

고속철도에서 슬릿커버후드의 터널 미기압파 저감성능에 관한 연구(Ⅱ)

Experimental Study on the Slit Cover Hood for Reducing the Micro Pressure Waves in High-speed Train-tunnel Interfaces



김동현*
Kim, Dong-Hyeon



신민호*²
Shin, Min-Ho



한명식*³
Han, Myeong Sik

Abstract

Purpose of this paper is to investigate the hood configuration at a tunnel entrance to reduce the micro pressure wave that is generated according to train speed. Two configurations were examined for the tunnel of 0.5 km in length. The experimental results show that a slit cover hood installed at the entrance of the tunnel reduces the maximum micro pressure wave by 41.2%, and the configuration with a slit cover hood installed at the entrance and the 45° slanted portal at the exit of the tunnel suppress the pressure wave by 47.7%.

Keywords : Micro pressure wave, Tunnel hood, Seoul-Pusan high-speed railway, Slanted portal, Slit hood

요 지

본 연구의 목적은 고속철도 터널 입구에 슬릿 커버 후드를 적용하여, 고속열차 터널 진입시 터널 출구 쪽에서 방사되는 미기압파를 저감시키는데 있다. 경부고속철도 107 m²의 단면적을 갖는 슬라브 궤도 0.5 km 터널에 대하여 슬릿 커버 후드라는 구조물 대책을 마련하였다. 개발시험 결과는 터널 입구에만 후드를 설치했을 경우 미기압파가 최대 41.2%가 저감되었으며, 터널 입구에 후드를 설치하고 출구에 45° 경사갱구를 설치 했을 경우는 47.7%가 저감되었다.

주요어 : 미기압파, 터널 후드, 경부고속철도, 경사 갱구, 슬릿 후드

*1 정회원, 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원

*2 비회원, 한국철도기술연구원 시설전기연구본부 본부장

*3 정회원, (주) 삼보기술단 기술연구소 소장

1. 서론

고속으로 열차가 터널 진입시에 압축파는 터널출구 방향으로 생성되며 이 압축파가 터널출구 끝단에서 다시 반사하여 열차쪽으로 팽창파로 돌아온다. 터널내부는 이러한 압축파와 팽창파의 지속적인 교란으로 심한 압력변동을 겪게 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 boom)과 저주파 진동을 야기한다(그림 1 참조). 터널내부 공기압 변동의 진폭은 진입하는 열차속도의 제곱에 비례하기 때문에, 터널에서 300 km/h급의 고속운행에는 많은 제약이 따른다.

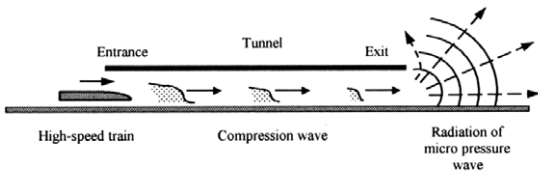


그림 1. 터널내 압축파 전파 및 터널출구 미기압파 방사 현상

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 경사개구가 미기압파 저감에 크게 기여한다는 것을 축소모델 실험을 통해 김동현 등(1999a)이 보였다.

경부고속철도 터널의 단면적은 107 m²로 매우 크기 때문에 열차의 터널진입시 터널출구에서 미기압파(micro pressure wave)에 의한 폭발음은 발생되지 않았으나 미

