

입구후드가 고속철도 터널입구의 압축파에 미치는 영향

김회동* · 김태호** · 김동현***
(1998년 3월 12일 접수)

Effect of Tunnel Entrance Hood on Entry Compression Wave

Heuy-Dong Kim, Tae-Ho Kim and Dong-Hyeon Kim

Key Words: Compression Wave(압축파), Impulsive Noise(충격성소음), High Speed Railway(고속철도), Compressible Flow(압축성유동), Unsteady Flow(비정상유동), Internal Flow(내부유동)

Abstract

The entry compression wave, which forms at the entrance of a high-speed railway tunnel, is closely related to the pressure transients in the train/tunnel systems as well as an impulsive noise appearing at the exit 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. Optimum hood shape necessary to reduce the pressure transients and impulsive noise was found to be of an abrupt type hood with its cross-sectional area 2.5 times the tunnel area. It is believed that the current results are highly useful in predicting the effects of entrance hoods and in choosing the shape of proper hood.

기호설명

- A_0 : 터널 단면적
- A_{HO} : 입구후드 단면적
- A_{TO} : 열차 단면적
- A_T : 열차 선두부 단면적
- D : 터널 통가직경
- L : 터널 길이
- L_C : 입구후드의 불연속면 길이
- L_H : 후드 길이
- L_N : 열차 선두부 길이
- R : 열차와 터널의 단면적비(Blockage ratio)
- U : 열차 속도
- a_0 : 대기상태의 음속
- γ : 기체의 비열비
- θ : 선형후드의 경사각

1. 서론

열차가 고속으로 터널에 돌입하게 되는 경우 반대편 터널출구에서 발파음에 가까운 충격성 소음이 발생하여, 주변의 구조물은 물론 주거환경에 심각한 지장음을 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^(1,2)에 의하면, 터널내부 및 외부에서 발생하는 파동현상은

* 회원, 안동대학교 기계공학과
** 회원, 안동정보대학 기계과
*** 회원, 한국철도기술연구원

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^(3,4). 따라서 이들 압력파의 특성에 대한 이해는 적절한 정감법을 찾는 데 있어서 필수적이다.

고속열차가 터널에 돌입함으로써 터널 입구에서 발생하는 압축파의 특성은 압축파의 파잉압력, 파면의 압력구배 그리고 파장 등으로 나타낼 수 있다⁽⁵⁾. 종래의 연구에 의하면^(6,7) 압축파의 파잉압력은 열차의 속도, 열차와 터널의 단면적비에 의하여 결정되며, 열차속도가 대략 200~300 km/h 범위에 대해서는 파잉압력은 수 kPa 정도인 것으로 알려져 있다.

실제의 고속철도 터널에서 발생하는 파동현상은 압력파의 파잉압력보다도 파면의 형상 즉 파면의 압력구배에 의하여 큰 영향을 받게 된다. 따라서 고속철도 터널에서 발생하는 파동현상을 정감시키는 방법들은 주로 압력파 파면의 압력구배를 완만하게 하는 방향으로 전개되어 왔으며, 다음과 같은 대책들이 제안되었다. (1) 터널 입구에 후드 등을 설치하여, 열차가 터널에 돌입하는 것에 의하여 발생하는 압축파 파면의 압력구배를 처음부터 작게 한다⁽⁸⁾. (2) 터널내의 압축된 공기를 터널 외부로 축출할 수 있는 구멍 혹은 갱도를 설치한다⁽⁹⁾. (3) 터널내에 액적운 분무한다든지, 선로의 자갈을 적절하게 이용하거나, 터널 벽에 흡음재를 적용시키는 등의 방법을 이용하여, 터널내를 전파하는 압축파를 감쇠시킨다^(10,11). (4) 터널 벽에 반사판을 설치하여 압축파의 전파에 수반되는 에너지 소산효과(dissipation effect)를 크게 한다⁽¹²⁾. (5) 발생한 미기압파를 터널 출구 부근에서 적절하게 제어한다^(13,14).

그러나 이와 같은 저감대책들은 현재까지 충분히 시험되지 않았으며, 위의 (1)~(5)의 저감요인은 잘 알려져 있지 않다. 더욱이 장래 추진될 열차의 고속화에 대비하여 이들의 저감대책은 실제로 매우 중요하게 되므로, 이들에 대한 체계적인 연구가 요망된다.

최근 Kage 등^(15,16)은 특성곡선법을 이용한 수

치계산법을 수행하여, 터널입구에 설치하는 입구후드가 터널내 압축파에 미치는 영향을 조사하였다. 그들의 연구결과로부터 입구후드가 압축파의 특성에 미치는 영향을 개략적으로 예측할 수 있었으나, 매우 제한된 계산조건으로 인하여 입구후드의 최적형상을 제시하지는 못하였다. 더욱이 그들의 계산에서는 입구후드의 길이를 다양하게 변화시키지 않았으며, 열차의 속도를 300 km/h까지로 제한하였다. 따라서 현재 우리나라에서 추진하고 있는 한국형 고속 열차의 속도를 고려하여 입구후드의 최적설계를 위해서는 보다 구체적인 연구결과가 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 불연속(본문에서는 Abrupt라고 정의함) 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.

