

고속철도 선로중심 간격에 끼치는 공력 영향에 관한 연구(I)

A Study of Aerodynamical Effects on the Distance between Track Center of High Speed Train(I)

남성원* 권혁빈**
Nam, Seong Won Kwon, Hyeok Bin

ABSTRACT

When constructing a high-speed railroad, the reduction of the distance between track centers and the width of track bed may bring about the effect of cost savings. When, however, considering the influence that the increase of wind pressure due to the change of the distance between track centers may have on the stability of train operation, extensive technical review and overall studies need to be performed before the distance between track centers is determined. Therefore, 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. In this study, we estimated the aerodynamical effects by the results of the real train experiments.

1. 서론

고속철도 뿐만아니라 기존선 개량 공사시, 상하행선간의 선로중심 간격과 시공기면폭의 감소는 막대한 선로 건설 공사비의 절감 효과를 가져 올 수 있으나, 선로중심 간격과 시공기면폭 축소로 인한 열차 풍압 증가가 서로 교행하는 열차의 주행 안전성과 선로변 작업자의 안전에 미치는 영향을 고려할 때 이러한 설계 제원 결정에 앞서 충분한 기술적 검토와 제반 연구가 선행되어야 한다.

열차의 고속 주행시, 발생하는 열차풍의 영향은 상대 교행 열차에 횡력으로 작용하며 이로인해 증가되는 차량간의 압력변동과 횡방향 가속도의 영향은 선로 중심 간격 결정에 주요 요소로 대두된다. 차량 속도 증가와 선로 중심 간격 감소로 야기되는 열차풍 크기 증대와 교행 열차 사이에 발생하는 압력 변동은 교행 열차의 횡가속도를 증가 시킬 수 있는 요인으로 진전될 수 있다. 따라서 열차 교행시 압력 변동의 주요 요인인 유동 변화를 예측하고 그 영향력을 검토하여 열차에 미치는 외력의 변화에 따른 열차 주행 안전성을 검토하여야 한다^(1~4).

본 연구의 고려 대상인 호남 고속철도는 현재 설계 단계로서 기존의 경부 고속철도보다 차량속도가 증가할 것으로 예상되므로 이에 맞는 선로의 제원 설계가 이루어 져야 한다.

* 책임저자, 정희원, 한국철도기술연구원, 철도시스템연구본부

E-mail : swnam@krri.re.kr

TEL : (031)460-5244 FAX : (031)460-5279

** 한국철도기술연구원

즉 고속 철도 차량의 설계 최고 속도는 350km/h 이상이며, 상하행선간의 선로 중심 간격은 5.0m 이하로 설계 가이드라인을 설정한다. 이는 해외의 사례들을 보더라도 경부 고속 철도의 선로 중심 간격인 5.0m는 최대값으로서 선정 당시 일부에서 논란의 소지가 있었으며, 차량 속도를 350km/h로 설정한 이유는 현재 세계 각국에서 운행되고 있는 고속철도의 최고 속도가 대부분이 300km/h이므로 멀지 않은 장래에 최고속도 350km/h의 차량이 개발될 것으로 예측되기 때문이다.

표1에 현재 운행중인 각국의 대표적인 고속철도의 선로 중심 간격을 나타내었다.

Table 1. Track Spec. of High-Speed train

고속철도	최고속도	선로간격	궤도구조
TGV지중해	300km/h	4.8m	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신간선	300km/h	4.3m	슬라브/ 발라스트

표에서 알 수 있듯이, 각국의 대부분의 고속철도는 최고 속도가 300km/h 이상이며, 선로 중심 간격은 5.0m 이하이고, 궤도 구조는 지형 특성에 따라 슬라브 혹은 발라스트 구조를 사용한다^(5~8).

본 연구에서는, 현재 운용중인 KTX와 경부 고속 철도 제원을 이용하여 실차 실험을 하고, 이러한 결과들을 이용하여 350km/h 및 선로 중심 간격 5.0m 이하에서의 교행시 열차간에 끼치는 공력 영향을 예측하고자 한다.

