

고속철도터널의 미기압파 해석에 관한 기초적 연구

(The study of impulsive wave emitted form high speed railway tunnel exit)

유 지 오(신홍대학 건축설비과), 조 형 제, 김 중 원(범창종합기술)

1. 서 론

열차가 고속으로 터널에 진입하면 열차의 선두부에서 압축파가 발생하여 음속으로 터널출구로 진행하게 된다. 터널출구에 도달한 압축파의 에너지는 일부는 외부로 방출되고, 나머지는 팽창파의 형태로 반사되어 터널내부로 전파된다. 이때 외부로 방출되는 에너지파는 충격성 압축파를 형성하게 되는데 이를 미기압파(Micro Pressure wave)라 한다.

터널출구부에서 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 터널입구 진입하는 열차에 의해 발생하는 압축파가 터널 전파하면서 변형된 결과로서 나타나는 현상이다. 따라서 미기압파는 터널입구부에서 발생하는 압축파의 기울기 및 세기에 영향을 미치는 열차의 진입속도 및 열차의 선두부 형상, 터널단면적에 영향을 받으며, 또한 입구에서 발생한 압축파는 터널을 전파하면서 변형되기 때문에 터널궤도(밸러스트 또는 슬라브 터널), 터널내 설치된 전력구등 단면적의 변화나 압력완화를 위한 갱구, 터널 출구부 형상 등에 영향을 받게 된다.

따라서, 미기압파에 대한 예측은 최근까지 국내에서는 적절하게 이루어지지고 못하고 있는 것이 국내의 실정이며, 터널출구에서 미기압파 발생을 예측하는 것은 매우 복잡하며, 불확실한 요인을 포함하게 된다. 이에 본 연구에서는 기존의 미기압파 해석 방법에 대해서 정리하고 실측결과 및 모형실험결과에 의해서 해석을 위한 중요인자를 도출하여 터널단면적에 따른 미기압파의 강도를 해석하고자 한다.

2. 미기압파 이론

미기압파에 대한 계산을 위해서 터널진입에 의한 터널입구부에서 압력기울기 및 압축파의 세기를 예측하고, 입구압축파가 터널을 전파하면서 변형되는 현상을 해석하여 터널출구부에서 압력기울기를 계산하고 이를 이론식에 대입하여 미기압파의 세기를 구하게 된다.

본 연구에서는 터널출구에서 미기압파 계산 방법을 다음과 같이 정리하고 계산방법에 따른 비교를 수행하여 출구부에서의 미기압파 강도를 해석하고자 한다.

2.1 터널입구 압출파의 세기 및 압력기울기

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

(a) Pope's Equation

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

(b) Hara's Equation

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

또한 열차의 주행속도 및 터널단면적에 따른 터널입구에서 압축파의 압력기울기는 식(3)이 되며, 식(3)에 식(1), (2)를 대입하면 식(4),(5)로 계산된다. [Ozawa, Hara]

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

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{EN_{\max}} = \frac{1}{2} \gamma \frac{a_1}{\pi k D} \rho_1 M_t^3 \left[\frac{1 - \phi^2}{\phi^2 + (1 - \phi^2)M_t - \gamma M_t^2 (1 - \phi^2/2)} \right] \quad (4)$$

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

여기서, M_t : 열차속도에 대한 마하수 (Mach Number ; U_t/a_1)

a_1 : 음속 (sonic velocity)

$\phi = 1 - R$ 이며, R 은 폐색율(blockage ratio of train $\approx A_2/A_1$)

k : 열차의 선두부 형상에 따른 경험상수 (empirical constant)

γ : 비열비(Specific heat ratio of air ; 1.4)

이다.