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

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

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

여기에서 A 는 시간과 거리에 의존하는 터널의 유효단면적이다. 열차의 돌입에 의하여 터널내에는 압축파가 발생하여 터널내를 전파하게 되므로, 다음과 같이 각각의 특성곡선으로 유동상태를 표현한다. 즉 위의 식(1)~(3)으로부터 유동상태량은 특성곡선 C^+ 와 C^- 에 대하여 다음과 같이

각각 쓰여진다.

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

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

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

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

Particle trajectory : along $dx/dt=u$

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

위의 각 특성곡선 C^+ 및 C^- 를 따르는 상태량의 수를 줄이기 위하여, 터널내외 임의의 점에서 압력 p , 음속 a 라고 가정하여, p_0 를 터널내외 초기압력 p_0 까지 등엔트로피적으로 변화시킬 때 음속을 a_a 라고 하면, a_a 는 다음과 같이 정리된다.

$$a_a = a \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \quad (7)$$

위의 식을 미분하여 얻어지는 dp 와 $a^2 = \gamma p / \rho$ 의 음속의 관계로부터 $d\rho$ 에 관한 식을 구할 수 있다. 이와 같이 얻어진 dp 와 $d\rho$ 를 위의 식(4)~(6)에 대입하여 정리하면, 특성방정식은 다음과 같이 다시 쓰여진다.

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

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

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

$$da - \frac{a}{a_a} da_a - \frac{\gamma-1}{2} du + \frac{(\gamma-1)ua}{2A} \frac{\partial A}{\partial x} dt + \frac{(\gamma-1)a}{2\gamma A} \frac{\partial A}{\partial t} dt = 0 \quad (9)$$

Particle trajectory : along $dx/dt=u$

$$\frac{2a^2}{a_a} da_a - \frac{\gamma-1}{A} \frac{p}{\rho} \frac{\partial A}{\partial t} dt = 0 \quad (10)$$

위의 식들에 포함되어 있는 상태량들의 무차원화를 위하여 다음과 같은 무차원 상태량을 도입한다.

$$C = \frac{a}{a_0}, \quad C_a = \frac{a_a}{a_0}, \quad X = \frac{x}{L}, \quad \tau = \frac{a_0 t}{L}, \quad U = \frac{u}{a_0} \quad (11)$$

여기에서 a_0 는 대기의 음속이며, L 은 터널의 길이이다. 위의 식(11)을 식(8)~(10)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 새로운 무차원 특성방정식이 얻어진다.

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

$$dC + \frac{\gamma-1}{2} dU = \frac{C}{C_a} dC_a - \frac{(\gamma-1)C}{2\gamma A} \frac{dA}{d\tau} d\tau - \frac{(\gamma-1)CU}{2A} \frac{dA}{dX} dX \quad (12)$$

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

$$dC - \frac{\gamma-1}{2} dU = \frac{C}{C_a} dC_a - \frac{(\gamma-1)C}{2\gamma A} \frac{dA}{d\tau} d\tau - \frac{(\gamma-1)CU}{2A} \frac{dA}{dX} dX \quad (13)$$

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

$$dC_a = \frac{(\gamma-1)C_a}{2\gamma A} \frac{dA}{d\tau} d\tau \quad (14)$$

위의 식들에서 열차가 터널에 진입함에 따라 $(dA/d\tau)/A$ 및 $(dA/dX)/A$ 의 값이 알려지면, 식(14)의 입자궤적식으로부터 dC_a 가 얻어지며, C^+ 와 C^- 의 특성선으로부터 dU 와 dC 가 구해지므로, 모든 격자점에서 유동의 상태량들이 구해진다.

본 수치계산에서는 대기압 $p_0=101.3\text{kPa}$, 대기 음속 $a_0=340\text{m/s}$, 공기의 비열비 $\gamma=1.402$ 로 가정하였다. 열차는 등속도로 진행하며, 수치계산은 열차의 선두부가 터널에 진입함과 동시에 시작되었다. 또 열차가 터널에 진입하기 직전의 주위의 유동은 계산에 고려하지 않았다.

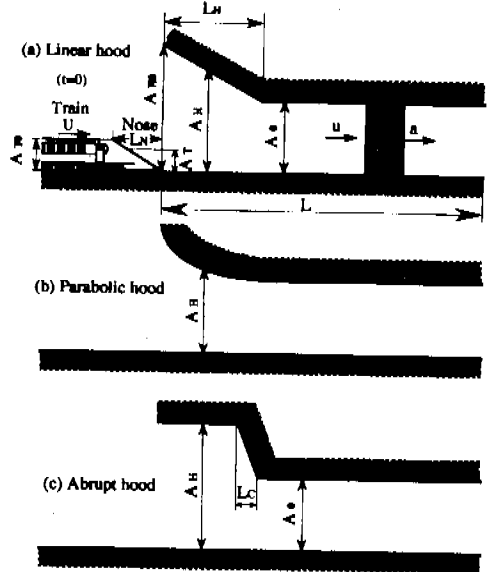


Fig.1 Shape of tunnel entrance hood.

