

연속터널에서 터널출구 미기압파를 저감 할 수 있는 스노우 셸터 개발

The development of snow shelter connecting serial tunnels for reducing the micro-pressure waves.

김 동 현¹⁾, 강 부 병²⁾, 이 재 환³⁾, 오 일 근⁴⁾, 김 형 진⁵⁾

Dong-Hyeon Kim, Bu-Byoung Kang, Jae Hwan Lee, Il-Geun Oh, Hyeong-Jin Kim

ABSTRACT

There are many tunnels located apart short distance from each other in mountainous country like Korea. Serial tunnels are connected by snow shelter in many cases. This study presents some countermeasures against micro pressure wave at the tunnel exit using snow shelter. Through 1/60 scale model laboratory test, we find that snow shelter with 3.6m slit and slit cover show the effect of reducing the micro pressure wave to about 60.5%.

1. 서 론

철도 차량·터널 인터페이스에서 나타나는 여러 가지 공기역학 문제에서 터널 미기압파 현상은 고속철도에서 발생하는 독특한 물리현상이다. 열차가 터널에 진입할 때 발생하는 압축파에 의해 터널 출구에서 미기압파(micro pressure wave)가 방사되는 것은 많이 알려진 사실이다.⁽¹⁾ 미기압파는 열차 단면적, 전두부의 형상, 터널 단면적, 터널의 길이, 터널내 슬라브/발라스트 궤도의 종류, 터널 출구로부터의 거리등에 의존한다.^{(2),(3)} 터널 출구에서 방사된 미기압파는 터널 출구 주변의 민가에 환경소음과 저주파 진동을 일으킨다. 이러한 미기압파는 저주파수 특성을 가지므로 방음벽과 같은 방법으로는 저감하기 매우 어렵다. 또한 터널 내 압력변동 대책 뿐 아니라 미기압파에 대한 저감 대책도 터널 단면적을 증가시킬 수 있으므로 이 현상에 대한 낮은 비용의 저감대책이 세워지지 않으면 철도에 대한 건설비가 기하급수적으로 증가된다.^{(4),(5)}

한국, 일본과 같이 산악이 많은 나라의 고속철도의 경우 터널과 터널 사이의 거리가 짧은 연속터널이 존재하게 되며 스노우 셸터로 연결하게 된다. 본 연구에서는 고속열차가 연속터널내로 진입할 경우에 셸터가 터널내 압력변동과 미기압파에 미치는 영향을 조사하기 위해서 특별히 개발된 시험장치를 활용하여 축소모형시험을 수행하였다.^{(4),(6),(7),(8)} 셸터를 활용하여 터널 미기압파를 저감 할 수 있는 대책을 개발하였는데 경부고속철도 화신 1, 2 터널을 대상으로 셸터의 양쪽 측벽에 높이 3.6 m의 슬릿을 설치하여 터널 진입속도 260 km/h ~ 320 km/h 영역에서 미기압파를 최대 60.5% 줄일 수 있다는 결과를 얻었다.

2. 연속터널 제원

- 1) 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원, 정희원
- 2) 한국철도기술연구원 차량연구본부 주임연구원
- 3) 한국철도기술연구원 차량연구본부 연구원
- 4) 한국철도기술연구원 연구기획본부 책임연구원, 정희원
- 5) 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원, 정희원

도표 1. 경부고속철도 화신 1, 화신 2 연속터널

터널 명칭	연 장		구조물
	실적	1/60축척	
화신 1 터널	260 m	4.333 m	tunnel 1
터널간 거리	205 m	3.417 m	slit cover shelter
화신 2 터널	245 m	4.083 m	tunnel 2

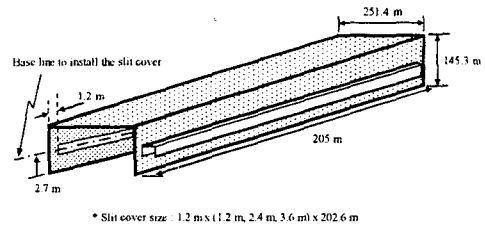


그림 1. 화신 1, 화신 2 연속터널에 설치한 슬릿 커버 셸터의 실적제원

본 연구에서는 고속전철이 연속터널을 통과시 발생하는 미기압파의 저감을 위해 슬릿 커버 셸터(Silt cover shelter)를 이용한 시험을 하였다. 연속터널 모델로는 경부고속철도 구간에 존재하는 화신 1, 화신 2 연속터널을 사용하였으며, 연속터널에 대한 제원은 도표 1에 나타내었다.

