

선로간격 설정시 KTX 열차풍 영향 측정에 관한 실험 연구

남성원* · 권혁빈**

Experimental Study to measure Aerodynamical Wind Effects of KTX for Determining the Distance Between Track Centers

Seong-Won Nam*, Hyeok-Bin Kwon**

Key Words : Aerodynamical effects(공력영향), Track center(선로중심), High speed train(고속철도)

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. And we estimated the aerodynamical effects by the results of the real train experiments by using KTX.

1. 서론

철도를 건설할 때에 복선 철도의 상하행선간의 선로 중심 간격이나 선로의 노반폭을 기존의 크기보다 줄일 수 있다면, 막대한 공사비 절감 효과를 거둘 수 있다.

그러나, 이러한 효과를 얻기 위하여는 선로 중심 간격 및 노반폭의 감소로 인한 안전 문제가 우선 선결되어야 한다. 선로 중심 간격의 축소는 교행하는 열차 사이에 풍압이 증가하여 철도차량의 주행 안전성이 저해되어 심할 경우 열차 전복과 같은 사고를 유발할 수 있으며, 노반폭의 감소는 승강장에 대기중인 여객의 뿐만 아니라 선로변에서 작업중인 철도 종사원의 안전에도 영향을 끼친다.

차량 속도가 증가되거나 선로간 간격이 좁아지면 교행시 발생하는 열차풍의 크기가 증가하며, 이로 인한 열차풍압은 차체에 횡압으로 작용하여 좌우진동 또는 롤링 모멘트를 가중시킨다. 정해진 궤도위를 차륜으로 주행하는 철도차량의 특성상, 이러한 횡압의 증가는 승차감 뿐만 아니라 탈선계수에도 영향을 끼치며 차량 운행상 확보하여야 할 주행 안전성을 저해하게 되므로 선로 건설시의 선로간 간격 결정에 앞서 그 영향력을 철저히 검토하여야 한다[1-4].

본 연구의 고려 대상인 호남 고속철도는 현재 설계단계로서 기존의 경부 고속철도에서 운행중인 KTX보다 차량 최고운행속도가 증가할 것으로 예상되므로 이에 맞는 선로 설계가 이루어져야 한다.

현재 계획중인 호남고속철도의 운행차량의 설계 최고속도는 350km/h이며, 상하행선의 선로간 중심 간격은 5.0m이하로 설계 가이드라인을 설정한다. Table.1에서 보는바와 같이 세계 각국에서 운행중인 고속철도의 선로 중심 간격이 대부분 5.0m 이내이며, 최근에 개발되고 있는 선진국의 신차종의 설계최고속도가 350km/h에 이르고 있는점을 반영하면 적절한 가이드라인으로 사료된다[5-8].

본 연구에서는 현재 운용중인 KTX와 경부 고속철도 제원을 이용하여 실차실험과 현장실험을 하고, 이러한 결과들을 바탕으로 350km/h로 주행하는 열차가 교행할 때의 열차풍의 크기를 선로 중심간격이 5.0m이하로 축소되었을 경우에 어떻게 변화되는지를 예측하였다. 실험에 이용한 차량은 서울-부산간을 운행하는 열차를 대상으로 하였으며, 선로변 현장실험은 경부고속선의 구간중 최고속도를 내는 직선구역에서 각각 측정하였다.

Table 1. Track Spec. of High Speed Train

고속철도	최고속도	선로간격	궤도구조
TGV지중해	300km/h	4.8m	발라스트
TGV북유럽	300km/h	4.5m	발라스트
ICE켈른	300km/h	4.5m	슬라브
Eurostar	300km/h	4.5m	슬라브 발라스트
KTX	300km/h	5.0m	발라스트
대만	300km/h	4.5m	슬라브
山陽간선	300km/h	4.3m	슬라브 발라스트
AVE마드리드	300km/h	4.3m	발라스트

* 한국철도기술연구원, swnam@krri.re.kr

** 한국철도기술연구원, hbkwon@krri.re.kr

2. 열차 실험 및 현장 실험

2.1 교행 풍압 실험 및 결과

KTX를 이용한 실차 실험은 서울-부산간을 영업 운행 속도로 왕복하며 측정하였으며, 압력센서를 차량 측벽에 설치하고 상대열차와 교행시에 압력 변화를 실시간으로 측정하였다. 차체 측벽에 부착한 압력센서와 차량내부 객실내에 설치한 압력센서로부터의 압력신호는 A/D컨버터를 거쳐 포터블 계측장비에 저장되며, 운행중의 교행 신호등은 선두부의 운전실로부터 무선으로 제공받았다.

