

〈논 문〉

수직갱을 이용한 터널내 비정상 압축파의 피동제어

김희동* · 瀬戸口俊明**

(1996년 5월 3일 접수)

Passive Control of Unsteady Compression Wave Using Vertical Bleed Ducts

Heuy-Dong Kim and Toshiaki Setoguchi

Key Words : Compressible Flow(압축성흐름), Compression Wave(압축파), High-Speed Railway(고속철도), Impulsive Noise(충격소음), Shock Tube(충격파관), Railway Tunnel(철도터널), Shock Wave(충격파), Passive Control(피동제어)

Abstract

When a high-speed railway train enters a tunnel, a compression wave is generated ahead of the train and propagates along the tunnel, compressing and accelerating the rest air in front of the wave. At the exit of the tunnel, an impulsive wave is emitted outward toward the surrounding, which causes a positive impulsive noise like a kind of sonic boom produced by a supersonic aircraft. With the advent of high-speed train, such an impulsive noise can be large enough to cause the noise problem, unless some attempts are made to alleviate its pressure levels. For the purpose of the impulsive noise reduction, the present study investigated the effect of a vertical bleed duct on the compression wave propagating into a model tunnel. Numerical results were obtained using a Piecewise Linear Method and testified by experiment of shock tube with an open end. The results showed that the vertical bleed duct reduces the maximum pressure gradient of compression wave front by about 30 percent, compared with the straight tunnel without the bleed duct. As the width of the vertical bleed duct becomes larger, reduction of the impulsive noise is expected to be greater. However the impulsive noise is independent of the height of the vertical bleed duct.

1. 서 론

최근 환경오염이나 수송에너지 효율⁽¹⁾의 관점에서부터 고속 대량수송기관으로 성능이 뛰어난 고속철도에 관심이 고조되고 있다. 세계 각국에서는 재래식 철도의 고속화뿐만 아니라 새로운 고속철도의 건설에 노력하고 있으며, 이에 따라 철도의 공기역

학은 새로운 연구영역으로 부각되고 있다.

열차가 터널을 주행하는 경우에는 터널내부에서 매우 복잡한 압력과 현상이 발생하여, 개활지를 주행하는 경우에 비해 큰 압력변동 및 공기저항이 발생하게 된다.⁽²⁾ 따라서 차체의 설계나 터널, 역사(station) 및 선로 주변의 구조물의 설계를 위해서는 터널주행에서 발생하는 풍압, 풍속 등에 관한 정보가 필요하다. 현재 우리나라 고속철도 건설에는 상당수의 터널과 지하역사 건설 등이 계획되어 있어 고속열차의 공기역학⁽¹⁾에 관한 관심이 절실한

*회원, 안동대학교 기계공학과

**일본 Saga University 기계공학과

실정이다.

열차가 고속으로 터널에 돌입하는 경우 열차전방에는 압축파가 발생하여 터널내를 전파한다. 이 압축파가 터널출구에 도달하여 외부로 방출될 때 들은 발파음에 가까운 충격성 소음(Impulsive noise)이 발생한다.⁽³⁾ 이러한 충격성 소음은 종래의 열차소음과는 성질이 전혀 다른 것으로, 터널내를 전파하는 압축파와 관련되는 것으로 알려져 있다. 한편 열차의 돌입에 의해서 형성된 압축파가 관내를 전파하여 일부는 관출구면에서 팽창파로서 터널내로 반사하게 된다.⁽⁴⁾ 이 경우 진행되는 열차와 복잡한 간섭을 일으켜 차체에 큰 압력변동이 발생함은 물론 격심한 공기저항의 변동까지 발생하므로, 터널내를 전파하는 비정상 압축파(unsteady compression wave)에 관한 연구는 철도의 고속화에 앞서 선행되어야 할 연구과제이다.

고속철도뿐만 아니라 관내를 전파하는 압축파의 거동은 공학적으로 매우 흥미로울뿐만 아니라 환경소음과도 매우 깊은 관련을 가지므로 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 예를 들면 각종 플랜트의 배관계⁽⁵⁾에서나 열차의 공기브레이크,⁽⁵⁾ 자동차의 배기관,⁽⁷⁾ 대포나 기타 총기류⁽⁸⁾ 등에서도 고속철도 터널에서와 유사한 압력과 현상이 발생한다. 종래의 연구^(9,10)에 의하면, 터널입구에서 형성되는 압축파의 강도는 열차속도의 2승에 비례하며, 또 터널출구에서 발생하는 충격성 소음의 크기는 터널내를 전파하여 출구에 도달하는 압축파면의 압력의

시간미분($\partial p/\partial t$)에 비례한다고 보고하였다. 더욱이 터널내에서 발생하는 압력변동 및 공기저항 등은 터널내를 전파하는 압축파와 밀접한 관계를 가진다.

터널 출구에서 발생하는 충격성 소음을 저감시키기 위하여, 종래 터널 입구^(11,12) 및 출구부분^(13,14)에 여러 대책을 적용한 바 있다. 그러나 이러한 대책을 적용하는 경우 열차가 고속화됨에 따라 얻어지는 저감효과에는 한계가 있으며, 보다 적극적이고 새로운 경감대책이 요구되고 있다. 본 연구에서는 터널내부에 수직갱을 설치하여 압축파의 전파 특성을 실험적 및 수치해석적으로 조사하였다. 본 연구에서는 고속철도 터널내에서 발생하는 압력과 현상을 경감하기 위해 실제로 가장 필요한 압축파면의 압력구배에 관한 정보를 제시하고자 한다. 현재 우리나라에서는 고속철도 터널이 건설중에 있으므로, 본 연구의 결과들은 터널, 지하역사 및 터널의 공조시설 등을 설계하는데 매우 유용하리라 생각된다.