본 계산에 이용된 후드형상의 개략도들

Fig.1(a, b, c)에 나타내었다. Fig.1(a)에는 후드단면적이 선형적으로 변하는 선형(Linear) 후드, Fig.1(b)에는 2차 함수적으로 변하는 곡선형(Parabolic) 후드, Fig.1(c)에는 불연속적으로 변하는 불연속(Abrupt) 후드를 나타내었다. Fig.1(a)에서 A_{H0} , A_H , A_0 , A_{T0} , A_T 는 각각 후드입구의 단면적, 후드내 임의의 지점에서 단면적, 터널의 단면적, 열차의 단면적, 열차의 선두부 단면적이며, L , L_N , L_H 는 각각 터널의 길이, 열차 선두부의 길이, 입구후드의 길이를 나타낸다. 또 U , u , a 는 각각 열차속도, 유체입자의 속도, 음속이며, Fig.1(c)에 나타낸 바와 같이 $L_c(=2m)$ 는 후드와 입구터널을 연결하는 불연속면의 길이이다. 한편 Fig.1(a)는 본 계산의 초기상태($t=0$)로 열차의 선단이 후드입구에 위치한다.

터널 단면적과 열차의 단면적은 실제 한국형 고속열차를 참조하여, $A_0=107m^2$, $A_m=10.1m^2$ 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 입구 압축파에 미치는 영향을 조사하였다.

수치계산에서 사용된 격자점은 등간격으로 약 5000개이었으며, Δx 는 격자간의 거리, 그리고 첫 번째 격자점 $i=1$ 과 계산영역의 최하류단의 격자점 $i=i_{max}$ 는 각각 후드입구면과 터널출구면에 대응한다. 수치계산의 시간간격 $\Delta \tau=0.9 \Delta x$ 로 가정하였다.

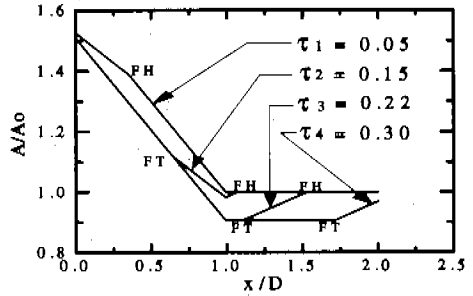
3. 결과 및 고찰

3.1 선형후드(Linear hood)

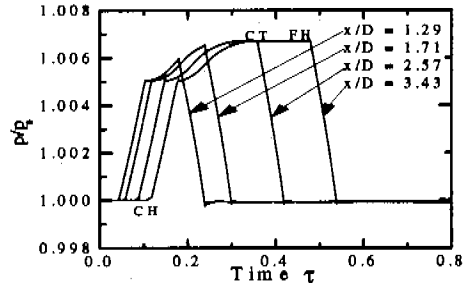
Fig.2(a,b,c)에는 열차속도 $U=300km/h$, 입구후드의 무차원 길이 $L_H/D=1.0$, 후드각 $\theta=15^\circ$ 인 선형후드에 대한 A/A_0 , p/p_0 및 압축파면의 압력구배 dp/dt 를 나타내었다. Fig.2(a)는 열차 진입후의 각 무차원 시간 τ 에 대하여 터널 유효단면적을 나타내었으며, 그림에서 점 FH와 FT는 각각 열차 선두부의 선단, 후단이며, 그림의 횡축 $x/D=1.0$ 은 터널입구면에 대응한다.

Fig.2(b)는 터널내의 각 위치에서 압력의 시간변화를 나타낸다. 그림에서 CH, CT는 열차가 터널에 진입하는 경우에, 터널입구에서 발생한 압축파의 파두(head of wave)와 파미(tail of wave)를 나타낸다. 예를 들어 위치 $x/D=3.43$ 에서 압축

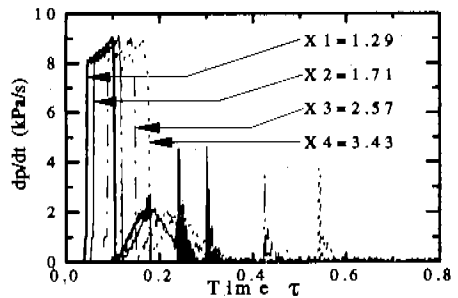
파에 의한 압력변화에 대하여 기술하면, 압축파가 측정점($x/D=3.43$)에 도달함으로써 압력은 급격하게 증가하게 되며, 그후 입구후드의 영향으로 압력 상승의 구배가 보다 완만해진다. 압축파의 파미부분에서 압력은 거의 일정하게 되며, 열차가 측정점을 통과할 때 압력은 급격히 낮아지게 된다.



