

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

김 동 현*, 민 동 호*

Experimental study on the alleviation of micro-pressure waves radiated from the tunnel exit with the slit hoods 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 갱구), slit hood(슬릿 후드)

Abstract

The purpose of present study is to investigate for reducing micro pressure waves generated according to train speeds (240 km/h ~ 380 km/h) through tunnels with countermeasures as followings; the hood configuration in tunnel entrance. We developed hoods for tunnel of 0.5 km length in the condition of tunnel cross-section area of 107 m² on the slab track. According to the results, the maximum micro-pressure wave is reduced by 41.2 % for the slit hood installed at the entrance of the tunnel and reduced by 47.7 % for the slit hood installed at the entrance of the tunnel and the 45° slanted portal at the exit of the tunnel

기호설명

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

1. 서 론

고속으로 열차가 터널 진입시에 압축파는 터널 출구 방향으로 생성되며 이 압축파가 터널출구 끝단에서 다시 반사하여 열차쪽으로 팽창파로 돌아온다. 터널내부는 이러한 압축파와 팽창파의 지속적인 교란으로 심한 압력변동을 격게 된다. 또한 열차의 터널 진입시 생성된 압축파는 대부분은 팽창파로 터널 입구 쪽으로 되돌아가지만 일부는 터널 출구 바깥의 대기중으로 미기압파(micro pressure wave)로 방출하여 환경소음(sonic

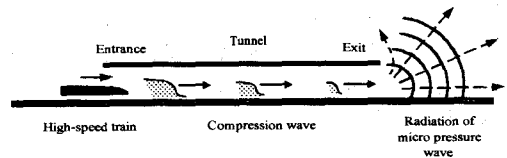


Fig. 1 The generation process of micro pressure wave at tunnel.

boom)과 저주파 진동을 야기한다(Fig.1 참조). 터널내부 공기압 변동의 진폭은 진입하는 열차속도의 제곱에 비례하기 때문에, 터널에서 300 km/h 급의 고속운행에는 많은 제약이 따른다.

터널 출구에서 발생하는 충격성 소음을 미기압파(micro pressure wave)라고 하며 터널 출구부근의 환경문제와 관련되며 열차 단면적, 열차 전두부의 형상, 터널의 단면적, 터널의 길이, 터널 내 슬라브/발라스트 궤도의 종류 및 터널 출구로부터 거리등에 복합적으로 의존하게 된다. 또한 경부고속철도 터널 입출구에 적용한 경사갱구가 미기압파 저감에 크게 기여한다는 것을 축소모델

* 한국철도기술연구원 차량연구본부

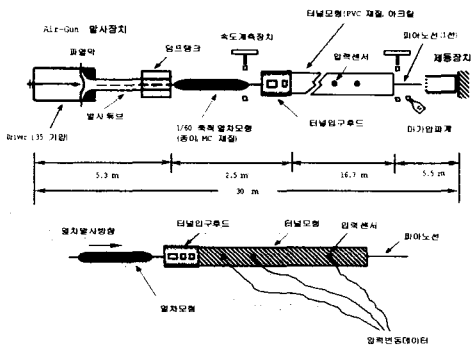


Fig. 2 The schematic of moving model rig.

실험을 통해 김동현 등⁽¹⁾이 보였다.

경부고속철도 터널의 단면적은 107 m²로 매우 크기 때문에 열차의 터널진입시 터널출구에서 미기압파(micro pressure wave)에 의한 폭발음은 발생되지 않겠으나 미기압파에 의한 저주파 진동이 터널출구 주변민가의 창문이나 문틀을 심하게 흔들어 놓을 수 있기 때문에 이에 대한 대책마련이 필요하다⁽²⁾.

따라서 본 연구에서는 터널미기압파 저감대책 중에서 선로구축물 쪽에 해당되는 입구후드를 선택하고, 이에 대한 미기압파 저감 성능을 파악하여 최적의 형상 개발을 수행하였다. 본 연구에서 개발한 슬릿후드를 입구부에만 설치하였을 경우에는 미기압파를 41.2% 저감할 수 있으며, 개발한 슬릿후드를 입구부에 설치하고 45° 경사개구를 출구부에 설치할 경우에는 미기압파를 47.7% 저감할 수 있었다.