2. 수치해석법

2.1 지배방정식 및 수치계산법

본 연구에서는 관내를 전파하는 압축파를 제어하기 위하여 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 수직갱을 시험하였다. 그림에서 관의 왼쪽으로부터 오른쪽으로 전파하는 압축파의 일부는 수직갱을 통하여 내기로

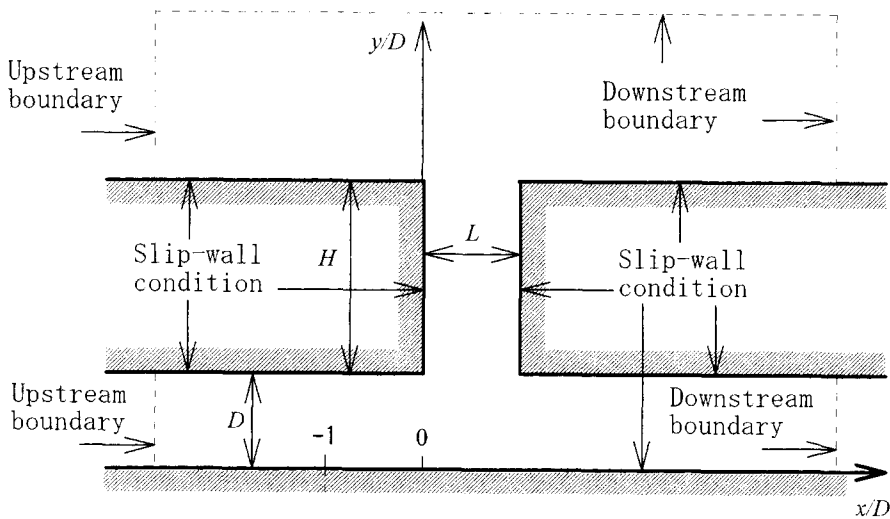


Fig. 1 Calculation model and area

방출되고 나머지 일부는 관의 오른쪽으로 전파한다. 그림에 나타낸 계산영역에 대하여 기체의 마찰이나 열전달에 의한 영향을 무시하여 2차원 비정상 압축성 흐름방정식을 적용하였다. 이 경우 질량, 운동량(x방향과 y방향) 및 에너지 보존의 법칙은 다음으로 주어진다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial(e+p)u}{\partial x} + \frac{\partial(e+p)v}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기에서 ρ 는 밀도, t 는 시간, u 와 v 는 각각 x 방향과 y 방향의 속도 성분을 나타내며, p 는 압력을 나타낸다. 또 e 는 단위체적 당 전에너지로 기체의 비열비 k 를 사용하여 다음 식으로 주어진다.

$$e = \frac{p}{k-1} + \frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2) \quad (2)$$

위의 식 (1)과 식 (2)의 상태량들을 다음과 같이 무차원화한다.

$$\left. \begin{aligned} x' = \frac{x}{L}, \quad y' = \frac{y}{L}, \quad t' = \frac{t}{kL/a_1}, \quad p' = \frac{p}{p_1} \\ \rho' = \frac{\rho}{\rho_1}, \quad e' = \frac{e}{p_1}, \quad u' = \frac{u}{a_1/k}, \quad v' = \frac{v}{a_1/k} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

여기에서 L 은 수직갱의 폭이며, a 는 음속, 그리고 하첨자 1은 대기의 상태를 의미한다. 식 (3)에서 나타낸 무차원량(')에서 단순화를 위해 상첨자 '를 생략하면, 식 (1)은 다음과 같은 보존식으로 쓰여진다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} &= 0 \\ U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e+p)u \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e+p)v \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

본 계산에서는 Strang에 의하여 제안⁽¹⁵⁾된 시간분할법을 적용하였으며, x 및 y 방향의 차분 연산자를 이용하여 piecewise linear method (PLM)⁽¹⁶⁾로 계산하였다. 위의 식 (4)에 시간분할법을 적용하면, 비정상 2차원 유동방정식은 다음과 같은 2개의 방정식으로 쓰여진다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + A_x(V) \frac{\partial V}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + A_y(V) \frac{\partial V}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

여기에서 V_x , V_y , $A_x(V)$ 및 $A_y(V)$ 는 각각 다음으로 주어진다.

$$\left. \begin{aligned} V_x = \begin{bmatrix} \rho \\ u \\ p \end{bmatrix}, \quad V_y = \begin{bmatrix} \rho \\ v \\ p \end{bmatrix} \\ A_x(V_x) = \begin{bmatrix} u & \rho & 0 \\ 0 & u & 1/\rho \\ 0 & kp & u \end{bmatrix}, \quad A_y(V_y) = \begin{bmatrix} v & \rho & 0 \\ 0 & v & 1/\rho \\ 0 & kp & v \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

계산에서는 먼저 PLM으로 x 방향에 대한 1차원 Euler 방정식을 계산하여, 그 후 시간전진 공간차분에 의해 수송량을 계산한다. y 방향에 대해서도 같은 방법으로 계산하므로, 따라서 본 계산은 4회의 계산을 한 사이클로 하여 시간을 진행시켜 반복 계산을 수행하였다.