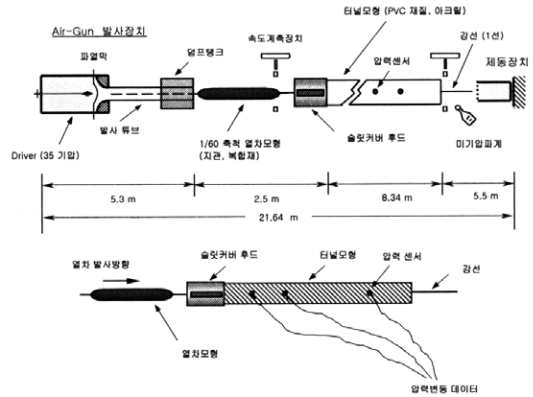


그림 2. 터널주행 열차모형 시험기-III 구성

기압파에 의한 저주파 진동이 터널출구 주변민가의 창문이나 문틀을 심하게 흔들어 놓을 수 있기 때문에 이에 대한 대책마련이 필요하다(Maeda, 1994, Kim, 1999). 김희동 등(1999a, 1999b)은 특성곡선법을 이용한 수치해석에서 선형후드(linear hood)와 불연속후드(abrupt hood)일 때 터널입구에서 형성된 압축파에 대한 과잉압력, 파면의 최대 압력구배 등을 조사하였다. Dayman과 Vardy (1979)는 터널입구에 후드 등의 가설물을 설치하여 열차가 터널 내에 돌입할 때 발생하는 터널내 압력구배를 처음부터 낮추는 연구를 수행하였다. 미기압파 저감 후드로 실용화된 것 중에서 일본 신간선용으로 개발된 것이 있으며, 여기서 사용된 후드는 양측벽에 개구부(openings) 구멍만 몇 개 뚫어 놓고 있다(Ozawa & Maeda, 1988).

본 연구에서는 터널미기압파 저감대책 중에서 선로구 축물 쪽에 해당되는 입구후드를 선택하고, 이에 대한 미기압파 저감 성능을 파악하여 최적의 형상 개발을 수행하였다. 본 연구에서 개발한 슬릿커버후드의 특징은 다수의 개구부 대신에 한 개의 긴 슬릿을 뚫고 여기에 "ㄱ" 형상의 슬릿가리개 (cover)를 장착하는 점이며, 이 슬릿커버 후드를 입구부에만 설치하였을 경우에는 미기압파를 41.2% 저감할 수 있으며, 개발한 슬릿커버후드를 입구부에 설치하고 45° 경사개구를 출구부에 설치할 경우에는 미기압파를 47.7% 저감할 수 있었다.

2. 터널주행 열차모형 시험 및 계측

슬릿커버후드 개발 시험에서 사용한 미기압과 측정 시험장치의 개략도는 그림 2와 같다. 터널부는 아치형으로 경부고속철도 터널내공 단면적 107m²에 해당된다.(김동현, 1999c)본 시험에서 사용한 유효차단비(blockage ratio)는 8.88%로서 경부고속철도의 터널과 KTX (Korea TGV) 열차의 비와 같다. 열차모델은 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 경사궤구를 통과할 만큼의 짧은 열차길이를 충분하다(Ozawa와 Maeda, 1988). 터널 입구와 출구 앞에 지면판을 두었으며, 터널내부의 압력변동은 Endevco 압력센서 8510B-1로 4 위치에서 연속적으로 기록하였다. 터널출구 미기압파 측정은 Rion의 철도 전용 초저주파 음압레벨계 XN-12A(저주파 대역 0.2 ~1 kHz 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. 여기서 열차모형, 터널모형 및 열차모형시험기에 관한 자세한 제원은 생략한다(김동현 등, 1999b 참조). 본 연구의 터널주행 열차모형 시험장치는 터널내의 압력변동과 터널출구에서 방사되는 미기압파에 대하여 2차원유동 수치해석 결과와 미기압파 특성분석으로 성능 검증하였다(김동현, 1999a, 1999b).

