

고속주행시 철도터널내 공기압 특성에 관한 기초연구 - 미기압(MPW)을 중심으로

김효규^{1*} · 최판규² · 유지오³

¹정회원, ㈜주성지앤비 대표이사

²정회원, ㈜주성지앤비 CFD 사업부 팀장

³정회원, 신한대학교 자동차공학과 교수

A study on the characteristics for aerodynamics at high speed in railway tunnels - focused on the micro pressure wave

Hyo-Gyu Kim^{1*}, Pan-Gyu Choi², Ji-Oh Yoo³

¹CEO, JS G&B Inc.

²Team Manager, Div. of CFD Engineering, JS G&B Inc.

³Professor, Dept. of Automotive Engineering, Shin-Han University

ABSTRACT: When a train enters the tunnel at high speed, the pressure wave occurs. When this pressure wave reaches at the exit of tunnel, some are either emitted to the outside or reflected in tunnel by the form of expansion wave. The wave emitted to the outside forms the impulsive pressure wave. This wave is called 'Micro Pressure Wave'. The micro pressure wave generates noise and vibration around a exit portal of tunnel. When it becomes worse, it causes anxiety for residents and damage to windows. Thus, it requires a counterplan and prediction about the micro pressure wave for high speed railway construction. In this paper, the effects of train head nose and tunnel portal shape were investigated by model test, measurement for the micro pressure wave at the operating tunnel as well as numerical analysis for the gradient of pressure wave in the tunnel. As results, a method for predicting the intensity of the micro pressure wave is suggested and then the intensity of the micro pressure wave is analyzed by the tunnel length and the cross-sectional area.

Keywords: High-speed train, Railway tunnel, Pressure change, Micro pressure wave, Aerodynamics

초 록: 열차가 고속으로 터널을 진입할 때 압축파가 발생하게 된다. 이 압축파가 터널 출구부에 도달하면 일부는 외부로 방출되고 일부는 팽창파의 형태로 반사되어 터널내부로 전파된다. 이러한 파는 충격파의 형태로 외부로 방출되는데, 이를 미기압(micro pressure wave)이라고 한다. 미기압파는 터널 출구부에 소음 및 진동문제를 일으키며, 이 현상이 클수록 민가 및 주변 유리창에 손상과 거주자의 불안을 일으키는 원인이 된다. 따라서 고속철도 건설을 위해서는 미기압에 대한 대책과 이에 대한 예측이 필요한 실정이다. 이에 본 연구는 운영중인 터널에서의 미기압 측정사례와 터널내 압력기울기에 대한 수치해석을 통하여, 차량의 선두부 형상 및 터널 갱구부 형상에 따른 영향을 분석하였다. 그 결과로, 본 연구에서는 미기압파의 강도를 예측하는 방법을 제시하였으며, 이를 통해서 터널 연장과 단면적에 따른 미기압 강도를 해석하였다.

주요어: 고속열차, 철도터널, 압력변화, 미기압(MPW), 공기역학

1. 서 론

열차가 고속으로 터널에 진입하면 열차의 선두부에 서 압축파가 발생하여 음속으로 터널출구로 진행하게 된다. 터널출구에 도달한 압축파의 에너지는 일부는 외부로 방출되고, 나머지는 팽창파의 형태로 반사되

*Corresponding author: Hyo-Gyu, Kim
E-mail: hgkim@gnbeng.com

Received March 13, 2014; Revised March 21, 2014;

Accepted March 25, 2014

어 터널내부로 전파된다. 이때 외부로 방출되는 에너지파는 충격성 압축파를 형성하게 되는데 이를 미기압파(micro pressure wave)라 한다. 터널 출구부에서 발생하는 미기압파 현상은 기존터널을 고속화하는 일본의 신칸센 터널에서 주로 조사되었으며, 주변환경에 소음과 진동을 유발하여 심한 경우에는 건물의 유리창의 파손을 일으키는 등 환경문제를 야기하게 되고 주민의 정신적인 불안감을 유발하는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 미기압파의 세기는 터널출구에서 방사되는 압축파의 압력기울기에 비례하는 것으로 보고되고 있으나, 터널 출구부에서 압력기울기는 터널입구를 진입하는 열차에 의해 발생하는 압축파가 터널을 전파하면서 변형된 결과로서 나타나는 현상이다. 이러한 미기압파는 터널 입구부에서 발생하는 압축파의 기울기 및 세기에 영향을 미치는 열차의 진입속도 및 열차의 선두부 형상, 터널 단면적에 영향을 받으며, 또한 터널입구에서 발생한 압축파는 터널을 전파하면서 변형되기 때문에 터널궤도(벨러스트 또는 슬라브), 터널내 설치된 전력구 등 단면적의 변화나 압력완화를 위한 갱구부, 터널 출구부 형상 등에 영향을 받게 된다. 따라서, 미기압파에 대한 예측은 최근까지 국내에서는 적절하게 이루어지지 못하고 있는 실정이며, 터널출구에서 미기압파 발생을 예측하는 것은 매우 복잡하며 불확실한 요인을 포함하게 된다.

이에 본 연구에서는 ① 기존의 미기압파 해석방법

에 대해서 이론적 정립을 수행하였고, ② 실측결과 및 모형실험 결과에 의해서 수치해석을 위한 중요한 자료를 도출하였으며, ③ 이를 통해서 터널단면적에 따른 미기압파의 강도를 해석하고자 하였다.

