

〈論 文〉

고속철도 터널내를 전파하는 압축파의 일차원 수치해석

김희동* · 엄용균* · 松尾一泰**

(1994년 5월 12일 접수)

One-Dimensional Numerical Study of Compression Wave Propagating in High-Speed Railway Tunnel

Heuy-Dong Kim, Yong-Kyoon Eum and Kazuyasu Matsuo

Key Words : Compressible Flow(압축성흐름), Compression Wave(압축파), Expansion Wave(팽창파), High Speed Railway(고속철도), Impulsive Noise(충격소음), Shock Tube(충격파관), Shock Wave(충격파)

Abstract

In order to investigate the compression wave propagating in a high-speed railway tunnel, a numerical calculation was applied to the wave phenomenon occurring in a model tunnel. Unsteady, one-dimensional inviscid or viscous flows were solved by an explicit TVD scheme, and the calculated flows were compared with the results of measurement in real tunnels. Tunnel noises caused by emission of the compression wave were characterized in terms of excess pressure of compression wave, pressure gradient in the wave front and width of the compression wave. Calculated attenuation, pressure gradient and width of compression wave with the propagating distance agreed with the results of measurement in the real tunnels. The results also show that tunnel noises are proportional to the train velocity entering the tunnel.

1. 서 론

열차가 고속으로 터널에 돌입할 때, 터널입구에서 형성되는 압축파(compression wave)는 터널내를 전파하여 출구에 이르게 된다. 이 때, 터널의 출구에 도착한 압축파의 일부는 개구단(open end of tunnel)에서 반사하여 팽창파(expansion wave)로서 터널의 입구를 향하여 전파하며, 나머지는 터널의 출구로부터 방출되어 충격성 소음(impulsive noise)의 원인이 되고 있다. 이러한 소음은 급작스레 발생하고, 더우기 그의 음압레벨(sound pressure level)이 매우 커서, 터널의 주변 환경에 지대

한 영향을 미치고 있기 때문에 소음의 저감대책이 절실히 요구되고 있다.

최근 우리나라에서 건설되고 있는 경부 고속철도의 현황을 비추어 볼 때, 터널의 출구 부근에서 발생되어질 미기압파는 심각한 환경소음문제로 대두될 것이 분명하다. 따라서 터널소음문제에 대한 적절한 대책이 설계시 고려될 필요가 있다. 종래의 연구 결과⁽¹⁾에 의하면, 터널출구에서 발생하는 충격성 소음(혹은 미기압파라고도 한다)은, Fig. 1에 나타난 바와 같이 터널입구에서 형성되는 압축파 및 터널 출구에서의 압축파에 관계하고 있음을 시사하였다. 따라서 압축파가 터널내를 전파하는 경우, 압축파의 전파거동 및 감쇠특성 등을 이해하는 것은 소음의 저감대책을 위해 필수적으로 선행되어야 할 공학적 연구 과제이다. 최근 김희동⁽²⁾은 고

*정회원, 인동대학교 기계공학과

**九州大學 總合理工學研究科

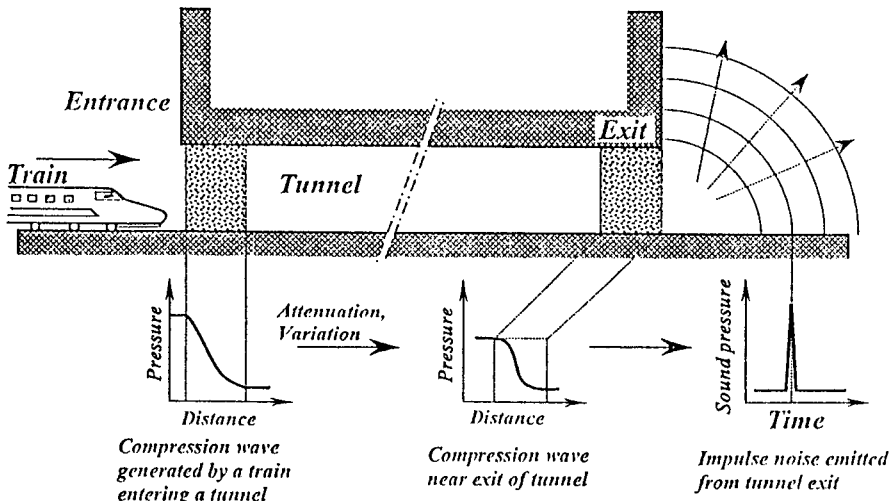


Fig. 1 Schematic diagram for impulsive noise in high speed railway tunnel

속철도 터널에서 발생하는 소음문제에 대하여, 소음의 발생 메카니즘과 그의 저감대책을 시사한 바 있으며, 또 김희동 등⁽³⁾은 실제 터널에서 발생하는 유체역학적 파동현상을 모의실험하기 위하여, 격막(diaphragm)구조 대신에 급속개구 밸브(fast opening gate valve)를 가지는 충격파관(shock tube)을 이용하여, 관내에서 형성되는 압축파의 전파거동 및 감쇠특성 등을 연구하였다. 이들의 연구결과는 실제의 고속철도 터널에서 발생하는 압축파와 직접 비교되었으며, 열차에 의해 터널내에 형성되는 압축파의 전파거동은 충격파관을 이용하여 효과적으로 모의될 수 있음을 밝혔다. 또한 터널의 출구에서 발생하는 미기압파를 조사하기 위하여, 음향이론(acoustic theory)⁽⁴⁾을 이용하여, 미기압파의 강도(즉 터널소음)는 터널의 출구에서 압축파의 시간구배에 비례한다는 것을 제시하였다. 또 김희동 등⁽⁵⁾은 터널 출구에서 발생하는 미기압파를 저감시키기 위하여, 현재 실제로 터널내에 적용되고 있는 반사판(reflector)의 효과를 모의실험 및 수치해석으로 연구하여, 반사판은 터널소음을 저감시키기에 효과적이지 않을 수 있다고 지적하였다. 따라서 반사판의 효과를 검증하기 위하여 보다 체계적인 연구가 요망되고 있다.

