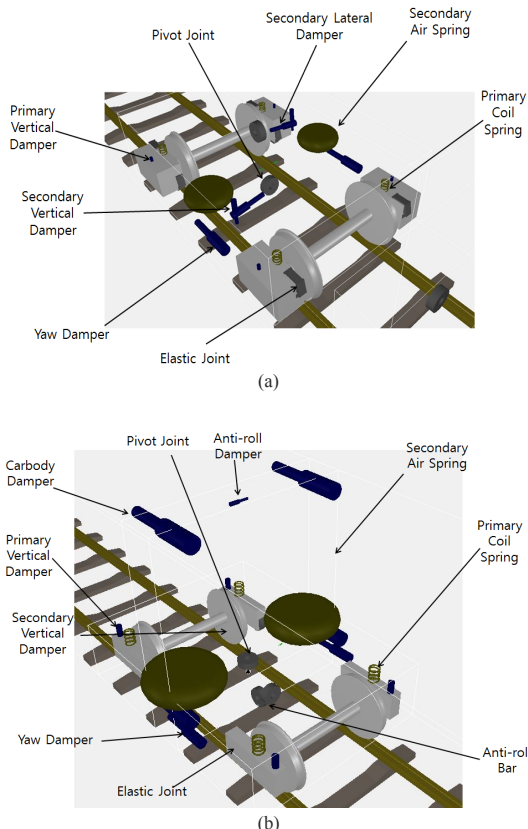


Fig. 2. Bogie model (a) End trailer Bogie (b) Articulated Bogie

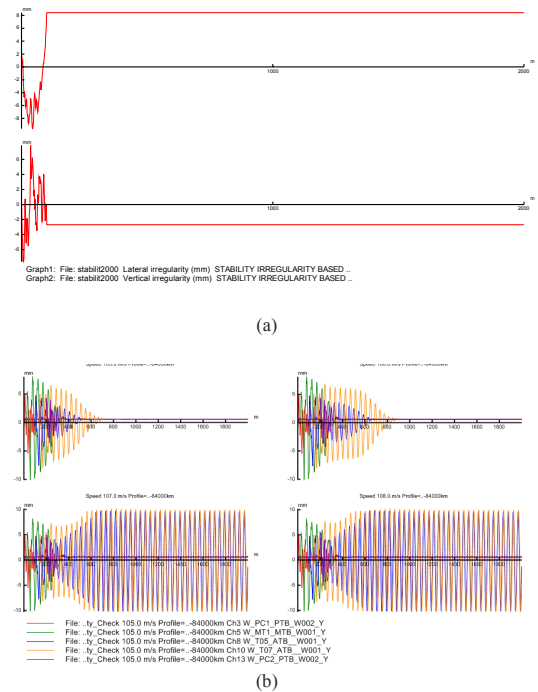


Fig. 3. Track model and critical speed analysis example (a) Track model (b) Analysis example(Conicity=0.187)

## 2.2 해석결과 및 검증

영업 운행중인 KTX 및 KTX-산천 고속열차의 XP55 차륜의 주행거리에 따라 측정된 휠프로파일을 이용하여 [5], KTX-산천 동력차와 편성 모델에 대한 임계속도 해석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 누적 주행거리가 늘어남에 따라 차륜은 마모되고 차륜담면구배(Conicity)는 증가한다. 차륜담면구배가 증가할수록 임계속도는 감소하며 KTX-산천의 동력차 모델보다 편성모델의 임계속도가 더 낫다. 이는 편성 열차의 경우 열차 간 상호작용에 의해 동력차 단독일 때 보다는 임계속도가 감소하게 된다는 것을 의미한다.

