차세대 고속열차(HEMU-430X)의 주행 안전에 따른 탈선평가

An Evaluation on Derailment according to Running Safety of Next-Generation High Speed Train (HEMU-430X)

심경석 · 박태원* · 이진희 · 정기범

Kyung-Seok Sim · Tae-Won Park · Jin-Hee Lee · Gi-Beom Jeong

Abstract With the cooperation of many research institutes and railway companies, the next generation high speed train is under development for many years. To confirm the safety requirement of the developed high speed train, multibody dynamic analysis is implemented. Through this analysis, railway derailment and lateral guiding force simulation was evaluated according to UIC code 518 OR for international railway vehicle. Test results were compared by limit value of safety criteria. Safety evaluation results, according to international standards, would provide basic reference data of ensuring safety speed and track radius curve. The safety of the train at the maximum speed is verified by numerical analysis results.

Keywords : Next Generation High-speed Train, Dynamic analysis, Derailment, Safety, UIC 518

초 록 차세대 고속열차(HEMU-430X)는 연구 지원과 많은 연구 기관의 노력으로 다년간 개발 중인 한국형 고속열차이다. 열차 모델을 다물체 동역학 해석 모델로 개발하여 차량-궤도 안전성 해석을 수행하였다. 이를 통해 국제 철도 안전 기준인 UIC code 518 OR에 따라 탈선 평가와 횡압의 제한 값을 확인하였다. 국제 기준에 따른 안전성 평가를 통하여 앞으로 본선 운전에 필요한 안전 확보 기본 자료를 생성하였으며 최고 속도에서의 안전성을 확인하였다.

주요어 : 차세대 고속열차, 동역학 해석, 탈선평가, 안전성, UIC 518

1. 서 론

최근 철도 선진국에서 350km/h 이상의 고속열차를 개발하였으며, 이러한 세계적 추세에 발맞추어 대한민국에서도 차세대 고속열차(HEMU-430X)를 최고 시험속도 430km/h를 목표로 개발하고 있다. 철도차량이 고속으로 주행하면 궤도 불규칙, 궤도 곡선반경, 궤도 틀림, 캔트(Cant) 등에서 차륜과 궤도 사이에서 상호작용을 일으키고 플랜지 접촉(Flange contact)에 의하여 주어지는 힘으로 횡압이 많이 증가하거나 또는 윤증 감소가 발생하여 탈선 위험도는 증가하게 된다[1,2]. 현재 탈선평가를 위한 실험적 방법으로 국내에서는 주로 스트레인 게이지를 차륜에 부착하여 측정하는 방법을 채택하고 있으며 주행 중에 받는 차륜 수직 방향의 하중과 수평 방향의 하중을 측정하여 탈선계수를 측정한다[3,4]. 이와 같은 시험 방법은 실제 차량이 개발되어 시험 운전 혹은 정상 운행 중에 측정되는 실험 방법으로 비용이 많이 들고 실제 차량이 제작된 후에 측정된다. 하지만 가상 해석을 통한 탈선평가는 다양한 조건의 선로 및 차량 동특성을 변화시켜가며 안전성 측면을 검토 할 수 있다. 가상해석을 통한 탈선 안전성을 평가한 연구사례는 다양하다. 기존 경부고속선

선로의 조건 변경과 차량 거동에 따른 안전성 관계가 연구되었고[5,6] 경부고속선 구간에서 주행속도 상승에 따른 탈선 안전 관계가 연구되었다[7,8]. 또한 차량 답면구배 변화에 따른 주행 안전성 연구가 진행되었다[9]. 이러한 연구는 기존 철도차량의 안전성 평가로 현재 개발되는 차세대 고속열차(HEMU-430X)의 동특성과 차량 편재에 있어서는 차이가 있다. 또한 차세대 고속열차(HEMU-430X)가 목표로 하는 최고 운영 속도(370km/h)와 최대 시험속도(430km/h)는 기존 고속열차(KTX)의 운영속도와 최대속도보다 증가하여 개발 중이며, KTX가 운영 중인 경부고속선에서 시험 주행해야 하기 때문에 주행 시험 전에 차세대 고속열차(HEMU-430X)에 대한 차량-궤도 안전성을 검토해야 한다. 본 연구에서는 차세대 고속열차(HEMU-430X)를 다물체 동역학 해석 도구인 ADAMS/Rail을 이용하여 개발하였고 차륜/궤도의 접촉에 의한 작용력 이론 식을 바탕으로 UIC 518[10]과 EN14363[11]에 따라 탈선평가를 수행하였다. 탈선평가 전에 개발된 모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 실제차량을 이용한 풀러리그 시험 결과와 해석적 검증을 선행하였다. 현재 개발 중인 차세대 고속열차(HEMU-430X)의 탈선해석을 기존 경부고속선 구간에서 살펴보았으며, 열차의 속도변화와 곡선반경 변화에 따른 주행 안전성 해석을 하였다. 해석 결과를 바탕으로 본선 운전에 필요한 안전 확보 기본 자료를 생성하여 곡선 선로를 통과하는 철도차량의 최대 속도와 최소 곡선반경을 제시하였다.

