

# 고속철도 터널입구에서 형성되는 압축파의 특성에 관한 연구

김희동\* · 김태호\*\* · 이종수\*\* · 김동현\*\*\*  
(1998년 7월 24일 접수)

## Characteristics of High-Speed Railway Tunnel Entry Compression Wave

Heuy-Dong Kim, Tae-Ho Kim, Jong-Su Lee and Dong-Hyeon Kim

**Key Words:** Compressible Flow(압축성유동), Compression Wave(압축파), High-Speed Railway(고속철도), Impulsive Noise(충격성소음), Unsteady Flow(비정상유동), Railway Tunnel(철도터널), Expansion Wave(팽창파).

### Abstract

Flow phenomena such as the pressure transients inside a high-speed railway tunnel and the impulsive waves at the exit of the tunnel are closely associated with the characteristics of the entry compression wave, which is generated by a train entering the tunnel. Tunnel entrance hood may be an effective means for alleviating the impulsive waves and pressure transients. The objective of the current work is to explore the effects of the train nose shape and the entrance hood on the characteristics of the entry compression wave. Numerical calculations using the method of characteristics were applied to one-dimensional, unsteady, compressible flow field with respect to high-speed railway/tunnel systems. Two types of the entrance hoods and various train nose shapes were employed to reveal their influences on the entry compression wave for a wide range of train speeds. The results showed that the entry compression wave length increases as the train nose becomes longer and the train speed becomes lower. The entry compression wave length in the tunnel with hood becomes longer than that of no hood. Maximum pressure gradient in the compression wavefront reduces by the entrance hood. The results of the current work provide useful data for the design of tunnel entrance hood.

### 1. 서론

터널내에 열차가 돌입하게 되면, 열차의 피스톤 효과로 인하여 터널입구 부근의 공기가 압축되어 압축파가 형성된다. 이러한 압축파는 터널 출구를 향해 전파하게 되며, 터널의 출구에서 팽창파로서 반사하게 된다. 이 경우에 압축파는 완

전반사하지 않고 그외 일부는 미기압파(impulsive wave)로 불리우는 펄스형태의 압력파로 되어 터널의 외부로 전파하게 된다(1). 이 때 발생하는 충격성 소음(impulsive noise)은 선로의 주변환경에 큰 영향을 미치게 된다. 한편 터널 출구에서 반사한 팽창파는 다시 터널 입구를 향해 전파하게 되며, 유사한 파동현상이 터널입구에서도 발생하게 된다. 따라서 터널내에는 반복적인 파동현상이 발생하며, 이러한 파동이 터널내를 주행하는 열차와 간섭(interference)하는 경우, 열차에는 큰 압력변동이 발생할 뿐만 아니라 비정상 주행저항으로 된다(2,3). 더욱이 이러한 파동들은 주행열차의 객실에 침투하여 승객의 심각

\* 회원, 안동대학교 기계공학파  
\*\* 회원, 안동정보대학 기계과  
\*\*\* 회원, 한국철도기술연구원

한 청각장애를 유발하게 한다<sup>(4)</sup>. 따라서 열차/터널계에서 발생하는 파동현상에 관한 해명은 매우 중요한 공학적인 과제임에 틀림없다.

터널내를 주행하는 열차의 공기역학적 문제들은 열차의 고속화와 관련되어 상당히 많은 기술적 문제들을 내포하고 있다. 최근에 이러한 기술적 문제들을 극복하기 위하여 상당히 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>(5,6,7)</sup>. 그 결과 터널내에서 발생하게 되는 압력변동이나 터널출구에서 발생하는 충격성 소음은 모두 터널내를 전파하는 압축파의 특성과 밀접하게 관련된다는 것이 알려지게 되었다. 따라서 현재까지 수행된 대부분의 연구들은 압축파의 특성을 이해하고, 이를 적절히 제어함으로써 압력변동이나 충격성 소음의 경감을 도모하기 위한 것이었다<sup>(8,9,10)</sup>.

고속철도 터널에서 형성되는 압축파는 터널내를 전파하는 과정에서 점성이나 열전달 등에 의한 소산과정을 겪게 되는 이외에도 비선형효과에 의한 파면의 변형이 발생하게 된다<sup>(11,12)</sup>. 지금까지 수행된 연구결과들에 의하면, 열차의 고속화를 위해서는 터널입구에서 형성되는 압축파를 적절히 제어하는 것이 필요하며, 터널내의 압력변동이나 충격성 소음에 대한 유려한 경감대책으로 터널입구에 적절한 형상의 입구후드를 설치하는 것이 제안되었다. 이 방법은 터널 입구에서 형성되는 압축파의 특성을 제어하려는 것이지만, 현재까지 입구후드가 압축파의 특성에 미치는 영향에 관해서는 충분히 알려져 있지 않다.

Fig.1에는 입구후드를 적용하는 경우에 압축파형의 변화를 도식적으로 나타내었다. 입구후드를 설치하는 경우에 압축파형은 후드의 입구부분과 터널의 입구부분에서 발생하는 압축파로 인하여 두 차례의 압력상승을 나타내는 형태로 된다. 일반적으로 입구후드가 설치되지 않은 경우, 터널 입구 부근에서 형성되는 압축파의 특성은 그림의 굵은 실선에 나타난 바와 같이, 압축파에 의한 파잉압력( $\Delta p$ ), 압축파면의 최대압력구배( $\partial p / \partial t$ )<sub>max</sub> 그리고 압축파의 파장( $\Delta \lambda$ )으로 설명될 수 있다<sup>(13)</sup>.

