

# 고속철도 터널 입구후드에 관한 수치해석적 연구

## Numerical Study on High-Speed Railway Tunnel Entrance Hood

김희동\*  
Kim, Heuy-Dong\*

김동현\*\*  
Kim, Dong-Hyeon\*\*

### ABSTRACT

High-speed railway trains entering and leaving tunnels generate finite amplitude pressure wave which propagate back and forth along the tunnels, reflecting at the open ends of the tunnels and at other discontinuities such as ventilation shafts and the train themselves. In present day railways, the magnitudes of the pressure waves are much too small to cause structural damage, but they are a serious potential source of aural discomfort for passengers on unsealed trains. Almost always do the pressure waves propagating along the tunnels lead to a hazardous impulse noise near the exit portal of the tunnel. In order to alleviate such undesirable phenomena, some control strategies have been applied to the compression wave propagating inside the tunnel. The objective of the current work is to investigate the effect of tunnel entrance hoods on the entry compression wave at the vicinity of the tunnel entrance. Three types of entrance hoods were tested by the numerical method using the characteristics of method for a wide range of train speeds. The results show that the maximum pressure gradient of compression wave can be considerably reduced by the tunnel entrance hood. Desirable hood shape for reduction of the pressure transients and impulse noise was found to be of abrupt type hood with its cross-sectional area 2.5 times the tunnel area.

### 1. 서 론

열차가 고속으로 터널에 돌입하게 되는 경우 반대편 터널출구에서 발파음에 가까운 충격성 소음이 발생하여, 주변의 구조물은 물론 주거환경에 심각한 지장을 초래하게 된다. 이 뿐만 아니라 터널내에서는 열차의 피스톤 효과로 인하여 발생하는 압력파가 터널내부를 전파하여, 터널의 입구 및 출구면에서 반사를 반복하게 됨으로써 큰 압력변동이 발생하게 되며, 이러한 압력변동은 주행하는 열차에 비정상 하중이나 비정상 주행저항으로 작용하게 된다.

이와 같은 파동현상은 열차의 동력설계 뿐만 아니라 차체의 강도설계에 관계하게 되며, 열차의 주행안정성 및 터널주변의 환경에도 큰 영향을 미치게 되므로, 이들에 대한 적절한 경감법의 연구는 대단히 중요하다. 종래의 연구<sup>(1,2)</sup>에 의하면, 터널내부 및 외부에서 발생하는 파동현상은 열차의 속도에 매우 밀접하게 관련되는 것으로 알려져 있다. 따라서 열차와 터널계에서 발생하는 파동현상의 해명은 열차의 고속화에 선행하여 연구되어야 할 중요한 과제임에 틀림없다.

고속철도 터널출구에서 발생하는 충격성 소음은 터널내를 전파하는 압력파형에 의하여 결정되며, 터널내부의 압력변동은 비정상 압축파와 팽창파에 기인한다<sup>(3,4)</sup>. 따라서 이들 압력파의 특성에 대한 이해는 적절한 경감법을 찾는 데 있어서 필수적이다. 일반적으로 고속철도

\* 국립안동대학교 기계공학과, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원, 정회원

터널 입구에서 발생하는 압축파의 특성은 압축파의 과잉압력, 파면의 압력구배 그리고 파장 등으로 나타낼 수 있다<sup>(5)</sup>. 종래의 연구에 의하면<sup>(6,7)</sup> 압축파의 과잉압력은 열차의 속도, 열차와 터널의 단면적비에 의하여 결정되며, 열차속도가 대략 200-300km/h 범위에 대해서는 과잉압력은 수 kPa 정도인 것으로 알려져 있다.

실제의 고속철도 터널에서 발생하는 파동현상은 압력파의 과잉압력보다도 파면의 형상 즉 파면의 압력구배에 의하여 큰 영향을 받게 된다. 따라서 고속철도 터널에서 발생하는 파동현상을 경감시키는 방법들은 주로 압력과 파면의 압력구배를 완만하게 하는 방향으로 전개되어 왔다.<sup>(8-14)</sup>

최근 Kage 등<sup>(15,16)</sup>은 특성곡선법을 이용한 수치계산법을 수행하여, 터널입구에 설치하는 입구후드가 터널내 압축파에 미치는 영향을 조사하였다. 그들의 연구결과로부터 입구후드가 압축파의 특성에 미치는 영향을 개략적으로 예측할 수 있었으나, 매우 제한된 계산 조건으로 인하여 입구후드의 최적형상을 제시하지는 못하였다. 또 그들은 입구후드의 길이를 다양하게 변화시키지 않았으며, 열차의 속도를 300km/h까지로 제한하였다. 따라서 현재 우리나라에서 추진하고 있는 한국형 고속 열차의 속도를 고려하여 입구후드의 최적설계를 위해서는 보다 구체적인 연구자료가 요망되고 있다.