2. 터널주행 열차모형 시험 및 계측

슬릿후드 개발 시험에서 사용한 미기압파 측정 시험장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 터널 축소모형은 아치형으로 경부고속철도 터널내공단면적 107m²에 해당되는 크기로 제작되었다. 본 시험에서 사용한 유효차단비(blockage ratio)는 8.88 %로서 KTX(Korea TGV)열차와 경부고속철도의 터널의 비와 같다. 터널내부의 압력변동은 Endeeco 압력센서 8510B-1로 4 위치에서 연속적으로 측정하였다. 터널출구 미기압파 측정은 Rion의 미기압파 측정전용 초저주파 음압레벨계 XN-12A(0.2 ~ 1kHz 저주파 대역 감도특성 일정)를 사용하였다. 터널 축에 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 수치해석 결과와 미기압파 특성분석으로 성능검증하였다^{1,2,3)}.

3. 터널 미기압파 저감용 슬릿후드

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 신간선 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 240~380 km/h인 범위에 대하여 수행하였다. 터널길이 0.5 km와 열차길이 0.67 m로 일정한 상태에서 터널 입구 슬릿후드를 변화시키면서 터널내의 압력변동과 터널 출구에서 방사되는 미기압파의 크기를 측정하였다.

본 연구에서는 미기압파의 저감율을 비교하기 위하여 차량과 터널의 유효차단비(blockage ratio)에 상관없이 적용할 수 있는 다음과 같은 경험식을 만들었다⁽²⁾.

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

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

Fig. 3은 본 연구에서 적용한 대표적인 슬릿후드의 형상을 보여준다. 후드의 내공단면적은 터널단면적의 1.3배를 적용하였다.

슬릿후드의 길이변화에 따른 일련의 실험을 통해 0.5km 슬라브레도 터널에서 최적의 슬릿후드 길이는 12.8m(실척 환산값)이었다. 슬릿후드 측면부에서 슬릿(개구부)의 높이와 슬릿 커버(개구부



(a) slit hood, A1



(b) slit hood, A6

Fig. 3 Appearances of the slit hood for reducing the micro pressure waves (1/60 scale).

를 'ㄱ'로 막는 덮개)의 크기에 따라서도 미기압과 저감효과는 달리 나왔다. 본 연구에서 시험한 결과는 슬릿후드의 길이와 슬릿(개구부)의 길이가 거의 같을 경우에 슬릿커버가 있을 경우의 미기압과 저감율이 슬릿 커버가 없을 경우보다 성능이 더 우수하였다. 슬릿후드의 최적길이는 12.8 m이고 슬릿(개구부)의 길이가 10.4 m 일 때 슬릿의 최적 높이는 1.1 m으로 얻어졌다. 또한 슬릿

커버는 슬릿(개구부)을 완전히 가릴 수 있는 크기면 충분하였다. 다양한 후드 형상변경 시험을 거친 후, Table 1은 슬릿후드의 최적 공력설계를 위해서 적용한 대표적인 형상에 대한 슬릿후드의 시험모델을 나타내었다. 후드모델 A1은 최적의 슬릿후드 형상이며 A2는 15° 경사수로(slanted channel)가 입구후드에 미치는 영향을 비교하기 위한 모델이다. A3모델은 슬릿의 높이가 미기압과 저감성능에 미치는 영향을 비교하기 위한 형상이다. A4모델과 A5모델은 각각 터널 출구부에 설치된 슬릿후드와 45° 경사개구(slanted portal)가 미기압과 저감에 미치는 영향을 분석하기 위한 시험이며, A6모델은 슬릿후드의 길이 영향을 비교하기 위한 시험모델이다.