3. 시험방법

본 시험은 한국철도기술연구원의 터널 주행 열차모형 시험기를 이용하여 수행되었으며 시험장치는 참고문헌에 소개되어 있다.⁽⁵⁾ 연속터널의 미기압파와 터널내 압력 변동 측정위치는 그림 2에 나타내었다. 화신 1 터널 출구 뒤에 음압계(Rion, XN-12)를 터널 중심에서 333.33mm(실척 20 m) 거리에 위치 시켰으며, 화신 2 터널 출구 뒤에 음압계(Rion, NA-18)를 터널 중심에서 333.33mm(실척 20 m) 거리에 위치 시켜 터널 출구에서 방출되는 미기압파를 측정하였다.

본 시험은 3가지 방법으로 진행되었다. 먼저 화신 1, 2 연속터널 양끝에 45° 경사갱구만을 설치하여 미기압파를 측정하였다. 이 시험을 기준 시험으로 정의하였다. 둘째로 연속터널 사이에 슬릿 커버 셸터를 설치하고 슬릿 높이를 20mm(실척 1.2 m), 40mm(실척 2.4 m), 60mm(실척 3.6 m)로 변화시키면서 열차 진입속도별 미기압파 저감을 측정하였다. 이때 셸터의 단면적은 터널단면적의 1.23배를 적용하였다. 마지막으로 슬릿 셸터에 커버를 부착하여 슬릿 및 슬릿커버 높이를 20mm, 40mm, 60mm로 변화시키면서 열차 진입속도별 미기압파 저감을 측정하였다. “ㄱ”자 형상 커버의 돌출된 폭은 20 mm로 일정하다. 그림 1은 연속터널 사이에 설치된 슬릿 커버 셸터 모델이다.

4. 시험 결과

4.1. 미기압파 저감성능 시험 결과

터널출구에서 방사되는 미기압파는 열차가 터널에 진입시의 첫 번째 압축파의 압력구배에 비례하여 증가한다는 것은 잘 알려져 있다.⁽⁵⁾ 또한 미기압파의 최대값은 열차속도의 3승과 비례한다.⁽¹⁾

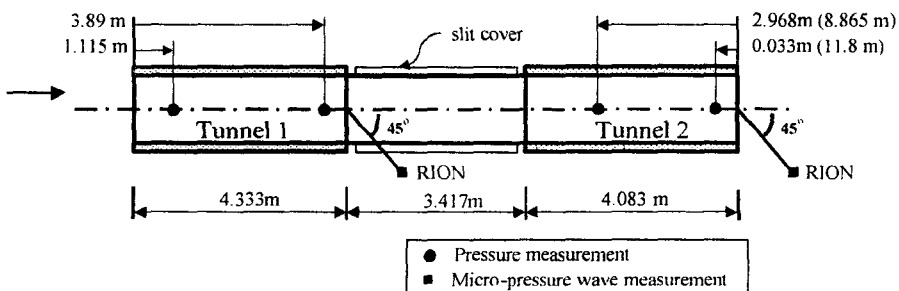


그림 2 경부고속철도 화신 1, 화신 2 연속터널에 대한 시험모델과 슬릿 커버 셸터 제원 및 측정센서 위치

본 연구에서는 터널내 차량의 단면비(blockage ratio)에 상관없이 적용할 수 있으며, 개발한 미기압과 저감대책의 성능을 비교 할 수 있는 다음과 같은 경험식을 이용하여 비교하였다.⁽⁴⁾

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

여기서, P_{\max} 는 미기압과의 최대값이고 Γ 는 미기압과 저감계수, U 는 열차의 터널진입시의 속도[km/h]이다. 식 (1)을 적용하여 도표 2에서 미기압과 저감성능을 비교하였다.

그림 3~그림 8은 열차 진입속도별 미기압과 저감계수를 나타내고 있다. 그림 3~그림 4는 20 mm 슬릿 셸터와 슬릿 커버 셸터에 따른 미기압과 최대 피크값의 비교 결과를 나타내고 있다. 그림 5~그림 6은 40 mm 슬릿 셸터와 슬릿 커버 셸터에 따른 미기압과 최대 피크값의 비교 결과를 나타내고 있다. 그림 7~그림 8은 60 mm 슬릿 셸터와 슬릿 커버 셸터에 따른 미기압과 최대 피크값의 비교 결과를 나타내고 있다.

도표 2는 본 시험 종류별 미기압과 저감율 결과를 나타내고 있다. 도표 2에 나타난 바와 같이 터널 1(화신 1터널)에서 측정된 미기압과 저감계수는 슬릿 높이가 관계없이 45도 경사갱구의 기준 시험 결과보다 높게 나타났으며, 슬릿 커버의 유·무와 관계없이 기준시험 보다 높게 나타났다.