본 연구에서는 고속열차가 터널내로 진입하는 경우에 입구후드가 터널입구의 압축파에 미치는 영향을 조사하기 위하여 특성곡선법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치계산은 넓은 범위의 열차의 속도 200~400km/h에 대하여 수행되었으며, 입구후드 형상의 효과를 조사하기 위하여 세 종류의 입구후드를 적용하였다. 본 연구의 결과로부터 터널출구에서 발생하는 충격성 소음은 Abrupt 후드를 설치하는 경우 가장 작게 된다는 것을 알았다. 본 연구의 결과는 실제의 고속열차 터널의 입구에 후드를 설치하려는 경우에 후드 형상의 결정, 입구후드의 효과예측 등에 대단히 유용하리라 판단된다.

## 2. 터널입구의 유동장 및 지배방정식

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

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} - a^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{(\gamma-1)p}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} - a^2 u \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

여기에서  $A$ 는 시간과 거리에 의존하는 터널의 유효단면적이다. 열차의 돌입에 의하여 터널 내에는 압축파가 발생하여 터널내를 전파하게 되므로, 다음과 같이 각각의 특성곡선으로 유동장을 표현한다. 즉 위의 식(1)~(3)으로부터 유동상태량들은 특성곡선  $C^+$ 와  $C^-$ 를 따라서 다음과 같이 각각 쓰여질 수 있다.

$C^+$  characteristics : along  $dx/dt=u+a$

$$\frac{dp}{dt} + \rho a \frac{du}{dt} + \frac{\rho u a^2}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{p}{A} \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$C^-$  characteristics : along  $dx/dt=u-a$

$$\frac{dp}{dt} - \rho a \frac{du}{dt} + \frac{\rho u a^2}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{p}{A} \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

particle trajectory : along  $dx/dt=u$

$$\frac{dp}{dt} - a^2 \frac{d\rho}{dt} - \frac{(\gamma-1)p}{A} \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

위의 특성곡선의 방정식들은 등엔트로피식과 음속의 관계식으로부터 다음과 같이 쓰여진다.

$C^+$  characteristics : along  $dx/dt=u+a$

$$da - \frac{a}{a_a} da_a + \frac{\gamma-1}{2} du + \frac{(\gamma-1)ua}{2A} \frac{\partial A}{\partial x} dt + \frac{(\gamma-1)a}{2\gamma A} \frac{\partial A}{\partial t} dt = 0 \quad (7)$$

$C^-$  characteristics : along  $dx/dt=u-a$

$$da - \frac{a}{a_a} da_a - \frac{\gamma-1}{2} du + \frac{(\gamma-1)ua}{2A} \frac{\partial A}{\partial x} dt + \frac{(\gamma-1)a}{2\gamma A} \frac{\partial A}{\partial t} dt = 0 \quad (8)$$

particle trajectory : along  $dx/dt=u$

$$\frac{2a^2}{a_a} da_a - \frac{\gamma-1}{A} \frac{\partial A}{\rho} \frac{\partial A}{\partial t} dt = 0 \quad (9)$$

한편 기상태에서의 음속( $a_0$ )과 터널의 길이( $L$ ) 등을 사용하여 위의 식들에 포함되어 있는 상태량들을 무차원화하면 다음과 같은 새로운 무차원 특성방정식이 얻어진다.

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

$$dC + \frac{\gamma-1}{2} dU = \frac{C}{C_a} dC_a - \frac{(\gamma-1)C}{2\gamma A} \frac{dA}{d\tau} d\tau - \frac{(\gamma-1)CU}{2A} \frac{dA}{dX} dX \quad (10)$$

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

$$dC - \frac{\gamma-1}{2} dU = \frac{C}{C_a} dC_a - \frac{(\gamma-1)C}{2\gamma A} \frac{dA}{d\tau} d\tau - \frac{(\gamma-1)CU}{2A} \frac{dA}{dX} dX \quad (11)$$

particle trajectory : along  $\frac{dX}{d\tau} = U$

$$dC_a = \frac{(\gamma-1)C_a}{2\gamma A} \frac{dA}{d\tau} d\tau \quad (12)$$

위의 식들에서 열차가 터널에 진입함에 따라  $(dA/d\tau)/A$  및  $(dA/dX)/A$ 의 값들이 알려지는 경우, 식(12)의 입자궤적식으로부터  $dC_a$ 가 얻어지며,  $C^*$ 와  $C^-$ 의 특성선으로부터  $du$ 와  $dc$ 가 구해지므로, 모든 격자점에서 유동의 상태량들이 구해진다.

