

## ◆ 특집 ◆ 철도차량의 주행안전성 평가 기법

# 곡선부 주행안전성 향상을 위한 윤축 조향 제어

## Wheelset Steering Control for Improvement a Running Safety on Curved Track

허현무<sup>1,✉</sup>, 안다훈<sup>1</sup>, 김남포<sup>1</sup>, 심경석<sup>2</sup>, 박태원<sup>2</sup>  
Hyun Moo Hur<sup>1,✉</sup>, Da Hoon Ahn<sup>1</sup>, Nam Po Kim<sup>1</sup>, Kyung Seok Sim<sup>2</sup>, and Tae Won Park<sup>2</sup>

1 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-Speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)

2 아주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ajou University)

✉ Corresponding author: hmhur@krrri.re.kr, Tel: +82-31-460-5245

Manuscript received: 2014.7.22 / Revised: 2014.8.1 / Accepted: 2014.8.7

*Lateral force of wheel is important parameter when we evaluate the safety of a railway vehicle on curved track. The lateral force of wheel is influenced by the steering performance of wheelsets. Generally, in passive type vehicles, the steering performance of wheelsets is influenced by the parameters like primary spring stiffness, wheel base, conicity of the wheel profile, etc. But, the steering performance of passive type vehicle has its limit. To overcome the limit of the steering performance of passive type vehicle, active steering technology is being developed. In this paper, we analyze the lateral force of wheel and the safety of the railway vehicle on curved track by adopting the active steering technology. As results of dynamic analysis for vehicle model equipped with active steering system, the lateral force of wheel is reduced and the safety is improved remarkably.*

Key Words: Curved Track (곡선구간), Running Safety (주행안전성), Active Steering Control (능동조향제어), Lateral Force (횡압)

### 기호설명

$2\delta$  = steering angle between front and rear wheelset

$2d$  = wheel base between front and rear wheelset

$R$  = radius of curved track

### 1. 서론

철도차량이 궤도를 주행할 때 주행 안전성 확보는 차량 운용측면에서 기본적인 요소이다. 동적

거동관점에서 보면 직선구간 주행 시에는 차량이 고속으로 주행하므로 차량 고유의 안정성과 관련된 사행동 및 진동 발생과 같은 불안정성이 중요한 인자가 된다. 한편, 곡선구간 주행 시에는 속도 제한으로 인하여 주행속도가 상대적으로 낮으나 곡선구간에 원활히 적응하여 안정된 주행상태를 구현할 수 있는 곡선추종성능이 중요한 인자가 된다. 철도차량의 주행안전성 및 동적 거동과 관련된 평가인자는 차량 진동특성, 차륜/레일간 작용력관련 횡압, 윤증감소율, 탈선계수 등을 들 수 있다.<sup>1</sup> 이중

곡선구간 주행 시 곡선추종성능과 관련된 인자는 차륜횡압, 탈선계수를 들 수 있다. 차륜 횡압은 곡선구간 주행 시 차륜에 작용하는 횡방향 작용력으로 내륜 차륜보다는 외륜 차륜에서 크게 발생한다. 탈선계수는 횡압을 차륜/레일 접촉부에 가해지는 수직방향 하중인 윤중으로 나눈 값으로서 횡압 증가에 따라 탈선계수도 증가하는 정비례 관계가 있다.<sup>2</sup>

이와 같이 횡압은 곡선구간 주행 시 차량 주행 안전성에 직접적인 영향을 주는 동시에 유지보수 측면에서는 차륜, 레일 마모, 손상, 소음 등을 발생시키는 주 요인이 되고 있다. 이로 인하여 차량, 궤도의 수명을 저하시켜 유지보수비용 증가의 요인이 되고 있다. 또한, 곡선구간 횡압 시험결과에 의하면 횡압은 운행속도에 정비례하고 곡선구간 길이가 짧을수록 증가한다고 알려지고 있다.<sup>3</sup>

따라서 곡선구간에서의 횡압은 운행속도, 주행 안전성, 유지보수 관점에서 매우 중요한 인자라 할 수 있다. 이러한 횡압은 윤축의 조향성능의 결과로서 윤축 조향성능은 차륜담면형상, 대차내 전후 윤축간 고정축거, 축상스프링 종강성과 같은 차량 설계인자에 의하여 좌우된다. 적절한 설계인자 선정을 통하여 조향성능은 향상되지만 성능 향상에는 한계가 있다. 즉, 수동형 차량에서 이러한 설계인자는 고속 주행안정성과도 관련되어 있기 때문에 조향성능과 고속 주행안정성을 동시에 충족시킬 수 있는 설계값을 선정하기에는 서로 상충되는 면이 있다.