2.2 계산조건 및 경계조건

비정상 압축파가 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 직경 D (등가직경)의 직관을 전파하는 경우에 대하여, 본 계산에서는 단순화를 위하여 다음 식⁽¹⁷⁾으로 표현되는 실제 터널에서의 압축파형을 $x/D = -2.0$ 의 위치에 가정하였다.

$$\frac{\Delta p_i}{p_a} = \frac{\Delta p^*}{p_a} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\pi x}{W} + \frac{5\pi D}{W} \right) \right\} \quad (7)$$

여기에서 $\Delta p_i/p_a$ 와 $\Delta p^*/p_a$ 는 게이지 압력으로 Fig. 2에 나타내었다. 또 p_a 는 압축파 전방의 대기의 압력, W 는 압축파의 파장이며, Fig. 2에는 W/D 를 변화시킨 경우의 압축파형을 나타내었다. 한편 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 관벽에서는 slip조건을, 관의 입구에는 유입조건을 가정하였으며, 관의 출구 및 수직갱의 상류측 및 하류측 경계는 상태량의 구배가 0으로 되는 유출조건을 적용하였다. 한편 본 계산결과를 실제 터널에 적용하기 위하여, D 를 9 m 그리고 Δp^* 를 2 kPa로 가정하여, 위의 식 (7)로부터 초기 압축파형을 얻었으며, 또 대기 중의 공기의 음속 a_1 를 350 m/s, 온도 T 를 305.15 K, 밀도 ρ 를 1.143 kg/m³, 대기압 p_a 를 100.125 × 103 Pa, 공기의 비열비 k 를 1.4로 가정하였다.

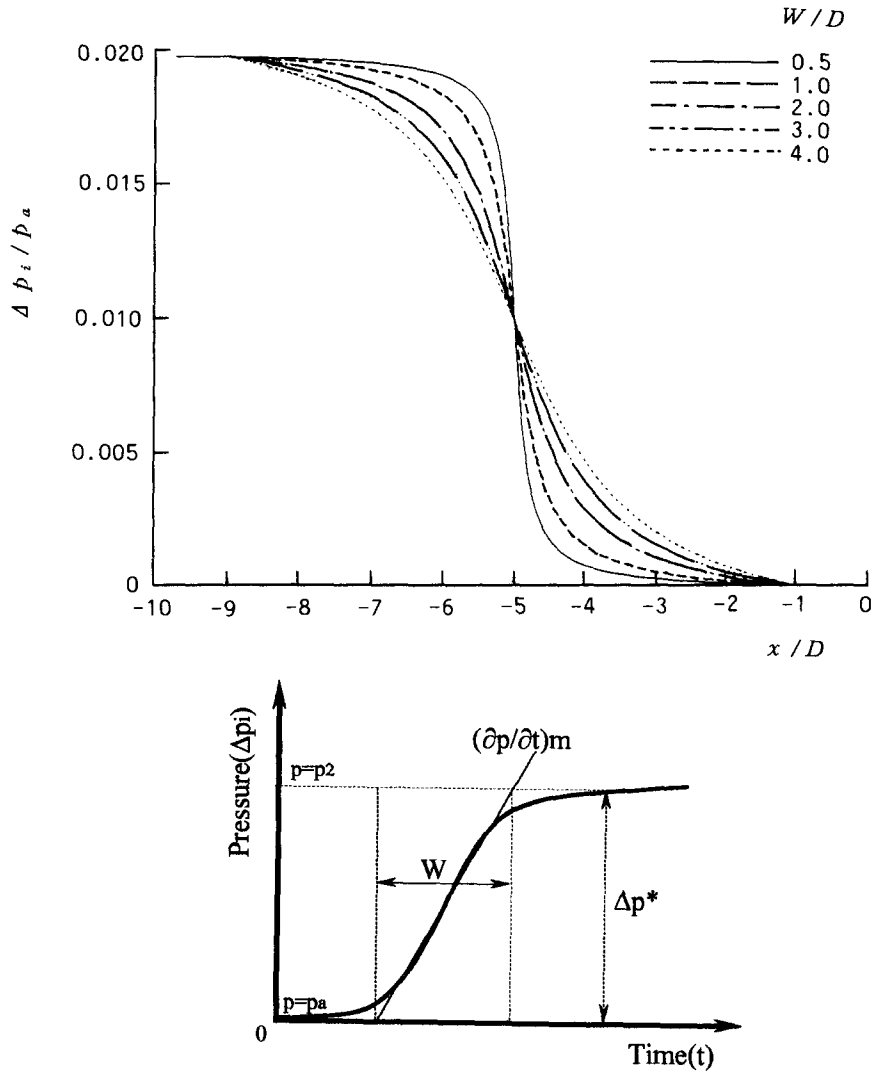


Fig. 2 Initial compression wave forms (W is wave length of compression wave and D equivalent diameter of duct)

3. 실험장치 및 방법

터널에서 전파하는 압축파를 측정하기 위하여 간단한 터널 모형장치를 제작하였다. 모형터널은 Fig. 3에 개략적으로 나타낸 바와 같이 저압실이 대기압에 개방되어 있는 대기 개방형 충격파관을 이용하였다. 고압실과 저압실의 길이는 각각 1.32 m 와 2.71 m이며, 이들은 모두 1번의 길이가 60 mm 인 정사각형 단면(등가직경 $D=60$ mm)으로 되어 있다. 저압실에는 격막으로부터 2185 mm 떨어진

위치에 폭 L (실험에서는 60 mm로 고정), 높이 H 인 수직관을 설치하였다.

실험은 충격파관의 고압실에 대기압보다 약간 높은 압력의 건조공기를 충전시켜 고압실과 저압실 사이에 위치하는 격막(두께 0.03 mm의 셀로판막)을 파막하게 되면, 고압실의 공기가 저압실로 급속히 유입하여 저압실 입구에서 압축파가 형성된다. 따라서 이 압축파는 고속터널의 입구에서 열차에 의해 형성되는 압축파의 역할을 하게 된다.