(a) Variation of tunnel effective area



(b) Pressure distribution in tunnel



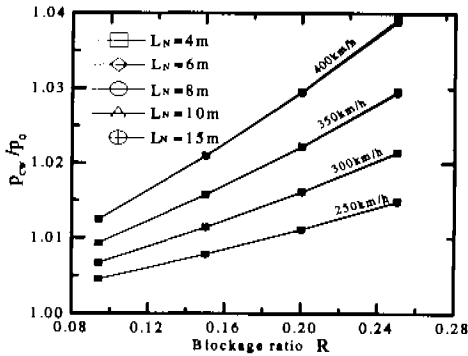
(c) Pressure gradient of compression wave

Fig.2 Linear hood.

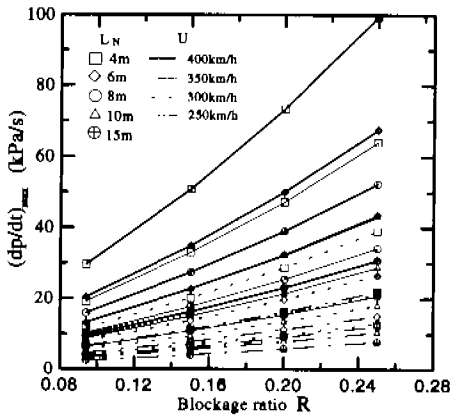
($R=0.094$, $U=300km/h$, $L_H/D=1.0$, $\theta=15^\circ$)

본 연구에서는 압축파의 통과로 인하여 압력 상승의 최대값을 압축파의 강도 p_{cw} 로 정의하였다. 또 점 CH로부터 CT까지를 터널내의 압축파라고 정의하였으며, 그 시간폭을 터널내 압축파

의 폭이라고 정의한다⁽¹⁵⁾. Fig.2(c)에는 터널내를 전파하는 압축파의 압력구배를 무차원 시간에 대하여 나타내었다. 그림에서 압축파의 파두에서 압력구배가 가장 크며, 측정점 $x/D=1.29$ 으로부터 $x/D=3.43$ 까지 압축파가 전파하는 동안에 압축파의 최대압력구배는 거의 변화하지 않는다.



(a) Strength of compression wave



(b) Maximum pressure gradient
Fig.3 Linear hood.
 ($A_H/A_0=1.5$, $L_H/D=1.0$)

Fig.3(a,b)는 열차속도 $U=250\sim 400\text{km/h}$, 열차 선두부길이 $L_N=4\sim 15\text{m}$, $A_H/A_0=1.5$, $L_H/D=1.0$ 의 선형 후드인 경우, 열차와 터널의 단면적비 R 에 대한 터널입구 압축파의 강도와 최대압력구배에 변화를 나타내었다. Fig.3(a)에서 터널입구에서 형성되는 압축파의 강도 P_w/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 1.03

으로 증가한다. 이것으로부터 압축파의 강도는 열차선두부의 형상에는 거의 영향을 받지 않으며, R 의 값과 열차속도에 의존한다는 것을 알 수 있다. Fig.3(b)에는 L_N 과 U 를 변화시킨 경우 R 에 대한 압축파의 최대압력구배의 변화량 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 고속화를 추진해 가면서, 터널출구의 충격성 소음 및 터널내부의 압력변동을 경감시키기 위해서는 열차 선두부길이(L_N)를 길게 하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

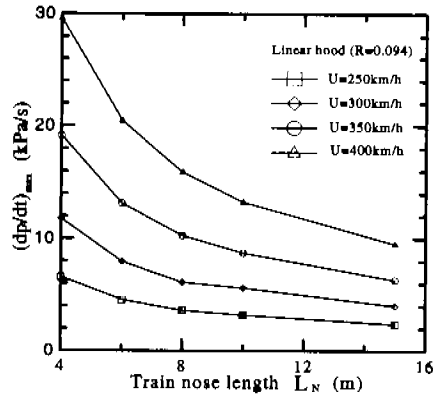


Fig.4 Effects of L_N on maximum pressure gradient.
 (Linear hood, $A_H/A_0=1.5$, $L_H/D=1.0$)

Fig.4에는 한국형 고속철도의 $R=0.094$ 인 경우 열차 선두부길이 L_N 과 최대압력구배의 관계를 나타내었으며, 그림에서 열차속도는 250~400km/h로 변화시켰다. 그림으로부터 주어진 열차속도에 대하여 최대압력구배의 값은 L_N 값을 길게 할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 예를 들면 $U=350\text{km/h}$ 인 경우 L_N 의 값을 4m에서 15m로 길게하면, 압축파의 최대압력구배의 값은 29.58kPa/s에서 9.52kPa/s로 감소한다. 또 L_N 이 일정할 경우 터널로 진입하는 열차의 속도를 증가시키면 압축

파의 최대압력구배는 증가하게 된다. 즉 $L_N=8m$ 일 때 열차속도를 250km/h에서 400km/h로 증가시키면, 압축파의 최대압력구배의 값은 3.61kPa/s에서 15.90kPa/s로 증가한다. 이것으로부터 터널입구에서 발생하는 압축파의 최대압력구배값은 열차선두부의 형상뿐만 아니라 열차의 진입속도에도 강하게 의존하는 것을 알 수 있다.