이상에서 기술한 바와 같이 터널내를 전파하는 압축파는 미기압파와 직접적으로 관계하게 되므로 압축파의 전파거동을 예측하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 터널입구에서 형성되는 압축파가 터널내를 전파하는 경우에 발생하는 파형의 변

화를 정량적으로 관찰하고, 실제 터널에서의 측정값들과 비교하기 위하여 관내를 전파하는 압축파의 모의실험에 이어 수치계산법을 사용하여 압축파의 전파거동을 조사하였다. 수치계산의 결과는 전파하는 압축파의 과잉압, 파면의 압력구배 및 압축파의 폭 등으로 압축파를 특성화하였으며, 종래의 관내 흐름에서 형성되는 압축파의 실험결과 및 실제 터널에서 측정된 데이터와 비교하였다.

2. TVD법에 의한 수치계산

2.1 지배방정식

2.1.1 일차원 압축성흐름

고속열차에 의해 형성되는 압축파가 터널내를 변형 혹은 감쇠해 가면서 전파하는 과정을 조사하기 위하여, TVD(total variation diminishing)법에 의한 일차원 수치해석을 행하였다. 본 연구에서 사용된 TVD법은 계산의 과정에서 발생할 수 있는 압축파의 파면에서 불합리한 압력진동을 수반하지 않으며, 더욱이 매우 작은 압력변동도 효과적으로 계산할 수 있으므로 터널내에 형성되는 압축파의 계산에 적용되었다.

비점성 계산에서는 유체의 마찰이나 열전도를 무시하여, 완전기체의 일차원 비정상 압축성 흐름을 고려하였다. 또 터널내에서 유로 단면적의 변화는 거의 없으므로 지배방정식들은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}\left\{\rho\left(e + \frac{u^2}{2}\right)\right\} + \frac{\partial}{\partial x}\left\{\rho u\left(h + \frac{u^2}{2}\right)\right\} = 0 \quad (3)$$

여기에서 e, h, u, ρ, p, x, t 는 각각 유체의 내부에너지, 엔탈피, 유속, 밀도, 압력, 공간좌표(흐름방향의 거리) 및 시간을 나타낸다. 완전기체에 대한 내부에너지와 엔탈피는 다음과 같이 주어진다.

$$e = \frac{1}{\gamma-1} \frac{p}{\rho}, \quad h = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} \quad (4)$$

여기에서 γ 는 기체의 비열비를 나타낸다. 또 $m = \rho u, \varepsilon = p/(\gamma-1) + \rho u^2/2$ 로 나타내면, 위의 지배방정식 (1)~(3)을 다음과 같은 보존형으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(U) + \frac{\partial F}{\partial x} = 0$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ m \\ \varepsilon \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ mu + p \\ (\varepsilon + p)u \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기에서 무차원수

$$p' = \frac{p}{p'}, \quad \rho' = \frac{\rho}{\rho'}$$

$$u' = \frac{1}{a_1/\sqrt{\gamma}}, \quad t' = \frac{t}{(L/a_1)/\sqrt{\gamma}} \quad (6)$$

들을 정의하여, 위의 식(5)를 변형시켜 단순화시키기 위하여 다음과 같이 다시 바꾸어 쓰면 무차원화된 식(5)가 얻어진다. 여기에서 a_1 은 음속, D 는 특성길이로서 터널의 등가직경을 나타낸다.

2.1.2 TVD법에 의한 일차원 압축성흐름의 해석

TVD차분법⁽⁶⁾은 쌍곡선형의 보존방정식(hyperbolic conservative equation)에 대한 수치계산법으로서, 충격파(shock wave) 및 접촉면(contact surface) 등의 불연속면 근처에서는 1차정도(first order accuracy)로, 그 외의 상태량의 구배가 급격하지 않는 부분에서는 2차정도(second-order accuracy)로 하여 진동이 없는 안정한 해를 수개의 격자점 내에서 포착할 수 있다. 또 인공 점성항을 고려할 필요가 없으며, 대상으로 하는 현상을 높은 해상도로 시뮬레이션할 수 있는 장점을 지니고 있다.

본 연구에서는 실제의 고속철도 터널에서 측정된 압축파의 파면(wave front)에서의 최대 압력구배

(maximum pressure gradient) 및 과잉압(excess pressure) 등의 실측값과 비교하고, 또 현재 고속철도 선로에 적용하고 있는 슬라브케도 터널(slab track tunnel: 선로가 슬라브 콘크리트로 되어 있음)과 밸러스트케도 터널(ballast track tunnel: 선로가 자갈로 깔려 있음)과의 차이를 수치계산으로 밝히기 위하여, 벽면에서 유체의 마찰효과를 고려하여 계산을 수행하였다.

벽면에서 마찰력을 D_g 라고 하면, 지배방정식은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + G = 0$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ m \\ \varepsilon \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ mu + p \\ (\varepsilon + p)u \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ D_g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기에서 D_g 는 마찰계수(friction coefficient) f 를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D_g = \frac{25}{D} \rho u |u| \quad (8)$$

여기에서 $D_g = 0$ 인 경우는 비점성흐름으로 된다. 위의 식(7)은 시간분할법(time splitting method)을 적용하여 다음과 같은 연립방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + G = 0 \quad (9)$$

따라서 식(7)의 해는 다음 식으로 나타내는 TVD법을 이용하여 구해진다.

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \lambda(F_{i+\frac{1}{2}}^n - F_{i-\frac{1}{2}}^n) - \Delta t G_i^n \quad (10)$$

여기에서 상첨자 n 은 시간스텝의 번호, 하첨자 i 는 방향의 계산격자점의 번호, $\lambda = \Delta t / \Delta x$ 이다. 계산에서는 U_i 와 F_i 가 이미 알고 있는 값이며, U_{i+1} 가 구하려고 하는 값이다.