*Corresponding author

Tel.: +82-31-219-2524, E-mail : park@ajou.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2012

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.4.343

2. 탈선평가 해석

2.1 탈선계수

차량이 궤도를 따라 주행할 때 차륜은 차량의 하중에 의한 수직 방향의 힘이 발생할 뿐만 아니라 선로 불규칙과 사행동으로 수평 방향의 힘이 작용한다. 이 수직 방향에 대한 수평방향의 힘의 비를 탈선계수로 한다. 탈선계수는 나달(Nadal)의 식으로 정량적 수치로 한계값을 제시하고 있다. 나달의 식은 Fig. 1과 같은 차륜/궤도 간의 작용력에 의해 표현되며 식 (1)과 같다[12].

$$\begin{aligned} Q &= N \sin(\delta) - T_y \cos(\delta) \\ P &= N \cos(\delta) - T_y \sin(\delta) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 δ 는 플랜지 각도(Flange angle)를 말하며 식 (1)의 두 식을 수평력(Q)에 대한 수직력(P)으로 나누면 식 (2)와 같다.

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan(\delta) - (T_y/N)}{1 + (T_y/N)\tan(\delta)} \quad (2)$$

$$T_{y\max} = \mu N \quad (3)$$

식 (2)의 접선력(T_y)이 식 (3)과 같이 μN 에 접하고, 차륜의 접착각(μ)이 커지게 되면 탈선계수(Q/P)의 값은 가장 작은 값을 취한다. 즉 이러한 극한상태에서 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan(\delta) - \mu}{1 + \mu \tan(\delta)} \quad (4)$$

본 연구에서는 탈선계수(Q/P)의 제한 값을 UIC 규정에서 제시한 0.8로 적용하였고 2m 이동에 대한 탈선계수의 평균에 대하여 평가하였다.

Fig. 1 Forces on the wheel/rail contact point

2.2 횡압

정적인 윤증이 차량의 차중만큼만 검출된다면 횡압은 0이라고 볼 수 있다. 그러나 차량이 주행하게 되면 윤증감소가 발생하고 아울러 차륜 플랜지(Flange)와 궤도의 접촉으로 횡방향 하중이 발생하는데 이것을 횡압이라고 부른다[13]. 열

차가 곡선부를 주행할 때 발생하는 횡압의 영향은 직선 주행보다 크다. 곡선부 통과 시 발생하는 원심력에 수평 방향 차륜 충격이 발생하게 되고 그에 따라서는 횡압이 윤증보다 커지게 되면 탈선의 위험성은 그만큼 높아지게 된다. UIC에서는 이와 같은 횡압을 안전성 측면에서 제한하고 있으며 식 (5)와 같이 제한 값을 제시하고 있다. 이 값을 기준으로 차세대 고속열차(HEMU-430X) 모델에서 횡압의 변화를 검토하였다.

$$(\sum Y)_{2m} = K(10 + P_0/3) \quad (5)$$

여기서 $(\sum Y)_{2m}$ 은 1축당 횡압(sum of guiding force)을 의미하고 2m 이동에 대한 횡압의 평균을 의미하며 P_0 는 축중(axle-load)을 의미한다. K 는 보정 계수이며, 화차의 경우 0.85, 견인차, 객차의 경우 1을 적용한다. 본 연구에서는 UIC 518 규정에 따라 1을 적용하였다[10,11].

