

공력에 의한 HEMU-400x 고속열차의 주행안정성 평가

Stability Evaluation on Aerodynamics of High Speed Railway Train

최 지 훈* · 박 태 원† · 심 경 석* · 곽 민 호** · 이 동 호**

J. H. Choi, T. W. Park, K. S. Sim, M. H. Kwak and D. H. Lee

(2011년 12월 8일 접수 ; 2012년 1월 25일 심사완료)

Key Words : Derailment(탈선계수), Wheel Unloading(윤중 감소율), Running Safety(주행안전성), Aerodynamics(공력), Overturning Moment(전복모멘트)

ABSTRACT

Recently, the speed of a train has been increased. So the trains are being exposed to wind more severely than before. Because of the operation of high speed trains and lightweight of the train, risks of train derailment have being increased. In this study, aerodynamic effects of a newly designed high speed train, HEMU-400x, are evaluated. For aerodynamic effect evaluation, analysis method is selected by examining the safety standards for high speed train. The condition of aerodynamic effects is selected by adverse effect conditions. In order to calculate C_s coefficients, numerical analysis is conducted. Using C_s coefficients, the side force is calculated. Through dynamics analysis, derailment and wheel unloading are obtained. Using these results, derailment evaluation is performed.

기 호 설 명

A : 고속열차 옆면적
 α : 열차와 풍속에 따른 상대속도의 요각
 C_m : 전복모멘트 계수
 C_s : 측력 계수
 d : 고속열차의 길이
 δ : 차륜과 선로의 접촉각
 δ_L : 좌측 차륜과 선로의 접촉각
 δ_R : 우측 차륜과 선로의 접촉각
 ΔP_L : 윤중 감소량
 e_w : 단위 벡터
 F : 측력

F_y : 횡하중
 λ_L : 좌측 차륜 탈선계수
 λ_R : 우측 차륜 탈선계수
 M_w : 전복모멘트
 μ : 마찰계수
 N : 선로에 대한 차륜의 수직력
 P : 차륜의 수직력
 P_0 : 정지 윤중
 Q : 차륜의 수평력
 ρ : 밀도
 T_y : 선로에 대한 차륜의 접선력
 U : 열차의 주행 속도
 V_w : 풍속

1. 서 론

† 교신저자; 정회원, 아주대학교 공과대학 기계공학부
E-mail : park@ajou.ac.kr

Tel : (031)219-2524, Fax : (031)219-1965

* 아주대학교 공과대학 기계공학과

** 서울대학교 공과대학 기계항공공학과

철도교량의 고가화, 세계적인 기상이변 등으로 철도차량이 강풍에 노출되는 빈도가 커지고, 고속철도의 개통, 기존철도의 고속화 및 철도차량의 경량화

로 인하여 강풍 시 열차의 전복 및 탈선 위험이 증가하고 있다. 강풍에 의한 차량 전복은 대형 인명, 재산 피해로 연결될 가능성이 높다. 따라서 해마다 빈번히 발생하는 태풍과 해안선, 고가교량의 자연풍 등 강풍에 대한 운행안전을 확보하여 국가 기간 교통망으로서의 철도교통에 대한 국민들의 높은 기대치를 충족시켜야 할 필요가 있다⁽¹⁾.

철도차량의 주행안정성을 저해하는 중요한 요인은 탈선이다. 철도에 있어서 탈선은 대형사고로 직결되기 때문에 결코 쉽게 간과할 수 없는 부분이며, 철도가 다른 교통수단에 비하여 상대적인 장점으로 내세울 수 있는 안전성을 확보하기 위해서는 반드시 탈선계수를 측정하여 주행안정성을 평가하여야만 한다.

대부분의 철도차량은 쉽게 탈선하지 않는다. 그것은 차량이 직선과 곡선 선로 및 분기기 등이 기준대로 만들어지고 보수된 선로 위를 주행하고 있기 때문이다. 물론 차량도 정해진 허용한도 내로 수선하면서 사용되고 있고, 제한 속도를 지키며 운전되고 있다. 탈선에 대한 안전의 문제는 이처럼 다양한 요인이 관계되고 복잡하기 때문에 철도차량의 탈선계수를 측정하고 평가하는 것은 결코 쉽지 않은 일이다⁽²⁾.