2.2 경계조건 및 초기조건

본 계산에서는 고속열차에 의해 터널입구에서 형성되는 초기 압축파의 파형으로써 다음과 같은 일본 철도기술연구소의 반경험식⁽⁷⁾을 이용하였다.

$$p_g = p^* \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \frac{Vt}{0.3D} \right)$$

$$u = u^* \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \frac{Vt}{0.3D} \right)$$

$$p^* = \frac{1}{2} \rho_1 u^2 \frac{1 - (1-R)^2}{(1-M_i)(M_i + (1-R)^2)}$$

$$u^* = \frac{p^*}{\rho_1 a_1} \tag{11}$$

여기에서 유속 u 는 미소진폭파의 이론⁽⁶⁾을 이용하여 구하였으며, 밀도는 등엔트로피 관계식으로 부터 구해진다. 위의 식에서 p_g 는 대기압을 기준으로 한 압력(게이지 압력), V 는 열차의 속도, t 는 시간, D 는 터널의 등가직경을 나타내며, ρ_1 는 기준상태에서 공기의 밀도, R 은 열차(A_h)와 터널(A_t)의 단면적비($R=A_h/A_t$), M_t 는 열차의 마하수($=V/a_1$)이다. 앞에서와 마찬가지로 위의 식(11)을 무차원화하여, 단순화하기 위하여 첨자 ‘를 생략하고 표시하면, 무차원화된 압력과 유속에 관한 다음의 식(12)을 얻을 수 있다.

$$p_g = \frac{1}{2} V^2 \frac{1 - (1-R)^2}{(1-M_t)\{M_t + (1+R)^2\}} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \frac{Vt}{0.3D} \right)$$

$$u = \frac{p_g}{\sqrt{\gamma}} \tag{12}$$

위의 식에서 열차에 의해 형성된 압축파는 열차의 속도와 터널의 조건(여기서는 일차원 계산이므로 R 로서 주어진다)에 의존함을 알 수 있다. 실제 열차에 의해 터널입구에 형성되는 압축파의 파형은 열차의 속도는 물론 열차의 선두형상, 터널의 입구 조건 및 형상 등에 의해 변화할 수 있다. 본 연구에서는 압축파가 터널내를 전파하는 과정에서 생길 수 있는 파형변화에 주목하고 있으므로, 계산에서는 위의 식으로 표현된 압축파를 초기파형으로 가정하였다. 계산은 터널을 모의하기 위하여 직관을 대상으로 하였으며, 경계조건은 직관의 입구 및 출구를 각각 유입 및 유출조건으로 하여, mesh간격은 $\Delta x=2\text{m}$ 로 정하였다. 또 시간 간격 Δt 에 대한 CFL=1.0로 하였으며, 대기상태에서 음속 $a_1=340\text{m/s}$, 밀도 $\rho_1=1.2\text{kg/m}^3$, 대기상태에서 압력 $p_1=1.013 \times 10^5\text{Pa}$, 동점성계수 $\nu=1.51 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{sec}$, 기체의 비열비 $\gamma=1.40$, 터널의 등가직경 $D=9\text{m}$ 그리고 열차와 터널의 단면적의 비 R 은 실제 일본의 산요신간선의 값과 같은 $R=0.216$ 으로 하였다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 압축파의 파형

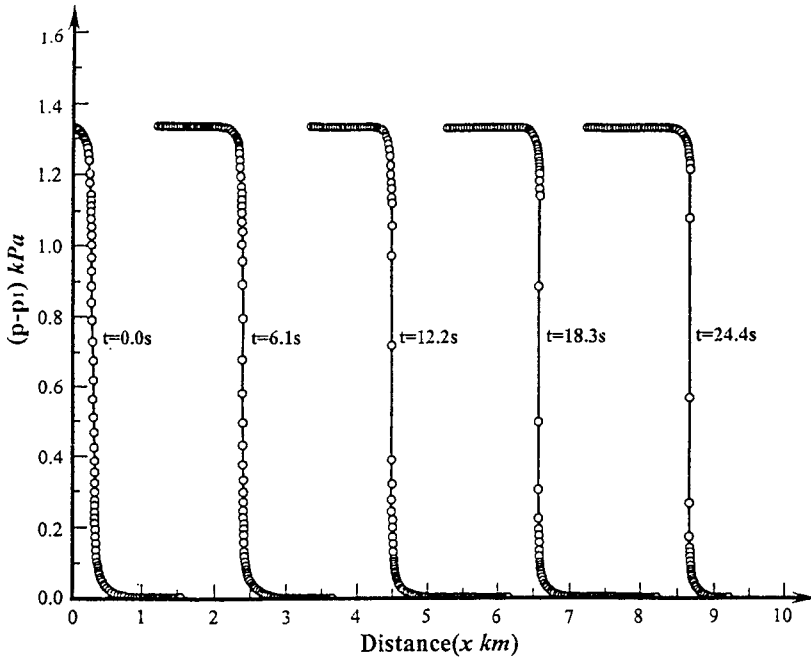
Fig. 2(a)와 (b)는 터널에 돌입하는 열차 F 의 속

도가 각각 $V=220\text{km/h}$ 와 270km/h 인 경우, 수치계산에 의한 압축파의 파형을 나타내고 있다. 그림의 종축은 압축파로 인한 과잉압($p-p_1$)이며, 압축파가 터널입구로부터 약 9km 진행할 때까지의 압축파의 파형의 변화를 나타낸다. Fig. 2(a)의 계산에서는 기체의 점성을 고려하지 않았기 때문에, 압축파의 전파에 따른 과잉압의 감쇠는 관찰되지 않고 있으나, 압축파 파면에서의 압력구배는 점점 급격하게 되고 있음을 알 수 있다. Fig. 2(b)는 열차의 속도가 270km/h 이고, 기체의 점성을 고려한 경우에 대한 압축파의 파형을 나타내고 있다. 여기에서 적용된 마찰계수 f 는 0.0325이다. 이 값은 뒤에서 기술하는 바와 같이, 실제의 슬라브케도 터널에서 측정결과와 계산결과가 가장 잘 일치하도록 취해진 값이다. Fig. 2로부터 압축파가 터널내를 전파함에 따라, 그의 파면에서 압력구배는 급격하게 되어가지만, 그러나 압축파의 파면 직후의 압력은 전파 거리의 증가에 따라 마찰의 효과때문에 감소하고 있으며, 그의 배후에 이어지는 압력도 터널 입구로부터 내부로 들어갈수록 조금씩 감소하고 있음을 볼 수 있다.