한편 고압실과 저압실의 하벽에는 몇 개의 압력 측정용 정압공(압력변환기 PCB pressure trans-

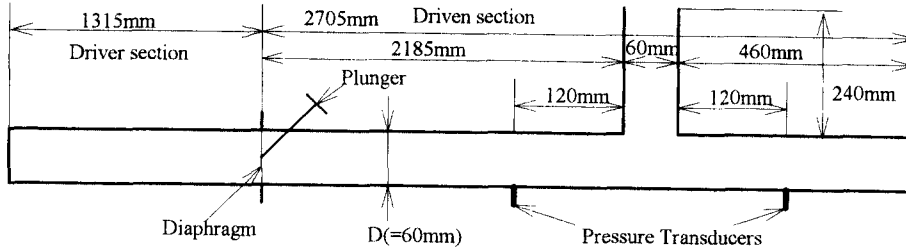
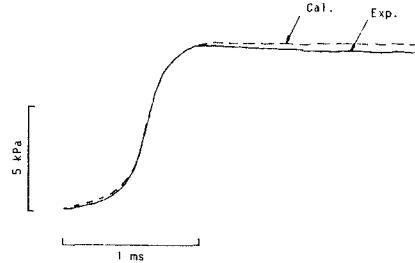


Fig. 3 Shock tube facility

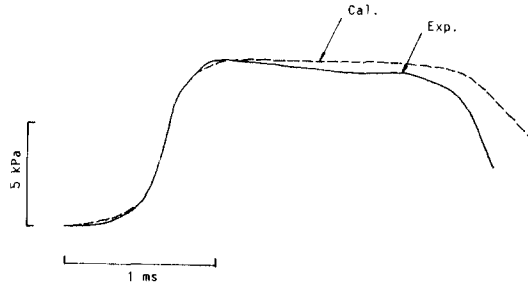
ducer 112A21)을 설치하였으며, 압력센서로부터 전기적인 출력은 직류증폭기를 거쳐 파형기록 장치에 보존한다. 압력측정에서 오차는 반복실험 및 압력센서의 검정을 통하여 확인하였으며, 그 결과 고압실에서 측정 압력의 오차는 거의 무시할 수 있었으나, 저압실에서 압축파를 측정하는데에는 약 2%의 오차가 발생하였다.

4. 결과 및 고찰

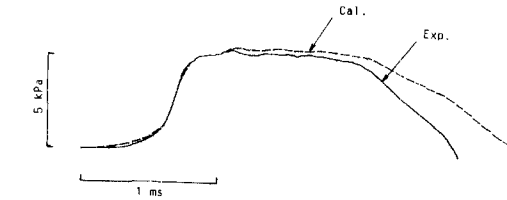
Fig. 4에는 관의 등가직경을 $D=60\text{ mm}$ 로 한 경우, 수치계산 및 실험에 의한 압축파형을 나타내었다. 그림의 (a)에는 $x/D=-2.0(y/D=0)$ 에서 측정된 압력파형을 실선으로, 수치계산에서 가정된 초기 압축파형을 점선으로 나타내었다. 그림 (b)와 (c)에는 각각 수직갱이 없는 즉 직관인 경우와 수직갱을 설치(수직갱의 폭 $L=D$, 높이 $H=4D$)한 경우, $x/D=3.0(y/D=0)$ 에서 압축파형을 나타내었다. 그림에서 $x/D=-2.0$ 에서 압력은 압축파의 파두가 압력센서에 도착하면서부터 급격하게 상승하기 시작하여, 그 후 어느 일정값을 유지한다. 그러나 직관 및 수직갱을 설치한 두 경우 $x/D=3.0$ 의 위치에서 압력은 압축파의 파두가 도착하여 약 2.5 ms 경과 후부터는 어느 일정값으로부터 감소하기 시작한다. 이것은 관 출구를 향해 전파하는 압축파가 출구면에서 반사팽창파로 되는 것에 기인한다. 그림(c)에는 압축파로 인한 압력상승 후 압력은 어느 일정값으로 되지만, 그림(b)에 비해 약간의 변동을 보이고 있다. 이것은 수직갱의 입구 모서리에서 발생한 정상압력파(steady pressure wave)의 영향 때문이다. 또 그림(c)에서 나타난 압력감소는 그림(b)에 비해 빠르다. 이것은 수직갱의 출구를 향해 진행되는 비정상 압축파가 수직갱의 출구면에서 반사하여 팽창파로 되기 때문이다.



(a) Without vertical hole initial compression wave at $x/D=-2.0$



(b) Without vertical hole compression wave at $x/D=3.0$



(c) With vertical hole compression wave at $x/D=3.0$ ($L=D, H=4D, W=2D$)

Fig. 4 Compression wave forms at points of $x/D=-2.0$ and $3.0(y/D=0)$

실제적으로 그림 (a)의 점선으로 나타낸 바와 같은 압축파형은 충격파관의 실험을 통하여 재현하는 것은 매우 어렵다. 본 실험에서는 수십번 실험을 반복한 후에 충격파관의 파막(셀로판)을 적절하