2. 실차 실험 개요

KTX를 이용한 실차 실험은 서울-부산간을 영업 운행 속도로 왕복하며 교행시의 차량 측벽에 끼치는 압력을 실시간으로 측정하였다. 차량 외부의 압력은 차체 측벽에 주행 방향과 수직으로 압력 튜브를 설치하여 압력센서에 연결하였으며, 차체 내부에 있는 데이터 처리 시스템과는 케이블로 연결하였다. 계측 센서의 위치는 19호 차량의 차체 리프팅 홀 근처의 좌우에 설치하였으며, 객실내 압력은 중앙의 의자 위에서 측정하였다. 각각의 측정 센서로부터의 입력 신호는 A/D컨버터를 거쳐 포터블 PC에 저장되며, 주행중의 운영 정보는 운전석으로부터 받도록 하였다.

그림 1에 편성 열차 위치와 압력 측정 개략도를 나타내었다. 19호 차량은, 하행선의 경우 차량 후부 조건이며, 상행선에서는 전두부 조건이 된다.

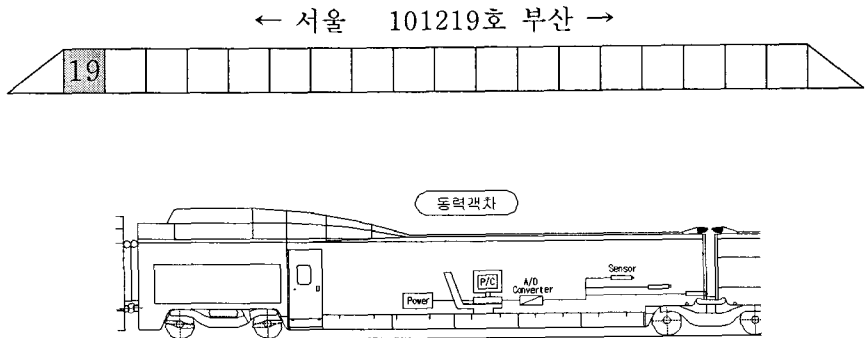


Fig. 1. Sketch of Measurement System

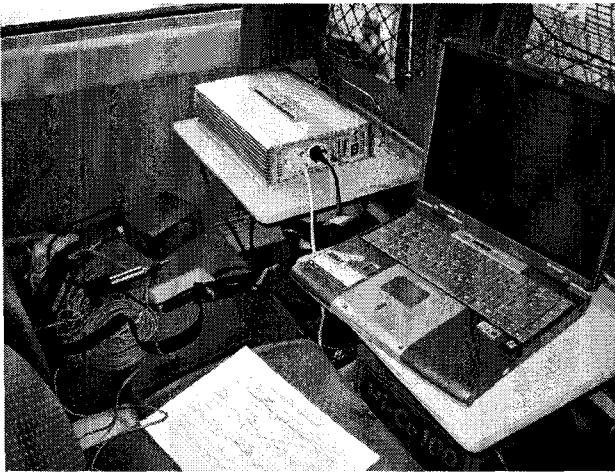


Fig. 2. Pressure DAQ system

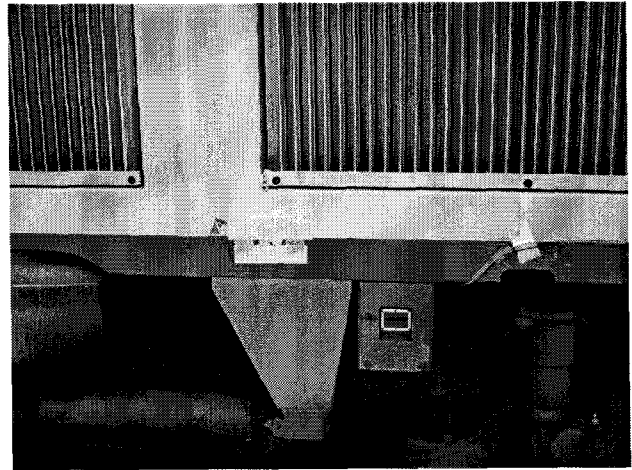


Fig. 3. Pressure sensor installed on outside

그림2는 KTX 객실내에 설치한 압력 계측 시스템으로, 사용한 압력센서는 Druck社 PMP4070 모델이며, 계측범위는 80~150kPa, 샘플링 속도는 5kS/s이다. 그림3은 차체 외벽에 설치한 압력센서의 그림이며 KTX의 차체 외벽에 압력센서를 직접 설치하기 곤란한 구조이어서 압력튜브를 이용하여 압력센서와 연결하였다.