3. 철도차량 해석 모델

3.1 차세대 고속열차 해석 모델

본 연구에서는 개발 중인 차세대 고속열차(HEMU-430X)의 동특성 정보를 상용 소프트웨어인 ADAMS/Rail에 적용하여 차량 모델을 개발하였다. KTX, KTXⅡ는 동력집중식으로 전두차의 동력이 집중되어 차량을 견인하는 반면 차세대 고속열차(HEMU-430X)는 동력 분산형으로 각 대차의 동력원에 의해 주행하는 것이 특징이다. 구성된 모델의 차량 편성을 Fig. 2에 나타내었고, Tc(객차) + M1~M4(동력객차) + Mc(동력차)로 구성된 6량 1편성 해석 모델이다. 대차는 동력차의 동력대차 2대, 동력객차의 동력대차 8대, 객차의 대차 2대로 구성되어 있으며 각 차량은 분산형 대차로 구성되어 있다. Tc 차량을 제외하고 모두 동력대차로 구성되어 있다. 차세대 고속열차(HEMU-430X) 시제차량의 질량 및 관성정보는 부록(Table 3~4)에 별도로 표시하여 제시하였다. 본 모델에 적용된 동특성 정보는 제작사에서 제공되었으며, 각 대차 모델의 구성은 부록(Fig. 11)과 같이 2가지 종류의 대차로 모델링되었다. 두 대차의 차이는 요댐퍼 위치이며, 전두부 형상 때문에 요댐퍼가 단방향으로 된 Tc차량의 Fig.2의 No.1 대차와 Mc차량의 No.12 대차는 부록(Fig. 11(a))와 같고 요댐퍼가 양방향으로 된 대차는 Fig.2의 Bogie No. 2~11이고 부록(Fig. 11(b))와 같다. 동력원이 포함된 동력차(Mc)와 동력객차(M1~M4)가 객차(Tc)에 비하여 질량이 높음을 부록(Table 3~4)에서 확인 할 수 있다. 차륜과 대차는 1차 현가장치로 연결되어 코일스프링과 수직댐퍼로 구성되며 차량과 대차는 2차 현가장치로 연결되어 공기스프링, 횡댐퍼, 수직댐퍼, 요댐퍼로 구성된다. 개발된 모델은 차체와 대차 사이를 연결해 주는 Z-link의 모델을 추가하여 차체와 대차 사이의 기구학적 구조를 나타내어 상대운동이 가능토록 하였다. 대차의 주요 구성에 대한 용어는 Fig. 3에 나타내었다. 차량의 주행방향은 Fig. 2와 같이 Mc 차량 방향이다.

Fig. 2 Numerical model of next-generation high-speed train

Fig. 3 Representation of 1st and 2nd suspensions of a bogie model

3.2 차륜/선로 모델

고속열차에 장착될 차륜의 모델과 경부고속선 궤도 모델의 단면 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 차륜 모델은 EN13715[14]에 제시된 S1002 프로파일을 사용하였고 궤도 형상은 UIC60의 1/20 프로파일을 사용하였다.

불규칙 선로 모델은 고속선으로 운영 중인 풍세교-비룡터널 구간 중 곡선 반경(R) 7,000m인 첫 번째 구간의 실제 측

Fig. 4 shape model of a wheel and a rail (S1002/UIC60)

(a) Lateral irregularity of a right rail profile

(b) Lateral irregularity of a left rail profile

Fig. 5 Lateral irregularities of rail profiles

정값을 이용하였다. EN14363[11] 규정에 따라 실측선로 데이터를 사용하였고 궤도검측차(EM-120)로 검측된 선로 자료를 이용하여 불규칙 데이터를 모델링하였다. 궤도불규칙 데이터의 일부를 Fig. 5에 나타내었고 좌, 우측 수평 방향의 선로 불규칙을 보여준다.

3.3 해석조건

국제 철도 기구인 UIC에서 제정한 UIC 518[10]은 철도차량 동특성에 대한 차량 시험 및 승인 절차서로 차량의 동적 거동 안전평가, 선로피로, 승차감 시험에 대하여 규정하고 있다. 또한 EN14363[11]에서도 동일한 내용으로 철도차량의 동적특성 안전평가를 규정하고 있다. 탈선계수 및 횡압을 평가하는 해석 조건은 UIC 518 규정과 EN14363 규정에 따라 결정하였다. 본 규정에서 제시하고 있는 탈선계수 및 횡압에 의한 제한조건을 선정하여 곡선 통과 주행 속도와 곡선 반경 변화에 따른 열차 주행 안전성 경향을 확인하였다.

