

〈논 문〉

바람이 고속전철의 동적 안전성에 미치는 영향 분석
Analysis of the Effect of Wind on the Dynamic Behavior
of High Speed Train

김영국[†] · 박찬경* · 박태원** · 배대성***

Y. G. Kim, C. K. Park, T. W. Park and D. S. Bae

(2001년 8월 10일 접수 ; 2001년 10월 4일 심사완료)

Key Words : Railway Dynamics(철도차량 동역학), Derailment(탈선), High Speed Train(고속전철), Suspension(현가장치), Cant(켄트), Curvature(곡률반경), Lateral Force(횡하중), Irregularity(불규칙도), Valance Speed(균형속도)

ABSTRACT

The dynamic behavior of high speed train is very important because the railway should be safe and is satisfied with the ride comfort of passengers. The train is composed of many suspension components, such as 1st springs, 1st dampers, 2nd springs and 2nd dampers, that have an influence on the dynamic characteristics of high speed train. Also, the wheel/rail shapes, the track conditions and geometry and many environmental factors, such as rain, snow and wind, affect the dynamic behavior of high speed train. This paper reviews the effect of wind and track conditions on the dynamic behavior of high speed train. The VAMPIRE program is used for this simulation. The result of simulation shows that the high speed train should not be operated when the wind velocity is beyond 34.5 m/sec.

1. 서 론

일반적으로 철도차량은 질량요소로 차체, 대차 및 휠셋 등으로 구성되어 있으며, 이들 질량요소는 차체와 대차사이에는 1차 현가장치, 대차와 휠셋사이에는 2차 현가장치로 연결되어 있다. 또한, 이들 현가장치는 탄성요소인 스프링과 댐핑요소인 댐퍼로 구성되어 있다. 이러한 현가장치의 성능과 휠/레일의 접촉조건(휠/레

일 형상, 선로조건)에 따라 철도차량은 동적 안전성 및 승차감에 큰 영향을 받는다.⁽¹⁾ 또한, 비, 눈 및 바람과 같은 환경요인 등도 철도차량의 동적 안전성에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 특히, 곡선부에서 바람은 철도차량의 동적 안전성에 커다란 영향을 줄 수 있다. 현재 운행중인 기존 저속 열차의 경우는 풍속이 30 m/s이상의 바람이 불면 열차의 운행을 금지하도록 규정하고 있다.⁽²⁾ 그러나, 2004년에 운행을 앞두고 있는 고속철도는 바람에 의한 운행제한에 대해 아직까지 구체화되지 않은 상태다.

본 연구는 G7사업의 일환으로 개발이 진행되고 있는 운행속도 350 km/h인 한국형 고속전철이 현재 건설중인 경부고속선로를 운행할 때에 바람이 고속열차의 동적 안정성에 미칠 영향을 선로조건에 따라 분석하였다.

[†] 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원

E-mail : ygkim@krti.re.kr

Tel : (031) 457-1978(525), Fax : (031) 455-4868

* 정회원, 한국철도기술연구원

** 정회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

***한양대학교 기계공학과

2. 모델링

2.1 차량 모델링

철도차량의 동적 해석은 AEA Technology사의 철도차량 전용해석 프로그램인 VAMPIRE S/W를 이용하여 수행하였다.⁽³⁾ 이 해석을 위해 필요한 철도차량의 편성모델과 좌표계는 Fig. 1과 같다.

해석을 위한 고속전철의 차량은 6량으로 동력차, 동력객차, 3대의 객차 및 동력객차로 구성하였다. 차체를 지지하는 대차는 2대의 동력차용 동력대차(PMB), 2대의 전후 동력객차용 동력대차(MTB) 및 동력객차와 객차, 객차와 객차사이를 연결하는 4대의 관절대차(ATB)로 구성하였다. 차체의 관성 특성치와 대차의 현가장치 특성치⁽¹⁾를 사용하여 VAMPIRE S/W로 표현한 해석 열차모델은 Fig. 2와 같다.