이러한 수동형 차량의 조향성능 한계를 극복하기 위하여 제어기술을 응용한 능동조향기술이 연구되고 있다. 능동조향기술은 능동구동장치와 제어기술을 이용하여 곡선구간 주행 시 윤축을 곡선의 곡률반경에 부합하게 정렬시켜 차륜과 레일간에 발생하는 공격각을 저감함으로써 차륜 종방향 작용력 및 횡압을 획기적으로 저감시키기 위한 기술로서 국내에서도 이에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>4,6</sup>

따라서, 본 논문에서는 곡선구간 주행 시 차륜 횡압 저감을 통한 주행안전성을 향상시키기 위하여 능동조향기술을 적용한 연구를 수행하였다. 능동조향장치가 적용된 차량 동역학 모델을 구성하였으며 곡선구간 주행 시 윤축 조향제어를 통한 주행안전성 해석을 수행하였다.

## 2. 윤축 조향제어 해석

### 2.1 윤축 조향제어 원리

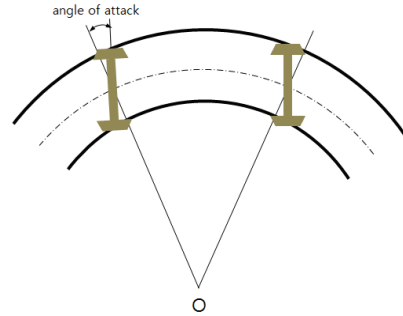


Fig. 1 Wheelset arrangement of a passive bogie

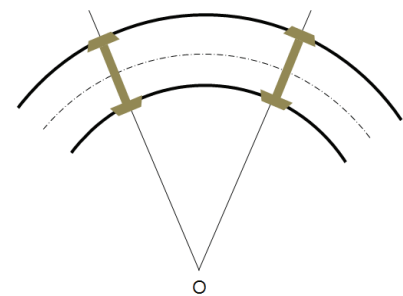


Fig. 2 Wheelset arrangement of an active steering bogie

일반적으로 기존 수동형 철도차량은 곡선구간 주행 시 Fig. 1과 같이 윤축이 곡선의 곡률반경 중심에 부합하게 정렬되지 않는다. 이는 윤축의 조향기능 부족에 기인한 것으로 차륜과 레일간에는 공격각(angle of attack)이 발생하게 된다. 이는 차륜과 레일간의 중, 횡방향으로 불필요한 작용력을 발생시켜 차륜과 레일의 마모를 발생시키며 동시에 극심한 곡선부 소음을 발생시키는 주 요인이 된다.

한편, 능동조향제어기술을 이용하여 Fig. 2와 같이 윤축을 곡선의 곡률반경 중심방향으로 정렬시키면 차륜과 레일간의 공격각은 “0”로 저감된다. 이때 이러한 윤축정렬상태를 Radial steering position이라 하며 공격각이 저감됨에 따라 차륜 종방향 작용력 및 횡압도 최소화 된다.

위와 같이 윤축을 Radial steering position으로 정렬시키기 위해서는 대차 내 전후 윤축간에 이뤄지는 부채꼴 모양의 각도인 조향각을 제어하여야 한다. 이때 요구되는 곡률반경에 따른 조향각 목표값은 Fig. 3과 같은 기하학적 관계로부터 식(1)과 같이 유도될 수 있다.<sup>4</sup>

$$2\delta = \frac{2d}{R} \tag{1}$$

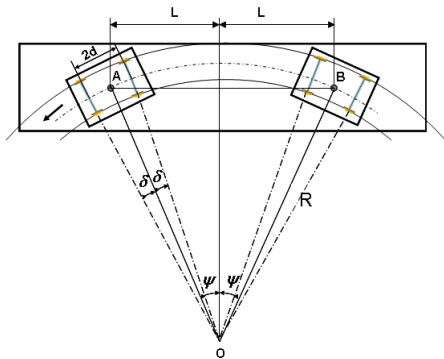


Fig. 3 Steering angle at radial steering position

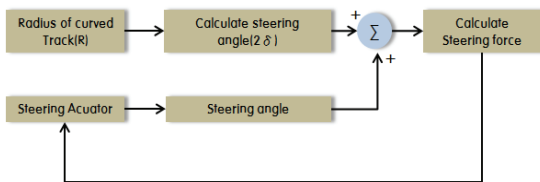


Fig. 4 Block diagram for active steering control

즉, 조향각 목표값( $2\delta$ )는 곡선구간 곡률반경( $R$ )과 대차내 전후 윤축간 간격인 wheel base( $2d$ )에 의하여 산출된다. 여기서 wheel base는 고정된 상수이며 곡률반경은 변수이므로 주행하는 곡선구간 곡률반경 정보만 알면 조향각 제어가 가능하다. Fig. 4는 능동조향제어를 위한 블록다이어그램을 나타낸다.