3. 터널 미기압파 저감용 슬릿커버후드

터널 미기압파를 저감시키는 방법은 열차가 터널 진입 시 생성되는 시간에 대한 압력구배를 낮추는 것으로 공기 역학적인 구조물을 이용하여 압력상승 시간을 지연시키

는 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. 이는 전두부 선단에 열차모델의 탈선을 방지하기 위해서 2 mm 와이어가 관통하므로 축방향으로 2 mm 뭉뚝한 형상이 되었다. 모형시험은 기존선 고속화 열차 및 장래의 고속열차의 속도를 고려하여 열차의 속도가 240~380 km/h인 범위에 대하여 수행하였다. 터널길이 8.34 m(실척 0.5 km)와 열차길이 0.605 m(실척 36.9 m)로 일정한 상태에서 터널입구 슬릿커버후드를 변화시키면서 터널내의 압력변동과 터널출구에서 방사되는 미기압파의 크기를 측정하였다.

본 연구에서는 미기압파의 저감율을 비교하기 위하여 차량과 터널의 유효차단비(blockage ratio)에 상관없이 적용할 수 있는 다음과 같은 경험식을 만들었다(김동현, 1999b).

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

여기에서, P_{\max} : 미기압파의 최대값 [Pa]

Γ : 미기압파 저감계수

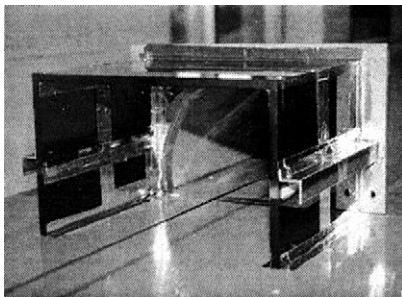
U : 열차의 터널진입속도 [km/h]

식 (1)을 적용하여 본 연구에서 수행한 여러 가지 슬릿커버후드의 미기압파 저감성능을 비교하였다. 사진 1은 본 연구에서 적용한 대표적인 슬릿커버후드의 형상을 보여준다. 후드의 내공단면적은 터널단면적의 1.3배를 적용하여 0.0387 m²(실척 139 m²)에 해당되며 가로 253 mm, 세로 153 mm이다.

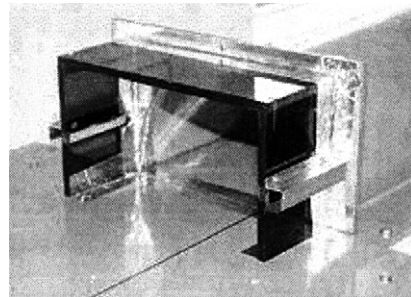
다양한 후드 형상변경 시험을 거친 후, 효과적인 공력 설계를 위해서 적용한 대표적인 형상의 슬릿커버후드를 표 1에 나타내었다. 후드모델 A1은 시험한 후드들 중에서

표 1. 슬릿 커버 후드의 최적 제원 (실척 사양)

Slit hood model	Length of slit hood (m)	Height of a slit (m)	Size of a slit cover (m)	Note
A1	12.8	1.1	1.2	Slit hood at the entrance
A2	12.8	1.1	1.2	15° slanted channel and slit hood at the entrance
A3	12.8	0.54	1.2	Slit hood at the entrance
A4	12.8	1.1	1.2	Slit hood at the entrance and exit
A5	12.8	1.1	1.2	Slit hood at the entrance and 45° slanted portal at the exit
A6	6.1	1.1	1.2	Slit hood at the entrance
A7	18.9	1.1	1.2	Slit hood at the entrance



(a) Slit cover hood, A1



(b) Slit cover hood, A6

사진 1. 미기압파 저감용 슬릿 커버 후드 개발품 (1/60 축척 모델)

가장 성능이 우수한 슬릿커버후드 형상이며 A2는 15° 경사수로(slanted channel)가 입구후드에 미치는 영향을 비교하기 위한 모델이다. A3모델은 슬릿의 높이가 미기압파 저감성능에 미치는 영향을 비교하기 위한 형상이다. A4모델과 A5모델은 각각 터널 출구부에 설치된 슬릿커버후드와 45° 경사개구(slanted portal)가 미기압파 저감에 미치는 영향을 분석하기 위한 시험이며, A6모델은 슬릿커버후드의 길이 영향을 비교하기 위한 시험모델이다.