2.2 바람 모델링

바람이 운행중인 고속열차를 향해 불면 바람의 속도에 의해 발생한 동압(dynamic pressure)이 고속열차의 측면에 작용하게 된다.⁽⁴⁾ VAMPIRE S/W의 경우는 외력으로 집중하중만을 사용할 수 있기 때문

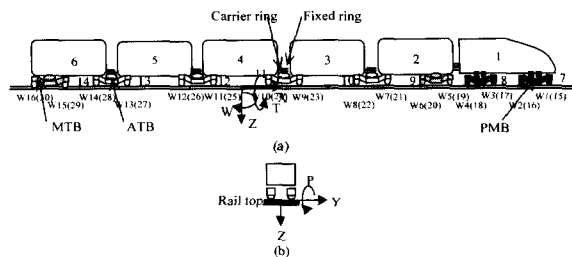


Fig. 1 Schematic diagram and axis system of train

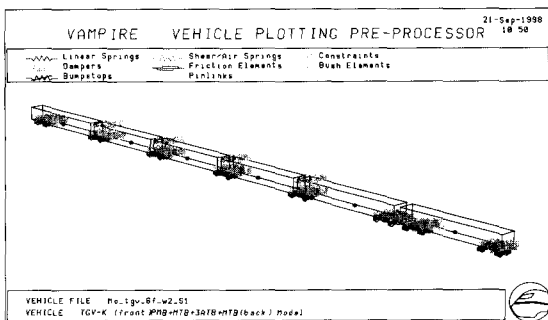


Fig. 2 VAMPIRE vehicle model

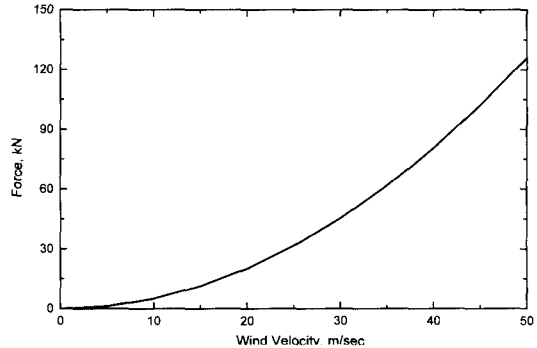


Fig. 3 Force vs. wind velocity

에 바람을 5초 동안 스텝하중으로 가정하여 해석 열차모델 6량의 각 차체 중앙에 작용하도록 하였다. Fig. 3은 풍속과 하중의 관계를 나타낸 것이다.

2.3 레일 모델링

다양한 선로조건에 대해 바람이 운행중인 열차의 동적 안전성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 아래와 같은 4개의 레일 모델을 해석에 사용하였다.

- 레일모델 1: 곡선구간
 캔트량: 일정(152 mm)
 곡률반경: 변화(R6000, 7000, 8000, 9000)
 레일 불규칙도: 없음
- 레일모델 2: 곡선구간
 캔트량 및 곡률반경: 변화(Table 1 참조)
 레일 불규칙도: 없음
- 레일모델 3: 곡선구간(Fig. 4 참조)
 캔트량 및 곡률반경: 변화
 레일 불규칙도: 있음
- 레일모델 4: 직선구간(Fig. 4 참조)
 캔트량 및 곡률반경: 없음
 레일 불규칙도: 있음

Table 1의 균형속도란 곡선부에서 발생하는 원심력과 열차중력의 합력이 레일중심을 향할 때의 열차속도를 말한다.⁽⁵⁾ 또한, 캔트량은 한쪽 레일에 대한 상

Table 1 Curvature vs. valance speed and cant

Curvature(m)	6000	7000	8000	9000
Cant at valance speed 300 km/h(mm)	177.0	151.7	132.8	118.0
Valance speed at cant 152 mm(km/h)	276.2	298.3	318.9	338.2

대쪽 레일의 상대높이를 말한다(Fig. 5 참조).

Fig. 4는 현재 시운전중인 경부고속철도 시운전구간에서 동서울 기점 106.3~136.3 km구간의 레일 검측 결과이다. 이 구간에서는 열차 진행방향의 우측(+Y 방향)에 회집중심을 갖는 곡률반경이 약 7000 mm인 곡선부가 2곳 존재하며, 캔트는 최대 140 mm로 열차진행 방향에 대해 좌측레일이 우측레일보다 높게 설정되어 있다. 또한, 레일불규칙도는 좌우방향 틀림이 전반적으로 ±4 mm, 최대 6 mm, 고저틀림은 전반적으로 ±2 mm, 최대 6 mm, 궤간틀림은 전체적으로 3 mm가 넓혀져 있으며, ±3 mm의 변동을 갖고 있다. 레일모델 3은 레일 검측데이터 중에서 곡선부분이 포함된 5 km(129.3~134.3 km)구간의 데이터를, 레일모델 4는 레일 검측데이터 중에서 직선구간이 포함된 5 km(108.8~113.8 km)구간의 데이터를 이용하였다.