### 2.2 윤축 조향제어 해석조건

윤축 조향제어에 의한 곡선구간 주행안전성 분석을 위하여 동역학 해석을 수행하였다. 해석 프로그램은 다물체 동역학 해석프로그램인 VI-Rail을 사용하였다.

차량 모델은 전동차 부수차량을 대상으로 수동형차량과 능동조향장치가 적용된 능동조향차량, 2가지 모델로 구성하였다, 능동조향장치는 대차프레임 좌우에 장착되며 전후 윤축 액슬박스에 연결되어 윤축의 요운동을 구현한다. 그리고 차량하중 조건은 공차상태로 하였다.

궤도 모델은 궤도틀림이 있는 곡률반경 300m, 캔트140mm인 곡선구간으로 모델링 하였다. 궤도틀림은 실선로에서 측정한 실데이터를 적용하였다.

Fig. 5와 Table 1은 능동조향장치가 적용된 능동조향대차 모델과 물성치를 나타낸다. Fig. 6은 곡률반경 300m인 곡선구간 궤도모델을 나타낸다.

능동조향제어기는 Fig. 4와 같은 제어흐름도에

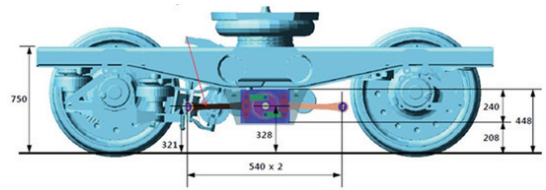


Fig. 5 Active steering bogie model

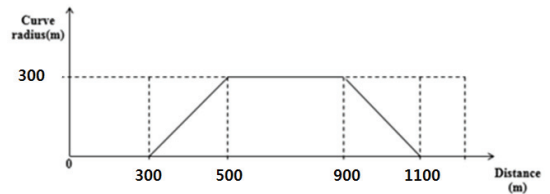


Fig. 6 Track model (R300)

Table 1 Specifications of the vehicle model

Parameter	Specification
Mass of carbody(kg)	22,100
Mass of wheelset(kg)	1,610
Mass of bogie frame(kg)	3,880
Moment of inertia of carbody(kg <sup>m</sup> <sup>2</sup> ): roll/pitch/yaw	50,800/667,700 /667,000
Moment of inertia of wheelset(kg <sup>m</sup> <sup>2</sup> ): roll/pitch/yaw	830/240/830
Moment of inertia of bogie(kg <sup>m</sup> <sup>2</sup> ): roll/pitch/yaw	1,572/1,940/3,300
Stiffness of primary spring(N/m): x/y/z	1.7E6/3.8E6 /0.81E6
Damping of primary spring(Ns/m): x/y/z	1700/3800/810
Stiffness of secondary spring(N/m): x/y/z	0.14E6/0.14E6 /0.39E6
Damping of lateral damper(Ns/m)	0.096E6
Lateral semi-spacing of primary spring(m)	1.05
Lateral semi-spacing of secondary spring(m)	1.125
Half distance between front and rear bogie centers(m)	6.9
Bogie semi wheelbase(m)	1.05
Wheel radius(m)	0.43
Wheel profile	1/20 wheel
Rail Profile	60kg Rail

따라 PID 제어기법을 적용하여 구현하였다. 목표조향각 설정을 위한 곡선구간 인식 및 곡률반경 정보 획득을 위하여 곡선구간 곡률반경 추정알고리즘을 적용하였다.<sup>7</sup> 그리고 곡선구간 주행 속도는 60km/h 로 하였다.