개발 중인 차세대 고속열차(HEMU-430X)의 운행속도는 시속 370km이며 최대속도는 400km/h이다. 또한, 시험 최대속도는 시속 430km이다. 본 연구에서는 다음 3가지 속도에 대하여 안전성 해석을 수행하였다. 차세대 고속열차(HEMU-430X)는 개활지에서 시험 운행할 것이며 직선 선로 및 곡선 반경(R) 7,000m 이상에서 운행할 것이다.

차세대 고속열차(HEMU-430X)의 주행속도에 따른 곡선

Table 1 Analysis condition of vehicle's speed variation

	Case 1	Case 2	Case 3
Running Speed (km/h)	370	400	430
Simulation Speed (km/h)	403	440	473
Curve Radius (m)	5000, 6000, 7000, 8000, 9000		
Cant (mm)	130		

반경의 영향을 분석하기 위하여 광명역을 기점으로 하행선 120km 부근의 실측 선로데이터를 이용하였고[15] 곡선 반경(R) 7,000m를 기준으로 $\pm 1,000\text{m}$, $\pm 2,000\text{m}$ 로 변경하여 5가지 곡선 선로에 대한 선로 반경을 가정하였고 캔트의 변화는 동일하다고 가정하여 해석하였다. 속도 변화에 따른 해석 조건을 Table 1에 나타내었고 해석속도는 목표속도에 10%를 상승하여 안전성을 고려하였다.

4. 해석 모델 검증

해석 전에 개발된 모델의 적정성을 확인하기 위하여 롤러리그 시험을 이용한 시험 결과와 비교하였다. 시험 방법은 차량이 롤러리그 위에서 일정속도로 주행 중 차륜에 롤러리그의 yaw 방향으로 6Hz의 가진 주파수로 가진 후 차량의 안정화 정도를 확인하는 실험이다. 실제 차량 중에서 M3 차량으로 롤러리그 가진 시험을 하였다. 시험 결과, 차체와 대차가 차륜에서 전달된 가진력에 의해 횡방향으로 거동하였

Fig. 6 Comparison of lateral accelerations of roller-rig test and simulation

Table 2 Comparison of lateral acceleration of roller-rig test and simulation result

Section		Maximum acceleration	RMS of acceleration
Car-body	Test	0.56	0.21
	Simulation	0.60	0.25
Bogie	Test	1.43	0.75
	Simulation	1.48	0.67

고 가진 종료 후 차량이 공진하지 않고 안정화되었다. Fig. 6은 시험 결과와 해석 결과의 일부로 주행속도 370km/h에서의 결과이다. Fig. 6(a)는 차체 횡방향 가속도의 경향을 나타내며, Fig. 6(b)는 대차 횡방향 가속도의 경향을 나타낸다. 결과로부터 가진 후 차량의 횡방향 안정성을 확인 할 수 있으며, 시험 결과와 해석 결과의 경향이 비슷한 것을 확인할 수 있다. 횡방향 가속도에 대한 최대값과 RMS값을 Table 2에 나타내었다.

5. 해석 결과

철도차량 주행 안전을 위한 동역학 해석은 UIC 규정에서 제시하고 있는 탈선계수와 횡압에 대하여 각각 살펴보았다. 탈선계수는 플랜지(Flange) 타오르기 탈선 등에 대한 안전도를 평가한 것이고, 횡압은 궤도 구조물이 버티는 지지강도 측면에서 해석한 것이다. 해석결과 의 최대값을 그림을 통하여 나타내었으며 규정에서 제시하고 있는 제한 값과 비교하여 곡선 주행에서의 목표속도에 대한 안전성 결과를 비교하였다. 안전기준은 UIC 518에 따라 결과를 분석하였다.

5.1 탈선 평가 결과

탈선이 시작될 때 차륜은 플랜지(Flange) 부분에서 궤도의 한 점에서 접촉하면서 궤도를 올라타게 되는데, 이와 같은 현상에 대한 탈선계수의 비를 UIC 규정에서는 0.8로 제한하고 있다. 차세대 고속열차(HEMU-430X)의 탈선계수의 영향을 조사하고자 실측선로에서 곡선반경을 변경하면서 차량 속도에 따른 결과를 확인하였다. Fig. 7에서는 차량 속도에 따른 각 곡선반경에서의 탈선도를 보여준다. 그래프 하단에 표현한 Bogie No.는 Fig. 2에서 제시한 차량 모델링의 대차 번호로 각 대차의 탈선도를 도식적으로 나타내었고, Fig. 2의 가로축에서 Bogie No. 12에 해당하는 그림이 Mc 차량의 전두 대차로 주행 방향이 된다.