총래의 연구<sup>(14)</sup>에 의하면 압축파의 파잉압력은 열차의 속도(V)와 열차와 터널의 단면적비(R)가 알려지는 경우, 다음의 식(1)에 나타내는 바와 같이 일차원 압축성 유동의 이론식을 이용하여 충분히 잘 예측할 수 있음을 보여주었다.

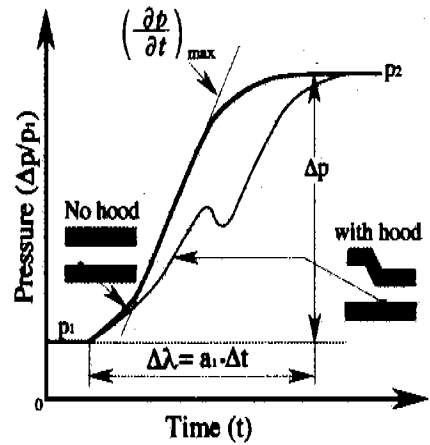


Fig.1 Sketch of compression waveform.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \gamma p_1 \left( \frac{V}{a_1} \right)^2 \left\{ \frac{1 - \phi^2}{\phi^2 + (1 - \phi^2) \frac{V}{a_1} - \gamma \left( \frac{V}{a_1} \right)^2 (1 - 0.5\phi^2)} \right\} \quad (1)$$

위의 식에서  $p_1$ 과  $a_1$ 은 각각 압축파 전방의 압력(대기압력)과 음속(대기상태의 음속)이며,  $\phi$  ( $=1-R$ )은 열차와 터널의 단면적비의 함수(여기에서  $R$ 은 터널 단면적에 대한 열차 단면적의 비),  $\gamma$ 는 공기의 비열비( $=1.4$ )를 의미한다. 최근 김등<sup>(15)</sup>은 터널입구에 후드를 설치하는 경우에도 식(1)에 나타내는 바와 같이 압축파의 파잉압력은 열차속도의 제곱에 비례하는 것으로 보고하였다.

그러나 터널내 압력변동이나 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음에 가장 큰 영향을 미치는 압축파면의 최대압력구배는 V와 R 이외에도 열차의 선두부형상, 터널입구부의 형상과 주변지형, 선로의 특성 등에 의해서도 영향을 받게 되므로, 이와 같은 단순한 이론식으로 압축파면의 예측하는 것은 거의 불가능하다. 그러나 고속철도 터널 입구에서 얻어진 실측값들에 의하면<sup>(16)</sup>, 압축파면의 최대압력구배 ( $\partial p / \partial t$ )<sub>max</sub>는 다음의 식(2)와 같은 근사적인 경험식으로 나타낼 수 있다.

$$\left( \frac{\partial p}{\partial t} \right)_{\max} = \frac{V}{\pi c D} \Delta p \quad (2)$$

위의 식에서 D는 터널의 등가직경 그리고 c는

실험값으로부터 결정되는 상수이며, 열차의 속도가 200km/h~300km/h의 범위에서는 대략 0.33정도인 것으로 보고되어 있다<sup>(17)</sup>. 위의 경험식으로부터 압축파면의 최대압력구배는 대략 열차속도의 3승에 비례한다는 것을 알 수 있다. 그러나 위의 경험식은 입구후드를 적용하지 않은 경우에 대한 것이며, 터널 입구에 후드를 적용한 경우에 압축파면의 최대압력구배값의 예측에 관해서는 현재까지 보고되지 않았다.

한편 압축파의 파장은 주로 터널의 입구와 출구면에서 발생하는 파동과 밀접하게 관련되며, 터널내의 압력변동이나 터널출구에서 발생하게 되는 충격성 소음의 크기를 예측하는데 매우 중요하다. 예를 들면 김<sup>(18)</sup>에 의하여 보고된 바와 같이 압축파의 파장이 매우 긴 경우에 압축파는 터널 출구면에서 거의 완전히 반사하여, 팽창파로서 터널내로 다시 전파하게 되므로, 터널 출구에서 충격성 소음문제는 발생하지 않게 된다. 그러나 압축파의 파장이 충격파와 같이 무시할 수 있을 정도로 짧은 경우에 압축파는 터널출구로부터 대부분 방출되어 강력한 충격성 소음의 원인으로 된다. 그러나 지금까지 이러한 압축파의 파장에 관한 연구는 수행되지 않았으며, 더욱이 터널 입구후드를 적용하는 경우에 대해서는 전혀 알려져 있지 않다.

이와 같은 압축파의 특성을 고려하는 경우에 Fig.1에 나타낸 바와 같이 터널입구에서 형성되는 압축파면의 최대압력구배를 가능한 한 작게 할 수 있도록 터널 입구후드를 설계하는 것이 바람직하다. 일본의 경우 열차가 300km/h로 주행할 때 발생하는 파동을 열차의 속도가 160km/h일 때 발생하는 파동과 거의 같게 되도록 입구후드 의 설계 목표를 설정해 두고 있다. 한국형 고속철도의 경우 선로의 약 30% 이상이 터널로 계획되어 있으므로, 터널에서 발생하는 파동현상에 대하여 이와 유사한 대책이 요망되고 있다. 그러나 입구후드를 설치하는 경우, 터널에서 발생하는 압축파의 특성에 관한 연구결과는 지금까지 보고되지 않았으며, 적절한 입구후드의 설계를 위해서는 입구후드의 효과에 관한 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 여러 형태의 선두부형상을 가지는 고속열차가 200km/h~400km/h의 속도로 터널에 진입하는 경우에 발생하는 압축파의 특성을

조사하기 위해서 수치해석법을 적용하였다. 또 압축파의 특성에 미치는 입구후드의 영향을 조사하기 위하여, 터널입구에 선형후드(Linear hood)와 불연속후드(Abrupt hood)를 설치하였다. 본 연구의 결과는 터널입구에서 형성되는 압축파의 과잉압력, 파면의 최대압력구배 그리고 파장에 관한 중요한 자료를 제공할 뿐만 아니라 압축파의 특성에 미치는 입구후드의 효과를 평가하는데 매우 유용하리라 판단된다.