Table 2는 식 (1)을 이용하여 Table 1에서 주어진 대표적인 슬릿후드에 대하여 최대 미기압과 저감효과를 나타내었다. A3모델과 A6모델은 최적화 시킨 슬릿후드 A1모델에서 슬릿의 높이를 약 1/2로 줄인 것과 슬릿후드의 길이를 약 1/2로 축소한 것인데 A1보다 미기압과 저감성능이 각각 약 5 %와 10 %정도 낮음을 알 수 있다. A1모델과 A4모델을 비교해 볼 때 A1모델은 입구에만 슬릿후드를 설치했을 경우인데 출구 쪽에도 후드를 설치한다 해도(A4 모델) 저감율은 1.1 %만이 향상될 뿐이다. 즉 경사개구의 2배 효과와 달리 후드 자체는 출구에서 미기압과 저감에 기여하지 못함을 보여주고 있다. 그러나 입구쪽 슬릿후드 단독으로 41.2 %나 저감시킨다는 것만으로도 큰 저감효과임은 분명하다. 슬릿후드의 앞부분에 15° 경사수로를 설치하였을 때(A2 모델) 미기압과 저

Table 1 Parameters for optimizing a size of the slit hood.

The slit hood model	The length of slit hood (m)	The height of a slit (m)	The size of a slit cover (m)	A note
A1	12.8	1.1	1.2	the slit hood at the entrance
A2	12.8	1.1	1.2	15° slanted channel and the slit hood at the entrance
A3	12.8	0.54	1.2	the slit hood at the entrance
A4	12.8	1.1	1.2	the slit hoods at the entrance and exit
A5	12.8	1.1	1.2	the slit hood at the entrance and 45° slanted portal at the exit
A6	6.1	1.1	1.2	the slit hood at the entrance

Table 2 Performance of slit hood for reducing the micro-pressure waves

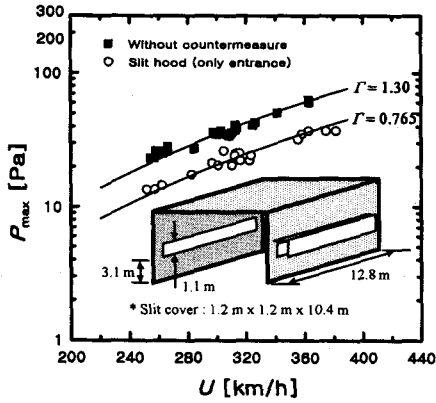
The slit hood model	The effective speed ranges (km/h)	Reduction factors (Γ)	Reduction effects (%)
A1	240 ~ 380 km/h	0.765	41.2%
A2	300 ~ 380 km/h	0.7	46.2%
A3	240 ~ 360 km/h	0.82	36.9%
A4	240 ~ 360 km/h	0.75	42.3%
A5	240 ~ 380 km/h	0.68	47.7%
A6	280 ~ 340 km/h	0.9	30.8%

감율이 46.2 %로 측정되었다. 슬릿후드를 터널 입구에 설치하고 45° 경사갱구를 터널출구에 설치하였을 경우(A5 모델)에 미기압과 저감율이 약 47.7 %임을 얻었다. 다른 모델과 비교해 볼 때 이 경우 미기압과 저감성능이 가장 좋게 나타났다. 이와 같은 시험결과는 다음과 같은 그래프로부터 분석되었다. Fig. 4(a)는 본 연구에서 개발된 슬릿후드(A1모델)를 입구에만 설치하였을 경우와 대책이 없는 경우에 관하여 비교한 도식으로 미기압과의 저감율이 41.2 %로 상당히 우수한 성능을 갖고 있음을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 A2모델을 입구에 설치하였을 경우에 나타나는 미기압과의 저감율로서 열차의 터널 진입 입구속도가 300 km/h 이상인 경우에 식 (1)에서 보여준 경험식에 잘 맞는 경향을 보여주고 있으며 슬릿후드만 설치한 경우(A1모델)보다 약 5 % 향상된 성능을 보여준다. Fig. 4(c)는 슬릿후드의 슬릿(개구부) 영향을 보기 위한 경우들 중의 하나로 슬릿의 높이를 A1모델에서 사용된 크기의 1/2인 절반으로 줄였을 경우에 A3모델에서 나타나는 미기압과의 저감성능이 약 5 % 상대적으로 떨어지는 것을 알 수 있다. 시험결과 슬릿의 최적높이는 1.1 m임을 알 수 있었다. Fig. 4(e)은 슬릿후드를 입구에 설치하고 45° 경사갱구는 출구에 설치하였을 경우에 나타나는 저감성능은 약 47.7%로 미기압과 저감율이 가장 좋은 것으로 나타났다. Fig. 4(f)는 슬릿후드의 길이변화에 대한 영향을 시험한 경우 중의 하나로 A6모델로 슬릿후드 시험을 한 결과 30.8 %의 미기압과 저감율이 나타

