

고속열차의 터널진입 압축파 예측에 관한 경험식 연구

A study on the empirical formula of tunnel compression wave generated by a high-speed train

김동현*†, 서용철**

Dong-Hyeon Kim *†, Yong-Cheol Seo **

Abstract When a high-speed train enters a tunnel, pressure rise occur due to air compressed as a piston effect in the tunnel and a compression wave generated with the effect is propagated to the tunnel exit as nearly the speed of sound. This compression wave will be distorted and attenuated by heat transfer and viscous effect in tunnel. The compression wave generated by train entry in tunnel have been predicted by using the method of one-dimensional inviscid analysis but its magnitude is lower than results of the field test conducted by various trains, entry speeds and cross-sectional areas of tunnels. This study suggests empirical formula predicting the compression wave by applying the viscous effect of turbulent boundary layer on the train surface when the train enters the tunnel. The empirical formula presented in this study is validated from full scaled field-test for various conditions of train nose shapes, cross-sectional areas of the tunnels and train entering speeds from low speed to high speed.

Keywords : Tunnel, Field test, Compression wave, Aerodynamics, High-speed railway

초 록 고속열차가 터널에 진입할 때 피스톤 효과에 의하여 터널내부의 공기는 압축되어 압력상승이 발생하는데 이 압력상승으로 생성된 압축파는 음속으로 터널출구 방향으로 진행한다. 이 압축파는 터널내부에서 열전달과 점성작용에 의하여 변형되거나 감쇠될 것이다. 터널입구에서 생성되는 압축파의 크기는 그 동안 1차원적인 비점성 해석해 방법으로 예측하였으며, 다양한 열차의 진입속도와 터널내공단면적에서 실제 철도현장의 터널 주행 실험 결과보다 매우 낮게 예측한다. 이에 본 연구의 압축파 경험식은 터널 진입 시에 열차 표면의 난류 경계층 두께에 의한 점성효과를 반영하여, 압축파의 크기를 타당하게 예측하는 터널진입 압축파 경험식을 제안한다. 본 연구에서는 다양한 열차/터널단면적의 폐색율 조건과 저속에서 고속까지의 터널진입속도에 대하여 실물 스케일의 철도현장 터널주행 실험을 수행하여 열차 진입속도의 함수로 통합된 경험식을 도출하였다.

주요어 : 터널, 현장실험, 압축파, 공기역학, 고속철도

1. 서 론

열차가 고속으로 터널에 진입할 때 압축파가 발생되어 터널출구 방향으로 음속의 속도로 전파된다. 터널 출구에 도달한 압축파의 일부는 충격성 소음/진동의 형태로 터널 출구로 부터 외부로 방사되는데 이를 미기압파(Micro-pressure wave)라고 부르며, 심한 경우에는 주변

*† 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 초고속공기역학연구단(dhkim@krri.re.kr)

** 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 초고속공기역학연구단(syc17532@krri.re.kr)

민가에 폭발음과 저주파진동을 일으킨다. 또한 터널 출구에서 반사되는 압력파는 다시 팽창파로 입구쪽으로 전달되고, 압축파와 팽창파로 인하여 반복되는 압력변동은 터널을 통과하는 열차와 수 차례 만나게 된다. 이 때문에 터널 내부의 승객은 이명감(ear-discomfort) 현상을 느끼게 된다[1]. 이러한 압력변동은 열차가 터널을 통과한 이후에 곧바로 사라지는 것이 아니라 지속적으로 반복되어 진행되다가 점차 감쇠되어 사라진다. 본 연구에서는 이러한 터널 내부의 공기역학적 특성을 예측하기 위하여, 현장실측을 통한 실험 데이터를 토대로 기존에 사용되는 진입 압축파의 압력상승 예측식을 개선하여 비교 분석하였다.