이는 연속터널의 중간에 위치한 일종의 슬릿 터널인 슬릿 커버 셸터는 열차가 터널 진입시 발생하는 압력구배를 낮추는 역할을 하며, 동시에 터널 1의 끝 부분에서 좁은 면적의 슬릿을 통해 미기압과를 방사하기 때문으로 생각된다. 이때 터널 2에는 효과를 발휘하여 압력상승 시간을 지연시키지만 터널 1 출구에 부착된 슬릿 커버 셸터는 터널 1에 대한 미기압과 최대 피크 값 저감에는 기여하지 못하는 것으로 생각된다.

터널 2(화신 2 터널)의 경우에는 슬릿 커버 셸터가 터널 입구에 부착되었다. 터널 2 출구에서 측정된 미기압과 저감계수는 기준 시험의 결과와 비교할 때 슬릿 높이가 증가할수록 효과적이었으며, 슬릿 커버가 없는 경우보다 있는 경우가 미기압과 저감에 효과적인 것을 알 수 있었다. 즉, 슬릿 셸터만 있을 시에는 슬릿 높이의 증가에 따라 기준 시험 결과와 차이점이 거의 없었으나, 셸터에 슬릿 커버를 부착하면 슬릿 높이가 증가할수록 기준시험에 비해 미기압과 저감율이 좋아지는 것을 알 수 있었다. 화신 1 터널의 입구에 45도 경사갱구를 설치하고 화신 2 터널 출구에 45도 경사갱구를 설치한 경우, 슬릿 및 슬릿커버의 높이가 60 mm인 경우에 미기압과 저감율이 24.5 %의 결과를 얻었다.

0.5 km급, 0.75km급, 1 km급의 2년간의 기술개발 시험결과에서 터널 출입구 45도 경사갱구는 미기압과를 최소 36 %이상 저감시키고 있다.^{(9)(10),(11)} 따라서 도표 2의 미기압과 저감효과 판정의 기준값은 45도 경사갱구에 의해 1차 저감된 기준 값이고, 터널 출입구에 45도 경사갱구를 적용하지 않은 기준 값으로 터널 2의 미기압과 저감을 산정하면 약 36 %를 더한 저감효과라고 볼 수 있다. 즉 최대 저감율 약 60.5 %를 기대할 수 있다.

4.2 연속터널내 풍압변동

그림 9~그림 10에서는 연속터널인 화신터널에서 슬릿 커버 셸터 유·무에 따른 터널진입속도 300 km/h급에 대한 풍압변동량을 나타내고 있다. 그림 2에서와 같이 압력센서 1과 압력센서 2는 터널 1(화신 1 터널)에 설치되어 있으며, 압력센서 3과 압력센서 4는 터널 2(화신 2 터널)에 설치되어 있다.

셸터를 설치한 경우 그림 10에서 보는 바와 같이 각 지점의 최대 풍압변동 값은 그림 9와 같이 슬릿이 없는 경우와 정압에는 큰 차이가 없으나 부압에서 14 %정도 더 크게 나타난다. 즉, 압력 변동 최대값이 셸터를 장착하면 약간 크게 나타난다. 그러나 최대 풍압변동 값에 도달하는 시간이 슬릿이 없는 경우보다 길다는 것을 알 수 있다. 즉, 슬릿 커버 셸터를 지나서 측정되는 압력센서 3번과 압력센서 4번의 시간에 대한 압력구배는 슬릿 커버 셸터가 없는 경우에 비해 작다는 것을

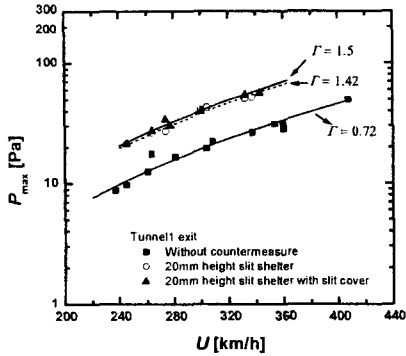


그림 3. 화산 연속터널의 20 mm 슬릿 셸터와 20 mm 슬릿 커버 셸터의 미기압과 최대 피크 값 비교(화산 1 터널출구)

