

고속선 터널미기압과 특성 및 예측기법 연구

Prediction Method and Characteristics of Micro-pressure Wave on High-speed Railway Tunnel

윤수환* · 남성원 · 김석원

Su-hwan Yun · Seong-won Nam · Seok-won Kim

Abstract This paper describes a prediction method for micro-pressure wave emitted from a tunnel on the Kyung-bu high-speed railway. Pressure and micro-pressure wave were measured simultaneously to obtain some constants for the prediction method. The change of a micro-pressure wave were analyzed according to the speed of the train, the track bed type, and the distance from a tunnel portal. At a train speed of 300km/h, the micro-pressure wave of 4.0km long ballast track tunnel is about 7.5Pa; that of 3.3km long slab track tunnel is about 14.3Pa. The strength of the micro-pressure wave decreases in inverse proportion to the distance and becomes about 0.5~1.0Pa at a point of 100m from the tunnel exit. Micro-pressure waves were predicted using the formula with the obtained constants. Using a comparison between the predicted data and field measurement data, it was confirmed that micro-pressure wave can be predicted easily through the prediction formula.

Keywords : Micro-pressure wave prediction, Pressure wave, Field measurement, High-speed train

초 록 본 논문은 경부고속선 터널에서 발생하는 미기압과 예측기법을 설명하였다. 미기압과 예측식에 필요한 계수를 도출하기 위하여 터널궤도유형에 따른 미기압과 변화를 알아보기 위하여 터널압력과 미기압과를 동시에 계측하였다. 열차속도, 터널궤도유형 그리고 출구로부터 거리에 따른 크기 변화를 분석하였다. 경부고속선 터널에서 발생하는 미기압과는 고속열차가 약 300kph로 진입할 때, 길이 4.0km의 자갈궤도터널에서는 약 7.5Pa 미기압과가 발생하며, 3.3km의 슬라브궤도터널에서는 약 14.3Pa의 미기압과가 발생한다. 그리고 터널출구에서 방사된 미기압과는 전과거리에 반비례하여 줄어들며, 100m 지점에서는 약 0.5~1.0Pa로 나타난다. 그리고 터널압력과 기울기를 이용하여 미기압과 예측식에 필요한 계수를 도출한 후, 예측식을 통해 미기압과 크기를 계산하였다. 계산된 미기압과 크기를 현장시험 결과값과 비교해 본 결과, 터널 미기압과 크기는 이론식을 이용하여 신속하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

주요어 : 미기압과예측, 압력과, 현장계측, 고속열차

1. 서 론

고속열차가 터널을 진입하면 피스톤효과와 같이 터널 내 공기가 압축되면서 압축과가 발생하여 터널출구로 전파한다. 터널출구에 도달한 압축과는 고정단반사 형태로 반사되어 다시 입구를 향해 전파한다. 이때, 압축과의 일부가 충격과의 형태로 터널출구에서 방사되는데, 이를 미기압과(micro-pressure wave)라고 한다(Fig. 1). 저주파 충격과의 미기압과가 터널 출구로 방출하면 민가의 창문 떨림이 발생하거나 심각한 경우 충격성 소음이 발생하여 터널 주변 주거환경에 영향을 미친다.

국내에서는 고속철도 시스템이 도입된 1990년대부터 터널압력과 및 미기압과에 대한 연구가 수행되기 시작하여 현재까지도 꾸준히 진행되고 있다. 터널 압력과 및 미기압과 예측을 위해 Nam[1]과 Kwon[2] 등은 각각 1차원 특성곡선법과 2차원 확대칭 전산해석을 수행하였다. 그리고 Mok 등 [3]는 3차원 전산해석을 이용하여 미기압과 크기를 저감시키는 터널후드 형상에 대한 설계를 수행한 바 있다. 하지만, 1차원 특성곡선법과 2차원 확대칭 해석법은 열차와 터널 입출구의 입체적 형상을 고려할 수 없기 때문에 미기압과 예측에 많은 어려움이 있다. 그리고 3차원 전산해석은 열차와 터널 입/출구의 형상을 고려할 수 있지만 막대한 해석시간이 요구되기 때문에 긴 터널에 대해서는 적용하기가 어렵다. 한편, Kim과 Min[4]은 발사형 이동모형 시험장비를 이용하여 미기압과 크기를 예측하고 입/출구 형상설계를 수행하였다. 하지만, 발사형 이동모형 시험은 막대한 설비비용이 요구되며, 터널내/외부의 형상모사 한계로 인해 현장시험결과보다 다소 크게 나타나는 것

*Corresponding author. Tel.: +82-31-460-5595, E-mail : shyun@krii.re.kr.