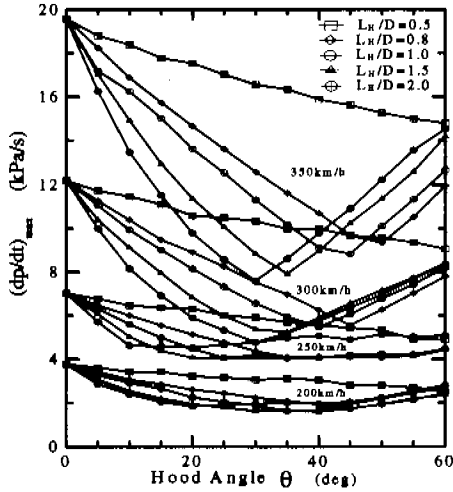


Fig.5 Maximum pressure gradient vs hood angle. (Linear hood, $R=0.094$, $L_N=5m$)

Fig.5에는 열차의 진입속도 $U=200, 250, 300, 350km/h$, 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 선형 후드인 경우, 후드각 θ 에 대한 터널내 압축파의 최대압력구배 값을 나타내었다. 그림에서 열차의 속도가 비교적 크고(예를 들면 $U=300km/h, 350km/h$), L_H/D 가 0.5로 작은 경우에 압축파의 최대압력구배는 후드각도 θ 가 증가함에 따라 단조롭게 감소한다. 그러나 L_H/D 가 0.5보다 큰 경우에 압축파의 최대압력구배값은 어느 θ 값에서 최소값을 가짐을 알 수 있다. 구체적으로 $L_H/D=2.0, U=350km/h$ 인 경우 압축파의 최대압력구배값은 $\theta=30^\circ$ 에서 최소로 된다. 이와 같이 $(dp/dt)_{max}$ 가 최저로 되는 θ 값은 L_H/D 값 뿐만 아니라 열차의 속도에도 강하게 의존하는 것을 알 수 있다. 본 연구의 결과로부터 선형 후드를 적용하는 경우 후드길이와 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 $U=200km/h$), 압력구배의 최대값은 입구후드의 각도에 크게 의존하지 않는다.

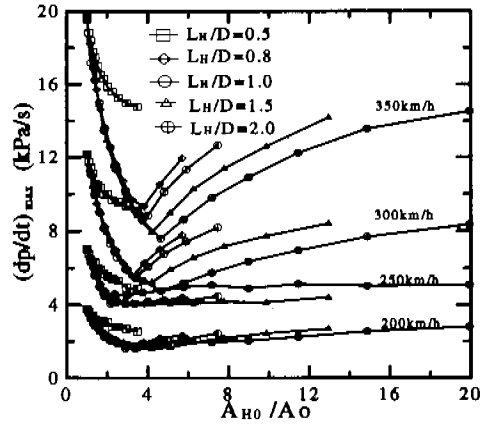


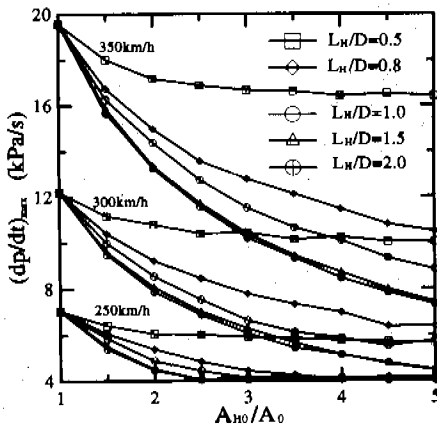
Fig.6 Maximum pressure gradient vs A_{H0}/A_0 (Linear hood, $R=0.094$, $L_N=5m$).

Fig.6에는 Fig.5와 동일한 조건에서 터널입구에서 발생하는 압축파의 최대압력구배의 값을 A_{H0}/A_0 에 대하여 나타내었다. 문헌(15,16)에서는 열차속도 $U=200, 300km/h, L_H/D=0.5, 1.0, 1.5$ 의 선형 후드인 경우 A_{H0}/A_0 의 값이 2.0이하의 영역에서 압축파의 최대압력구배값을 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 $U=350km/h$ 이고 $L_H/D=2.0$ 인 경우 압축파의 최대압력구배값은 A_{H0}/A_0 약 4.5에서 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 $U=350km/h$ 인 경우 L_H/D 의 값을 1.0에서 2.0으로 2배로 하면 압축파의 최대압력구배값은 약 11kPa/s에서 8.5kPa/s로 감소하게 된다.