본 수치계산에서는 대기압  $p_0=101.3$  kPa, 대기 음속  $a_0=340$  m/s, 공기의 비열비  $\gamma=1.402$ 로 가정하였다. 또 열차는 등속도로 진행하며, 수치계산은 열차의 선두부가 터널에 진입함과 동시에 시작되었다. 터널 단면적과 열차의 단면적은 실제 한국형 고속열차를 대상으로 하여,  $A_0=107m^2$ ,  $A_T=10.1m^2$ 로 가정하였으며, 수치계산은 터널의 등가직경  $D=11.672m$ , 터널의 길이  $L=200m$ 로 고정하였다. 수치계산은 터널 단면적에 대한 열차 단면적비(blockage ratio)  $R$ , 열차 선두부길이  $L_N$ , 연결부길이  $L_C$ , 열차의 속도  $U$ , 후드의 무차원 길이  $L_H/D$  등을 변화시켜, 이들이 고속철도 입구에서 형성되는 압축파에 미치는 영향을 조사하였다. 수치계산에서 사용된 격자점은 등간격으로 약 4000개이었으며,  $\Delta x$ 는 격자간의 거리, 그리고 첫 번째 격자점  $i=1$ 과 계산영역의 최하류단의 격자점  $i=i_{max}$ 는 각각 후드입구면과 터널 출구면에 대응하도록 하였다. 수치계산의 시간간격  $\Delta \tau = 0.9 \Delta x$ 로 가정하였다.

본 계산에 이용된 후드형상의 개략도를 Fig.1(a, b, c)에 나타내었다. Fig.1(a)에는 후드단면적이 선형적으로 변하는 Linear 후드, Fig.1(b)에는 2차 함수적으로 변하는 Parabolic 후드, Fig.1(c)에는 불연속적으로 변하는 Abrupt 후드를 나타내었다. Fig.1(a)에서  $A_{H0}$ ,  $A_H$ ,  $A_0$ ,  $A_T$ ,  $A_r$ 는 각각 후드입구의 단면적, 후드내 입구의 지점에서 단면적, 터널의 단면적, 열차의 단면적, 열차의 선두부 단면적이며,  $L$ ,  $L_N$ ,  $L_H$ 는 각각 터널의 길이, 열차 선두부의 길이, 입구후드의 길이이다. 또

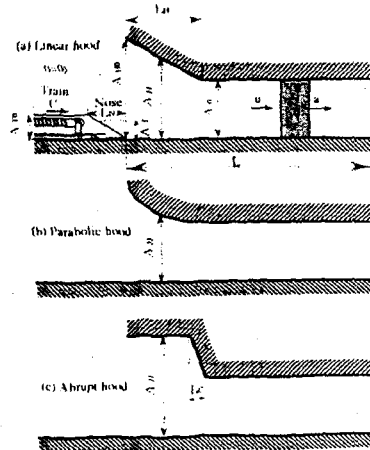


Fig. 1 Sketch of entrance hood

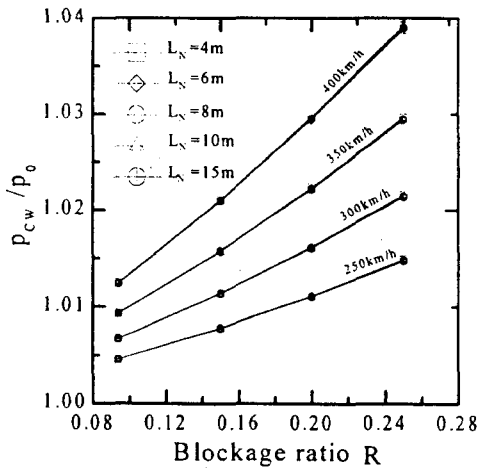
$U$ ,  $u$ ,  $a$ 는 각각 열차속도, 유체입자의 속도, 음속이며, Fig.1(c)에 나타난 바와 같이  $L_c$ 는 후드와 입구터널을 연결하는 불연속면의 길이이다.