2.2 입구압력파의 전파 및 변형

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

(가) 압축파의 감쇄

일반적으로 터널입구에서 발생한 압축파는 터널을 전파함에 따라서 강도가 감소하는 것으로 보고되고 있으며, 터널벽면의 마찰계수에 영향을 받으며, Bannister에 의하면 x 지점에서 압력파(Δp_c)와 터널입구에서 압력파의 강도 (Δp_c)_{Ent}의 비를 식(6)으로 제시하고 있다.

$$\frac{\Delta p_c}{(\Delta p_c)_{Ent}} = \text{Exp}\left(-k \frac{x}{D}\right) \quad (6)$$

(나) 압력기울기

열차의 진입으로 발생한 압력파가 터널을 전파하는 동안 압력기울기의 변동은 터널도상(슬라브, 벨러스트)에 영향을 크게 받는 것으로 보고되고 있으며, 이에 대한 연구는 실험적인 연구보다는 해석적인 방법의 연구가 많은 실정이다.

대표적인 실험적 연구로는 J Herb가 독일의 Schulwald Tunnel(Length : 4460 m, Train Speed : 300 km/h, Tunnel Cross section Area : 92m², Track condition : Slab)에서 수행한 연구가 있다.

이 연구에 의하면 터널위치별 압축파의 압력기울기는 그림 1에 나타낸 바와 같이 터널연장이 증가하면 증가하는 경향을 보이며, 이 경우, 열차의 진입에 의한 초기압축파의 압력기울기는 약 6.4 kPa/s정도이나 터널 출구부(4,420 m)에서는 약 12 kPa/s정도로 약 1.875배 정도 증가하는 것으로 나타나고 있다.

또한 일본의 신칸센 터널에서 T Fukuda 등이 수행한 연구결과에 의하면 그림 2에 나타낸 바와 같이 슬라브 궤도 터널에서는 압력기울기가 증가하고 있으며, 벨러스트 궤도 터널에서는 감소하는 것으로 나타나고 있다.

이 외에 해석적인 연구로 김희동의 연구가 있으며, 이 논문에 의하면 열차의 주행속도가 270 km이고 전형적인 슬라브 도상의 신칸센 터널을 열차가 통과할 때 거리에 따른 압력파의 압력기울기에 대한 연구결과에 의하면 5 km까지는 거리가 증가함에 따라서 압력파의 기울기가 증가하며, 5 km이상에서는 그 증가 정도가 완만하게 되어 거의 변화가 없는 것으로 나타나고 있다.

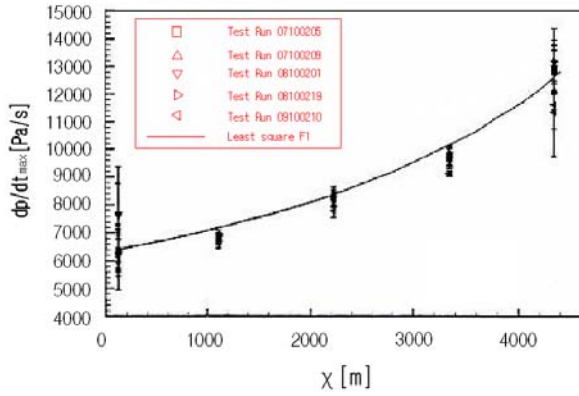


그림 1 터널연장에 따른 압축파의 압력기울기(by Herb)

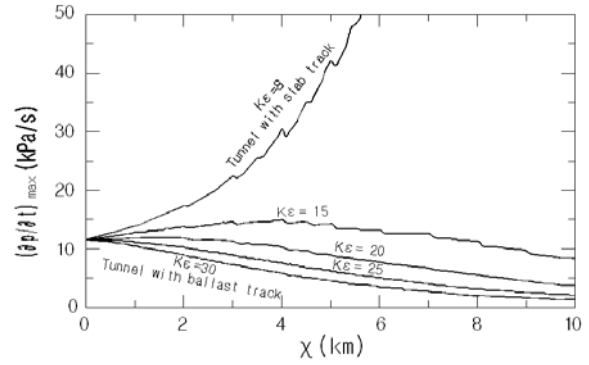


그림 3 터널연장에 따른 압력기울기의 변화(T Fukuda, AVVT 12th)

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 터널연장 따른 압력기울기의 변화에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

2.3 터널출구에서 발생하는 미기압파

전술한 바와 같이 터널 출구부에서 미기압파의 강도($\Delta p_{\text{pulse,max}}(r)$)는 터널출구부의 압력파의 압력기울기에 비례하며, 식(7)로 표시된다.

$$\Delta p_{\text{pulse,max}}(r) = \frac{2A_t}{\Omega a_1 r} \left(\frac{\partial \Delta p}{\partial t} \right)_{\text{exit}} \quad (7)$$

여기서, A_t : 터널단면적(tunnel cross sectional area)
 r : 터널출구로부터 거리(distance)
 Ω : 터널출구형상에 따른 계수

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 신간선의 경우에는 2.3을 적용하고 있다.