2. 미기압파 이론

미기압파에 대한 계산을 위해서 터널진입에 의한 터널 입구부에서 압력기울기 및 압축파의 세기를 예측하고, 입구압축파가 터널을 전파하면서 변형되는 형상을 해석하여 터널 출구부에서 압력기울기를 계산하고 이를 이론식에 대입하여 미기압파의 세기를 구하게 된다. 본 연구에서는 터널출구에서 미기압파 계산방법을 다음과 같이 정리하고 계산방법에 따른 비교 연구를 수행하여 출구부에서의 미기압파 강도를 해석하고자 한다.

고속열차에 의해 터널입구 부근에서 형성되는 유동은 일반적으로 3차원 비정상 압축성 유동이나, 이를 Fig. 1과 같이 1차원 유동으로 모델화함으로써 유동특성이나 물리적 특성을 비교적 간단하게 이해할 수 있다. 일반적으로 공기압 계산을 위한 가정조건은 ① 압축파의 폭은 미소 진폭파이며 음속으로 전파한다. 그리고 ② 압축파면의 유동은 등엔트로피 1차원 유동으로 가정하며, ③ 열차가 진입하는 순간의 터널내압은 대기압이며 초기풍속은 0 m/s 이다(김희동, 1994).

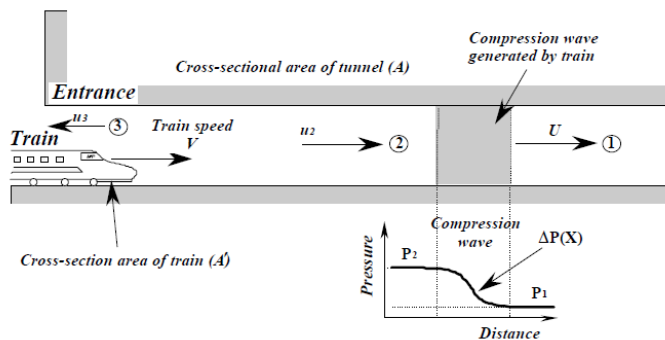


Fig. 1. One-dimensional flow model of compression wave

2.1 터널입구에서 생성되는 압축파의 강도 및 압력기울기

열차의 진입으로 인한 터널입구에서 압축파 강도는 일반적으로 식 (1) 및 (2)로 계산되며, 두 식간의 오차는 거의 없는 것으로 알려져 있다.

2.1.1 Pope's Equation

$$\Delta p_c = \frac{1}{2} \gamma p_1 M_t^2 \left[\frac{1 - \phi^2}{\phi^2 + (1 - \phi^2) M_t - \gamma M_t^2 (1 - \phi^2 / 2)} \right] \quad (1)$$

여기서, M_t : 열차속도(V)에 대한 마하수(mach number[-] ; V/α_1)
 V : 열차의 차속[m/s]
 α_1 : 음속[m/s]으로 Fig. 1의 상태 ①점, 즉 대기압 상태에서의 음속
 p_1 : 대기압(101.3[kPa])으로 Fig. 1의 상태 ①점, 즉 대기압 상태
 ϕ : $\phi = 1 - R$ 이며, R 은 폐색율(blockage ratio of train (=A'/A))
 γ : 공기의 비열비(specific heat ratio of air ; 1.4[-])
 이다(이하 동일 기호에 대한 설명은 생략한다).

2.1.2 Hara's Equation

$$\Delta p_c = \frac{1}{2} \rho V^2 \frac{1 - (1 - R)^2}{(1 - M_t) \{M_t + (1 - R)^2\}} \quad (2)$$

여기서, ρ : 공기의 밀도(1.2[kg/m³])
 R : 폐색율(blockage ratio of train (=A'/A))
 이다.

또한 열차의 주행속도 및 터널 단면적에 따른 터널 입구에서 압축파의 압력기울기는 식 (3)이 되며, 식 (3)에 식 (1), (2)를 대입하면 식 (4), (5)로 계산된다 (Wu, Chiu, 2003).

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} = \frac{V}{\pi k D} \Delta p_c \quad (3)$$

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\text{EN,max}} = \frac{1}{2} \gamma \frac{\alpha_1}{\pi k D} p_1 M_t^3 \left[\frac{1 - \phi^2}{\phi^2 + (1 - \phi^2) M_t - \gamma M_t^2 (1 - \phi^2 / 2)} \right] \quad (4)$$

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\text{EN,max}} = \frac{1}{2} \rho \frac{V^3}{\pi k D} \frac{1 - (1 - R)^2}{(1 - M_t) \{M_t + (1 - R)^2\}} \quad (5)$$

여기서, D : 터널의 대표직경(= $4 \times$ 터널단면적 / 둘레길이 = $4 \times A / \ell$ [m])
 k : 열차의 선두부 형상에 따른 경험상수(empirical constant)
 이다.

2.2 압축파의 전파 및 변형

터널입구에서 발생하는 압축파는 터널을 전파함에 따라 감쇄와 변형을 수반하게 되는데, 이는 기존연구에 의하면 압축파가 전파함에 따라 압력기울기가 점차로 급격하게 증대하는 비선형효과(nonlinear effect)와 압력기울기를 완만하게 하는 확산작용(dissipation effect)에 의해서 결정되는 것으로 보고되고 있다(김희동, 1994). 특히 압축파의 압력기울기는 터널출구에서 발생하는 미기압파에 직접적으로 영향을 미치므로 매우 중요하다.