각 차량에서 후미 대차(Bogie No. 1,3,5,7,9,11)의 탈선계수가 전두 대차(Bogie No. 2,4,6,8,10,12)에 비하여 다소 높은 값을 보이고 있지만 탈선계수의 제한값에는 미치지 못함을 확인할 수 있다. 이는 곡선주행 시 전두대차 차륜의 플랜지 접촉(Flange contact)에 의한 차량 거동이 후미대차 주행에 영향을 미치게 되어 후미대차 차륜의 횡압 증가로 나타나며, 따라서 탈선계수가 증가하게 된다[16,17]. 또한 각 차속에 대하여 곡선 반경이 커질수록 탈선계수는 작아지는

(a) Derailment graph at train speed 370km/h

(b) Derailment graph at train speed 400km/h

(c) Derailment graph at train speed 430km/h

Fig. 7 Comparison of derailment coefficient at train speed variation

경향을 보이고 있다. 각 차량에 대한 탈선계수는 부록(Table 5~7)에 별도로 표시하여 결과값을 제시하였다. 또한 차량 일부(Mc차량, Tc차량)의 탈선계수를 곡선반경과 주행속도에 대한 결과로 Fig. 8에 나타내었다. 탈선 해석 결과 M1~M4 차량도 Fig. 8과 유사한 결과를 보인다.

Fig. 8에서는 같은 곡선반경에서 주행속도가 작을수록 탈선계수의 크기는 작게 나타나며 이는 곡선주행 시 속도가 작을수록 주행 저항이 작음을 나타낸다. 또한 Fig. 7과 동일하게 곡선반경이 커질수록 탈선계수는 점차 작아지며 모든 결과는 탈선계수의 제한값을 만족하고 있다.

(a) Derailment coefficient of Mc car

(b) Derailment coefficient of Tc car

Fig. 8 Comparison of derailment coefficient according to radius curve variation

5.2 횡압 평가 결과

UIC에서는 차축의 힘과 계수를 선정하여 제한 값을 제시하고 있으며, 차량 중량 변화에 따라 횡압의 제한은 결정될 것이다.

차세대 고속열차(HEMU-430X)의 횡압의 영향을 조사하고자 실측선로에 곡선반경을 변경하면서 차량 속도에 따른 결과를 확인하였다. Fig. 9에서는 차량 속도에 따른 각 곡선반경에서의 횡압의 변화를 보여준다.

해석 결과, 횡압 역시 탈선계수 결과와 유사한 경향의 그래프를 보인다. 각 차량에서 후미 대차(Bogie No. 1,3,5,7,9,11)의 횡압이 전두 대차(Bogie No. 2,4,6,8,10,12)에 비하여 다소 높은 값을 보이고 있다. 이는 곡선선로 통과 시 전두대차 차륜의 플랜지 접촉(Flange contact)에 의한 차량 거동이 후미대차 주행에 영향을 미치게 되며 후미대차 차륜의 횡압 증가로 해석될 수 있다[16,17]. 또한 Mc차량(Bogie No.11~12)의 횡압이 후미차량의 횡압보다 다소 높은 값을 보이고 있다. 곡선반경이 작아질수록 제한값에 근접하는 결과로 나타났으며, 곡선반경에 따라 제한값을 벗어나는 차량이 발생하였다. 각 차량에 따라 횡압 결과를 부록(Table 8~10)에 별도로 표시하여 결과값을 제시하였다. 또한 차량 일부(Mc 차량, Tc 차량)의 안전성을 곡선반경과 주행속도에 대한 결과로 Fig. 10에 나타내었다. 횡압 해석결과 M1~M4