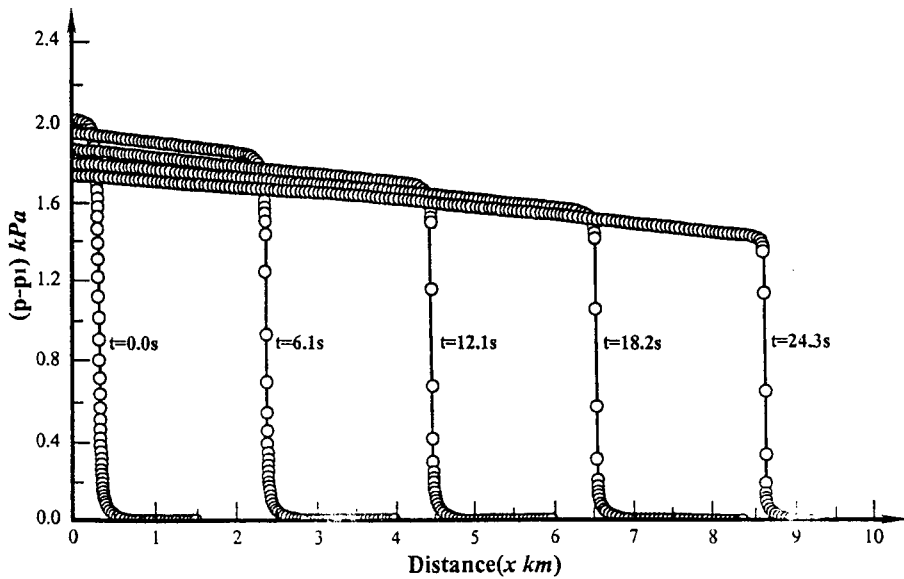
3.2 압축파의 감쇠

Fig. 3은 열차의 속도 $V=200\text{km/h}$ 인 경우, 마찰계수 f 가 압축파의 과잉압 $\Delta p_{21}(=p_2-p_1$, 여기서 p_2 는 압축파 직후의 압력)에 미치는 영향을 나타내었다. Fig. 3으로부터 마찰계수가 증가할수록 압축파의 과잉압은 현저하게 감쇠하는 것을 알 수 있다. 예를 들면, $x=4\text{km}$ 의 지점에서 과잉압 Δp_{21} 는 마찰계수 f 가 0.125일 때, 약 800 Pa이며, $f=0.25$ 일 경우, 약 620 Pa로 보다 작아지게 된다.

Fig. 4에는 열차의 속도 $V=200\text{km/h}$, 마찰계수 $f=0.0325$ 의 경우, 거리 x 에 따른 압축파의 과잉압의 변화를 나타내었다. 계산결과와 실험값의 비교를 위하여, 거의 같은 속도($192\text{km/h} \sim 197\text{km/h}$)에 대하여, 실제의 슬라브케도 터널에서 측정한 값들^(1,7)을 표시하였으며, 참고로 열차의 속도가 220km/h , 230km/h , 270km/h 인 경우의 계산결과도 함께 나타내었다. 실제의 터널에서 측정한 값에 의하면, 열차의 속도가 약 195km/h 인 경우, 터널 입구에서 형성되는 과잉압은 $1100 \sim 1200\text{Pa}$ 정도이며, 입구로부터 9km의 지점에서는 $850 \sim 950\text{Pa}$ 까지 감소하고 있다. 마찰계수 $f=0.0325$ 는 계산결과가 실측값과 거의 일치하도록 취한 값이다.



(a) Inviscid calculation (train velocity, $V = 220$ km/h)



(b) Viscous calculation ($f = 0.0325$, $V = 270$ km/h)

Fig. 2 Calculated compression waves propagating in shock tube

Fig. 4로부터 압축파의 감쇠에 대한 계산결과는 슬라브케도 터널에서 압축파의 감쇠와 일치하며, 또 열차의 속도가 빨라지면 압축파의 감쇠가 현저해진다는 것을 알 수 있다. Fig. 5에는 열차의 속도 V

$= 200 \sim 270$ km/h, 마찰계수 $f = 0.0325$ 의 경우, 터널입구로부터 거리 x 에서의 과잉압을 터널입구에서 압축파의 과잉압으로 무차원한 값을 무차원거리 x/D 에 대해 나타내었다. Fig. 5에서 실측값은 열

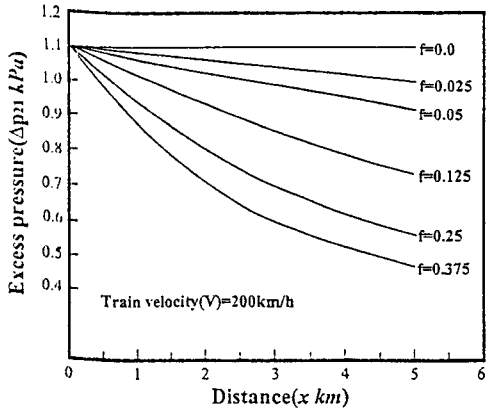


Fig. 3 Effects of friction coefficient on excess pressure of compression wave

차의 속도 약 $V=195$ km/h에 대한 경우^(1,7)로, $V=200$ km/h에 대한 계산결과와 거의 일치하고 있다. 또 열차의 속도가 빠를수록 벽면에서 마찰효과에 의한 과잉압의 감쇠가 현저하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 6는 열차의 속도 약 $V=220$ km/h인 경우의 계산결과와 벨러스트레드 터널에서 측정된 압축파의 과잉압의 비교를 나타낸다. 마찰계수 f 의 값은 실험결과와 일치하도록 $f=0.18$ 과 $f=0.20$ 으로 하였다. 벨러스트레드 터널에서

측정된 실측값은 본 계산결과와 매우 잘 일치하고 있으며, 더우기 Fig. 5의 결과와 비교해 보면, 벨러스트레드 터널에서 f 의 값은 슬라브레드 터널에서의 값의 약 6배 정도 된다는 것을 알 수 있다. 참고문헌(10)에서 기술된 압축파에 의한 과잉압에 관한 Bannister의 해석해와 본 계산결과를 비교하면 Fig. 7과 같이 된다. 계산에서는 열차의 속도 $V=200$ km/h와 270 km/h인 두 경우에 대하여, 마찰계수 $f=0.0325$ 로 가정하였으며, Bannister의 해석해에 대해서는 마찰계수 $f=0.0320$ 과 0.0325 의 값을 적용하였다. Fig. 7로부터 Bannister의 해석해와 본 계산의 결과는 잘 일치하고 있으며, 마찰계수 $f=0.0325$ 의 값과 Bannister의 식은 터널 내에서 형성되는 압축파에 대해 충분히 적용될 수 있다고 판단된다. 한편 마찰계수 $f=0.16$ 과 0.18 로 가정하여 계산한 결과와 벨러스트레드 터널에서 실측값과의 비교로부터, 벨러스트레드 터널에 상당하는 마찰계수는 약 $f=0.18$ 이라고 판단되었다.