KTX의 열차당 편성 차량수는 20량으로 구성되어 있으며, 양측 끝단에 운전석이 있는 동력차 2량, 일부가 동력실로 구성된 동력객차 2량, 객차 16량으로 구성되어 있다. Fig. 1에 동력객차에 설치한 교행 압력 측정 개략도를 나타내었다. 사용한 압력센서는 Druck社 PMP4070모델이며, 계측범위는 80~150kPa, 데이터 샘플링 속도는 최대 5kS/s이다. Fig. 2~3에 차량 교행 속도가 409km/h 및 598km/h 일 때의 압력변화를 나타내었다. 그림에서 붉은선 심볼로 표시된 압력은 교행하는 쪽의 차체에 작용하는 열차 풍압을 나타낸다.

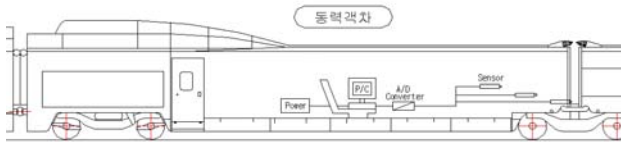


Fig. 1. Sketch of Measurement System

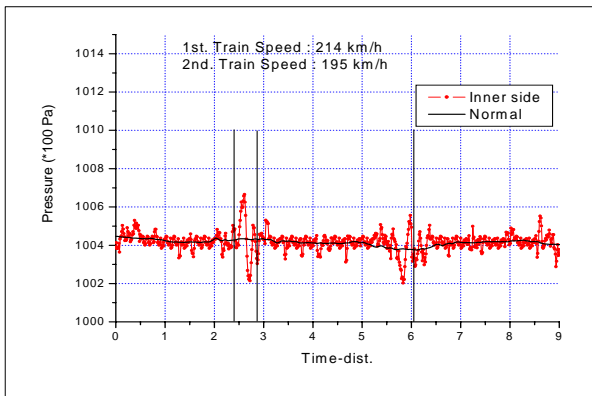


Fig. 2. Pressure Variation (Relative velocity 409km/h)

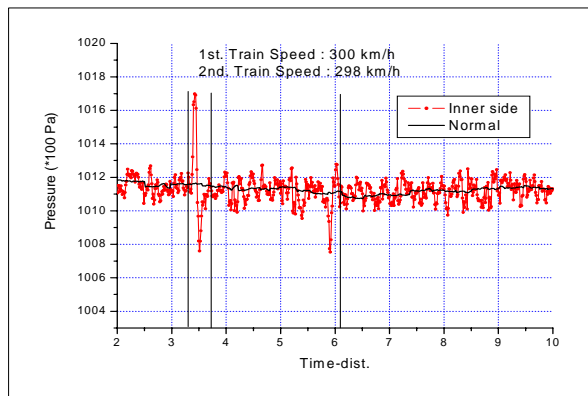


Fig. 3. Pressure Variation (Relative velocity 598km/h)

Fig. 2의 경우는 교행하는 두 열차의 평균속도가 204km/h, Fig. 3의 경우는 299km/h로 95km/h차이가 나지만, 교행시의 압력 변화 유형은 정성적으로 유사한 패턴을 나타낸다. 즉, 전두부가 교차할때는 외측으로 작용하는 반발력이 주로 작용하며, 후미부가 통과할때는 내측으로 작용하는 흡인력이 작용한다.

고속선 및 기존선에서의 다양한 차량 속도에 대한 교행 압력의 최대 반력 및 최대 인력의 크기를 Table 2에 표시하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 선로 중심 간격이 5.0m인 고속선과 4.3m인 기존선에서 차량 교행 속도가 증가함에 따라 양측 차량 전두부의 교행시의 최대 반력과 최대 인력이 증가함을 알 수 있다. 고속선에서의 각 case별로 교행 차량 상대 속력의 크기는 대략 100km/h 정도씩 차이가 나지만, case 1 및 2의 경우, 측정 차량의 속도는 비슷하나 상대 열차의 속도 차이가 약 85km/h이며 case 3의 경우는 측정 차량의 속도가 case 1 비하여 85km/h, 상대 열차의 속도는 100km/h 정도 차이가 있기 때문에 최대 반력 및 최대 인력의 크기가 교행 속도의 절대 크기에 비해하지 않는 것으로 판단된다.