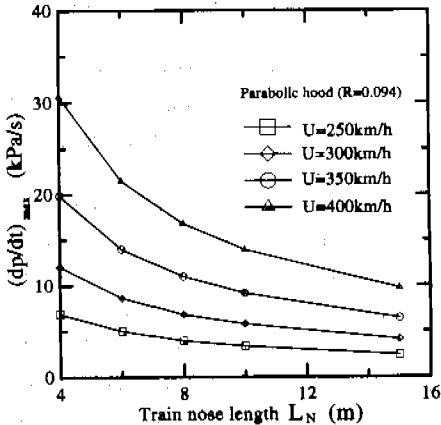
3.2 곡선형 후드(Parabolic hood)

Fig.7(a,b)에는 $R=0.094$ 의 곡선형 후드인 경우

에 대한 최대압력구배의 변화를 나타내었다. Fig.7(a)는 A_{H0}/A_0 에 대한 압축파의 최대압력구배의 값을 나타내며, A_{H0}/A_0 가 일정한 값일 때, 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 0.5으로 작아지게 되면 최대압력구배의 값은 4.14kPa/s 에서 5.90kPa/s 로 약 43%정도 증가하지만, $U=350\text{km/h}$ 인 경우에 대해서는 10.19kPa/s 에서 16.67kPa/s 로 약 64%정도 증가한다.



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

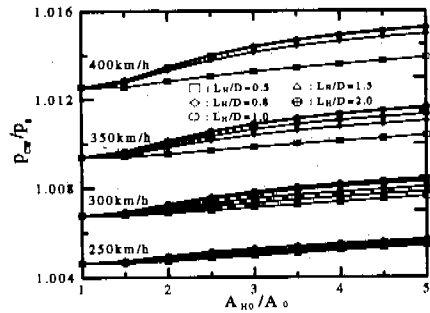


(b) Effects of L_N on maximum pressure gradient ($A_{H0}/A_0=1.5$, $L_H/D=1.0$)

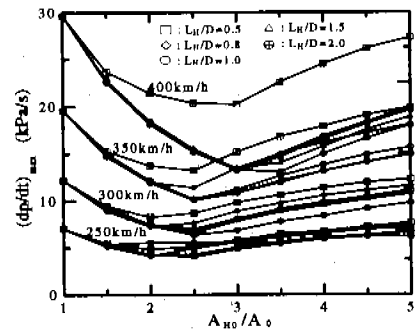
Fig.7 Parabolic hood ($R=0.094$).

Fig.6의 선형 후드의 경우와는 달리 압축파의 최대압력구배는 A_{H0}/A_0 가 증가함에 따라 단조롭

게 감소하는 것을 알 수 있다. 문헌(15,16)에서는 A_{H0}/A_0 의 값이 2.0이하의 영역에서 선형후드와 곡선형후드에서 최대압력구배의 특성은 거의 일치한다고 보고하였다. 본 연구의 결과로부터 A_{H0}/A_0 의 값을 2.0이상으로 더욱 증가시키는 경우 선형후드와 곡선형 후드에 대한 최대압력구배는 서로 일치하지 않는다. Fig.7(b)는 열차 선두 부길이 L_N 에 대한 최대압력구배의 값을 나타낸다. 곡선형 후드에서 L_N 이 증가하면 $(dp/dt)_{max}$ 는 작아진다. 또 Fig.4의 선형후드의 경우와 비교하여 보면, $L_N=4\text{m}$ 와 $U=400\text{km/h}$ 일 때 최대압력구배의 값은 곡선형 후드의 경우 약 30.67kPa/s 이며, 선형 후드인 경우의 29.58kPa/s 에 비하여 크다는 것을 알 수 있다.



(a) Strength of compression wave



(b) Maximum pressure gradient vs A_{H0}/A_0
Fig.8 Abrupt hood ($R=0.094$).

3.3 Abrupt 후드

Fig.8(a,b)에는 $R=0.094$, $L_N=5\text{m}$ 인 불연속 후드에 대하여 열차속도와 L_H/D 를 변화시킨 경우, A_{H0}/A_0 가 터널입구에서 발생하는 압축파의 강도와 최대압력구배에 미치는 영향을 나타내었다. Fig.8(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, 후드길이가 길어질수록 압축파의 강도는 커진다. 이러한 경향은 A_{H0}/A_0 의 값이 증가할수록 뚜렷하게 나타난다.

Fig.8(b)는 A_{H0}/A_0 에 대한 최대압력구배의 값을 나타낸다. 그림에서 최대압력구배가 최소로 되는 A_{H0}/A_0 의 값을 선형후드와 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 $U=300\text{km/h}$, $L_H/D=1.0$ 일 때 선형 후드와 곡선형 후드에서 최대압력구배가 최소로 되는 A_{H0}/A_0 의 값은 4.5인 반면, 불연속 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. 예를 들면 불연속 후드의 경우 열차속도 $U=250\sim 350\text{km/h}$ 일 때 최대압력구배가 최소로 되는 A_{H0}/A_0 의 값은 약 2.5로, 열차속도가 400km/h 로 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 $U=400\text{km/h}$ 일 때 후드길이가 압축파의 최대압력구배에 미치는 영향을 살펴 보면, 후드길이가 증가할수록 압축파의 최대압력구배의 값은 감소하며, 어떤 후드길이에서 최소값을 가진다는 것을 알 수 있다.