### 3. 결과 및 고찰

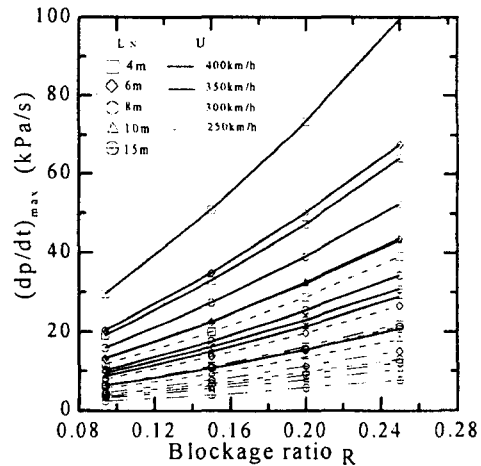
#### 3.1 Linear hood

Fig.2(a,b)는 열차속도  $U=250\sim 400\text{km/h}$ , 열차 선두부길이  $L_N=4\sim 15\text{m}$ ,  $A_{H0}/A_0=1.5$ ,  $L_H/D=1.0$ 의 선형후드인 경우, 열차와 터널의 단면적비  $R$ 에 대한 터널입구 압축파의 강도와 최대압력구배에 변화를 나타내었다. Fig.2(a)에서 터널입구에서 형성되는 압축파의 강도  $p_{cw}/p_0$ 는 열차 선두부길이  $L_N$ 에 거의 영향을 받지 않으며,  $R$ 과 열차속도  $U$ 가 증가할수록 커진다는 것을 알 수 있다. 예를 들면  $U=400\text{km/h}$ 인 경우  $R$ 의 값을 0.1에서 0.2로 증가시키면, 압축파의 강도는 약 1.013에서 1.03으로 증가한다. 이것으로부터 압축파의 강도는 열차선두부의 형상에는 거의 영향을 받지 않으며,  $R$ 의 값과 열차속도에 의존한다는 것을 알 수 있다.

Fig.2(b)에는  $L_N$ 과  $U$ 를 변화시킨 경우  $R$ 에 대한 압축파의 최대압력구배의 변화를 나타내었다. 그림에서 주어진  $R$  값에 대하여  $L_N$ 이 클수록, 또 열차진입 속도가 작을수록 최대압력구배의 값은 급격하게 감소한다. 또 열차의 속도가 일정할 경우  $R$ 이 증가할수록 최대압력구배는 커지게 되며, 이러한 경향은 열차의 속도가 증가할수록 뚜렷하게 나타난다. 구체적으로  $R=0.2$ 이고  $U=350\text{km/h}$ 인 경우,  $L_N$ 을 4m에서 15m로 증가시키는 경우 최대압력구배의 값은 약 47.16kPa/s에서 15.41kPa/s로 감소한다. 따라서 열차의 고속화에 수반되는 충격성 소음 및 터널내부의 압력변동을 경감시키기 위해서는 열차 선두부길이( $L_N$ )를 길게하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.



(a) Strength of compression wave



(b) Maximum pressure gradient of compression wave

Fig.2 Linear hood ( $A_{H0}/A_0=1.5$ ,  $L_H/D=1.0$ )

Fig.3에는 열차의 속도  $U=200, 250, 300, 350\text{km/h}$ , 후드길이  $L_H/D=0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0$  및 터널 단면적에 대한 열차 단면적비(blockage ratio)  $R=0.094$ 인 Linear 후드인 경우, 후드 각  $\theta$ 에 대한 터널내 압축파의 최대압력구배 값을 나타내었다. 그림에서 열차의 속도가 비교적 크고(예를 들면  $U=300\text{km/h}, 350\text{km/h}$ ),  $L_H/D$ 가 0.5로 작은 경우에 압축파의 최대압력구배는 후드각도  $\theta$ 가 증가함에 따라 단조롭게 감소한다. 그러나  $L_H/D$ 가 0.5보다 큰 경우에 압축파의 최대압력구배값은 어느  $\theta$  값에서 최소값을 가진다는 것을 알 수 있다. 구체적으로  $L_H/D=2.0$ ,  $U=350\text{km/h}$ 인 경우 압축파의 최대압력구배값은  $\theta=30^\circ$ 에서 최소로 된다. 이와 같이  $(dp/dt)_{\max}$ 의 값이 최소로 되는  $\theta$  값은  $L_H/D$ 값 뿐만 아니라 열차의 속도에도 강

하게 의존하는 것을 알 수 있다. 본 연구의 결과로부터 Linear 후드를 적용하는 경우 후드 길이와 열차속도가 알려지면, 충격성 소음을 최소로 하는 입구후드의 각도를 결정할 수 있으며, 터널출구 부근에서 발생하는 충격성 소음의 저감책으로 후드의 무차원 길이를 길게하는 것이 바람직하다. 한편 열차의 속도가 비교적 낮은 경우(예를 들면  $U=200\text{km/h}$ ), 압력구배의 최대값은 입구후드의 각도에 크게 의존하지 않는다.