© 2015 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2015.18.1.8>

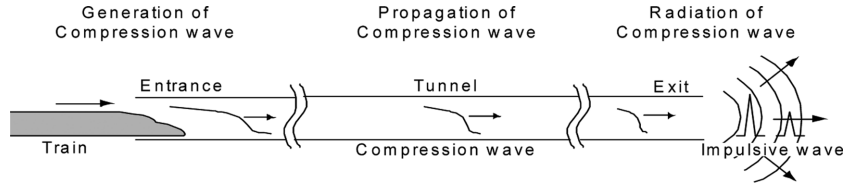


Fig. 1. Process of tunnel pressure wave propagation and micro-pressure wave emission.

으로 알려져 있다[5]. 그리고 Yun 등 [6]은 경부고속선 터널에서 현장계측시험을 수행하고 미기압파 크기를 변화를 분석한 바 있다.

한편, 터널단면적(약 64m²)이 상대적으로 작은 일본에서는 미기압파에 의한 충격성소음을 경험한 1960년대 중반부터 Hara, Yamamoto, Ozawa 등을 중심으로 터널압력파와 미기압파에 대한 연구가 집중적으로 수행되었다. 일본 역시 미기압파 특성 분석 및 크기에측을 위하여 현장계측시험, 이동모형시험과 전산해석방법 등 다양한 연구를 수행하였다. 특히, 많은 현장계측 시험결과를 바탕으로 압축파기울기와 미기압파 간의 관계를 이론적으로 정립하고, 터널내/외 형상과 열차형상 효과를 고려하여 신속하게 미기압파의 크기를 예측할 수 있는 이론적 방법을 제시하였다[7-9].

이처럼 미기압파는 복잡한 전산해석이나 이동모형시험이 없이도 이론식을 이용하여 신속하게 예측할 수 있다. 하지만, 해당 예측식을 이용하기 위해서는 국내 고속열차와 터널구조를 반영할 수 있는 몇 가지 상수값이 도출되어야 한다. 현재까지는 해당 상수값을 도출할 수 있는 현장계측시험 자료가 부족하여 미기압파 이론식을 활용할 수 없었다. 따라서, 본 연구에서는 국내 고속선의 터널압력파와 미기압파를 계측하여 그 특성을 분석하고, 미기압파 예측식을 이용하여 신속하게 미기압파 크기를 예측하고자 한다.

2. 터널압력파와 미기압파 관계식

미기압파 크기는 터널압력파가 출구에 도달한 시점의 해당 압력파 기울기에 의해 결정된다. 하지만, 압력파의 기울기는 터널압력파가 터널을 전파하는 동안, 터널 내부구조 및 거칠기 등에 의해 변화하며, 특히 터널 입/출구 형상에 의해 크게 변화하는 것으로 알려져 있다.

열차의 터널진입에 의해 발생하는 입구압축파의 기울기는 열차의 진입속도, 전두부 형상과 터널 입구형상(경사갱구, 후드 및 압력공 등) 그리고 열차/터널 단면적비 등 다양한 형상요소에 의해 결정된다. Maeda 등 [7]은 이러한 요소들을 고려하여 입구압축파 기울기를 식 (1)과 같이 유도하였다. 식 (1)에서 v 는 열차의 터널진입속도, R 은 터널/열차 단면적비, ρ 는 공기밀도, t 는 열차전두부와 터널입구 영향을 나타내는 효과계수이며, d 는 터널의 수력직경을 나타낸다.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{ent} = \frac{1}{2} \rho \frac{v^3}{kd} \frac{1-(1-R)^2}{(1-v/c)(v/c+(1-R)^2)} \quad (1)$$

ent : tunnel entrance, p : pressure, v : train speed at entrance, d : tunnel hydraulic diameter, R : cross-sectional area ratio of a train to a tunnel, c : speed of sound, ρ : air density, k : shape effect coefficient of a train nose and a tunnel entrance.