표 2는 식 (1)을 이용하여 표 1에서 주어진 대표적인 슬릿커버후드에 대하여 최대 미기압파 저감효과를 나타내었다. A3모델과 A6모델은 성능이 우수한 슬릿커버후드 A1모델에서 슬릿의 높이를 약 1/2로 줄인 것과 슬릿커

버후드의 길이를 약 1/2로 줄인 것인데 A1보다 미기압파 저감성능이 각각 약 5%와 10%정도 낮음을 알 수 있다. A1모델과 A4모델을 비교해 볼 때 A1모델은 입구에만 슬릿커버후드를 설치했을 경우인데 출구 쪽에도 후드를 설치한다 해도(A4 모델) 저감율은 1.1%만이 향상될 뿐이다. 즉 경사개구의 2배 효과(김동현, 1999a)와 달리 터널 출구에 설치된 슬릿커버후드 자체는 출구에서 미기압파 저감에 기여하지 못함을 보여주고 있다. 그러나 입구쪽 슬릿커버후드 단독으로 41.2%나 저감시킨다는 것만으로도 큰 저감효과임은 분명하다. 슬릿커버후드의 앞부분에 15° 경사수를 설치하였을 때(A2 모델) 미기압파 저감율이 46.2%로 측정되었다. 슬릿커버후드를 터널입구에 설

표 2. 미기압과 저감용 슬릿 커버 후드의 성능

The slit hood model	The effective speed ranges (km/h)	Reduction factors (I')	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%

치하고 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.

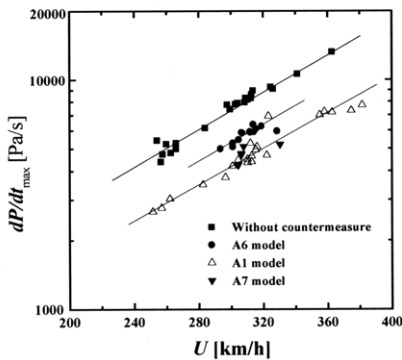
슬릿커버후드의 길이변화에 따른 일련의 실험에서 가장 효과적인 시험 결과는 8.34 m(실척 0.5 km) 슬라브궤도 터널에서 슬릿커버후드의 길이는 213 mm(실척 12.8 m) 이었다. 슬릿커버후드의 측면부에서 슬릿(개구부)의 높이와 슬릿 커버(개구부를 'ㄱ'로 막는 덮개)의 크기에 따라서도 미기압과 저감효과는 달리 나왔다. 본 연구에서 시험한 결과는 슬릿커버후드의 길이와 슬릿(개구부)의 길이가 거의 같을 경우에 슬릿커버가 있을 경우의 미기압과 저감율이 슬릿 커버가 없을 경우보다 성능이 더 우수하였다. 시험한 슬릿커버후드들 중에서 효과적인 길이는 12.8 m(실척) 이고 슬릿(개구부)의 길이가 10.4 m(실척)일 때 슬릿의 높이는 1.1 m(실척)으로 얻어졌다. 또한 슬릿커버는 슬릿(개구부)을 완전히 가릴 수 있는 크기면 충분하였다. 이와 같은 시험결과는 다음과 같은 그래프로부터 분석되었다. 그림 3(a)는 미기압과의 저감에 효과적인 슬릿커버후드의 길이를 찾기 위해서 3가지의 후드길이에 관하여 시험을 수행한 것으로 각각의 후드 길이는 실척으로 6.1, 12.8 및 18.9 m에 해당되며 열차의 터널 진입속도가 240 km/h~400 km/h일 때 최대 압력구배만을 속도에 관하여 나타내었다. 세 개의 시험결과에 따르면 A1모델과 A7모델인 경우에 최대 압력구배가 비슷하게 낮게 나오는 것을 알 수 있으며 A1모델이 건설비용 차원에서 더 효과적

