

# 고속철도 터널에서 경사갱구 입구의 미기압파 저감성능에 관한 연구(I)

## Experimental Study on the Slanted Portals for Reducing the Micro-pressure Waves in High-speed Train-tunnel System(I)



김 동 현\*  
Kim, Dong-Hyeon



신 민 호\*  
Shin, Min-Ho



한 명 식\*  
Han, Myeong Sik

### 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. A among methods for the purpose of 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 slanted portal using the moving model rig. According to the results, 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.

**Key Words :** Micro-pressure wave, Slanted portal, Tunnel hood, High-speed railway, Compression wave, Expansion wave

### 요 지

고속열차가 터널에 진입할 때 압축파가 터널 내부로 전파된다. 이 압축파와 연관된 터널출구 미기압파는 고속철도 열차-터널

\*1 정회원, 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원

\*2 한국철도기술연구원 시설전기연구본부 책임연구원

\*3 정회원, (주) 삼보기술단 기술연구소 소장

인터페이스에서 발생하는 독특한 물리현상이다. 미기압파를 저감시키는 방법중에 터널 입·출구부에 공기역학적인 구조물을 사용하여 압축파의 시간에 대한 구배를 지연시키는 방법이 있다. 본 연구의 목적은 터널주행 열차모형 시험기로 최적의 경사갱구를 개발하는 것이다. 경사갱구의 경사각도에 따른 시험을 통한 시험결과에서 터널 입구부에 45° 경사갱구를 적용했을 때 미기압파 최대 피크값이 19.2%가 저감되었다. 터널 입·출입구 양쪽에 45° 경사갱구를 적용할 경우는 41.2% 저감되었다. 또한 터널 입·출입구 양쪽에 30° 경사갱구를 적용할 경우는 미기압파 최대 피크값이 34.6% 저감되었다.

**주요어 :** 미기압파, 경사갱구 입구, 터널 후드, 고속철도, 압축파, 팽창파

## 1. 서론

고속철도 차량 터널 인터페이스에서 나타나는 여러 가지 공기역학 문제에서 터널 미기압파 현상은 고속철도에 서만 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. 공기음향이론(aeroacoustic theory)에 의하면 터널 출구로부터 나오는 강력한 소음의 크기는 출구에 도착하는 압축파의 압력변화에 대한 최대 시간 변화율, 즉 압축파의 파면 압력구배에 비례한다. 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 107m<sup>2</sup>으로 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 대책마련이 필요하다(Maeda et al, 1994; 김동

현 등 1999b).

터널 입구에서 형성되는 압축파의 파형  $\Delta p(x)$ 는 열차의 돌입속도와 그의 전두부 형상, 단면비 등의 복합적인 영향에 의존하는 것으로 기대되며, 해석적인 방법으로 이러한 영향에 대한 해를 얻기는 매우 곤란하다. 이 때문에 수치계산 및 실험적 연구가 활발하게 진행되고 있다 (Ozawa et al., 1988; Maeda et al., 1994; Moritoh et al., 1994; Takayama et al., 1995; Matsuo et al., 1997). 김희동 등(1999a, 1999b)은 특성곡선법을 이용한 수치해석에서 선형후드(Linear hood)와 불연속후드(Abrupt hood)일 때 터널입구에서 형성된 압축파에 대한 과잉압력, 파면의 최대압력구배 등을 조사하였다.

본 연구에서는 고속열차가 터널내로 진입할 경우에 경사갱구가 터널내 압력변동과 미기압파에 미치는 영향을 조사하기 위해서 축소모형시험을 수행하였다. 다시 말해서 터널미기압파 저감대책의 선로구축물 쪽 대책 중 하나인 경사갱구의 경사각도에 따른 미기압파 저감 성능을 파악하여 최적 경사갱구를 개발하는 것이다. 본 연구에서 시험을 통하여 검증한 45° 경사 갱구를 터널 입구에만 설치하면 미기압파 저감율이 19.2%이고, 45° 경사갱구를 터널의 입구와 출구 양쪽에 설치할 경우에는 미기압파를 최고 41.9% 줄일 수 있었다.