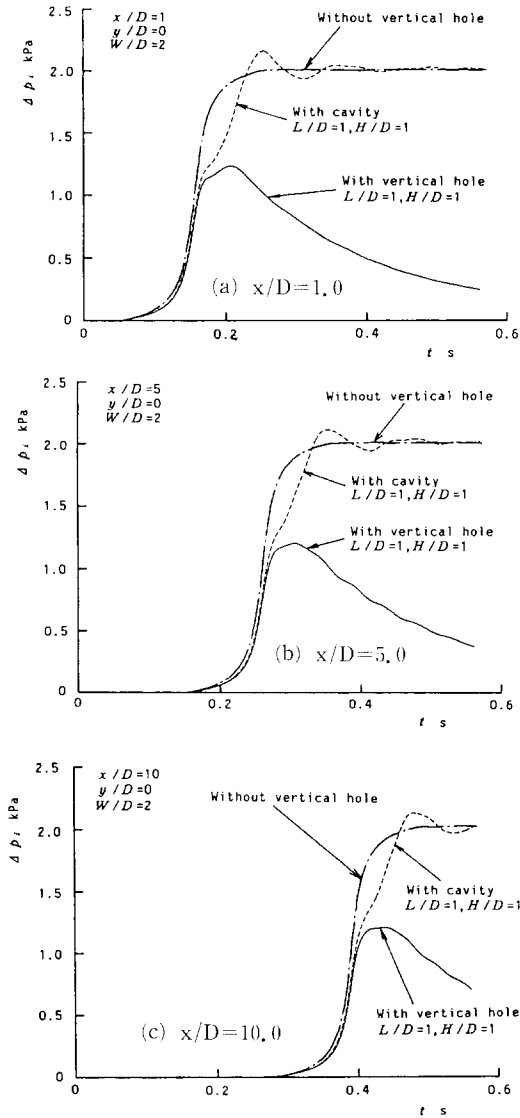


Fig. 5 Compression wave forms at points of $x/D = 1.0, 5.0$ and 10.0 ($y/D = 0$)

게 조절함으로써 그림의 실선으로 나타낸 바와 같은 압축파형을 얻을 수 있었다. 본 실험에서 얻어진 압축파형을 초기 압축파형으로 입력하여 수치계산할 수 있으나 본 연구에서는 이를 시도하지 않았다. 따라서 본 연구의 실험과 수치계산 결과들의 비교는 그림(a)의 압축파형에서 나타난 약간의 차이를 고려하여야 한다. 이러한 차이를 감안한다면, 그림(b)에 나타낸 실험과 계산결과는 매우 잘 일치한다고 할 수 있다. 더욱이 그림(c)에 나타낸 바

와 같이 수직갱을 설치한 경우에도 압축파형은 실험과 계산결과가 매우 잘 일치한다. 따라서 본 계산법은 수직갱이 설치되어 있는 유동장을 적절하게 묘사할 수 있다고 판단된다.

Fig. 5에는 직관, 직관내 공동(cavity)을 설치한 경우⁽¹⁸⁾ 및 수직갱을 설치한 세 경우에 대하여, 초기 압축파의 파장 W/D 를 2.0으로 가정하여 $x/D = 1.0, 5.0$ 및 10.0 ($y/D = 0$)의 지점에서 계산한 압축파형을 나타내었다. 계산에 적용된 수직갱 및 공동의 폭은 $L=D$ 이고, 높이는 $H=D$ 로 동일하다. 그림으로부터 직관인 경우와 공동을 설치한 경우에 비해 수직갱을 설치하면, 압축파의 과잉압(over pressure)은 상당히 낮아진다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 수직갱을 설치한 경우 과잉압의 변화는 수직갱의 물리적인 크기에 의존하게 된다. 본 연구에서 $L=D, H=D$ 인 경우 터널로 진행되는 압축파의 과잉압은 초기 압축파의 과잉압의 60~70% 정도로 된다는 것을 관찰할 수 있다. 직관내에 공동을 설치한 점선의 경우 압축파에 의한 과잉압은 직관보다도 부분적으로 크게 나타나지만, 공동내에서 압력파가 회절(diffraction) 및 반사(reflection)하게 되므로, 압력은 약간의 변동을 나타낸다. 그러나 압축파 후미부의 압력은 직관에서의 압력에 접근한다는 것을 알 수 있다. 종래 연구에 의하면, 터널출구에서 발생하는 충격성소음은 압축파면의 압력구배에만 의존하였으므로, 본 연구에서는 압축파의 과잉압은 더 이상 상세하게 다루지 않았다.

한편 수직갱을 설치한 경우에 압축파면은 직관이 나 공동의 경우와는 달리 파면의 후미부에서 압력 감소가 현저하게 나타난다. 이것은 수직갱으로 전파한 비정상 압축파가 출구면에서 반사팽창파(reflected expansion wave)되어 관내로 전파하기 때문이다. 수직갱을 설치한 경우에 비정상 압축파에 의해서 발생하는 유동장을 상세히 관찰하기 위해서 Fig. 6과 Fig. 7에는 각각 등압선도와 유속벡터를 나타내었다. Fig. 6의 각 무차원 시간(τ)에 대하여 나타낸 등압선도에서 각 선간의 압력차($\Delta p_i/p_a$)는 0.0003Pa이다. 그림(a)는 $\tau = 2.7707$ 로 압축파의 파두가 수직갱의 위치에 도달한 상태를, 그림(d)에는 $\tau = 5.5530$ 으로 압축파가 수직갱 부분을 통과한 직후의 상태를 나타낸다. 그림에서 관의 왼쪽으로부터 오른쪽으로 전파하는 비정상 압축파가 수직갱 부분에 도달하게 되면, 파의 회절현상으로 인하여 일부는 수직갱으로 나며지 일부는 관의