임을 알 수 있다. 그림 3(b)는 대표적인 슬릿의 높이 변화에 따른 최대 압력구배의 저감 효과를 나타내고 있다. 그림 3(c)는 슬릿의 개구부를 막는 'ㄱ' 자형의 슬릿커버의 효과 및 길이 결정에 대한 시험을 나타내고 있다. 여기서 중요한 점은 슬릿(개구부)이 없는 후드(A1 model without slit)와 슬릿은 있지만 슬릿커버가 없는 후드(A1 model without slit cover)에 대한 실험 결과인데, 이때 나타나는 최대 압력구배가 비슷한 크기를 갖는 점이다. 반면에 슬릿에 커버(cover)를 설치한 후드(A1 model, 슬릿커버후드)의 최대 압력구배를 살펴보면 단지 슬릿 후드에 커버를 설치함으로써 압력구배를 효과적으로 낮출 수 있다는 점이다. 이러한 최대 압력구배의 저감성능은 미기압과 저감성능과 밀접한 관계를 갖으며 그림 4에서 보다 분명하게 알 수 있다.

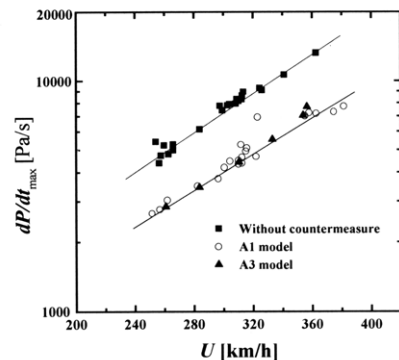
그림 4(a)는 본 연구에서 개발된 슬릿커버후드(A1모델)를 입구에만 설치하였을 경우와 대책이 없는 경우에 관하여 비교한 도식으로 미기압과의 저감율이 41.2%로 상당히 우수한 성능을 갖고 있음을 알 수 있다. 그림 4(b)는 A2모델을 입구에 설치하였을 경우에 나타나는 미기압과의 저감율로서 열차의 터널 진입 입구속도가 300 km/h 이상인 경우에 식(1)에서 보여준 경험식에 잘 맞는 경향을 보여주고 있으며 슬릿커버후드만 설치한 경우(A1모델)보다 약 5% 향상된 성능을 보여준다. 그림 4(c)는 슬릿커버후드의 슬릿(개구부) 영향을 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 m(실척)임을 알 수 있었다. 그림 4(e)은 슬릿커버후드를 입구에 설치하고 45° 경사갱구는 출구에 설치하였을 경우에 나타나는 저감성능은 약 47.7%로 미기압과 저감율이 가장 좋은 것으로 나타났다. 그림 4(f)는 슬릿커버후드의 길이변화에 대한 영향을 시험한 경우 중의 하나로 A6모델로 슬릿커버후드 시험을 한 결과 30.8%의 미기압과 저감율이 나타났으며 A1모델에 비하여 약 10% 상대적으로 성능이 떨어짐을 알 수 있었으며, 실험한 슬릿커버후드의 길이 중에서 가장 효과적인 길이는 12.8 m(실척)임을 알 수 있었다. 특히,

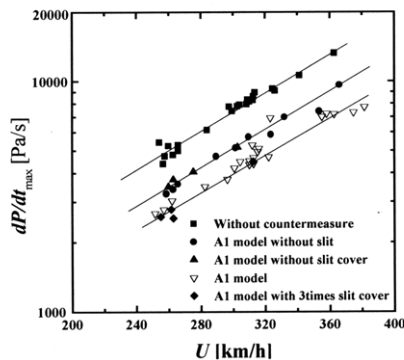
입구 슬릿커버후드의 역할이 미기압과 저감(터널내 전파하는 압력구배 저감)에 기여하는 반면에 출구에 설치된 슬릿커버후드는 방사되는 미기압과의 주 전파경로에 기여하는 영향이 적음을 알 수 있다. 이러한 현상은 후드를 터널 앞, 뒤로 각각 달았을 때(A4 모델)의 미기압과 저감율이 터널 입구에만 후드를 달았을 때(A1 모델)와 별반 차이가 없는 것과 터널입구에 슬릿커버후드를 달고 출구에는 45° 경사갱구를 달았을 때(A5 모델)의 미기압과 저감효과가 약 47.7%로 되는 것으로도 설명된다(김동현, 1999a). 그러나 터널출구 갱구의 경사각도에 따른 명확한 역할 및 영향은 심도 깊게 추후 연구되어야 할 것이다