Fig.4에는 Fig.3과 동일한 조건에서 터널입구에서 발생하는 압축파의 최대압력구배의 값을  $A_{H0}/A_0$ 에 대하여 나타내었다. 문헌(15)와 (16)에서는 열차속도  $U=200, 300\text{km/h}$ ,  $L_H/D=0.5, 1.0, 1.5$ 의 선형후드인 경우  $A_{H0}/A_0$ 의 값이 2.0이하의 영역에서 압축파의 최대압력구배 값을 구하였으며, 압축파의 최대압력구배의 값은  $A_{H0}/A_0$ 가 증가할수록 단조롭게 감소한다는 것을 보고하였다. 그러나 본 연구에서  $A_{H0}/A_0=2.0$  이상의 범위에 대하여 각 열차속도와  $L_H/D$ 에 따라 어떤  $A_{H0}/A_0$ 의 값에서 최대압력구배의 최소값이 나타나며, 그 후 더욱  $A_{H0}/A_0$ 가 증가함에 따라 최대압력구배는 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 구체적으로  $U=350\text{km/h}$ 이고  $L_H/D=2.0$ 인 경우 압축파의 최대압력구배값은  $A_{H0}/A_0 \approx 4.5$ 에서 최소로 된다.  $A_{H0}/A_0$ 의 증가에 따라 최대압력구배가 증가하는 영역에서는 후드길이를 증가시킬수록 최대압력구배의 값이 감소한다. 예를 들면  $A_{H0}/A_0$ 가 6.0이고  $U=350\text{km/h}$ 인 경우  $L_H/D$ 의 값을 1.0에서 2.0으로 2배로 하면 압축파의 최대압력구배값은 약  $11\text{kPa/s}$ 에서  $8.5\text{kPa/s}$ 로 감소하게 된다.

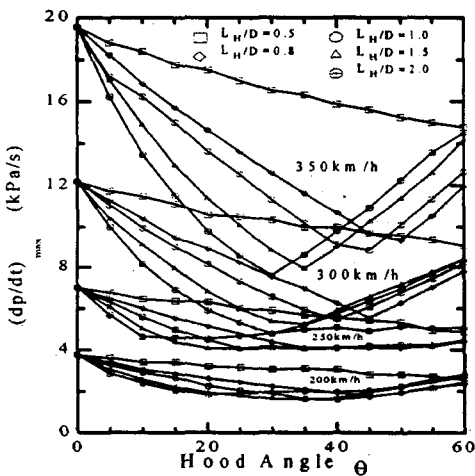


Fig.3 Maximum pressure gradient vs hood angle  
(Linear hood,  $R=0.094$ ,  $L_N=5\text{m}$ )

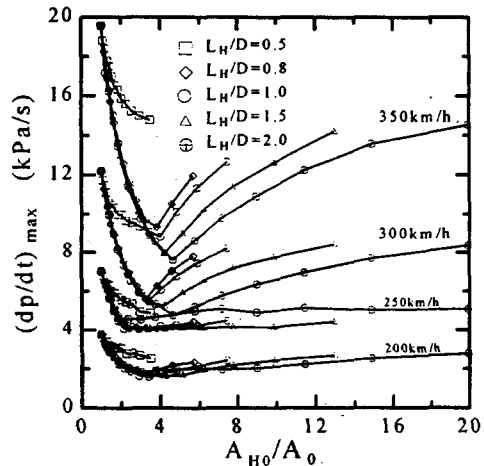


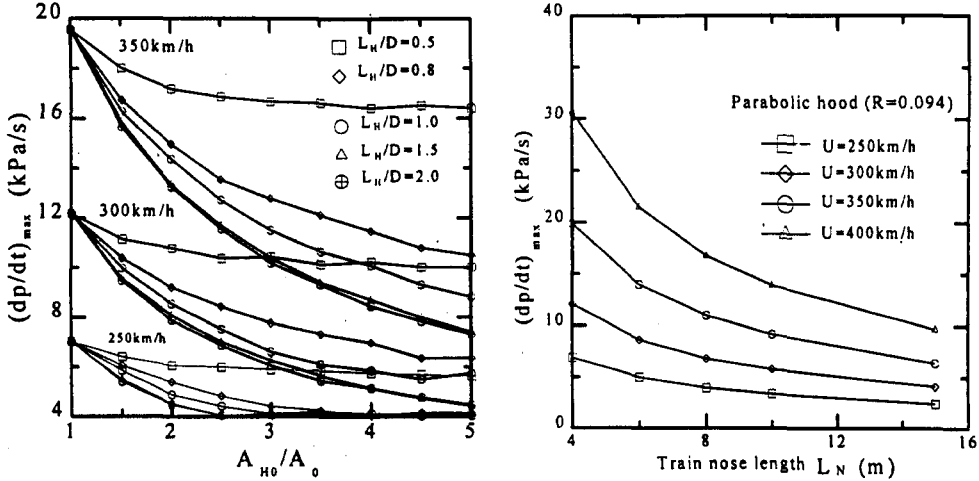
Fig.4 Maximum pressure gradient vs  $A_{H0}/A_0$   
(Linear hood,  $R=0.094$ ,  $L_N=5\text{m}$ )