2.2.1 압축파의 감쇄

일반적으로 터널입구에서 발생한 압축파는 터널을 전파함에 따라서 강도가 감소하는 것으로 보고되고 있으며, 터널벽면의 마찰계수에 영향을 받는다. Bannister 등(1948)에 의하면 x 지점에서 압력파(Δp_c)와 터널입구에서 압력파의 강도(Δp_c)_{EN}의 비를 식 (6)으로 제시하고 있다(Matsuo 외, 1991).

$$\xi = \frac{\Delta p_c}{(\Delta p_c)_{EN}} = \text{Exp}(-k \frac{x}{D}) = 1 / (1 + f \frac{U_i}{\alpha_1} \frac{x}{D}) \quad (6)$$

여기서, k : 감쇄계수(coefficient of attenuation)

x : 터널입구로부터 임의의 지점까지의 거리[m]

f : 관 내벽의 표면거칠기(surface roughness = $\lambda/4$)

U_i : 압축파에 의해 유도된 풍속[m/s](Fig. 1의 U_2 와 같음)

이다.

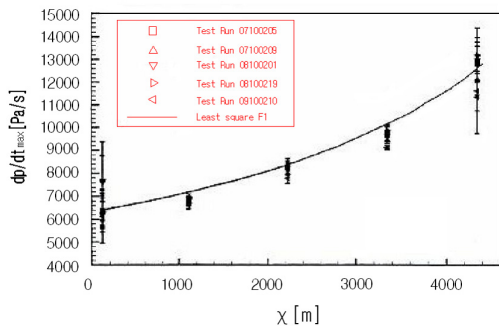
2.2.2 압력기울기

열차의 진입으로 발생한 압력파가 압축파의 형태로 터널을 전파하는 동안 압력기울기의 변동은 터널도상(슬라브, 밸러스트)에 영향을 크게 받는 것으로 보고되고 있으며(김희동, 1994), 이에 대한 연구는 실험적인 연구보다는 해석적인 방법의 연구가 많은 실정이다. 대표적인 실험적 연구로는 Herb 등(2003)이 독일의 Schulwald tunnel (length : 4,460 m, train Speed : 300 km/h, tunnel cross section area : 92 m², track condition : slab)에서 수행한 연구가 있다. 이 연구에 의하면 터널위치별 압축파의 압력기울기는 Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이 터널연장이 증가하면 증가하는 경향을 보이며, 이 경우 열차의 진입에 의한 초기압축

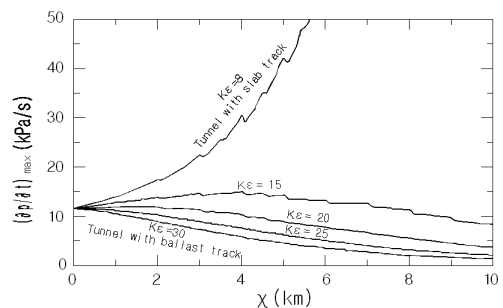
파의 압력기울기는 약 6.4 kPa/s 정도이나 터널 출구부(4,420 m)에서는 약 12 kPa/s 정도로 약 1.875배 정도 증가하는 것으로 나타나고 있다.

또한 일본의 신칸센 터널에서 Fukuda 등(2006)이 수행한 연구결과에 의하면 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 슬라브 궤도 터널에서는 압력기울기가 증가하고 있으며, 밸러스트 궤도 터널에서는 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이 외에 해석적인 연구로 김희동(1994)의 연구가 있으며, 이 논문에 의하면 열차의 주행속도가 270 km 이고 전형적인 슬라브 도상의 신칸센 터널을 열차가 통과할 때 거리에 따른 압력파의 압력기울기에 대한 연구결과에 의하면 5 km까지는 거리가 증가함에 따라서 압력파의 기울기가 증가하며, 5 km 이상에서는 그 증가 정도가 완만하게 되어 거의 변화가 없는 것으로 나타나고 있다.

이상의 압력기울기에 대한 연구결과에서 터널연장에 따른 압력기울기의 변화는 도상의 타입과 폐색율, 열차의 주행속도에 영향을 받는 초기압축파의 강도에 크게 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 즉, 열차의 주행속도가 동일할 지라도 폐색율이 변하여 압축파의 기울기가 변하면 터널연장에 따른 기울기의 변화특성에 상당히 큰 차이가 발생하게 된다. 따라서 미기압파에 영향을 미치는 터널출구부의 압력기울기를 평가하기 위해서 터널연장에 따른 압력기울기의 변화에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.



(a) by Herb (2003)



(b) by Fukuda (2006)

Fig. 2. Variation of pressure gradient $(dp/dt)_{max}$ of compression wave

2.3 터널출구에서 방출되는 미기압파

Fig. 3은 열차가 터널 진출입시 터널 양 갱구부로부터 방사되는 미기압파의 개요도를 나타내고 있으며, 전술한 바와 같이 터널 출구부에서 미기압파의 강도 ($\Delta p_{\text{pulse,max}}(r)$)는 터널출구부의 압력파의 압력기울기에 비례하며 식 (7)으로 표시된다.

$$\Delta p_{\text{pulse,max}}(r) = \frac{2A_t}{\Omega \alpha_1 r} \left(\frac{\partial \Delta p}{\partial t} \right)_{\text{exit}} \quad (7)$$

여기서, A_t : 터널단면적(tunnel cross sectional area, $[m^2]$)(Fig. 1의 A와 같음)
 r : 터널출구로부터 거리(distance, [m])
 Ω : 출구부의 지형형상에 따른 계수(solid angle[rad])
 이다.