이 연구에서는 현재 개발 중인 차세대 고속열차 HEMU-400x의 고속주행 시, 바람에 의한 영향을 평가하기 위하여 고속철도안전기준과 참고문헌 등을 통하여 다양한 풍속과 고속열차의 주행속도, 레일의 곡선반경을 설정하여 동역학 해석을 실시하였다. 바람의 방향이 수시로 바뀌므로 이를 다 해석하기에는 어려움이 있기 때문에 가장 고속열차에 영향을 많이 끼치는 바람의 방향을 선정하고 그에 대한 공력을 구하여 고속열차에 가해주는 동역학 해석을 실시하였다. 그리고 동역학 해석을 통해서 탈선계수와 운중 감소율을 측정하여 탈선에 대한 평가를 진행하였다.

2. 시험 조건

2.1 고속철도운영안전기준

현실적인 해석을 진행하기 위해 바람에 대한 고속열차운영안전기준을 확인하였다. 현재 고속철도안전기준 제 29조에는 강풍 시 운전취급에 대한 주의

Table 1 High-speed train driving condition on wind speed

Wind speed	Driving condition
45 m/s ~	Operation stop
40~45 m/s	Under 90 km/h
30~40 m/s	Under 170 km/h
~ 30 m/s	Deceleration operation

사항이 명시되어 있다. 고속주행 중에 강풍이 예상되거나 발생한 경우에는 Table 1과 같은 풍속변화에 따라 운행중지 또는 속도를 제한하여야 한다.

2.2 풍속 방향 및 공력 선정

열차가 주행 중에 바람의 방향이 수시로 바뀌므로 모든 바람의 방향을 고려하여 해석을 정확하게 진행하기에는 어려움이 있다. 따라서 열차에 가장 악영향을 끼치는 바람의 방향을 선정하여 해석을 진행하기로 하였다. Fig. 1과 같이 바람이 고속열차로 불게되면 고속열차의 주행속도와 풍속에 따라 발생하는 상대속도가 고속열차에 영향을 미친다. 그리고 상대속도의 각도인 요각(yaw angle)에 따라서 같은 속도에서도 고속열차 탈선에 영향을 미치는 정도가 달라진다. 즉, 상대속도는 풍력 입사각과 주행속도에 대한 벡터의 합으로 표현할 수 있으며 풍력이 작용하는 요각에 따라 측력(side force), 양력(lift force), 요 모멘트(yawing moment) 등 여러 힘으로 작용하게 된다. 그리고 전복모멘트(overturning moment)는 요각에 따라 발생하게 되는 roll 방향의 힘으로 Fig. 2⁽³⁾와 식 (1)에서 알 수 있듯이 요각이 90°에 가까울수록 전복모멘트계수는 증가하게 된다^(4,5). 그리고 pitch 방향에 대한 작용 힘인 양력과 yaw 방향에 대한 작용 힘인 요 모멘트는 Fig. 3⁽⁶⁾과 Fig. 4⁽⁷⁾에서 확인 할 수 있듯이 요각이 0~30°일 때 가장 큰 수치를 보이며 고속 열차의 탈선에 큰 영향을 끼치지 못하는 것을 확인하였다^(6,7). 요각이 90°일 때 바람은 고속열차의 측면에 수직방향으로 작용하게 된다. 그러므로 측력이 고속열차의 탈선에 영향을 가장 많이 미친다고 판단할 수 있다⁽⁸⁾.

$$M_w = \frac{\rho}{2} \times A \times C_m \times V_w^2 \times d \times e_w \quad (1)$$

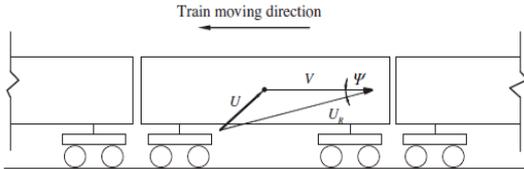
$$C_m = C_m(\alpha) \cdot \sin^2(\alpha)$$

식(1)에서 M_w 는 전복모멘트, C_m 은 전복모멘트계수, α 는 요각, ρ 는 밀도, e_w 는 단위벡터(unit vector), A 는 고속열차 옆면적, V_w 는 풍속, d 는 고속열차길이를 나타낸다.

2.3 탈선계수

철도차량이 주행할 때의 수평 방향의 힘(Q)과 수직방향의 힘(P) 사이의 비를 탈선계수라 한다. 수평

방향의 힘이 커지거나 수직 방향의 힘이 작아져서 이 수치가 커지거나 차륜과 레일간의 횡 방향의 힘이 일정 값 이상이 되면 차륜은 레일을 타고 오르며 결국 탈선을 야기시킨다. 이러한 형태의 탈선을 방지하기 위해 탈선계수는 Fig. 5와 같이 표현되며 식(2)와 같은 나달(Nadal)의 공식⁽⁹⁾을 만족해야 한다.



