

300km/h급 고속철도의 터널 미기압파 저감을 위한 경사개구의 실험적 연구

김 동 현*, 민 동 호*

Experimental study on the alleviation of micro-pressure waves radiated from the tunnel exit with the slanted portals on the high-speed train operations of 300km/h

Dong-Hyeon KIM and Dong-ho MIN

Key Words: micro-pressure wave(미기압파), tunnel hood(터널 후드), Seoul-Pusan high-speed railway(경부고속철도), slanted portal(경사 개구)

Abstract

The compression wave produced when a high-speed train enters a tunnel propagates along the tunnel ahead of the train. The micro pressure wave related to the compression wave is a special physics phenomena created by high-speed train-tunnel interfaces. On this work, the method for reducing the micro pressure wave is to delay the gradient of the compression wave by using aerodynamic structures. The objective of this paper is to determine the optimum angle of the slanted portal using the moving model rig. According to the results of the present study, the maximum value of micro pressure wave is reduced by 19.2% for the 45° slanted portal installed at the entrance of the tunnel and reduced by 41.9% for the 45° slanted portals at the entrance and exit of the tunnel. Also it is reduced by 34.6% for the 30° slanted portals installed at the entrance and exit of the tunnel.

기호설명

- P_{max} : 미기압파의 최대값 [Pa]
- p : 터널내 공기압 [Pa]
- Γ : 미기압파 저감계수
- U : 열차의 터널진입속도 [km/h]

1. 서론

고속철도 차량-터널 인터페이스에서 나타나는 여러 가지 공기역학 문제에서 터널 미기압파 현상은 고속철도에서만 겪게되는 독특한 물리적 현상이다. 고속전철이 터널에 진입할 때, 압축파는 열차전두부 앞부분에서 생성되며 압축파는 파동의 앞에 정지하고 있는 공기를 압축하고 가속하여 음속으로 터널을 따라 전파되며 터널 출구

부분에서 압축파는 팽창파로써 열차를 향하여 뒤로 반사된다. 동시에 이 압축파의 일부분은 충격파(impulsive wave)로 되어 출구로부터 주위 환경인 밖을 향하여 방사된다. 이 충격파는 초음속 비행기에 의해서 생성된 소닉붐처럼 강력한 소음을 발생시킨다. 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음인 미기압파는 터널 출구부근의 환경문제와 관련하며, 열차단면적, 전두부의 형상, 터널의 단면적, 터널의 길이, 터널내 슬라브/발라스트 궤도의 종류, 터널 출구로부터 거리등에 복합적으로 의존하게 된다. 경부고속철도 터널의 단면적은 107 m²으로 매우 크기 때문에 열차의 터널진입시 터널출구에서 미기압파(micro pressure wave)에 의한 폭발음은 발생되지 않았으나 미기압파에 의한 저주파 진동이 주변민가의 창문이나 문틀을 심하게 흔들어 놓을 수 있기 때문에 이에 대한 대책 마련이 필요하다⁽¹⁾.

* 한국철도기술연구원 차량연구본부

터널 입구에서 형성되는 압축파의 파형 $\Delta p(x)$ 는 열차의 돌입속도와 그의 선두형상, 단면비등

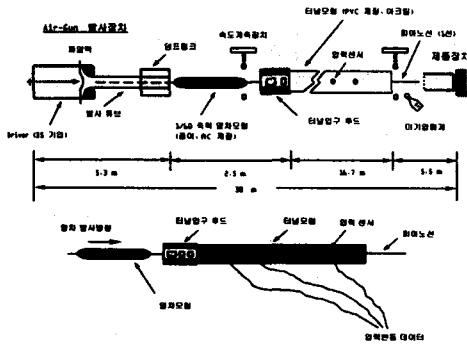


Fig. 1 The schematic of moving model rig.