(a) Lateral guiding force at train speed 370km/h

(b) Lateral guiding force at train speed 400km/h

(c) Lateral guiding force at train speed 430km/h

Fig. 9 Comparison of lateral guiding force at train speed variation

차량도 Fig. 10과 유사한 결과를 보인다. Fig. 10에서는 같은 곡선반경에서 주행속도가 작을수록 횡압의 크기는 작게 나타났다. 곡선반경(R) 7,000m에서는 속도 370km/h에서 기준을 만족하였으며 곡선반경(R) 8,000m에서는 속도 400km/h에서 기준을 만족하고, 곡선반경(R) 9,000m에서는 모든 속도에 대하여 만족하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 개발 중인 차세대 고속열차(HEMU-430X)의 경부고속선에서 차량-레도 상호 안전성을 평가하였다. 고속철도차량의 제원을 이용하여 해석 모델을 개발하였으며

(a) Lateral guiding force of Mc car

(b) Lateral guiding force of Tc car

Fig. 10 Comparison of lateral guiding force according to radius curve variation

KTX 차량이 주행하고 있는 실측선로를 해석 모델에 적용하였다. 주행 시 곡선부 제한 속도를 평가한 것으로 분석결과에 대한 차량 속도 제한을 제시하고자 한다. 본 연구 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 탈선계수에 의한 평가는 어떠한 상황에서도 만족함을 확인할 수 있었다. 이는 곡선반경 주행 시 차륜의 플랜지 접촉(Flange contact)에 의해 수평력과 수직력 상승이 동시에 일어나는 것으로 짐작할 수 있고, 탈선평가는 다양한 방법에 의해 수행되어야 함을 나타낸다.

(2) 곡선반경이 커질수록 주행 안전성은 좋아지는 것으로 나타났다으며, 개활지 직선선로에서는 최고 시험속도 430km/h에서 주행할 수 있는 결과를 얻었다.

(3) 차세대 고속열차(HEMU-430X)의 경부고속선 주행 시, 실제 목표 운영 속도인 370km/h와 곡선 반경(R) 7,000m에 대하여 국제규정을 만족하는 것을 확인 할 수 있으며, 이를 통하여 운영속도에 대한 안전성을 확보하였다.

(4) 차세대 고속열차(HEMU-430X)의 경부고속선 주행 해석은 UIC 518 기준에 따라 평가하였고 횡압 평가 결과, 곡선 반경(R) 7,000m, 8,000m, 9,000m에 대한 주행속도 370km/h, 400km/h, 430km/h(주행속도에 10% 상승한 407km/h, 440km/h, 473km/h에서 주행 해석 결과임)의 주행 안전성을 각각 확보하였다.

후 기

연구는 국토해양부 미래철도 기술개발 사업의 연구비지원 (과제번호07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] K. Y. Eum, J. H. Um, Y. H. You, J. H. Choi (2004) Evaluation of Running Stability of Tilting Trains in Conventional Curved Track, *Journal of the Korean Society for Railway*, 7(4), pp. 367-373.
 - [2] B. G. Eom, H. S. Lee (2010) Assessment of Running Safety of Railway Vehicles using Multibody Dynamics, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11(2), pp. 315-320.
 - [3] Y. S. Ham (2010) Derailment Mechanism of Railway Vehicle, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(1), pp. 2-7.
 - [4] Y. S. Ham, D. H. Lee, S. J. Kwon, J. W. Seo (2010) The Experiment Study about a Correlation between the Derailment Coefficient of the Railway Vehicle and the Track Alignment, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 27(8), pp. 7-12.
 - [5] I. Y. Choi, D. H. Koo, S. Y. Hwang, Y. S. Lim (2010) Analysis on Safety and Ride Comfort of KTX According to Track Surface, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(6), pp. 583-588.
 - [6] B. H. Song, S. C. Yang, Y. S. Kang (2004) A Study on the Parameters Effecting on the Derailment Factor of Running Train on the Curved Track, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 24(6), pp. 947-954.
 - [7] Y. S. Ham, J. W. Seo, D. H. Lee, S. J. Kwon, J. C. Kim, C. W. Lee, (2008) Measurement and Analysis of Derailment Coefficient for Korean Tilting Vehicle, *Proceedings Autumn of the Korean Society for Railway*, pp. 1628-1633.
 - [8] Y. W. Kim, B. G. Eom, B. B. Kang, H. S. Lee (2011) A Study on Derailment Safety Analysis in a Conventional Line (Dongdaegoo-Namsunghuyn), *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 35(8), pp. 941-949.
 - [9] J. C. Kim, Y. S. Ham (2007) Analysis on Running Safety for KTX Vehicle, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(5), pp. 473-479.
 - [10] UIC CODE 518 OR (2003) Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of View of Their Dynamic Behavior-Safety-Track Fatigue-Ride Quality.
 - [11] The European Standard EN 14363 (2005) Railway Applications - Testing for the Acceptance of Running Characteristics of Railway Vehicles.
 - [12] J. Santamaria, E.G. Vadillo, et al. (2009) Influence of Creep Forces on the Risk of Derailment of Railway Vehicles, *Vehicle System Dynamics*, 47(6), pp. 721-752.
 - [13] Y.S. Ham, H.M. Hur (2003) Evaluation of Running Safety for Korean High Speed Railway Vehicle, *Proceedings Autumn of the Korean Society for Railway*, pp. 316-321.
 - [14] The European Standard EN 13715 (2006) Railway Applications-Wheelsets and bogies-Wheels-Wheels tread.
 - [15] Y.G. Kim (2003) Design Optimization of Suspension using Neural Network and Performance Evaluation for the High Speed Train, Ph. D Thesis, Ajou University.
 - [16] K.Y. Eum, S.S. Kim, Y.H. Kim, M.S. Lee, H.C. Jeong (2009) Comparison and analysis of the running safety followed by derailment coefficient and wheel off-loading at the curves, *Proceedings Autumn of the Korean Society for Railway*, pp. 2674-2684.
 - [17] J. Evans, S. Iwnicki (2004) Vehicle Dynamics and the Wheel/Rail Interface, *Rail Technology Unit*.
- 접수일(2012년 1월 26일), 수정일(2012년 3월 29일),
게재확정일(2012년 8월 2일)
-