그리고 일반적으로 압력파가 터널을 전파하는 동안 그 기울기는 변화하는데, 슬라브케도 터널에서는 점차적으로 증가하는 반면, 자갈케도 터널에서는 터널내 구조 및 거칠기 등에 의해 점차적으로 감소한다. Ozawa는 이에 대한 관계를 시험적 방법을 통해 압축파의 기울기 변화를 식 (2)와 같이 제안하였다[8]. 식 (2)에서 α 는 압력파 기울기의 감쇠계수로서 압력파가 터널을 전파하는 동안 압력파 기울기 변화율을 나타낸다. 일반적으로 터널압력파의 기울기는 콘크리트 케도터널에서는 그리고 x 는 터널길이(경사갱구 제외)를 나타낸다.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{exit} = \left(\frac{dp}{dt}\right)_{ent} \cdot e^{-\alpha x} \quad (2)$$

$exit$: tunnel exit, x : tunnel length, α : attenuation coefficient of pressure wave gradient.

끝으로 터널출구에 도달한 압축파는 식 (3)의 관계를 가지면서 미기압파로 방출한다[8]. 식 (3)에서 Ω_s 는 터널출구의 형상에 의한 효과를 나타내며, A 는 터널단면적, c 는 음속 그리고 r 은 터널출구중심으로부터의 거리를 나타낸다.

$$P_{MPW} = \frac{2A}{\Omega_s c r} \left(\frac{dp}{dt} \right)_{exit} \tag{3}$$

Ω_s : solid Angle of a sloped portal, c : speed of sound, A : cross-sectional area of tunnel, r : distance from a tunnel exit.

앞서 언급한 연속된 과정의 식을 이용하면 간단하게 미기압과 크기를 예측할 수 있다. 하지만, 식 (1)의 k , 식 (2)의 α 그리고 식 (3)의 Ω_s 는 각각 열차의 형상, 터널유형 그리고 터널입/출구 형상 등에 의해 영향을 받기 때문에 해당 터널 및 차량에 대한 각각의 값들이 정의되어야 한다.

3. 터널압력과 미기압과 현장계측 시험

3.1 현장계측 시험방법

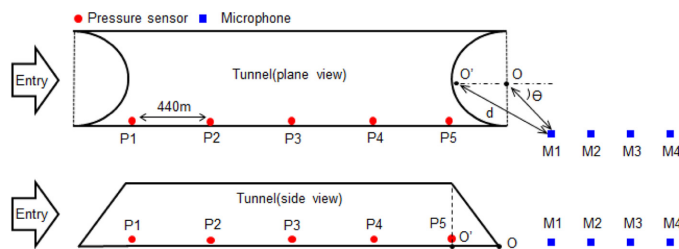
3.1.1 계측시스템 및 터널

터널압력과 미기압과의 상호관계를 분석하기 위해서는 두 물리값을 동시에 계측해야 한다. 이를 위해 터널압력과 계측을 위한 압력센서와 미기압과 계측을 위한 마이크로폰으로 구성된 계측시스템을 구축하였다. 계측시스템에 사용된 압력센서와 마이크로폰의 대표 제원은 Table 1에 제시하였다. 압력센서는 급격히 변동하는 터널압력을 충분히 감지할 수 있는 범위와 정확도를 가진 압력센서를 사용하였으며, 미기압과 센서는 저주파의 미기압과(약 15Hz 이하)[8]를 감지하기에 충분한 범위의 무지향성 마이크로폰을 사용하였다.

Fig. 2는 현안터널에 대한 각 센서들의 배치방법 및 설치 사진을 나타낸다. 현안터널 내에 설치한 압력센서는 터널시작점(O')을 기준으로 440m 간격으로 총 5개의 센서를 Fig. 2(b)와 같이 설치하였다. 그리고 모든 압력센서들은 시간적으로 서로 동기시켜, 감지된 압력신호를 동일시각에 각 센서부 메모리에 저장하도록 하였다. 그리고 마이크로폰은 경사갱구 끝점

Table 1. Specifications of pressure sensor and microphone.

