

차량 전복 안전성에 끼치는 열차 풍압의 파라메타 연구

Parametric Study of the Effects of Train Wind on Turnover Safety

남성원[†]
Seong-Won Nam

Abstract When constructing a high-speed railroad, the reduction of the distance between track centers and the width of track bed will save the construction cost. However the shortening the distance between track centers may cause the stability problems due to higher wind pressure. Therefore the extensive technical review and aerodynamical study should be performed to determine the adequate distance between track centers. In this study, the impact that the increase in wind pressure due to the change of aerodynamic phenomena with the change of the distance between track centers may have on two trains passing by each other was predicted, and the stability of train operation was analyzed in order to review the distance between track centers suitable to Honam HSR trains. We conducted the parametric study of the effects of train wind on the running stability.

Keywords : Train wind pressure, Aerodynamical effects, High speed train, Running stability

요 지 고속 철도 건설시, 선로중심 간격 및 시공기면폭의 감소는 건설 비용의 절감을 가져온다. 그러나, 선로중심 간격의 축소는 열차 주행 풍압의 증가로 여러 가지 안전성 문제를 야기 할 수 있으므로 기술적 검토와 공기 역학적 연구가 수행되어야 한다. 본 연구에서는 호남고속철도에 적합한 선로 중심 간격을 검토하는데 필요한 차량 주행 안전성을 해석하기 위하여 선로중심 간격 변화로 인한 교행 열차 풍압을 예측하였으며, 차량 전복 안전성에 끼치는 열차 풍압의 영향에 대한 파라메타 연구를 하였다.

주 요 어 : 열차 풍압, 공력 영향, 고속 열차, 주행 안전성

1. 서 론

철도를 새롭게 건설할 때에 상하행선 선로의 중심 간격을 줄일 수 있다면, 막대한 선로 공사비 절감 효과를 거둘 수 있다. 이는 선로 건설에 수용되는 토지 보상비 절감 뿐만 아니라 막대한 선로 공사비가 소요되며, 선로의 특성에 따라 터널/교량과 같은 토목 구조물 구간 혹은 일반 토공 선로인 성토 및 절개 구간인가에 따라 건설 비용의 편차가 큰 것으로 알려져 있다. 그러나, 선로 중심 간격의 감소는 차량 뿐만 아니라 철도 종사원의 안전에 직결되므로 다양한 영향에 대하여 검토한 후 결정하여야 한다. 차량 속도가 증가되거나 선로간 간격이 좁아지면 교행시 발생하는 열차풍의 크기가 증가하며, 증가된 열차 풍압은

차체에 횡압력으로 작용하여 좌우진동 또는 차체의 롤링 모멘트를 가중시킨다. 정해진 궤도 위를 차륜으로 주행하는 철도차량의 특성상, 횡압의 증가는 승차감뿐만 아니라 차량 탈선에 큰 영향을 끼친다. 해외의 고속철도의 선로 중심간격은 대부분 4.3m~5.0m이며, 최근에 건설되는 노선일수록 차량 속도 향상에 따라 넓어지는 경향이 있다 [1-3].

본 연구에서는 前報[4,5]에서 구한 열차풍압의 영향을 받는 고속열차 주행 안전성에 미치는 주요 인자인 열차속도, 강풍, 선로 중심 간격, 차량 중심 높이, 차량 중량, 차량 측면적, 곡선 반경, 캔트 높이의 변화에 대하여 검토하였으며, 이러한 인자들이 차량 전복 안전성에 끼치는 영향을 정성적 및 정량적으로 분석하여 각각의 경우에 대하여 차량에 작용하는 합력의 작용점을 구하고자 함이 목적이다.

[†] 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 철도환경연구실
E-mail : swnam@krii.re.kr
TEL : (031)460-5244 FAX : (031)460-5279

2. 열차중 실험 결과

열차 풍압을 측정하기 위하여 경부 고속철도에서 운행 중인 KTX를 이용한 실차 실험과 선로변 현장 실험을 실시하였다. 교행 압력 측정 개략도를 Fig. 1에 표시하였으며, 선로 중심 간격 5.0m에 대한 차량 속도 변화시의 단독 및 교행 열차 풍압 예측 결과값을 Table 1에 나타내었다. 또한, 선로변 압력 측정 개략도를 Fig. 2에, 실험으로 구한 열차속도 300km/h까지에 대한 값들에 기초하여 외삽으로 구한 선로 중심간격 변화시의 단독 및 교행 열차 풍압 예측값을 Table 2에 나타내었다. KTX의 열차 실험을 위하여 동력차의 내외부에 압력 센서를 설치하여 서울-부산간을 영업 속도로 왕복하며 실시간으로 열차 풍압을 측정하였다. 실험에 대한 개요 및 방법은 前報 [4-5]와 같다.

