

# 고속열차의 선두부 형상이 터널 입구압력파에 미치는 영향

## Effect of Train Nose Shape on the High-Speed Railway Tunnel Entry Compression Wave

김 회 동\*  
Kim, Heuy-Dong\*

김 태 호\*\*  
Kim, Tae-Ho\*

서 태 원\*  
Seo, Tae-Won\*

### ABSTRACT

The entry compression wave, which is generated at the entrance of the tunnel, is almost always associated with the pressure transients in the tunnel as well as the impulse noise at the exit of the tunnel. It is highly required to design the train nose shape that can minimize such undesirable phenomena. The objective of the current work is to investigate the effects of the train nose shape on the entry compression wave. Numerical computations were applied to one-dimensional unsteady compressible flow in high-speed railway train/tunnel systems. A various shape of train noses were tested for a wide range of train speeds. The results showed that the strength of the entry compression wave is not influenced by the train nose shape, but the time variation of pressure in the entry compression wavefront is strongly related to the train nose shape. The current method of the characteristics was able to represent a desirable nose shape for various train speeds. Optimum nose shape was found to considerably reduce the maximum pressure gradient of the entry compression wave.

### 1. 서 론

열차가 고속으로 터널에 돌입하게 되는 경우 반대편 터널출구에서 발파음에 가까운 충격성 소음이 발생하여, 주변의 구조물은 물론 주거환경에 심각한 지장을 초래하게 된다.<sup>(1)</sup> 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.<sup>(2,3)</sup>

이와 같은 파동현상은 열차의 동력설계 뿐만 아니라 차체의 강도설계에도 관계하게 되며, 열차의 주행안정성 및 터널주변의 환경에도 큰 영향을 미치게 되므로, 이들에 대한 적절한 경감법의 연구는 대단히 중요하다. 종래의 연구<sup>(4,5)</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.

우리 나라에서 건설중인 고속열차의 경우, 선로의 약 30% 정도가 터널로 예정되어 있으며, 따라서 터널내에서 발생하는 압력변동 및 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음에 대한 적절한 경감법은 고속열차의 성공적인 운영을 위해서 매우 중요하다. 이미 고속열차가 운행되고 있는 프랑스나 독일 그리고 일본의 사례를 고찰하여 보면, 터널의 존재는 열차의 고속화에 가장 중요한 제한요인이 되고 있음을 알 수 있다. 일본의 산요신칸센의 경우, 선로의

\* 국립안동대학교 기계공학과, 정회원

\*\* 안동공업전문대학

약 60% 정도가 터널로 구성되어 있어, 과거부터 터널을 주행하는 고속열차의 공기역학에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 그 결과 고속철도 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음을 고려하여 최근 500계열이라는 차세대 고속열차를 설계하여, 영업운행에 임하고 있다. 이 열차의 선두부는 종래의 열차의 형상과는 달리 열차의 선두부를 가능한 한 길게 하여, 압력변동 및 충격성 소음의 경감을 도모하고 있다.

현재 국내에서 고속열차의 공기역학 및 터널내에서 발생하는 파동현상에 관한 연구는 극히 미비한 실정이며, 장래 고속열차의 운행에 수반되어 발생할 수 있는 제반 문제점을 해결하기 위해서는 이에 대한 체계적인 연구가 절실히 요망되고 있다. 고속열차의 공기역학적 특성 및 압력변동 등은 열차속도 의존성이 매우 강할 뿐만 아니라 열차가 터널을 주행하게 되는 경우에 가장 심각한 형태로 나타나게 된다. 따라서 고속철도의 터널 및 열차의 형상의 설계에는 이들 공력특성들이 충분히 반영될 필요가 있으며, 특히 우리나라의 경우 국토 면적이 협소하고, 터널이 선로의 상당수를 차지하고 있는 상황에서는 더욱 열차 및 터널계에서 발생하는 파동현상을 이해할 필요가 있다.