Pressure sensor	Microphone
Full Range: 800 to 1200 mbar abs.	Frequency response characteristics: Free-field
Accuracy: ±0.08% F.S	Frequency Range: 3.15~20,000Hz
Sensitivity: 0.02% F.S	Sensitivity: 50mV/Pa
Maker: Druck/Model: PMP 4000	Maker: PCB/Model: 378B02
Sampling rate: 500s/sec	Sampling rate: 5000s/sec



(a) Location of pressure sensors and a microphone(Hyun-an tunnel)



(b) Pressure sensor



(c) Microphone

Fig. 2. Field measurement system for tunnel pressure wave and micro-pressure wave.

(O)에서 10m, 20m, 50m 100m 떨어진 지점에 설치하였다(Fig. 2(c)). 경사갱구를 포함한 터널시작점(O')을 기준으로 환산한 거리는 각각 23m, 35m, 65m, 115m 지점이다.

한편, 미기압파 크기는 터널출구 중심에서 방향각(θ)에 따라 달리 나타나는 것으로 알려져 있다. 하지만, Miyachi[10]의 연구결과에 의하면 터널중심에서 0~45° 범위에서는 방향각에 관계없이 미기압파 방출크기가 거의 동일한 것으로 나타났다. 본 현장계측에서 마이크로폰의 방향각은 Table 2에 제시한 것과 같이 각각 43°, 20°, 8°, 4°이므로(Fig. 2 참고), 측정되는 모든 미기압파의 크기는 마이크로폰의 방향각에 무관할 것으로 예상되며, 터널중심으로부터의 거리만이 변수로 작용한다.

계측터널은 Table 3에 제시한 바와 같이, 경부고속선 1단계 구간의 자갈케도터널 1곳과 경부고속선 2단계 구간의 슬라브케도터널 2곳으로 선정하였다. 자갈케도터널은 운주터널로 길이가 약 4030m이며, 슬라브케도터널은 경부고속선 2단계 구간의 현안터널과 복안터널로 각각의 길이는 약 1750m와 3320m이다. 그리고 모든 터널의 입/출구는 동일한 형태의 45° 경사갱구로 건설되어 있다.

Table 2. Distance and angle of measurement points.

	M1	M2	M3	M4
d (m)	10	20	50	100
θ (°)	43	20	8	4

Table 3. Tunnel specifications for field measurement.

Tunnel	Length(m)	Type
Un-ju	4030	ballast
Bok-an	3320	Slab
Hyun-an	1750	Slab

3.2 현장계측결과 및 분석

3.2.1 터널압력과 미기압파 계측결과

Fig. 3은 KTX가 현안터널을 300kph로 진입할 때 발생하는 터널압력과 미기압파를 동시에 계측한 결과이다. Fig. 3(a)는 터널내 압력과 전파를 나타낸 것으로 P1~P5의 각 센서에서 계측된 터널내 압력이다. 전두부 진입에 의해 발생한 압축파(CW)와 압축파 반사에 의한 팽창파(EW)가 반복적으로 발생하여 전파하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 터널압력파가 출구에 도달할 때마다 Fig. 3(b)와 같이 미기압파가 반복적으로 발생한다.

3.2.2 미기압파 방출 특성

국내 영업운행 중인 고속열차를 대상으로 진입속도 약 255~300km/h 범위에 대한 미기압파 계측결과를 Fig. 4에 제시하였다. 본 현장계측의 측정범위에서 나타난 미기압파 방출특성을 살펴보면, 슬라브케도터널(현안터널, 복안터널)에서는

