

# 편측 주행을 고려한 고속철도 터널의 후드 형상에 대한 연구

## A Study of Tunnel Entrance Hood Shape of High-Speed Train with Side Running Effect

곽민호\*      구요천\*      윤수환\*      노주현\*      이동호 †  
Kwak, Min-Ho    Ku, Yo-Cheon    Yun, Su-Hwan    Rho, Joo-Hyun    Lee, Dong-Ho

### ABSTRACT

When a train enters into the tunnel with high speed, a compression wave generated inside the tunnel has been studied as a one-dimensional phenomenon. However, one-dimensional approach can't analyze 3-dimensional flow effect in the vicinity of the train body. In this research, so as to overcome this weak point, a prediction method of the wavefront of a compression wave using steady state solution has been used for the parametric study considering 3-dimensional effects of the interactions between trains and tunnels. The effective hood shapes were deduced in both cases of the train's entry into the tunnel on the single track and on a side of the double track. As a result, in case of the train's entry on a side of the double track, the increase of compression wave value propagated to the tunnel inside have appeared compared with the train's entry on the single track. Also, a horizontally convex elliptic hood shape is more effective at the train's entry on a side of the double track for the purpose of a decrease of wavefront gradient of a compression wave.

### 1. 서 론

열차가 고속으로 터널에 진입하는 경우 급격한 단면적 변화에 의한 압축파가 발생하며, 이 압축파는 터널 내부로 전파되면서 승객의 승차감을 저하시키거나 터널 출구에서의 미기압파로 인한 소음문제를 야기시키게 된다. 이러한 압축파의 크기는 열차와 터널의 단면적 비, 열차의 터널 진입 속도, 열차 전두부의 형상과 터널 입구의 형상에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다.[1] 그림 1은 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음의 발생과정을 보여준다.

터널 입구에서 발생하는 압축파는 터널 내부로 전파되면서 비선형적 특성으로 인해 압축파 파두의 기울기가 급격해지게 된다.[2] 따라서 그 현상이 1차원적 특성을 나타내며 그 동안에 많은 연구들이 1차원 현상이라는 가정 하에 이루어져 왔다. 하지만 길이가 짧은 터널의 경우 기울기가 충분히 급격해지지 못하거나 자갈 도상의 경우에는 기울기가 오히려 완만해지기 때문에 더 이상 1차원 현상으로 볼 수 없게 된다.[1,2]

† 책임저자 : 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 교수, 항공우주  
신기술연구소

E-mail : donghlee@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7399 FAX : (02)882-7927

\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

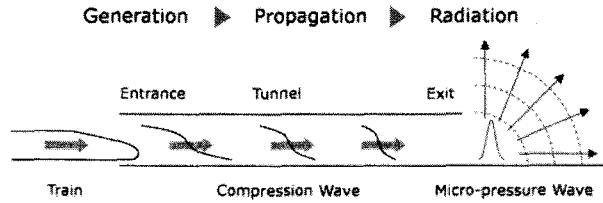


그림 1. Mechanism of the Booming Noise Generation

이렇게 1차원 현상으로 가정할 수 없게 되는 경우 열차가 터널의 중앙으로 진입하는 경우와 터널의 편측으로 진입하는 경우 압축파의 특성이 달라지게 된다. 열차가 터널의 편측으로 진입하게 되면 터널의 한쪽 벽면과의 거리가 줄어들어 압축파의 크기가 증가하게 된다.[3,4] 이러한 압축파의 크기를 감소시키기 위한 방법으로는 터널 단면적 증가, Side Branch, 흡음재, 전두부 형상 설계, 열차 단면적 축소 등의 여러 가지 방법이 알려져 있다. 그 중의 하나가 터널 입구에 설치하는 후드이다. 후드는 단면적 변화의 급격한 정도를 줄여주어 압축파의 크기를 감소시키는 방법이다. 기존의 고속철도의 터널 주행 연구에서는 터널 내의 압축파를 1차원으로 가정하여 해석하는 경우가 대부분이었기 때문에 터널 형상 및 후드 형상이 대부분 원형으로 도출되었었고, 3차원 해석 및 설계는 거의 이루어지지 못했었다.

본 연구에서는 터널 진입 시 열차 주위에서 발생하는 3차원 유동효과를 고려하기 위해 정상류를 이용한 방법으로 열차/터널의 Parametric Study를 수행하였다. 이를 통해 열차가 터널 중앙으로 진입하는 경우와 터널 측면으로 진입하는 경우에 대해 후드 형상이 어떻게 달라지는지에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 정상류를 이용한 압축파 예측방법

터널 내부 압축파의 크기는 열차의 터널 진입 위치에 따라 차이를 보이며 이를 정확히 예측하기 위해서는 3차원 수치해석이 수행되어야 한다. 하지만 3차원 열차/터널 수치해석에는 매우 많은 계산시간이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 터널 내부 압축파의 효율적인 예측을 위해 열차의 정상해석 데이터를 이용한 압축파 예측방법을 이용하였다.