반면에 터널출구에서 압축파형에 대해서 Ozawa는 식(8)로 제시하고 있다.

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

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

$$\left(\frac{\partial \Delta p}{\partial t} \right)_{\text{comp,max}} = \frac{\Delta p^* a_1}{L_w} \quad (9)$$

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

그러나, 식(9)는 $L/D > 3.5$ 인 경우에는 실제 측정결과와 잘 일치하나 $L/D < 3.5$ 인 경우에는 open-end-correction이 필요하며, 이를 고려하는 경우, 시간변화에 따른 미기압파의 강도는 식(11)로 미기압파의 최대강도를 식(12)로 제시하고 있다.

$$\Delta p_{\text{pulse}} = \frac{D^2}{4ra_1} \left(\frac{\Delta p_{\text{exit}}(t)}{2\Delta l/a_1} \right) \quad (11)$$

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

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

$$\Delta p_{\text{exit}}(t) = [\Delta p_{\text{comp}}]_{x=0,t} - [\Delta p_{\text{comp}}]_{x=0,t-2\Delta l/a_1} \quad (13)$$

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

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{\text{eff}} = \frac{\Delta p_{\text{exit}}}{(2\Delta l/a_1)} \quad (14)$$

$$\Delta p_{\text{pulse,max}}(r) = \frac{D^2}{4ra_1} \left(\frac{\Delta p_{\text{exit}}(t)}{2\Delta l/a_1} \right) \quad (15)$$

여기서, Δl 은 개구단 보정계수로 갱구상부에 성토부분이 적은 경우, 0.3D, 성토부분이 크거나 수직인 경우에는 0.425D를 적용한다.

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 터널출구에서 미기압파 계산의 단계를 거쳐 수행하였다.

3.1.1 입구압력기울기

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 표 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.

표 1은 현장측정결과와 모형실험 결과로부터 k값을 산정한 결과를 나타낸 것이다. 표 2(a)는 화신5터널에서 측정된 측정결과를 통해 입구 압축파의 압력기울기를 이론적인 계산결과와 비교하여 k를 유추한 결과이며, 이 경우 k값은 주행속도에는 무관하게 0.417~0.441범위에 있으며, 평균 0.428로 분석되었다. 또한 표 2(b)는 모형실험결과로부터 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 터널출구부 압력기울기

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

표 1 k 값에 대한 연구 결과

연구자	논문	k
S. Ozawa	Countermeasures to reduce Micro pressure wave radiating from exits of shinkansen tunnels, AVVT 7th, 1991, pp.253	0.35
K Matsuo	Entry compression wave generated by a high speed train entering a tunnel. AVVT 10th 1997, pp. 925	0.33(신간선에 대한 실험결과 잘 일치하며, 0.3보다 0.33의 적용을 권장)
D Wu	Prediction of pressure wave generation by high speed train entering tunnel using a commercial CFD code- a simplified approach, AVVT 10th, 2000, pp.767-	0.3
D Wu	Aerodynamic aspects of high-speed railway station with adjoining tunnels, AVVT 11th 2003, pp.715-	0.33

$$\Delta p = \Delta p_c \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{Vt}{kD} \right) \right] \quad (16)$$

표 2(a) 현장측정결과를 이용한 k값 분석(화신5터널)

주행속도 [km/h]	측정결과	Theory		k factor
	입구 압력기울기 [kPa/s]	입구압력 [Pa]	입구압력기울기 [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

표 2(b) 모형실험에 의한 k값 계산결과

출구형식	터널길이 [m]	열차속도 [km/h]	터널입구 압축과의 압력 기울기 [Pa/s]	k factor
45도 경사형	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
		350	9.140	0.445
면벽식	750	275	5.069	0.380
		300	6.443	0.391
		325	8.365	0.386
		350	10.078	0.404

그림 3은 Fluent를 이용한 시뮬레이션 결과의 타당성을 검토하기 위해서 시뮬레이션 수행결과와 Schulwald 터널에서 압력기울기 측정결과 및 Pope의 1D 해석결과를 비교하여 나타내 것이다.