에 의존하는 것으로 기대되며, 해석적인 방법으로 해를 얻기는 매우 곤란하다. 이 때문에 수치 계산 및 실험적 연구가 활발하게 진행되고 있다^{2,4,5,6,7}). 공기음향이론(aeroacoustic theory)에 의하면 터널 출구로부터 나오는 강력한 소음의 크기는 출구에 도착하는 압축파의 압력변화에 대한 최대 시간 변화율, 즉 압축파의 파면 압력구배에 비례한다. 따라서 본 연구에서는 터널미기압파 저감 대책법의 선로구축물 쪽 대책 중 하나인 입구경사갱구의 경사각도에 따른 미기압파 저감 성능을 파악하여 최적 경사갱구를 개발하는 것이다. 본 연구에서 시험을 통하여 검증한 45° 경사 갱구를 입구에만 설치하면 미기압파 저감율이 19.2 %이고, 45° 경사갱구를 입구와 출구 양쪽에 설치할 경우에는 미기압파를 최고 41.9 % 줄일 수 있었다.

2. 터널주행 열차모형 시험기

Fig. 1은 본 시험에서 미기압파 측정에 사용된 시험장치의 개략도이다. 터널부는 아치형으로 경부고속철도 터널내공 단면적 107m²에 해당된다. 본 시험에서 사용한 유효차단비(blockage ratio)는 8.88 %로서 경부고속철도의 터널과 KTX (Korea TGV)열차의 비와 같다. 열차모형은 1/60 축척으로 본 연구에서 1 m이내의 길이를 사용하는데 이는 주로 터널 후드(완충용) 개발에 적용시 터널입구 진입시의 압력구배로 공력설계 되기 때문이다⁽¹⁾. 터널 입구와 출구 앞에 지면판을 두었으며, 터널내부의 압력변동은 Endeveco 압력센서 8510B-1로 4 위치에서 연속적으로 기록하였다. 터널출구 미기압파 측정은 Rion의 철도전용 초저

주파 음압레벨계 XN-12A(저주파 대역 0.2 ~ 1kHz 감도특성 일정)를 사용하였다. 터널 측에 대해 45° 각도에서 출구로부터 333 mm 거리와 지면판 위 20 mm 높이에 음압레벨계를 위치시켰다. 마이크로폰의 헤드는 미기압파의 방사방향에 맞추어 위치시켰다. 본 연구의 터널주행 열차모형 시험장치는 터널내의 압력변동과 터널출구에서 방사되는 미기압파에 대하여 2차원유동 수치 해석 결과와 미기압파 특성분석으로 성능검증하였다^{1,2,3}).

3. 터널 미기압파 저감용 입구 경사갱구

터널 미기압파를 저감시키는 방법은 열차가 터널 진입시 생성되는 시간에 대한 압력구배를 낮추는 것으로 공기역학적인 구조물을 이용하여 압력상승 시간을 지연시키는 것이다. 본 연구에서는 보다 정확한 미기압파 저감대책을 구하기 위하여 터널 형상을 경부고속철도 터널에 가깝게 형상화 시켰다(일본 철도종합기술연구소의 경우 선간선 터널 형상을 사용하지 않고 파이프 형상으로 시험함). 차량의 전두부는 KTX보다 약간 뭉뚝한 전두부(nose)를 갖는 형상을 사용하였다. 모형시험은 기존선 고속화 열차 및 장래의 고속열차의 속도를 고려하여 열차의 속도가 220~420 km/h인 범위에 대하여 수행하였다. 열차와 터널의 단면적비 0.88 %, 터널길이 0.5 km와 열차길이 0.67 m로 일정한 상태에서 터널입구 경사갱구의 경사각도를 변화시키면서 터널내의 압력변동과 터널 출구에서 방사되는 미기압파를 측정하였다.