- V : High speed train running velocity,
- U : wind speed
- U_g : Relative velocity, ψ : Yaw angle

Fig. 1 Relationship of driving speed and wind speed

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

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

식(2)의 접선력(T_y)이 식(3)과 같이 $\mu \cdot N$ 에 접근하고, 차륜의 접촉각(δ)이 커지게 되면 탈선계수(Q/P)의 값은 가장 작은 값을 취한다. 즉 이러한 극한상태에서 식(4)와 같이 정리할 수 있다.

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

탈선계수의 제한값은 국제철도연맹(International Union of Railways)에서 제시한 주행 안전성 규정인 UIC 518을 따랐으며 제한값은 0.8을 적용한다⁽¹⁰⁾.

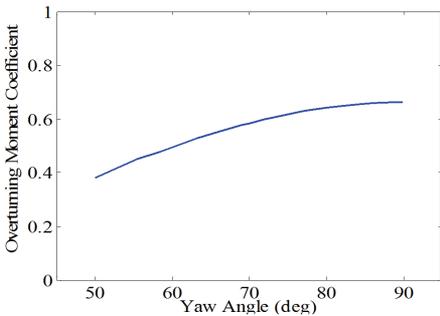


Fig. 2 Relationship of yaw angle and overturning moment

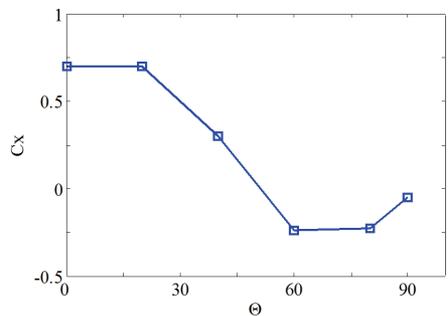


Fig. 4 Relationship of yaw angle and lift force

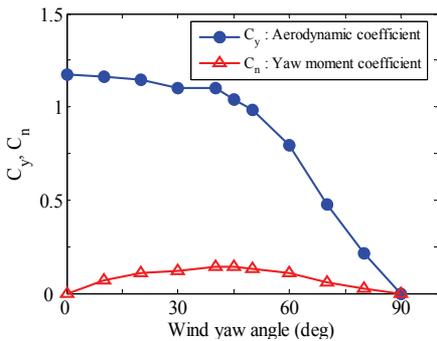


Fig. 3 Relationship of aerodynamics coefficient and yawing moment

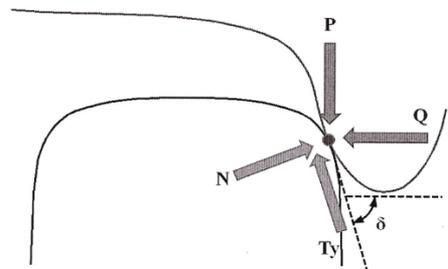


Fig. 5 Force at the contact point of wheel and rail

2.4 윤중 감소율

윤중이란 Fig. 6과 같이 차륜과 레일의 접촉면을 통하여 궤도에 수직방향으로 전달되는 열차하중을 의미하며, 이러한 윤중은 열차의 중량에 기초가 되는 정지 윤중과 열차 중량의 영향에 동적 충격효과가 고려된 동적 윤중으로 구분할 수 있다⁽¹¹⁾.

일반적으로 탈선계수가 커지면서 탈선하기 시작하지만 실제 탈선사례에서는 횡압이 클 때보다 윤중 감소가 클 때에 탈선된 경우가 많다. 그래서 윤중의 감소하는 정도를 나타내는 지표로서 윤중 감소율을 정하고, 이것을 안전율 평가 방법으로서 사용하고 있다.

정적 윤중 감소는 완화곡선에서의 궤도의 평면성 틀림, 차량재하의 편재, 곡선에서 차체가 안쪽으로 기울어지는 현상(cant over) 등에 의해 차륜에 비교적 장시간에 걸쳐 발생하는 윤중 감소를 말하며 차체의 동요에 의해 발생하는 동적 윤중 감소와는 구별하여 안전성을 판정할 필요가 있다. 또한 동적 윤중 감소는 차량의 동요 등에 의해 발생하는 비교적 단시간의 윤중 감소를 말하고 이음매충격 등에 의해 발생하는 극히 단시간의 윤중 감소도 여기에 포함된다. 윤중 감소율은 좌, 우 양륜을 가지는 한 윤축의 힘의 균형으로 정의할 수 있다. 윤축중심에 탈선을 조장하는 방향으로 횡하중 F_y 가 작용하고, 정지 윤중을 $P_0=W_0/2$ (W_0 : 축중), 윤중의 정지 윤중으로부터의 감소치를 $\Delta P_L=P_0-P_L$ 이라고 할 때에 탈선방향 차륜의 윤중 감소율은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

λ_L 과 λ_R 의 한계치는 식 (6)에서 구할 수 있다. 윤중 감소율은 횡하중이 없는 경우($F_y=0$)의 기본답면을 가정하여 $\delta_L=60^\circ$, $\tan \delta_R=1/20$ 이라고 하면, 차륜/레일 간 마찰계수 $\mu=0.2$ 일 때에 $\Delta P_L/P_0$ 의 한계치가 약 0.64가 된다는 점에서 0.6(60%)을 정적인 경우의 목표치로 하고 있다.