Fig.9에는 $A_{H0}/A_0=2.5$, $R=0.094$ 인 불연속 후드인 경우 L_H/D 의 값과 열차속도를 변화시켜 불연속 후드의 길이 L_c 가 터널내 압축파의 강도에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 압축파의 강도 P_{cw}/P_0 는 L_c 가 작아질수록, 열차속도가 증가할수록, 커지게 된다. 이와 같이 L_c 와 P_{cw}/P_0 의 관계에 미치는 후드길이의 영향은 열차의 속도가 고속일수록 뚜렷하게 나타나지만, 열차의 속도가 감소하는 경우에는 L_c 와 P_{cw}/P_0 에 미치는 후드길이의 영향은 크지 않다.

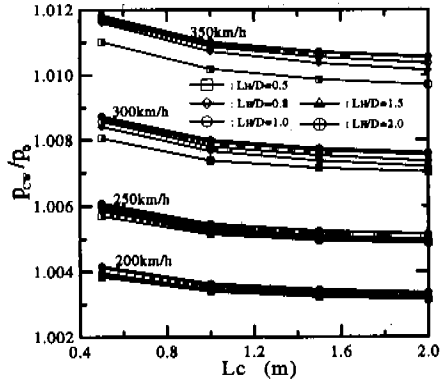


Fig. 9 Effect of L_c on strength of compression wave(Abrupt hood, $A_{H0}/A_0=2.5$, $R=0.094$).

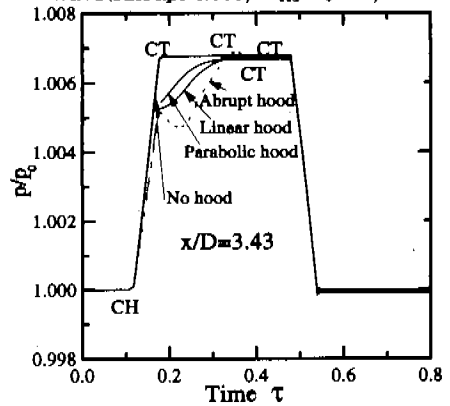


Fig.10 Comparison of each hood shape ($U=300\text{km/h}$, $L_H/D=1.0$, $A_{H0}/A_0=1.5$).

3.4 각 후드의 비교

Fig.10에는 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, 터널 입구로부터의 무차원 거리 $x/D=3.43$ 인 위치에서 터널내외 압축파에 의한 압력의 시간 변화를 비교하였다. 그림에서 굵은 실선은 후드를 설치하지 않은 경우, 일점쇄선은 곡선형 후드, 가는 실선은 선형 후드, 점선은 불연속 후드를 의미한다. 그림으로부터 CH에서 CT까지의 시간폭은 후드가 없는 경우에 비하여 후드를 설치하는 경우가 크며, 각 후드에 대해서는 곡선형, 선형, 불연속 후드 순서로 시간폭이 커진다는 것을 알 수 있다. 또 압축파의 강도는 후드에 따라 약간 변화한다는 것을 알 수 있다.

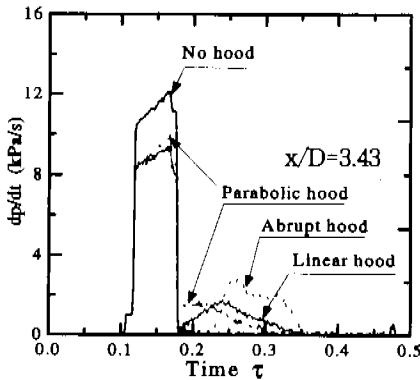


Fig.11 Effect of hood shape on pressure gradient of compression wave ($U=300\text{km/h}$, $L_H/D=1.0$, $A_{H0}/A_0=1.5$).

Fig.10과 동일한 조건에서 후드가 없는 경우와 각 후드의 영향을 비교하기 위하여, 압력구배의 시간적 변화를 Fig.11에 나타내었다. 그림에 나타난 선들은 Fig.10과 동일하다. 열차가 터널에 돌입함으로써 발생하는 압축파는 입구후드를 적용하지 않은 경우에는 압력구배가 매우 크지만, 입구후드를 적용하게 되면 압력구배 값은 작아진다. 구체적으로 최대압력구배의 값은 후드가 없는 경우가 가장 크며, 그리고 곡선형, 선형, 불연속 후드 순서로 작아진다는 것을 알 수 있다.

한편 입구후드를 설치하는 경우에 후드의 영향으로 인하여 압축파의 파피부분에 높은 압력구배가 나타나며, 이 압력구배의 최대값은 불연속 후드에서 가장 크다.

Fig.12에는 열차속도에 대하여 최대압력구배를 나타내었으며, 그림에서 굵은 실선은 불연속 후드, 가는 실선은 선형 후드, 점선은 곡선형 후드를 의미한다. 그림에서 주어진 열차속도와 후드 길이에 대하여 압축파의 최대압력구배는 곡선형 후드가 가장 크다. 이러한 경향은 속도를 증가할수록 뚜렷하게 나타난다. 예를 들면 열차속도 $U=350\text{ km/h}$ 이고 $L_H/D=0.5$ 일 때, 압축파의 최대압력구배값은 곡선형 후드에서는 18.02kPa/s , 선형 후드는 17.20kPa/s , 그리고 불연속 후드는 15.25 kPa/s 로 나타난다. 이것으로부터 후드길이 일정할 경우, 각 열차속도에 대하여 압축파의 최대압력구배는 곡선형 후드가 가장 크며, 불연속 후드가 가장 작게 나타난다.