3. 실험 결과 및 분석

현재 우리나라에서 운행중인 경부고속철도의 KTX 차량 최고속도는 300km/h이며, 상하행선간의 선로 중심 간격은 5.0m이다. 따라서 차량 속도 300km/h 이상과 선로 중심 간격 5.0m 이하에 대한 검토는 그 범위 이하에서 운행중인 KTX, 새마을 및 무궁화 열차를 대상으로 한 실험 결과에 기초하여 보간하고 예측하거나 전산 해석 및 이론적 방법으로 구하여야 한다. 그림4에 차량속도와 선로중심 간격에 대한 현황과 목표로 하는 대상 영역을 도시하였다. 즉, 차량속도 300km/h와 선로중심간격 5.0m의 조건과 차량속도 150km/h와 선로중심 간격 4.3m의 조건에서 측정된 값들을 기초로 예측하여야 한다.

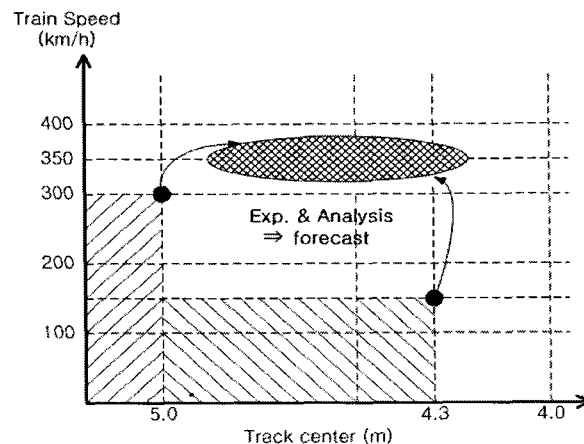


Fig. 4. Research Target

본 연구에서는 선로 중심 간격 및 시공기면폭 설정을 위한 첫 번째 연구 접근 방법으로, 선로 중심 간격 5.0m인 경부 고속선에서는 교행하는 KTX를 이용하고, 기존선에서는 KTX와 기존선 차량과의 다양한 속도별 교행 열차풍압을 측정하여 차량 속도 변화와 선로 중심 간격 변화시의 공력 영향을 분석하였다. 기존의 일반 철도의 선로 중심 간격은 차량의 폭과 시설물 설치의 허용오차 및 열차 주행시 차량 횡진동에 의한 승무원 및 승객에 대한 안전을 고려하여 결정하나, 고속철도의 선로 중심 간격은 열차 교행

시 고속주행에 의하여 발생하는 열차풍에 의하여 차량이 탈선 전복하지 않아야 하며, UIC 등에서 정하는 승차감 기준 이하가 되도록 선로 중심 간격을 결정하여야 하므로, 이러한 조건을 만족시키기면서 선로 건설비와 같은 경제성도 고려하여 최적값을 찾아야 한다. 일반적으로 선로 중심 간격은 차량 한계의 최대폭에 궤도 보수 작업상의 안전성, 열차 교행시의 압력, 열차풍에 의한 작업원의 안전, 교량 설계시의 필요 공간, 궤도부설 오차, 곡선구간 확폭량을 고려하여 결정한다.

그림5에 열차 교행시에 발생하는 전형적인 압력 변화 유형을 나타내었다. 즉, 열차가 교행할 때에 발생하는 열차풍압의 변동 패턴은 전두부가 교차할때에는 열차풍압이 외측으로 작용하는 반발력이 주로 작용하며, 후미부가 교차할때에는 내측으로 끌어당기는 흡인력이 작용하는 것으로 알려져 있다.

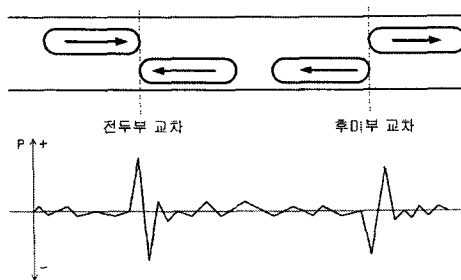


Fig 5. Pressure Variation Pattern of Passing Trains

그림 6~7에 고속선에서, 그림 8~9에 기존선에서의 차량 교행시 압력 변화의 대표적인 사례들을 표시하였다.