그림에서 시뮬레이션 결과가 실험결과와 1D 해석결과보다 다소 높게 나타나고 있으나 평균편차는 6.1% 정도로 압력과의 전파에 따른 압력기울기를 예측하기 위한 수단으로 CFD시뮬레이션 적용해도 공학적인 오차가 크지 않을 것으로 평가된다.

이에 본 연구에서는 주행속도를 300 km/h, 350km/h로 하고 연장이 8 km의 터널에 대해서 압축과의 전파특성을 시뮬레이션 하였으며, 해석결과는 각각 그림 4 및 그림 5에 나타낸 바와 같다.

그림 4은 주행속도가 300 km/h인 경우로, 터널입구의 압축과의 압력기울기에 대한 압축과의 압력기울기 비를 나타낸 것이다. 그림에서 압력파가 출구로 전파함에 따라 압력기울기가 증가하고 있으며, 증가 기울기는 단면적이 감소할수록 급격해지는 것으로 나타나고 있으며, 단면적이 95.1 m²이고 터널연장이 8 km인 경우에는 압력기울기는 터널입구 압축과의 압력기울기 보다 약 3.6배정도 증가하는 것으로 나타나고 있어 터널연장에 따라서 출구부 압력기울기의 증가가 비교적 큰 것을 알 수 있다.

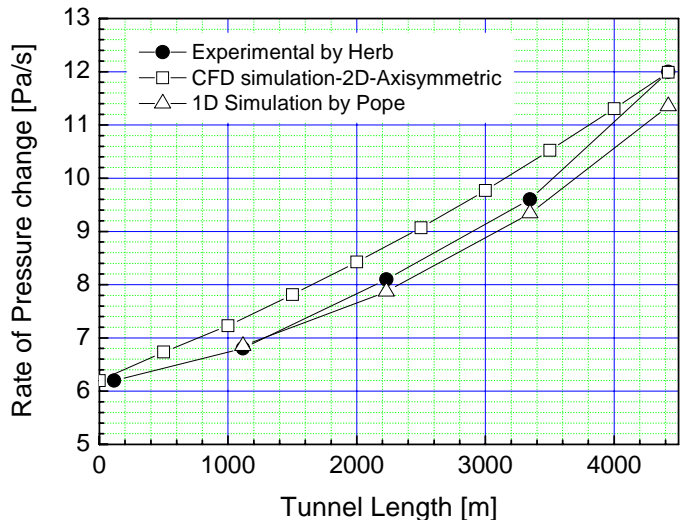


그림 3 터널연장에 따른 압력기울기 비교

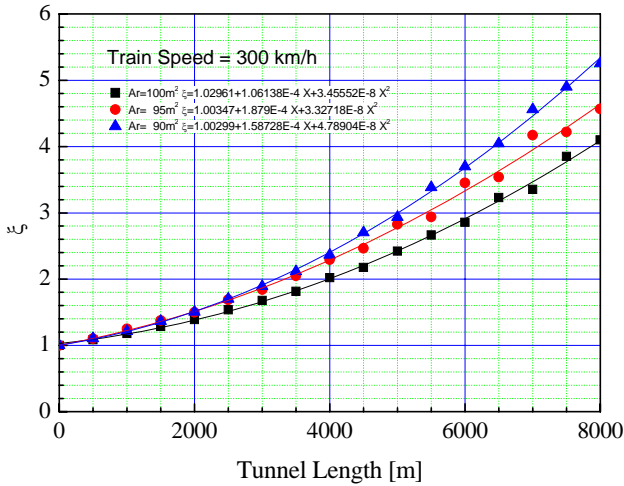


그림 4 압력과의 전파에 따른 압력기울기특성
(주행속도 350 km/h)