입구압축파의 압력변화에 대한 최대시간변화율 $(dp/dt)_{max}$ 는 터널출구로부터 방사되는 미기압파의 크기를 계산하기 위해 매우 중요한 값이다. Δp 는 거의 열차속도의 제곱에 비례하므로 $(dp/dt)_{max}$ 가 열차속도에 의존하는 정도는 U^2/U^1 , 즉 U^3 이라는 것을 알 수 있으므로 열차속도의 세제곱에 비례한다. 터널출구에서 방사되는 미기압파는 열차가 터널에 진입시의 첫 번째 압축파의 압력구배에 비례하여 증가한다⁽⁸⁾는 것은 잘 알려져 있다. 본 기술개발의 모형실험 데이터도 Fig. 2와 같이 미기압파 최대값이 시간에 대한 최대압력구배에 비례하는 결과를 보여주고 있다. Fig. 2는 경사갱구(45°, 입구와 출구 양쪽에 설치)가 설치

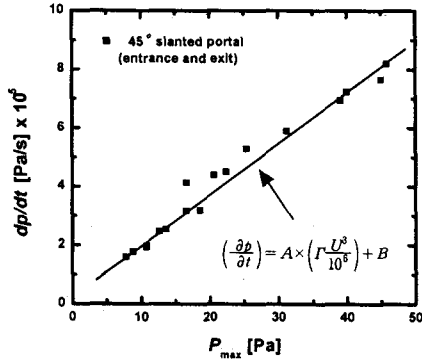


Fig. 2 The relation comparison of the micro pressure waves and the compression wave gradient (with 45° slanted portal on the tunnel entrance and exit).

되었을 때 입구에서 66.7 m 떨어진 터널내벽 위치에서 측정된 압력구배와 터널 출구에서 20 m 떨어진 위치에서 측정한 미기압파와의 선형 비례 관계를 보여주고 있다.

본 연구에서는 미기압파의 저감율을 비교하기 위하여 차량과 터널의 유효차단비(blockage ratio)에 상관없이 적용할 수 있는 경험식을 만들었다.

$$P_{\max} = \Gamma \cdot U^3 / 10^6 \quad (1)$$

식 (1)을 적용하여 본 연구에서 수행한 여러가지 경사갱구의 미기압파 저감성능을 비교하였다.

다음의 Fig. 3은 시험에 사용된 대표적인 입구 경사갱구들의 형상을 보여주고 있다. 경사갱구의 내공단면적은 터널 단면적과 같다. 경사갱구의 기울기의 변화(30°, 40°, 45° 및 55°)에 따라서 경사갱구를 입구에만 설치했을 경우와 입구/출구에 모두 설치하였을 경우에 대하여 0.5 km 슬라브레도 터널(본 시험은 1/60 축척시험이므로 8.34 m에 해당)에서 방사되는 미기압파의 크기를 측정하였다. 여기서 경사각도는 지표면과 경사갱구가 이루는 각도를 기준으로 하였다. Table 1은 아무런 대책을 적용하지 않은 0.5 km 슬라브레도 터널을 표준 비교 대상으로 하였을 때, 4가지 형상의 후드에 관하여 터널 출구에서 나타나는 미기압파들을 식 (1)을 이용하여 미기압파 최대값의 저감율을 나타낸 도표이다. Table 1에서 경사 각도가 45°이면서 경사갱구가 입구와 출구에 모두 설치

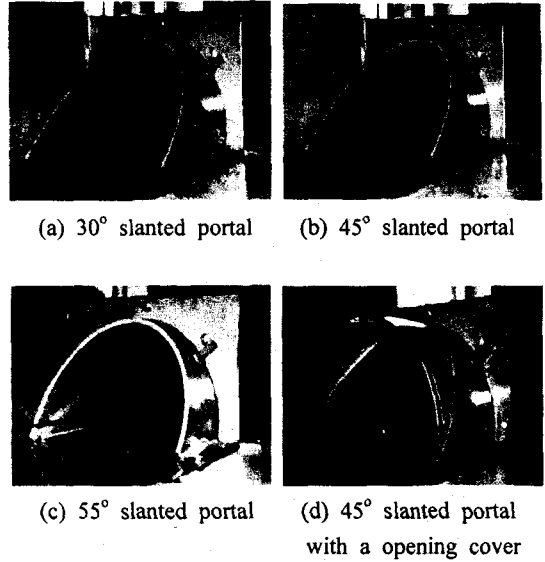


Fig. 3 Appearances of the slanted portal for reducing the micro-pressure waves (1/60 scale models).

