

철도차량의 승강장 통과 시 발생하는 공기역학적 영향에 대한 실험적 연구(기존철도역 현장 시험)

An Experimental Study on the Aerodynamic Effects Generated by a Train Passing near by Platform(Conventional Railway Station Field Test)

김동현¹ · 권역빈² · 김문현³ · 송문석⁴ · 김도훈⁵

Dong-Hyeon Kim · Hyeok-Bin Kwon · Moon Hun Kim · Moon Shuk Song · Do Hoon Kim

Abstract

A series of filed tests have been performed to investigate the aerodynamic effects on platform of the railway station during the passage of train that can be unpleasant and even dangerous to the pedestrians. To assess the aerodynamic effects on the platform, two aerodynamic properties has been measured; one is the wind gust induced by the train and the other is the pressure pulses generated when the nose and the tail of train passes. To measure these aerodynamic properties during the train passage, an array of hot-wire type anemometers and several sets of pressure transducers have been used, respectively. This paper deals with the filed test on conventional railway at about 100km/h operational speed, in which total 34 measurements has been made at the Bugok station in Seoul-Busan line for Saemaul-ho and Mugungwha-ho train. The results showed dramatic differences in the aerodynamic features between the two trains that are supposed to originate from the contrasting nose shapes of the trains.

Keywords : Train gust(열차풍), Pressure pulse(압력 펄스), Platform(승강장), Conventional Railway(기존철도), Saemaul train(새마을 열차), Mugungwha train(무궁화 열차)

1. 서론

철도차량이 선로 위를 주행할 때에는 주위 공기유동장을 교란시켜 터널, 교량, 선로주변에 설치된 방음·방풍벽, 고가교 등 각종 구조물과 선로변 및 역사 내 플랫폼의 인명과 화물, 인근 궤도 상의 정차 혹은 운전 중인 열차 등에 영향을 미친다. 철도차량의 통과로 인한 선로 주위의 공기유동장 교란으로서는 차량 전두부 및 후미부에 형성되는 압력장의 변화로 인한 급격한 압력변동과 차량 표면에 형성되는 경계층으로 인해 유도되는 강한 난류 열차풍으로 크게 나뉘어 진다[1]. 철도차량에 의한 공기유동장의 교란의 크기는 보통 열차속도의 제곱에 비례하며, 이는 차량

속도의 증가에 따른 공기유동장의 교란의 증가량이 차량속도의 증가량보다 훨씬 크다는 것을 의미한다. 따라서 철도의 고속화 시에는 공기유동에 의한 선로주변의 영향을 정확히 예측, 평가하여 선로 주변의 구조물과 인명, 화물 등에 피해가 없도록 사전에 대책을 마련하여야 한다.

근래 들어 기존철도의 200km/h 급 고속화와 300km/h 급 고속철도의 출현으로 인하여 차량에 의한 선로변 공기유동장에 대한 연구는 최근에 더욱 활발해졌다. 미연방철도국(Federal Railroad Administration, FRA)은 고속철도의 안전에 관한 연구의 일환으로서 1990년대 후반부터 240km/h의 고속철도 운행 중 선로변의 인명과 시설물[2], 역사 내 인명과 시설[3], 인근 선로의 열차에 타고 있는 승객[4]에 미치는 공기역학적 영향에 대한 일련의 연구를 수행한 바 있다. 또한, 최근에는 A. Sanz-Andres와 J. Santiago -Prowald[5]는 열차 풍압이 보행자에 미치는 영향에 대하여 연구하였고, 동 저자 등은 선로주위 교통표지판에 미치는 풍압[6]에 대

1 정회원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부, 책임연구원

2 정회원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부, 선임연구원

3 정회원, 숭실대학교, 기계공학부, 교수

4 정회원, 한국철도대학, 철도차량전기과, 교수

5 정회원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부, 연구원

해서도 연구를 수행한 바 있다.