최근 김희동<sup>(6,7)</sup>에 의하여 보고된 바와 같이, 고속철도 터널에서 발생하는 압력변동 및 충격성 소음의 경감을 위해서는 여러 대책들이 고려될 수 있다. 이들 대책들은 열차에 실시할 수 있는 대책과 터널에 실시하는 대책으로 분류할 수 있다. 김 등<sup>(8,9,10)</sup>은 충격파관 및 수치계산법을 이용하여 고속철도 터널에 실시하는 피동적 방법과 능동적 방법들에 대하여 연구하였다. 이들 연구결과들의 일부는 실제의 고속철도 터널에 적용되어, 그 효과들이 시험되고 있으며, 장래 실용화될 것으로 판단된다. 한편 열차에 적용하는 대책으로 열차의 단면적을 가능한 한 작게 하는 방법과 열차의 선두부를 공력적 유선형으로 설계하는 방법이 고려될 수 있다. 여기에서 열차의 단면적을 작게 하는 것은 수송능력 등과 관련되므로 한계가 있을 수 있다. 따라서 열차의 선두부를 적절히 설계하여, 공력특성을 개선하고 충격성 소음 등을 완화시키는 것이 바람직하다.

최근 Iida 등<sup>(11)</sup>은 3차원 압축성 Navier-Stokes 방정식에 난류모델을 적용하여, 고속열차의 선두부 형상을 변화시켜 터널 입구에서 형성되는 압축파의 특성을 수치해석적으로 조사하였다. 그들의 연구는 주행하는 열차에 대하여 이동격자계를 적용하였으나, 해석은 터널입구 부근의 유동장에 제한되었으며, 터널 입구후드의 효과는 포함하지 않았다. 또 그들의 계산은 넓은 범위의 열차속도에 대하여 수행되지 않았으며, 수치계산을 위해서 과도한 시간이 소요되었으므로, 그다지 실용적이지 못하였다.

Kage 등<sup>(12,13)</sup>은 고속철도 터널 입구의 유동장에 대하여 특성곡선법을 이용하여 비정상 압축성 유동장을 일차원적으로 해석하였다. 그들의 해석법은 여러 형태의 선두부 형상을 가정하여, 터널 입구의 압축파에 미치는 열차 선두부 형상의 효과를 적절하게 예측하였다. 이 계산법은 매우 단순하고 유용한 것이었으나, 열차의 속도를 변화시키지 않았으며, 그들의 연구는 열차와 터널의 단면적비 R의 값이 0.216인 일본의 고속철도를 대상으로 수행되었다. 따라서 한국형 고속철도에 적용될 수 있는 연구결과가 필요하며, 속도 변화에 따른 열차 선두부의 최적형상에 관한 실용적 자료가 요구되고 있다.

본 연구에서는 한국형 고속철도 터널계의 압력파에 미치는 열차 선두부의 형상의 효과 등을 조사할 수 있는 새로운 수치계산법을 개발하여, 열차속도가 200-400km/h의 범위에 대해서 수치계산을 수행하였다. 본 연구의 결과들은 우리나라 고속철도 터널에서 발생하는 압력변동을 최소로 하고, 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음을 경감시키는데 적절한 열차 선두부 형상을 구하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 터널입구의 유동장 및 지배방정식

일반적으로 터널 내부 뿐만 아니라 외부에서도 고속으로 주행하는 열차의 선두부에 의하여 연속적으로 약한 압축파가 발생하여 주위로 전파하게 된다.<sup>(14)</sup> 그러나 대부분의 일차원 계산에서는 터널 외부에서는 유로 단면적이 무한대의 크기로 되므로 압축파의 발생을 무시하며, 열차의 선두부가 터널입구에 도달하는 순간부터 터널내에 압축파가 형성되는 것으로 가정한다. 따라서 본 연구에서 계산의 초기상태는 일정속도로 주행하는 열차의 선두부가 터

널 입구에 위치하는 것으로 가정한다.