## 2. 터널입구의 유동장 및 지배방정식

열차가 터널에 돌입하는 경우에 터널내에서 발생하는 유동장은 시간  $t$ 와 거리  $x$ 를 변수로 하는 입자원 비정상 압축성 지배방정식에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\rho u}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\rho}{A} \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} - a^2 \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{(\gamma-1)p}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} - a^2 u \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

여기에서  $A$ 는 시간과 거리에 의존하는 터널의 유효단면적이다. 열차의 돌입에 의하여 터널내에는 압축파가 발생하여 터널내를 전파하게 되므로, 다음과 같이 각각의 특성곡선으로 유동장을 표현한다. 즉 위의 식(3)~(5)로부터  $C^+$  특성곡선,  $C^-$  특성곡선 및 입자계적용 따라 유동상태방들이 일정하게 유지되는 특성방정식이 구해진다. 이 특성방정식에 음속의 식  $a = (\gamma p / \rho)^{0.5}$ 를 이용하고, 터널내 임의의 점에서 압력  $p$ , 음속  $a$ , 유체입자의 속도  $u$ , 압력  $p$ 를 대기 압력  $p_1$ 까지 동엔트로피적으로 변화시킬 때의 음속  $a_a$ , 거리  $x$ , 그리고 시간  $t$ 를 각각  $a/a_1 \equiv C$ ,  $u/a_1 \equiv U$ ,  $a_a/a_1 \equiv C_a$ ,  $x/L \equiv X$ ,  $a_1 t/L \equiv \tau$  등으로 무차원하여 특성방정식에 적용하면, 다음과 같은 무차원 특성곡선의 식들을 얻을 수 있다.

$$C^+ \text{ characteristics : along } \frac{dX}{d\tau} = U + C$$

$$dC + \frac{\gamma-1}{2} dU = \frac{C}{C_a} dC_a - \frac{(\gamma-1)C}{2\gamma A} \frac{dA}{d\tau} d\tau - \frac{(\gamma-1)CU}{2A} \frac{dA}{dX} d\tau \quad (6)$$

C characteristics : along  $\frac{dX}{dt} = U - C$

$$dC - \frac{\gamma-1}{2} dU = \frac{C}{C_a} dC_a - \frac{(\gamma-1)C}{2\gamma A} \frac{dA}{dr} dr - \frac{(\gamma-1)CU}{2A} \frac{dA}{dX} dr \quad (7)$$

Particle trajectory : along  $\frac{dX}{dt} = U$

$$dC_a = \frac{(\gamma-1) C_a}{2\gamma A} \frac{dA}{dr} dr \quad (8)$$

위의 식들에서 열차가 터널에 진입함에 따라  $(dA/dr)/A$  및  $(dA/dX)/A$ 의 값이 알려지는 경우, 식(8)의 입자궤적식으로부터  $dC_a$ 가 얻어지며,  $C^+$ 와  $C^-$ 의 특성곡선으로부터  $dU$ 와  $dC$ 가 구해지므로, 모든 격자점에서 유동의 상태량들이 구해진다. 본 수치계산에서는 대기압  $p_1=101.3\text{kPa}$ , 대기음속  $a_1=340\text{m/s}$ , 공기의 비열비  $\gamma=1.402$ 로 가정하였다. 또 열차는 동속도로 진행하며, 수치계산은 열차의 선두부가 터널에 진입함과 동시에 시작되었다. 그리고 열차가 터널에 진입하기 직전의 주위의 유동은 계산에 고려하지 않았다.

본 수치계산에 이용된 후드형상의 개략도를 Fig.2 (a, b, c)에 나타내었다. Fig.2(a)에는 후드가 없는 경우, Fig.2(b)에는 후드단면적이 선형적으로 변하는 선형후드, Fig.2(c)에는 불연속적으로 변하는 불연속후드를 나타내었다.

Fig.2(a)에서  $A_{T0}$ ,  $A_T$ ,  $A_0$ 는 각각 열차의 단면적, 열차의 선두부 단면적, 터널의 단면적이며, 그리고  $U$ ,  $u$ ,  $a$ ,  $L$ 은 각각 열차속도, 유체입자의 속도, 음속, 터널의 길이이다. Fig.2(b)에서  $A_{H0}$ ,  $A_H$ ,  $L_H$ 는 각각 후드입구의 단면적, 후드내 임의의 지점에서 단면적, 입구후드 길이를 나타낸다. Fig.2(c)에 나타낸 바와 같이  $L_c(=2\text{m})$ 는 후드와 입구터널을 연결하는 불연속면의 길이이다. 한편 Fig.2(a)는 본 계산의 초기상태( $t=0$ )로 열차의 선단이 후드입구에 위치한다.