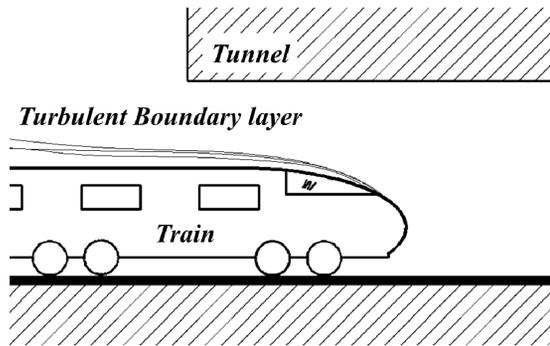


Fig. 1 turbulent boundary layer generated on the train surface

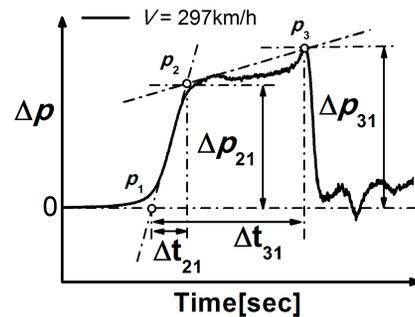


Fig. 2 First pressure wave by train entry in a tunnel

2. 본론

2.1 현장실험

본 연구에서는 터널 내부의 진입 압축파를 측정하기 위하여 2003년도에 호남선의 백양-노령역 사이에 위치한 노령 1, 2터널과 경부고속철도의 오송역 남쪽 끝에 위치한 상봉2터널에서 현장실험을 수행하였다. 여기서 노령 2터널의 길이는 노령 1터널에 비해 비교적 길고, 터널 단면적은 작다. 또한 300km/h 고속철도의 상봉2터널은 터널 단면적이 노령 1,

Table 1 Specification for tunnels

Tunnels	Length	Cross sectional area	Track spacing
Noryeong 1	590m	63.5m ²	4.3m
Noryeong 2	2,300m	61.3m ²	4.3m
Sangbong 2	720m	107m ²	5.0m

2터널에 비해 매우 큰 것이 특징이다. 각 터널에 대한 세부 제원은 table. 1에 정리하였다.

현장실험에 적용한 열차의 종류는 총 4종으로, 노령 1, 2터널의 경우는 무궁화 호와 새마을 호(Fig. 3 (a), (b)) 열차를 대상으로 하였고, 상봉 2터널에 진입하는 고속열차는 KTX, G7

열차(Fig. 3 (c), (d))를 적용하였다. 노령 1, 2터널에 운행중인 무궁화 호와 새마을 호는 비교적 저속이며, 무궁화 호는 열차의 전두부가 뭉뚝하고, 이에 비해 새마을 호는 유선형으로 설계되어있다. 상봉 2터널에 적용한 KTX와 G7 고속열차는 노령 1, 2터널에 운행중인 열차에 비해 고속으로 운행하기 때문에 공기저항을 줄이기 위하여 새마을 호보다 전두부가 더 긴 유선형으로 설계되어 있다.

터널내부 공기압력을 측정하는 방법은 두 가지로 나눌 수 있는데, 압력센서를 터널 벽면에 설치하거나, 혹은 열차표면에 부착하는 방법이다. 본 연구에서는 Fig 4와 Table 3에서와 같이

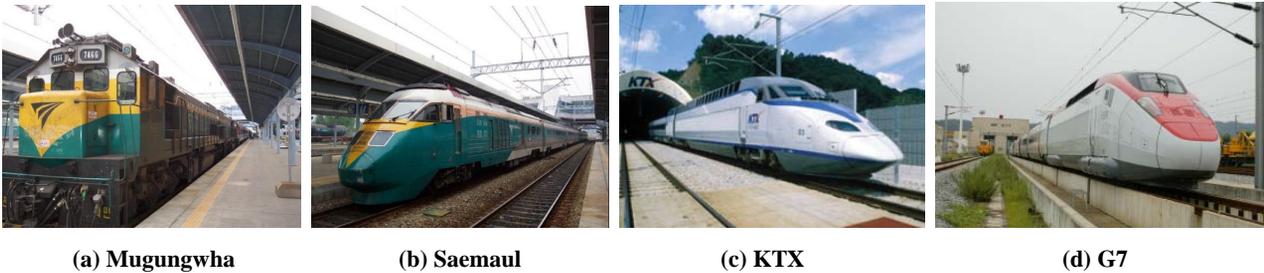


Fig. 3 Trains studied for the aerodynamic field tests in tunnels

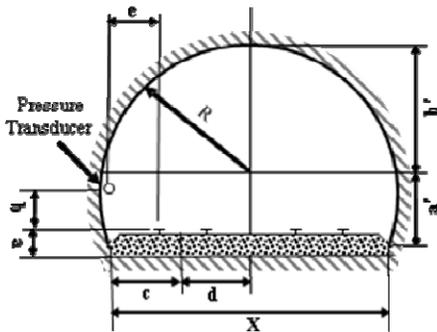


Fig. 4 Measurement points in tunnels

Table 3 Specification for measurement point of tunnels (unit : m)