열차가 터널에 돌입하는 경우에 터널내에서 발생하는 유동장은 터널의 유효단면적이 시간  $t$ 와 거리  $x$ 의 함수로 되는 일차원 비정상 압축성 지배방정식으로 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 터널의 유효단면적이다. 위의 비선형 방정식들을 변형하면 두 특성곡선 즉 우향특성곡선(right-running characteristic)  $C+$ 와 좌향특성곡선(left-running characteristic)  $C-$ 를 따라 유동의 상태량이 일정하게 되는 특성방정식들을 얻을 수 있다. 본 수치계산은 이들 특성곡선을 따라 수행하였으며, 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, 각각  $A_0=107\text{m}^2$ ,  $A_T=10.1\text{m}^2$ 로 가정하였으며, 수치계산은 터널의 등가직경  $D=11.672\text{m}$ , 터널의 길이  $L=200\text{m}$ 로 고정하였다. 또 터널 단면적에 대한 열차 단면적비(blockage ratio)  $R$ , 열차 선두부길이  $L_N$ , 열차의 속도  $U$ 를 변화시켰다.

한편 열차 선두부의 형상이 터널 입구의 압축파에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 다음의 식으로 나타내는 바와 같이 선두부의 형상을 4형태로 계통적으로 변화시켰다.

$$y = -\frac{b}{a}x \quad , \quad \text{선형} \quad (4)$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad , \quad \text{타원형} \quad (5)$$

$$\frac{y}{b} = \left(\frac{x}{a}\right)^\alpha \quad , \quad \text{멱승형} \quad (6)$$

$$\frac{y}{b} = \left(\frac{x}{a}\right)^\alpha + \left(\frac{x}{a}\right) \quad , \quad \text{혼합형} \quad (7)$$

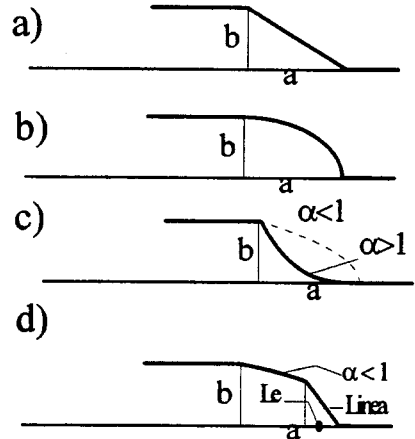


Fig.1 Shape of train nose

위의 식들로 나타나는 열차 선두부의 형상을 Fig.1에 도식적으로 나타내었다. 그림의 a)에는 열차 선두부의 선단으로부터 열차의 단면적이 직선적으로 증가하는 선형선두부(linear nose)로, 선두부의 길이를  $a$ , 그리고 열차의 높이를  $b$ 로 가정한다. 그림 b)는 위의 식(5)로 나타내는 바와 같이 장축의 길이를  $a$ , 그리고 단축의 길이를  $b$ 로 하는 타원형(elliptic nose)이다. 그림 c)는 위의 식(6)에서  $a>1.0$ 과  $a<1.0$ 인 두 경우를 포함하는 것으로,  $a>1.0$ 인 경우에는 실선으로 나타내는 바와 같이 선두부의 형상이 아래로 볼록한 형태, 그리고  $a<1.0$ 인 경우에는 위로 볼록한 형태를 의미하며, 본 연구에서는 멱승형(power-law nose)이라 가정하였다. 한편 그림 d)는 위의 식(7)로 나타내는 바와 같이 선형과 멱승형을 조합한 혼합형(combined nose)으로, 열차 선두부의 선단으로부터 직선부의 길이를  $L_e$ 로 가정하였다. 수치계산에서는 입구후드가 없는 경우로 열차 선두부의 형상을 나타내는  $a$ ,  $b$ ,  $L_e$  등의 파라미터들을 변화시켜, 선두부의 형상이 압축파에 미치는 영향을 조사하였으며, 터널내에서 발생하는 파동현상의 경감에 적절한 선두부의 형상을 구하였다.