실제 한국형 고속열차를 참조하여, 본 계산에 적용된 열차 및 터널의 형상에 관계되는 제량과 계산범위를 Table 1에 나타내었다. 여기에서  $a$ ,  $b$ ,  $D$ 는 각각 열차 선두부길이, 열차의 등가직경, 터널의 등가직경이며, 그리고  $L_e$ 와  $\alpha$ 는 각각 혼합형 선두부의 선형부분의 길이( $L_e=4\text{m}$ )와 역승형 선두부의 형상을 나타낸다. 본 연구는 문헌(19)에서 보고된  $\alpha$ 의 최적값( $\alpha_{opt}$ )을 적용하여 수치계산을 수행하였다. 또 Table 1에서 ○는 본 연구에 적용된 열차와 터널입구 형상에 관한 계산조건을 나타낸다. 수치계산은 터널 단면적에 대한 열차 단면적비(blockage ratio)  $R$ , 열차 선두부형상, 후드입구의 형상, 그리고 열차속도  $U$ 를 변화시켜, 이들이 터널입구에 형성되는 압축파의 과잉압력, 최대압력구배 및 압축파의 파장에 미치는 영향을 조사하였다

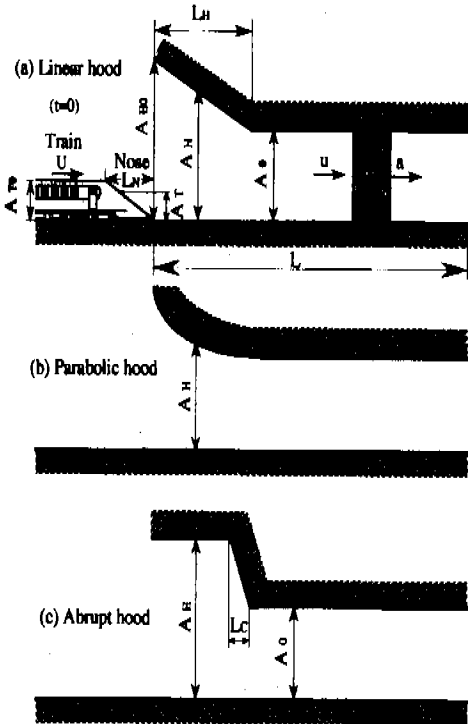


Fig. 2 Shape of tunnel entrance hood.

Table 1 Geometric properties and calculation condition.

Train	Cross sectional area $A_0$ (m <sup>2</sup> )	10.1	Tunnel	Tunnel length $L$ (m)	107
	Equivalent diameter $b$ (m)	3.586		Cross sectional area $A_0$ (m <sup>2</sup> )	11.672
	Train nose length $a$ (m)	5 - 40		Equivalent diameter $D$ (m)	200
	Train velocity $U$ (km/h)	300 - 400			
Hood	No hood	Linear hood	Abrupt hood		
Nose	Linear nose	Elliptic nose	Power-law nose $\alpha < 1$		
	Elliptic nose	Power-law nose $\alpha > 1$	Dumbbell nose $\alpha < 1$		
	Power-law nose $\alpha > 1$	Dumbbell nose $\alpha < 1$			

수치해석에 사용된 격자점은 등간격으로 약 5000개이었으며,  $\Delta x$ 는 격자점간의 거리, 수치계산의 시간간격  $\Delta \tau = 0.9 \Delta x$ 로 설정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 No hood의 경우 열차 선두부 형상에 따른 압축파 특성

Fig.3에는  $R=0.094$ 이고, 후드를 설치하지 않은 경우 열차 선두부 형상을 선형, 타원형, 멱승형, 혼합형으로 변화시켜, 열차 선두부 길이를 나타내는  $a/b$ 의 값과 터널입구에서 발생하는 압축파의 파장과의 관계를 나타내었으며, 열차속도는  $U=200\text{km/h}$ 와  $350\text{km/h}$ 로 가정하였다. 그림에서 열차 선두부 형상과 열차의 속도에 관계없이  $a/b$ 의 값이 증가함에 따라 압축파의 무차원 파장( $\Delta \lambda/D$ , 여기에서  $D$ 는 터널의 등가직경을 나타낸다.)의 값은 증가하며, 이러한 현상은 속도를 감소시키더라도 유사하게 나타난다. 또 일정  $a/b$ 의 값에 대하여 열차의 속도가  $200\text{km/h}$  또는  $350\text{km/h}$ 로 주어지는 경우 압축파의 무차원 파장은 열차의 선두부 형상이 혼합형인 경우 가장 길며, 타원형인 경우 가장 짧다는 것을 알 수 있다. 구체적으로  $a/b=7$ 이고,  $U=350\text{ km/h}$ 인 경우 열차의 선두부 형상을 혼합형에서 타원형으로 변화시키면 무차원 파장은 약 11%정도 짧아진다.

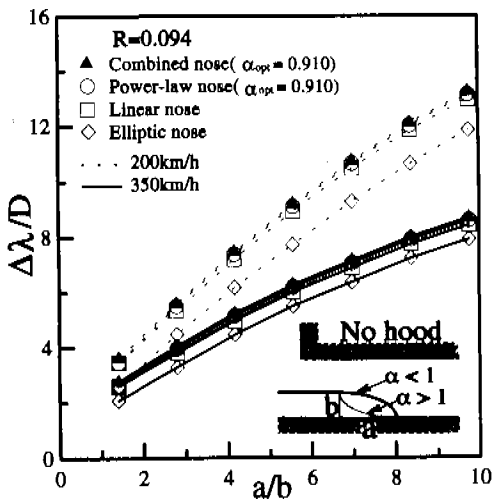


Fig. 3 Compression wave length vs  $a/b$ .

