

철도터널 통풍공의 공기역학적 성능에 대한 연구

김 동 현* · 강 부 병** · 신 민 호***

The study for the aerodynamic effects of air-shafts in the railway tunnel

Dong-Hyeon Kim, Bu-Byoung Kang and Min-Ho Shin

Key Words: Railway Tunnel(철도 터널), Train(열차), Air-Shaft(통풍공), Pressure Fluctuation(압력 변동), Speed-Up(속도향상), Moving Model Rig(주행 모형시험기)

Abstract

The purpose of present study is to investigate for reducing pressure fluctuations in the case of installing the air-shafts on the side wall of the tunnel with small cross-sectional area on conventional line. Experiments were performed with a 1/61-scale moving model rig for the tunnel of 0.764 km length in the condition of tunnel cross-section area of 28 m². According to the results, the maximum pressure fluctuation is reduced by 45 % for 19 air-shafts. This results have the speed-up effects of about 33.4 km/h for the train running in tunnel.

1. 서 론

열차 고속주행시 가장 큰 장애 요인은 터널 내 풍압변동이며, 이의 영향으로 열차의 객실 내 압력변동이 증가되어 승객 이명감(ear discomfort)을 발생시킨다.^(1,2) 이에 대한 해결책 중의 하나로 터널 내공 단면적 확장공사 없이 통풍공(air-shaft)을 적용하는 간편하고 저렴한 대책을 마련하고자 한다.⁽³⁾

현재 기존철도 노선의 주축을 이루는 경부선과 호남선 터널은 경부선 55개소, 호남선 20개소가 있다. 경부선 444.5 km에서 터널이 5 % 이내이고, 호남선은 256.3 km에서 터널이 3 % 이내로 차지한다. 호남선은 평야지대가 많기 때문에 터널 총연장이 경부선보다 더 짧다. 한편, 경부고속철도

는 기존철도와 달리 고속운행을 위해 선로의 곡률 반경이 매우 크고, 가급적 직선 선로로 부설한다. 따라서 선로의 전 구간에서 터널이 차지하는 비율이 46 %로 매우 높다. 그러나 기존철도는 1960년대 이전에 저속용으로 건설된 선로이기 때문에 곡률 반경이 작고 가능한 산과 구릉을 피해 선로를 건설하여 터널이 차지하는 비율이 적다. 기존선 고속화의 철도이설이나 새로이 건설되는 1급 선로에서는 터널이 차지하는 비율이 10 % ~ 30 % 대로 더 높아질 것이다. 기존선 고속화에서 첫 번째로 고려할 수 있는 방법이 틸팅(tilting) 차량 등을 적용하는 기존 선로에서의 속도향상 방법이 있고, 두 번째가 선로 곡률 반경이 심한 지역의 철도 이설 방법이 있다. 터널에서 작은 내공단면을 가질수록 건설비용은 그만큼 적게 든다. 승객 이명감 및 터널 내 풍압변동(pressure fluctuations)을 고려하여 터널 단면적 최적화 설계를 할 때, 다양한 방법 중에서 터널 내에 통풍공을 뚫어주면 압력감감 효과가 대단하다. 이 방법은 소단면 기계화 굴착으로 공사비용을 최소화할 수 있다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 1/61축척 터널주행 열차모형 시

* 회원, 한국철도기술연구원 시설연구본부
E-mail: dhkim@krrri.re.kr
TEL: 031-461-8531, FAX: 031-461-8374

** 회원, 한국철도기술연구원 차량연구본부
*** 한국철도기술연구원 시설연구본부

험기(moving model rig)로 기존선 28 m²의 소단면 터널에 19개의 통풍공을 적용할 경우 터널 단면적을 50% 확폭한 효과와 맞먹는 약 33 km/h의 속도향상이 가능함을 보였다.