Kyung S. Sim : sukisi83@ajou.ac.kr

Graduate School of Mechanical Engineering, Ajou University,
San 5, Woncheon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-749, Korea

Tae W. Park : park@ajou.ac.kr

Department of Mechanical Engineering, Ajou University,
San 5, Woncheon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-749, Korea

Jin H. Lee : ljh1227@ajou.ac.kr

Graduate School of Mechanical Engineering, Ajou University,
San 5, Woncheon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-749, Korea

Gi B. Jeong : kbarrow@ajou.ac.kr

Graduate School of Mechanical Engineering, Ajou University,
San 5, Woncheon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-749, Korea

부 록

(a) One-direction of yaw damper (Bogie No. 1, 12)

(b) Two-direction of yaw damper (Bogie No. 2~10)

Fig. 11 Type of bogie model of next-generation high-speed train

Table 3 The mass and the moment of inertia (Car-body of a HEMU-430X)

Car-body		Tc	M1	M2	M3	M4	Mc
Mass (Kg)		37,932	39,646	33,489	34,972	39,275	42,709
Inertia	x	91.13	95.25	80.46	84.02	94.36	102.61
	y	2074.35	1841.33	1555.37	1624.25	1824.10	2335.59
	z	2074.35	1841.33	1555.37	1624.25	1824.10	2335.59

Table 4 The mass and the moment of inertia (Bogie of a HEMU-430X)

		Tc		M1		M2		M3		M4		Mc	
Bogie No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mass (Kg)		2971		3911								3921	3934
Inertia	x	3247.6	3132.6	3508.7								3516.4	3525.3
	y	2930.3	3913.2	3834.4								3839.8	3837.2
	z	3845.2	3739.0	4720.0								4731.5	4744.3

Table 5 Results of derailment evaluation at train speed 370km/h

Car-body		Tc		M1		M2		M3		M4		Mc		Remark
Bogie No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Limited value		0.8												
Curve radius (m)	5,000	0.41	0.32	0.39	0.30	0.40	0.32	0.40	0.31	0.41	0.33	0.42	0.31	Accept
	6,000	0.32	0.24	0.31	0.25	0.31	0.25	0.33	0.27	0.33	0.26	0.33	0.26	Accept
	7,000	0.26	0.18	0.27	0.19	0.25	0.18	0.25	0.19	0.25	0.21	0.28	0.20	Accept
	8,000	0.22	0.16	0.21	0.16	0.22	0.17	0.22	0.18	0.21	0.16	0.26	0.22	Accept
	9,000	0.19	0.15	0.20	0.16	0.21	0.16	0.19	0.14	0.18	0.15	0.23	0.18	Accept