2.4 곡선부에서의 횡하중의 변화

Fig. 5는 바람이 고속열차를 향해 불 때, 곡선부에서의 열차속도, 노선상태(캔트 및 곡률반경) 및 바람으로 인해 발생하는 하중들의 상관관계를 나타낸 것으로 횡하중을 아래와 같이 구할 수 있다.

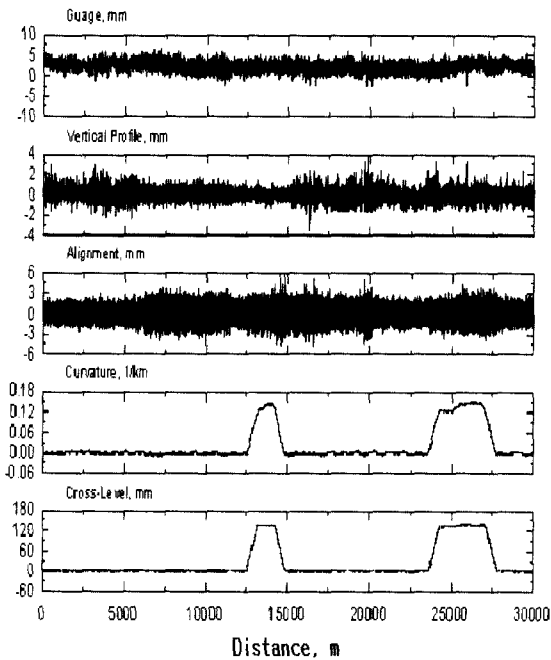


Fig. 4 Data of track irregularity

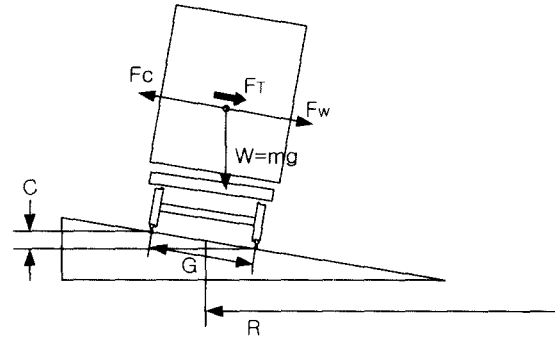


Fig. 5 Force balance at curve

□ 균형캔트인 경우

$$F_T = \pm F_W \quad (1)$$

□ 캔트초과($V < V_0$), 캔트부족($V > V_0$)인 경우

$$\begin{aligned} F_T &= \pm F_W - F_C + \frac{W \cdot C}{G} \\ &= \pm F_W - \frac{W \cdot V^2}{3.6^2 \cdot R \cdot g} + \frac{W \cdot C}{G} \\ &= \pm F_W - \frac{W \cdot V^2}{3.6^2 \cdot R \cdot g} + \frac{W \cdot V_0^2}{3.6^2 \cdot R \cdot g} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, F_W : 풍력(kN), \pm 은 풍향, F_C : 원심력(kN), F_T : 선로상태, 바람 및 열차속도로 인해 발생한 횡방향 하중(kN), W : 열차무게(ton), V : 열차속도(km/h), V_0 : 열차의 균형속도(km/h), R : 곡률반경(m), C : 캔트(mm), G : 레일간격(mm), g : 중력가속도(=9.81 m/s²)

횡방향 하중(F_T)이 (+)인 경우에는 우측 휠에, (-)인 경우에는 좌측 휠에 횡하중이 작용함을 의미한다. 균형캔트인 경우에는 풍향에 의해 좌·우측 휠에 걸리는 횡하중이 결정되며, 캔트초과인 경우는 캔트 효과로 인한 힘이 원심력보다 크게 되어 우측 휠에 횡하중을 증가시키는 효과를 갖으며, 캔트부족이 되면 반대현상이 일어난다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1 시뮬레이션 조건