2. 실험대상 철도터널 및 차량

국내 기존선의 단선 철도터널 단면적은 24.5 m² ~ 29.4 m²로 제 1종부터 제 4종으로 분류하여 선로등급 및 선로의 중요도에 따라 채택하고 있다. 또한 같은 종에서도 직선용과 곡선용으로 나누어지는데 곡선용이 궤도의 캔트(cant) 량에 의한 열차 기울기를 고려하여 내공단면이 약간 크다. 1960년대 이전에 완공된 터널이 경부선은 50 개소, 호남선은 5개소이며, 1960년대 이후에 완공된 터널이 경부선 5개소, 호남선 15개소로서 이미 많이 노후화 된 상태이다. 경부선 및 호남선에서 터널이 제일 많은 구간이 경부선의 대구-부산 구간이며, 이 기존선 구간에 전철화 공사가 완공되면 KTX 고속전철이 고속철도 대구-부산 추가노선이 완공될 때까지 운행 될 계획이다. 대

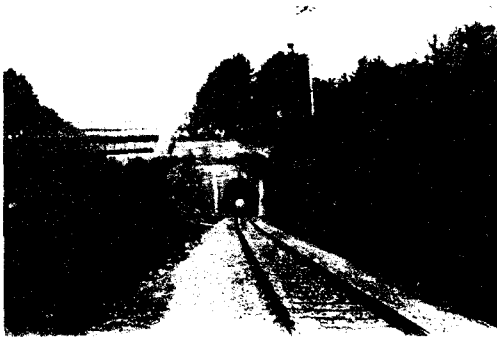


Fig. 1 The tunnel with small cross-sectional area on conventional line

Table 1 Specifications of the tunnel

Items	Specifications
track	single
Cross-sectional area	28 m ²
Perimeter	21.17 m
Length	764 m

구-부산 기존선 16개소 터널에서 성현 터널(토피고 상·하행 각각 121 m)을 제외한 14개 터널의 토피고가 48.8 m 이하이다. 기존선 고속화 선로 구축물 기술개발을 위해 경부선, 호남선의 재래 터널 소단면 단선터널 단면적 28 m²을 대상으로 관절형 수직 통풍공(Fig. 5 참조)을 적용했을 때 터널 내 풍압변동 저감효과를 터널주행 열차모형 시험기로 고찰하였다.⁽⁵⁾ 시험모델은 1/61 축척을 적용하고, 열차속도는 실제속도에 맞추어 터널 내에서 압력과의 특성이 실제크기로 생성되게 하였다.⁽⁶⁾

본 연구의 1/61축척 터널모형 실험에서 터널길이는 12.522 m(실척 763.84 m), 열차모델 길이는 1.546 m(실척 94.3 m)이고, 소단면 단선터널 사진은 Fig. 1에 나타내었으며, 터널모형 및 통풍공의 자세한 제원은 Table 1과 Fig. 5에 나타내었다. 국내 간선철도에서 최고속 차량인 새마을호를 시험대상 차량으로 하였다. Fig. 2와 Table 2는 새마을호의 정면도와 실험에 사용한 제원을 각각 나타내었다. 새마을호의 전두부를 축대칭 형상으로 선단부터 면적을 변환했을 때 반경 변화와 유효