3.3 압축파의 시간구배

터널내를 전파하는 압축파의 특성으로서 압축파에 의한 과잉압 이외에도 압축파의 파면에서 압력구배, 즉 압력의 시간적 변화의 값이 터널의 출구에서 발생하는 미기압파에 큰 영향을 미치게 된다.

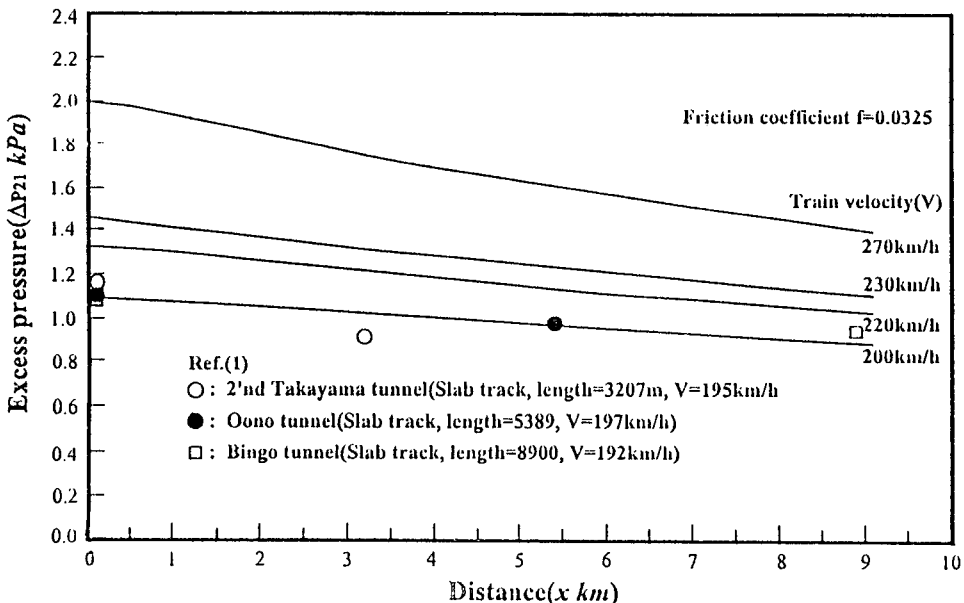


Fig. 4 Variation of excess pressure of compression wave with train velocity (wall friction coefficient f is 0.0325)

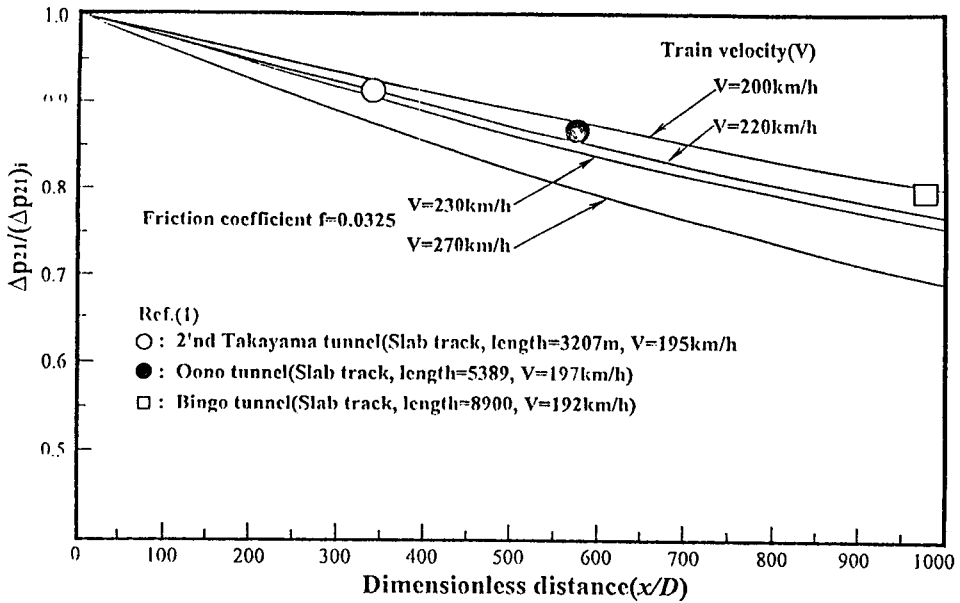


Fig. 5 Attenuation of compression wave with propagating distance

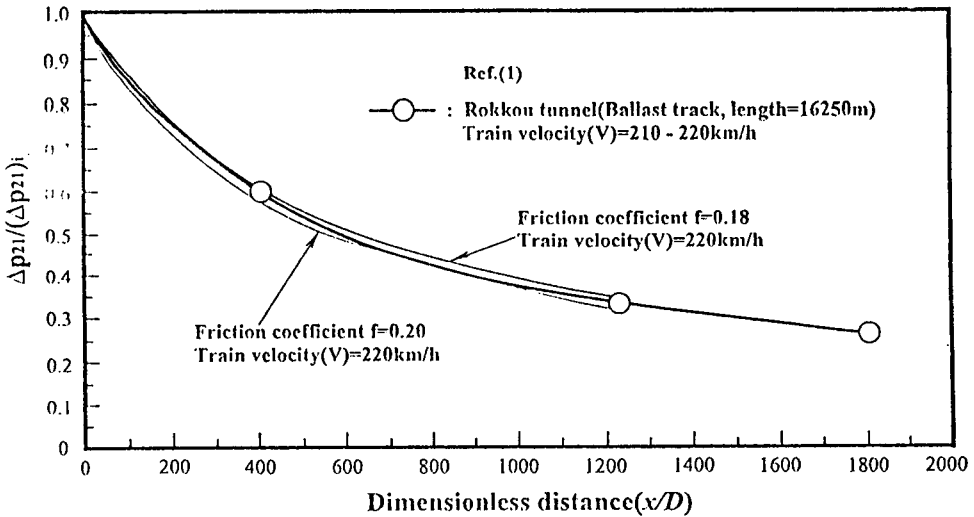


Fig. 6 Comparison of calculated attenuation with measured attenuation of compression wave in ballast track tunnel