바람이 고속열차의 동적 안전성에 미치는 영향을 Table 2와 같이 4개 레일모델에 대하여 열차속도와 풍력을 변화시키면서 탈선계수를 구하여 평가하였다. 여기서 풍향이 좌측(+)인 것은 바람이 열차의 회전

Table 2 Conditions of simulation

Conditions		Wind direction		
		Left (+Y)	Right (-Y)	
1	Rail model 1	Train speed (km/h)	50/100/150/200/250/300/350	50/100/150/200/250/300/350
		Force (kN)	0/50/60/70/80/90/100	0/50/60/70/80/90/100
2	Rail model 2	Train speed (km/h)	50/100/150/200/250/300/350	50/100/150/200/250/300/350
		Force (kN)	0/50/60/70/80/90/100	0/50/60/70/80/90/100
3	Rail model 3	Train speed (km/h)	10/50/100/150/200/250/300/350	100/150/200/250/300/350
		Force (kN)	0/50/60/70/80/90/110/130	0/50/60/70/80/90/100/110/120/130
4	Rail model 4	Train speed (km/h)	100/150/200/250/300/350	-
		Force (kN)	70/80/90/110	-

중심방향으로 부는 경우이며, 우측(-)인 것은 열차의 회전 바깥방향으로 바람이 분다는 것을 의미한다.

3.2 철도차량 안전성 판정

철도차량의 동적 안전성은 탈선계수, 운중감소율, 횡방향 하중 등을 구해 판정한다.⁽⁶⁾ 탈선계수는 운중에 대한 횡하중의 비(=횡하중/운중)를 말하고, 여기서는 동적 안전성의 판정기준으로 탈선계수의 최대값(1.2이하)을 사용하였으며, 전체 휠에 걸리는 탈선계수 중에서 가장 큰 값을 이용하여 평가하였다.

3.3 캔트, 원심력 및 바람의 효과 분석

해석 결과에 의하면 탈선계수는 해석 열차모델에서 가장 뒷 부분인 동력객차 후대차의 휠(Fig. 13, Fig. 14 및 Fig. 15에서 휠번호 15, 16)에서 최대이므로 동력객차를 예로 이들 효과를 분석한다.

Table 3은 캔트에 발생한 횡하중을 나타내며, 이 횡하중은 항상 열차의 회전중심으로 작용하게 된다. Table 4는 열차속도와 곡률반경에 의해 발생하는 원심력에 의한 횡하중을 나타내며, 캔트 효과와 반대로 횡하중이 열차의 회전 바깥방향으로 항상 작용한다.

Table 3 Cant effect

Cant(mm)	177	152	132	118
Force(kN)	61.25	52.70	45.83	41.00

Table 4 Centrifugal force effect

Train speed(km/h)	Curvature(m)			
	6000	7000	8000	9000
50	-1.64	-1.41	-1.23	-1.09
100	-6.56	-5.62	-4.92	-4.37
150	-14.76	-12.65	-11.07	-9.84
200	-26.23	-22.49	-19.68	-17.49
250	-40.99	-35.14	-30.74	-27.33
300	-59.03	-50.60	-44.27	-39.35
350	-80.34	-68.87	-60.26	-53.56

경부고속철도의 경우에 최대 캔트는 180 mm, 최소 곡률반경은 7000 m이며, 곡선부에서 캔트와 곡률반경은 Table 1에서와 같이 열차속도가 균형속도로 되도록 설치하고 있다. 만약 고속열차가 350 km/h로 경부고속철도의 선로를 주행하면, 캔트 효과에 의한 발생하는 최대 횡하중은 61.25 kN으로 열차의 회전중심으로 바람이 34.9 m/s로 부는 경우에 해당하며, 원심력 효과는 68.87 kN으로 열차의 회전 바깥방향으로 바람이 37.0 m/s로 부는 경우에 해당한다.