정상류를 이용하여 압축파 파면구배를 예측하는 방법은 Ogawa등이 처음 제안하였다.[5] Ogawa는 압축파의 파면구배를 결정하는 인자를 도출하고자 열차가 터널에 진입할 때의 유동장을 일차원 유동으로 모델링하였고, 그 결과 열차 주위 가상의 터널 벽면에서의 수직 방향 속도성분이 파면구배와 직접적인 비례관계를 가짐을 증명하였다. 정상류를 이용하여 압축파 파면구배를 예측하는 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + (u+c) \frac{\partial p'}{\partial x} = \begin{cases} -\frac{\gamma}{2} \frac{p}{A_T} V_{wall} (t \geq -x/U_t) \\ 0 & (t < -x/U_t) \end{cases} \quad (1)$$

$$V_{wall} = \oint_{wall} \bar{v} \cdot d\bar{n} \quad (2)$$

여기서  $V_{wall}$ 은 가상의 터널 벽면에 대한 수직방향 속도성분의 적분치이다.

다음으로 후드가 설치된 터널의 경우에 대해 정상류를 이용한 압축파 예측방법을 구성하였다. 정상류를 이용한 방법이 가상의 터널 벽면에 대한 수직방향 속도 성분을 이용하기

때문에 터널과 마찬가지로 가상의 후드 벽면을 고려하여 수직방향 속도성분을 터널과 후드에 대해 각각 적용해 주었다. 즉, 식 (1)을 다음의 식 (3)과 같이 변형하여 사용하였다.

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + (u+c) \frac{\partial p'}{\partial x} = \begin{cases} -\frac{\gamma}{2} \frac{p}{A_T} V_{wall,T} & (t \geq -x_T/U_i) \\ -\frac{\gamma}{2} \frac{p}{A_H} V_{wall,H} & (-x_H/U_i < t < -x_T/U_i) \\ 0 & (t \geq -x_H/U_i) \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $V_{wall,T}$ 는 터널에 진입한 부분에서의 터널에 수직한 방향 속도성분이고  $V_{wall,H}$ 는 후드에 진입한 부분에서의 후드에 수직한 방향 속도성분이다. 또한  $x_T$ 와  $x_H$ 는 각각 터널과 후드의 위치를 나타낸다.

### 3. 계산 결과 및 고찰

#### 3.1 중앙 주행 vs 편측 주행

열차가 터널의 중앙이 아닌 편측으로 진입하는 경우 압축파의 특성이 어떻게 달라지는지 살펴보자. 후드의 단면적이 터널 단면적의 1.4배인 경우 터널 내부에서 발생하는 압축파 파면구배는 그림 2와 같다.

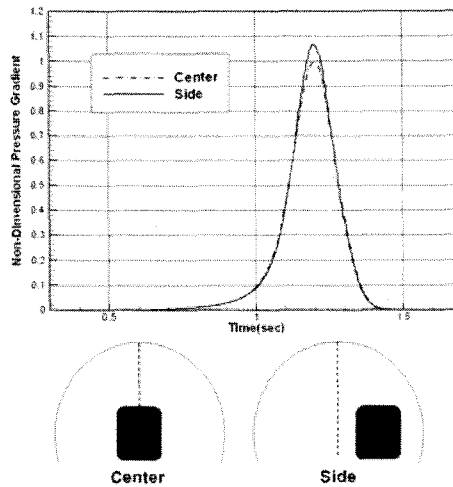


그림 2. Comparison of Pressure Gradients

그림 2에서 세로축은 후드가 없는 터널에 대해 열차가 중앙으로 진입하는 경우의 최대압력 구배값을 기준으로 무차원화한 값이다. 열차가 터널의 중앙으로 진입하는 경우에 비해 터널의 측면으로 진입하는 경우 발생하는 압축파의 파면구배는 약 6.7% 정도 증가한다. 이는 열차가 터널 벽면과 가까운 경로를 따라 진입함으로써 보다 강한 압축파가 발생되기 때문이다. 따라서 열차가 터널의 중앙으로 진입하는 경우에 비해 측면으로 진입하는 경우 터널 내부에서 발생하는 압축파의 크기가 증가하며 터널 후드를 설계하는 경우에도 이러한 특성을 고려해야 한다.