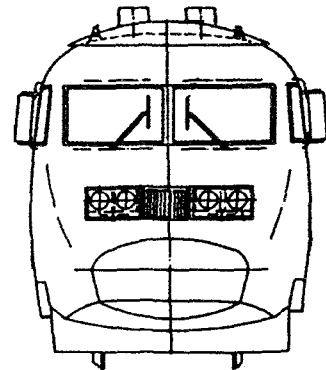
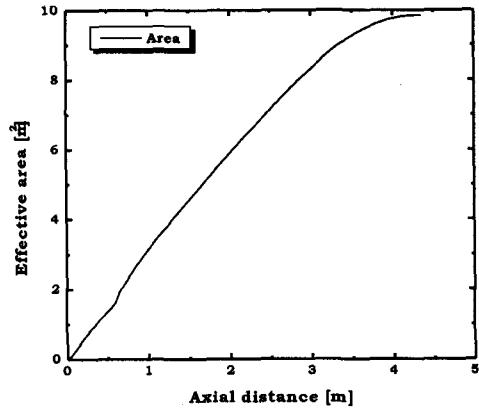
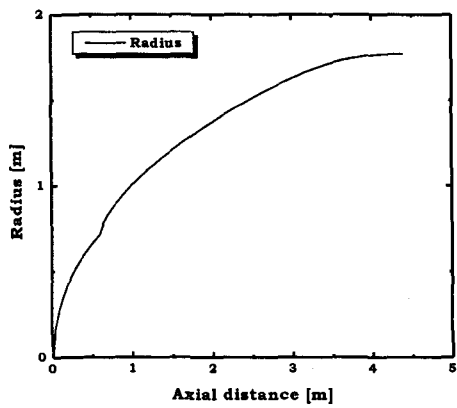


Fig. 2 The Saemaul train on conventional line

Table 2 Specifications of the train

Items	Specifications
Cross-sectional area	9.8 m ²
Perimeter	12.08 m
Train configuration	4 car 1 train
Overall length	94.3 m



(a) The effective radius variation of the nose part

(b) The effective area variation of the nose part

Fig. 3 Axis-symmetric transformation for the Saemaul train(full scale dimension)

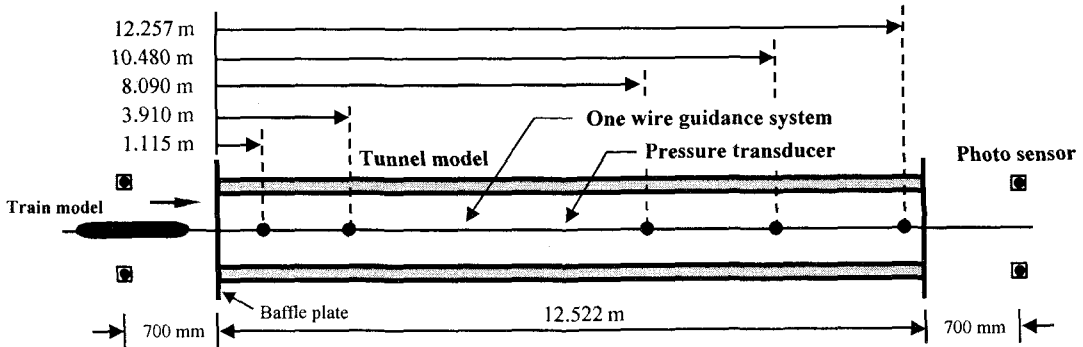


Fig. 4 Schematic of moving model experiment

단면적 변화를 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에 각각 도시하였다. Fig. 3(b)와 같은 유효단면적 변화를 갖도록 축대칭으로 변환한 열차모델은 1/61로 축척하여 실험에 사용하였다. 본 연구에서는 우선 4량1편성 차량을 시험 대상으로 하였는데 이는 추후 열차 편성별 영향을 도출하고자 한다.

새마을호는 현재 개활지에서 최고 영업속도 약 140 km/h로 운행하고 있으며, 소단면 4종류 터널에서는 약 90 km/h ~ 110 km/h로 속도로 운행한다. 터널구간이 곡선선로 영역에 있다 하더라도 추후 탈링차량 등의 적용으로 20% ~ 30% 속도향상이 가능하다. 속도향상시 근본적인 문제는 소단면 터널로 인해 승객이 심한 이명감을 느끼기 때문이고, 선로보수원의 열차풍에 대한 안전

문제 등이 있다. 또한 열차의 개활지 주행보다 터널진입시 열차주행 저항은 약 1.3 배 이상 증가되며, 터널내벽에 미치는 풍하중도 구조해석으로 검토되어야 하는 사항이다.