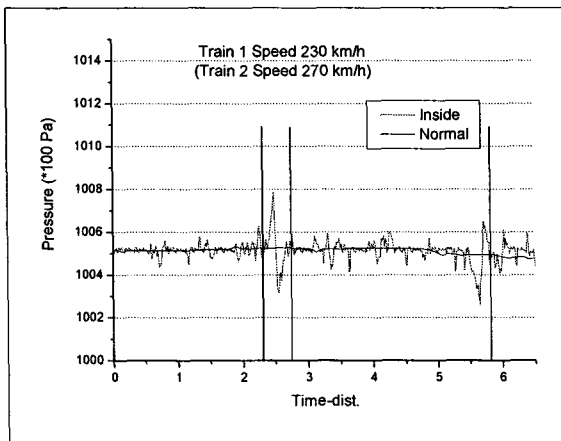


Fig. 6. Pressure Variation(Velocity 500km/h)

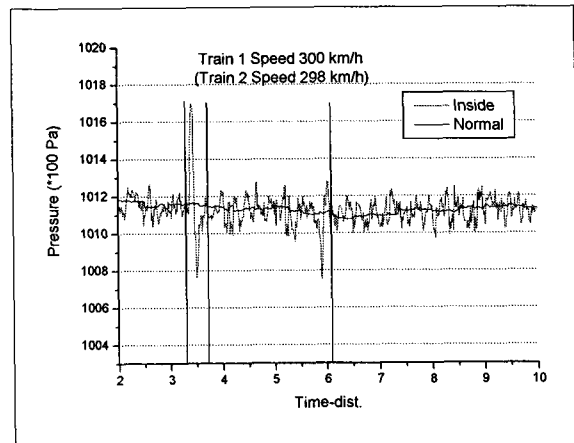


Fig. 7. Pressure Variation(Velocity 598km/h)

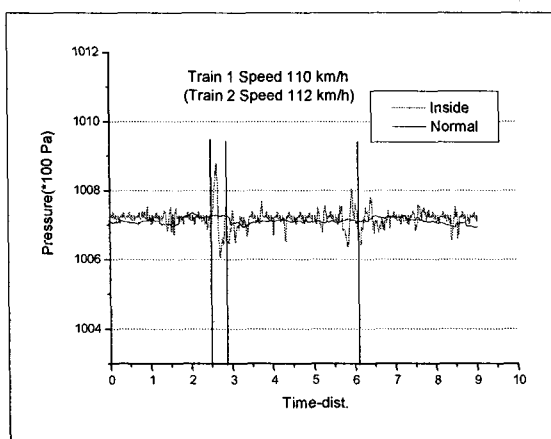


Fig. 8. Pressure Variation(Velocity 222km/h)

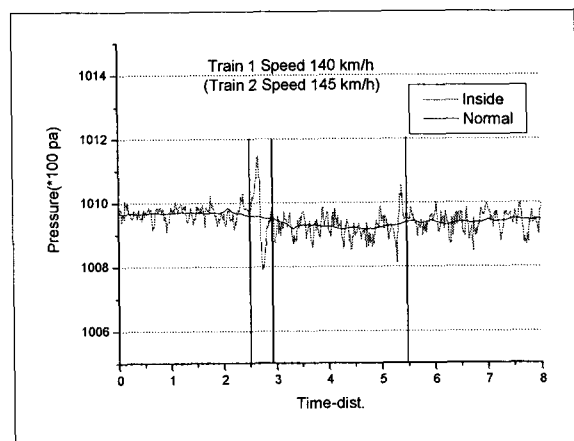


Fig. 9. Pressure Variation(Velocity 285km/h)

고속선 및 기존선에서의 다양한 차량 교행 속도에 대한 교행 압력의 최대 반력 및 최대 인력의 크기를 표 2에 표시하였다.

Table 2. Pressure Variation for Cases

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

표에서 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. case 1대비 case 2의 경우는 최대 반력은 30Pa 증가하나 최대 인력은 비슷한 수준이며, case3의 경우는 최대 반력은 300Pa 증가하나 최대 인력은 180Pa 증가 하는데 그치고 있다. 따라서 전두부 교행시에는 양측 열차간에 작용하는 힘이 인력에 비하여 반력이 더 크게 작용함을 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 비례하지 않는 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 상대 열차를 정지시켜 놓고 측정 열차의 속도를 변경하여 가며 실시한 실험에서도 알 수 있다.