본 수치계산에서 사용된 격자점은 등간격으로 약 5000개이었으며,  $\Delta x$ 는 격자간의 거리, 그리고 첫 번째 격자점  $i=1$ 과 계산영역의 최하류단의 격자점  $i=i_{\max}$ 는 각각 입구면과 터널 출구면에 대응하도록 하였다. 수치계산의 시간간격  $\Delta \tau = 0.9 \Delta x$ 로 가정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 선형 선두부에 의한 압축파의 특성

Fig.2에는 한국형 고속철도의 열차와 터널의 단면적비가  $R=0.094$ , 열차의 속도  $U=350\text{km/h}$ 인 선형 선두부의 경우, 열차 선두부의 형상을 나타내는 파라미터  $a/b$ 의 값이 압축파에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 CH, CT는 열차가 터널에 진입하는 경우, 터널입구에서 발생하는 압축파의 파두(head of wave)와 파미(tail of wave)를 나타낸다. 그림으로부터 열차속도  $U$ 와  $R$ 의 값이 주어지는 경우,  $x/D=10$ 인 위치에서 압축파의 과잉압력  $\Delta p$ 는  $a/b$ 의 값 즉 열차의 선두부의 길이에 거의 영향을 받지 않지만, 압축파의 파장은 열차의 선두부 길이가 증가할수록 길어진다. 이러한 사실은 압축파의 과잉압력이 열차속도  $U$ 와  $R$ 의 값에 의하여 결정된다는 종래의 이론적 결과와 일치한다.<sup>(15)</sup>

Fig.3에는 열차속도  $U$ 와  $R$ 의 값이 주어지는 경우,  $a/b$ 의 값이 압축파면의 압력구배에 미치는 영향을 나타내었다. 그림으로부터 압축파면의 최대압력구배값  $(dp/dt)_{\max}$ 는  $a/b$ 의 값이 감소할수록 커지게 된다는 것을 알 수 있다. 이것은 열차 선두부의 길이를 길게 하는 경우에 터널내에서 발생하는 압력변동이나 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음이 상당히 감소한다는 것을 의미한다.

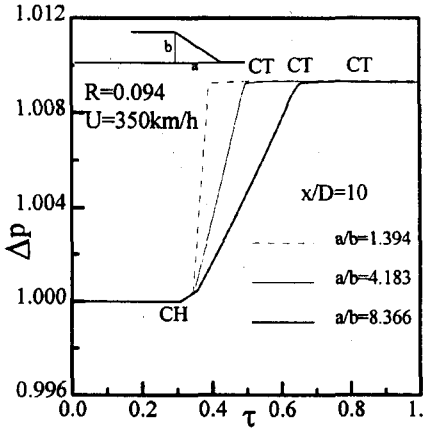


Fig.2 Compression wave forms

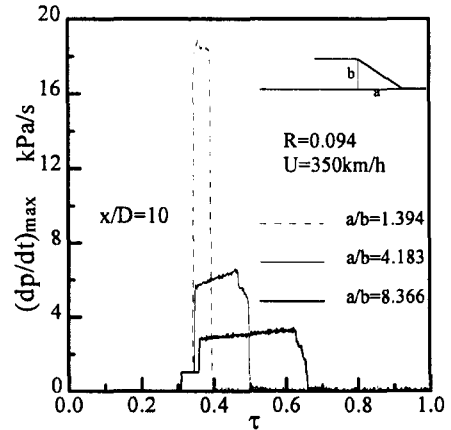


Fig.3 Pressure gradient of compression wave front

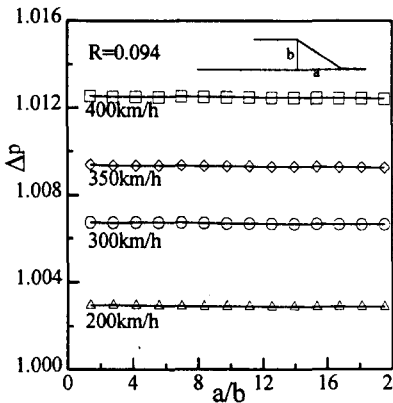


Fig.4 Strength of compression wave

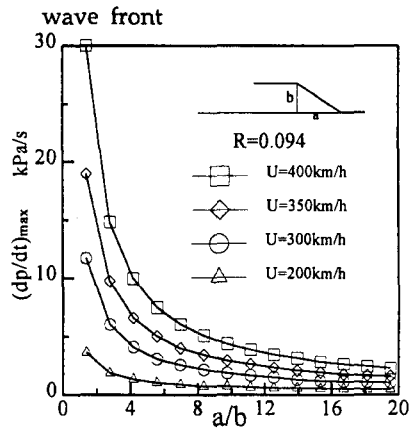


Fig.5 Maximum pressure gradient of compression wave

Fig.4에는  $R=0.094$ 인 경우 열차선두부 형상을 나타내는  $a/b$ 와 압축파의 과잉압력의 관계를 나타내었으며, 그림에서 열차의 속도는 200~400km/h로 변화시켰다. 그림으로부터 열차