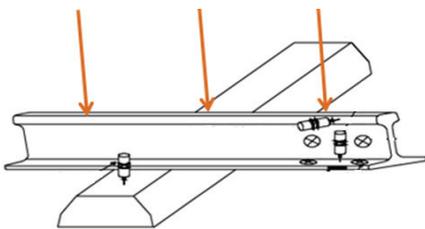


Fig. 6 Wheel unloading

$$\frac{\Delta P_L}{P_0} = \frac{\lambda_L - \lambda_R}{\lambda_L + \lambda_R} - \frac{F_y}{P_0} \times \frac{1}{\lambda_L + \lambda_R} \quad (5)$$

$$\lambda_L = \frac{\tan(\delta_L) - \mu_L}{1 + \mu_L \tan(\delta_L)}, \quad \lambda_R = \frac{\tan(\delta_R) - \mu_R}{1 + \mu_R \tan(\delta_R)} \quad (6)$$

마찰계수의 가정이나 횡하중이 없다고 가정한 경우에도 반드시 여유가 있는 값은 아니지만, 안전성 확보 면에서 탈선계수와 함께 병용되어 오고 있다. 또한 일반적인 주행시험에서 관측되는 동적인 윤중 감소에 대해서는 실제 현상을 감안하여 종래부터의 실적이 있는 0.8(80%)이 이용되고 있다.

3. 해 석

3.1 해석 시나리오 설정

해석에 사용된 6량 1편성 고속열차(HEMU-400x)는 동력차(Mc)와 동력객차(1-4), 객차(Tc)로 구분되며 철도차량 모델은 Fig. 7에 나타내었다. 고속열차 탈선에 가장 악영향을 미치는 상황을 설정하기 위해

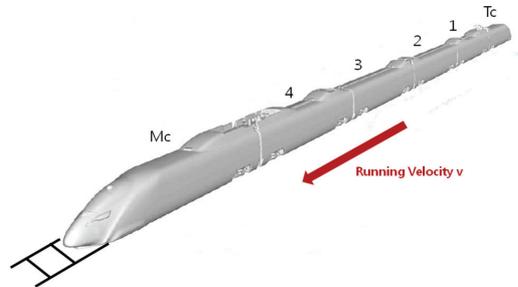


Fig. 7 High speed train

Table 2 Analysis scenario

Radius(m)	Velocity (m/s)	Wind speed (m/s)	Relative velocity U (m/s)
7000	55.55 (200 km/h)	15	57.54
		30	63.14
		45	71.49
	102.7 (370 km/h)	15	103.78
		30	106.99
		45	112.12
	119.4 (430 km/h)	15	120.33
		30	123.11
		45	127.59

Fig. 1과 같이 주행속도와 풍속을 고려하여 상대속도 U 의 방향을 선정하였다. 그리고 고속철도운행안전기준 제 29조와 탈선안전성에 대한 논문^(12,13)을 토대로 하여 Table 2와 같이 시나리오를 작성하였다. 이 연구는 고속열차의 탈선을 평가하는 것이므로 고속열차의 기준인 200 km/h를 최소 주행속도로 선정하였다. 그리고 차세대 고속열차의 실제 운행 주행속도인 370 km/h와 최고 시험속도인 430 km/h를 선정하여 탈선 유무를 평가하기로 하였다.

또한 고속철도운행안전기준과 실제 탈선 사례 및 바람의 풍속 등을 고려하여 풍속을 15, 30, 45 m/s로 설정하였다.