3. 시험모델 및 계측시스템 구성

재래철도 터널은 1960년대 이전에 건설된 터널이 대다수이고, 그 동안 빈번한 터널내의 라이닝 보수공사로 표면의 상태가 무척 거칠다. 또한 라이닝이 적용되지 않은 요철이 심한 암석터널들도 많은 상황이다. 따라서 터널내면의 표면 거칠기는 매우 열악하다. 발라스트 궤도의 기존선 재래철도 터널의 평균 표면 거칠기 ϵ_p 를 약 6 mm로

하였을 때 상대 거칠기(relative roughness) ϵ_p/D_p 는 1.005×10^{-3} 이다. 완전한 상사의 요구조건은 상대 거칠기 $\epsilon_p/D_p = \epsilon_m/D_m$ 을 만족해야 하므로 축척에서의 표면거칠기 ϵ_m 는 Table 3에서와 같이 9.836×10^{-5} m가 되어야 한다. 따라서 열차모델은 알루미늄의 매끈한 표면을 그대로 사용하고, 터널모델 벽면은 표면 거칠기가 매우 낮고, 쉽게 구할 수 있는 비닐코팅 종이테이프로 바르고 터널모델의 바닥은 나왕나무로 표면 거칠기를 조정하였다. 이와 같이 경계층 형성과 관련된 마찰력은 축척 실험모델의 벽면을 아주 매끄럽게 하여 어느 정도 보상되도록 하였다.⁽⁷⁾ 더욱이 터널 내에 전파하는 압력파의 시간에 대한 구배도 터널 내부 표면 거칠기(surface roughness)와 관계된다.⁽⁸⁾

터널내부의 압력변동은 Fig. 4에서와 같이 Endevco 압력센서(8510B-1)로 다섯 위치에서 연속적으로 기록하였다. 터널입구 전방에 있는 포토센서(응답속도 2×10^{-5} sec)에 열차 전두부가 도달되면 모든 센서의 측정이 시작되며 또한 동시에 열차속도를 측정한다. 포토센서는 터널 앞과 뒤의 700 mm에 각각 위치시켰으며 주행 감속도를 파악하기 위해 속도측정을 개별적으로 하였다. 터널 입출구 전후의 대기온도는 K형 열전대로 각각 측정하였다. 압력센서(8510B-1)는 6.9 kPa의 동압력범위와 55 kHz의 공진주파수를 갖는다. 터널 내 압력신호는 샘플링 주파수(sampling frequency) 200 kHz의 DC Dynamic Strain Amplifier(MINEBEA 모델 NMB DAS-406B)에서 증폭한 후 1 kHz에서 low-pass filtering을 하였고,

Table 3 Conditions of tunnel model experiment

Tunnel	Full scale	1/61 reduced scale
Effective diameter, D	5.97 m	0.0979 m
Surface roughness, ϵ	6×10^{-5} m	9.836×10^{-5} m
Relative roughness, ϵ/D	1.005×10^{-3}	
Air-shaft diameter, ϕ	2.135 m	35 mm
Height of air-shaft, L_h	20.74 m	340 mm

아날로그 신호를 디지털 신호로 전환하는 NI의 High-speed A/D Converter 모델 PCI-MIO-16E-1와 데이터 계측 소프트웨어 LabVIEW는 HP Vectra VE기종 컴퓨터에 장착하여 측정 데이터를 얻었다. 본 시험에서 측정 채널당 최대이용 샘플링 주파수는 100 kHz를 선택했다.