속도가 일정한 경우 a/b의 값이 압축파의 과잉압력에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig.5에는 U와 R의 값이 주어지는 경우, a/b의 값이 압축파면의 최대압력구배에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 열차속도가 400km/h인 경우, 압축파의 최대압력구배값은 a/b가 작은 경우 급격하게 감소한 후, a/b가 더 증가할수록 감소율이 둔화된다. 이러한 경향은 열차의 속도가 증가함에 따라 뚜렷하게 나타난다. 이것으로부터 터널입구에서 발생하는 압축파의 최대압력구배값은 열차선두부의 형상뿐만 아니라 열차속도에도 강하게 의존하는 것을 알 수 있다. 한편 a/b가 약 10이상에서 각 열차속도에 대한 최대압력구배는 거의 일정해진다. 이것으로부터 주어진 열차의 속도에 대하여 열차 선두부형상의 최적조건이 존재하는 것을 알 수 있다.

### 3.2 타원형 선두부에 의한 압축파의 특성

Fig.6에는 R=0.094인 타원형 선두부의 경우, 열차속도를 변수로 하여 열차 선두부의 형상을 나타내는 a/b의 값이 압축파의 과잉압력에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 압축파의 과잉압력은 열차의 속도가 200, 300km/h인 경우 a/b이 증가하더라도 거의 영향을 받지 않지만, 열차의 속도가 350, 400km/h인 경우 a/b값이 증가함에 따라 약간 감소한다.

Fig.7에는 타원형 선두부인 경우, 열차 선두부 형상이 터널입구에서 발생하는 압축파의 최대압력구배에 미치는 영향을 조사하기 위하여 열차속도를 200~400km/h로 하여 나타내었다. 그림에서 열차속도 U=350km/h인 경우 a/b의 값이 작은 영역(a/b=0~8)에서 압축파의 최대압력구배는 급격하게 감소하며, a/b가 큰 영역(a/b=8~20)에서는 점차적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 열차속도가 증가할수록 뚜렷하게 나타난다. 이것으로부터 선형 선두부와 마찬가지로 타원형 선두부의 최대압력구배도 열차선두부의 형상뿐만 아니라 열차의 진입속도에도 강하게 의존한다.

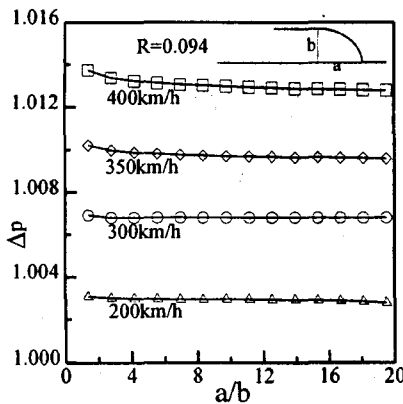


Fig.6 Strength of compression wave

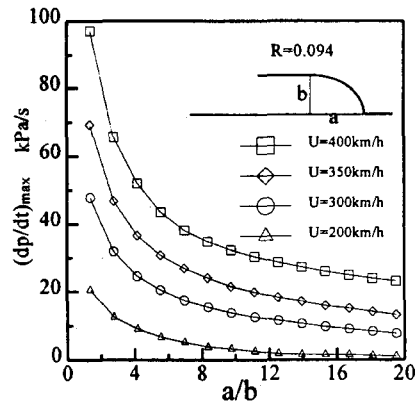


Fig.7 Maximum pressure gradient of compression wave

### 3.3 뾰족형 선두부에 의한 압축파의 특성

Fig.8에는 R=0.094, a/b=4.183인 열차 선두부 형상에 대하여 열차와 터널의 단면적비 R와 터널입구로부터의 거리를 터널의 등가직경으로 무차원한 값 x/D, 그리고 무차원 시간 τ를 함께 표시하였다. 또 그림에서 점선은 식(6)의 α=0.5인, 실선은 α=3.0인 경우 열차의 선두부형상을 의미한다.