한편 그림으로부터 터널입구에서 형성되는 압력파의 파장은 열차의 속도와 선두부 형상에 의존하게 되지만, 대략 터널 등가직경  $D$ 의 수배에 달하게 된다는 것을 알 수 있다. 구체적으로 열차의 속도가  $350\text{km/h}$ 이고,  $a/b$ 의 값이 4~8까지의 범위에 대하여 터널입구에서 발생하는 압축파의 파장은 터널 등가직경  $D$ 의 약 4.5배에서 7.5배 정도로 된다는 것을 알 수 있다. 압축파의 파장이 길어질수록 터널 출구에서 파동은 완전반사의 형태에 가까게 되므로, 터널출구면에서 발생하는 충격성 소음이 감소할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 결과로부터 터널입구에 후드를 설치하지 않은 경우 열차 선두부 형상이 혼합형 혹은 멱승형인 경우가 다른 선두부 형상에 비하여 충격성 소음이 작아지는 것을 알 수 있다.

터널내에서 발생한 압축파의 최대압력구배의 저감에 대한 보다 효과적인 대책을 실시하기 위하여, 위에 기술한 열차의 선두부형상들 중에서 실제 고속열차 선두부 형상과 유사하며, 간단한 형태인 멱승형 선두부인 경우 입구후드의 영향을 조사하기 위하여, 터널입구에 선형후드와 불연속 후드를 설치하였다. 문헌(19)에 의하면 멱승형 선두부인 경우 열차의 주행속도에 따라 충격성 소음을 최소화 하는  $\alpha$ 의 값 즉  $\alpha_{opt}$  값이 존재한다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 문헌(19)의 결과를 이용하여,  $U=400\text{km/h}$ ,  $350\text{km/h}$ ,  $300\text{km/h}$ ,  $200\text{km/h}$ 인 경우  $\alpha_{opt}$ 의 값을 각각 0.922, 0.910, 0.899, 0.840로 선택하였다.

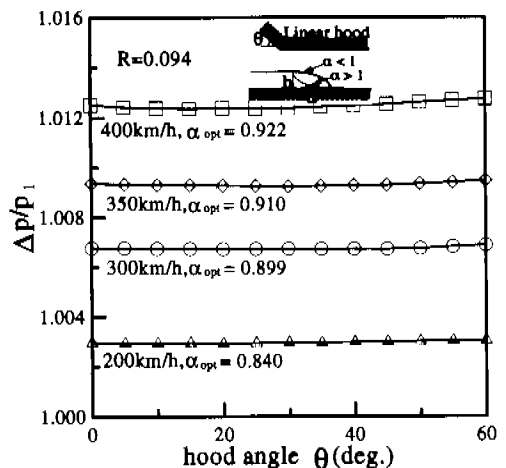


Fig. 4 Compression wave strength vs  $\theta$  in linear hood.

3.2 선형후드인 경우 압축파의 특성

Fig.4에는 열차 선두부 형상을 먹송형( $a=5m$ )으로 하고,  $R=0.094$ ,  $L_H/D=1.0$ 인 선형후드를 설치하는 경우, 열차속도를 변수로 하여 입구후드각  $\theta$ 의 값이 압축파의 강도에 미치는 영향을 나타내었다. 그림으로부터 열차속도에 관계없이  $\theta$ 의 값은 압축파의 강도에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉 터널입구에서 발생하는 압축파는 후드각에는 의존하지 않으며, 열차와 터널의 단면적비  $R$ 과 열차속도  $U$ 만으로 예측 가능하다는 것을 알 수 있다.

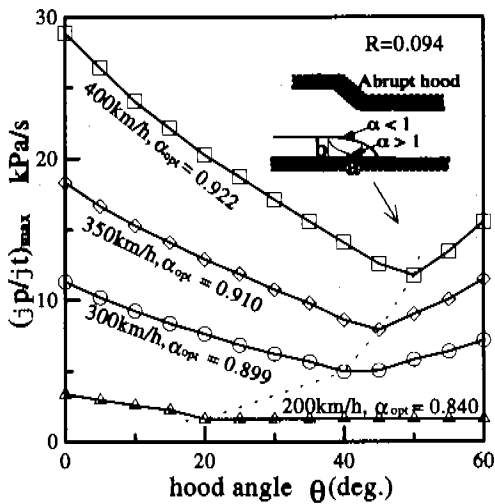


Fig.5  $(\partial p / \partial t)_{max}$  vs  $\theta$  in linear hood.

Fig.5에는 Fig.4와 동일한 조건에서 후드각  $\theta$ 와 터널입구에서 발생하는 압축파의 최대압력구배  $(\partial p / \partial t)_{max}$ 와의 관계를 나타내었다. 그림에서 열차속도가 비교적 큰 경우( $U=300, 350, 400km/h$ )  $(\partial p / \partial t)_{max}$ 의 값은  $\theta$ 가 증가할수록 감소하여 어느  $\theta$ 값에서 최소값을 가진 후,  $\theta$ 값이 더욱 증가하면  $(\partial p / \partial t)_{max}$ 의 값은 다시 증가한다. 이러한 경향은 속도가 증가할수록 뚜렷해진다. 구체적으로  $U=350 km/h$ 인 경우 압축파의 최대압력구배값은  $\theta = 45^\circ$ 에서 최소로 된다. 그러나 열차의 속도가 비교적 낮은 경우( $U=200km/h$ ), 터널입구 압축파의 최대압력구배값은 후드각에 크게 의존하지 않는다. 본 연구의 결과로부터 입구후드를 선형후드로 설정하고, 선두부 형상이 먹송형인 경우 열차의 진입속도가

알려지면, 터널출구 부근에서 발생하는 충격성 소음을 최소로 하는 후드각을 결정할 수 있다.