현재 우리나라 철도는 고속철도의 건설과 더불어 기존선의 고속화가 진행되고 있으며, 연구 중인 틸팅차량의 개발되어 상업운전이 시작되면 기존선에서도 180km/h의 속도로 철도가 운행될 것으로 예상된다. 이처럼 기존선이 고속화되어 어감에 따라 열차통과 시 선로구축물에 대한 공기역학적 영향은 매우 커질 것으로 예상되며, 이에 대한 정확한 평가, 분석을 통하여 현존하는 선로구축물에 대한 적절한 안전기준의 정비와 신축시설물에 대한 공기역학적 최적설계기술의 확보가 시급하다.

본 연구에서는 기존선 터널 및 선로변 현장계측시스템을 개발, 이를 이용해 기존선 역사 플랫폼에서 열차통과로 인한 공기역학적 영향에 대한 현장계측시험을 수행하였으며, 그 결과를 분석하였다.

2. 시험 장치 및 측정조건

2.1 시험장치

열차 통과 시 발생하는 열차풍을 측정하기 위하여 Hot-Wire Probe Array System을 개발하였다. Array를 구성하기 위해 사용되는 열선유속계(Hot-Wire Probe)는 CTA(Constant Temperature Anemometer) 방식으로 열선이 코팅되어있어 현장시험에 적합하도록 제작 되었다. 제조사는 TSI (Model 8455)이며 측정 한계치는 50m/s, 오차범위는 $\pm 0.5\%$ 이내이다. 열차통과 시 발생하는 압력변동을 측정하기 위한 압력계는 ENDEVCO社의 모델 8510B-1과 8510B-2를 사용하였으며, 각각의 모델은 $\pm 1\text{psig}$, $\pm 2\text{psig}$ 의 측정범위를 가지고 있다. 최대 오차는 측정치의 $\pm 1.5\%$ 이다. 또한 전압 증폭기와 결합되어 측정범위에 따라 전압출력을 임의로 설정할 수 있도록 구성하였다. 본 시험에서는 Keyence社의 최대 응답속도 1.5ms인 광전자 센서(모델명: PZ-M51) 2조를 사용하여 열차속도를 측정하였다. 데이터 획득을 위하여 16채널로 구성된 National Instrument 사의 DAQ Card(6062E)와 펜티엄 II급 노트북 컴퓨터가 사용되었으며, 데이터 획득 프로그램은 NI사의 LabView로 프로그래밍 되었다.

2.2 측정조건

철도차량의 통과로 인해 발생하는 압력변동과 열차풍 측정을 위하여 경부선 통과역인 부곡역 플랫폼에 시험장치를 계측장비를 설치하고 현장계측시험을 실시하였다. Fig. 1은 플랫폼에 설치된 사람모형들과 Hot-Wire Probe Array 및 압력센서의 위치를 나타낸 것이다.

Fig. 1에서 열차풍의 유속측정을 위한 Hot-Wire Probe

Array(A)는 열차로부터의 거리(y)와 플랫폼 바닥면으로부터의 높이(z) 두 방향으로 어레이를 구성하였는데, 열차로부터의 거리는 각각 0.3m, 0.8m, 1.8m, 2.8m이며, 플랫폼 바닥면으로부터의 높이는 각각 0.3m, 0.6m, 1.2m가 되도록 하여 열차로부터의 상대적인 위치에 따른 열차풍의 영향을 조사할 수 있도록 하였다. 또한 플랫폼 승객의 안전과 관련하여 어린이와 휠체어에 앉은 사람을 대상으로 열차통과 시 압력변동을 측정하였는데, 이를 위해 신장 1.1m의 어린이 모형(B)과 앉은키 1.3m의 휠체어를 탄 사람모형(C)을 설치하여 각각 가슴 높이에 해당하는 0.7m와 0.85m 높이에 x, y 방향으로 압력센서를 설치하였다.