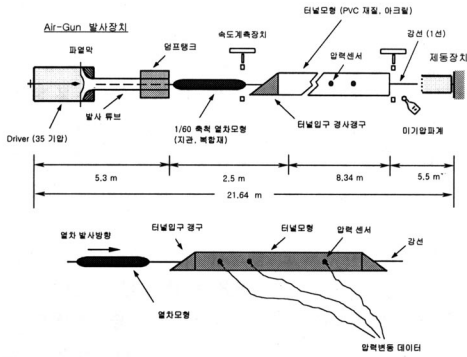


그림 1. 터널주행 열차모형 시험기 개략도

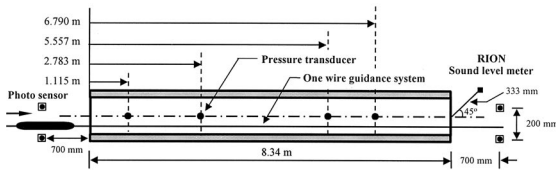


그림 2. 1/60축척 터널모형의 측정센서 위치(실척 0.5km 터널, 슬라브계도)

## 2. 터널주행 열차모형 시험기

그림 1은 본 시험에서 미기압파 측정에 사용된 시험장치의 개략도이다. 터널부는 아치형으로 경부고속철도 터널내공 단면적 107㎡에 해당된다.(김동현 등, 1999c) 본 시험에서 사용한 유효차단비(blockage ratio)는 8.88 %로서 경부고속철도의 터널과 KTX (Korea TGV)열차의 비와 같다. 열차모형은 1/60축척을 적용하였으며 3량 길이에 조금 못 미치는 0.605 m를 사용하였다. 열차가 터널입구 진입시에 생성되는 압축파의 시간에 대한 구배에 따라 터널출구 미기압파의 강도가 결정되기 때문에 본 연구에 대해서는 경사갱구를 통과할 만큼의 짧은 열차 길이로 충분하다.(Ozawa et al., 1988) 터널 입구와 출구 앞에 지면판을 두었으며, 터널내부의 압력변동은 Endevco 압력센서 8510B-1로 4 위치에서 연속적으로 기록하였다. 터널출구 미기압파 측정은 Rion의 철도전용 저주파

음압레벨계 XN-12A(저주파 대역 0.2 ~1 kHz 감도특성 일정)를 사용하였다. 터널 축에 대해 45° 각도에서 출구로부터 333 mm 거리와 지면판 위 20mm 높이에 음압레벨계를 설치하였다(그림 2 참조). 경부고속철도 복선 궤도에서 열차 운행선로 맞은편 쪽에 해당되며, 마이크론의 헤드는 미기압파의 방사방향에 맞추어 위치시켰다. 여기서 열차모형, 터널모형 및 열차모형시험기에 관한 자세한 제원은 생략한다.(김동현 등, 1999a 참조) 본 연구의 터널주행 열차모형 시험장치는 터널내의 압력변동과 터널출구에서 방사되는 미기압파에 대하여 비정상 1차원유동 수치해석 결과와 미기압파 특성분석으로 성능 검증하였다.(Kim et al., 1999d)

## 3. 터널 미기압파 저감용 경사갱구 입구

본 연구에서 적용한 터널 미기압파 저감방법은 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 철도총합기술연구소의 경우 신간선 터널 형상을 사용하지 않고 원형 파이프를 시험함). 차량의 전두부는 KTX보다 약간 뭉뚱한 전두부(nose)를 갖는 형상을 사용하였다. 이는 전두부 선단에 열차모형의 탈선을 방지하기 위해서 2mm 와이어가 관통하므로 축 방향으로 2mm 뭉뚱한 형상이 되었다. 모형 시험은 기존선 고속화 열차 및 장래의 고속열차의 속도를 고려하여 열차의 속도가 220~420 km/h인 범위에 대하여 수행하였다. 열차와 터널의 단면적비 8.88 %, 터널길이 8.34 m(실척 0.5 km)와 열차길이 0.605 m로 일정한 상태에서 터널입구 경사갱구의 경사각도를 변화시키면서 터널내의 압력변동과 터널 출구에서 방사되는 미기압파를 측정하였다.