4. 실험결과 토의

통풍공 터널개발 실험 대상인 12.522 m (실척 763.84 m) 터널에 대해 통풍공 개수에 따른 터널 내 압력변동(풍압변동)을 관찰하는 시험을 수행하였다. 통풍공은 Fig. 5와 같이 한쪽 측벽에 "L"자형상으로 설치하였으며, 터널 입구에서 333.33 mm (실척 20.33 m) 거리에 위치한 통풍공을 기준으로 통풍공 간격을 3 종류로 증가시키면서 통풍공 개수에 따른 터널 내 압력변동 변화를 시험하였다. 먼저 통풍공 간격을 2666.66 mm (실척 162.67 m)로 설치하였으며, 이 경우 터널 내에 설치된 통풍공은 총 5개이다. 둘째로 통풍공 간격

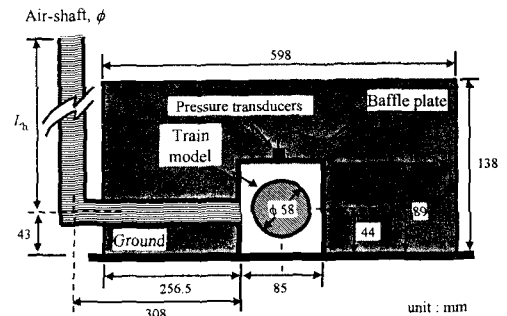


Fig. 5 Front view of tunnel model with air-shafts

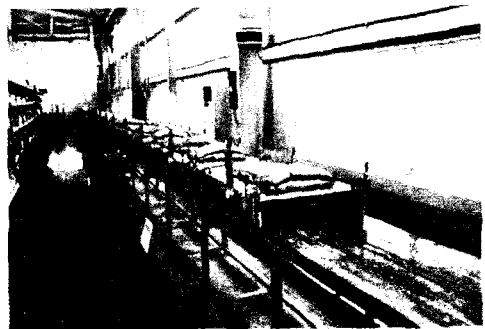


Fig. 6 Photograph of experimental set-up

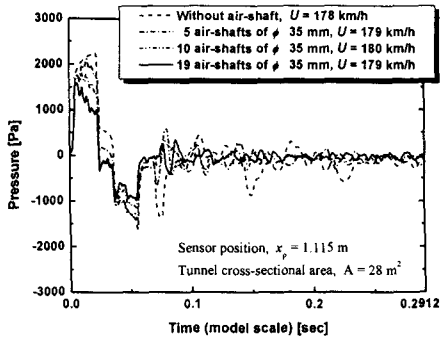


Fig. 7 Comparison with air-shafts of pressure fluctuations in tunnel for train entry speed 178 km/h and $x_p = 1.115$ m

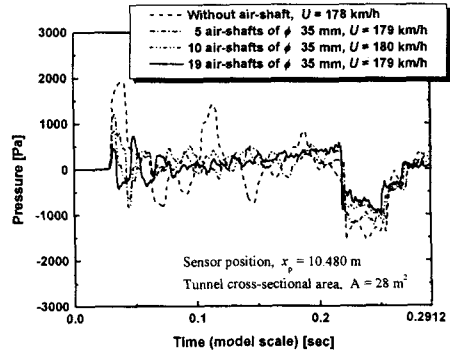


Fig. 10 Comparison with air-shafts of pressure fluctuations in tunnel for train entry speed 178 km/h and $x_p = 10.480$ m

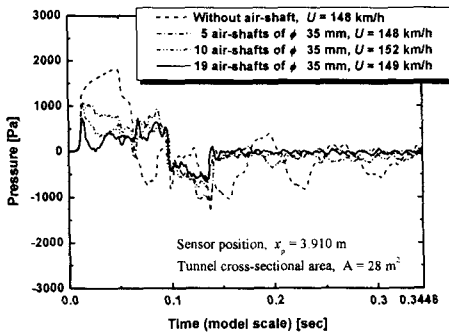


Fig. 8 Comparison with air-shafts of pressure fluctuations in tunnel for train entry speed 148 km/h and $x_p = 3.910$ m