현장시험은 하루에 걸쳐 플랫폼을 통과하는 모든 열차에 대해서 열차풍 및 압력변동을 측정하였다. 플랫폼에서 측정 한 열차는 총 34대로서 이 중 무궁화호는 총 24편성, 새마을호는 총 10편성이다. 열차의 통과속도를 살펴보면 측정 지점이 곡선구간을 앞에 둔 감속구간이기 때문에 대부분 100km/h 내외에 머물렀으며 최저 97km/h, 최대 114km/h를 나타내고 있는데, 새마을호의 경우 평균 시속은 112km/h로 무궁화호 평균시속인 105km/h에 비해 약간 크게 나타났다. 전두부 형상을 살펴보면, 새마을호의 경우에는 새마을호 전

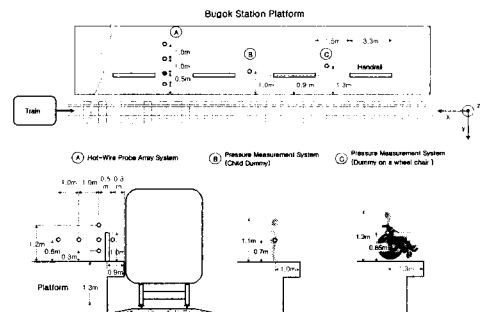


Fig. 1. Test measuring system installed in Bugok station platform

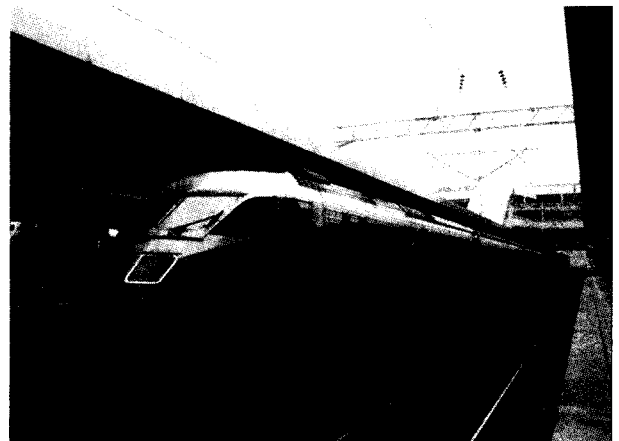


Fig. 2. Front head shape of Saemaul-ho

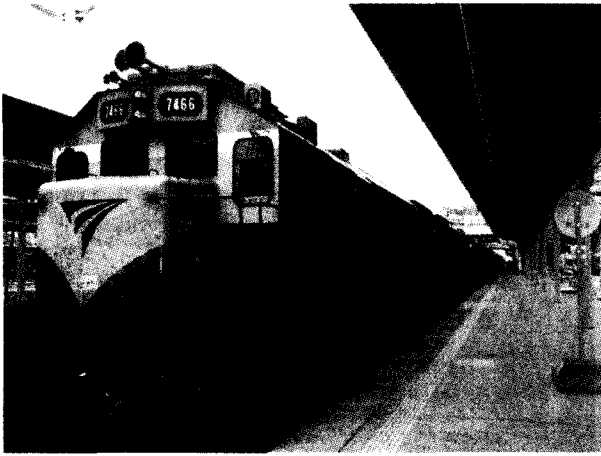


Fig. 3. Front head shape of Mugungwha-ho

용 동력차에 사용되는 유선형 전두부(Fig. 2)를 가졌으며, 무궁화호의 경우에는 각진 절편형(Fig. 3)이었다.

3. 시험결과

부곡역 플랫폼에서의 열차풍 측정결과는 비슷한 속도로 통과한 새마을호와 무궁화호에 대하여 열차가 통과하는 동안의 유속변화를 비교하여 분석하였다. Fig. 4는 플랫폼 끝단에서 0.3m의 위치에서 대한 유속변동을 나타내고 있다. Fig. 4에서 무궁화호(○)는 열차 통과와 거의 동시에 급격한 유속의 증가가 이루어져 전두부 통과와 동시에 최고속도인 20m/s에 도달했으며, 이후 유속에 급격하게 줄어들었다가 후미부 통과 직후 다시 유속이 약간 상승하였다가 이후 점차 유속이 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러나, 새마을호(●)의 경우는 전두부 통과 이후 유속이 점차 증가하다가 후미부 통과 직후 최대유속인 12m/s를 기록하고 있다. 전체 측정구간 내에서 새마을호의 유속은 무궁화호의 유속보다 크지 않은 것으로 보여지며, 전두부 통과 시 열차풍의 패턴이 극적으로 차이가 나며 후미부 통과 후의 후류에 의한 열차