3.2 궤도 모델링

궤도틀림(track irregularity)은 차량 주행의 안전성과 밀접한 관계가 있으며 선로의 불규칙한 구간에 의하여 차량 동적 거동에 영향을 미친다⁽¹⁴⁾. 따라서 이 연구에서는 실제로 고속열차가 주행하게 될 선로의 실측 데이터를 이용하여 궤도틀림을 모델에 적용하였다. 곡선 궤도 모델은 경부고속철도의 실측선로 중 최소곡선반경 7,000 m를 갖는 구간을 선택하였으며, 광명역을 기점으로 하행선 120 km에 해당하는

해당하는 위치이다. 이 연구에서 사용된 실측선로의 궤도틀림 검측 결과 중 일부(궤간틀림)를 Fig. 8에 나타내었다. 궤간틀림은 좌·우측 선로의 횡방향 불규칙한 정도를 말한다. 실측선로의 궤도 선형조건(track design)은 캔트 140 mm, 완화곡선 400 m이다.

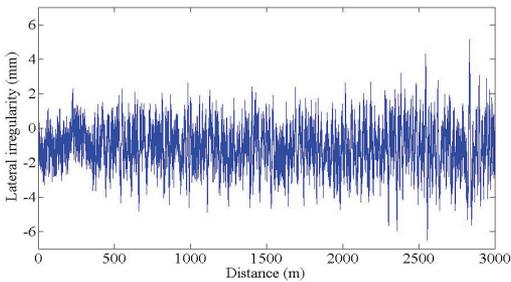
3.3 C_s 계수

측풍 유입 시 차량에 작용하는 공력 중 고속열차의 탈선에 영향을 미치는 측력을 계산하기 위해서 3차원 형상의 열차 모델 주변의 유동장에 대한 수치 해석을 수행하였다. 수치해석을 위해 압축성 Navier-Stokes 방정식을 바탕으로 난류모델은 k-w sst 모델을 사용하였고 해석 시간을 단축하기 위해 정상해석을 수행하였다⁽¹⁵⁾. 효율적인 해석을 수행하기 위해 이 연구에서는 상용유체해석 프로그램인 Fluent를 이용하였다⁽¹⁶⁾. 해석 격자는 6량의 HEMU-400x 고속열차 모델을 이용하여 구성하였으며, 약 1250만개의 비정렬 격자로 구성되었다. 그리고 Table 3과 같이 해석 시나리오의 일부본인 주행속도 430 km/h의 조건에서 측면에서 불어오는 바람의 속도 0, 15, 30, 45 m/s인 경우에 대해 해석을 수행하였다.

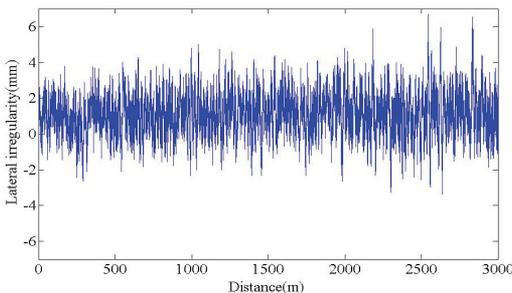
해석 결과 중 열차에 작용한 측력(F) 결과를 이용하여 6량 각각의 차량에 대한 측력 계수인 C_s 를 식 (7)과 같은 관계식을 통해 산출하였다. 그리고 이를 Fig. 9와 같이 C_s 와 요각에 대한 그래프로 나타낼 수 있다⁽¹⁷⁾.

$$C_s = \frac{F}{\frac{1}{2} \times \rho \times U^2 \times A} \quad (7)$$

식 (7)에서 ρ 는 표준대기환경에서의 밀도 1.225 kg/m³, 단면적 A 는 고속열차 1량의 길이 방향 단면적인 86 m², U 는 고속열차 주행속도와 풍속의 상대속도를 사용하였다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 각 차량에



(a) Lateral irregularity of a left track



(b) Lateral irregularity of a right track

Fig. 8 Track irregularity of a curved track

Table 3 C_s analysis conditions

Velocity (km/h)	Wind speed (m/s)	Relative velocity U (m/s)	Yaw angle β (deg)
430	0	119.44	0.0
	15	120.38	7.2
	30	123.15	14.1
	45	127.64	20.6

따라 C_s 값이 다르다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 각 차량의 위치와 주행 시 바람에 의해 발생하는 와류(vortex) 현상과 관련이 있다. 그리고 Fig. 9를 이용하여 다양한 요각에 대한 다양한 C_s 값을 추정할 수 있다.

3.4 측력 계수

고속열차 탈선에 영향을 미치는 측력(F)의 관계식은 식 (7)을 식 (8)과 같이 변형시켜 구할 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} \times \rho \times U^2 \times A \times C_s \quad (8)$$

해석 시나리오를 이용하여 각각의 상대속도에 대한 요각을 Table 4와 같이 구할 수 있다. 그리고 Table 4와 Fig. 9를 이용하고 보간법을 사용하여 요각에 대한 각 차량의 C_s 값 그래프를 Fig. 10과 같이 새롭게 나타내었다. Table 5는 Fig. 10을 이용하여 구한 각 차량의 C_s 값을 나타낸다.