Fig. 6은 캔트량이 152 mm, 곡률반경이 7000 m인 경우에 풍향과 풍력의 변화에 따른 좌측 휠과 우측 휠에 걸리는 탈선계수를 나타낸 것이다. 풍력이 0 kN인 경우에는 캔트 효과와 원심력 효과가 상쇄되어 탈선계수는 작다. 또한, 열차속도가 300 km/h 이하에서

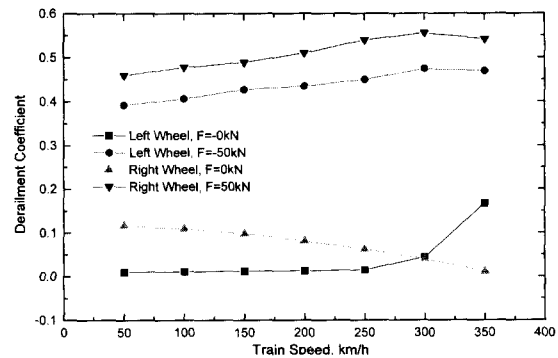


Fig. 6 Derailment of left and right wheel (C=152 mm, R=7000 m)

는 우측 휠이 좌측 휠의 탈선계수가 크며, 300 km/h 이상에서는 반대의 현상이 나타난다. 이것은 300 km/h 이상에서는 캔트 효과가 원심력 효과보다 큰 캔트초과 상태가 되고 300 km/h 이하에서는 반대현상인 캔트부족이 되기 때문이다. 풍력이 50 kN인 경우에는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 탈선계수가 0.4 ~ 0.6이 증가하였고, 우측 휠의 탈선계수가 좌측 휠보다 항상 큰 데, 이는 풍력의 효과가 캔트 효과에 추가되어 원심력의 효과보다 크기 때문이다.

3.4 곡률반경의 변화에 의한 탈선계수 영향 분석

Fig. 7은 풍향이 우측이고 풍력이 70 kN인 경우에 곡률반경의 변화에 대한 좌측 휠에 걸리는 탈선계수를 나타낸 것으로 곡률반경의 변화에 대한 탈선계수의 변화는 0.04정도에 불과하다. 동력객차인 경우에 곡률반경 변화(R6000→R9000)에 따른 횡하중 변동량이 약 26.8 kN으로 풍력보다 훨씬 작기 때문에 곡률

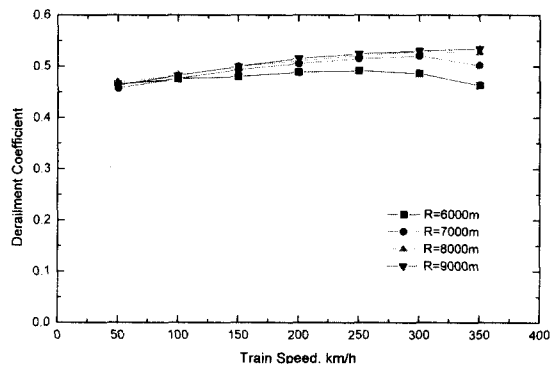


Fig. 7 Derailment vs. train speed and curvature (Left wheel, $F = -70$ kN, $C = 152$ mm)

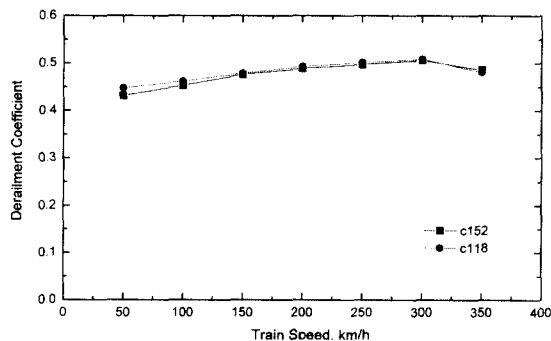


Fig. 8 Derailment vs. train speed and cant (Left wheel, $F = -60$ kN, $R = 9000$ m)

반경의 변화가 탈선계수에 큰 영향을 미치지 못한다.

3.5 캔트의 변화에 의한 탈선계수 영향 분석

Fig. 8은 곡률반경이 9000 m, 풍향이 우측, 풍력이 60 kN일 때, 캔트량의 변화에 따른 좌측 휠에 걸리는 탈선계수를 나타낸 것이다. 모든 속도범위에서 캔트량의 변화에 따른 탈선계수의 변화는 0.02정도이다. 동력객차인 경우를 예로 들면, 캔트량 변화(C152 → C118)에 따른 횡하중 변동량은 약 11.8 kN로 풍력에 비해 훨씬 작기 때문에 캔트량의 변화는 탈선계수에 큰 영향을 주지 못한다.