그림으로부터  $(\partial p / \partial t)_{max}$ 가 최소로 되는  $\theta_{opt}$ 는 열차속도에 의존하여, 열차속도가 증가하는 경우  $\theta_{opt}$ 의 값도 증가하는 것을 알 수 있다. 열차의 속도가 비교적 큰 범위( $U=300\sim 400km/h$ )에 비하여 비교적 작은 범위( $U=200\sim 300km/h$ )에서  $\theta_{opt}$ 의 변화가 더 크게 나타난다. 이것은 열차가 고속으로 주행하는 경우 입구후드를 설계하기가 더 용이해진다는 것을 의미한다.

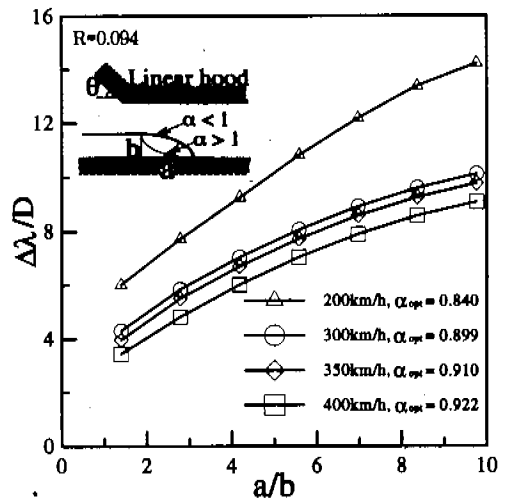


Fig.6 Compression wave length vs  $a/b$  in linear hood.

위의  $\theta_{opt}$ 값의 선형후드를 설치하고, 열차 선두부 형상을 먹송형으로 하는 경우 열차속도를  $U=200\sim 400km/h$ 로 변화시켜,  $a/b$ 의 값이 터널입구에서 발생하는 압축파의 파장에 미치는 영향을 Fig.6에 나타내었다. 그림에서 터널입구에서 발생하는 압축파의 무차원 파장은 열차의 속도에 관계없이  $a/b$ 의 값이 증가함에 따라 길어진다. 또 그림에서  $a/b$ 의 값이 주어지는 경우 열차의 주행속도가 저속( $U=200km/h$ )일수록 압축파의 무차원 파장은 길어지며, 고속( $U=300\sim 400km/h$ )일수록 짧아진다. 또  $a/b$ 의 값이 일정한 경우 열차속도가 고속( $U=300\sim 400km/h$ )인 범위에 비하여 비교적 저속( $U=200\sim 300km/h$ )인 범위에서 무차원 파장이 뚜렷하게 변하는 것을 알 수 있다. 구체적으로  $a/b=7$ 인 경우에 열차의 속도가  $300km/h$ 에

서 400km/h로 변하게 되면, 터널입구 압축파의 무차원 파장은 약 11%정도 감소하는 반면에 200km/h에서 300km/h로 변하는 경우는 약 28% 정도 감소한다.

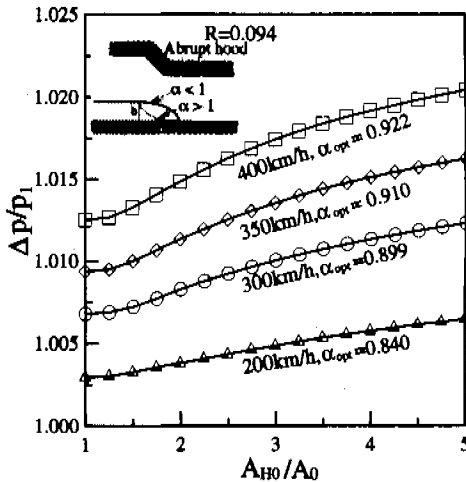


Fig. 7 Compression wave strength vs  $A_{H0}/A_0$  in abrupt hood.

3.3 불연속후드인 경우 압축파의 특성

Fig.7에는  $R=0.094$ , 열차속도  $U=200\sim 400$  km/h,  $a=5m$ 인 역송형 선두부와  $L_H/D=1.0$ 의 불연속후드인 경우, 입구후드와 터널의 단면적비  $A_{H0}/A_0$ 의 값과 터널입구 압축파의 강도의 관계를 나타내었다. 그림에서 터널입구에서 형성되는 압축파의 강도  $\Delta p/p_1$ 는 열차의 속도에 관계없이  $A_{H0}/A_0$ 의 값이 증가할수록 커진다. 또  $A_{H0}/A_0$ 의 값이 일정한 경우 열차의 속도가 증가할수록 압축파의 강도는 커진다. 그러나 그림의 종축의 값으로부터  $\Delta p/p_1$ 의 값에 있어서 변화는 크지 않다는 것을 알 수 있다.