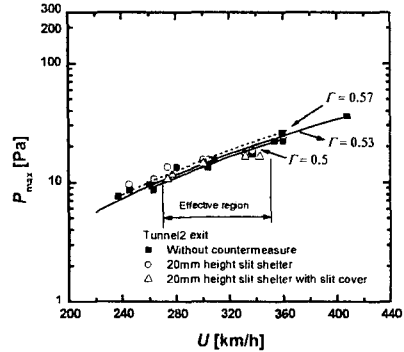


그림 4. 화산 연속터널의 20 mm 슬릿 셸터와 20 mm 슬릿 커버 셸터의 미기압과 최대 피크 값 비교(화산 2 터널출구)

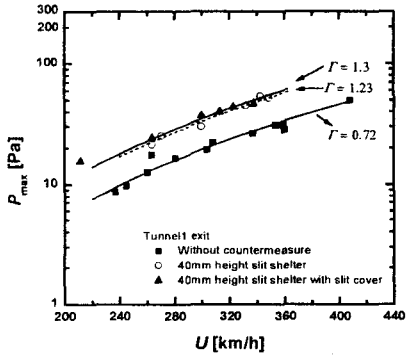


그림 5. 화산 연속터널의 40 mm 슬릿 셸터와 40 mm 슬릿 커버 셸터의 미기압과 최대 피크 값 비교(화산 1 터널출구)

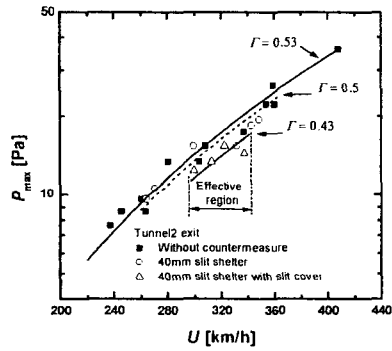


그림 6. 화산 연속터널의 40 mm 슬릿 셸터와 40 mm 슬릿 커버 셸터의 미기압과 최대 피크 값 비교(화산 2 터널출구)

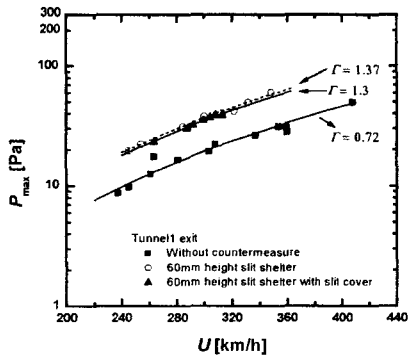


그림 7. 화산 연속터널의 60 mm 슬릿 셸터와 60 mm 슬릿 커버 셸터의 미기압과 최대 피크 값 비교(화산 1 터널출구)

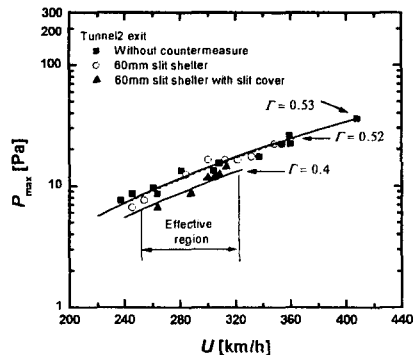


그림 8. 화산 연속터널의 60 mm 슬릿 셸터와 60 mm 슬릿 커버 셸터의 미기압과 최대 피크 값 비교(화산 2 터널출구)

의미하며, 슬릿 커버 셸터가 압력상승 시간을 지연하는 것을 알 수 있다. 또한 풍압변동량이 부압에서 14 %정도 크게 나타나지만 터널내 풍압변동량의 허용범위 이내라면 승객 이명감

(ear-discomfort)에 영향이 없을 것이다.

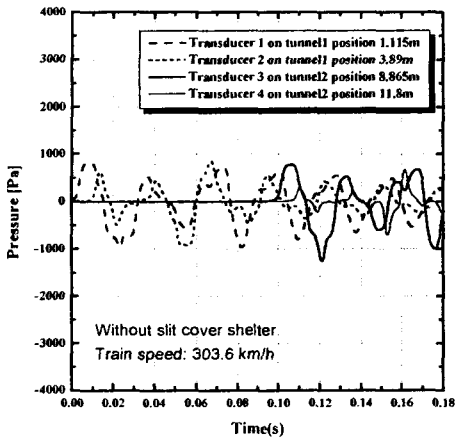


그림 9. 화신 연속터널에서 셸터가 없는 경우의 화신 1, 2 터널내 실시간 풍압변동량(열차 진입속도 303.6 km/h)