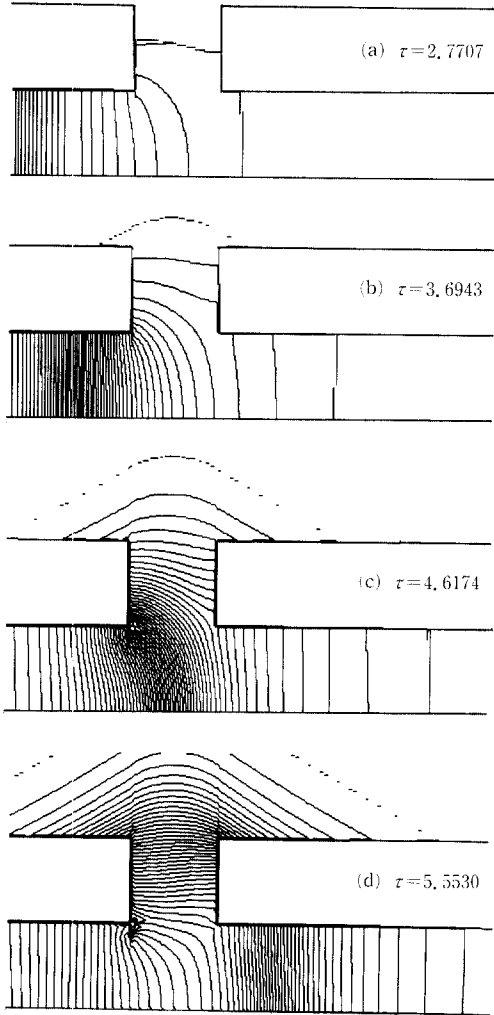


Fig. 6 Pressure profiles at each time ($L=D$, $H=D$, $W=3D$ and is dimensionless time, $t/kD/a_1$)

오른쪽으로 전파한다. 여기에서 관 축방향으로 전파하는 압축파의 지향성⁽¹⁹⁾로 인하여, Fig. 5에 나타난 바와 같이 초기압축파 과잉압의 60~70% 정도가 관축방향으로 향하게 된다. 그리고 압축파가 수직갱을 통과한 직후에는 수직갱의 입구 모서리 부근에서 정상팽창파가 발생한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에는 수직갱의 입구 부분에서 유동을 상세하게 관찰하기 위하여, 유속벡터를 각 시간에 대하여 나타내었다. 그림에서 무차원 시간 $\tau=4.617$ 이후에는 수직갱의 모서리에서 유속은 상당히 빨라지며, 모서리 부근에서 발생하는 유속의 최대값은

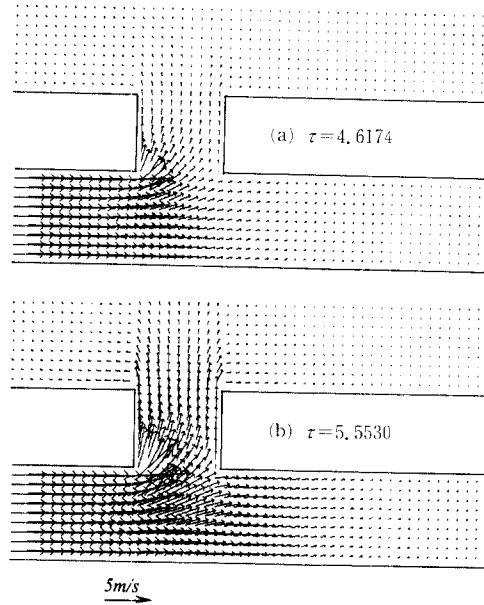


Fig. 7 Velocity vectors at each time ($L=D$, $H=D$ and $W=3D$)

6~7 m/s 정도라는 것을 알 수 있다. 이러한 유속은 초기압축파의 강도, 압축파의 파장 그리고 관의 물리적인 크기에 의존하는 것으로 예상된다.

Fig. 5에 나타난 압축파가 수직갱($L=D$, $H=D$) 부분을 통과하는 경우 압축파면의 압력구배의 공간적 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 그림(b)에는 참고를 위하여 직관과 공동($L=D$, $H=D$)을 설치한 경우에 대하여 압축파면의 최대압력구배 $(\partial p/\partial t)_m$ 를 함께 나타내었다. 또 그림에는 관의 하벽($y/D=0$)과 상벽($y/D=1.0$)에서의 계산값을 각각 Δ 와 \circ 로 나타내었다. 그림(a)의 경우, 압축파면의 최대압력구배는 수직갱의 위치에서부터 급격하게 감소하며, 수직갱의 하류에서는 일정한 값을 유지한다. 그러나 공동의 경우 최대압력구배의 값은 공동부분에서 급격히 감소하며, 공동의 하류에서 더욱 감소한 후, 공간적 위치에 관계없이 일정값으로 된다는 것을 관찰할 수 있다. 수직갱과 공동의 하류에서 발생하는 최대압력구배의 일정값으로부터 관내에 수직갱을 설치하는 경우, 최대압력구배는 직관에 비해 약 30% 정도, 공동의 경우에 비해 약 20% 정도 작아진다는 것을 알 수 있다. 따라서 관내에 수직갱을 설치하게 되면 관 출구에서 발생하는 충격성소음을 상당히 저감시킬 수 있다고 판단된다. 이러한 저감효과는 압축파의 파장과 수직갱의 물리