된 경우에 미기압파 저감율이 약 42 %임을 나타내고 있으며, 다른 경사도와 비교해 볼 때 미기압파의 저감성능이 매우 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 4는 경사갱구의 설치에 따른 미기압파 최대값의 저감 분포를 나타내는 그래프로서 열차의 터널진입속도와 터널출구에서의 미기압파 최대값을 나타낸다. 열차진입 속도영역은 220 km/h에서 420 km/h까지 수행하였다. Fig. 4(a)는 30° 경사갱구를 입구부에만 설치하였을 경우와 입구/출구부에 동시에 설치하였을 때 저감되는 미기압파의 최대값을 보여주고 있으며 Fig. 4(b)는 40° 경사갱구를 입구부와 출구부에 설치하였을 때이며 Fig. 4(c)는 45° 경사갱구를 입구부에만 설치하였을 경우와 입구/출구부에 설치하였을 경우이며, Fig. 4(d)는 55° 경사갱구를 입구와 출구부에 설치하였을 경우에 나타나는 터널 진입속도와 최대미기압파 값을 보여주고 있다. 경사갱구는 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 입구와 출구 모두 설치하는 것이 입구에만 설치하였을 경우와 비교하여 2배 이상의 저감성능이 있다.

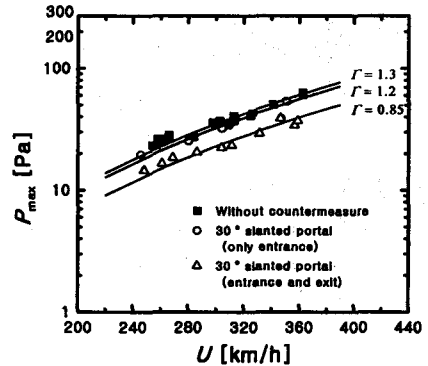
특히, 경사갱구의 경사각도가 45° 일때 미기압파 저감 성능이 매우 우수한 것으로 시험결과 나

Table 1 Performance of a slanted portal for reducing the micro-pressure waves.

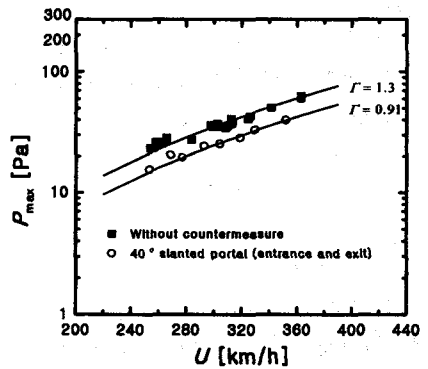
The angles of slanted portal	The effective speed ranges (km/h)	Reduction factors (Γ)	Reduction effects (%)
30° only entrance	240~360	1.2	7.7
30° entrance and exit	240~360	0.85	34.6
40° entrance and exit	240~360	0.91	30
45° only entrance	250~420	1.05	19.2
45° entrance and exit	220~400	0.755	41.9
55° entrance and exit	240~340	1.22	6.2

타 났으며, 주목할 만한 시험결과는 경사각도의 증가에 대해 미기압파 저감율이 비례하지 않다는 사실이다. 이는 입구 경사각구의 역할이 미기압파 저감(터널내 전파하는 압력구배 저감)에 기여한다면, 출구 경사각구는 방사되는 미기압파의 주 방향에 기여하는 것으로 사료된다. 다시 말하면 1/60 축척 시험에서 미기압파의 측정점이 지면에서 위로 2 cm(실척으로 1.2 m에 해당)이므로 터널 출구쪽 갱구의 경사각도 40°보다 경사각도 30°에서 더 작은 미기압파 최대값을 얻게 되었다. 즉, 지면에 가까운 민가가 아니라 60° 경사각도로 하늘 쪽으로 주 방사가 되도록 하는 효과가 있을 수 있다. 이러한 현상은 후드를 터널 앞, 뒤로 각각 달았을 때의 미기압파 저감율이 터널 입구에만 후드를 달았을 때와 별반 차이가 없는 것과 터널입구에 슬릿후드를 달고 출구에는 45° 경사각구를 달았을 때 저감효과가 약 47.7%로 되는 것으로도 설명된다²⁾. 그러나 입출구 각각의 갱구 경사각도에 따른 명확한 역할 및 영향은 심도 깊게 추후 연구되어야 할 것이다(현재까지 터널 출구에서 미기압파 방사는 무지향성으로 구형으로 방사된다고 보고되어 있다). 또한 갱구의 경사각도를 입/출구에 달리 주고 시험해 볼 필요성이