입구 압축파의 압력변화에 대한 최대시간변화율  $(dp/dt)_{max}$ 는 터널출구로부터 방사되는 미기압파의 크기를 계산하기 위해 매우 중요한 값이다.  $p$ 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 제곱에 비례한다. 터널출구에서 방사되는 미기압파는 열차가 터널에 진입시의 첫 번째 압축파의 압력구배에 비례하여 증가한다(Ozawa et al., 1988)는 것은 잘 알려져 있다. 본 기술개발의 모형실험 데이터도 그림 3과 같이 미기압파 최대 값이 시간에 대한 최대 압력구배에 비례하는 결과를 보여주고 있다. 그림 3은 경사갱구(45° 갱구, 입구와 출구 양쪽에 설치)가 설치되었을 때 입구에서 1,115 m(실척 66.7 m) 떨어진 터널내벽 위치에서 측정된 압력구배와 터널 출구에서 333 mm(실척 20 m) 떨어진 위치에서 측정된 미기압파와의 선형 비례관계를 보여주고 있다.

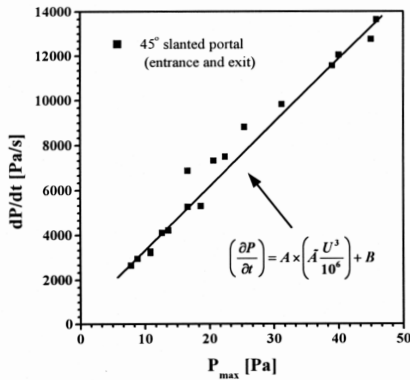


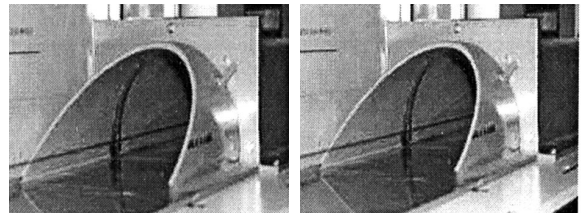
그림 3. 미기압파와 압축파의 시간에 대한 구배 관계 비교 (터널 입출구에 45° 경사갱구 적용한 경우)

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

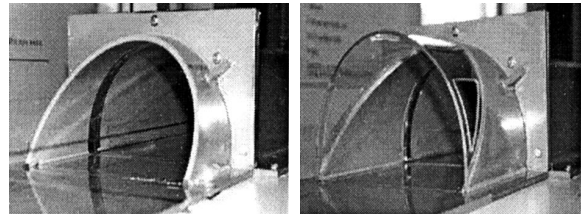
$$P_{max} = \Gamma \cdot U^3 / 10^6 \quad (1)$$

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

다음의 사진 1은 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 8.34 m 슬라브궤도 터널(실척 0.5km)에서 방사되는 미기압파의 크기를 측정하였다. 여기서 경사각도는 지표면과 경사갱구가 이루는 각도를 기준으로 하였다.



(a) 30° 경사갱구 시험모델 (b) 45° 경사갱구 시험모델



(c) 55° 경사갱구 시험모델 (d) 양구덮개 시험모델

사진 1. 미기압파 저감용 경사갱구 시험모델 형상(1/60 축척 모델)

표 1은 입구부에 아무런 대책을 적용하지 않은 8.34 m(실척 0.5 km) 슬라브궤도 터널을 표준 비교 대상으로 하였을 때, 4가지 형상의 후드에 관하여 터널 출구에서 나타나는 미기압파를 식 (1)을 이용하여 미기압파 최대 값의 저감율을 나타낸 도표이다. 표 1에서 경사 각도가 45° 이면서 경사갱구가 입구와 출구에 모두 설치된 경우에 미기압파 저감율이 약 42%임을 나타내고 있으며, 다른 경사도와 비교해 볼 때 미기압파의 저감성능이 매우 우수한 것으로 나타났다.

표 1. 경사갱구의 미기압파 저감성능 비교

경사갱구의 경사각도	유효속도 범위 (km/h)	저감계수 ( $I'$ )	저감율 (%)
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

그림 4는 경사갱구 입구가 터널내 압력변동에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그래프로 결과를 분명하게 나타내기 위해서 대표적인 3개의 경우만을 비교하였는데, 경사갱구가 없는 경우와 각각 30°, 55°의 경사갱구 입구가 설치된 경우가 해당된다. 경사갱구 입구의 역할은 지면과 이루는 경사갱구 각도가 작을수록 열차의 터널 진입시에 생성된 압축파의 시간에 따른 변화율인 최대 압력구배를 작게 한다는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 최대압력 값에 이르는 시간 폭을 지연시켜주는 역할을 한다.