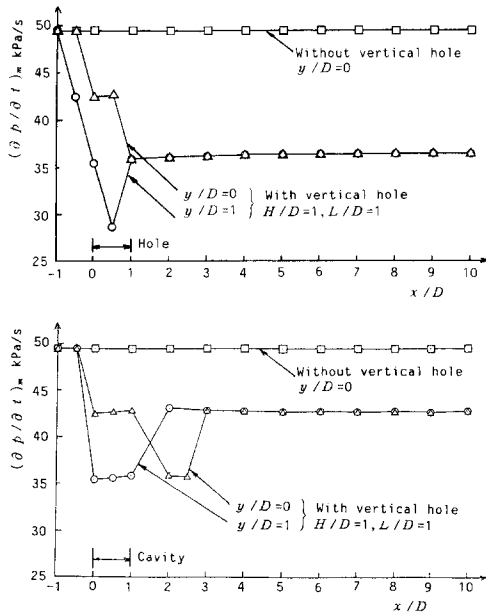


Fig. 8 Variation of maximum pressure gradient in compression wave front ($W/D=2.0, L=D$ and $H=D$)

적인 크기에 의존할 수 있으므로, Fig. 9에는 초기 압축파의 파장이 변하는 경우에 수직갱의 효과를 나타내었다. 그림의 계산점은 $x/D=5.0$ ($y/D=0$)에 대한 것이며, 직관과 수직갱 ($L=D, H=D$)을 설치한 두 경우에 압축파면의 최대압력구배를 나타내었다. 그림의 종축에 나타낸 $(\partial p/\partial t)_m$ 과 $(\partial p/\partial t)_{ms}$ 는 각각 수직갱을 적용한 경우와 직관에서 발생하는 압축파면의 최대압력구배를 나타낸다. 그림에서 두 경우 모두 초기압축파의 파장이 $W/D=1.0$ 에서 최대압력구배는 급격하게 감소하며, 파장이 더욱 커지는 경우에 최대압력구배의 감소율은 작아진다는 것을 알 수 있다. 따라서 터널 출구에서 발생하는 충격성소음을 저감시키기 위하여 수직갱을 터널내부에 설치하려고 하는 경우 터널내부에서 발생하는 압축파의 파장을 고려하여 수직갱의 크기를 결정할 필요가 있다. 본 계산결과는 초기압축파의 강도가 2kPa에 대한 것이지만, 초기압축파의 강도가 변화하는 경우에도 유사한 결과를 얻었다.

Fig. 10에는 직관에 대한 수직갱의 효과를 상세히 조사하기 위하여, 수직갱의 높이 H 를 변화시켜 압축파면의 최대압력구배를 압축파의 파장에 대하여 나타내었다. 그림의 종축에는 직관의 경우와 수

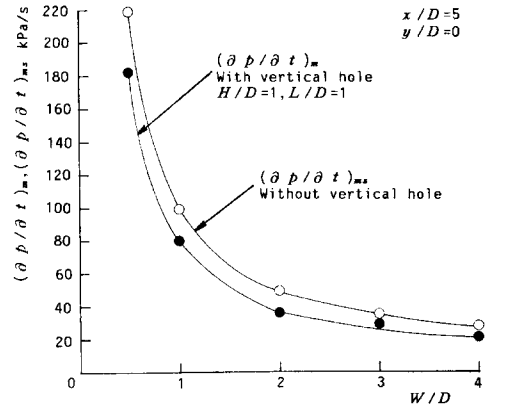


Fig. 9 Comparison of maximum pressure gradient in compression wave front with and without vertical bleed hole

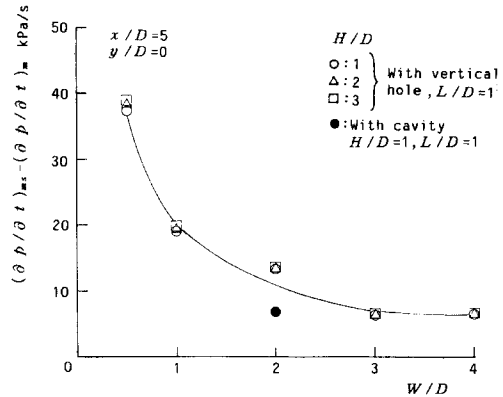


Fig. 10 Effects of wave length and hole height on maximum pressure gradient in compression wave front

직갱을 적용한 경우에 대한 압축파면의 최대압력구배의 차 $(\partial p/\partial t)_{ms} - (\partial p/\partial t)_m$ 를 나타내었다. 이러한 차는 충격성 소음의 저감에 직접적으로 관계되므로 본 연구에서는 수직갱의 이득효과라고 정의하였다. 그림으로부터 압축파의 파장이 길어질수록 수직갱의 이득효과가 작아지며, 이러한 경향은 수직갱의 높이 H 에 의존하지 않는다는 것을 알 수 있다. 본 계산결과는 $x/D=5.0$ 에 대한 것이지만, 수직갱의 위치로부터 충분히 떨어진 다른 하류의 위치에서도 유사한 결과를 얻었다.

한편 Fig. 11에는 수직갱의 폭 L 을 변화시킨 경우 압축파의 파장에 대한 수직갱의 이득효과를 나타내었다. 그림에서 수직갱의 폭이 일정한 경우 압축파의 파장이 길어질수록 수직갱의 이득효과는 작

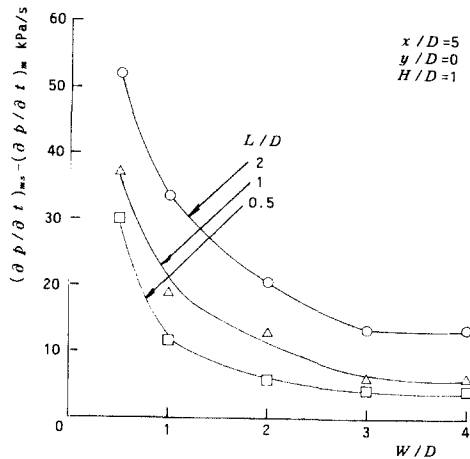


Fig. 11 Effects of wave length and hole width on maximum pressure gradient in compression wave front

아지게 된다. 그러나 압축파의 파장이 일정한 경우 수직갱의 폭이 커질수록 수직갱의 이득효과는 커진다는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 터널의 등가직경과 동일한 압축파의 파장인 경우, 수직갱의 폭을 0.5D에서 2D로 늘이게 되면 이득효과는 약 3배 정도로 커지게 된다.