Tunnels	a	b	c	d	e	a'	b'	X	R
Noryeong 1	0.68	1.5	2.15	2.15	1.4	2.8	4.9	8.6	4.9
Noryeong 2	0.68	1.5	2.03	2.15	1.28	3.0	4.7	8.35	4.7
Sangbong 2	0.67	1.0	4.18	2.5	2.78	2.0	7.1	13.4	7.1

터널입구로부터 100m와 200m 위치에 압력센서를 장착하여 압력과의 압력변동을 측정하였다[2]. 압력센서의 높이를 임의로 정한 것은 터널 내부의 압력과 특성이 터널길이에 따라 변하는 1차원 현상으로 가정할 수 있기 때문이다. 압력 측정장비는 미세압력센서인 ENDEVCO 8510B-1과 8510B-2를 이용하였다. 이 센서들은 측정된 압력과 기준압의 차압을 통해 측정하도록 되어있다. 측정범위는 각각 $\pm 1\text{psig}$, $\pm 2\text{psig}$ 이고, 측정 오차범위는 $\pm 1.5\%$ 이다.

2.2 현장실험 조건

현장실험에서 각 터널들의 실험 당일 주변 환경조건들을 측정하였다. Table. 4는 각 터널들의 실험당일 온도, 습도, 대기압을 측정한 후 평균값으로 정리하였다. Table. 5와 Table 6은 현장 열차주행실험에서 측정한 열차속도와 측정한 환경조건으로 계산된 밀도, 음속과 열차/터널 폐색율(blockage ratio)을 정리하였다[2].

Table. 4 Ambient conditions in the tunnel

Tunnel	Temperature (°C)	Relative Humidity (%)	Atmospheric Pressure (kPa)
Noryeong 1	30	63	101.6
Noryeong 2	29	68	101.3
Sangbong 2	20.9	82.3	101.0

Table. 5 Speeds and specifications of trains passing through the Noryeong 1 and 2 Tunnels

No.	Nose Shape	Train Length	Passage Speed	Density, ρ	Sound speed, C	Blockage Ratio, β
NR1-1	streamlined	192m	118km/h	1.1648	350m/s	0.157
NR1-2	very blunt	192m	98km/h	1.1648	350m/s	0.184
NR1-3	very blunt	170m	114km/h	1.1648	350m/s	0.184
NR1-4	very blunt	206m	113km/h	1.1648	350m/s	0.184
NR2-1	very blunt	170m	81km/h	1.1648	349.4m/s	0.19
NR2-2	very blunt	279m	96km/h	1.1648	349.4m/s	0.19
NR2-3	very blunt	170m	79km/h	1.1648	349.4m/s	0.19
NR2-4	very blunt	192m	83km/h	1.1648	349.4m/s	0.19
NR2-5	streamlined	189m	83km/h	1.1648	349.4m/s	0.163
NR2-6	streamlined	189m	98km/h	1.1648	349.4m/s	0.163

Table. 6 Speeds and specifications of trains passing through the Sangbong 2 Tunnel

No	Nose Shape	Train Length	Passage Speed	Density, ρ	Sound speed, C	Blockage Ratio, β
G7-1	well-streamlined	131m	154km/h	1.2	344.7m/s	0.09
G7-2	well-streamlined	131m	153km/h	1.2	344.7m/s	0.09
G7-3	well-streamlined	131m	89km/h	1.2	344.7m/s	0.09
KTX-1	well-streamlined	388m	297km/h	1.2	344.7m/s	0.091
KTX-2	well-streamlined	388m	298km/h	1.2	344.7m/s	0.091
KTX-3	well-streamlined	388m	300km/h	1.2	344.7m/s	0.091
KTX-4	well-streamlined	388m	298km/h	1.2	344.7m/s	0.091
KTX-5	well-streamlined	388m	148km/h	1.2	344.7m/s	0.091