Table 2 Analysis results for active steering control

parameter	Passive	Active
Steering angle(deg)	0.15	0.40
Angle of attack(deg)	0.31	0.05
Wear index	172.4	31.1
Crvature(1/km)		3.347

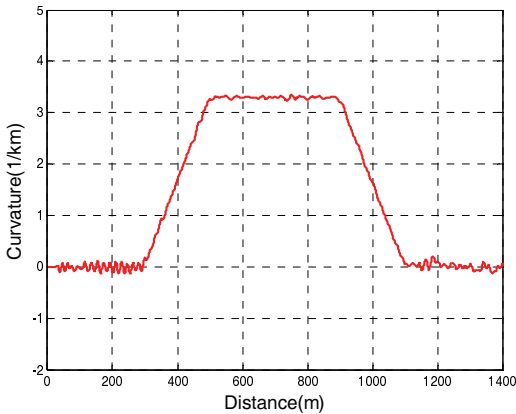


Fig. 7 Estimated curvature

### 3. 주행안전성 해석 결과

#### 3.1 윤축 조향제어 성능

Fig. 7 ~ Fig. 10은 곡률반경 300m인 곡선구간 주행 시 수동형 차량과 능동조향차량의 윤축 조향성능을 해석한 결과이다.

Fig. 7은 곡률반경 추정알고리즘을 적용하여 주행 중 통과하고 있는 곡선의 곡률반경을 실시간으로 추정한 해석 결과이다. 곡률반경 300m인 곡선구간의 경우 curvature에 대한 참값은 3.333 임에 비하여 해석결과는 3.347로서 오차는 불과 0.4%에 불과하였다. 이렇게 양호하게 추정된 곡률반경값을 제어기에 입력하여 윤축의 조향제어를 수행한 결과 Fig. 8과 같이 조향각은 수동형이 0.15deg에 불가함에 비하여 능동조향의 경우에는 0.4deg로 윤축의 조향각 구현 성능이 크게 향상되었다. 이 값은 곡률반경 300m인 곡선구간의 경우, 식(1)에 의하여 산출된 목표조향각은 0.4deg임을 고려하면 매우 정확하게 부합한 조향각 구현성능을 보였다고 할 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 전위대차 외륜 차량의 공격각과 마모지수를 해석한 결과이다. 공격각은 수동형이 0.31deg임에 비하여 능동조향의 경우에는 0.05 deg로 현저하게 저감되었다. 마모지수 또한 수

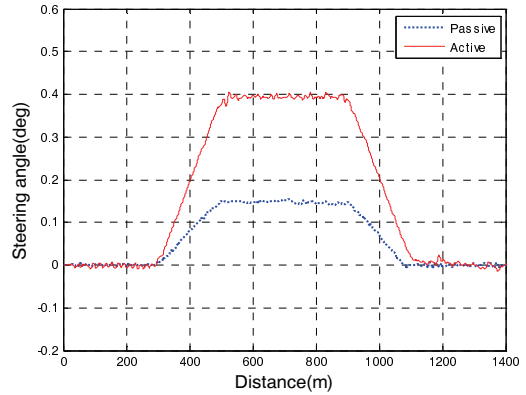


Fig. 8 Steering angle

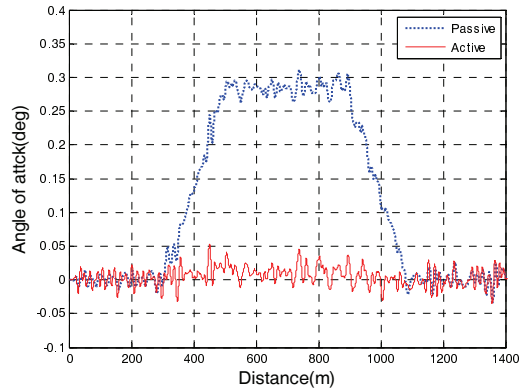


Fig. 9 Angle of attack

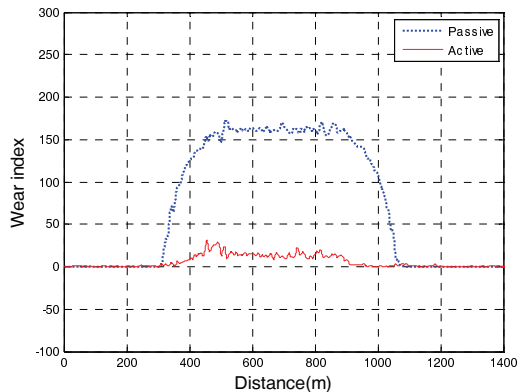


Fig. 10 Wear index

동형이 172.4, 능동조향 시에는 31.1로서 크게 저감되고 있음을 볼 수 있다. 따라서 능동조향기술 적용에 따라 윤축의 조향 성능은 수동형 차량에 비하여 크게 향상되었음을 알 수 있다.