이상으로부터 충격성소음을 저감시키기 위하여, 터널내에 수직갱을 설치하는 경우 수직갱의 폭은 터널의 등가직경보다 클수록 효과적이라는 것을 알 수 있다. 그러나 이것은 경제적이지 못할 수 있으며, 가능한 한 큰 수직갱을 설치하는 것이 압력파를 경감시키는데 바람직하다. 본 연구에서는 수직갱의 물리적인 크기가 압축파의 과잉압에 미치는 영향은 나타내지 않았지만, 수직갱의 크기가 압축파의 과잉압에 미치는 영향도 최대압력구배에서 나타난 경향과 유사하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 고속철도 터널출구에서 발생하는 충격성소음을 저감시킬 목적으로, 터널내에 수직갱을 설치하여 압축파의 제어를 시험하였다. 계산에서는 2차원 유로내 모델 수직갱을 설치하여 수직갱이 압축파면의 최대압력구배에 미치는 영향을 조사하였다. 또 계산결과의 타당성을 입증하기 위하여 충격파관을 이용한 실험을 수행하였다. 그 결과 본 계산결과는 실험결과와 잘 일치하였다. 본 계산결

과로부터 터널내에 수직갱을 설치하는 경우 수직갱의 폭이 클수록 충격성소음의 저감효과는 커지게 되며, 또 압축파의 파장이 작을수록 수직갱의 효과가 커진다는 것을 알 수 있었다. 그러나 수직갱의 높이는 충격성소음에 영향을 미치지 않았다.

본 연구로부터 수직갱을 설치하여 터널출구에서 발생하는 충격성소음을 저감시키기 위해서는 매우 큰 수직갱이 필요하였다. 이러한 수직갱을 설치하는 것은 현실적으로 매우 어려우며, 따라서 저자들은 터널내부에 다공질벽의 적용을 실험적 및 수치해석적으로 시험하고 있다.

후 기

이 논문은 고속철도 터널출구에서 발생하는 충격성소음의 저감대책에 관한 연구의 일환으로, 1995년도 과학재단의 공모과제(핵심전문연구) 연구비를 지원받아 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

- (1) 김희동, 1996, "고속鐵道の 空氣力學 I ~ III," 大韓機械學會誌 第36卷1號, 第36卷3號, 第36卷5號.
- (2) 김희동, 1997, "터널내를 주행하는 1열차의 공기역학적 해석," 大韓機械學會論文集, 第21卷, 第8號, pp. 963~972.
- (3) 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.
- (4) Kim, H. D. and Setoguchi, T, 1996, "Interaction of Unsteady Expansion Wave with Cross-Sectional Area Change in Tube," *KSME Journal*, Vol. 10, No. 4.
- (5) Brandmaier, H. E. and Knebel, M. E., 1976, "Steam Flow Through Safety Valve Vent Pipes," *Journal Fluid Eng.*, Vol. 98, No. 2, pp. 199~207.
- (6) 長谷川泉, 川口清, 田中宏, 1989, "長大管内の壓縮空氣の減壓特性に関する研究(第3報, 分岐管付長大管の實驗)," 日本機械學會論文集(B), 第54卷, 第503號, pp. 1602~1606.
- (7) Sekine, N., et. al., 1988, "Initiation and Propagation of Shock Waves in the Exhaust Pipe of an

- Internal Combustion Engine," *Transactions of JSME*, Vol. 54, No. 498 (In Japanese).
- (8) Klingenberg, G. and Heimerl, J. M., 1992, "Gun Muzzle Blast and Flash," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, AIAA Educational Series.
- (9) 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.
- (10) 金義東, 外 1人, 1994, "高速鐵道 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8卷, 第10號.
- (11) 小澤智, 內田俊孝, 前田達夫, 1977, "入口緩衝工による 備後トンネル微氣壓波の低減," 日本鐵道技術研究所報告書, No. 1054.
- (12) Ozawa, S., Maeda, T., Matsumura, T., Uchida, K., Kajiyama, H. and Tanemoto, K., 1991, "Countermeasures to Reduce Micro-Pressure Waves Radiating from Exits of Shinkansen Tunnels," *Proc. of 7th Intl. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Nov. 1991, Brighton, UK.
- (13) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1996, "Passive Control of Impulsive Noise Caused by Unsteady Compression Wave," *ASME Trans. Journal Fluid Engineering* (to be Published).
- (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) Strang, G., 1968, "On the Construction and Computation of Difference Schemes," *Journal Numerical Anal.*, Vol. 5, No. 3.
- (16) Glimm, J., 1965, "Solution in the Large for Nonlinear Hyperbolic System of Equations," *Communications of Pure and Applied Mathematics*, Vol. 18, pp. 697~715.
- (17) Ozawa, S., 1979, "Studies of Micro-Pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit," *Railway Technical Res. Rept. of Japan*, No. 1121.
- (18) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1997, "Passive Control of Unsteady Compression Wave Using Porous Walls," *International Conf. on Fluid Engineering*, July, Tokyo, Japan.
- (19) 金義東, 外 1人, 1996, "高速鐵道 터널出口에서 發生하는 衝擊性 騒音의 低減을 위한 實驗的 研究," 大韓機械學會論文集, 第20卷, 第7號.