3.6 풍향과 풍력 변화에 따른 탈선계수 영향분석

곡선부에서 횡하중은 바람의 효과, 원심력 효과 및 캔트 효과에 상관관계에 의해 결정된다는 것을 이미 검토하였다. 또한, 원심력 효과는 열차의 회전 바깥방향(-), 캔트 효과는 열차의 회전중심방향(+)으로 항상 힘을 작용시키지만, 바람은 열차의 회전에 대해 양방향으로 힘을 작용시킨다. 따라서, 풍향과 풍력은 열차의 탈선방향 및 탈선여부를 결정하는 중요한 요인이며, 이에 대한 영향을 레일 불규칙도를 무시한 경우와 고려한 경우로 나누어 검토하였다.

(1) 레일 불규칙도를 무시한 경우

□ 풍향에 따른 탈선계수의 영향분석

Fig. 9는 풍력 90 kN, 곡률반경 7000 m인 경우에 풍향과 열차속도에 대한 탈선계수와의 관계를 나타낸다. 이 경우에는 풍력이 원심력 효과보다 크기 때문에 풍향에 의해 탈선계수가 최대인 휠의 위치가 결정된다. 즉, 풍향이 좌측인 경우에는 우측 휠에, 우측인 경우에는 좌측 휠에서 탈선계수가 최대가 된다. 풍향이 우측인 경우에 풍력과 원심력 효과는 동일한 방향이고 캔트 효과는 반대방향으로 작용하며, 풍력과 캔트 효과는 일정하므로 탈선계수는 열차속도에 비례하여 증가한다. 풍향이 좌측인 경우는 풍력과 캔트 효과가 동일한 방향이고 원심력 효과는 반대방향이므로 이 경우의 탈선계수와 열차속도는 반비례인 관계를 갖게 된다. 또한, 풍향에 따른 탈선계수를 비교하면 풍향이 좌측인 경우가 우측에 비해 크다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 풍향이 좌측인 경우에 저속에서 원심력이 작기 때문에 횡하중이 풍력과 캔트 효과의 합으로 가장 커지며, 풍향이 우측인 경우에는 횡하중

이 원심력이 작은 저속에서는 캔트 효과 때문에 풍력보다 작지만 고속이 될수록 원심력 효과와 캔트 효과가 상쇄되어 거의 풍력과 같게 되기 때문이다.

□ 풍력에 따른 탈선계수의 영향분석

Fig. 10과 Fig. 11은 곡률반경이 7000 m인 경우에 대한 풍향 및 풍력, 열차속도 및 탈선계수의 관계를 나타낸 것이다. 풍향이 우측인 경우는 풍력이 80 kN까지는 탈선계수가 한계치를 넘지 않지만(Fig. 10 참조), 풍향이 좌측인 경우는 풍력이 70 kN에서도 한계치를 초과한다(Fig. 11 참조).

Fig. 12는 풍향에 관계없이 곡률반경의 변화 및 풍력에 따라 고속열차가 운행할 수 없는 속도범위의 한계를 나타낸 것이다. 풍력이 60 kN 이하에서는 곡률반경에 상관없이 모든 열차속도에서 열차의 운행이 가능하지만, 90 kN 이상에서는 열차를 전혀 운행할 수 없다. 또한, 70 kN과 80 kN인 경우는 곡률반경에 따라 일부 열차속도에서 열차의 운행이 가능하다.

(2) 레일 불규칙도를 고려한 경우

Fig. 13과 14는 레일모델 3을 적용한 경우로

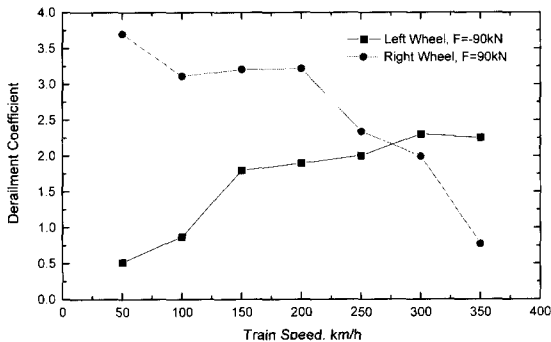


Fig. 9 Derailment vs. train speed and direction of wind (R=7000 m)