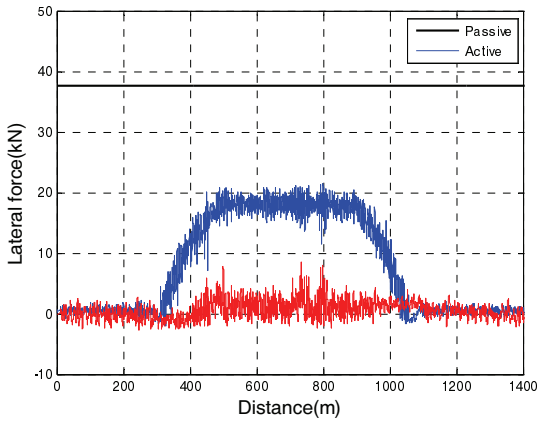


Fig. 11 Lateral force of wheel

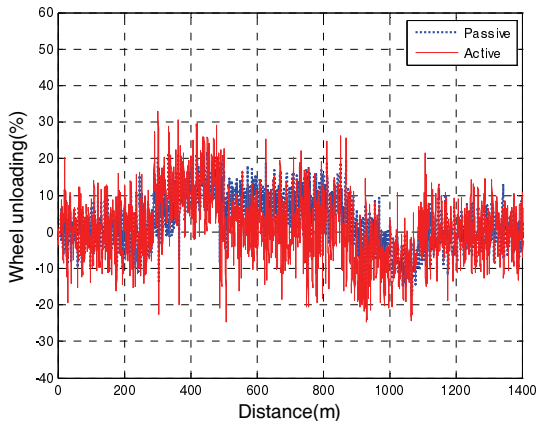


Fig. 12 Wheel unloading

### 3.2 주행안전성

Fig. 11 ~ Fig. 13은 “철도차량 안전기준에 관한 규칙” 주행안전기준에 의거하여 주행안전성을 해석한 결과이다.<sup>1</sup>

Fig. 11은 전위대차 외궤차륜에 가해지는 횡압을 해석한 결과이다. 수동형이 21.6kN임에 비하여 능동조향 시에는 8.4kN으로 약 61%의 횡압 저감 효과가 나타났다. 즉 윤축 능동조향 제어에 따라 차륜과 레일 간의 공격각 발생이 저감되고 그로 인하여 곡선부 외궤 차륜의 횡압이 현저히 저감됨을 알 수 있다.

Fig. 12는 곡선구간 내측 차륜의 윤증감소율을 해석한 결과이다 수동형이 21.9%임에 비하여 능동조향 시에는 32.6%로 증가하였다. 이를 “철도차량 안전기준에 관한 규칙” 주행안전기준 제 31조에 명시된 통계분석 방법을 적용하여 분포를 그리면