식 (7)에서 Ω 는 터널출구의 형상에 영향을 받는 계수로 이에 대한 연구결과에 의하면 개구부 상부성토 또는 절토부분이 거의 없는 경우에는 2π 이며, 일본 신칸센 터널의 경우에는 2.3을 적용하고 있다(Ozawa, 1991).

반면에 터널출구에서 압축파형에 대해서 Ozawa (1979)는 신칸센 고속철도 라인으로부터 획득한 반경험식(semi-experimental formula)으로부터 식 (8)로 제시하고 있다.

$$\Delta p_{\text{comp}} = \Delta p^* \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{\pi}{L_w} \left(r + \frac{10}{3} D \right) \right\} \right] \quad (8)$$

여기서, Δp^* : 압력상승치(pressure rise, [Pa])
 L_w : 압축파의 길이(length of the compression wave, [m])
 이다.

터널출구부에서 최대압력 기울기는 식 (8)에서 식 (9)가 되며, 따라서 미기압파 계산식 (7)은 식 (10)이 된다.

$$\left(\frac{\partial \Delta p}{\partial t} \right)_{\text{comp,max}} = \Delta p^* \frac{\alpha_1}{L_w} \quad (9)$$

$$\Delta p_{\text{pulse,max}}(r) = \Delta p^* \frac{D^2}{4rL_w} \quad (10)$$

그러나, 식 (9)는 $L_w/D > 3.5$ 인 경우에는 실제 측정결과와 잘 일치하나 $L_w/D < 3.5$ 인 경우에는 개구단 보정(open-end-correction)이 필요하며, 이를 고려하는 경우 시간변화에 따른 미기압파의 강도는 식 (11)로 미기압파의 최대강도를 식 (12)로 제시하고 있다. 또한 $r = \alpha_1 t$ 의 관계가 있다.

$$\Delta p_{\text{pulse}} = \frac{D^2}{4r\alpha_1} \left(\frac{\Delta p_{\text{exit}}(t)}{2\Delta l/a_1} \right) \quad (11)$$

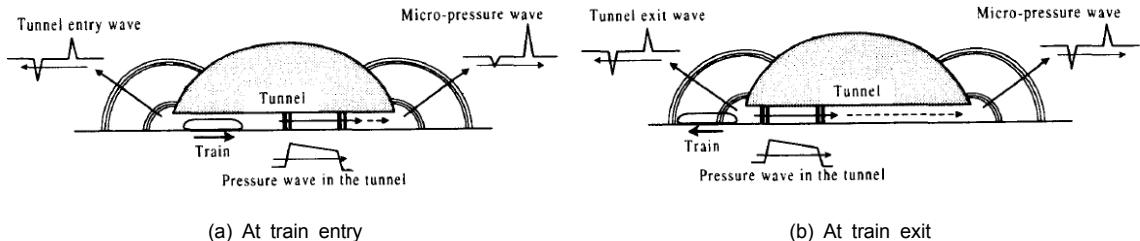


Fig. 3. Pressure waves radiated from tunnel portals

$$\Delta p_{\text{pulse,max}}(r) = \Delta p^* \frac{D^2}{4\pi r \Delta l} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{\pi \Delta l}{L_w} \right) \right\} \quad (12)$$

$$\Delta p_{\text{pulse,max}}(r) = \frac{D^2}{4r\alpha_1} \left(\frac{\Delta p_{\text{exit}}(t)}{2\Delta l/\alpha_1} \right) \quad (15)$$

여기서, 출구에서 압력파($\Delta p_{\text{exit}}(t)$)는 식 (13)으로 구한다.

$$\Delta p_{\text{exit}}(t) = [\Delta p_{\text{comp}}]_{x=0,t} - [\Delta p_{\text{comp}}]_{x=0,t-2\Delta l/\alpha_1} \quad (13)$$

또한, Vardy는 Ozawa에 의한 계산방법을 수정하여 출구부에서 압력파의 유효 압력기울기를 식 (14)로 정의한 미기압파의 강도를 식 (15)로 제시하고 있다.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{\text{eff}} = \frac{\Delta p_{\text{exit}}}{(2\Delta l/\alpha_1)} \quad (14)$$

여기서, Δl 은 개구단보정(open-end-correction) 계수로 갱구상부에 성토부분이 적은 경우, 0.3D, 성토부분이 크거나 수직인 경우에는 0.425D를 적용한다 (Vardy, 2008).

3. 미기압파 해석

3.1 미기압파 계산

본 연구에서는 미기압파의 계산은 ① 입구 압력기울기의 계산, ② 입구압축파의 터널전파에 따른 변형에 대한 해석 및 출구 압력기울기 계산, ③ 터널출구에

Table 1. Comparison of k factor

| Author | Paper | k factor |
|--------|---|----------|
| Ozawa | Countermeasures to reduce Micro pressure wave radiating from exits of shinkansen tunnels, 7th AVVT, 1991, pp. 253 | 0.35 |
| Matsuo | Entry compression wave generated by a high speed train entering a tunnel. AVVT 10th 1997, pp. 925 | 0.33 |
| Wu | Prediction of pressure wave generation by high speed train entering tunnel using a commercial CFD code - a simplified approach, 10th AVVT, 2000, pp.767 | 0.3 |
| Wu | Aerodynamic aspects of high-speed railway station with adjoining tunnels, 11th AVVT 11th, pp. 715 | 0.33 |