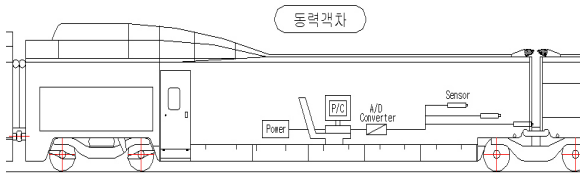


Fig. 1. Schematic sketch of measurement system

Table 1. Wind pressure for train speed

차량속력 (km/h)	열차풍압 (Pa)	
	단독주행	교행열차
300	253.69	471.13
310	270.13	513.37
320	287.0	552.6
330	304.6	594.84
340	322.93	637.08
350	342.0	682.33

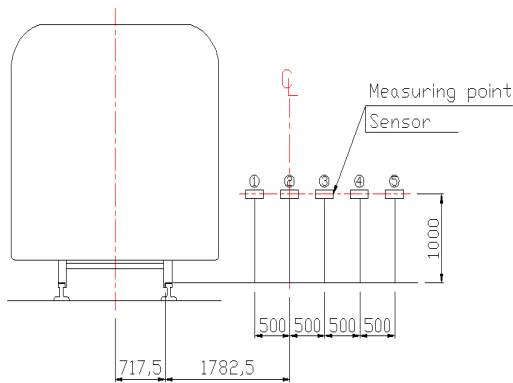


Fig. 2. Overview of train wind pressure test

Table 2. Wind pressure for track distance

선로중심간격 (m)	열차풍압 (Pa)	
	단독주행	교행열차
5.0	253.69	485.82
4.8	276.33	529.17
4.6	298.96	572.51
4.4	326.24	624.75
4.2	360.18	689.74
4.0	399.78	765.58

3. 주행 안전성 분석

철도 차량이 선로상을 주행중에 외력을 받아 전복되는 이론 해석 계산식은 Fig. 3으로부터 유도할 수 있다. 즉, 편심과 이상 진동이 없는 것으로 가정하면, 차체에 작용하는 힘은 곡선 통과시의 원심력에 의한 힘, 차량 중량에 의한 중력, 횡풍 및 교행 열차풍에 의한 풍압으로 구성된다. 차체에 작용하는 힘의 역학 관계로부터 다음식을 유도할 수 있다[6].

$$\tan(\alpha - \theta) = \frac{b}{H} \tag{1}$$

$$b \leq \frac{G}{2} \frac{1}{s} \tag{2}$$

$$\tan \alpha = \frac{F}{W} = \frac{\frac{m V_t^2}{r} + pA}{mg} \tag{3}$$

$$\tan \theta = \frac{c}{G} \tag{4}$$

여기서, α 는 합력이 이루는 각도, θ 는 캔트각, A 는 차체 측면적, b 는 작용점 거리, c 는 캔트, H 는 차체 중심높이, g 는 중력가속도, G 는 궤간, m 은 열차 무게, p 는 풍압, r 은 곡선 반경, s 는 안전율, V_t 는 차량속도를 각각 나타낸다.

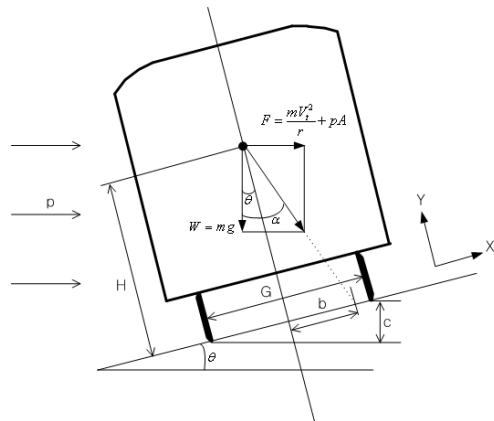


Fig. 3. Forces applying to carbody

위의 식 (1)~(4)로부터 다음식을 유도할 수 있다.

$$\frac{b}{H} = \frac{\frac{mV_t^2}{r} + pA}{mg} - \frac{c}{G} \quad (5)$$

식 (5)에서 차량 전복에 대한 가장 열악한 상태는 다음 3가지 경우를 고려할 수 있다.