터널입구에서 발생한 압축파가 터널내를 전파하여 대기로 방출할 때 충격성 소음은 압축파면

의 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.

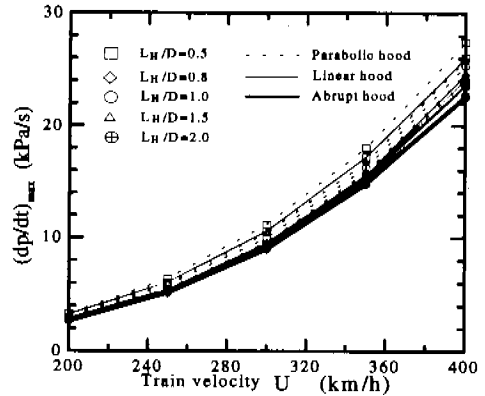


Fig.12 Effect of U on maximum pressure gradient of compression wave ($A_{H0}/A_0=1.5$, $R=0.094$).

Table 1 Comparison of compression wave characteristics in three entrance hoods ($L_H/D=1.0$, $A_{H0}/A_0=1.5$, $R=0.094$).

Train Velocity	Linear Hood		Parabolic Hood		Abrupt Hood	
	p_{cw}/p_0	$(dp/dt)_{max}$	p_{cw}/p_0	$(dp/dt)_{max}$	p_{cw}/p_0	$(dp/dt)_{max}$
250km/h	1.004577	5.820732	1.004593	5.85403	1.004676	5.239053
300km/h	1.006705	9.947942	1.006697	9.98966	1.006865	9.272518
350km/h	1.009297	16.20239	1.009318	16.27972	1.009567	15.00020

본 연구에서 적용된 세 가지 입구후드의 효과들을 비교하기 위하여 압축파 강도 p_{cw}/p_0 와 압축파의 최대압력구배 $(dp/dt)_{max}$ 를 Table 1에 나타내었다. Table의 세 형태의 입구후드에 대하여 압축파의 강도는 열차속도에 대하여 거의 일정한 형태로 변화하고 있지만, $(dp/dt)_{max}$ 의 값은 불연속 후드에서 가장 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 세가지 입구후드의 형태 중에서, 불연속형의 후드를 터널 입구에 설치하게 되면, 반대편 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음의 저감에 가장 효과적이라는 것을 예상할 수 있다.

4. 결 론

고속철도 터널입구에서 형성되는 압축파의 특

성을 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 열차 선두부의 형상에는 거의 영향을 받지 않으며, 열차와 터널의 단면적비 R과 열차속도에 의존한다.

(2) 터널입구에서 발생하는 압축파의 최대압력구배값은 열차선두부의 형상과 열차의 진입속도에 강하게 의존한다.

(3) 선형 후드를 적용하는 경우 후드길이와 열차의 진입속도가 주어지면, 충격성 소음을 최소로 하는 후드각도를 예측할 수 있다.

(4) 곡선형 후드인 경우에, 압축파의 최대압력구배는 후드와 터널의 단면적비 A_{H0}/A_0 가 증가함에 따라 감소한다.

(5) 불연속 후드의 경우 열차의 속도에 따라 충격성 소음을 최소로 하는 후드와 터널의 단면적비 A_{H0}/A_0 가 존재한다.

(6) 열차의 속도와 입구후드의 길이가 동일한 경우 압축파의 최대압력구배는 곡선형 후드가 가장 크며, 불연속 후드가 가장 작다.

참고문헌

(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) Matsuo, K. and Aoki, T., 1991, "Wave Problems in High-Speed Railway Tunnels," Proc. 18th International Symposium on Shock Waves, Ed. Takayama, K., Sendai, Jpn, pp.95~102.

(3) Kim, H.D. and Setoguchi, T., 1998, "Impulse Noise and Its Control," Progress in Aerospace Sciences, Vol.34, pp.1~44.

(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, Matsuo, K., 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 공기역학—," 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 공기역학—," 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, Setoguchi, T., 1997, "수직경을 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, 엄용균, 신현승, 이종수, 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, Setoguchi, T., 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, "Numerical Study of Compression Waves Produced by High-Speed Trains Entering a Tunnel(1st Report, Effects of Nose Length and Cross-Sectional Area of Train)," Jour.

JSME, Vol.58, No.547, pp.815~819.
(16) Kage, K., Okubayashi, T., Kariya, T. and
Kawagoe, S., 1996, "Numerical Study of

Compression Waves Produced by High-Speed
Trains Entry a Tunnel (Effect of Train Nose
Shape," Jour. JSME, Vol.62, No.598, pp.218~223.