Table 2. Calculated result of k factor by measurement and model test

(a) by measurement (5th Wha-shin tunnel)

| Speed [km/h] | Measurement | Theoretical Analysis | | k factor |
|--------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------|
| | (dp/dt) _{max} [kPa/s] | dP _{center} [Pa] | (dp/dt) _{max} [kPa/s] | |
| 268.1 | 3.4107 | 724.2 | 4.2021 | 0.431 |
| 264.0 | 3.3445 | 701.5 | 4.0082 | 0.420 |
| 283.3 | 4.0360 | 811.8 | 4.9779 | 0.431 |
| 263.5 | 3.3426 | 698.7 | 3.9850 | 0.417 |
| 261.6 | 3.0924 | 688.4 | 3.8976 | 0.441 |

(b) by model test

| Type | Length [m] | Speed [km/h] | (dp/dt) _{max} [kPa/s] | k factor |
|--------------------------|------------|--------------|--------------------------------|----------|
| 45° Inclined Portal Type | 1000 | 275 | 4.527 | 0.426 |
| | | 300 | 5.805 | 0.434 |
| | | 325 | 7.954 | 0.406 |
| | | 350 | 9.454 | 0.4315 |
| | 750 | 275 | 4.470 | 0.4315 |
| | | 300 | 5.758 | 0.4375 |
| 325 | | 7.380 | 0.4375 | |
| Vertical Portal Type | 750 | 350 | 9.140 | 0.445 |
| | | 275 | 5.069 | 0.380 |
| | | 300 | 6.443 | 0.391 |
| | | 325 | 8.365 | 0.386 |
| | | 350 | 10.078 | 0.404 |

서 미기압과 계산의 단계를 거쳐 수행하였다.

3.1.1 입구 압력기울기

본 연구에서는 입구 압력기울기는 식 (5)를 적용하였으며, 이 식을 적용하기 위해서는 갱구형상 및 열차의 선두부 형상에 영향을 받는 k값에 대한 검토가 필요하다. k 값에 대한 연구 결과는 Table 1에 나타난 바와 같으며, 전형적인 신간선 터널에서는 0.3~0.35로 적용하고 있으나 본 연구에서는 국내 KTX 열차의 선두부 형상을 고려하기 위해서 모형실험과 현장측정을 수행하여 터널 입구부에서 압력기울기를 구하여 이를 적용하였다. Table 2는 현장측정결과와 모형실험 결과로부터 k값을 산정한 결과를 나타낸 것이다. (범창종합기술, 2007)

Table 2(a)는 화신5터널에서 측정한 측정결과를 통해 입구 압축파의 압력기울기를 이론적인 계산결과와 비교하여 k를 유추한 결과이며, 이 경우 k값은 주행속도에는 무관하게 0.417~0.441 범위에 있으며, 평균 0.428로 분석되었다. 또한 Table 2(b)는 모형실험 결과로부터 k값을 유추한 결과로 이 경우 45° 경사면을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우(면벽식)이 k값에 있어서 차이가 발생하고 있으며, k값은 45° 경사면을 설치한 경우에는 평균 0.4311이며, 면벽식의 경우에는 0.390로 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 평균하여 k값을 0.43으로 적용하였다.

3.1.2 터널 출구부 압력기울기

출구 압축파의 기울기의 예측을 위해서 압력파의 전파에 따른 터널내 압력해석을 Fluent를 이용하여 2D-axisymmetric unsteady, segregated, inviscid 모델에 의해서 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 입구 경계 조건으로 압축파의 파형이 필요한데 본 연구에서는 식 (16)으로 표현되는 Matsuo 등(1997)에 의해서 제시된 압축파에 대한 파형식을 적용하였다.

$$\Delta p = \Delta p_c \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{V \cdot t}{k \cdot D} \right) \right] \quad (16)$$

Fig. 4은 Fluent를 이용한 시뮬레이션 결과의 타당성을 검토하기 위해서 시뮬레이션 수행결과와 Schulwald 터널에서 압력기울기 측정결과 및 1-D 해석결과를 비교하여 나타내 것이다. 그림에서 시뮬레이션 결과가 실측결과와 1-D 해석결과보다 다소 높게 나타나고 있으나 평균편차는 6.1%정도로 압력파의 전파에 따른 압력기울기를 예측하기 위한 수단으로 CFD 시뮬레이션 적용해도 공학적인 오차가 크지 않을 것으로 평가된다.

본 연구에서는 주행속도를 300 km/h, 350 km/h로 하고 연장이 8 km의 터널에 대해서 압축파의 전파특성을 시뮬레이션 하였으며, 해석결과는 각각 Fig. 5에 나타난 바와 같다.