### 3.2 Parabolic hood

Fig.5(a,b)에는  $R=0.094$ 의 Parabolic 후드인 경우에 대한 최대압력구배의 변화를 나타내었다. Fig.5(a)는  $A_{H0}/A_0$ 에 대한 압축파의 최대압력구배의 값을 나타내며,  $A_{H0}/A_0$ 가 주어지는 경우 최대압력구배의 값은 후드길이가 증가할수록 작아진다. 이러한 경향은 터널로 진입하는 열차의 속도가 증가할수록 뚜렷하게 나타난다. 예를 들면  $U=250\text{km/h}$ 이고  $A_{H0}/A_0=3$ 인 경우  $L_H/D$ 가 2.0에서 0.5로 작아지게 되면 최대압력구배의 값은  $4.14\text{kPa/s}$ 에서  $5.90\text{kPa/s}$ 로 약 43%정도 증가하지만,  $U=350\text{km/h}$ 인 경우에 대해서는  $10.19\text{kPa/s}$ 에서  $16.67\text{kPa/s}$ 로 약 64%정도 증가한다. Fig.4에서 기술한 Linear 후드의 경우와는 달리 압축파의 최대압력구배는  $A_{H0}/A_0$ 가 증가함에 따라 단조롭게 감소하는 것을 알 수 있다.

문헌(15,16)에서는  $A_{H0}/A_0$ 의 값이 2.0이하의 영역에서 Linear 후드와 Parabolic 후드에서 최대압력구배의 특성은 거의 일치한다고 보고하였다. 본 연구의 결과로부터  $A_{H0}/A_0$ 의 값을 2.0이상으로 더욱 증가시키는 경우 Linear 후드와 Parabolic 후드에 대한 최대압력구배는 서

로 일치하지 않는다. Fig.5(b)는 열차 선두부길이  $L_N$ 에 대한 최대압력구배의 값을 나타낸다. Parabolic 후드에서  $L_N$ 이 증가하면  $(dp/dt)_{max}$ 는 작아진다.



(a) Maximum pressure gradient vs  $A_{H0}/A_0$

(b) Effect of  $L_N$  on maximum pressure gradient  
( $A_{H0}/A_0=1.5$ ,  $L_H/D=1.0$ )

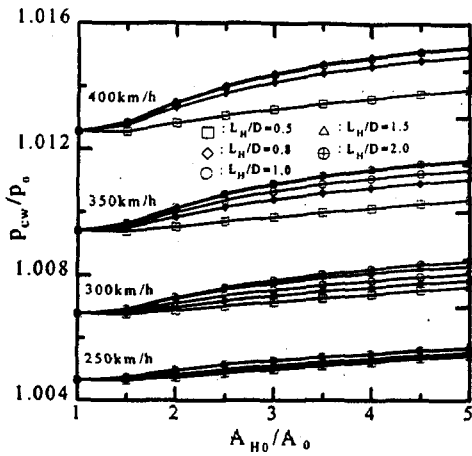
Fig.5 Parabolic hood ( $R=0.094$ )

### 3.3 Abrupt hood

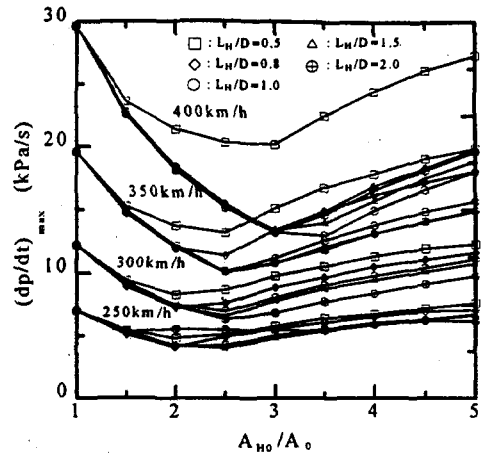
Fig.6(a,b)에는  $R=0.094$ ,  $L_N=5m$ 인 Abrupt 후드에 대하여 열차속도와  $L_H/D$ 를 변화시킨 경우,  $A_{H0}/A_0$ 가 터널입구에서 발생하는 압축파의 강도와 최대압력구배에 미치는 영향을 나타내었다. Fig.6(a)에서 압축파의 강도  $p_{cw}/p_0$ 는  $A_{H0}/A_0$ 가 증가할수록, 또 열차속도가 증가할수록 커지게 된다. 그리고 열차의 속도와  $A_{H0}/A_0$ 가 일정한 경우 후드의 길이가 증가할수록 압축파의 강도는 증가한다. 그러나 열차의 속도가 비교적 작은 경우에는 입구후드의 영향은 뚜렷하게 나타나지 않는다. 그림에서  $A_{H0}/A_0$ 가 일정할 때 열차의 속도가 증가할수록, 또 후드길이가 길어질수록 압축파의 강도는 커진다. 이러한 경향은  $A_{H0}/A_0$ 의 값이 증가할수록 뚜렷하게 나타난다.