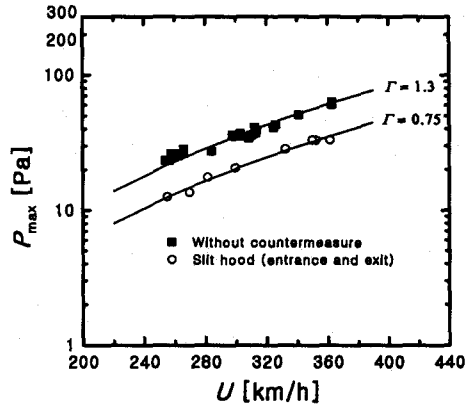
났으며 A1모델에 비하여 약 10 % 상대적으로 성능이 떨어짐을 알 수 있었으며 슬릿후드의 최적 길이는 12.8 m임을 알 수 있었다. 특히, 입구 경사갱구의 역할이 미기압과 저감(터널내 전파하는 압력구배 저감)에 기여한다면, 출구 경사갱구는 방사되는 미기압과의 주 방향에 기여하는 것으로 사료된다⁽¹⁾. 이러한 현상은 후드를 터널 앞, 뒤로 각각 달았을 때(A4 모델)의 미기압과 저감율이 터널 입구에만 후드를 달았을 때(A1 모델)와 별반 차이가 없는 것과 터널입구에 슬릿후드를 달고 출구에는 45° 경사갱구를 달았을 때(A5 모델)의 미기압과 저감효과가 약 47.7 %로 되는 것으로도 설명된다. 그러나 터널출구 갱구의 경사각도에 따른 명확한 역할 및 영향은 심도 깊게 추후 연구되어야 할 것이다(현재까지 터널출구에서 미기압과 방사는 무지향성으로 구형으로 방사된다고 보고되어 있다).

4. 결 론

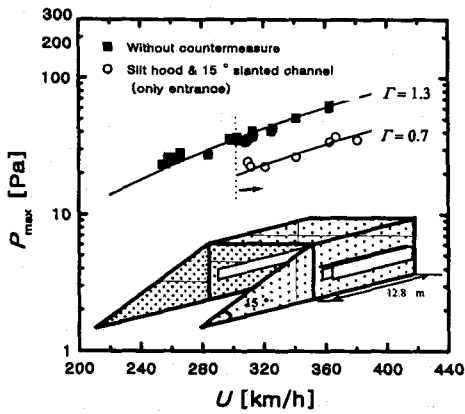
열차가 고속으로 터널에 진입할 때 압축파가 열차 앞에 생성되고 터널을 통하여 전파된다. 터널 출구에서 압축파는 팽창파로서 터널 입구쪽으로 즉 뒤로 반사된다. 이 압축파와 팽창파의 상호작용은 열차 안에 있는 승객에게 이명현상(ear disccomfort)을 야기한다. 한편 첫 번째 압축파가 터널 출구에 도달했을 때 일부분이 미기압과라고 불리는 충격성(impulsive) 파로 터널출구 바깥 주변으로 방사되는데 이것은 환경 소음 및 진동문