- ① 곡선에서 외측 열차가 횡풍과 교행 열차풍을 받는 경우
- ② 평탄선로를 주행중 횡풍과 교행 열차풍을 받는 경우
- ③ 곡선에 내측 열차가 정차한 상태에서 횡풍과 교행 열차풍을 받는 경우이며, 각각의 경우에 대한 합력의 작용점은 다음과 같다.

$$b = H \left(\frac{\frac{mV_t^2}{r} + pA}{mg} - \frac{c}{G} \right) \quad (6)$$

$$b = H \left(\frac{pA}{mg} \right) \quad (7)$$

$$b = H \left(\frac{c}{G} + \frac{pA}{mg} \right) \quad (8)$$

식 (6)~(8)에서 열차에 작용하는 합력의 작용점 거리(b)는 궤간을 벗어나지 않아야 전복 안전성이 확보되므로 수식에 관련된 파라미터에 대하여 검토할 필요가 있다. 파라미터 영향 분석에서 안전율=1은 차체에 작용하는 합력의 작용점 거리가 차량 중심선에서 궤간의 1/2에 해당되는 경우이며(b=717.5mm), 안전율=2는 작용점 거리가 궤간의 1/4에 해당되는 경우이다(b=358.75mm). 따라서, 안전율을 크게 설정할수록 허용되는 합력의 작용점 거리가 작아져 차량 전복 안전성이 확보됨을 의미한다.

3.1 열차속도(V_t)에 의한 영향

선로간 중심 간격이 5.0m이며, 강풍이 없는 상태에서 열차속도를 300km/h~350km/h로 변화시켰을 경우의 열차에 미치는 합력의 작용점의 변화를 위에서 열거한 경우①, ②, ③에 대하여 비교 검토하였다.

경우①에서는 차량속도의 제곱에 비례 증가하는 원심력과 열차 풍압이 추가되었기 때문에 경우②, ③에 비하여 합력의 작용점 거리의 증가율이 훨씬 더 가파름을 알 수 있다. 즉, 열차 속도 증가는 곡선 통과중의 교행 외측 열차의 주행 안전성에 가장 민감하게 작용하는 것으로 나타났다.

3.2 강풍에 의한 영향

선로중심간격 5.0m, 차량속도 300km/h로 주행하는 조건에서 추가적인 외력으로서 강풍이 불 경우에 주행 안전성

의 영향을 검토하였다. 우리나라에 오는 대형 태풍의 최대 풍속이 30m/s 전후이므로

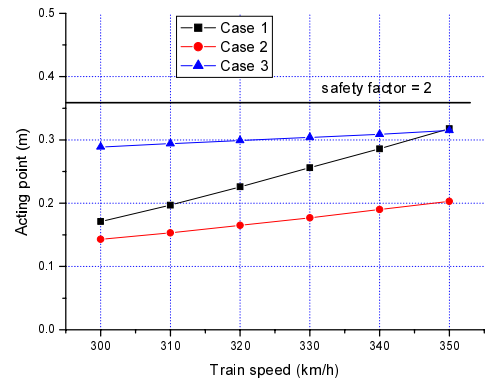


Fig. 4. Acting point of resultant force for train speed

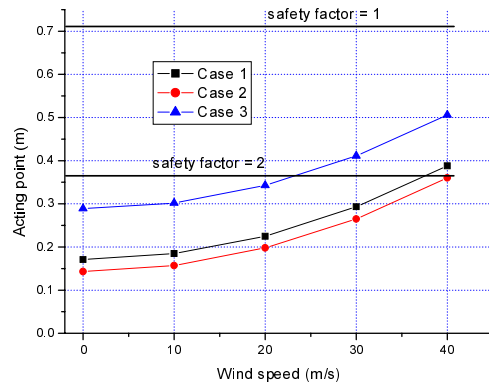


Fig. 5. Acting point of resultant force for wind speed

본 연구에서 고려한 강풍의 속도 범위는 0m/s~40m/s로 가정하였다. 강풍의 속도가 증가하면 경우①, ②, ③ 모두, 차체에 작용하는 합력의 작용점 거리가 증가하나, 경우③에서는 풍속이 23m/s를 넘으면 안전율 2에 대한 가이드라인을 초과하게 된다. 그러나 차륜-궤도의 접촉점을 벗어나는 합력의 작용점 거리는 안전율 1인 0.7175m 이상이므로 탈선에 이르지 않는 것으로 사료된다. 한편, 현재 철도 운영 규정에는 강풍 속도가 20m/s에서 열차 서행, 30m/s에서 열차 운행 중단을 하고 있으므로 강풍의 영향을 고려한 측면에서도 적절한 규제라고 할 수 있다.