차량 속도별 교행 압력 크기를 Fig.5에 나타내었다. 그림에서 기호 ■는 경부 고속선에서의 주행시 교행 압력을 측정된 것이며, 기호 ○는 기존의 선로에서 측정된 교행 압력을 각각 나타낸다. 기존선에서의 차량 속도는 150km/h를 넘지 않는 범위에 분포되어 있음을 알 수 있으며, 고속선에서는 140km/h~300km/h에 이르기 까지 차량 속도대역이 폭넓게 분포하며, 이를 데이터를 바탕으로 실험식을 구한 결과 경부 고속선에서의 KTX의 차량 교행 압력은 최고속도 300km/h에서 약 474Pa이며, 이 곡선에 따라 외삽하여 구한 350km/h 주행시의 열차 풍압은 *점의 약 682 Pa로 나타났다.

Table 2. Pressure Variation for Cases

case	교행속력 (km/h)	선로	교행압력 (Pa)		
			기준	최대반력	최대인력
1	409	고속	100430	100660	100210
2	500	고속	100520	100780	100310
3	598	고속	101160	101690	100760
4	222	기존	100720	100870	100600
5	285	기존	100950	101140	100790

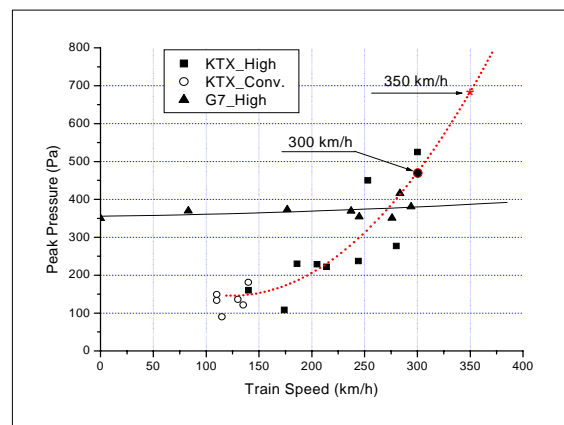


Fig. 5. Peak Pressure to Train Speed

2.2 선로변 열차풍 실험 및 결과

고속열차의 주행으로 발생하는 열차 풍압의 크기를 열차로부터의 거리에 따라 어떻게 변하는가를 측정하기 위하여 선로변에서 현장 실험을 실시하였다.

철도 선로변에서의 열차풍 크기 측정 현장 실험은 KTX가 최고속도로 주행하는 구간을 선택하여 실시하였다. Fig. 6 및 Fig. 7에 선로변 열차풍 크기를 측정하기 위하여 설치한 압력센서 및 측정 구역의 전경 사진과 설치한 압력센서 측정 위치에 대한 개략도를 표시하였다.

현장 실험은 서울기점 124km에 위치한 오송차량 기지 근처의 하행선 선로변에서 실시하였으며, 이 구간에서는 운전 선도상 허용되는 열차의 최고 속도가 300km/h로서 다양한 속도대역에 대하여 열차 풍압을 측정하였다.

압력 측정 개소는 총 10개소이며 레일면상으로부터 1.0m 높이 지점에 50cm 간격으로 설치하였다. 차체에서 가장 가까이 설치한 센서①은 주행중인 열차의 차체 측면으로부터 약 50cm 떨어진 위치이며, 센서②는 선로 중심 간격이 5.0m인 경우의 중앙에 해당된다. 그리고, 대향 열차의 내측 차체면은 센서④의 위치에 해당되며, 선로 중심 간격이 4.0m로 줄어들게 되면 대향 KTX 열차의 차체 외측면은 센서②의 위치에 오게 된다.

통과하는 차량 속도는 측정 구간에 대한 운전 선도상의 속도로 정하였으며, 캠코더를 이용하여 확인하였으며, 실험 기간 동안에 통과한 KTX 차량의 평균 속도는 대략 250~300km/h로서 고속도 영역에서 주로 측정하였다.



Fig. 6. Field Test of Train Wind Pressure

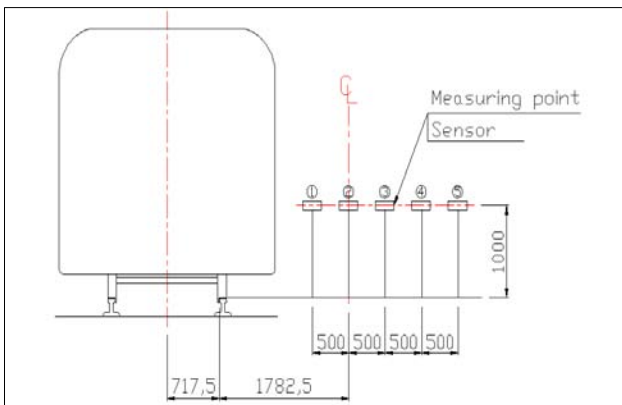


Fig. 7. Overview of Train Wind Test

Figure 8~9에 통과하는 열차의 평균 속도가 300km/h 및 280km/h일때의 열차풍 크기 변화를 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 교행 열차풍의 변화 패턴과 마찬가지로 열차 전두부 통과시에는 큰 반발력이, 후미부 통과시에는 흡인력이 작용하였으며, 주행 열차의 차체로부터 측정점이 멀어질수록 압력이 감소하는 경향을 나타낸다.