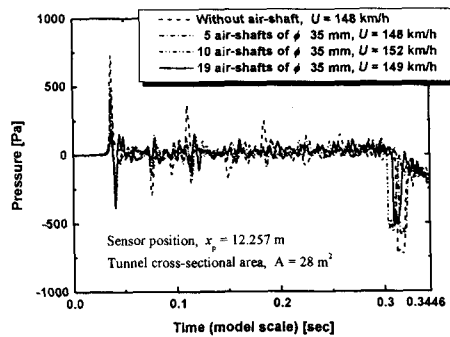


Fig. 11 Comparison with air-shafts of pressure fluctuations in tunnel for train entry speed 148 km/h and $x_p = 12.257$ m

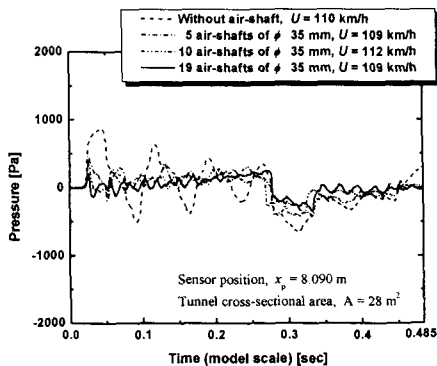


Fig. 9 Comparison with air-shafts of pressure fluctuations in tunnel for train entry speed 110 km/h and $x_p = 8.090$ m

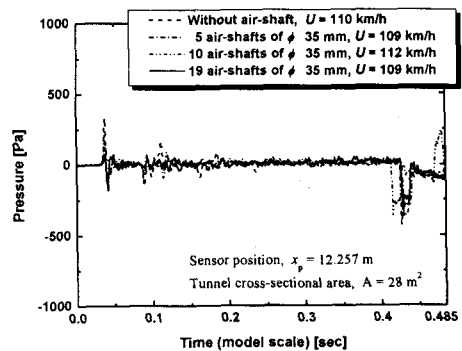


Fig. 12 Comparison with air-shafts of pressure fluctuations in tunnel for train entry speed 110 km/h and $x_p = 12.257$ m

Table 4 The reduction effect of pressure fluctuations in tunnel with air-shafts for train entry speed 110 km/h

Conditions \ x_p	Absolute values of pressure fluctuations						Reduction effects
	1.115 m	3.910 m	8.090 m	10.48 m	12.257 m	Max. peak values	
Without air-shaft	961 Pa	1034 Pa	864 Pa	712 Pa	335 Pa	1034 Pa	reference
5 air-shafts	741 Pa	591 Pa	471 Pa	423 Pa	219 Pa	741 Pa	28.3 %
10 air-shafts	668 Pa	544 Pa	379 Pa	313 Pa	165 Pa	668 Pa	35.4 %
19 air-shafts	576 Pa	382 Pa	258 Pa	241 Pa	170 Pa	572 Pa	44.7 %

Table 5 The reduction effect of pressure fluctuations in tunnel with air-shafts for train entry speed 148 km/h

Conditions \ x_p	Absolute values of pressure fluctuations						Reduction effects
	1.115 m	3.910 m	8.090 m	10.48 m	12.257 m	Max. peak values	
Without air-shaft	1640 Pa	1823 Pa	1596 Pa	1323 Pa	732 Pa	1823 Pa	reference
5 air-shafts	1434 Pa	1070 Pa	867 Pa	801 Pa	505 Pa	1434 Pa	21.3 %
10 air-shafts	1232 Pa	998 Pa	887 Pa	808 Pa	569 Pa	1232 Pa	32.4 %
19 air-shafts	1049 Pa	738 Pa	691 Pa	651 Pa	516 Pa	1049 Pa	42.5 %

Table 6 The reduction effect of pressure fluctuations in tunnel with air-shafts for train entry speed 178 km/h