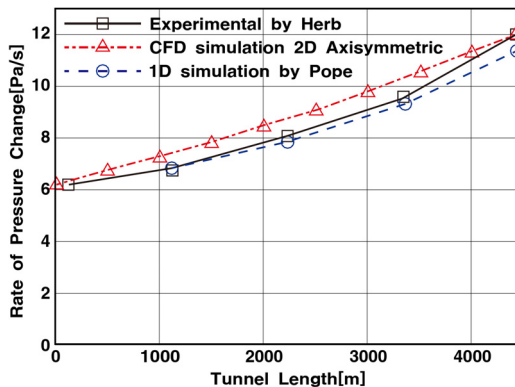


Fig. 4. Comparison of pressure gradient $(dp/dt)_{max}$ by tunnel length

Fig. 5(a)는 주행속도가 300 km/h인 경우로, 터널입구의 압축파의 압력기울기에 대한 압축파의 압력기울기 비를 나타낸 것이다. 그림에서 압력파가 출구로 전파함에 따라 압력기울기가 증가하고 있으며, 증가기울기는 단면적이 감소할수록 급격해지는 것으로 나타나고 있으며, 단면적이 95.1 m²이고 터널연장이 8 km인 경우에는 압력기울기는 터널입구 압축파의 압력기울기 보다 약 3.6배정도 증가하는 것으로 나타나고 있어 터널연장에 따라서 출구부 압력기울기의 증가가 비교적 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 주행속도가 350 km/h인 경우로 동일지점에서 압력기울기는 단면적이 작을수록 증대하며, 주행속도가 300 km/h인 경우보다 증대하는 것으로 나타나고 있다. 이 경우 압력기울기의 증가는 약 7,000 m지점에서부터 감소하고 있으며, 그림에 나타난 바와 같이 포물선식으로 표현하여 보간하여 적용하였다.

3.1.3 터널 출구부 미기압파의 강도

터널 출구에서 미기압파의 강도는 세가지 방법, Method 1(식 (7) 적용), Method 2(식 (12) 적용), Method 3(식 (15) 적용)을 적용하여 계산하였다. 터널 출구에서 미기압파의 강도에 대한 계산식 (7)에서 Ω 는 전술한 바와 같이 갱구부의 형상에 영향을 받는 계수로 본 연구에서는 향후 건설되는 호남선의 갱구형상과 동일할 것으로 예상되는 화신5터널에서의 현장측정결과를 분석하여 구하였으며, 분석결과를 Table 3에 나타냈다. 분석결과에 Ω 는 5.5~6.18정도의 범위에 있으며, 본 과업에서는 이를 평균하여 5.936 (1.89 π)로 미기압파 강도 계산에 적용하였다. 또한 식 (12), 식 (15)에 압축파의 진폭(L_w)은 식 (17)로 구하였다.

$$L_w = \frac{\Delta p^*}{(dp/dt)_{Exit, Entrance}} \quad (17)$$

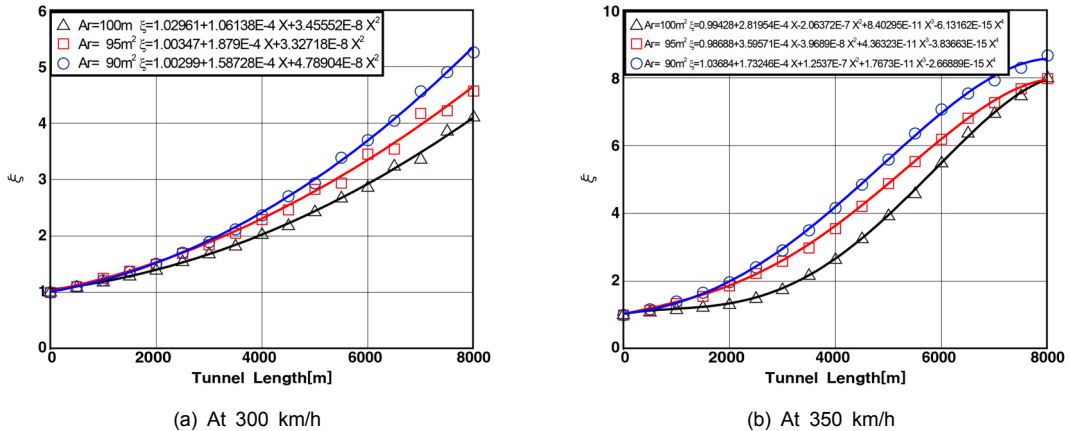


Fig. 5. Comparison of the pressure gradient ratio of compression wave by cross-section area

Table 3. Calculated result of Omega by measurement (5th Wha-Shin tunnel)

| Train Speed [km/h] | Measurement | | Ω factor |
|--------------------|--------------------------|----------|-----------------|
| | $(dp/dt)_{exit}$ [kPa/s] | MPW [Pa] | |
| 268.1 | 2.353 | 11.946 | 6.075 |
| 264.0 | 2.231 | 11.225 | 6.130 |
| 283.3 | 2.821 | 14.072 | 6.182 |
| 263.5 | 2.217 | 11.893 | 5.747 |
| 261.6 | 1.974 | 10.974 | 5.546 |

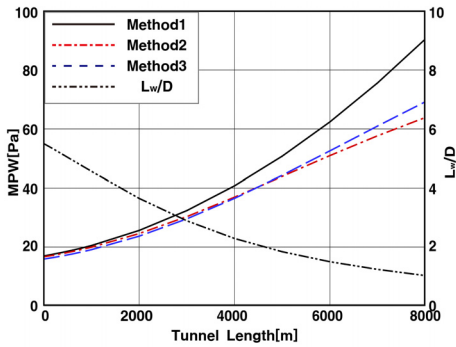
3.2 미기압과 해석결과

3.2.1 미기압 해석조건

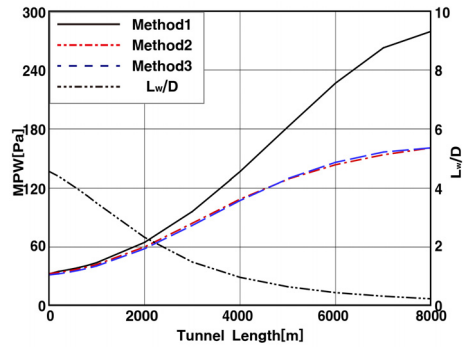
미기압파에 대한 해석은 터널단면적 90.3, 95.1, 100.1 m², 터널연장 : 200~8,000 m에 대해서 수행하였으며, 이를 해석조건을 정리하면 Table 4에 나타낸 바와 같다.