열차의 전두부가 통과할 때에 가장 큰 반발력이 작용하였으며, 전두부가 통과한 직후 흡인력이 발생하였다. 중간의 편성 차량들이 통과할 때에는 복잡한 난류 성분이 혼재되어 열차풍압 변동의 진폭이 등락하는 형태를 보이다가 후미부가 통과할 때에 큰 부압이 작용하여 흡인력이 작용하고, 후미부가 완전히 통과한 후에 후류에 의한 비교적 작은 압력 변동을 나타낸다.

Figure 10에 열차풍 현장 시험 결과를 표시하였다. 근방 차량별 통과 속도에 따른 실측치를 300km/h인 경우 ●로, 270km/h인 경우 ■로 각각 나타내었다. Fig. 5에서 구한 교행 열차풍 측정 실험값과의 상관 관계를 찾기 위하여, 같은 조건인 선로 중심 간격 5.0m에서 열차속도 300km/h에 대한 값은 구하였으며, 그 때의 값은 약 255Pa임을 알 수 있다. 앞에서 구한 같은 조건에서의 교행 열차풍의 크기가 474Pa이므로 교행열차풍/단독열차풍 간에는 약 1.86배의 비례 관계가 있음을 알 수 있다.

Figure 10에서 속도가 350km/h 일 때의 외삽 곡선을 구하면, 적색의 예측값 곡선을 얻을 수 있다. 이 곡선상의 *점의 값은 선로중심 간격이 5.0일 때 350km/h 속도에서의 열차풍압이며 약 346 Pa이다. 마찬가지로 앞 장의 350km/h 외삽 곡선상의 교행 열차풍압은 682Pa이므로 교행열차풍/단독열차풍 예측 곡선간에는 약 1.97배의 비례 관계가 있다.

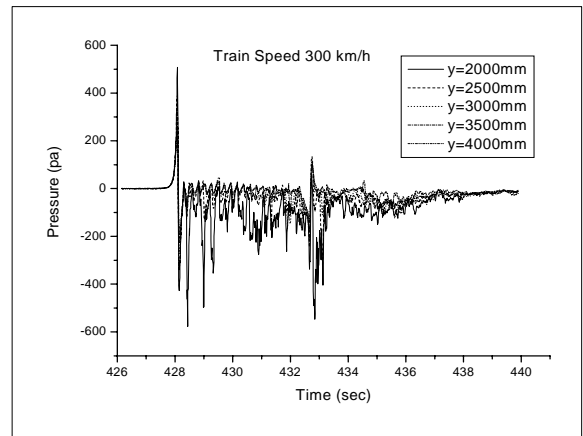


Fig. 8. Train Wind Pressure(300km/h)

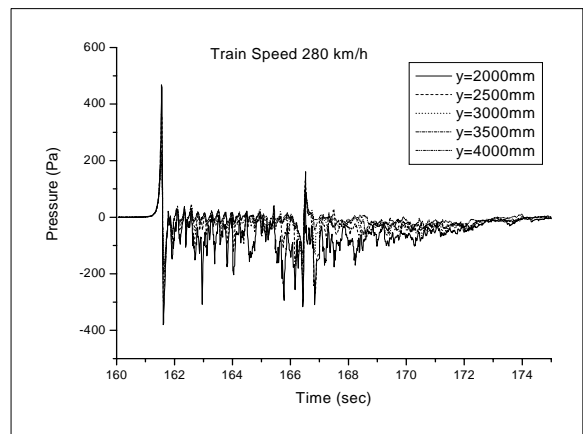


Fig. 9. Train Wind Pressure(280km/h)