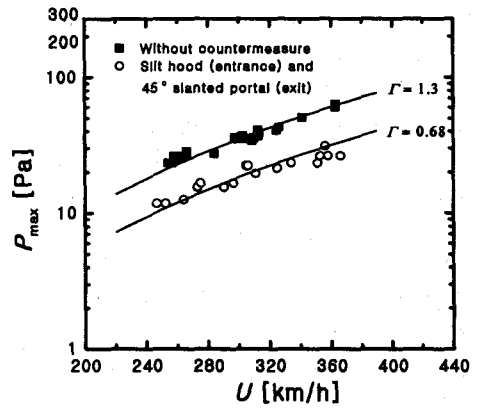
(a) Slit hood model, A1



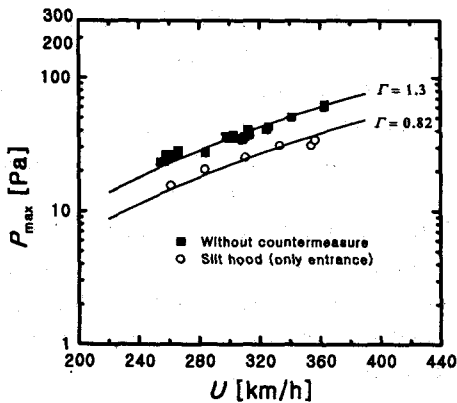
(d) Slit hood model, A4



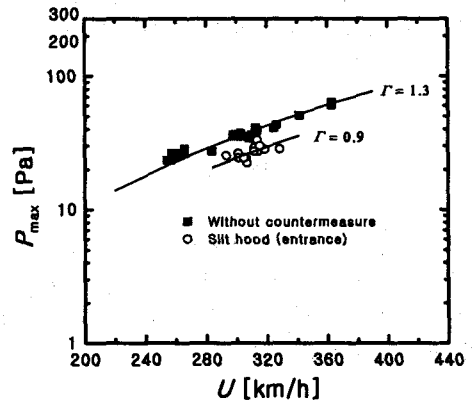
(b) Slit hood model, A2



(e) Slit hood model, A5



(c) Slit hood model, A3



(f) Slit hood model, A6

Fig. 4 Maximum values of micro pressure wave for the case of slit hood measured at 0.333 m from tunnel exit (tunnel length of 0.5 km).

제를 야기한다. 이 현상은 터널내공 단면적이 작은 경우 폭발음을 일으키기도 하며 터널출구 주변민가의 문과 창문들을 흔들어 놓는다. 본 연구에서는 중형(1/60축척) 터널주행 열차모형 시험장치로 미기압과 저감 저비용 대책인 경부고속철도용 터널입구 후드를 개발하였다. 0.5km의 비교적 짧은 터널의 경우에 미기압과는 열차의 속도가 증가할수록 커지며 이와 같은 경향은 입구후드의 종류에 관계없이 거의 일관된 양상을 보이며, 미기압의 최대 값은 열차입구속도의 3승에 비례함이 본 실험결과와 잘 일치하였다. 그리고 이상의 실험결과들로부터 터널입구에 후드를 설치하면 열차의 터널 돌입속도를 줄이는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

본 연구는 미기압과 저감 대책으로 후드 길이, 측면 개구율, 슬릿거리계의 크기 등을 변화시켜 슬릿후드를 개발하였고, 또한 후드와 경사 갱구와의 혼합사용을 통한 일련의 실험을 통하여 열차진입속도 240 ~ 380 km/h 영역에서 터널출구 미기압파를 최대 47.7 % 줄일 수 있는 대책을 개발하였다. 주요 결과로는 개발된 슬릿후드를 입구부에만 설치하였을 경우에는 미기압파를 41.2 % 저감할 수 있으며 개발된 슬릿후드를 입구부에 설치하고 45° 경사갱구를 출구부에 설치할 경우에는 미기압파를 47.7 % 저감할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 후드는 터널 길이에 따라 후드 길이만 적합화시켜 사용할 수 있다.

본 연구는 추후 호남고속철도, 신의주고속철도 등의 터널 단면적 최적화를 시행하면 반드시 필요한 기술이다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철기술개발 선로구축물 시스템 엔지니어링 기술개발의 3차년도 개발결과 중 일부이며 (주) 대본 엔지니어링, (주) 삼보기술단의 지원에 감사드린다.

참고문헌

- (1) 김동현, 민동호, 오일근, "350km/h급 터널 미기압과 저감대책 개발", 한국소음진동학회 추계학술대회 논문집, pp. 101-107, 1999. 11.18.
- (2) 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
- (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.