2.3 비점성의 터널 진입 압축파

열차가 터널입구에 진입할 때 발생하는 압축파는 열차의 전두부 형상, 터널 진입속도, 그리고 열차와 터널의 단면적비 즉, 폐색율에 의존하는 것으로 알려져 있으며, Fig. 2에서 터널내부의 압력상승 Δp_{21} 는 다음과 같이 표현할 수 있다[3].

$$\Delta p_{21} = \frac{1}{2} \rho V_t^2 \frac{1 - (1 - \beta)^2}{(1 - V_t/C)[V_t/C + (1 - \beta)^2]} \quad (1)$$

여기서 V_t : 열차속도[m/s], β : 터널 단면적에 대한 열차 단면적의 비, C : 음속, ρ : 공기의 밀도이다. 열차가 터널 돌입 시에 상기 식(1)에 의한 첫 번째 압력상승(진입 압축파)은 비점성 압력상승 값이며, 본 연구의 철도 현장시험에 의한 실험데이터와의 비교에서 Fig. 4에서와 같이 상당한 오차를 보인다.

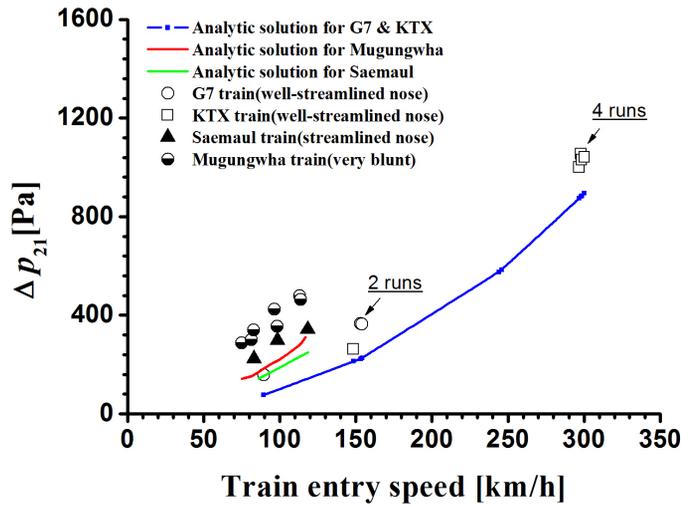


Fig. 4 Prediction of Δp_{21} using the equation (1)

2.4 열차 표면 난류경계층을 고려한 터널 진입 압축파

비점성에 의한 터널진입 1차 압력상승은 Fig. 2에서 Δp_{21} 에 해당되고, 열차표면 공기마찰에 의한 2차 압력상승은 Δp_{32} 에 해당된다. 즉, 2차 압력상승 Δp_{32} 는 차량표면에 형성되는 난류경계층 두께의 영향으로 볼 수 있다.

고속주행의 철도차량 표면에 형성되는 공기마찰에 의한 경계층 두께가 터널진입 시에 진입 압축파의 압력상승 Δp_{32} 에 영향을 미치므로 즉, 경계층 두께에 의하여 차량 단면적이 증가한 것과 같은 효과가 터널 진입 시의 압력상승에 작용한다고 생각할 수 있다. 따라서 High Reynolds 수 유동에서 차량의 난류 경계층 두께 δ_{train} 는 난류 경계층 1/7승 법칙에 따라 식 (2)와 같이 공기유속 U 와 반비례 관계를 갖는다[4,5].

$$\left(\frac{U}{U}\right)_{turb} \approx \left(\frac{y}{\delta_{train}}\right)^{1/7}, \quad \delta_{train} \approx \frac{L}{\text{Re}_L^{1/7}} \quad (2)$$

여기서 L 은 차량의 길이이다. 본 연구에서는 난류 경계층 두께를 차량 주변의 공기 유동속도 대신에 차량의 터널진입속도 V_t 의 함수로 표현하여 폐색률 β 값을 보정하여 다음과 같은 경험식 (3)과 (4)를 얻었다.