### 3.2 후드/터널 단면적 비에 대한 고찰

먼저 터널/후드 단면적 비( $R_{HT}$ )에 따른 압축과 파면구배를 조사해 보았다. 현재 운행 중인 KTX의 경부선 터널형상을 사용하였고 후드의 길이는 40m이며, 후드형상은 현재의 터널이 그대로 반경방향으로 확장된 형태를 이용하였다. 터널/후드 단면적 비는 후드가 없는 경우( $R_{HT}=1$ )에서부터 후드가 터널 단면적의 2배인 경우( $R_{HT}=2$ )까지 조사해보았으며 그 결과는 그림 3과 같다.

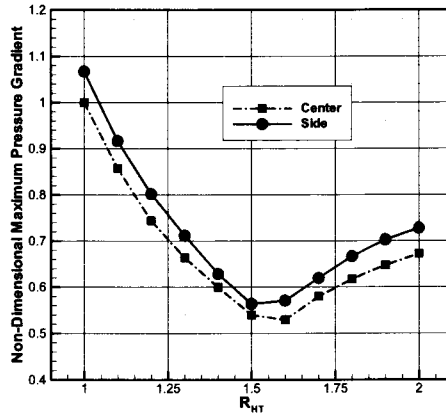


그림 3. Maximum Pressure Gradient vs  $R_{HT}$

후드의 단면적이 터널 단면적의 1.5~1.6배 정도일 때 최대 압력구배의 크기가 가장 작으며 후드가 없는 경우에 비해 최대 압력구배 값을 50% 가량 감소시키는 효과가 있음을 볼 수 있다. 또한 이 값에서 멀어질수록 최대 압력구배 값이 커지게 되므로 최대 압력구배 값을 최소로 하는 후드/터널 단면적비가 1.5~1.6 근처에 존재함을 예상할 수 있다. 또한 그림 3에서 열차가 터널의 중앙으로 진입하는 경우에 비해 측면으로 진입하는 경우 압력구배 값이 모든 후드/터널 단면적비에 대해 큰 것을 다시 한 번 확인할 수 있다.

### 3.3 후드 형상에 따른 고찰

본 연구에서는 타원형 후드에 대해서만 비교를 시도하였기 때문에 후드의 형상은 타원의 장반경/단반경 비( $R_{AB}$ )에 의해 결정된다. 열차가 터널의 중앙과 편측으로 각각 진입하는 경우 후드 형상변화에 따른 압력구배 값을 조사해보았다. 후드/터널 단면적 비는 1.5배로 고정시켰고 후드의 길이는 40m로 동일하다.

그림 4는 후드의 형상을 원형( $R_{AB}=1$ )에서부터 좌우로 넓은 타원형( $R_{AB}>1$ )으로 점차 변화시켜가면서 최대 압력구배 값을 조사한 결과이다. 세로축이 후드가 설치되지 않은 터널의 중앙으로 진입할 때 발생하는 압력과의 크기로 무차원화시킨 값들이므로 그림 4에 나타나는 약 0.5의 값들은 후드에 의한 압력구배 감소 효과를 확인시켜 준다. 또한 그림 3과 마찬가지로 편측주행의 경우 압력구배 값이 중앙주행보다 높게 나오고 있다.

그림 4에서 중요한 점은 중앙 주행과 편측 주행에 대해 최소의 압력구배를 갖는 후드 형상이다. 중앙 주행의 경우  $R_{AB}=1.2$  부근에서 최소값을 갖지만 편측 주행의 경우  $R_{AB}=1.3\sim 1.4$  부근에서 최소값을 갖는다. 즉 편측주행의 경우에는 중앙주행의 경우보다 좌우로 더 넓은 형태의 후드가 효과적임을 나타낸다.

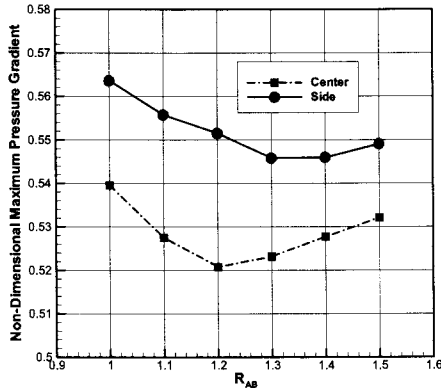


그림 4. Maximum Pressure Gradient vs  $R_{AB}$

### 3.4 열차/터널 단면적 비에 따른 고찰

다음으로 열차/터널 단면적 비에 따라 압력구배를 최소화 하는 후드 형상에 대해 조사하여 그 결과를 표 1에 나타내었다. 압력구배를 최소화 하는 후드 형상이 열차/터널 단면적 비에 따라 다양한 것을 볼 수 있다. 그 중에 중앙 주행과 편측 주행시 각각 최대 압력구배 값을 최소화 하는 Case들을 표 2에 정리하였다. Case #1은 중앙 주행의 경우에 대해 최대 압력구배 값을 최소화 하는 후드의 형상이고 Case #2는 Case #1의 형상에 대한 편측주행의 결과이다. Case #3는 편측주행의 경우에 대한 최적형상이다.