Fig.9에는 R=0.094인 뾰족형 선두부의 경우, 열차속도를 변수로 하여 열차 선두부의 형상을 나타내는 a의 값이 압축파의 과잉압력에 미치

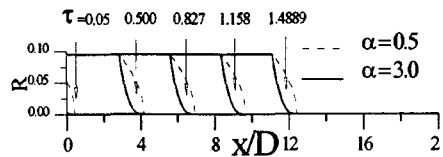


Fig.8 Shape of power law nose

는 영향을 나타내었다. 그림에서 압축파의 파잉압력은 열차의 속도가 200, 300km/h인 경우  $\alpha$ 가 증가하더라도 거의 영향을 받지 않지만, 열차의 속도가 350, 400km/h인 경우  $\alpha$  값이 증가함에 따라 약간 감소한다.

Fig.10에는 열차의 진입속도  $U=200\sim 400\text{km/h}$ ,  $R=0.094$ 인 먹송형 선두부인 경우, 열차 선두부 형상을 나타내는  $\alpha$ 와 터널내 압축파의 최대압력구배 값의 관계를 나타내었다. 그림에서 열차속도  $U=400\text{km/h}$ 인 경우 압축파의  $(dp/dt)_{\max}$ 의 값은  $\alpha$ 가 증가할수록 급격하게 감소하여 어느  $\alpha$  값에서 최소값을 가진 후,  $\alpha$  값이 더욱 증가하면  $(dp/dt)_{\max}$ 의 값은 다시 증가한다. 그림에서  $(dp/dt)_{\max}$ 가 최소로 되는  $\alpha$  값  $\alpha_{\text{opt}}$ 은 열차속도에 의존하는 것으로 나타난다. 본 연구의 결과로부터  $\alpha_{\text{opt}}$ 와 열차의 속도와의 관계를 Fig.11에 나타내었다. 그림으로부터 열차속도가 증가하는 경우  $\alpha_{\text{opt}}$ 의 값도 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 열차의 선두부는 열차의 주행속도에 따라 그의 최적 형상이 달라질 수 있다는 것을 알 수 있다.