Table 6 Results of derailment evaluation at train speed 400km/h

Car-body		Tc		M1		M2		M3		M4		Mc		Remark
Bogie No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Limited value		0.8												
Curve radius (m)	5,000	0.49	0.37	0.49	0.36	0.46	0.39	0.49	0.38	0.50	0.39	0.50	0.38	Accept
	6,000	0.38	0.30	0.38	0.31	0.39	0.30	0.37	0.30	0.38	0.31	0.39	0.31	Accept
	7,000	0.31	0.23	0.31	0.26	0.31	0.23	0.32	0.23	0.31	0.24	0.33	0.25	Accept
	8,000	0.25	0.22	0.24	0.20	0.27	0.20	0.27	0.20	0.28	0.20	0.28	0.22	Accept
	9,000	0.21	0.18	0.21	0.18	0.22	0.16	0.21	0.18	0.24	0.19	0.27	0.22	Accept

Table 7 Results of derailment evaluation at train speed 430km/h

Car-body	Tc		M1		M2		M3		M4		Mc		Remark
Bogie No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Limited value	0.8												Accept
Curve radius (m)	5,000	0.51	0.38	0.53	0.39	0.51	0.40	0.55	0.44	0.52	0.40	0.56	0.40
	6,000	0.44	0.36	0.45	0.34	0.42	0.35	0.45	0.34	0.45	0.37	0.47	0.35
	7,000	0.37	0.30	0.37	0.31	0.36	0.30	0.38	0.30	0.39	0.31	0.39	0.32
	8,000	0.32	0.25	0.31	0.26	0.31	0.26	0.29	0.24	0.31	0.25	0.34	0.25
	9,000	0.22	0.16	0.22	0.17	0.21	0.17	0.23	0.18	0.23	0.17	0.27	0.21

Table 8 Results of guiding force at train speed 370km/h

Car-body	Tc		M1		M2		M3		M4		Mc		Remark
Bogie No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Limited value (kN)	43.8		46.6		42.5		43.5		46.4		48.7		N/A
Curve radius (m)	5,000	60.9	57.5	62.8	53.6	64.8	61.0	64.7	54.6	61.9	55.3	76.9	55.6
	6,000	40.8	36.7	50.6	44.2	48.5	39.6	50.9	50.2	47.7	44.8	53.3	45.4
	7,000	29.1	28.8	33.6	35.8	31.4	33.7	34.2	35.3	34.9	31.0	42.0	32.8
	8,000	26.8	25.4	27.1	21.1	26.7	25.3	28.9	30.9	28.9	22.7	37.4	30.3
	9,000	21.7	18.7	25.4	22.4	27.5	24.4	24.9	23.5	27.3	22.7	34.6	26.9

Table 9 Results of guiding force at train speed 400km/h

Car-body	Tc		M1		M2		M3		M4		Mc		Remark
Bogie No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Limited value (kN)	43.8		46.6		42.5		43.5		46.4		48.7		N/A
Curve radius (m)	5,000	80.2	64.0	85.4	58.7	81.7	73.0	83.2	66.1	89.7	69.3	96.2	72.6
	6,000	61.4	48.7	66.6	55.8	61.9	59.1	62.7	56.6	65.2	54.4	69.3	61.3
	7,000	45.5	35.8	49.6	39.5	43.2	35.6	46.9	39.8	49.2	42.6	55.4	47.6
	8,000	34.2	30.8	38.6	38.2	39.1	29.3	38.3	32.5	38.6	31.0	43.9	35.5
	9,000	30.6	23.6	29.6	28.2	25.8	24.5	29.2	31.4	29.7	30.7	41.7	30.8

Table 10 Results of guiding force at train speed 430km/h

Car-body	Tc		M1		M2		M3		M4		Mc		Remark
Bogie No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Limited value (kN)	43.8		46.6		42.5		43.5		46.4		48.7		N/A
Curve radius (m)	5,000	102.5	86.1	107.6	89.9	101.6	81.2	109.9	88.9	110.6	90.1	119.1	88.9
	6,000	77.5	60.8	80.7	70.7	78.9	65.7	83.5	66.6	81.9	65.7	86.9	70.3
	7,000	58.6	49.5	66.8	57.5	63.0	48.3	66.0	59.8	62.9	53.3	75.0	59.5
	8,000	48.0	40.8	51.9	45.2	50.4	42.4	54.0	42.4	51.6	45.3	54.9	45.2
	9,000	29.2	26.6	33.2	23.4	33.5	25.4	31.3	27.2	31.3	25.6	43.2	36.1