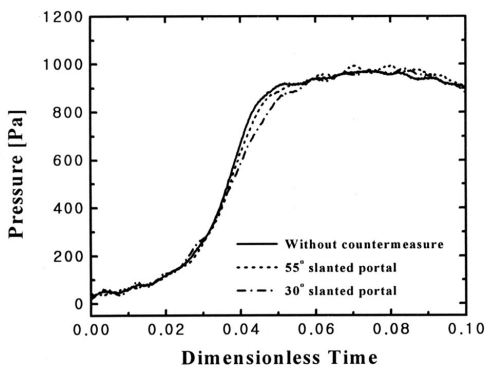


그림 4. 터널 입구로부터 1.115 m 위치에서 측정된 갱구 경사각도에 따른 터널내 압력구배 비교 (터널진입속도 300 km/h)

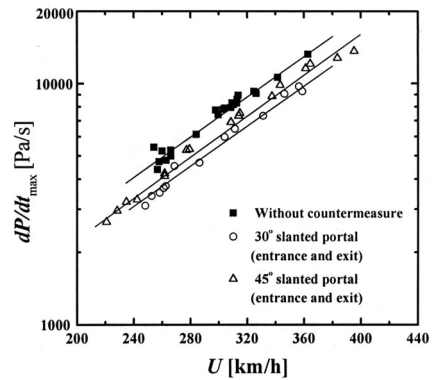


그림 5. 터널입구로부터 1.115 m 위치에서 측정된 터널내 압력구배 최대값 분포

이러한 경사갱구의 터널내 최대 압력구배를 감소시키는 역할은 그림 5에서 더 분명하게 보여주고 있다. 그림 5는 열차의 터널진입속도가 220km/h~420km/h에서 경사갱구의 경사각도가 30°, 45° 및 경사갱구가 없을 때에 해당되는 3가지 경우이며 최대 압력구배를 열차진입속도에 관하여 나타내었다. 시험결과에 따르면 경사갱구 입구의 경사각도가 낮을수록 최대 압력구배가 작아지는 것을 보여주고 있다.

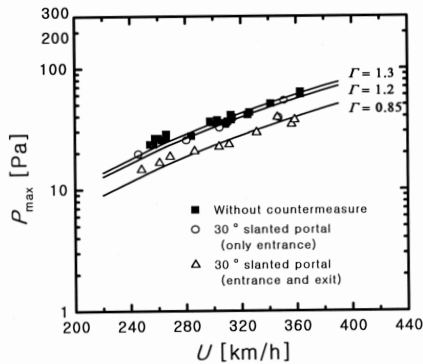
그림 6은 경사갱구의 설치에 따른 미기압파 최대 값의 저감 분포를 나타내는 그래프로서 열차의 터널진입속도와 터널출구에서의 미기압파 최대 피크값을 나타낸다. 열차진입 속도영역은 220 km/h에서 420 km/h까지 수행하였다. 그림 6(a)는 30° 경사갱구를 입구부에만 설치하였을 경우와 입구/출구부에 동시에 설치하였을 때 저감되는 미기압파의 최대 피크값을 보여주고 있으며 그림 6(b)는 40° 경사갱구를 입구부와 출구부에 설치하였을 때이며 그림 6(c)는 45° 경사갱구를 입구부에만 설치하였을 경우와 입구/출구부에 설치하였을 경우이며, 그림 6(d)는 55° 경사갱구를 입구와 출구부에 설치하였을 경우에 나타나는 터널 진입속도와 최대 미기압파 피크값을 보여주고 있다. 미기압파 저감 시험을 수행한 결과를 비교해보면 경사갱구는 그림 6에서 보여주는 바와 같이 입구와 출

구에 모두 설치하는 것이 입구에만 설치하였을 경우와 비교하여 2배 이상의 저감성능이 있다.

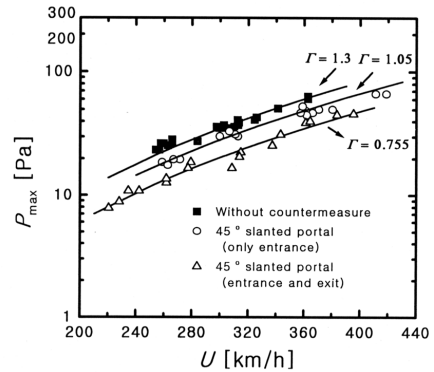
특히, 경사갱구의 경사각도가 45° 일때 미기압과 저감 성능이 매우 우수한 것으로 시험결과 나타났으며, 주목할 만한 시험결과는 경사각도의 증가에 대해 미기압과 저감율이 비례하지 않다는 사실이다. 또한 미기압과는 첫 번째 압축파의 파면 압력구배에 비례하여 증가한다(Ozawa et al., 1988)는 널리 알려진 사실을 전제로 하여 그림 5와 그림 6을 검토한 결과에 따르면, 입구 경사갱구의 역할은 미기압과 저감(터널내 전파하는 압력구배 저감)에 기여하며 출구 경사갱구는 방사되는 미기압과의 전파 경로에 기여하는 것으로 사료된다. 그리고 입출구 각각의