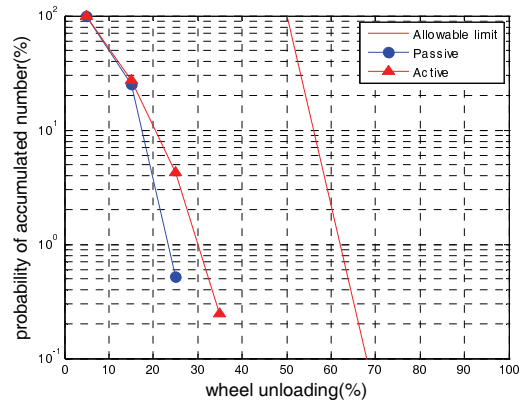


Fig. 13 Statistical analysis for wheel unloading

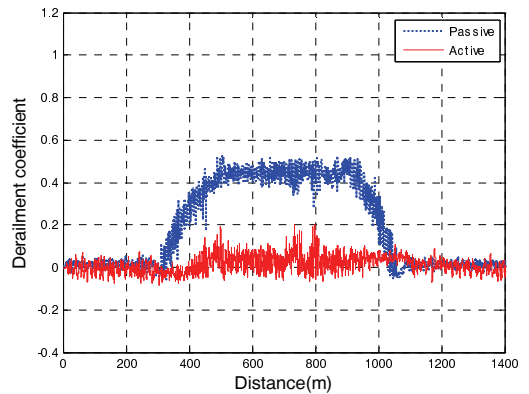


Fig. 14 Derailment coefficient

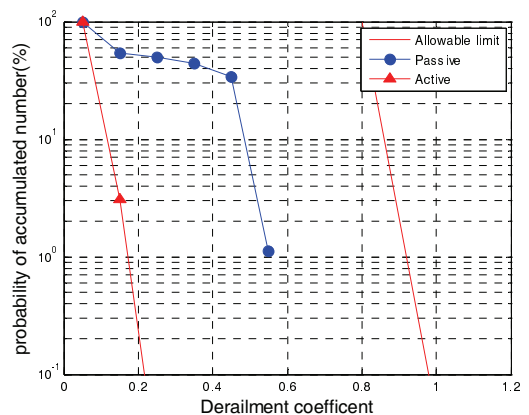


Fig. 15 Statistical analysis for derailment coefficient

Fig. 13과 같다. 능동조향 시, 수동형에 비하여 윤증감소율이 다소 증가하였으나 허용기준치와 비교하면 충분히 안전한 영역에 분포하고 있다. 윤증

감소율이 능동조향 시, 수동형에 비하여 다소 증가한 것은 조향시스템 적용에 따라 수동형에 비하여 기구학적으로 구속되어 자유도가 제한됨에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 14와 Fig. 15는 곡선구간 외측 차륜의 탈선계수 해석결과와 주행안전기준 제 32조에 의거하여 분석한 탈선계수에 대한 통계분석결과를 나타낸다. 탈선계수는 수동형이 0.53임에 비하여 능동조향 시에는 0.2로 현저히 저감되었으며 통계분석결과를 보더라도 허용기준에 비하여 현저히 안정된 영역에 분포하고 있음을 알 수 있다.

따라서 곡선구간 주행 시 윤축 능동조향 제어에 의한 주행안전성은 현저한 차륜 횡압 저감 효과에 기인하여 크게 향상되었다고 판단된다.

#### 4. 결론

곡선구간 주행 시 차륜 횡압 저감을 통한 주행안전성을 향상시키기 위하여 윤축 능동조향제어를 통한 차량 주행안전성을 분석하였다. 능동조향장치가 적용된 차량 동역학 모델을 구성하였으며 곡률반경 300m인 곡선구간 주행 시 윤축 조향제어를 통한 조향성능과 주행안전성을 분석하였다.

능동조향제어에 의하여 대차의 조향각 구현 성능이 수동형 차량에 비하여 현저히 개선되었다. 그로 인하여 곡선구간 외측 차륜의 공격각, 마모지수도 현저히 저감되어 조향성능이 크게 향상됨을 확인하였다.

주행안전성관련 횡압은 수동형에 비하여 약 61% 저감되어 매우 우수한 횡압 저감 효과를 보였으며 탈선계수 또한 동등 수준으로 저감되었다. 윤축감소율은 다소 증가하였으나 허용기준치와 비교하면 충분히 안전한 영역에 분포하고 있다.

따라서 곡선구간 주행 시 윤축 능동조향 제어에 의한 주행안전성은 수동형 차량에 비하여 크게 향상될 것으로 기대한다. 이에 대한 실험적 검증은 추후 시제대차 제작을 통한 시험선 성능시험을 통하여 추진될 계획이다.

#### 후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(과제명: 13RTRP-B072165-01)에 의해 수행되었습니다.

#### REFERENCES

1. Railroad Safety Law, "Rule about Safety Level of Rolling-Stock," Ministry of Land, Transport and Marine Affairs, Notification, No. 35, 2008.
2. Ham, Y. S., Lee, D. H., Kwon, S. J., and Seo, J. W., "The Experimental Study about a Correlation between the Derailment Coefficient of the Railway Vehicle and Track Alignment," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 27, No. 8, pp. 7-12, 2010.
3. Ham, Y. S., "A Study on the Lateral Force Variation of Tilting Vehicle when Speed-Up in Curved Line," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 677-678, 2008.
4. Hur, H. M., Yoo, W. H., Kim, M. S., and Kim, N. P., "Steering Performance Analysis on Practical Active Steering Control Strategy," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 1045-1046, 2010.
5. Hur, H. M., Park, J. H., and Kim, N. P., "A Study on the Wheelset Steering Angle of the Rolling-Stock," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 1541-1542, 2011.
6. Hur, H. M., Yoo, W. H., Shin, Y. J., Sim, K. S., and Park, T. W., "Analysis on the Actuator Force of Active Steering Bogie for Radial Steering," Proc. of KSPE Spring Conference, Paper No. 994, 2014.
7. Hur, H. M., Park, J. H., and Kim, H. J., "Experimental Study on the Curvature Estimation of the Railway Curve," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 1039-1040, 2010.