Fig. 8은 열차의 속도가 $V=200\sim 270$ km/h인 경우, 거리 x 에 대한 압축파의 파면에서 최대 압력구배의 변화를 나타내고 있다. 계산에서 기체의 점성을 무시하였다. Fig. 8로부터, 최대 압력구배는 열차의 속도가 빠를수록, 또 압축파가 진행하여 갈수록 증가한다는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 열차의 속도가 $V=220$ 에서 270 km/h로 증가하게 되

면 최대 압력구배는 거의 모든 위치에서 약 2배 정도 증가하게 되며, 따라서 열차의 속도가 터널소음에 지대한 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 이 값은 김희동 등⁽²⁾에 의해 소개된 바와 같이 열차의 속도의 3승법칙에 적용하여, $V=220$ km/h를 기준으로 하여 계산하면 약 1.9배 정도되어 본 계산결과와 일치하였다. Fig. 9는 압축파의 파면에서 최

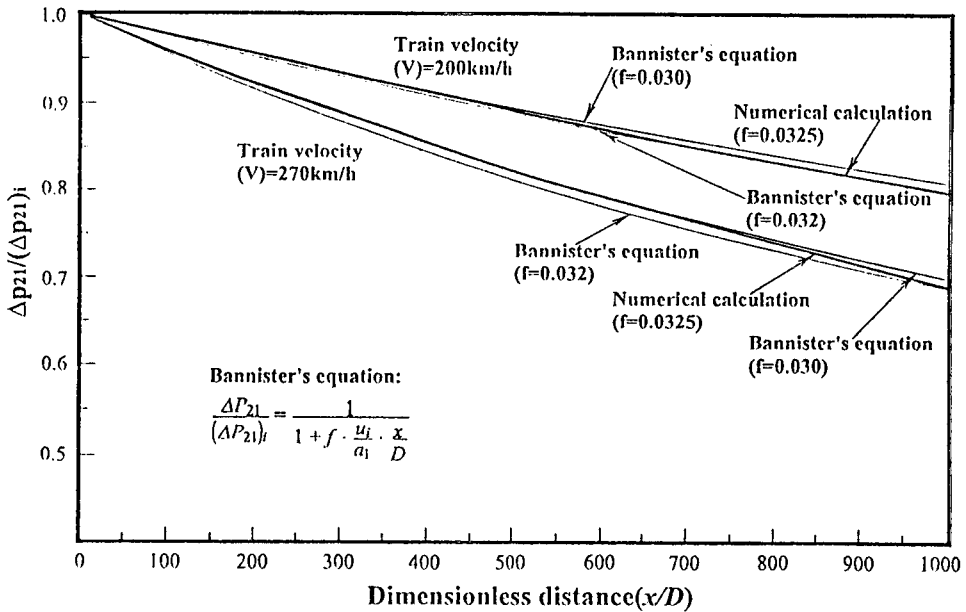


Fig. 7 Comparison of calculated auenuation of compression wave with attenuation by Bannister's equation

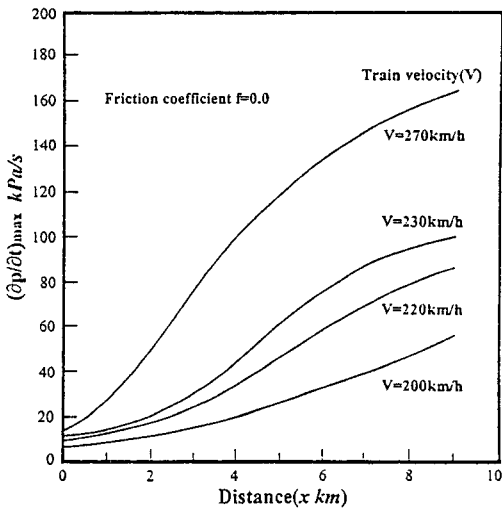


Fig. 8 Variation of maximum pressure gradient of compression wave with distance

대 압력구배에 미치는 마찰계수의 영향을 나타내고 있다. 압축파가 터널내를 전파해 갈 때, 파의 비선형성에 의하여 파면이 점차 급격하게 되는 경우와 기체의 점성에 의한 마찰 때문에 발생하게 되는 확산효과, 즉 파면이 전파해감에 따라 완만하게 되는 경우가 있으며, 이들의 상대적인 크기에 의하여 전

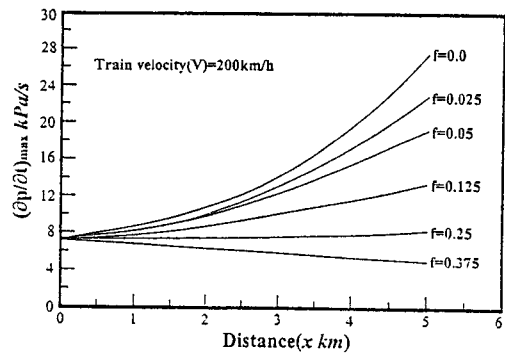


Fig. 9 Effect of wall friction on maximum pressure gradient of compression wave

파하는 압축파의 최대 압력구배가 결정된다. Fig. 9로부터 마찰계수 f 가 약 0.25보다 작은 경우에는 비선형효과가 지배적으로 되며, 0.25보다 큰 경우에는 확산효과가 지배적으로 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 열차의 속도가 약 $V=195$ km/h인 경우, 슬라브레도 터널에서 발생하는 압축파의 최대 압력구배의 거리에 대한 변화를 나타내고 있다. Fig. 10 중의 ○, ●, □는 실측값^(1,7)이며, 터널 입구로부터 $x=9$ km의 지점을 제외하고는 실선으로 표