Fig.6(b)는  $A_{H0}/A_0$ 에 대한 최대압력구배의 값을 나타내었다. 그림에서 최대압력구배가 최소로 되는  $A_{H0}/A_0$ 의 값을 Linear 후드와 비교하면, 같은  $U$ 와  $L_H/D$ 에 대하여 압축파의 최대압력구배는 보다 작은  $A_{H0}/A_0$ 값에서 나타나는 것을 알 수 있다. 예를 들면 열차속도  $U=300km/h$ ,  $L_H/D=1.0$ 일 때 Linear 후드와 Parabolic 후드에서 최대압력구배가 최소로 되는  $A_{H0}/A_0$ 의 값은 4.5인 반면, Abrupt 후드인 경우에는 약 2.5에서 나타난다. 또 그림으로부터 열차의 속도가 변화하는 경우, 최대압력구배가 최소로 되는  $A_{H0}/A_0$ 의 값이 변화하는 것을 알 수 있다. 구체적으로 Abrupt 후드의 경우 열차속도  $U=250\sim350km/h$ 일 때 최대압력구배가 최소로 되는  $A_{H0}/A_0$ 의 값은 약 2.5로, 열차속도가 400km/h로 증가하는 경우에는 약 3.0으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

한편 그림에서 최대압력구배가 최소로 되는  $A_{H0}/A_0$ 의 값을 기준으로 하여, 이 값보다 작은  $A_{H0}/A_0$ 의 영역에서는 열차의 속도에 따른 후드길이의 영향이 뚜렷하게 나타나지 않으나, 이 값보다 큰 영역에서는 후드의 영향이 크게 나타나게 된다.  $A_{H0}/A_0=4.5$ 이고  $U=400 km/h$ 일 때 후드길이가 압축파의 최대압력구배에 미치는 영향을 고찰해 보면, 후드길이가 증가할수록 압축파의 최대압력구배의 값은 감소하며, 어떤 후드길이에서 최소값을 가진다는 것을 알 수 있다.



(a) Strength of compression wave



(b) Maximum pressure gradient vs  $A_{H0}/A_0$

Fig.6 Abrupt hood ( $R=0.094$ )

### 3.4 각 후드의 비교

Fig.7에는 열차속도  $U=300\text{km/h}$ , 후드길이  $L_H/D=1.0$ ,  $A_{H0}/A_0=1.5$  인 위의 세가지 후드와 후드를 적용하지 않은 경우 ( $A_{H0}/A_0=1.0$ )에 대하여, 터널입구로부터의 무차원 거리  $x/D=3.43$ 인 위치에서 터널내에서 형성되는 압축파의 최대압력구배값을 비교하였다. 그림에서 터널입구에서 발생하는 압축파는 입구 후드를 적용하지 않은 경우에는 압력구배가 매우 크지만, 입구후드를 적용하게 되면 압력구배의 최대값 값은 작아진다는 것을 알 수 있다. 구체적으로 최대압력구배의 값은 후드가 없는 경우가 가장 크며, 그리고 Parabolic, Linear, Abrupt 후드 순으로 작아진다. 한편 입구후드를 설치하는 경우에 후드의 영향으로 인하여 압축파의 파미부분에 높은 압력구배가 나타나며, 이 압력구배의 최대값은 Abrupt 후드에서 가장 크다. 터널입구에서 발생한 압축파가 터널내를 전파하여 대기로 방출할 때 충격성 소음은 압축파면의 최대압력구배에 의존한다. 따라서 본 연구의 결과로부터 입구후드를 적용하지 않은 경우에 비하여 입구후드를 설치하게 되면 충격성 소음의 크기는 작아지며, 다른 후드에 비하여 Abrupt 후드가 가장 낮은 충격성 소음을 기대할 수 있다.