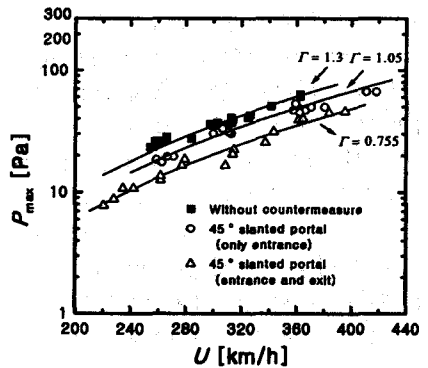
상기 결과로부터 제기된다. Fig. 5는 미기압파의 저감율이 Fig. 4에서 나타나는 바와 같이 다른 경사도에 비하여 성능이 우수한 45° 경사각구에 대하여 Fig. 3(d)와 같이 양쪽에 구멍이 있는 덮개를 설치하였을 경우에 나타나는 열차의 진입속도



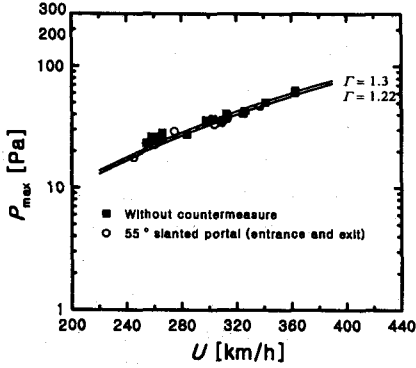
(a) 30° slanted portal (entrance, entrance/exit)



(b) 40° slanted portal (entrance)



(c) 45° slanted portal (entrance, entrance/exit)



(d) 55° slanted portal (entrance)

Fig. 4 Maximum values of micro pressure wave for a slanted portal measured at 0.333 m from tunnel exit (tunnel length of 0.5 km).

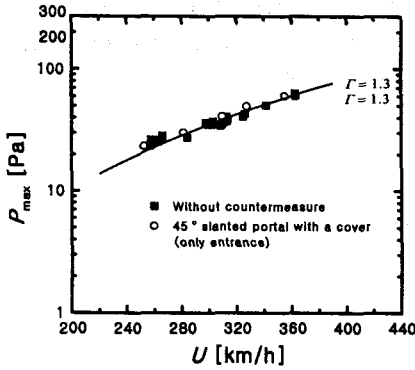


Fig. 5 Maximum values of micro pressure wave for 45° slanted portal with a a opening cover measured at 0.333 m from tunnel exit (tunnel length of 0.5 km).

와 출구에서 방사되는 미기압파의 최대값을 나타내고 있다. Fig. 5는 경사갱구에 덮개를 설치할 경우에 경사갱구 대책이 없는 경우와 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

터널에 열차 진입시 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음인 미기압파는 터널 출구부근에 충격성 소음 또는 저주파 진동의 환경문제를 야기하

며, 열차단면적, 전두부의 형상, 터널의 단면적, 터널의 길이, 터널내 슬라브/발라스트 레도의 종류, 터널 출구로부터 거리에 의존한다. 본 연구진이 개발한 한국형 중형(1/60 축척) 터널주행 열차 모형 시험장치로 미기압파 저감 저비용 대책인 경부고속철도용 터널입구 경사 갱구의 경사각도에 따른 성능을 파악하였다. 0.5 km의 비교적 짧은 터널의 경우에 미기압파는 열차의 속도가 증가할수록 커지며 이와 같은 경향은 입구후드(경사갱구)의 종류에 관계없이 거의 일관된 양상을 보이며, 슬라브레도에서 미기압의 최대 값은 열차입구속도의 3승에 비례함이 실험결과와도 잘 일치하였다. 그리고 실험결과들로부터 터널입구에 경사갱구를 설치하면 열차의 터널 진입속도를 줄이는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다.