3.3 선로 중심 간격 변화에 의한 영향

상하행선 열차 선로 중심 간격이 5.0m에서 4.0m로 축소될 경우, Table 2에서 알 수 있듯이 간격 축소에 따라 열차풍압의 크기는 증가한다. 경우①, ②는 선로 간격이 작아지면 교행 풍압이 증가하는데에 비하여 경우③은 한쪽의 열차는 정지해 있으므로 단독 열차 풍압의 크기 만큼만 외력이 증가하므로 작용점 거리의 증가율이 경우①, ②에 비하여 작다.

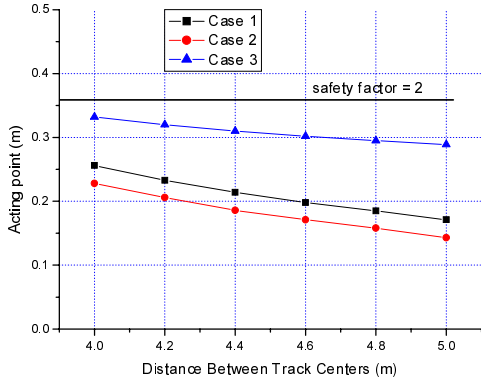


Fig. 6. Acting point of resultant force for track distance

그림에서 알 수 있듯이 선로 중심 간격이 4.0m까지 축소 되더라도 선로 간격 축소로 인한 열차 풍압의 증가에 의한 열차 전복 가능성은 낮지만, 선로에서의 작업원의 안전 및 선로 구축물 등을 고려하면 이 간격보다 더 작게 설정하는 것은 차량한계 및 건축한계 측면에서 제한이 있을 것으로 사료된다.

3.4 차량 중심 높이(H)에 의한 영향

차량의 무게 중심 높이는 주행 안전성 확보, 승차감 저하 및 동륜의 축중 이동 저감을 위하여 차량 설계시 적극적으로 고려하고 있는 사항이다.

차량의 무게 중심 높이가 1.4m~1.9m 변할 경우, 각 경우에 대한 협력의 작용점 거리의 변화를 Fig. 7에 표시하였다.

곡선에 열차가 정차한 상태에서 대향 열차의 풍압을 받는 경우인 경우③이 차량 중심 높이 변화에 가장 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

3.5 차량 중량에 의한 영향

최근의 철도 차량은 최적의 시스템 설계 및 신소재를 이용한 차량 제작 등으로 점점 경량화되고 있는 추세이다. 차량의 경량화를 통하여 궤도 파괴를 저감시키고, 소음 진동을 줄여서 승차감 향상을 기할 수 있으므로 차량 중량을 줄이도록 차량 설계에 적극 반영하고 있다. 열차 중량 403ton을 기준으로 ±10%씩 변화되었을 때의 협력의 작용점 거리 변화를 검토하였다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 열차 중량이 5% 저감된 382.85ton, 10% 경량화된 362.7ton이 되더라도 경우①, ②, ③ 모두 협력의 작용점 거리가 안전율 2에 훨씬 못 미치는 0.3m 이하에 머물고 있다. 경량화가 되면 차체가 가벼워져서 강풍 등의 외력에 의하여 쉽게 전복되는 것으로도 알려져 있으나, 경량화로 인한 위험성 증가는 미미할 것으로 판단된다.