(a) Length of slit cover hood

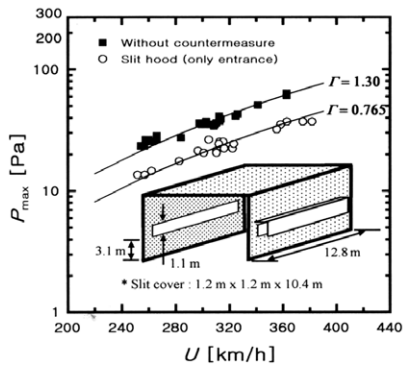


(b) Height of slit

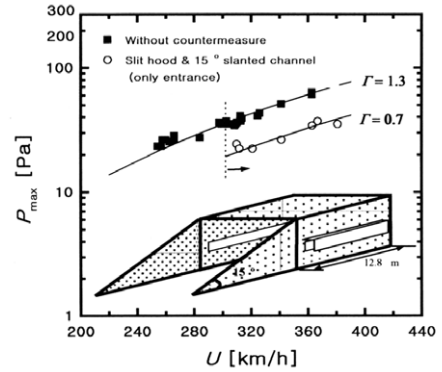


(c) Size of slit cover

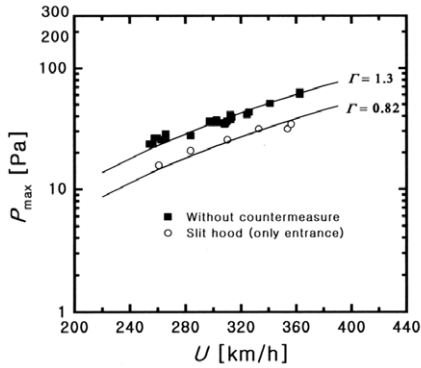
그림 3. 터널 내부 1.115m에서 측정된 압력구배 최대 피크 값



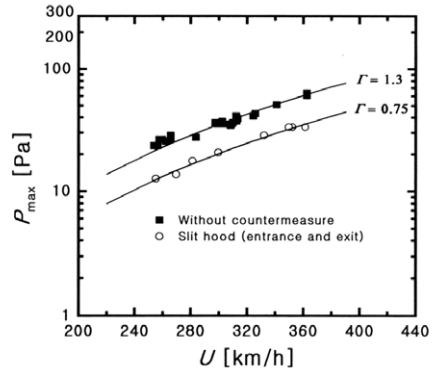
(a) Slit hood model, A1



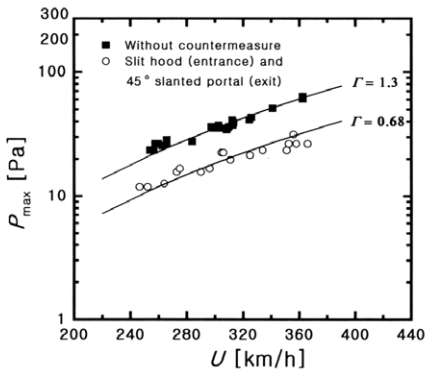
(b) Slit hood model, A2



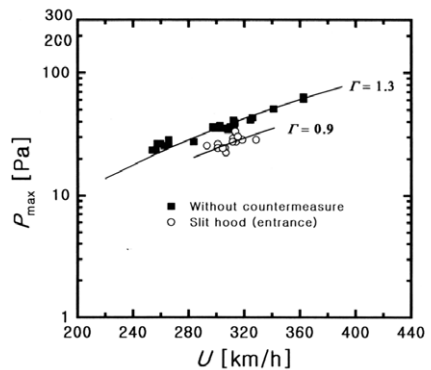
(c) Slit hood model, A3



(d) Slit hood model, A4



(e) Slit hood model, A5



(f) Slit hood model, A6

그림 4. 슬릿 커버 후드 적용한 경우의 터널 출구로부터 0.333 m에서 측정된 미기압파의 최대 피크값 (후드 형상 그림은 실적 제원 표시함)

(현재까지 터널출구에서 미기압파 방사는 무지향성으로 구형으로 방사된다고 보고되어 있다).

4. 결론

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 discomfort)을 야기한다. 한편 첫 번째 압축파가 터널 출구에 도달했을 때 일부분이 미기압파라고 불리는 충격성(impulsive) 파로 터널출구 바깥 주변으로 방사되는데 이것은 환경 소음 및 진동문제를 야기한다. 이 현상은 터널내공 단면적이 작은 경우 폭발음을 일으키기도 하며 터널출구 주변민가의 문과 창문들을 흔들어 놓는다. 본 연구에서는 중형(1/60축척) 터널주행 열차모형 시험장치로 미기압파 저감 저비용 대책인 경부고속철도용 터널입구 후드를 개발하였다. 0.5 km(실척)의 비교적 짧은 터널의 경우에 미기압파는 열차의 속도가 증가할수록 커지며 이와 같은 경향은 입구후드의 종류에 관계없이 거의 일관된 양상을 보이며, 미기압의 최대 값은 열차입구 속도의 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 미기압파 저감 대책으로 후드 길이, 측면 개구율, 슬릿가리개의 크기 등을 변화시켜 슬릿커버후드를 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. 중요 결과로는 개발된 슬릿커버후드를 입구부에만 설치하였을 경우에는 미기압파를 41.2% 저감할 수 있으며 개발된 슬릿커버후드를 입