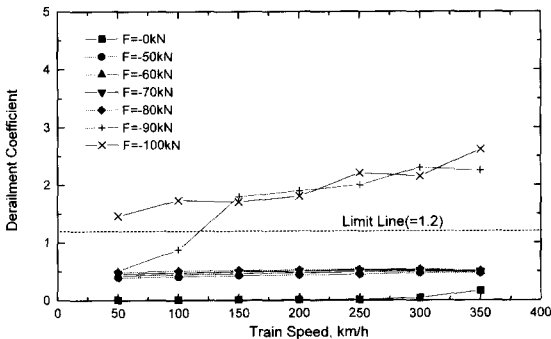


Fig. 10 Derailment vs. train speed and wind (Wind direction:right, left wheel, R=7000 m)

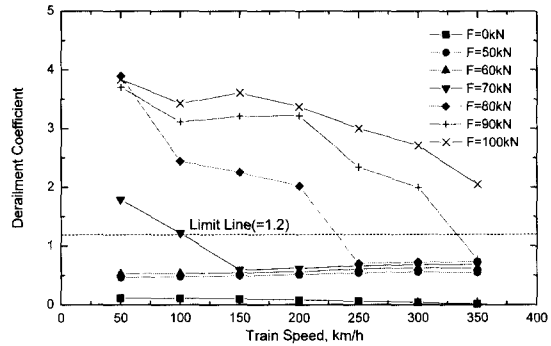


Fig. 11 Derailment vs. train speed and wind (Wind direction : left, right wheel, R=7000 m)

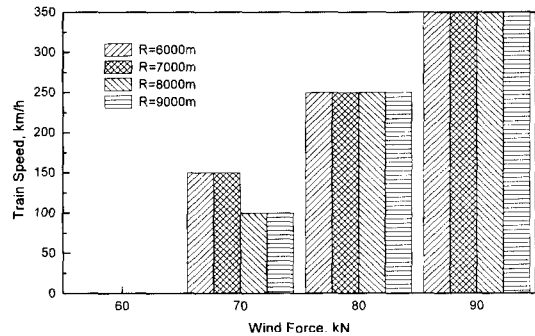


Fig. 12 Train speed vs. wind force and curvature

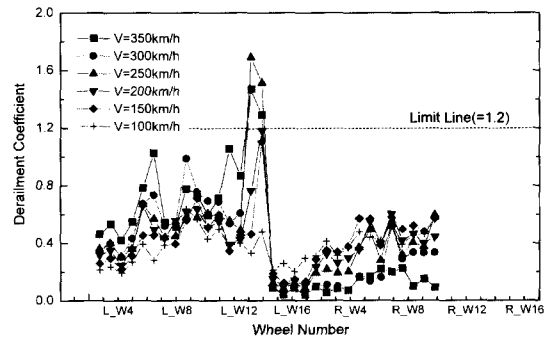


Fig. 13 Derailment coefficient of each wheel (F=80 kN)

Fig. 13은 풍향이 우측인 경우에 각 휠에 작용하는 탈선계수를, Fig. 14는 풍향이 좌측인 경우에 각 휠에 작용하는 탈선계수를 구한 결과이다.

풍향이 우측인 경우는 풍력이 70 kN 이하에서는 열차속도에 관계없이 모든 휠에서 탈선계수가 한계치 이하로 열차의 안전성에 문제가 없었다. 그러나, 풍력이 80 kN가 되면 Fig. 13에서 볼 수 있는 바와 같이

고속영역(300, 350 km/h)에서 동력객차 휠(15, 16번 휠)의 탈선계수가 한계치를 초과하여 열차의 안전성의 문제가 발생한다. 또한, 풍력이 90 kN 이상에서는 탈선계수가 열차속도와 관계없이 대부분의 휠에서 한계치를 벗어난다.

풍향이 좌측인 경우는 Fig. 14에서 보는 바와 같이 풍력이 70 kN에서 일부 휠에서 탈선계수가 한계치를 초과하며, 60 kN 이하에서는 불규칙도가 없는 경우와 마찬가지로 열차의 안전운행이 가능하다. 또한, 풍력이 80 kN 이상에서는 모든 열차속도에서 대부분의 휠의 탈선계수가 한계치를 벗어난다.