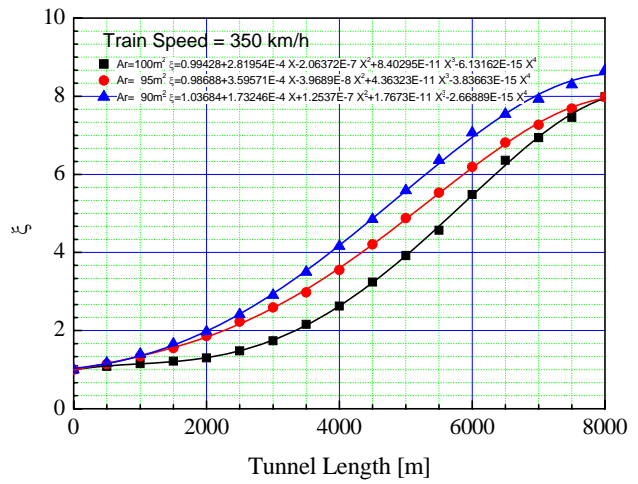


그림 5 압력과의 전파에 따른 압력기울기특성
(주행속도 300 km/h)

그림 5는 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 나타낸 바와 같이 4차원 포물선식으로 표현하여 보간하여 적용하였다.

3.1.3 터널 출구부 미기압과의 강도

터널 출구에서 미기압과의 강도는 세가지 방법, 식(7), 식(12), 식(15)를 적용하여 계산하였다.

터널 출구에서 미기압과의 강도에 대한 계산식(7)에서 Ω는 전술한 바와 같이 갱구부의 형상에 영향을 받는 계수로 본 연구에서는 향후, 건설되는 호남선의 갱구형상과 동일할 것으로 예상되는 화신5터널에서의 현장측정결과를 분석하여 구하였으며, 분석결과는 표 3에 나타났다. 분석결과에 Ω는 5.5~6.18 정도의 범위에 있으며, 본 과업에서는 이를 평균하여 5.936(1.89π)로 미기압과 강도 계산에 적용하였다. 또한 식(12), 식(15)에 압축파의 진폭(L_w)은 식(16)으로 구하였다.

$$L_w = \frac{p^*}{(dp/dt)_{Exit, Entrance}} \quad (16)$$

3.2 미기압과 해석결과

3.2.1 미기압 해석조건

미기압과에 대한 해석은 터널단면적 90.3, 95.1, 100.1 m², 터널연장 : 200~8000 m에 대해서 수행하였으며, 이를 해석조건을 정리하면 표 4에 나타낸 바와 같다.

표 3 현장측정결과 분석 (화신5터널)

주행속도 [km/h]	측정결과		Ω
	출구 기울기 [kPa/s]	미기압 [Pa]	
268.1	2.353	11.946	6.075
264.0	2.231	11.225	6.130
283.3	2.8212	14.072	6.182
263.5	2.217	11.893	5.747
261.6	1.974	10.974	5.546

표 4 미기압 해석조건

구분		해석조건
터널 제원	연장	200~8000 m
	단면적	90.3, 95.1, 100.1 m ²
열차 제원	운행방식	미교행
	주행속도	300, 350 km/h
	열차단면적	9.765 m ²

3.2.3 미기압파 강도 해석결과

본 연구에는 터널갱구 경사벽이 끝나는 지점에서부터 20 m이격된 지점을 기준으로 하여 미기압파의 강도를 해석하였다.

그림 6(a)와 그림 6(b)는 각각 주행속도가 300, 350 km/h이고 터널 단면적이 90m²인 경우에 해석방법에 따른 미기압파 강도에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 Method 1, 2, 3은 각각 식(7), (12), (15)를 적용한 결과이다.

그림 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 그림 4에 나타난 바와 같이 압축파의 기울기가 증가하기 때문이다. 또한 그림에서 Meodth 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 m이상에서는 약간의 편차가 있으나 평균편차는 약 4%정도로 거의 일치하는 것으로 평가된다.