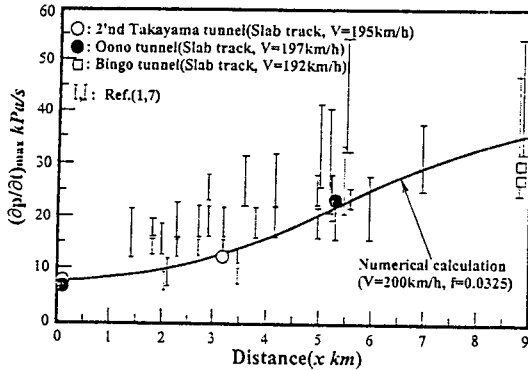


Fig. 10 Comparison of maximum pressure gradients of compression waves calculated and measured (train velocity is 200 km/h and friction coefficient is assumed by $f=0.0325$)

시한 $V=200$ km/h, $f=0.0325$ 의 계산결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또 I와 II는 각각 일본의 철도기술연구소의 측정값⁽¹⁾ 및 오카야마, 히로시마, 시모노세키의 철도공사국에서 실시한 미기압파에 대한 실태조사의 결과⁽⁷⁾로서, 미기압파의 최대 압력값과 최대 압력구배와의 관계를 나타내는 다음의 식⁽¹¹⁾을 이용하여 환산하였다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\pi r a_1}{A_t} \cdot p_{\max} \quad (13)$$

여기에서 p_{\max} 는 미기압파의 최대압력, A_t 는 터널

의 단면적, a_1 는 기준상태에서 음속, r 은 터널 출구와 측정점 사이의 거리를 나타낸다. 이와 같이 하여 얻어진 실측값과 계산결과는 대략 일치하고 있다. Fig. 11에서 실측값의 폭(I, II)이 크게 나타나고 있는 것은, 터널 부근의 지형, 터널내의 추기구멍(bleed hole), 반사판 등의 영향과 대향 차량에 의해 유기되는 흐름 등과 관련되기 때문이라고 생각된다. Fig. 11로부터 슬라브케도 터널에서 압축파의 최대 압력구배는 적어도 터널입구로부터 $x=9$ km 이내에서는 전파 거리에 따라 증가하는 것으로 보여진다.

Fig. 11은 전파 거리에 따른 압축파의 파면에서 최대 압력구배의 변화를 나타낸 것으로, 굵은 실선은 각각의 속도 V 에 대하여 마찰계수 $f=0.0325$ 로 가정한 경우의 수치계산 결과이다. 또 가는 실선은 “미기압파의 크기는 열차 속도 V 의 3승에 비례한다”는 소위 열차속도의 3승법칙을 이용하였다. 즉 $V=200$ km/h의 굵은 실선의 계산값을 기준으로 하여, $\partial p/\partial t \propto V^3$ 법칙에 따라, $V=220, 230, 270$ km/h인 경우로 환산한 결과를 나타낸다. Fig. 11로부터, 열차속도의 3승법칙에서는 열차의 속도에 상관없이 압력구배는 거리에 따라 증가하고 있다. 한편 계산에서는 대략 $x=5$ km의 지점까지의 압력구배는 비교적 큰 증가를 나타내고 있지만, 그 이후부터는 마찰효과에 의해 압력구배의 현저한 증가는 나타나지 않고 있다. 즉 열차의 속도가 V

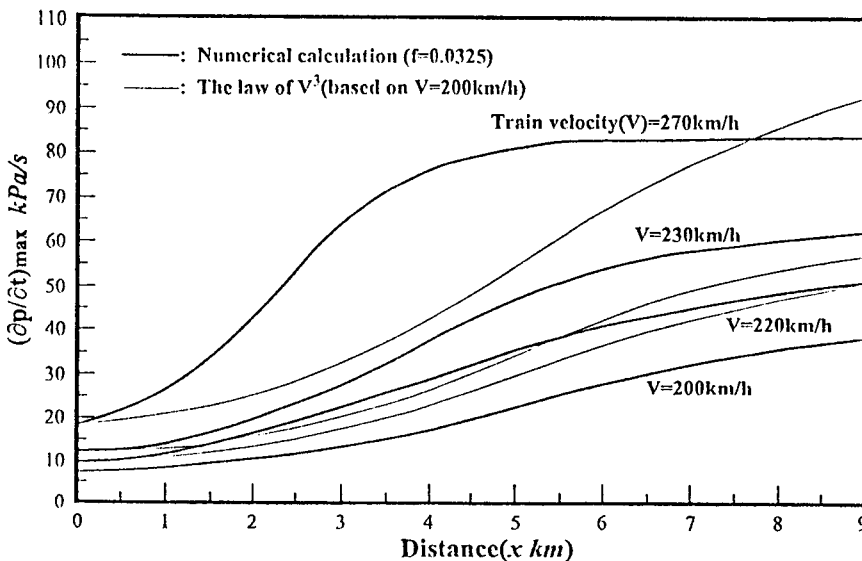


Fig. 11 Variation of maximum pressure gradient in compression wave with distance

=270 km/h인 경우, 터널의 길이가 약 5 km보다 길어지게 되면, 파의 비선형효과와 확산효과가 거의 균형을 취하게 되어, 최대 압력구배는 거의 변화하지 않게 된다. 이 결과에 의하면, 비록 길이가 짧은 터널이라고 할지라도, 열차의 속도가 빠르게 되면 미기압파, 즉 터널소음은 더욱 심각해진다는 것을 알 수 있다. 구체적으로 터널소음으로 문제시 되는 미기압파의 최대 압력값의 하한(lower limit)은 약 50 Pa 정도이며, 이 값으로 $\partial p/\partial t$ 의 값을 계산하면, 약 16 kPa/s 정도된다. 따라서, $V=200$ km/h인 경우에는 터널의 길이가 약 3~4 km 이상, $V=220$ km/h인 경우는 터널의 길이가 약 2 km 이상, 열차의 속도가 더욱 빨라져 $V=270$ km/h 정도 되면, 매우 짧은 터널이라고 할지라도 터널소음의 문제를 창출하게 된다는 것을 알 수 있다.