열차의 안전운행에 대해 불규칙도는 풍향이 우측인 경우에는 영향을 미치지, 좌측의 경우에는 영향을 미치지 못한다. 이는 불규칙도에 의해 발생할 수 있는 횡하중이 바람의 효과, 캔트 효과 및 원심력 효과에 의해 발생하는 횡하중에 비해 상대적으로 작기 때문이라고 판단된다.

Fig. 15는 레일모델 4을 적용하여 풍향이 좌측인

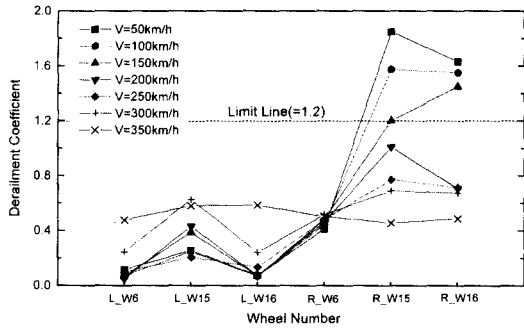


Fig. 14 Derailment coefficient of each wheel ($F = 70$ kN)

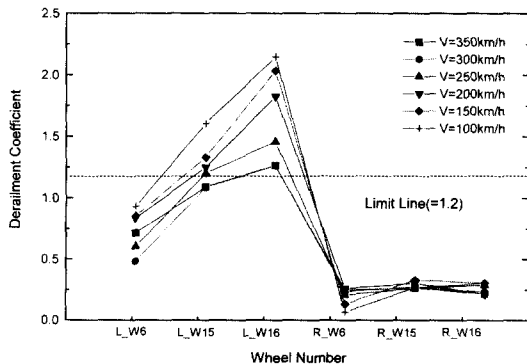


Fig. 15 Derailment coefficient of each wheel ($F = -80$ kN)

경우에 각 휠에 작용하는 탈선계수를 구한 결과로 풍력이 70 kN 이하에서는 열차속도에 관계없이 모든 휠에서 탈선계수가 한계치 이하로 열차의 안전성에 문제가 없었다. 그러나, 80 kN 이상에서는 Fig. 15에서 보는 바와 같이 탈선계수가 한계치를 초과하게 된다.

4. 결론

이상으로 선로조건(곡률반경, 캔트, 레일 불규칙도), 열차속도 및 바람이 고속열차의 동적 안전성에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 경부고속철도의 시험선 구간에서 고속열차 운행시에 바람으로 인한 고속열차의 탈선을 방지하기 위해 필요한 운행제한은 바람의 속도가 직선구간에서는 37.3 m/s(풍력 70 kN), 곡선구간에서는 34.5 m/s(풍력 60 kN) 이상 일 때 필요하다.

(2) 풍속(풍력), 풍향, 캔트량, 곡률반경 및 열차속도가 고속열차의 동적 안전성에 영향을 주는 중요한 요인이다. 그러나, 곡률반경의 변화, 캔트의 변화 및 레일의 불규칙도는 고속열차의 동적 안전성에 영향을 미치지, 그 효과는 작다.

(3) 경부고속철도의 전구간에서의 선로조건이 시험선 구간의 선로조건과는 약간 차이가 있지만, 캔트 변화와 곡률반경 변화만으로는 고속열차의 동적 안전성에 큰 영향을 미치지 못하므로 경부고속철도 시험선 구간에서의 분석결과를 전구간에 대해 적용할 수 있다. 따라서, 경부고속철도의 전구간(최대캔트 180 mm, 최소곡률반경 7000 m)에서 고속열차가 바람에 대해 안전하게 운행할 수 있는 바람의 한계속도는 34.5 m/s이다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

(1) 박찬경, 김기환 외2, 1998, "Vampire를 이용한 경부고속철도 차량의 동적 안정성 해석", 한국철도학

- 회 춘계학술대회 논문집, p. 510~516.
- (2) 철도청, 1996, "운전취급규정 제432조", p. 249.
- (3) BRR, 1998, VAMPIRE Users Manual.
- (4) 목재균 외7, 1998, "동적압력부하 변화에 따른 차량운행 특성연구", 한국철도기술연구원 기술보고서.
- (5) 철도의 속도향상, 2001, 백남옥역, 골든벨, p. 125.
- (6) Interantional Union of Railways, 1995, UIC Code 518OR.