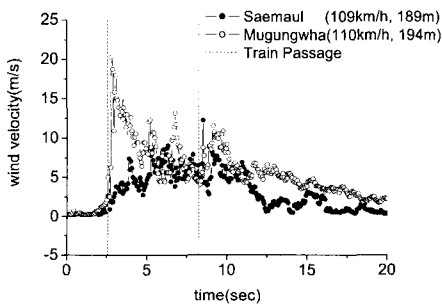


Fig. 4. Wind fluctuation in platform in train passing(0.3m from edge)

풍도 무궁화호가 다소 큰 것으로 보인다. 이처럼 두 차량의 열차풍 특성이 대조적으로 나타나는 이유는 전두부 형상의 차이에 기인하는 것으로 보인다. 즉 새마을호의 유선형 전두부는 공기유동이 전두부 표면을 따라 부드럽게 흐르기 때문에 전두부 진입 시에 유속의 변화가 완만하지만, 무궁화호는 비유선형 형상으로 인하여 전두부 진입 시 유속의 변화가 심하며 후미부의 통과 시에도 강한 난류열차풍이 유도되기 때문이다. 측정위치와 전두부 형상에 따른 열차풍 특성을 좀 더 자세히 알아보기 위하여 각 경우별로 측정구간 내에서의 최대유속($U_{wind,max}$)을 열차속도(U_{train})로 무차원화시킨 값들과 열차풍(U_{max}) 무차원화를 하기 위해 사용된 식은 식 (1)과 같으며, Table 1 및 Fig. 5, Fig. 6은 열차풍의 평균값을 무차원화하여 열차속도에 관계없이 열차풍의 특성을 상호 비교할 수 있다.

Table 1. Dimensionless U_{max}^* train gust according to conditions

Position Train type	Distance (m)	0.3	0.8	0.8	0.8	1.8	2.8
	Height (m)	0.6	0.3	0.6	1.2	0.6	0.6
Saemaul-ho		0.456	0.280	0.285	0.315	0.244	0.198
Mugungwha-ho		0.763	0.571	0.581	0.467	0.294	0.249