갱구 경사각도에 따른 명확한 역할 및 영향은 추후 심도 깊게 연구되어야 할 것이다. 현재까지 터널출구에서 미기압과 방사는 무지향성으로 구형으로 방사된다고 보고(Maeda et al., 1994)되어 있다. 또한 갱구의 경사각도를 입/출구에 달리 주고 시험해 볼 필요성이 상기 결과로부터 제기된다.

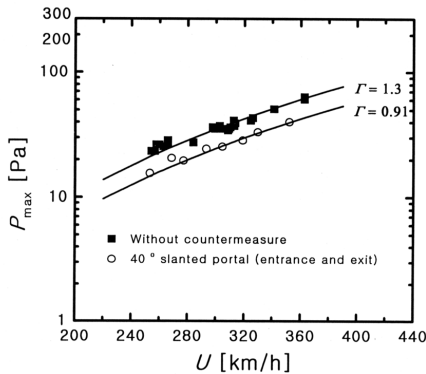
그림 7은 미기압과의 저감율이 다른 경사도에 비하여 성능이 우수한 45° 경사갱구(그림 6 참조)에 대하여 그림 3(d)와 같이 양쪽에 구멍이 있는 덮개(양구 덮개)를 설치하였을 경우에 나타나는 열차의 진입속도와 출구에서 방사되는 미기압과의 최대 값을 나타내고 있다. 그림 7은 경사갱구에 양구 덮개를 설치할 경우에 경사갱구 대책이



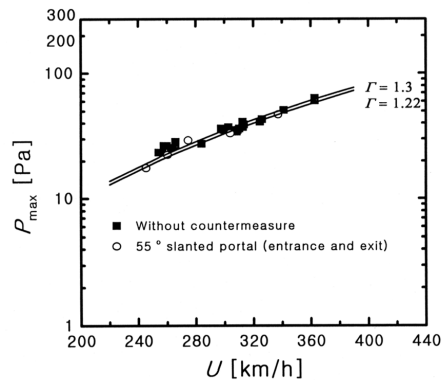
(a) 30° 경사갱구(입구, 입출구)



(c) 45° 경사갱구(입구, 입출구)



(b) 40° 경사갱구(입구)



(d) 55° 경사갱구(입구)

그림 6. 터널출구로부터 0.333 m 위치에서 측정된 미기압과 최대 피크값

없는 경우와 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 그림 8에서 나타내는 바와 같이 터널내 최대 압력구배가 터널만 있는 경우와 45° 경사갱구에 양구 덮개가 설치된 경우 비슷한 경향을 보이는 것으로 설명된다.

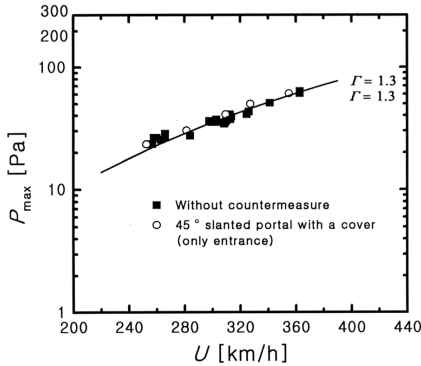


그림 7. 양구 덮개 적용한 45° 경사갱구에 대한 미기압과 최대 피크값 (터널출구로부터 0.333 m에서 측정)

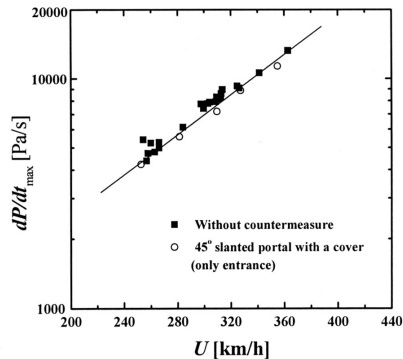


그림 8. 열차 진입속도에 따른 압력구배 최대값 (터널입구로부터 1.1115m 위치에서 측정)