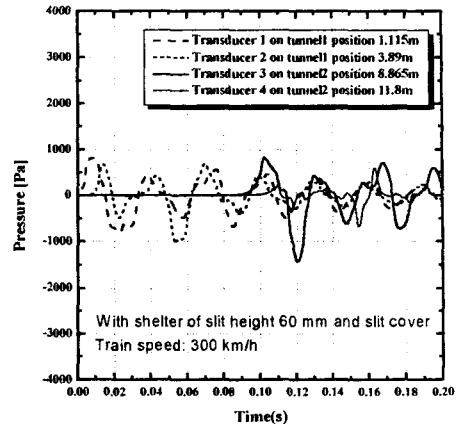


그림 10. 화신 연속터널에서 60 mm 슬릿 커버 셸터가 있는 경우의 화신 1, 2 터널내 실시간 풍압변동량(열차 진입속도 300 km/h)

표 2. 연속터널용 슬릿 셸터의 미기압과 저감효과

슬릿 셸터 형태 (설치 깊 재원)	유효속도 영역 (km/h)	터널 1		터널 2	
		미기압과 저감계수 (Γ)	미기압과 저감율 (%)	미기압과 저감계수 (Γ)	미기압과 저감율 (%)
터널 양끝 45° 경사갱구 터널연결 대책 없음	230~400	0.72	기준*	0.53	기준*
터널연결 슬릿셸터 슬릿높이 1.2 m 터널 양끝 45° 경사갱구	260~340	1.42	-97.2	0.57	-7.5 (28.5 %)**
터널연결 슬릿셸터 슬릿높이 1.2 m + 슬릿커버 터널 양끝 45° 경사갱구	240~340	1.5	-108.3	0.5	5.7 (41.7 %)**
터널연결 슬릿셸터 슬릿높이 2.4 m 터널 양끝 45° 경사갱구	260~350	1.23	-70.8	0.5	5.7 (41.7 %)**
터널연결 슬릿셸터 슬릿높이 2.4 m + 슬릿커버 터널 양끝 45° 경사갱구	290~340	1.3	-80.6	0.43	18.9 (54.9 %)**
터널연결 슬릿셸터 슬릿높이 3.6 m 터널 양끝 45° 경사갱구	240~350	1.37	-90.3	0.52	1.9 (37.9 %)**
터널연결 슬릿셸터 슬릿높이 3.6 m + 슬릿커버 터널 양끝 45° 경사갱구	260~320	1.3	-80.6	0.4	24.5 (60.5 %)**

* 미기압과 저감효과 판정의 기준값은 45° 경사갱구에 의해 1차 저감된 기준 값임.

** 터널 출입구에 경사갱구를 적용하지 않은 기준 값으로 터널 2의 미기압과 저감을 신 경하면 저감율 값에 약 36 %를 더한 효과로 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 연속터널을 연결해주는 셸터를 활용하여 터널 미기압파를 저감할 수 대책을 개발하였다. 경부고속철도 화신 1, 2터널을 대상으로 셸터의 양쪽 측벽에 높이 60mm의 슬릿을 갖는 셸터를 장착하여 터널진입속도 260 km/h ~ 320 km/h 영역에서 미기압파를 최대 60.5 % 줄일 수 있는 슬릿커버 셸터 대책을 개발하였다. 향후 호남고속철도, 신의주고속철도 건설시 예상되는 연속터널에 본 연구의 미기압파 저감대책 기술은 유용하게 사용 될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 일부분이며 (주) 삼보기술단, (주) 대본엔지니어링의 지원에 감사드린다.

참고문헌

1. 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.
2. Maeda T., Matsumura, T. and etc, "Countermeasures against Micro-pressure Waves Radiated from Tunnel Exit under Speed-up of Shinkansen," RTRI REPORT, Vol. 4, No. 1, 1990. 1.(in Japancse)
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 김동현 등, "고속전철 비정상시험장치 1차개발 및 기본모델 공력시험," G7 위탁과제 보고서, 1998. 10.
7. 김동현 외, "350km/h급 고속철도 터널 미기압파 저감대책 개발", 한국소음진동공학회, 추계학술대회, 1999.
8. 김동현 외, "한국형 터널주행 열차모형 시험기 개발", 한국철도학회 추계학술대회, 1999.
9. 김동현 등, "고속철도 터널의 공력학적 설계기술개발(터널 미기압파 저감대책)," G7 위탁과제 보고서, 1998. 10.
10. 김동현, "고속철도 터널 공력설계 및 터널입구 후드 개발", G7 고속전철기술개발사업 보고서, 1999.
11. 김동현 등, "고속철도 터널 공력설계 및 터널 후드개발" G7 고속전철기술개발사업 보고서, 2000, 10.