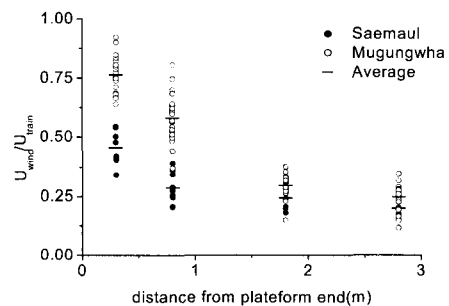


Fig. 5. Maximum train gust in platform according to distance

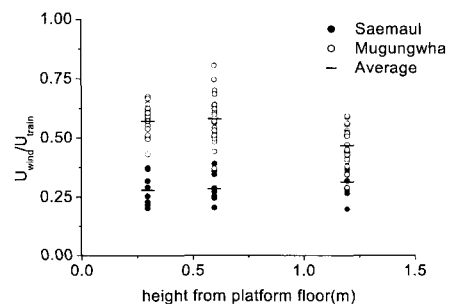


Fig. 6. Maximum train gust in platform according to height

$$U_{max}^* = \frac{U_{wind, max}}{U_{train}} \quad (1)$$

열차로부터의 거리에 따른 열차풍 특성 결과, 0.3m 거리에서는 열차속도의 45%~76%에 달하는 크기의 유속이 나타났으나, 2.8m에서는 25%이하로 감소하여 거리가 증가할수록 유속의 크기가 급격히 감소하는 경계층 유동의 특성을 보여주는 것을 확인할 수 있었다. 높이에 따른 열차풍의 크기는 플랫폼 위 0.3m, 0.6m지점에서는 큰 차이가 없으나, 1.2m지점에서는 무궁화호의 열차풍 크기가 약간 감소한 것을 알 수 있다. 어느 경우든 무궁화호의 경우가 약 1.2배에서 2배까지 더 큰 것을 알 수 있는데, 이는 전두부 형상의 차이로 인한 것으로 보여진다. 승강장 압력변동시험 결과를 분석하기 위해 휠체어 모형 x-방향 센서에서 측정된 열차가 통과하는 동안의 압력변화를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서와 같이 전두부가 진입하기 직전 압력이 크게 증가하였다가 전두부가 통과하는 시점에서 최고조에 다다른 압력이 급격히 감소하였다가 얼마후 다시 급격히 증가하여 열차가 통과하는 동안 대기압 수준을 유지하게 되며, 후미부가 통과하는 시점에서는 압력이 약간 감소했다가 후미부 통과 후 일시적으로 증가한 후 다시 압력이 대기압으로 회복하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 열차통과 시 압력이 펄스파의 형태로 변하는 것을 압력펄스라고 부르기도 하는데, 이는 열차 전두부에서 유동이 압축되면서 고압의 유동장이 형성되며, 후미부에서는 반대로 유동이 팽창하면서 저압의 유동장이 형성되기 때문이다. 그리고, 후미부 통과 시의 압력펄스가 전두부 통과 시의 압력펄스보다 작은 이유는 열차의 길이방향으로 생성되는 경계층의 크기가 커지면서 후미부에서의 압력변화가 전두부에서보다 작아지기 때문이다. 새마을호와 무궁화호의 전두부 통과 시 압력변동 특성을 비교하여 살펴보면, 새마을호에 비해 무궁화호가 압력변동의 크기가 더 큰 것을 알 수 있다. 새마을호(●)의 경우에는 압력의 상승-회복 곡선과 하강-회복 곡선이 형상과 변화의 폭이 매우 비슷하여 거의 대칭인 형태가 나타나지만 무궁화호(○)의 경우에는 압력하강의 폭이 압력상승의 폭보다 다소 커서 대칭성이 나타나지 않을 뿐 아니라 압력하강 후 회복 시 압력곡선이 정규적이지 않으며 각 경우마다 불균일하게 나타났다. 이는 새마을호의 경우에는 전두부가 일정한 길이 내에서 단면적의 변화가 완만하며, 공기가 전두부 표면을 따라 흐르도록 유선형으로 설계되었기 때문에 압력변화가 작고 완만하지만, 무궁화호의 전두부는 앞부분에서 단면적이 급격히 증가하는 각진 형상이기 때문에 압력변화가 크며, 각진 부분에서 유동의 박리가 동반되면서 상당

히 불안정한 유동구조가 형성되므로 이에 따라 압력변화도 매우 불안정한 양상을 띄고 있다는 것을 알 수 있다. 측정위치에 따른 압력변동의 영향을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 각 경우에서 전두부 통과 시 최대압력 및 최소압력의 차이를 차량속도를 기준으로 한 동압으로 무차원화하여 Fig. 8에 나타내었고, 그 중 각 조건별 평균값들을 Table 2에 정리하였다. 무차원화에 사용된 식은 아래 식 (2)와 같다.

$$\Delta C_p = \frac{P_{max} - P_{min}}{\frac{1}{2} \rho U_{train}^2} \quad (2)$$

Table 2에서와 같이 무궁화호의 압력변동 평균치는 0.79로 새마을호 0.32의 두 배 이상으로 나타났으며, 이 중 어린이 모형 y-방향에서의 압력변동값이 전반적으로 다른 값보다 20~30% 높게 나타났다.