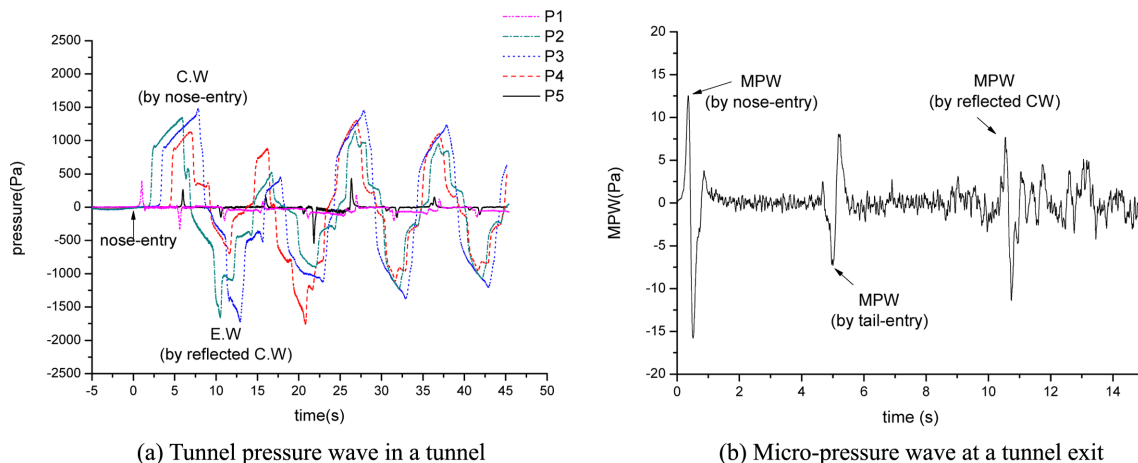


Fig. 3. Field-measurement results of tunnel pressure wave and micro-pressure wave(Hyun-an tunnel, KTX 300 kph, CW:compression wave, EW:expansion wave, MPW:micro-pressure wave).

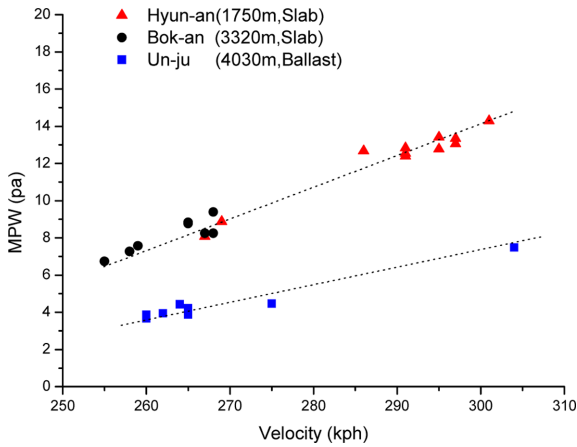


Fig. 4. Micro-pressure wave change as a function of train velocity.

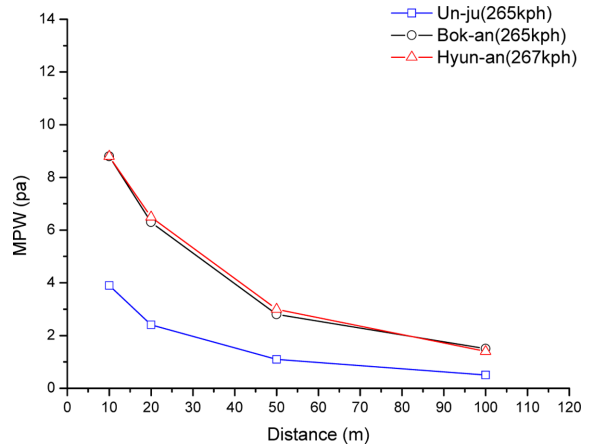


Fig. 5. Micro-pressure wave attenuation as a function of distance from a tunnel.

6.7~14.3Pa, 그리고 자갈케도터널(운주터널)에서는 3.9~7.5Pa의 미기압파가 발생한다. 따라서 고속열차가 경부고속선 터널을 300km/h로 진입 시, 3.3km 이하의 모든 슬라브케도 터널에서는 최고 약 14.3Pa 이하의 미기압파가 발생하며, 4km 이상의 자갈케도 터널에서는 최고 약 7.5Pa 이하의 미기압파가 발생한다는 것을 예상할 수 있다. 그리고 자갈케도터널에서는 미기압파 크기가 슬라브케도터널의 약 50% 수준으로 현저히 낮게 나타난다. 이것은 자갈의 공극 및 거칠기 등이 압축파 기울기를 상쇄시켜 미기압파 크기가 낮아지는 현상으로서, 거친 터널 표면구조가 미기압파 크기를 저감시키는데 큰 효과가 있다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 미기압파가 출구 주변으로 전파할 때, 거리에 따른 미기압파 크기 변화를 나타낸다. 터널출구에서 약 9Pa(슬라브케도)과 약 4Pa(자갈케도)로 방출된 미기압파는 터널주변으로 방사하면서, 거리에 반비례하여 감소한다. 결국, 반경 100m 지점에서는 약 0.5~1.5Pa로 상쇄되며, 그 이상의 거리에서는 미기압파 영향이 매우 낮을 것으로 예상된다.