그림 6(b)는 주행속도가 350 km/h이고 터널단면적이 90m²인 경우에, 미기압파 계산강도 및 L_w/D 를 나타낸 것으로 터널연장이 증가하면 미기압파의 강도가 증가하나 터널연장이 6000 m이상이되면 증가율이 감소하는데 이는 그림 5에 나타난 바와 같이 출구압축파의 압력기울기의 증가가 둔화되기 때문이다. 또한 주행속도가 300 km/h인 경우와 마찬가지로 터널연장이 2,000 m이상 증가하여 $L_w/D > 2.0$ 보다 증가하는 경우에는 Mehtod 1과 Method 2는 편차가 상당히 크게 나타나고 있으며, 계산방법 2와 3은 편차가 거의 없는 것으로 나타나고 있다.

그림 7은 Method 2(식(7)적용)한 경우로 터널연장에 따른 터널 단면적별 미기압파 강도를 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 열차의 주행속도가 300 km/h인 경우로 터널연장이 동일한 경우에 단면적이 감소하면 터널입구의 압축파의 압력기울기가 증가하고 또한 비선형효과가 증가하기 때문에 출구압력기울기가 증가하여 미기압파의 강도가 증가하며, 일반적으로 알려진 20Pa을 미기압파의 기준으로 하는 경우, 단면적이 90m²인 경우에는 1008.7m, 95m²인 경우에는 1112.9 m, 100m²인 경우에는 1616.4 m정도에서 기준을 초과하는 것으로 나타나고 있다.

그림 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 저감대책이 요구되는 것으로 판단된다.

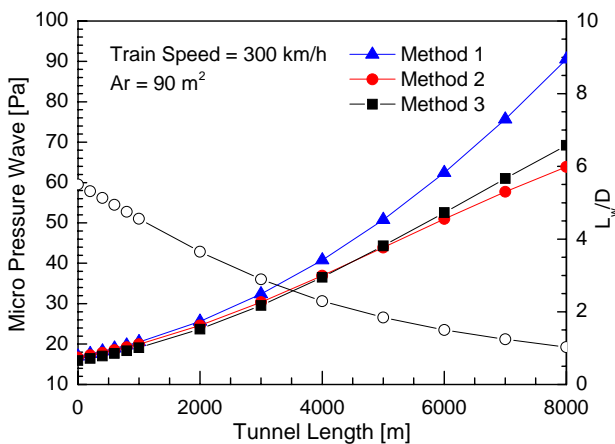


그림 6(a) 계산방법에 따른 미기압파 강도 비교(주행속도 300 km/h)

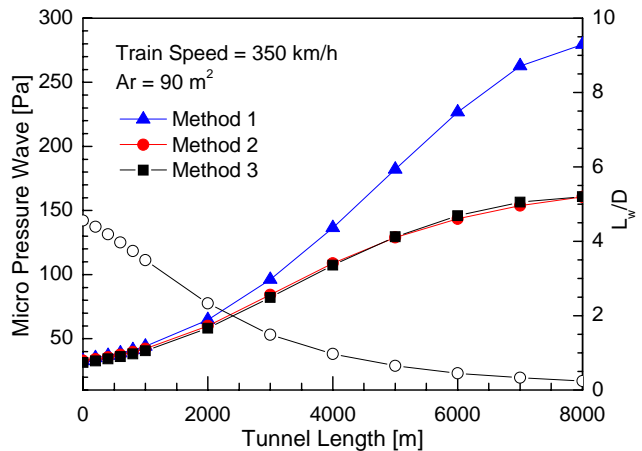


그림 6(b) 계산방법에 따른 미기압파 강도 비교(주행속도 350 km/h)

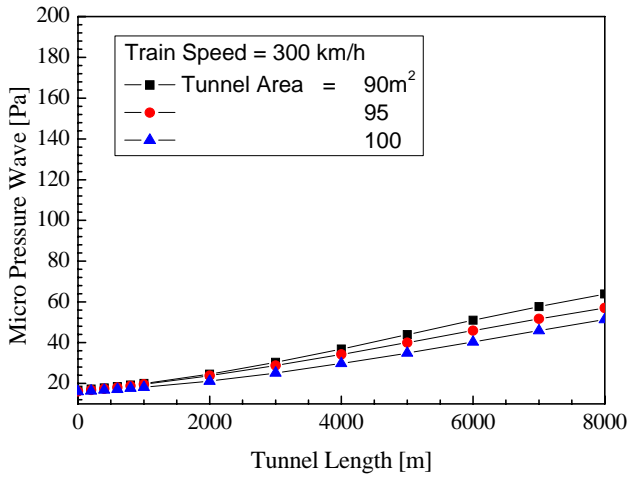


그림 7(a) 단면적변화에 따른 미기압과 강도 비교(주행속도 300 km/h)