Fig.8에는 Fig.7과 동일한 조건에서 터널입구에서 발생하는 압축파의 최대압력구배값  $(\partial p/\partial t)_{max}$ 를  $A_{H0}/A_0$ 에 대하여 나타내었다. 그림에서 압축파의  $(\partial p/\partial t)_{max}$ 의 값은 열차속도에 관계없이  $A_{H0}/A_0$ 의 값이 증가할수록 감소하여 어느  $A_{H0}/A_0$ 의 값에서 최소값을 가진 후,  $A_{H0}/A_0$ 의 값이 더욱 증가하면  $(\partial p/\partial t)_{max}$ 의 값은 다시 증가한다. 이러한 경향은 속도가 증가할수록 뚜렷하게 나타난다. 구체적으로  $U=350km/h$ 인 경우 압축파의 최대압력구배값은  $A_{H0}/A_0=2.5$ 에서 최소값

을 가진다. 또 그림으로부터  $(\partial p/\partial t)_{max}$ 가 최소로 되는  $A_{H0}/A_0$ 의 값  $(A_{H0}/A_0)_{opt}$ 은 열차속도에 의존하며, 열차속도가 증가하는 경우  $A_{H0}/A_0$ 의 값도 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구의 결과로부터 불연속후드를 설치하는 경우 열차의 진입속도가 알려지면, 터널출구 부근에서 발생하는 충격성 소음을 최소로 하는  $A_{H0}/A_0$ 의 값을 결정할 수 있다

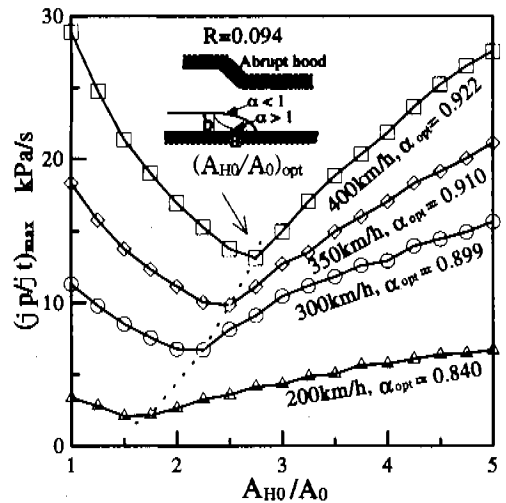


Fig. 8  $(\partial p/\partial t)_{max}$  vs  $A_{H0}/A_0$  in abrupt hood.

위에서 기술한 바와 같이  $(\partial p/\partial t)_{max}$ 가 최소로 되는  $A_{H0}/A_0$ 의 값 즉  $(A_{H0}/A_0)_{opt}$ 의 값에 대하여 열차속도를  $U=200\sim 400km/h$ 로 변화시키면서,

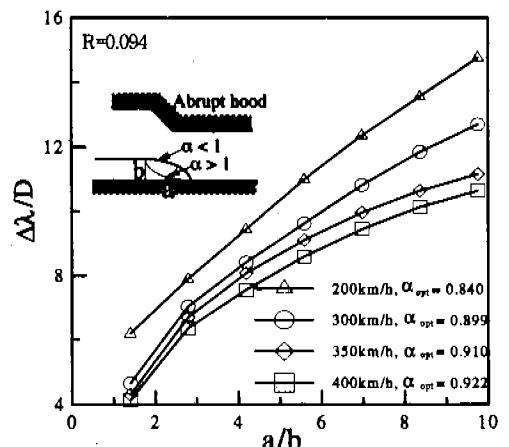


Fig. 9 Compression wave length vs  $a/b$  in abrupt hood.

a/b의 값이 압축파의 무차원 파장에 미치는 영향을 Fig.9에 나타내었다. 그림에서 터널입구에서 발생하는 압축파의 무차원 파장은 열차의 속도에 관계없이 a/b의 값이 증가함에 따라 길어진다. 또 a/b의 값이 일정한 경우 열차속도가 증가할수록 압축파의 무차원 파장은 짧아진다. 구체적으로 a/b= 7이고, 열차의 속도가 200km/h에서 400km/h로 증가하는 경우에 압축파의 무차원 파장은 약 24%정도 감소한다.

3.4 입구후드에 따른 압축파 특성

Fig.10에는 R=0.094, U=350km/h인 역승형 선두부에 대하여 입구후드가 없는 경우와 입구후드 형상이 선형, Abrupt형인 경우 터널입구에서 형성되는 압축파의 무차원 파장을 비교하였다. 그림에서 입구후드 형상에 관계없이 a/b의 값이 증가함에 따라 압축파의 무차원 파장은 길어진다. 또 a/b의 일정한 값에 대하여 압축파의 무차원 파장은 입구후드가 없는 경우가 가장 짧으며, 입구후드가 있는 경우는 선형후드에 비하여 불연속 후드인 경우가 압축파의 무차원 파장이 더 길어진다는 것을 알 수 있다. 이는 입구후드가 설치되지 않은 경우에 비하여 입구후드를 설치하는 경우에 압축파형은 후드의 입구부분과 터널의 입구부분에서 발생하는 압축파로 인하여 두 차례의 압력상승을 겪게 되므로 압축파의 파장이 길어지기 때문이다. 구체적으로 a/b=7인 경우 입구후드

를 설치하지 않은 경우에 비하여 불연속 입구후드를 설치하는 경우 압축파의 무차원 파장은 약 42%정도 길어진다. 따라서 충격성 소음 크기는 입구후드를 설치하지 않은 경우에 비하여 입구후드를 적용하는 경우 작아지며, 선형 입구후드에 비하여 불연속 입구후드가 작아지는 것으로 예상된다.