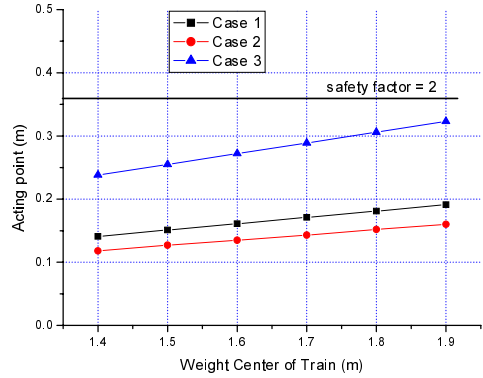


Fig. 7. Acting point of resultant force for centroid

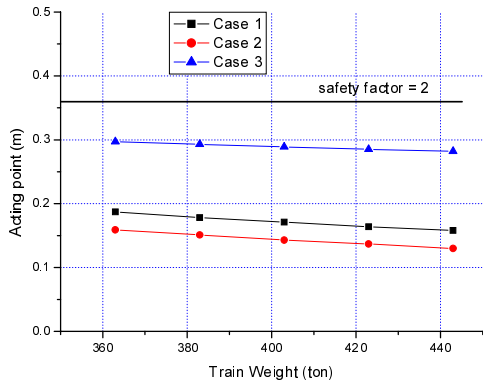


Fig. 8. Acting point of resultant force for train weight

3.6 차량 측면적(A)에 의한 영향

열차의 전면 투영 차체 면적은 공기저항 감소측면에서 유리하므로 승객들이 탑승하는 객실내 공간이 훼손되지 않는 범위내에서 최대한 줄일려고 하는 경향이 있으며, 측면적은 차량 길이와 차량 높이에 의존하지만 전면 투영 면적과 마찬가지로 객실 공간 확보 범위내에서는 줄이는 것이 바람직하다. 차량의 측면적이 693m²을 기준으로 각각 ±15%씩 증감 될때에 작용점 거리의 변화를 검토하였다. 차량 측면적의 변화는 경우①, ②, ③ 모두 압력항에 관여하므로 차량 측면적이 커지면 협력의 작용점 거리도 증가함을 알 수 있다.

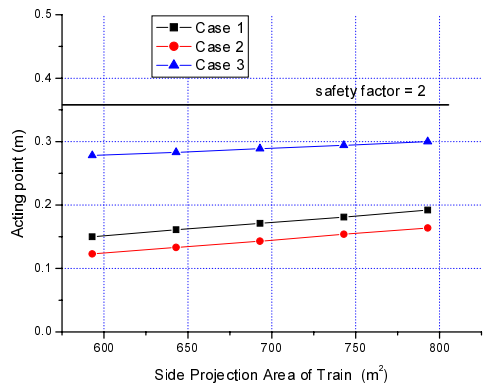


Fig. 9. Acting point of resultant force for side area

3.7 선로 곡선 반경(r)에 의한 영향

지형적인 여건이 허락한다면 철도의 선로도 가능한 한 직선으로 건설하는 것이 속도 향상 및 여러 가지 측면에서 바람직하지만, 선로가 지나가는 주변의 여건 및 지형에 따라 곡선 선로는 피할 수 없는 실정이다. 일반적으로 열차의 곡선 통과 최고 속도에 따라 최저 곡선 반경이 정하여 지므로 선로 곡선 반경의 변화로 인한 합력의 작용점 거리의 변화를 검토하였다. 그림에서 알 수 있듯이 경우②는 직선 평탄 선로이므로 곡선 반경의 영향을 받는 원심력이 없으며, 경우③은 해당 열차가 정지하고 있는 상태이므로 ($V_t=0$) 곡선 반경의 변화에 무관하지만, 경우①에서는 곡선 반경의 감소함에 따라 반비례하여 차량에 작용하는 원심력 증가로 인하여 작용점 거리가 증가한다. 즉 동일한 차량 속도에서는 선로의 곡선 반경이 작아질수록 작용점 거리가 커지므로 주행 안전성측면에서는 불리함을 알 수 있다.

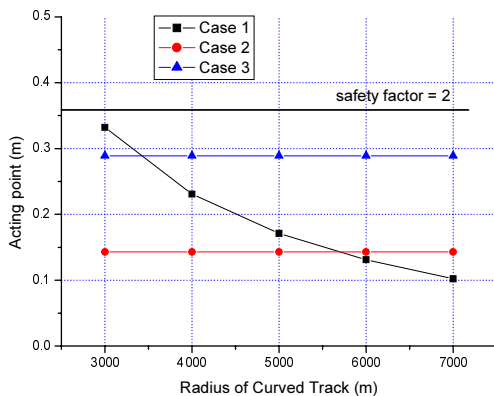


Fig. 10. Acting point of resultant force for radius

3.8 캔트 높이(c)에 의한 영향

선로의 바깥면을 높이 부설하면, 열차가 곡선 선로를 주행할 때 원활하게 통과할 뿐만 아니라 탑승객들이 느끼는 원심력이 감소되므로 승차감이 향상된다. 이처럼 곡선 선로에서 안쪽 레일을 기준으로 바깥쪽 레일을 높게 부설하는 것을 캔트라고 한다. 최대 캔트는 열차 통과 속도에 따라 정하여 지지만, 다양한 종류의 열차가 동일 선로를 사용하게 되면 캔트 초과 또는 캔트 부족 현상이 일어나므로 캔트 높이 변화에 대한 영향을 검토하였다.