그림10은 대향 열차가 정차한 상태에서 측정 열차가 다양한 속도로 통과할 때의 교행 압력을 측정한 결과이다. 측정 열차의 차량 속도가 70km/h~295km/h까지 변하여도 교행 압력의 크기에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 즉, 측정 열차의 교행 압력은 대향 열차의 속도에 크게 의존함을 알 수 있다.

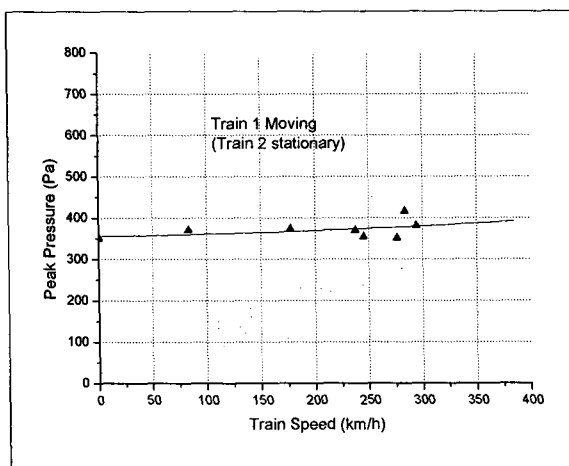


Fig. 10. Pressure Variation(Train 2 Stop)

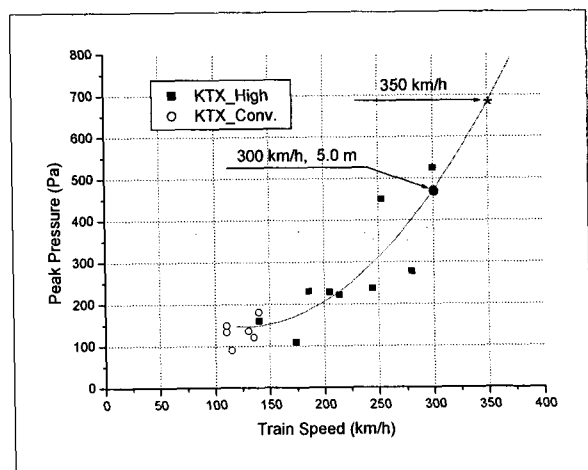


Fig. 11. Peak Pressure to Train Speed

그림 11에 차량 속도별 교행 압력 크기를 나타내었다. 그림에서 ■기호는 정부 고속선에서의 주행시 교행 압력을 측정한 것이며, ○기호는 기존의 선로에서 측정한 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 정부 고속선에서의 KTX의 차량 교행 압력은 최고속도 300km/h에서 약 474Pa이며, 이 곡선에 따라 의

삽하여 구한 350km/h 주행시의 열차 풍압은 *점의 약 682 Pa로 나타났다. 따라서, 향후 고속전철의 차량 속도가 350km/h 향상되었을 경우에 교행 열차 상호간에 주고 받는 풍압의 영향을 평가 할 수 있으며 이를 바탕으로 차량 주행 안정성, 선로변 작업원, 통과역의 주변 승강장의 대기 승객에 미치는 영향 및 선로변 시설물의 풍압 안전 설계시, 이 값을 가이드 라인으로 고려할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속 열차가 교행할 때에 받는 풍압의 영향을 파악하기 위하여 경부 고속선에서 KTX 열차를 이용하여 실차 실험하였다. 실차 실험은 경부 고속철도를 상업 운행하는 조건에서 시행하였으며, 서울-부산 1왕복 운행중 고속선 및 기존선에서 교행하는 다양한 열차 속도 대역에 대하여 측정하였으며 측정열차의 운행 정보는 운전실로부터 직접 받았다. 고속선에서의 교행 차량 속도는 최고 598km/h(측정 차량 속도 약 300km/h), 기존선에서는 285km/h(측정차량 속도 약 145km/h)로서 각각 선로 최고 속도 까지 측정하였다. 실차 실험 결과 얻은 결과를 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 474Pa의 반력이다.
- (3) 다양한 속도 대역에서 측정한 실차 실험결과로부터 향후 차량속도가 350km/h 증속되었을 대의 교행 열차 풍압은 682Pa로 예측된다.

참고 문헌

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