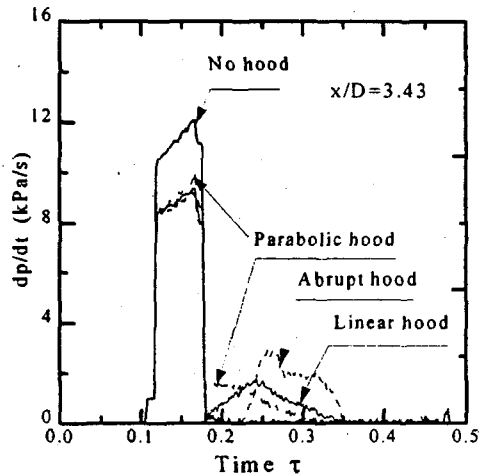


Fig.7 Effect of hood shape on pressure gradient of compression wave

( $U=300\text{km/h}$ ,  $L_H/D=10$ ,  $A_{H0}/A_0=15$ )

### 4. 결론

고속철도 터널입구에서 형성되는 압축파의 특성을 조사하기 위하여 터널입구에 세 형태의 후드를 설치하여 수치계산을 수행하였다. 수치계산 결과들은 입구후드가 압축파에 미치는 영향을 규명하는데 이용되었다. 본 연구로부터 얻어진 결과들은 다음과 같이 요약된다.

- (1) 터널입구에서 발생하는 압축파의 강도는 열차선두부의 형상에는 거의 영향을 받지 않으며, 열차와 터널의 단면적비  $R$ 과 열차속도에 의존한다.
- (2) Linear 후드를 적용하는 경우 후드길이와 열차의 진입속도가 주어지면, 충격성 소음을 최소로 하는 후드각도를 예측할 수 있다.

- (3) Parabolic 후드인 경우에, 압축파의 최대압력구배는 후드와 터널의 단면적비  $A_{H0}/A_0$ 가 증가함에 따라 감소한다.
- (4) Abrupt 후드의 경우 열차의 속도에 따라 충격성 소음을 최소화 하는 후드와 터널의 단면적비  $A_{H0}/A_0$ 가 존재한다.
- (5) 같은 열차의 속도와 입구후드의 길이에 대하여 압축파의 최대압력구배는 Parabolic 후드가 가장 크며, Abrupt 후드가 가장 작다.

#### 참 고 문 헌

1. 김희동 (1994), "고속철도 터널출구에서 발생하는 유체역학적 파동현상," 大韓機械學會 學會誌, 第34卷, 第10號, pp.796~807.
2. Kim, H.D. and Setoguchi, T. (1998), "Open End Correction in Compression Wave Discharge Problem from an Open End of a Duct," AIAA Journal(submitted).
3. Kim, H.D. and Setoguchi, T. (1998), "Impulse Noise and Its Control," Progress in Aerospace Sciences, Pergamon Press (to be published).
4. Kim, H.D. and Setoguchi, T. (1998), "Discharge of Weak Shock from an Open End of a Duct," Jour. Sound and Vibration (to be published).
5. 김희동, 松尾一泰 (1994), "고속철도 터널에서 발생하는 파동현상에 관한 충격파관의 연구 (1) (압축파의 특성에 대하여)," 大韓機械學會論文集, 第18卷, 第10號, pp.2686~2697.
6. 김희동 (1997), "터널내를 주행하는 열차의 공기역학적 해석(I) -1열차의 공기 역학-," 大韓機械學會論文集, 第21卷, 第8號, pp.963~972.
7. 김희동 (1997), "터널내를 주행하는 열차의 공기역학적 해석(II) -2열차의 공기 역학-," 大韓機械學會論文集, 第21卷, 第8號, pp.983~995.
8. Dayman, B. and Vardy, A.E., (1979), "Alleviation of Tunnel Entry Pressure Transients : 1. Experimental Program," 3rd Intl. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, March, Sheffield University, England, pp.343~362.
9. 김희동, 瀬戸口俊明 (1997), "수직갱을 이용한 터널내 비정상 압축파의 피동제어," 大韓機械學會論文集, 第21卷, 第9號, pp.1095~1104.
10. Kim, H.D. and Setoguchi, T. (1997), "Passive Control of Unsteady Compression Wave Using Porous Walls," International Conf. on Fluid Engineering, July, Tokyo, Japan.
11. 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, Yokohama, Japan.
12. 김희동 (1994), "직관내를 전파하는 압축파에 관한 기초적 연구," 安東大學校 基礎科學研究所, 第8輯, pp.73~89.
13. 김희동, 瀬戸口俊明 (1996), "고속철도 터널출구에서 발생하는 충격성 소음의 저감을 위한 실험적 연구," 大韓機械學會論文集, 第20卷, 第7號, pp.2375~2385.
14. 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.
15. Kage, K., Kawagoe, S. and Matsuo, K. (1992), "高速列車によって發生するトンネル入口波の數値解析(第1報, 列車の鼻部長さおよび列車斷面的の影響)" 日本機械學會論文集, 第58卷 第547号, pp.815~819.
16. Kage, K., Okubayashi, T., Kariya, T. and Kawagoe, S. (1996), "高速列車によって發生するトンネル入口波の數値解析(列車鼻部形狀の影響)" 日本機械學會論文集, 第62卷 第598号, pp.218~223.