3.5 동역학 해석

동역학 해석을 수행하기 위해 6량의 고속열차 모델을 다물체 동역학 해석프로그램인 ADAMS/Rail을

이용하여 Fig. 11과 같이 생성하였다. 그리고 각 차량에 측력을 가하여 Table 2의 해석 시나리오를 기준으로 해석을 수행하였다. Table 6은 해석 결과로서 각 주행속도와 풍속에 따른 운중 감소율과 탈선계수를 나타낸다. 운중 감소율과 탈선계수 수치가 모두 UIC 518 기준인 0.8이하 이면 탈선이 발생하지 않고 안전하다고 할 수 있으며 0.8 이상이면 탈선이 발생할 위험이 있다고 판단 할 수 있다. Table 6에서 알 수 있듯이 주행속도 200 km/h와 풍속 45 m/s에서 운중 감소율과 탈선계수가 각각 0.75, 0.54으로 탈선한계 내에 있으므로 탈선이 발생하지 않는다. 그리고 이것을 기준으로 풍속 30 m/s, 15 m/s에서도 탈선에 대해 안전하다고 할 수 있다. 주행속도 370 km/h와 풍속 30 m/s에서의 탈선계수는 0.48이지만 운중 감소율이 0.85로 나타나며 탈선한계수치인 0.8보다 크므로 탈선이 발생할 수 있다고 평가할 수 있다. 그리고 주행속도 430 km/h와 풍속 30 m/s에서도 운중 감소율이 1.04이므로 탈선이 발생할 수 있다.

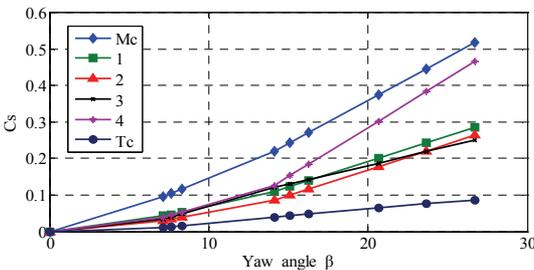


Fig. 9 C_s coefficient about yaw angle

Table 4 Yaw angle about relative velocity

Relative velocity U (m/s)	Yaw angle β (deg)
57.54	15.11
63.13	28.37
71.49	39.01
103.78	8.31
106.99	16.28
112.12	23.66
120.33	7.16
123.11	14.10
127.59	20.65

Table 5 C_s about yaw angle

Yaw angle (deg)	Mc	1	2	3	4	Tc
7.16	0.095	0.042	0.029	0.033	0.039	0.01
8.31	0.116	0.053	0.038	0.048	0.053	0.014
14.1	0.22	0.109	0.085	0.121	0.126	0.039
15.11	0.243	0.123	0.099	0.131	0.153	0.042
16.28	0.271	0.139	0.116	0.143	0.184	0.047
20.65	0.375	0.200	0.178	0.188	0.302	0.064
23.66	0.446	0.242	0.221	0.218	0.384	0.075
28.37	0.555	0.307	0.286	0.266	0.509	0.093
39.01	0.809	0.457	0.438	0.376	0.798	0.133

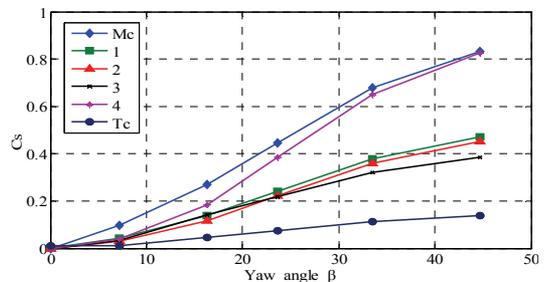


Fig. 10 C_s about yaw angle

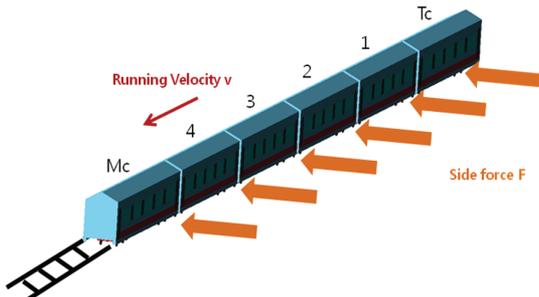


Fig. 11 Dynamic modeling of a high speed train

Table 6 Result of analysis

Velocity (m/s)	Wind speed (m/s)	Wheel unload	Deraiment
55.56 (200 km/h)	45	0.75	0.54
102.7 (370 km/h)	15	0.53	0.41
	30	0.86	0.48
	45	1.21	0.40
119.4 (430 km/h)	15	0.77	0.71
	30	1.04	0.61

더 정확한 주행속도와 풍속에 따른 탈선한계를 파악하기 위하여 Fig. 10을 구한 방법과 마찬가지로 보 간법을 이용하여 탈선한계에 따른 주행속도와 풍속을 구하고 다양한 주행속도와 풍속을 추가하여 상대속도 U 와 요각을 구하였다. 그리고 Fig. 10의 C_s 그래프를 활용하여 요각에 대한 C_s 값을 추론하였다.