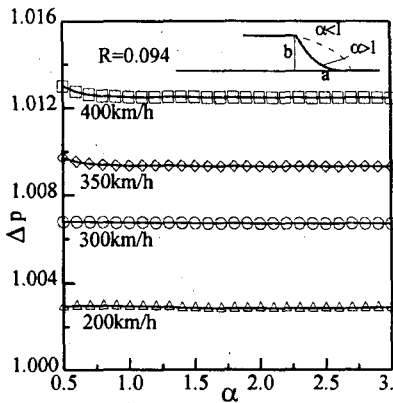


Fig.9 Strength of compression wave

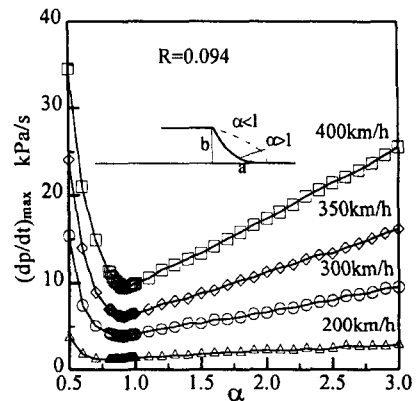


Fig.10 Maximum pressure gradient of compression wave

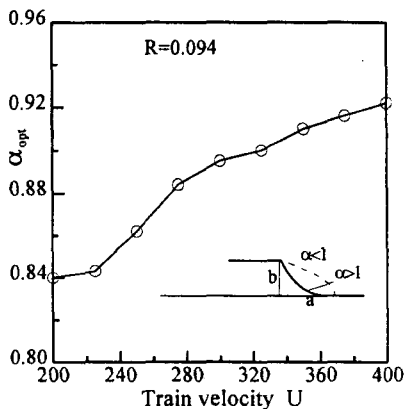


Fig.11  $\alpha_{\text{opt}}$  vs  $U$

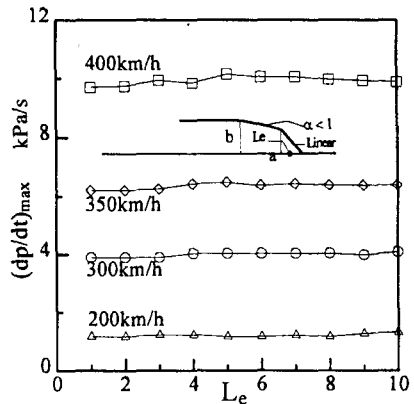


Fig.12  $L_e$  vs  $(dp/dt)_{\max}$

### 3.4 혼합형 선두부에 의한 압축파의 특성

Fig.12에 Fig.1에 나타낸  $L_e$ 와 압축파의 최대압력구배의 관계를 나타냈으며, 열차속도  $U=200\sim 400\text{km/h}$ 이다. 그림으로부터 열차속도가 일정한 경우  $L_e$ 의 값이 터널입구에서 발생하는 압축파의 최대압력구배값에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

### 3.5 선두부 형상에 따른 압축파의 특성비교

Fig.13에는  $R=0.094$ , 열차속도  $U=350\text{km/h}$ 인 경우 네 종류의 열차 선두부 형상에 대한  $a/b$ 의 값과 압축파의 과잉압력의 관계를 나타내었다. 그림에서 압축파의 과잉압력은 선형, 역승형, 혼합형 선두부 형상인 경우  $a/b$ 가 증가하더라도 거의 영향을 받지 않지만, 타원형 선두부인 경우는  $a/b$ 가 증가함에 따라 약간 감소한다. 또  $a/b$ 의 값이 일정할 경우 압축파의 과잉압력은 타원형 선두부가 가장 크며, 이러한 경향은  $a/b$ 가 감소할수록 뚜렷하게 나타난다.

Fig.14에는 Fig.13와 동일한 조건하에서 네 종류의 열차선두부 형상을 비교하기 위하여  $a/b$ 값에 대한 최대압력구배를 나타내었다. 그림에서 타원형 선두부인 경우,  $a/b$ 의 값이 작은 경우 압축파의 최대압력구배의 값은 급격하게 감소한 후,  $a/b$ 의 값이 커짐에 따라 완만하게 감소한다. 이러한 경향은 다른 선두부 형상에서 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 또  $a/b$ 가 일정한 값일 때, 압축파의 최대압력구배의 값은 타원형 선두부가 가장 크게 나타나며, 선형, 역승형 그리고 혼합형인 선두부에서는 최대압력구배의 값이 거의 일치한다. 구체적으로  $a/b=4$ 인 경우 열차의 형상을 타원형 선두부에서 선형, 역승형이나 혼합형 선두부로 대체하면 압축파의 최대압력구배의 값은  $36.5\text{kPa/s}$ 에서  $6.5\text{kPa/s}$ 로 약 82.2%정도 감소한다.

Fig.15에는 열차속도에 대하여 최대압력구배를 나타내었다. 그림에서 열차속도가 일정할 때, 압축파의 최대압력구배는 타원형 선두부에서 가장 크며, 타원형인 선두부가 열차속도에 보다 강한 의존성을 가진다는 것을 알 수 있다. 구체적으로 열차속도  $U=400\text{km/h}$ 인 경우, 열차의 형상을 타원형 선두부에서 선형, 역승형이나 혼합형 선두부로 대체하면 압축파의 최대압력구배의 값은  $52\text{kPa/s}$ 에서  $10\text{kPa/s}$ 로 약 81%정도 감소한다.