Conditions \ x_p	Absolute values of pressure fluctuations						Reduction effects
	1.115 m	3.910 m	8.090 m	10.48 m	12.257 m	Max. peak values	
Without air-shaft	2254 Pa	2544 Pa	2303 Pa	1931 Pa	1163 Pa	2544 Pa	reference
5 air-shafts	2118 Pa	1628 Pa	1296 Pa	1210 Pa	806 Pa	2118 Pa	16.7 %
10 air-shafts	1816 Pa	1432 Pa	1035 Pa	845 Pa	581 Pa	1816 Pa	28.6 %
19 air-shafts	1592 Pa	1104 Pa	813 Pa	732 Pa	382 Pa	1592 Pa	37.4 %

을 1333.33 mm (실척 81.33 m)로 설치하였으며, 터널 내에 설치된 통풍공은 총 10개이다. 마지막으로 통풍공 간격을 666.66 mm (실척 40.67 m)로 설치하였으며, Fig. 5와 같이 터널 내에 설치된 통풍공은 총 19개이다. 터널 내 설치된 모든 통풍공 내경은 $\phi = 35$ mm (실척 2.14 m)이며, 통풍공 높이는 $L_h = 340$ mm (실척 20.74 m)로 고정시켰다. 터널 천정 높이부터 토피고 높이를 측정하면 295 mm(실척 18 m)에 해당되며, 대구-부산 경부선 터널의 토피고에서 성현터널을 제외한 14개 터널의 평균에 해당된다. 아울러 터널 내 열차 진입속도를 $U = 110$ km/h ~ 178 km/h로 변화시키면서 터널내 압력변동을 측정하였다. Fig. 6은 통풍공이 10개 설치된 터널모형 사진을 나타내었다.

터널 내 센서 위치에 따른 풍압변동의 실험 결과는 주요결과만 Fig. 7 ~ Fig. 12에 나타내었다. 통풍경 내경이 일정한 상태에서 터널에 열차 진입속도별로 통풍공 개수를 변화시킨 결과인데 터널내 모든 위치에서 첫 번째 압축과 피크 값(peak value)이 통풍공 개수 증가에 대하여 감소함을 볼 수 있다. 또한 압력센서 위치에서 열차 통과 후에 압축파와 팽창파의 피크 값이 전체적으로 매우 감소된다. 즉, 터널 양 끝단에서 압축파와 팽창파의 반사량이 현격히 줄어들음을 알 수 있다. 등 간격으로 분포된 통풍공이 압력파의 크기를 감소시켜, 미약한 압력파가 터널 양 끝단에서 반사되어 터널 내를 교차함을 볼 수 있다. 실험 결과에서 보는 것과 같이 터널내의 통풍공 간격이 작을수록 풍압변동 최대 피크 값이 감소함을 알 수 있었으며, 열차가 저속일수록 풍압변동 최대 피크 값의 저감율이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 열차가 저속일수록 통풍공에 의한 효과가 좋게 나타난다. 이러한 결과를 Table 4 ~ Table 6에 정리하였으며, 터널 내 열차진입속도에 대한 풍압변동 최대 피크 값과 저감율 결과를 나타내었다. 도표 결과에 나타난 것처럼 열차진입속도가 일정할 때 통풍공 개수가 2 배로 증가하면 풍압변동 최대 피크 값의 저감율이 약 10 % 정도 향상하는 것을 알 수 있다. 열차 주행속도 실험범위에서 통풍공을 터널 한쪽 측벽에만 19개를 적용했을 때 풍압변동 저감율은 37.4 % ~ 44.7 %까지나 되는 걸 볼 수 있다. 이 결과는 평균 33.4 km/h의 속도향상 효과를 갖는다. 즉 승객

이명감이나 열차풍에 대한 안전성을 고려할 때 통풍공을 19개 터널에 적용함으로써 터널주행에서 33.4 km/h 정도의 기존선 고속화가 가능하다. 본 연구결과는 기존 터널에 통풍공을 적용하였을 때 소단면 단선터널 단면적 28 m²에서 14 m² 정도 더 확폭한 효과와 같다. 통풍공을 양쪽 측벽에 모두 적용할 경우는 속도향상 효과가 더 클 것이라 기대된다.