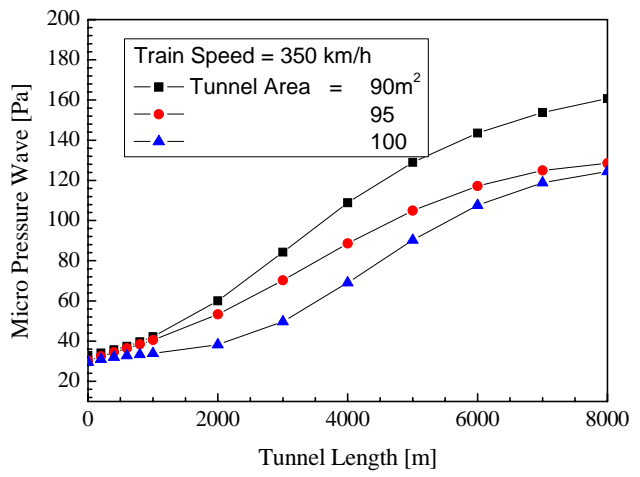


그림 7(b) 단면적변화에 따른 미기압과 강도 비교(주행속도 350 km/h)

4. 결론

본 연구에서는 고속열차터널의 출구부에서 발생하는 미기압파의 강도를 예측하기 위해서 모형실험과 현장측정결과를 통해서 열차선두부 및 터널개구형상에 따른 영향을 반영하기 위한 계수와 터널출구부에서 출구부 형상의 영향을 반영하기 위한 계수를 현장측정결과에 의해서 검토하였으며, 또한 터널연장에 따른 압축파의 기울기에 대한 검토를 수치해석적인 방법으로 수행하였으며, 검토결과를 반영하여 터널연장 및 터널단면적에 따른 미기압과 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 k 값을 현장실험 및 모형실험에 통해서 구하였으며, 전형적인 KTX터널과 같이 45°경사를 갖는 경우에는 k 값이 0.43을 나타냈다.
- (2) 터널출구부 압축파 계산식의 출구형상을 반영하는 Ω 는 기존의 2π 보다는 작은 5.936(1.89 π)으로 나타났다.
- (3) 터널연장에 따른 비선형 효과에 의한 압력기울기의 변화를 해석적인 방법으로 해석한 결과, 본 연구 대상인 슬라브 터널에서는 터널연장이 증가하면 압력기울기가 증가하는 것으로 나타났다.
- (4) 터널출구에서 미기압파의 강도는 터널단면적이 감소하면 증가하며, 슬라브도상 터널에서는 압력기울기의 증가로 인해서 터널연장이 증가하면 미기압파의 강도가 증가하는 것으로 나타났다.
- (5) 열차의 주행속도를 300 km/h로 하는 경우에는 단면적에 따라서 차이가 있으나 터널연장이 약 1000~2000 m이상인 경우에는 미기압과 저감대책이 요구되며, 주행속도가 350 km/h인 경우에는 단터널의 경우에도 미기압파의 강도가 30 Pa을 초과할 것으로 예상되며, 따라서 미기압과 저감대책의 수립이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. S Ozawa, 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
2. K MATSUO, T AOKI, S MASHIMO, E NAKATSU, 1997, "Entry compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel", 9th international Symposium on AVVT, pp 925-934
3. S OZAWA, K MURATA, 2000, "A pressure wave emitted from openings of tunnel wall", 10th international Symposium on AVVT, pp 757-765
4. 김희동, 중앙선(덕소-양수) 복선전철 건설공사 터널내 공기역학적 영향검토
5. 김희동, 1994, 고속철도 터널에서 발생하는 유체역학적 파동현상