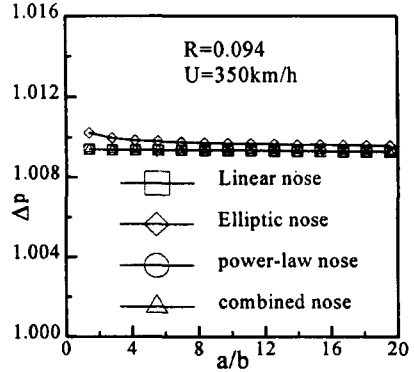


Fig.13 Comparison of compression wave strength

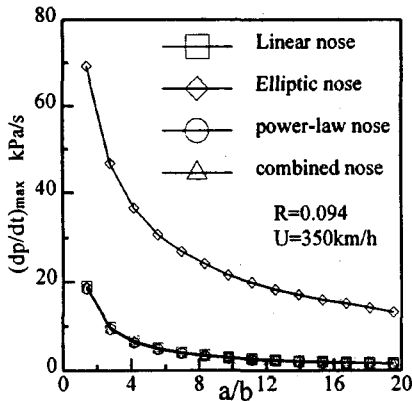


Fig.14 Comparison of maximum pressure gradient

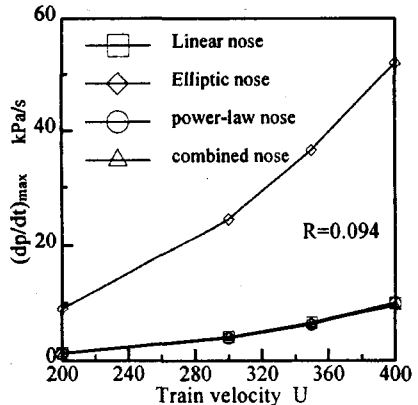


Fig.15  $U$  vs  $(dp/dt)_{\max}$

## 4. 결론

고속열차가 터널내로 진입하는 경우에 발생하는 터널입구에서 형성되는 압축파의 특성과 열차 선두부 형상의 관계를 조사하기 위하여, 특성곡선법을 이용하여 수치해석하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 선형 선두부인 경우 터널입구에서 발생하는 압축파의 과잉압력은 열차 선두부 형상에

- 의존하지 않으나, 압축파면의 최대압력구배의 값은 열차 선두부가 길수록 작아진다.
- (2) 타원형 선두부인 경우 압축파의 과잉압력은 열차의 선두부 형상과 진입속도에 의존하는 것을 알 수 있다.
  - (3) 뾰족형 선두부인 경우 주어진 열차속도에 대하여 압축파의 최대압력구배를 최소화하는 어느  $\alpha$  값이 존재하였으며, 이  $\alpha$  값은 열차의 진입속도에 따라 증가한다.
  - (4) 혼합형 선두부인 경우 열차속도가 같은 경우 압축파의 과잉압력은 선형 선두부의 길이에 무관하다는 것을 알 수 있다.
  - (5) 열차의 속도가 같은 경우 압축파의 최대압력구배값은 타원형 선두부가 가장 크며, 다른 형상의 열차의 선두부에 대해서는 일정한 값을 가진다.
  - (6) 열차의 속도가 알려지는 경우 압축파면의 압력구배를 최소로 하는 선두부 형상을 저절하게 예측할 수 있다.

## 후기

본 연구는 과학재단 '97 핵심전문연구(과제번호 : 971-1008-052-2)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드린다.

## 참 고 문 헌

1. Kim, H.D. and Setoguchi, T.(1998), "Impulse Noise and Its Control," Progress in Aerospace Sciences, Pergamon Press (to be published).
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 김희동 (1996), "고속철도의 공기역학III," 대한기계학회 학회지 제36권5호.
7. 김희동 (1996), "고속철도의 공기역학IV," 대한기계학회 학회지 제36권10호.
8. 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.
9. 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.
10. 김희동, 瀬戸口俊明 (1997), "수직갱을 이용한 터널내 비정상 압축파의 파동제어," 大韓機械學會論文集, 第21卷, 第9號, pp.1095~1104.
11. Iida, M., Matsumura, T., Fukuda, T., Nakatani, K. and Maeda, T. (1996), "Optimization of Train Nose Shape for Reducing Impulsive Pressure Wave from Tunnel Exit," Trans. JSME, series B, Vol.62, No.569, pp.148~155.
12. 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.
13. 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.
14. 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).
15. 김희동, 우선훈, 김동현 (1998), "열차후미부의 터널진입에 의한 비정상 압력파의 이론해석," 춘계학술대회논문집 B, pp.638~643