4. 결론

고속철도 터널입구에 후드를 설치하는 경우 압축파의 특성을 조사하기 위하여 특성곡선법을 이용한 수치계산을 수행하였다. 수치계산에서는 열차의 속도를 200~400km/h 변화시켰으며, 열차의 선두부 형상을 선형, 타원형, 역승형 그리고 혼합형으로 가정하였다. 수치계산 결과들은 압축파의 특성값에 미치는 입구후드의 영향을 조사하기 위하여 이용되었다. 본 연구로부터 얻어진 결과들은 다음과 같이 요약된다.

- (1) 터널입구에 후드를 설치하지 않은 경우 열차 선두부 형상이 혼합형인 경우가 다른 선두부 형상에 비하여 압축파의 파장이 가장 길다.
- (2) 선형후드를 설치하는 경우, 열차의 주행속도에 따라 압축파의 최대압력구배가 최소로 되는 입구후드각을 제안하였다.
- (3) 불연속형 후드인 경우, 열차의 주행속도에 따라 압축파의 최대압력구배가 최소로 되는 후드 단면적 값을 제안하였다.
- (4) 열차 선두부 형상이 역승형인 경우 입구후드를 적용하지 않은 경우에 비하여 입구후드를 설치하는 경우가 압축파의 파장이 길어지며, 또 선형 입구후드에 비하여 불연속 입구후드가 충격성 소음의 저감에 보다 효과적이다.

참고문헌

- (1) Kim, H.D. and Raghunathan, S., 1998, "Impulse Noise and Its Control," Progress in Aerospace Sci., Pergamon Press, Vol.34, pp. 1~44.
- (2) 김희동, 1997, "터널내를 주행하는 열차의 공기역학적 해석(I) —1열차의 공기역학—," 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제8호, pp.963~972.

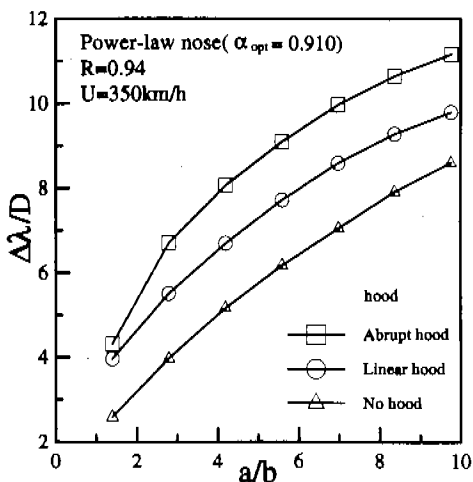


Fig. 10 Comparison of compression wave lengths.



- (3) 김희동, 1997, "터널내를 주행하는 열차의 공기역학적 해석(II) —2열차의 공기역학—," 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제8호, pp.983~995.
- (4) 김희동, 1996, "고속철도의 공기역학 I~IV," 대한기계학회지, 제36권1호, 제36권3호, 제36권5호, 제36권10호.
- (5) Matsuo, K., et. al., 1992, "Emission of a Propagating Compression Wave from an Open End of a Tube," JSME Journal, Vol.58, No.546, pp.331~337.
- (6) Ido, A., Iida, M. and Maeda, T., 1993, "Wind Tunnel Tests for Nose and Tail of Train," Railway Technical Research Report, The Railway Technical Research Institute of Japanese National Railways, Vol.7, No.7.
- (7) Maeda, T., et. al., 1987, "Aerodynamic Drag of Shinkansen Electric Cars (series 0, series 100, series 200)," Railway Technical Research Report, The Railway Technical Research Institute of Japanese National Railways, No.1371.
- (8) Ozawa, S., Maeda, T., Matsumura, T. and Uchida, K., 1993, "Effect of Ballast on Pressure Wave Propagating through Tunnel," The International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, 1993, Yokohama, Japan.
- (9) 김희동, Setoguchi, T., 1997, "수직갱을 이용한 터널내 비정상 압축파의 파동제어," 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제9호, pp.1095~1104.
- (10) Kim, H.D. and Setoguchi, T., 1997, "Reduction of Impulsive Noise Caused by Unsteady Compression Wave," JSME International Journal, Series B, Vol.40, No.2, pp.223~229.
- (11) Private communication.
- (12) 김희동, Matsuo, K., 1995, "고속철도 터널에서 발생하는 파동형상에 관한 충격파관의 연구 (2) —압축파의 감쇠와 비선형효과—," 대한기계학회논문집(B), 제19권, 제8호, pp.1972~1981.
- (13) 김희동, Matsuo, K., 1994, "고속철도 터널에서 발생하는 파동형상에 관한 충격파관의 연구 (1) —압축파의 특성에 대하여—," 대한기계학회논문집(B), 제19권, 제8호, pp.1972~1981.
- (14) 김희동, 1994, "고속철도 터널에서 발생하는 파동현상," 대한기계학회지, 제34권, 제10호, pp.796~807.
- (15) 김희동, 김태호, 김동현, 1998, "입구후드가 고속철도 터널입구의 압축파에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 부고중.
- (16) 김희동, 1996, "직관내를 전파하는 압축파의 감쇠와 변형에 관한 수치해석적 연구," 대한기계학회논문집, 제20권, 제7호, pp.2315~2325.
- (17) Matsuo, K., Aoki, T., Mashimo, S. and Nakatsu, E., 1997, "Entry Compression Wave Generated by a High-Speed Train Entering a Tunnel," 9th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, 6~8 Oct.
- (18) 김희동, 1998, "관단으로부터 미소 압력파의 반사에 관한 기초적 연구," 대한기계학회논문집(B), 제22권, 제5호, pp.618~626.
- (19) 김희동, 김태호, 김동현, 1998, "고속열차의 선두부 형상이 터널 입구압력파에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 출판예정.