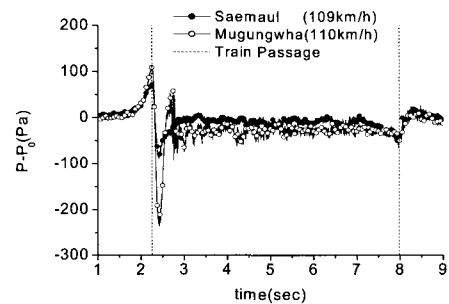


Fig. 7. Pressure fluctuation in train passing (x-direction of wheelchair model)

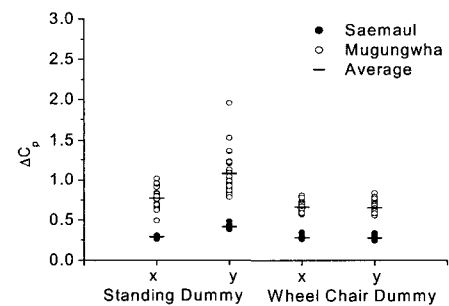


Fig. 8. Maximum pressure fluctuation according to condition

Table 2. Maximum pressure fluctuation according to condition

Train type	Position		Wheel chair(x)	wheel chair(y)	Average
	Junior (x)	Junior (y)			
Saemaul-ho	0.29005	0.41389	0.28061	0.27594	0.31512
Mugungwha-ho	0.77139	1.07584	0.65952	0.65148	0.78956

4. 결 론

철도차량이 철도역을 통과할 때 승강장 주위에 미치는 공기역학적 영향을 조사하기 위하여 경부선 부곡역 승강장에 유속계와 압력계를 설치하고 총 38편성의 통과 열차에 대하여 유속 및 압력변동을 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) 열차가 승강장을 통과할 때 나타나는 공기역학적 효과로는 열차진행방향으로 급격한 유속증가를 의미하는 열차풍과 열차 전두부와 후미부 주위에 형성되는 고압과 저압의 압력장에 의해 발생하는 압력변동이 있으며, 유속계와 압력계를 이용한 현장측정결과 이들을 확인할 수 있었다.
- (2) 열차풍 측정결과, 차량 전두부의 진입과 동시에 유속변동이 시작되며 열차후미부가 통과한 이후에도 일정시간 유속변화가 지속되는 것을 알 수 있었다. 열차풍의 최대 유속은 열차로부터의 거리에 비례하며, 전두부의 형상에도 관계하는 것으로 나타났다.
- (3) 열차통과 시 압력변동 측정 결과, 전두부 진입 시에는 급격한 압력상승과 압력하강이 순간적으로 이루어지며, 차량 중간부가 지나가는 동안에는 대기압이 유지되다가 후미부 통과 시에는 압력이 약간 작아졌다가 다시 상승하며 곧 대기압으로 회복된다.
- (4) 비유선형 전두부를 가진 무궁화호에 비해 유선형의 전두부를 가진 새마을호는 승강장 통과 시 매우 우수한 공기역학적 특성을 나타내었다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 기본연구사업 “궤도토목 선로구축물 성능혁신” 과제의 연구결과 중 일부임을 밝히며 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Gawthorpe, R. G., “Aerodynamics of Trains in the Open Air”, Aerodynamics in Railway Engineering, pp.7-12, 1978.
2. Lee., Harvey Shui-Hong, “Assessment of Potential Aerodynamic Effects on Personnel and Equipment in Proximity to High-Speed Trains Operations”, Report. DOT/FRA/ORD-99/11, Federal Railroad Administration, 1999.
3. Liao, S., Mosier, P., Kennedy, W., Andrus, D., “The Aerodynamic Effects of High-Speed Trains on People and Property at Stations in the Northeast corridor”, DOT /FRA/ORD-99/12, Federal Railroad Administration, 1999.
4. Holmes, S., Schroeder, M., “Aerodynamic Effects of High-Speed Passenger Trains on Other trains”, DOT/FRA/ORD-01/12, Federal Railroad Administration, 2002.
5. Sanz-Andres, A., Santiago-Prowald, J., “Train-induced Pressure on Pedestrians”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.90, pp.1007-1015, 2002.
6. Sanz-Andres, A., Santiago-Prowald, J., Baker, C., Quinn, A., “Vehicle-induced Loads on Traffic Sign Panels”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.91, pp. 925-942, 2003.