3.2.2 미기압과 강도 해석결과

본 연구에는 터널개구 경사벽이 끝나는 지점에서부터 20 m 이격한 지점을 기준으로 하여 미기압파의 강도를 해석하였다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 각각 주행속도가 300, 350 km/h이고 터널 단면적이 90 m²인 경우에 해석방법에 따른 미기압파 강도에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 Method 1, 2, 3은

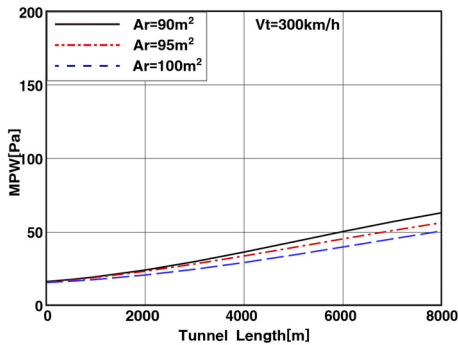


(a) At 300 km/h

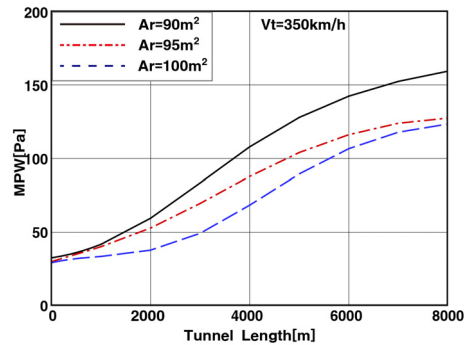


(b) At 350 km/h

Fig. 6. Comparison of MPW by calculation method (Ar=90 m²)



(a) At 300 km/h



(b) At 350 km/h

Fig. 7. Comparison of MPW by cross-sectional area (Ar=90~100 m²)

Table 4. Parameters of calculation

| Parameters | | Calculation ranges |
|------------|----------------------|----------------------------------|
| Tunnel | Length | 200~8,000 m |
| | Cross-sectional Area | 90.3, 95.1, 100.1 m ² |
| Train | Running Type | One side |
| | Train Speed | 300, 350 km/h |
| | Train Area | 9.765 m ² |

각각 식 (7), (12), (15)를 적용한 결과이다.

Fig. 6(a)는 주행속도가 300 km/h인 경우로 그림에서 알 수 있는 바와 같이 미기압파의 강도는 터널연장이 증가하면 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이는 본 해석대상의 터널이 슬라브도상의 터널로 연장이 증가할수록 비선형효과에 의해서 Fig. 4에 나타난 바와 같이 압축파의 기울기가 증가하기 때문이다. 또한 그림에서 Method 1과 Method 2에 의한 해석결과가 터널연장이 증가할수록 편차가 증가하는 것으로 나타나고 있는데 이는 터널연장이 증가할수록 압축파의 압력기울기의 증가로 인해 압축파의 폭(L_w)이 감소하게 되어 L_w/D 가 감소하게 되기 때문이다. 이와 같은 경향은 Ozawa의 연구결과에서 제시된 바와 같이 $L_w/D < 3.5$ 이하가 되는 터널연장이 3,000 m이상의 범위에서 오차가 증가하는 것으로 설명될 수 있다. 그림에서 Method 2와 Method 3에 의한 결과는 미기압파 강도는 터널연장이 6,000 m 이상에서는 약간의 편차가 있으나 평균편차는 약 4% 정도로 거의 일치하는 것으로 평가된다.

Fig. 6(b)는 주행속도가 350 km/h이고 터널단면적이 90 m²인 경우에, 미기압파 계산강도 및 L_w/D 를 나타낸 것으로 터널연장이 증가하면 미기압파의 강도가 증가하나 터널연장이 6,000 m 이상이 되면 증가율이 감소하는데 이는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 출구압축파의 압력기울기의 증가가 둔화되기 때문이다. 또한 주행속도가 300 km/h인 경우와 마찬가지로 터널연장이 2,000 m 이상 증가하여 $L_w/D < 2.0$ 보다 감소하는 경우에는 Method 1과 Method 2는 편차가 상당히 크게 나타나고 있으며, 계산방법 2와 3은 편차가 거의 없는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 7은 Method 2는 식 (7)을 적용한 경우로 터널연장에 따른 터널 단면적별 미기압파 강도를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 열차의 주행속도가 300 km/h인 경우로 터널연장이 동일한 경우에 단면적이 감소하면 터널입구의 압축파의 압력기울기가 증가하고 또한 비선형효과가 증가하기 때문에 출구압력기울기가 증