$$\beta = \frac{A_{train}}{A_{tunnel}}, \quad \eta = \beta \cdot \left(\frac{\lambda_m}{V_t^{1/7}} \right) \quad (3)$$

여기서, 본 연구의 기존철도와 고속철도 현장실험에서 λ_m 은 2.87, V_t : 열차속도[m/s]이다.

$$\Delta p_{31} = \frac{1}{2} \rho V_t^2 \frac{1 - (1 - \eta)^2}{(1 - V_t/C)[V_t/C + (1 - \eta)^2]} \quad (4)$$

상기 식 (3), (4)의 효과는 차량 단면적 증가효과를 가져오고 Fig. 5와 같이 현장실험데이터와 잘 일치하는 결과를 도출한다. 특히 유선형 열차에 대한 현장실험 데이터와 본 연구의 경험식 비교에서 매우 좋은 일치를 보인다. 무궁화호 열차는 뾰족한 전두부 형상과 불규칙한 표면형상에 의하여 난류 경계층의 두께가 훨씬 더 두꺼워진다고 분석할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 경험식 (4)는 High Reynolds 수 유동영역의 저속에서 난류 경계층이 두꺼워지고, 고속에서 난류경계층이 얇아진다.

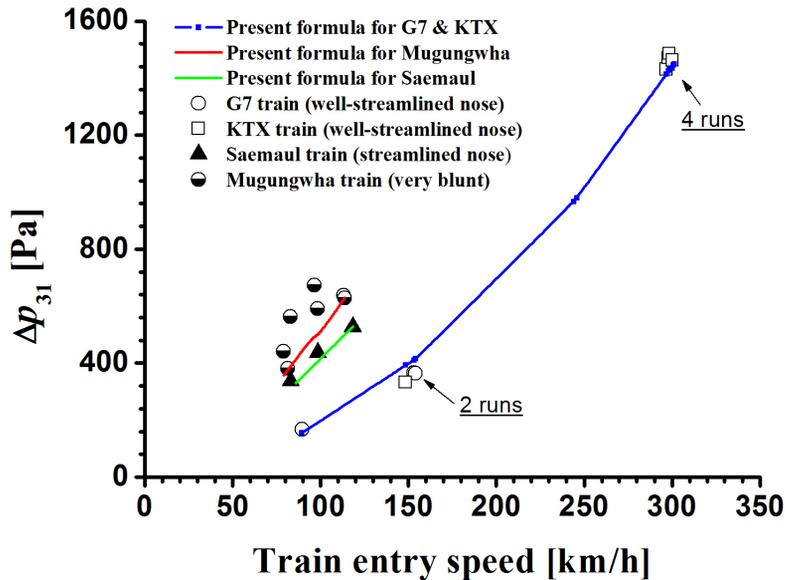


Fig. 5 Prediction of Δp_{31} using the equation (4)

3. 결 론

본 연구에서는 다양한 열차/터널단면적의 폐색율 조건과 저속에서 고속까지의 터널 진입 속도에 대하여 실물 스케일의 철도현장 터널주행실험을 수행하여 터널 진입 압축파의 크기를 예측할 수 있는 경험식을 도출하였다. 본 연구의 압축파 경험식은 터널 진입 시에 열차 표면의 난류 경계층 두께에 의한 점성효과가 반영되어, 압축파의 크기를 매우 타당하게 예측할 수 있다.

후 기

연구는 2013년도 한국철도기술연구원의 주요사업인 철도 친환경 향상기술개발사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 관계자에게 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] T. Fukuda, (1999) Study on Compression Wave Propagating through High-Speed Railway Tunnels, RTRI Research Report Special NO. 28, Railway Technical Research Institute, Japan National Railways, Japan.
- [2] D. H. Kim, & H. B. Kwon (2006) Field tests on the Pressure Transients in Train-Tunnel Interfaces on the Korean Railway, In *Proceedings of the 12th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Slovenia*.
- [3] T. Hara, (1960) Aerodynamic problems when train is running into tunnel with large velocity, Railway Technical Research Report (in Japanese), 153, September, 1-20
- [4] F. M. White, (2011) Fluid Mechanics, McGraw-Hill, New York.
- [5] H. Schlichting, (1968) Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, New York.