해석의 정확도를 검증하기 위하여 KTX-산천 영업열차의 운전실과 객실에서 측정된 가속도값과 해석결과를 비교하는 연구를 수행하였다. 측정은 한국철도공사의 협조를 얻어 Fig. 5와 같이 경부고속철도 대전-광명 구간을 운행 중인 KTX-산천 영업열차의 전후부 운전실과 중간, 후미객차의 차체 바닥에 가속도계(PCB Piezotronics 사의 Model 3711D1FA3G)를 좌우방향과 상하방향으로 설치하여 데이터를 획득하였다. 측정된 데이터의 분석은 National Instrument사의 DIAdem 프로그램[7]을 이용하

였다. 측정된 운전실과 객실의 차체 횡방향 및 상하방향 가속도에 0.4~10Hz의 밴드패스 필터를 적용하고 1초 단위로 RMS(Root mean square) 값을 구한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 운전실의 가속도값이 객실보다 크므로 이에 대한 개선이 필요함을 알 수 있고, 이에 대해 저차 등의 이전 연구에서 수행하였다[5]. 동력차의 경우 수직방향 가속도가 수평방향보다 상당히 크며, 이는 2차 코일 스프링의 강성을 낮춤으로써 개선할 수 있다. 객차의 경우 수직과 수평방향 진동가속도가 비슷한 수준이다.

해석결과와 시험결과를 비교하기 위하여 대전-광명 구간의 실효도에서 측정된 궤도 불규칙도를 이용하여 해석을 수행하였다. 한국철도공사의 협조로 궤도검측차(EM-120)로 검측된 궤도 불규칙 자료를 변환하여 실효도 불규칙 데이터를 생성하였다[8, 9].

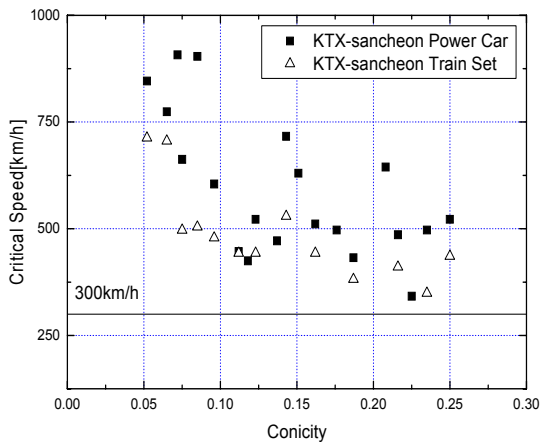


Fig. 4. Critical speed analysis result of KTX-sancheon

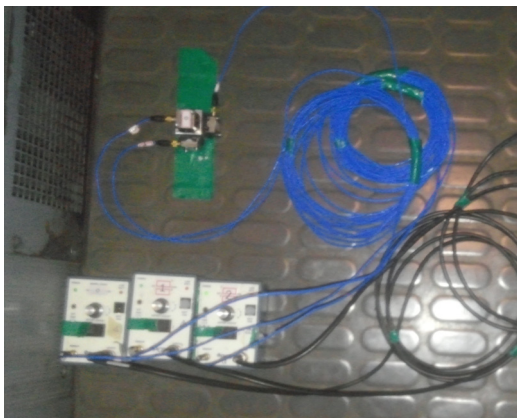


Fig. 5. Acceleration measurement of KTX-sancheon

생성된 대전-광명 구간의 실효도 불규칙 결과를 이용하여 KTX-산천 편성을 해석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 결과는 선두 운전실, 전위 객차, 중간 객차, 후위 객차, 후위 운전실 순으로 정리하였다.

Fig. 7에서 횡방향 가속도 및 상하방향 가속도는 운전실이 객실보다 조금 크다. KTX-산천 운전실과 객실에 대하여 Fig. 6의 가속도의 최대값과 Fig. 7 해석 결과의 RMS값을 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 전체적으로 해석결과와 측정결과가 유사하며 이는 해석의 타당성을 입증한다.