해석 결과, 각각의 주행속도와 풍속에 따른 한계 풍속과 주행속도를 Table 7과 같이 도출하였다. Table 7에서 알 수 있듯이 탈선계수는 탈선한계인 0.8보다 크게 나타나지 않지만 운중 감소율이 변화가 크므로 탈선한계를 확인할 수 있었다. 주행속도 200 km/h, 풍속 47 m/s에서 운중 감소율이 한계수치인 0.8보다 큰 0.81로 나타나며 주행속도 370 km/h, 풍속 28 m/s에서는 운중 감소율이 0.82로 나타난다.

그리고 최고 시험속도인 430 km/h에서는 풍속 16 m/s일 때, 운중 감소율이 0.81로 나타나며 탈선이 발생할 것이라고 예상할 수 있다. 그러므로 주행속도 200 km/h에서는 풍속 45 m/s, 주행속도 370 km/h에서는 풍속 27 m/s, 주행속도 430 km/h에서는 풍속 15 m/s가 탈선이 발생하지 않고 주행할 수 있는 한계값

Table 7 Deraiment limit

Velocity (km/h)	Wind speed (m/s)	Relative velocity U (m/s)	Wheel unload	Deraiment
200	45	71.5	0.75	0.54
	47	72.7	0.81	0.52
370	27	106.1	0.73	0.62
	28	106.4	0.82	0.61
430	15	120.3	0.77	0.71
	16	120.5	0.81	0.77

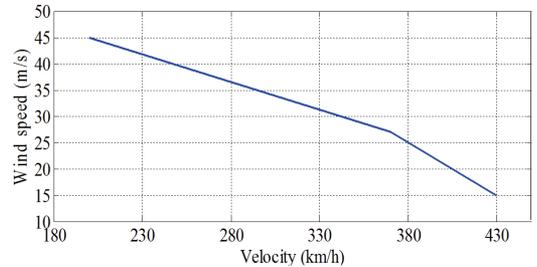


Fig. 12 High speed train speed limit for wind speed

이라고 할 수 있다. Fig. 12는 풍속에 대한 고속열차 주행속도의 한계 속도를 나타낸다. 곡선 아래쪽에서의 주행은 탈선이 발생하지 않지만 곡선 위쪽에서의 주행은 탈선이 발생할 가능성이 크다. 그러므로 보다 안전하게 고속열차를 주행하기 위해서는 곡선의 아래쪽 환경에서 주행을 해야 한다.

4. 결 론

이 연구를 통해 실제 시험으로는 확인하기 어려운 공력에 의한 탈선 가능성을 동역학 해석을 통해 평가하였다. 고속철도차량의 재원을 이용하여 해석 모델을 개발하였으며 KTX 차량이 주행하고 있는 실측선로를 해석 모델에 적용하였다. 철도안정성 해석 시나리오를 작성하였고 탈선평가에 대한 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 시속 200 km/h에서는 풍속 45 m/s에서 주행을 하였을 때 탈선계수는 0.54, 운중 감소율은 0.75으로 탈선한계인 0.8 보다 작게 나타나므로 탈선이 발생하지 않았다. 하지만 풍속을 45 m/s보다 크게 했을 때 탈선계수는 0.48로 안정하지만 운중 감소율이 0.81로 탈선한계인 0.8보다 크게 나타나며 탈선 위험성이 확인되었다. 그러므로 45 m/s가 200 km/h에서의 한계

주행 풍속이라고 판단할 수 있다.

(2) 최고운행속도인 시속 370 km/h에서는 풍속이 27 m/s일 때 탈선계수는 0.62, 운중 감소율이 0.73로 탈선한계인 0.8에 근접하게 나타나며 풍속 28 m/s와 30 m/s에서는 운중 감소율이 각각 0.82와 0.85로 나타나 탈선한계보다 크므로 탈선이 발생할 가능성이 높다. 그러므로 풍속 25 m/s가 370 km/h로 주행할 수 있는 최대 한계라고 판단 할 수 있다.