표 1. Optimization Results

BR	Center		Side	
	$R_{HT}$	$R_{AB}$	$R_{HT}$	$R_{AB}$
0.07	1.56	1.01	1.51	1.31
0.08	1.56	1.21	1.52	1.24
0.09	1.53	1.18	1.51	1.36
0.10	1.57	1.09	1.51	1.41
0.11	1.58	1.13	1.51	1.49
0.12	1.56	1.24	1.52	1.40
0.13	1.56	1.40	1.52	1.43

표 2. Best Optimization Results

Case #	$R_{HT}$	$R_{AB}$	Entrance Position	$(dP/dt)_{MAX}$
1	1.53	1.18	Center	0.5053
2	1.53	1.18	Side	0.5455
3	1.51	1.36	Side	0.5396

표 2에서 볼 수 있듯이 열차가 터널 중앙으로 진입하는 경우에는 후드 단면적이 터널 단면적의 1.53배이고 거의 타원형 후드의 장반경이 단반경의 1.18배 정도인 경우에 최대 압력구배 값이 가장 작다. 하지만 열차가 터널의 편측으로 진입하는 경우에는 단면적은 1.51배로 거의 비슷하지만 후드 장반경이 단반경의 1.36배인 경우가 가장 좋은 특성을 보인다. 즉 좌우로 넓은 후드가 보다 효과적이다.

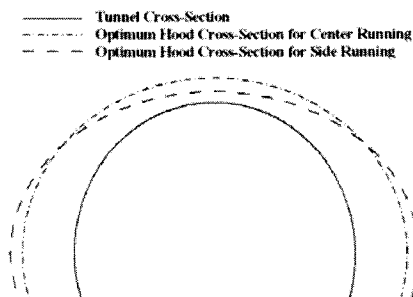


그림 5. Cross-Section Geometry

#### 4. 결 론

본 연구에서는 정상류를 이용한 압축과 예측방법을 이용하여 열차가 터널의 중앙으로 진입할 때와 편측으로 진입할 때의 압축과 특성을 살펴보고 편측주행에 효과적인 터널 후드 형상도출을 시도하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 정상류를 이용한 압축과 예측방법을 후드가 설치된 터널 입구에 적용함으로써 수치 해석에 비해 매우 짧은 시간 내에 압축파면 구배를 예측할 수 있었다.

(2) 열차가 중앙으로 진입하는 경우에 비해 편측으로 진입하는 경우 터널 벽면과의 좁은 영역에서 보다 강한 압축효과가 발생함으로써 터널 내부로 전파되는 압축파의 크기가 증가하며 정상류를 이용한 방법을 통해 이를 확인하였다.

(3) 열차가 터널 중앙으로 진입하는 경우에 대한 최적후드형상은 열차가 편측으로 진입하는 경우 더 이상 유효하지 않으며, 타원형 후드의 경우 좌우로 보다 넓은 형상의 후드가 편측주행 시 압축파 파면구배 감소에 효과적임을 확인할 수 있었다.

(4) 정상류를 이용한 방법을 사용함으로써 압축파 파면구배를 효과적으로 예측할 수 있었으며, 차량 및 터널 형상이 바뀌는 경우에도 이러한 방법을 사용함으로써 효율적인 해석 및 설계를 수행할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 “차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단” 및 국토해양부 “미래철도기술개발사업” (과제번호 07차세대고속철도A01)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Raghu S. Raghunathan, H.-D. Kim, and T. Setoguchi (2002), "Aerodynamics of high-speed railway train", Progress in Aerospace Sciences 38, pp.469-514
2. Alan Vardy and Jim Brown (2001), "An overview of wave propagation in tunnels", TRANSAERO, pp.249-266
3. Takanobu Ogawa and Kozo Fujii (1997), "Numerical Investigation of Three-Dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel", Computers & Fluids, Vol.26, No.6, pp.565-585.
4. 김인선, 옥호남 (1997), "고속전철의 터널진입시 공력특성 해석 및 전두형상 최적화 연구", 한국항공우주학회지, 제26권, 제1호, pp.17-264.
5. Takanobu Ogawa and Kozo Fujii (1994), "Prediction of Wavefront of a Compression Wave Generated by a Train Moving into a Tunnel with a Steady State Solution", 제 26회 유체역학 강연회 강연집.