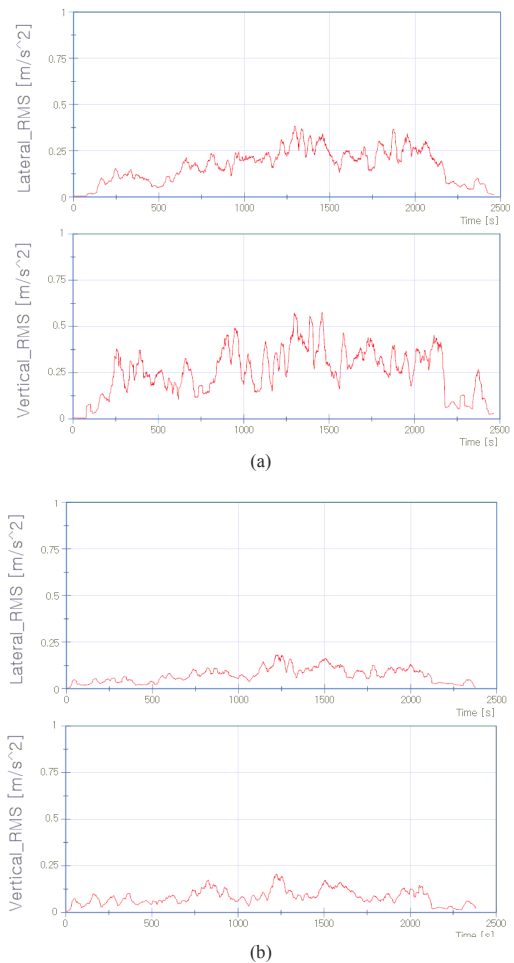


Fig. 6. Acceleration measurement Results (a) Front driver's cab (b) Middle passenger car

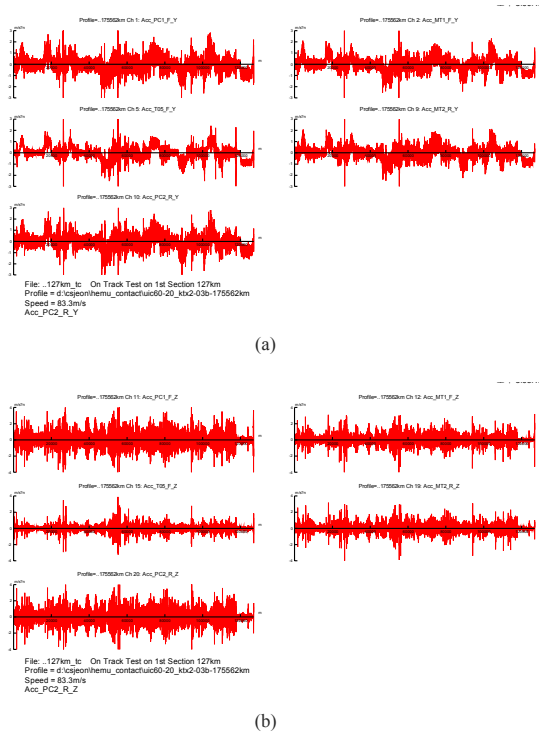


Fig. 7. Simulation results (a) Lateral acceleration (b) Vertical acceleration

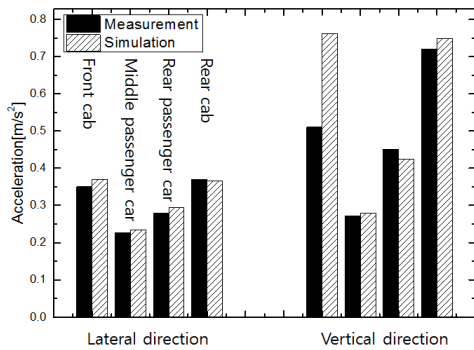


Fig. 8. Comparison of analysis and test result

### 2.3 최적화를 통한 임계속도 향상

KTX-산천 편성모델의 임계속도를 향상시키기 위하여 객차대차 주요 현가장치 파라미터에 대한 최적화를 실시하였다. 2수준 요인 실험을 이용한 민감도 분석 방법의 하나로 실험 횟수를 획기적으로 줄인 Plackett-Burman design[10]을 이용하여 실험계획 수립 및 해석을 수행하였다. 먼저 차량의 주요 구성요소 중 상대적으로 중요한 것으로 판단되는 10개의 변수를 선정하고, 이