(3) 최고시험속도인 시속 430 km/h에서는 풍속이 15 m/s일 때 탈선계수는 0.71, 운중 감소율이 0.77으로 탈선한계에 가까워짐을 알 수 있다. 그리고 풍속 30 m/s에서는 운중 감소율이 1.03로 탈선한계수치를 넘어선다. 또한 풍속 16 m/s에서 해석 결과 탈선계수는 0.73으로 탈선한계보다 작게 나타나지만 운중 감소율이 0.81으로 나타나며 탈선이 발생할 가능성이 높아졌다. 그러므로 450 km/h에서 주행을 할 때는 풍속이 15 m/s미만일 때 주행하는 것이 안전하다.

이 연구의 결과를 통해 풍속에 대한 차세대 고속 열차의 운행안전기준을 개선할 수 있을 것이라고 예상된다.

후 기

이 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Kwon, H. B. and You, W. H., 2010, Measurement of the Aerodynamic Loads on Railway Vehicles under Crosswind, Proceedings of the KSME Annual Spring Conference, pp. 157~164.

(2) Ham, Y. S. and Hur, H. M., 2003, Evaluation of Running Safety for Korean High Speed Railway Vehicle, Proceedings of the Korean Society for Railway Annual Autumn Conference, pp. 316~321.

(3) Suzuki, M., Tanemoto, K. and Maeda, T., 2003, Aerodynamic Characteristics of Train Vehicles under Cross Winds, Transactions of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 91,

pp. 209~218.

(4) Xia, H., Guo, W.W., Zhang, N. and Sun, G. J., 2008, Dynamic Analysis of a Train-bridge System under Wind Action, Transactions of Computer and Structures, Vol. 86, pp. 1845~1855.

(5) Charuvisit, S., Kimura, K. and Fujino, Y., 2004, Experimental and Semi-analytical Studies on the Aerodynamic Forces Acting on a Vehicle Passing through the Wake of a Bridge Tower in Cross Wind, Transactions of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 92, pp. 749~780.

(6) Baker, C. J., Jones, J., Lopez-Calleja, F. and Munday, J., 2004, Measurements of the Cross Wind Forces on Trains, Transactions of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 92, pp. 547~563.

(7) Khier, W., Breuer, M. and Durst, F., 2000, Flow Structure around Trains under Side Wind Conditions, Transactions of Computers and Fluids, Vol. 29, pp. 179~195.

(8) Wetzel, C. and Proppe, C., 2006, On the Crosswind Stability of High Speed Railway Vehicles, Proceedings of Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 6, Issue 1, pp. 341~342.

(9) Santamaria, J., Vadillo, E. G. and Gomez, J., 2009, Influence of Creep Forces on the Risk of Derailment of Railway Vehicles, Transactions of Vehicle Systems Dynamics, Vol. 47, Issue 6, pp. 721~752.

(10) UIC CODE 518, 2005, Testing and Approval of Railway Vehicle form the Point of View of Their Dynamic Behaviour-safety-track Fatigue-ride Quality, UIC.

(11) Eum, K. Y., Kim, S. S., Kim, Y. H., Lee, M. S. and Jeong, H. C., 2009, Comparison and Analysis of the Running Safety followed by Derailment Coefficient and Wheel Off-loading at the Curves, Proceedings of the Korean Society for Railway Annual Autumn Conference, pp. 2674~2683.

(12) Souh, B. Y. and Lee, B. H., 2010, A Study on the Quasi-static Overturning and Derailment Safety of Tilting Train, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.

20, No. 6, pp. 537~545.

(13) Son, M. S., Eom, B. G. and Lee, H. S., 2011, The Derailment Safety Estimation of DMT Freight for Real Track Condition, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 7, pp. 637~642.

(14) Choi, I. Y., Koo, D. H., Hwang, S. Y. and Lim, Y. S., 2010, Analysis on Safety and Ride Comfort of KTX According to Track Surface, Transactions of the Korean Society for Railway, Vol. 13, No. 6, pp. 583~588.

(15) Lee, D. H., 2009, Research on the

Aerodynamic Technology Advancement of the High-speed EMU, Seoul National University.

(16) Yun, S. H., 2005, Numerical Study of the Crosswind Safety on Korean Tilting Train Express, M. S. Thesis, Seoul National University.

(17) Kang, S. O., Jun, S. O., Kim, K. H. and Lee, D. H., et al. 2010, Influence of Rotating Wheel and Moving Ground Condition to Aerodynamic Performance of 3-Dimensional Automobile Configuration, Transactions of KSAE, Vol. 18, No. 5, pp. 100~107.