구부에 설치하고 45° 경사갱구를 출구부에 설치할 경우에는 미기압파를 47.7% 저감할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 후드는 터널 길이에 따라 후드길이만 적대화시켜 사용할 수 있다. 본 연구는 추후 호남고속철도, 신의주고속철도 등의 터널 단면적 최적화를 시행하면 반드시 필요한 기술이다.

감사의 글

본 연구는 G7 고속전철기술개발 선로구축물 시스템 엔지니어링 기술개발의 결과 중 일부이며 건설기술연구원의 지하구조물그룹 및 (주) 대본 엔지니어링, (주) 삼보기술탄의 지원에 감사드린다.

참고 문헌

1. 김동현, 민동호, 오일근 (1999a), "350km/h급 터널 미기압파 저감대책 개발", 한국소음진동학회 추계학술대회 논문집, pp. 101-107.
2. 김동현, 양신추, 오일근 (1999b), "한국형 터널 미기압파 저감 시험기 개발", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 146-154.
3. 김희동 등 (1999a), "고속철도 터널입구에서 형성되는 압축파의 특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제2호, pp. 234-242.
4. 김희동 등 (1999b), "입구후드가 고속철도 터널입구의 압축파에 미치는 영향", 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제1호, pp. 58-68.
5. 김동현 등 (1999c), "터널 미기압파 저감을 위한 강재후드 개발 연구", 한국철도기술연구원.
6. Kim, Dong-Hyeon, Min, Dong-Ho, and Oh, Il-Geun (1999), "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. (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., 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., 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., Matsui, Y. (1995), "Experimental Investigation on Tunnel Sonic Boom," Shock Waves, Springer Verlag, pp. 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.
12. Dayman, B. and Vardy, A.E. (1979), "Alleviation of tunnel Entry pressure transients: 1. experimental program," 3rd Intl.Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, March, Sheffield University, England, pp. 343-362.