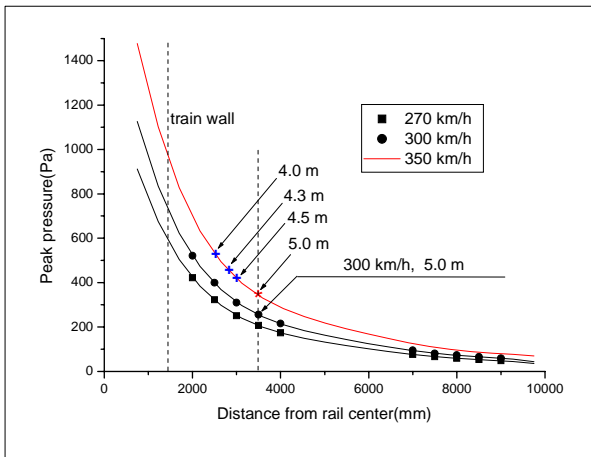


Fig. 10. Results of Field Test

이는 교행 열차의 상대 속도가 대상 열차 관점에서 2배에 해당되므로, 300km/h 이하에서 얻은 데이터를 이용하여 구한 예측 곡선들이 이론값들과 크게 벗어나지 않으며, 예측 곡선간의 비례상수 1.97은 실험값간의 비례상수 1.86과는 6% 이내의 오차를 갖는다. 따라서, 차량속도 350km/h일 때의 선로 중심간격 변화에 따른 열차 풍압은 그림4-8의 곡선상에서 구한 예측값 (예를 들면, 4.5, 4.3, 4.0m 일때에 +로 표기)에다 비례정수 1.97~1.86을 곱한 값들이 교행 차량에 작용하는 열차 풍압이 될 것으로 예측할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 고속 열차가 교행할 때에 받는 풍압의 영향을 파악하기 위하여 경부 고속선에서 KTX열차를 이용하여 실차 실험과 선로변 현장 실험을 실시하였다. 실차 실험은 경부 고속철도를 영업 운행하는 조건에서 시행하였으며, 서울-부산간 왕복 운행중 고속선 및 기존선에서 교행하는 다양한 열차 속도 대역에 대하여 측정하였으며, 선로변 현장 실험은 KTX가 최고운행속도로 주행하는 운전 선도 구간에서 열차풍압을 측정하였다. 고속선에서의 교행 차량 속도는 최고 598km/h(측정차량 속도 약 300km/h), 기존선에서는 285km/h(측정차량 속도 약 145km/h)로서 각각 선로 최고 속도까지 측정하였다. 선로변 현장 실험은 250~300km/h로 주행하는 열차에 대하여 열차풍압 변동을 측정하였다. 측정된 결과들을 정리하면 다음과 같다.

(1) 교행시 측정열차가 받는 풍압의 크기는 대향 열차의 차량 속도에 크게 의존한다.

(2) 경부선 KTX열차가 차량속도 300km/h로 교행할 때에 전두부에서 받는 열차 풍압의 크기는 약 474Pa이며, 단독 주행하는 열차 풍압을 선로변에서 측정한 값은 255Pa이다.

(3) KTX가 300km/h로 주행할 때의 교행열차풍압/단독열차풍압 값은 1.86이며, 300km/h이하로 실차 측정된 값들에 기초하여 예측한 350km/h에서의 비례값은 1.97로서 실측값과 예측값간의 오차는 6% 이내이다.

후기

본 연구는 (주)삼안의 수탁연구 사업의 일환으로 진행되었으며, KTX실험에 협조하여 준 Korail 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김희동, "고속철도의 공기역학(II)," 대한기계학회지, 제36권 제3호, (1996), pp.268-280.
- [2] Maeda, T, "Review of Micro-pressure Wave Radiating from Tunnel Portal and Pressure Variation under Train Passage," RTRI Report, Vol.10, No.2, (1996), pp.5-10
- [3] Kobayashi, M, "Analysis of Pressure Changes Developed Outside and Inside a Shinkansen Train Running through a Tunnel," J. JSME (B), Vol.61, No.591, (1995), pp.4054-4060.
- [4] Suzuki, M, "Study on Interaction between Vehicle Dynamics and Aerodynamic Force on High-Speed train in tunnel," RTRI Report, Vol.15, No.5, (2001), pp.19-24
- [5] Schetz, J, "Aerodynamics of High-Speed Trains," Annu.Rev.Fluid Mech, Vol.33, (2001), pp.371-414
- [6] Robert.A, "Measurement of the Aerodynamic Pressures Produced by Passing Trains," Proc. 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conf., (2002), pp.1-8.
- [7] Rochard, B.P., "A Review of methods to measure and calculate Train Resistances," IMechE, Vol.214, part F, (2000), pp.185-199.
- [8] UIC code 779-1, "Effect of the Slipstream of Passing Trains on Structures Adjacent to the Track," (1996)