4. 터널출구 미기압파 예측

4.1 미기압파 예측식 도출 및 검증

현장계측결과와 식 (1)~(3)을 이용하여 출구 미기압파 방출크기를 예측하기 위해서는 각 식에 필요한 Ω_s , k , α 를 도출해야 한다. 먼저, 터널형상, 열차, 그리고 대기조건 등에 필요한 상수를 Table 4와 같이 적용하였다. 계측거리 r 는 경사갱구의 미기압파 저감효과와 구분하기 위하여 터널끝점을 기준으로 설정하였다. 그리고 모든 현장계측결과에 대한 출구압력과 기울기를 Fig. 6과 같이 도출하고, 식 (1)~(3)의 관계를 이용하여 모든 경우의 Ω_s , k , α 값을 도출하였다. 그리고 각각의 평균

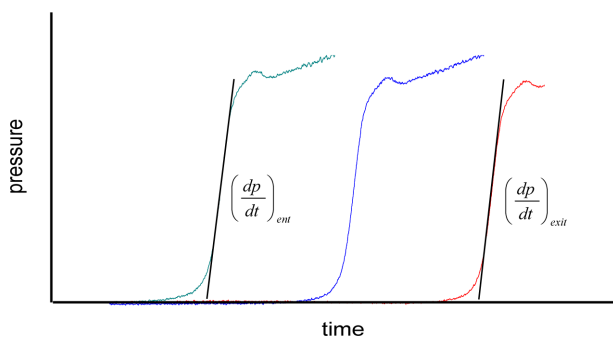


Fig. 6. Maximum pressure gradient of pressure wave.

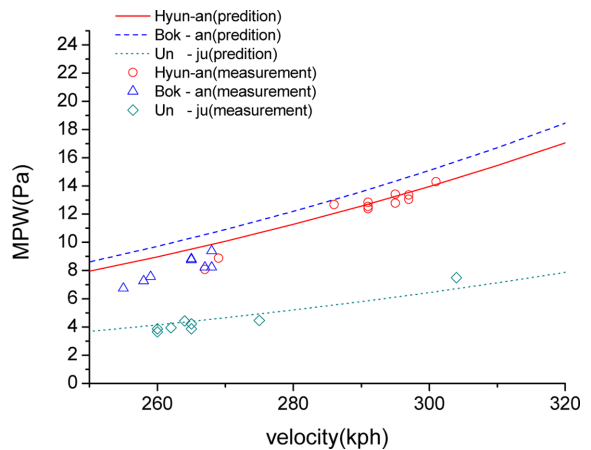


Fig. 7. Validation of micro-pressure wave estimation as a function of train velocity.

Table 4 Constant lists for atmosphere conditions and tunnel structure.

$c(m/s)$	$r(m)$	$A(m^2)$	$\rho(kg/m^3)$	$r(m)$	R
340	23	107.9	1.23	10.6	0.09

Table 5 Important factor mean values for micro-pressure wave prediction.

Tunnel	Ω_s	κ	α
Hyun-an	8.37	1.84	-0.00005
Bok-an	8.37	1.84	-0.00005
Un-ju	8.37	1.84	0.00017

값을 Table 5에 제시하였다.

앞서 계산된 계수들을 식 (1)~(3)에 적용하여 미기압파 예측값과 현장계측 값을 터널별로 구분하여 Fig. 7에 나타냈다. 285~300km/h 속도범위에서는 오차의 평균 약 3.7%로 계측값과 잘 일치하며, 운주터널의 경우도 평균 오차가 약 0.4%로 현장계측결과와 잘 일치한다. 하지만, 250~270km/h 범위에서 예측값이 다소 크게 나타나는데, 현 시험데이터로 그 원인을 분석하는데 한계가 있는 상황이다.