3.4 압축파의 폭

터널의 출구에서 발생하는 펄스 형태의 미기압파는 펄스 압력의 최대값 및 펄스의 시간적인 넓이(폭)에 의하여 특성화된다. 이러한 펄스 폭은 터널 내 압축파의 폭과 관계하기 때문에 압축파의(시간) 폭은 미기압파를 결정하는 중요한 요인이 된다. Fig. 12는 슬라브케도 터널에서 압축파의 폭의 거리에 따른 변화를 나타내고 있다. Fig. 12는 입의 x 지점에서 압축파 파면의 폭 b 를 터널 입구에서의 폭 b_0 로 무차원하여, 무차원거리 x/D 에 대해 표시하였다. 계산에서 마찰계수는 $f=0.0325$, 열차속도 $V=200\sim 270$ km/h였으며, 실측값⁽¹⁾은 약

$V=195$ km/h에 대한 것이다. Fig. 12로부터 $V=200$ km/h에 대한 경우, 계산값과 실측값이 일치하고 있음을 알 수 있다. 압축파의 폭은 터널내를 전파함에 따라 좁아지게 되며, 뿐만 아니라 열차의 속도가 증가할수록 압축파 파면의 폭은 현저하게 좁아진다. 또 앞의 Fig. 8에 의하면, 열차의 속도가 증가할수록 마찰에 의해 압축파의 과잉압의 감쇠효과는 크게 되었다. 따라서 압축파의 파면에서 최대 압력구배는 파면의 폭과 과잉압의 크기, 즉 양자의 효과에 의해 증가하는 경우와 감소하는 경우가 있다고 생각할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속철도 터널에서 발생하는 압축파의 전파거동 및 감쇠특성 등을 조사하기 위하여, 관내 일차원 비정상 압축성흐름에 대하여 TVD 수치계산법을 적용하였다. 수치계산에서는 압축파의 파면에서의 압력구배, 압축파의 과잉압 및 압축파의 폭 등에 미치는 마찰계수의 영향을 조사하여, 종래의 실측값들과 비교하였다. 본 연구의 결과들을 요약하면 다음과 같다.

(1) 압축파는 관내를 전파함에 따라 감쇠하며, 그 감쇠의 정도는 벽마찰의 효과가 클수록 현저하게 된다. 마찰계수 $f=0.0325$ 일 때, 계산결과와 슬라브케도 터널에서의 실측값과 일치하였으며, $f=0.18$ 일 때는 벨러스트케도 터널에서의 실측값과 잘 일치하였다.

(2) 압축파의 과잉압은 열차의 돌입속도가 빠를수록 마찰의 효과에 의해 현저하게 감쇠하며, 실제 터널의 측정값과 일치한다.

(3) 압축파의 파면에서 최대 압력구배는 열차의 속도가 빠를수록 증가한다.

(4) 압축파의 파면에서 최대 압력구배는 마찰에 의한 확산효과와 비선형 효과의 상대적인 크기에 의해, 증가하거나, 거의 변화하지 않거나, 혹은 감소한다. 본 계산에서는 마찰계수가 $f=0.25$ 보다 작으면, 파의 비선형효과가 지배적으로 되어, 거리에 따른 최대 압력구배는 증가하게 되지만, $f=0.25$ 보다 크게 되면 확산효과가 지배적으로 되어, 최대 압력구배는 감소한다.

(5) 압축파가 관내를 전파함에 따라 압축파의 폭은 작아지며, 이것은 열차의 속도가 빠를수록 현저해진다.

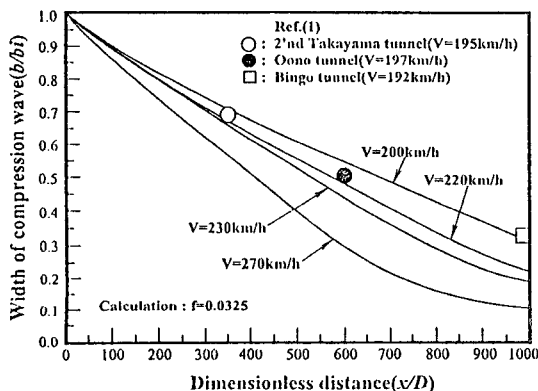


Fig. 12 Comparison of calculated and measured width of compression wave ($f=0.0325$)

참고문헌

- (1) Ozawa, S., 1979, "Studies of Micro-Pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit," *Railway Technical Res. Rept. of Japan*, No. 1121(In Japanese).
- (2) 김희동, 1994, "고속鐵道 터널에서 發生하는 流體力學的 波動現象," *大韓機械學會誌*, 第34卷, 第10號, pp. 796~807.
- (3) 김희동, 松尾一泰, 1994, "고속鐵道 터널에서 發生하는 波動現象에 關한 衝擊波管의 研究 (1) (壓縮波의 特性에 對하여)," *大韓機械學會論文集*, 第18卷, 第10號, pp. 2686~2697.
- (4) Lighthill, J., 1978, *Waves in Fluids*, Cambridge Univ. Press.
- (5) 김희동, 엄용균, 신현승, 이종수, 1994, "直管 內를 傳播하는 壓縮波에 對한 基礎的 研究," *安東大學校 基礎科學研究所 第8輯*.
- (6) Harten, A., 1983, "High Resolution Schemes for Hyperbolic Conservation Laws," *Journal of Computational Physics*, Vol. 49, pp. 357~393.
- (7) 小澤智, 森藤達夫, 前田達夫, 木下眞夫 1976, "トンネル出口微氣壓波の實態," *鐵道技術研究報告*, No. 1023.
- (8) Pai, S-I., 1959, *Introduction to the Theory of Compressible Flow*, D. Van Nostrand Company Inc.
- (9) 生井武文, 松尾一泰, 1983, "衝擊波の力學," *コロナ社*.
- (10) Bannister, F. K. and Mucklow, G. F., 1948, "Wave Action Following Sudden Release of Compressed Gas from a Cylinder," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 159, pp. 269~300.
- (11) 山本彬也, 1975, "列車とトンネルの空氣力學," *第11回 鐵道研究所講演論文集*.