5. 결론

기존선 속도향상의 장애요인 중 하나는 터널 내 풍압변동량 증가에 의한 승객 이명감 현상이다. 본 연구는 기존철도 소단면 단선터널에 통풍공을 적용하여 터널 내 풍압변동량을 감소시켜 운행속도 향상 방안을 마련하고자 한다.

통풍경 직경이 일정한 상태에서 터널에 110 km/h ~ 178 km/h의 열차 진입속도별로 통풍공 개수를 변화시켜, 터널 내 모든 위치에서 첫 번째 압축과 피크 값이 통풍공 개수 증가에 대하여 감소함을 볼 수 있었다. 또한 압력센서 위치에서 열차통과 후에 압축파와 팽창파의 피크 값이 전체적으로 매우 감소되었고, 터널 양 끝단에서 압축파와 팽창파의 반사량이 현격히 줄어들음을 알 수 있었다. 즉, 등 간격으로 분포된 통풍공이 압력파의 크기를 감소시켜, 미약한 압력파가 터널 양 끝단에서 반사되어 터널 내를 교차함을 볼 수 있었다.

(1) 터널내의 통풍공 간격이 작을수록 풍압변동 최대 피크 값이 감소함을 알 수 있었으며, 열차가 저속일수록 풍압변동 최대 피크 값의 저감율이 증가하였다.

(2) 열차진입속도가 일정할 때 통풍공 개수가 2 배로 증가하면 풍압변동 최대 피크 값의 저감율이 약 10 % 정도 향상되었다.

(3) 열차 주행속도 실험범위(110 km/h ~ 178 km/h)에서 통풍공을 터널 한쪽 측벽에만 19개를 적용했을 때 풍압변동 저감율은 37.4 % ~ 44.7 %까지 되었다. 이 결과는 평균 33.4 km/h의 속도향상 효과를 갖는다.

본 연구결과를 통하여 기존철도 터널에 통풍공을 적용하였을 때 열차 속도향상이 가능하고, 소단면 단선터널 단면적 28 m²을 14 m² 정도 더 확폭한 효과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 건설교통부 '99 산학연 공동기술연구개발사업의 일부분이며 (주) 대우엔지니어링, (주) 삼보기술단, (재) 한국철도기술공사, (주) 경동의 지원에 감사 드린다.

참고문헌

- (1) Vardy, A. E., 1976, "The use of airshafts for the alleviation of pressure transients in railway tunnels," Paper C4, BHRA, Cambridge
- (2) International Union of Railways, 1994, "Detemination of Railway Tunnel Cross-sectional Area on the Basis of Aerodynamical Considerations," UIC-Code
- (3) Burri, J. and Zumsteg, F., 1997, "Airshafts for the alleviation of pressure waves in tunnels of the new Swiss Rail 2000," *Proceedings of the 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Aosta Valley, Italy, 6-8 October, pp. 289~290
- (4) Henson, D. A. and Pope, C. W., 1997, "The alleviation of pressure transients in a main line railway tunnel," *Proceedings of the 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Aosta Valley, Italy: 6-8 October, pp. 289~290
- (5) 김동현, 오일근, 2001, "압축공기 발사기에 단선 와이어 유도방식을 적용한 1/60축척 터널주행 열차모형 시험기 개발에 대한 연구," 대한기계학회 논문집 B권, 제25권, 제5호, pp. 634~644.
- (6) Wolf, W. B. and Demmenie, E., 1997, "A New Test Facility for The Study of Interacting Pressure Waves and Their Reduction in Tunnels for High-speed Trains," *Proceedings of the 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Aosta Valley, Italy: 6-8 October, pp. 301~317
- (7) Gerhart, P. M. and Gross, R. J., 1985, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Addison-Wesley Publishing Corporation, pp. 383~392
- (8) Maeda, T., 1994, "The Final Report of Micro Pressure Wave Study for The Seoul-Pusan High-speed Railroad Project," Japan Railway Technical Services