경우②는 직선 평탄 선로이므로 캔트에 대한 항이 없기 때문에 작용점 거리가 일정한 값을 나타내지만, 경우①에서는 캔트가 증가하면 바깥으로 작용하는 전복력에 대하여 열차 중력항이 증가하므로 작용점 거리는 반대로 감소한다. 경우③은 열차가 정지하고 있는 상태에서 곡선 선로의 안쪽으로 전복력이 작용하므로 캔트가 증가하면 열차 중력

에 의한 전복 모멘트가 부가되어 합력의 작용점 거리도 비례하여 증가됨을 알 수 있다. 경우③은 경우②보다 c/G 만큼 더 큰 값을 가지며, 경우①과 비교하여도 경우③의 작용점 거리 크기는 횡풍으로 인한 풍압에다 선로의 캔트량에 관한 항의 합력이 작용하는데 비하여 경우①은 원심력항과 풍압의 합에 캔트량을 빼 크기이므로 전반적으로 경우③의 값들이 크게 나타났다.

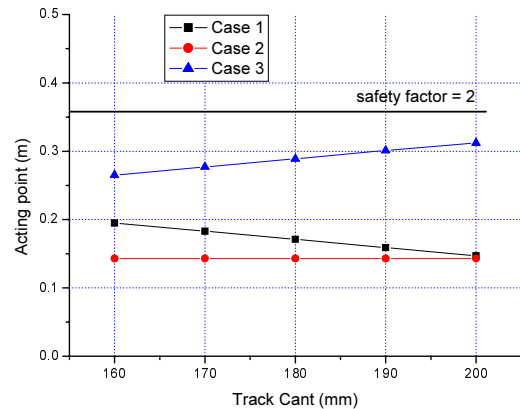


Fig. 11. Acting point of resultant force for cant

4. 결론

본 연구에서는 고속 열차가 교행할 때에 받는 열차 풍압이 열차 주행 안전성에 끼치는 영향에 대하여 검토하였다. 열차에 작용하는 외력의 작용점 거리를 ①곡선 통과 중 외측 열차가 횡풍과 교행 열차풍을 받는 경우, ②평탄 선로를 주행중 횡풍과 교행 열차풍을 받는 경우, ③곡선에 내측 열차가 정차한 상태에서 횡풍과 교행 열차풍을 받는 경우로 구분하여 각각에 대한 주요 파라미터의 변화에 대하여 정량적 및 정성적으로 분석하였다. 열차 속도가 300km/h~350km/h에서는 합력의 작용점 거리가 0.14m~0.32m, 선로 중심 간격이 4.0m~5.0m에서는 합력의 작용점 거리가 0.14m~0.33m, 차량 중심 높이가 1.4m~1.9m에서는 합력의 작용점 거리가 0.11m~0.32m, 차량 중량이 362ton~443ton에서는 합력의 작용점 거리가 0.13m~0.295m, 차량 측면적이 589m²~797m²에서는 합력의 작용점 거리가 0.12m~0.3m, 선로의 곡선 반경이 3000m~7000m에서는 합력의 작용점 거리가 0.1m~0.33m, 캔트 높이가 160mm~200mm에서는 합력의 작용점 거리가 0.14m~0.31m로서 각 경우에 대하여 외력의 작용점 거리가 안전율 2를 넘지 않았으나, 강풍속도가 24m/s를 넘으면 경우③에서는 안전율 2를 추가하며, 40m/s 풍속에서는 최대 0.5m의 값을 갖는다.

참고 문헌

1. A. Robert(2002). "Measurement of the aerodynamic pressures produced by passing trains," Proc. 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conf., pp.1-8.
 2. B. P. Rochard(2000), "A Review of methods to measure and calculate train resistances," IMechE, Vol. 214, part F, pp.185-199.
 3. UIC code 779-1(1996), "Effect of the slipstream of passing trains on structures adjacent to the track."
 4. 남성원, 권혁빈(2007), "로 중심간격 설정을 위한 실차 실험을 통한 공력 영향 연구," 한국철도학회논문집, 제 10권, 제 5호, pp. 487-491.
 5. 남성원, 권혁빈, 남윤수(2008), "KTX 열차 풍압 특성을 측정하기 위한 선로변 현장 실험 연구," 한국철도학회논문집, 제 11권, 제 6호, pp.575-580.
 6. 한국철도기술연구원(2007), "호남고속철도 선로 중심간격 설정을 위한 공기역학적 검토," pp.74-77.
- 접수일(2009년 8월 24일), 수정일(2009년 9월 18일),
게재확정일(2009년 11월 7일)