를 Table 1에 정리하였다. 이 변수들을 이용하여 민감도 분석을 실시하였으며, 목적함수는 차량의 임계속도로 선정하였다. Table 1은 차량의 성능향상을 위해 필요한 설계변수의 수준 및 값들을 보여준다. 표에서 Current는 현재에 사용하고 있는 값을 나타내며, Min과 Max는 각각 설계변수들의 하한값 및 상한값을 의미한다. Table 1의 설계변수를 이용하여 Plackett-Burman design에 의한 실험계획 및 해석을 수행하여 반응함수식을 식 (1)과 같이 구하였다. 식 (1)의 설계변수 각각에 대한 설명은 Table 1에 나타나 있다.

$$Y = 373.5 + 4.5x_1 - 1.5x_2 + 0.3x_3 - 1.5x_4 + 4.5x_5 + 13.5x_6 + 8.1x_7 - 3.3x_8 + 0.9x_9 + 3.9x_{10} \quad (1)$$

민감도 해석 결과는 Fig. 9와 같다. 2차 요덤퍼 x 방향 시리즈 강성( $x_6$ ), 안티롤바 x(T) 방향 강성( $x_7$ ), 1차 탄성조인트 x 방향 강성( $x_1$ ), 2차 요덤퍼 x 방향 댐핑계수( $x_5$ ) 순으로 민감도가 큰 것을 알 수 있다. 최적화를 위해 민감도 분석에서 영향이 큰 앞의 4개 변수를 이용하여, 마모된 차륜일 때의 임계속도를 향상시키기 위하여 차륜답면구배 0.187의 마모된 차륜에 대해 최적설계를 수행하였다. 4개의 설계변수에 대한 중심합성실험계획표(Central composite design table)[11]와 각 실험에 대한 임계속도 해석 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2의 실험결과를 조합하여 반응표면분석법(Response surface analysis)[12]에 의해 2차 회귀 모형 함수를 추정하였고, 최적화를 위해 목적함수와 구속조건을 다시 정리하면 식 (2)와 같다. 이 때 목적함수는 차량 임계속도

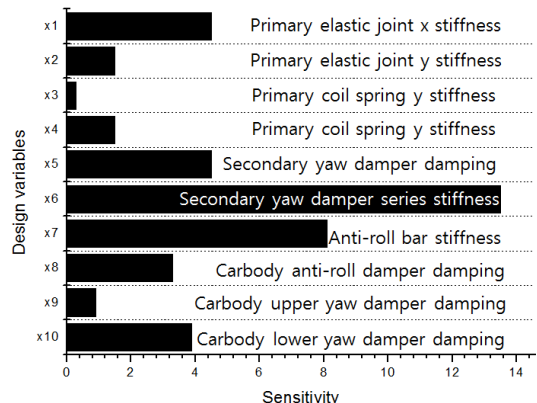


Fig. 9. Sensitivity analysis result

**Table 1.** Design variables and level

No	Design variables	Unit	Min[%]	Current[%]	Max[%]	Remarks
$x_1$	Primary elastic joint stiffness( $x$ )	MN/m	70	100	130	
$x_2$	Primary elastic joint stiffness( $y$ )	MN/m	70	100	130	
$x_3$	Primary coil spring stiffness( $y$ )	MN/m	70	100	130	
$x_4$	Secondary air spring stiffness( $y$ )	MN/m	50	100	150	
$x_5$	Secondary yaw damper coefficient( $x$ )	MNs/m	70	100	130	
$x_6$	Secondary yaw damper series stiffness( $x$ )	MNs/m	90	100	110	Non-linear
$x_7$	Anti-roll bar stiffness( $x(T)$ )	MNm/rad	50	100	150	
$x_8$	Carbody anti-roll damper coefficient( $y$ )	MNs/m	70	100	130	Non-linear
$x_9$	Carbody upper yaw damper coefficient( $x$ )	MNs/m	70	100	130	Non-linear
$x_{10}$	Carbody lower yaw damper coefficient( $x$ )	MNs/m	70	100	130	Non-linear