본 연구는 미기압파 저감 대책으로 경사갱구의 경사각도에 따른 최적 경사갱구 개발을 통한 일련의 실험을 통하여 열차진입속도 220 ~ 420 km/h 영역에서 터널출구 미기압파를 최대 41.9% 줄일 수 있었다. 경사갱구는 입구와 출구 모두 설치하는 것이 입구에만 설치하였을 경우와 비교하여 2배 이상의 저감성능이 있다. 특히, 경사갱구의 경사각도가 45° 일때 미기압파 저감 성능이 매우 우수한 것으로 시험결과 나타났으며, 주목할 만한 시험결과는 경사각도의 증가에 대해 미기압파 저감율이 비례하지 않다는 사실이다. 이는 입구 경사갱구의 역할이 미기압파 저감(터널내 전파하는 압력구배 저감)에 기여한다면, 출구 경사갱구는 방사되는 미기압파의 주 방향에 기여하는 것으로 사료된다.

철도의 고속화를 실현하기 위해서는 고속화에 따라 급격하게 증가되는 철도 환경소음 및 공기역학적 현상을 완화하여 환경과의 조화를 이루는 것이 불가결하다. 이를 위해서는 열차/선로구축물 인터페이스에서 나타나는 공기역학적 현상을 해명하고 기여도가 높은 현상부터 완화·저감도 모하는 것이 중요하다. 앞으로 현상구명을 위한 정도를 더욱 높여갈 필요가 있다고 생각된다.

후기

본 연구는 G7 고속전철기술개발 선로구축물 시스템 엔지니어링 기술개발의 3차년도 개발결과 중 일부이며 (주) 대본 엔지니어링, (주) 삼보기술

단의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Dong-Hyeon Kim, Dong Ho Min and Il-Geun OH, "Experimental study of the aerodynamic countermeasures for reducing the micro-pressure waves and pressure fluctuations in high-speed train-tunnel interfaces" World Congress on Railway Research, Tokyo, Japan, October 19-23, 1999
- (2) 김동현, 민동호, 오일근, "350km/h급 터널 미기압과 저감대책 개발", 한국소음진동학회 추계학술대회 논문집, pp. 101-107, 1999. 11.18.
- (3) 김동현, 양신추, 오일근, "한국형 터널 미기압과 저감 시험기 개발", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 146-154, 1999. 11. 20.
- (4) Maeda, T. and etc, "The Final Report of Micro Pressure Wave Study for The Seoul-Pusan High-speed Railroad Project," Japan Railway Technical Services, 1994.
- (5) Matsuo, K.; Aoki, T.; Mashimo, S.; Nakatsu, E.; Entry compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel, 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 925-934, Aosta Valley, Italy: 6-8 October 1997.
- (6) Moritoh, Y., Zenda, Y., "Aerodynamic Noise of High speed Railway Cars," Japan Rail. Eng., Vol. 34, No 1, Tokyo, 1994.
- (7) Takayama, K.; Sasoh, A.; Onodera, O.; Kaneko, R.; Matsui, Y.; Experimental Investigation on Tunnel Sonic Boom, Shock Waves, Springer Verlag, pp. e 127-138, 1995.
- (8) Ozawa, S. and Maeda, T., "Model Experiment on Reduction of Micro-Pressure Wave Radiated from Tunnel Exit," JSME, International Symposium on Scale Modeling, Tokyo, July 18-22, 1988.