5. 결 론 및 향후 계획

본 연구에서는 경부고속선 터널의 미기압파 방출 특성을 분석하고, 길이 4km 이하 경부고속선 터널에 대한 미기압파 예측기법을 검토하였다. 이를 위하여 경부1단계/2단계 고속선 터널에 대한 터널내 압력과 및 출구미기압파를 동시에 계측하고 분석하였다. 경부고속선 터널에서 방출되는 미기압파는 길이 약 3.3km 이하인 슬라브궤도 터널에서 최고 약 14.3Pa 이며, 약 4km 이상의 자갈궤도터널에서는 최고 7.5Pa의 미기압파가 발생한다. 터널출구에서 방사된 미기압파는 거리에 반비례하여 감쇄하며, 출구로부터 100m 떨어진 지점에서는 약 0.5~1.5Pa 수준으로 감소한다. 그리고 미기압파 이론식을 이용하여 도출한 미기압파 곡선은 현장계측시험결과와 잘 일치하여, 미기압파 이론식을 이용하면 복잡한 전산해석이나 모형시험 없이도 매우 간단하고 신속하게 미기압파 크기를 예측할 수 있음을 확인하였다. 향후, 본 연구에 대한 보완시험과 매우 긴 터널에 대한 추가시험을 통해 미기압파 예측기법을 보다 향상시키면, 새로운 터널을 건설하거나 보다 더 빠른 고속열차를 개발할 때 신속하게 미기압파 크기를 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 미래철도기술개발사업 ‘430kph급 고속열차 시운전 시험연구’지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] S.W. Nam, H.B. Kwon, S.H. Yun (2012) Characteristics method analysis of wind pressure of train running in tunnel, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(5), pp. 436-441.
- [2] H.B. Kwon, S.W. Nam, J.H. Kwak (2009) Assessment of the pressure transient inside the passenger cabin of high-speed train using computational fluid dynamics, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(1), pp. 65-71.
- [3] J.M. Mok, K.Y. Choe, J. Yoo (1997) A study on tunnel entry design considering the booming noise resulting from micro-pressure wave, *Journal of KSNVE*, 7(6), pp. 959-966.
- [4] D.H. Kim, D.H. Min (2001) Experimental study on the slit cover hood for reducing the micro pressure waves in high-speed train-tunnel interfaces, *Transactions of KSME B*, 25(6), pp. 758-765.
- [5] 2year Report of 2nd Stage (2001) Aerodynamic design of high-speed railway tunnel and Development of tunnel hood for G7.
- [6] S.H. Yun, S.W. Nam, H.B. Kwon, S.S. Kim (2013) Investigation of micro-pressure emission from tunnel for high-speed train with field measurement, *Proceeding of KSR 2013 fall conference*, pp. 410-415.
- [7] T. Maeda, T. Matsumura, K. Tanemoto, H. Kajiyama (1990) Countermeasures against Micro-pressure waves radiated from tunnel exit under speed-up of shinkansen(in Japanese), RTRI Report 4(1) pp. 44-51.
- [8] S. Ozawa (1979) Studies of Micro-pressure wave Radiated from a Tunnel Exit, RTRI Report, No. 1121.
- [9] S. Ozawa, K. Murata, T. Maeda (1997) Effect of ballasted track on distortion of pressure wave in tunnel and emission of micro-pressure

wave, *Proceeding of the 9th International Conference of Aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels*, BHR GROUP CONFERENCE SERIES PUBLICATION 27, pp. 935-950.

- [10] T. Miyachi (2011) Theoretical model for micro-pressure wave emission considering the effect of topography around the tunnel portal, *QR of RTRI*, 52(2), pp. 117-122.

【 Received 15 July 2014; Revised 5 January 2015; Accepted 9 January 2015 】

Su-hwan Yun : shyun@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Korea

Seong-won Nam : swnam@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Korea

Seok-won Kim : swkim@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Korea