**Table 2.** Central composite design table and simulation results

No	$x_6$	$x_7$	$x_1$	$x_5$	Critical speed[km/h]
1	90	50	70	70	342
2	90	50	70	130	342
3	90	50	130	70	360
4	90	50	130	130	356.4
5	90	150	70	70	360
6	90	150	70	130	360
7	90	150	130	70	374.4
8	90	150	130	130	378
9	110	150	130	130	417.6
10	110	150	130	70	378
11	110	150	70	130	396
12	110	150	70	70	388.8
13	110	50	130	130	396
14	110	50	130	70	378
15	110	50	70	130	374.4
16	19.5	50	70	70	374.4
17	100	100	100	100	381.6
18	85.86	100	100	100	352.8
19	114.14	100	100	100	403.2
20	100	29.3	100	100	370.8
21	100	170.7	100	100	392.4
22	100	100	57.58	100	360
23	100	100	142.42	100	385.2
24	100	100	100	57.58	345.6
25	100	100	100	142.42	378

의 최대화이기 때문에 본 문제를 최소화 문제로 변환하기 위하여 회귀 모형 함수에 음의 값을 취하여 주었다. 식 (2)의 설계변수 각각에 대한 설명은 Table 1에 나타나 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } x_6, x_7, x_1, x_5 \\
 & \text{To minimize} \\
 & Y = -376.4 - 15.0x_6 - 8.0x_7 - 6.8x_1 \\
 & \quad - 5.5x_5 - 1.4x_6^2 - 3.2x_7^2 + 1.2x_1^2 \\
 & \quad + 6.6x_5^2 + 0.9x_6x_7 + 0.9x_7x_1 - 3.5x_1x_5 \\
 & \quad + 1.8x_6x_1 - 2.2x_7x_5 - 4.5x_6x_5
 \end{aligned} \tag{2}$$

최소값을 찾는 알고리즘을 구성하는데 있어 본 연구에서는 n개의 독립변수로 구성된 2차의 목적함수를 최소화시키는데 있어서 효율적인 성능을 발휘하는 SQP (Sequential quadratic programming)방법[13]을 사용하여 목적 함수를 최소화시키는 설계 변수 값을 도출하였고, 이를 Table 3에 나타내었다. 최적화 결과 차륜답면구배 0.187의 경우 임계속도가 9.4% 정도 증가하였다. 실제차량에서는 차륜답면구배가 0.05~0.3 정도까지 존재하므로, 이 영역에서 최적화 전후의 임계속도를 Fig. 10에 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 최적화 후 전체 차륜답면구배에서 임계속도가 상승하는 경향을 보인다.

Table 3. Optimization results

Variables	Unit	Initial	Optimized
$x_6$	%	100	110
$x_7$	%	100	150
$x_1$	%	100	130
$x_5$	%	100	130
Critical speed	km/h	381.6	417.6 (9.4% ↑)

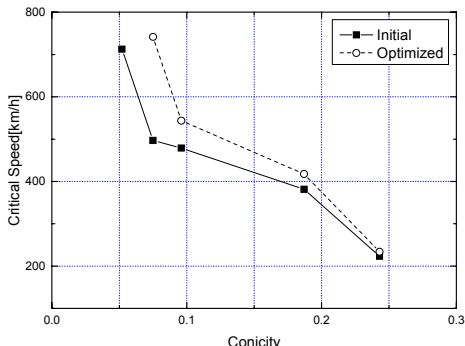


Fig. 10. Optimization result

### 3. 결론

본 연구는 KTX-산천 차량의 영업속도를 350km/h로 향상시키기 위한 연구의 일부로, KTX-산천 차량 편성의 임계속도를 향상시키기 위하여 수행되었다. KTX-산천 편성의 해석모형을 작성하고, 영업선에서 측정된 실케도 불규칙도를 이용하여 동역학해석을 수행하였다. 이 해석 결과를 영업운행 열차에서 측정된 진동가속도 값과 비교하여 해석의 정확도를 검증하였다.