가하여 미기압파의 강도가 증가하며, 일반적으로 알려진 20 Pa 을 미기압파의 기준으로 하는 경우, 단면적이 90 m²인 경우에는 1008.7 m, 95 m²인 경우에는 1112.9 m, 100 m²인 경우에는 1616.4 m 정도에서 기준을 초과하는 것으로 나타나고 있다. Fig. 7(b)는 열차의 주행속도가 350 km/h인 경우로 이 경우에도 터널단면적이 감소하면 미기압파의 강도가 증가하며, 터널의 길이가 아주 짧은 경우에도 미기압파의 강도가 30 Pa을 초과하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 열차의 주행속도를 350 km/h로 하는 경우에는 미기압파 저감 대책이 요구되는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 고속열차가 터널내를 주행할 경우, 터널 출구부에서 발생하는 미기압파의 강도를 예측하기 위해서 모형실험과 현장측정결과를 통해서 열차 선두부 및 터널개구 형상에 따른 영향을 반영하기 위한 계수와 터널 출구부에서 출구부 형상의 영향을 반영하기 위한 계수를 현장측정결과에 의해서 검토하였다. 또한 터널연장에 따른 압축파의 기울기에 대한 검토를 수치해석적인 방법으로 수행하였다. 검토결과를 반영하여 터널연장 및 터널단면적에 따른 미기압파 강도를 이론적으로 구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 터널입구에서 압력기울기를 예측하기 위해서 Ozawa에 의해서 제시된 식 (3)을 적용하였으며, 터널입구형상 및 열차의 선두부 형상에 영향을 받는 k값을 현장실험 및 모형실험에 통해서 구하였으며, 전형적인 KTX 터널과 같이 45° 경사를 갖는 경우에는 k값이 0.43을 나타냈다.
2. 터널 출구부 압축파 계산식의 출구형상을 반영하는 Ω 는 기존의 2π 보다는 작은 5.936(1.89 π)으로 나타났다.
3. 터널연장에 따른 비선형 효과에 의한 압력기울기

의 변화를 해석적인 방법으로 해석한 결과, 본 연구 대상인 슬라브 터널에서는 터널연장이 증가하면 압력기울기가 증가하는 것으로 나타났다.

4. 터널출구에서 미기압과의 강도는 터널단면적이 감소하면 증가하며, 슬라브도상 터널에서는 압력 기울기의 증가로 인해서 터널연장이 증가하면 미기압과의 강도가 증가하는 것으로 나타났다.
5. 열차의 주행속도를 300 km/h로 하는 경우에는 단면적에 따라서 차이가 있으나 터널연장이 약 1,000 ~ 2,000 m 이상인 경우에는 미기압과 저감대책이 요구되며, 주행속도가 350 km/h인 경우에는 단터널의 경우에도 미기압과의 강도가 30 Pa을 초과할 것으로 예상되며, 따라서 미기압과 저감대책의 수립이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술 연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Bannister, Mucklow. (1948), "Wave action following sudden release of compressed gas from a cylinder", Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 159, No. 42, p. 269.
2. Pope, C.W. (1975), "Transient pressures in tunnels - a formula predicting the strength of the entry wave produced by trains with streamlined and unstreamlined noses", British Railways Research and Development Division Tech. Memo. Aero 12.
3. Ozawa, S. (1979), "Studies of micro-pressure wave radiated from a tunnel exit", Railway Technical Research Report of Japanese National Railways, No. 1121, pp. 1-92.
4. Matsuo, K., Aoki, T., Kashimura, H., Kawaguchi, M., Takeuchi, N. (1991), "Attenuation of compression waves in a high-speed railway tunnel simulator", 7th international Symposium on AVVT, pp. 239-252.
5. Ozawa, S., Maeda, T., Matsumura, T., Uchida, K., Kajiyama, H., Tanemoto, K. (1991), "Countermeasures to reduce micro-pressure waves radiating from exits of shikansen tunnels", 11th international Symposium on AVVT, pp. 253-266.
6. Matsuo, K., Aoki, T., Kashimura, H. (1994), "Generation mechanism of impulsive wave emitted from high-speed railway tunnel exit", 8th international Symposium on AVVT, pp. 199-209.
7. Matsuo, K., Aoki, T., Mashimo, S., Nakatsu, E. (1997), "Entry compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel", 9th international Symposium on AVVT, pp. 925-934.
8. Wu, D. (2000), "Prediction of pressure wave generation by high-speed train entering tunnel using a commercial CFD code - a simplified approach", 10th international Symposium on AVVT, pp. 767-777.
9. Ozawa, S., Murata, K. (2000), "A pressure wave emitted from openings of tunnel wall", 10th international Symposium on AVVT, pp. 757-765.
10. Wu, D., Chiu, T. (2003), "Aerodynamic aspects of a high-speed railway station with adjoining tunnels", 11th international Symposium on AVVT, pp. 715-725.
11. Ozawa, S. (2003), "Countermeasures for reducing micro-pressure wave at the stage of propagation of the compression wave through a tunnel", 11th international Symposium on AVVT, pp. 389-402.
12. Herb, J., Deeg, P., Tielkes, T. (2003), "Assessment of possible sonic boom effects in German high-speed railway tunnels - experimental and numerical data for the wave steepening process", 11th international Symposium on AVVT, pp. 775-782.
13. Fukuda, T., Miyachi, T., Iida, M. (2006), "Propagation of compression wave in a long slab-tracked tunnel and ballast-tracked tunnel", 12th international Symposium on AVVT, pp. 777-788.
14. Vardy, A.E. (2008), "Generation and alleviation

- of sonic booms from rail tunnels, proc. of the institution of civil engineers”, Engineering and Computational Mechanics, pp. 107-119.
15. Kim, H.D. (1994), “Wave phenomenon in high-speed railway tunnel”, Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 34, No. 10, pp. 796-807.
16. Bumchang, Eng. (2007), Basic design of high-speed railway construction project in Ho-nam line - verification report based on the tunnel cross-section, pp. 86-87.