#### 4. 결론

터널에 열차 진입시 터널 출구에서 발생하는 미기압과는 터널 출구부근에 충격성 소음 또는 저주파 진동의 환경문제를 야기하며, 열차단면적, 전두부의 형상, 터널의

단면적, 터널의 길이, 터널내 슬라브/발라스트 궤도의 종류, 터널 출구로부터 거리에 의존한다. 본 연구진이 개발한 한국형 중형(1/60 축척) 터널주행 열차모형 시험장치로 미기압과 저비용 저감대책인 경부고속철도용 터널입구 경사갱구의 경사각도에 따른 성능을 파악하였다. 8.34 m(실척 0.5 km)의 비교적 짧은 터널의 경우에 미기압과는 열차의 속도가 증가할수록 커지며 이와 같은 경향은 경사갱구(입구후드)의 경사각도에 관계없이 거의 일관된 양상을 보이며, 슬라브 궤도에서 미기압과의 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 미기압과 저감 대책으로 경사갱구의 경사각도에 따른 최적 경사갱구 개발을 통한 일련의 실험을 통하여 열차진입속도 220 ~ 420 km/h 영역에서 터널출구 미기압과를 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 미기압과 저감 성능이 매우 우수한 것으로 시험결과 나타났으며, 주목할 만한 시험결과는 경사각도의 증가에 대해 미기압과 저감이 비례하지 않다는 사실이다. 입구 경사갱구의 역할은 미기압과 저감(터널내 전파하는 압력구배 저감)에 기여하며 출구 경사갱구는 방사되는 미기압과의 전파 경로에 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·저감을 도모하는 것이 중요하다. 본 기술개발은 철도 고속화에서 터널의 단면적 최적설계시 반드시 필요한 기술이다.

## 감사의 글

본 연구는 G7 고속전철기술개발 선로구축물 시스템 엔지니어링 기술개발의 3차년도 개발결과중 일부이며 한국 건설기술연구원 지하구조물그룹, (주) 삼보기술단, (주) 대본 엔지니어링의 지원에 감사드립니다.

## 기호

- $\Gamma$  : 미기압파 저감계수
- $P_{max}$  : 미기압파의 최대 피크값 [Pa]
- $p$  : 터널내 공기압 [Pa]
- $U$  : 열차의 터널진입속도 [km/h]

## 참고문헌

1. 김동현 등(1999a), "한국형 터널 미기압파 저감 시험기 개발," 한국철도학회, 추계학술대회 논문집, pp. 146-154.
2. 김동현 등(1999b), "350km/h급 고속철도 터널 미기압파 저감대책 개발," 한국소음진동공학회, 추계학술대회 논문집, pp. 101-107.
3. 김동현 등(1999c), "터널 미기압파 저감을 위한 강재후드 개발 연구," 한국철도기술연구원 수탁과제 보고서.
4. 김희동 등(1999a), "입구후드가 고속철도 터널입구의 압축파에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제1호, pp. 58-68.
5. 김희동 등(1999b), "고속철도 터널입구에서 형성되는 압축파의 특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제2호, pp. 234-242.
6. Kim, D. H., Min, D. H., and Oh, I. G.(1999d), "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.
7. Maeda, T. et al.(1994), "The Final Report of Micro-

Pressure Wave Study for The Seoul-Pusan High-speed Railroad Project," Japan Railway Technical Services.

8. Matsuo, K., Aoki, T., Mashimo, S., and Nakatsu, E.(1997), "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.
9. Moritoh, Y. and Zenda, Y.(1994), "Aerodynamic Noise of High speed Railway Cars," Japan Rail. Eng., Vol. 34, No 1, Tokyo.
10. Takayama, K., Sasoh, A., Onodera, O., Kaneko, R. and Matsui, Y.(1995), "Experimental Investigation on Tunnel Sonic Boom, Shock Waves, Springer Verlag, pp. e 127-138.
11. Ozawa, S. and Maeda, T.(1988), "Model Experiment on Reduction of Micro-Pressure Wave Radiated from Tunnel Exit," JSME, International Symposium on Scale Modeling, Tokyo, July 18-22.