영업운행 차량에서 측정된 차륜마모데이터를 이용하여 KTX-산천 객차대차의 임계속도에 영향을 미치는 현가장치 파라미터들에 대한 민감도 분석을 수행하였는데, 2차 요댐퍼  $x$ 방향 시리즈 강성, 안티롤바  $x(T)$ 방향 강성, 1차 탄성조인트  $x$ 방향 강성, 2차 요댐퍼  $x$ 방향 댐핑 계수 순으로 임계속도에 크게 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 이 설계변수들과 반응표면 분석법을 이용한 최적화를 통하여 임계속도를 향상시킬 수 있는 현가장치 설계 파라미터를 제시하였다. 최적화 결과 임계속도가 초기상태보다 9.4% 정도 증가함을 확인하였다. 최적화된 현가장치 설계 파라미터는 KTX-산천 영업속도를 350km/h로 향상시키기 위한 신규대차 설계 시 반영될 예정이다.

### References

- [1] A.A. Shabana, K.E. Zaazaa, H. Sugiyama, Railroad Vehicle Dynamics. CRC Press, pp. 24-31, 2008.
- [2] A.H. Wickens, Fundamentals of Rail Vehicle Dynamics: Guidance and Stability. Swets & Zeitlinger Publishers, pp. 6-10, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203970997>
- [3] H.M. Hur, W.H. You, "A Study on the Wear Characteristics of Wheel Profile for High Speed Rolling-Stock," Journal of the Korean Society for Railway, vol. 8, no. 5, pp. 477-482, 2005.
- [4] H.M. Hur, J.H. Park, W.H. You et al., "An Analysis on the Influence of Wheel Flange Wear on the Vibration of EMU," Journal of the Korean Society for Railway, vol. 12, no. 2, pp. 230-235, 2009.
- [5] C.S. Jeon, H.S. Cho, C.S. Park, S.W. Kim and T.W. Park, "Critical speed enhancement of a Korean high-speed train through optimization with measured wheel profiles," Proc IMechE Part F : J Rail and Rapid Transit(OnlineFirst), 2016. <http://pif.sagepub.com/content/early/recent> (August 2, 2016) DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0954409716662091>
- [6] DeltaRail Group Limited, VAMPIRE Pro V6.20 Users'

Manual, 2013.

- [7] National Instruments, DIAdem Users' Manual, 2013.
- [8] W.J. Chung, Y.S. Ham, "Investigation of the Track Irregularities Reconstruction Methods," Key Engineering Materials, pp. 1659-1664, 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.270-273.1659>
- [9] W.J. Chung, K.I. Han, "A Basic Investigation for Reconstruction Profile of Track Irregularities Measured by Chord Method," Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference, pp. 1086-1903, 2002.
- [10] R.L. Plackett, J.P. Burman, "The Design of Optimum Multifactorial Experiments," Biometrika, vol. 33, no. 4, pp. 305-325, 1946.  
DOI: <https://doi.org/10.1093/biomet/33.4.305>
- [11] S.H. Park, Design of Experiments. Minyoung Publishing Co., 2009.
- [12] R.H. Myers, D.C. Montgomery. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [13] S.S. Rao. Engineering Optimization: Theory and Practice. John Wiley & Sons, Inc. 1996.

---

**전 창 성**(Chang-Sung Jeon)

[정회원]



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

<관심분야>

철도차량 동역학, 기계공학