

〈논 문〉

다공벽을 전파하는 압축파에 관한 수치해석적 연구

김 희 동* · 瀬戸口俊明**

(1996년 6월 19일 접수)

Numerical Study of Compression Waves Propagating Through Porous Walls

Heuy-Dong Kim and Toshiaki Setoguchi

Key Words : Compressible Flow(압축성흐름), Compression Wave(압축파), High-Speed Railway(고속철도), Impulsive Noise(충격성소음), Shock Tube(충격파관), Shock Wave(충격파), Passive Control(피동제어), Porous Wall(다공벽)

Abstract

When a high-speed railway train enters a tunnel, a compression wave is generated ahead of the train and propagates through 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. In the purpose of the impulsive noise reduction, the present study calculated the effect of porous walls on the compression wave propagating into a model tunnel. Two-dimensional unsteady compressible equations were differenced by using a Piecewise Linear Method. Calculation results show that the cavity/porous wall system is very effective for a compression wave with a large nonlinear effect. The porosity of 30% is most effective for the reduction of the maximum pressure gradient of the compression wave front. The present calculation results are in a good agreement with experimental ones obtained previously.

1. 서 론

최근 환경오염이나 수송에너지 효율⁽¹⁾의 관점에서부터 고속 대량 수송기관으로 성능이 뛰어난 고속철도에 관심이 고조되고 있다. 세계 각국에서는 재래식 철도의 고속화뿐만 아니라 새로운 고속철도

의 건설에 노력하고 있으며, 이에 따라 철도의 공기역학은 새로운 연구영역으로 부각되고 있다.

열차가 터널을 주행하는 경우에는 터널내부에서 매우 복잡한 압력파 현상이 발생하여, 개활지를 주행하는 경우에 비해 큰 압력변동 및 공기저항이 발생하게 된다.^(2,3) 따라서 차체의 설계나 터널, 역사(station) 및 선로 주변의 구조물의 설계를 위해서는 터널주행에서 발생하는 풍압, 풍속 등에 관한 정보가 필요하다. 현재 우리나라 고속철도 건설에

*회원, 안동대학교 기계공학과

**佐賀大學 機械工學科

는 상당수의 터널과 지하역사 건설 등이 계획되어 있어 터널을 주행하는 고속열차의 공기역학^(2,3)에 대한 관심이 절실한 실정이다.

열차가 고속으로 터널에 돌입하는 경우 열차전방에는 압축파(compression wave)가 발생하여 터널내를 전파한다. 이 압축파가 터널출구에 도달하여 외부로 방출될 때 돌연 발파음에 가까운 충격성 소음(impulsive noise)이 발생한다.⁽⁴⁾ 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 관 출구면에서 팽창파(expansion wave)로서 터널내로 반사하게 된다. 이 경우 진행되는 열차와 복잡한 간섭을 일으켜 차체에 큰 압력변동이 발생함은 물론 격심한 공기저항의 변동까지 발생하게 된다.⁽²⁾ 이와 같이 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음이나 터널내의 압력과 현상들은 터널내를 전파하는 비정상 압축파(unsteady compression wave)에 의존하게 되므로, 이에 관한 연구는 철도의 고속화에 앞서 선행되어야 할 연구과제이다.

종래 관내를 전파하는 압력파에 관한 연구는 주로 과잉압이 상당히 큰 충격파에 대하여 수행되어 왔다. 이들 연구는 충격파에 의해서 유기되는 경계층 흐름이나 충격파의 감쇠 등을 규명하기 위한 것이거나,^(5,6) 충격파의 회절과 반사 등과 같은 전파 특성 등^(7,8)을 조사하기 위한 것이었다. 그러나 충격파와는 달리 유한한 파장을 가지는 압축파가 관내를 전파하는 경우에 대한 연구는 지금까지 거의 수행되지 않았다.

고속철도뿐만 아니라 관내를 전파하는 압축파의 거동은 공학적으로 매우 흥미로울 뿐만 아니라 환경소음과도 매우 깊은 관련을 가지므로 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 예를 들면 각종 플랜트의 배관계⁽⁹⁾에서나 열차의 공기브레이크,⁽¹⁰⁾ 자동차의 배기머플러,⁽¹¹⁾ 대포나 기타 총기류⁽¹²⁾ 등에서도 고속철도 터널에서와 유사한 압력파 현상이 발생한다. 종래의 연구^(13,14)에 의하면, 터널입구에서 형성되는 압축파의 강도는 열차속도의 2승에 비례하며, 또 터널출구에서 발생하는 충격성 소음의 크기는 다음 식 (1)로 나타내는 바와 같이 터널내를 전파하여 출구에 도달하는 압축파면의 압력의 시간미분($\partial p/\partial t$) (이하에서는 압력구배라 한다)에 비례한다고 보고하였다.

$$\Delta p_m \propto \frac{1}{r} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_m \quad (1)$$

여기에서 Δp_m 는 관 출구로부터 방출되는 펄스파의 피크 압력, r 은 관 출구로부터 반경방향의 거리, 그리고 $(\partial p/\partial t)_m$ 는 관 출구면에서 형성되는 압축파면의 압력 시간미분의 최대값을 의미한다.

위와 같은 실험적인 사실은 판단으로부터 임의의 질량유속(mass flux)이 주위 공간으로 방출되는 경우에 발생하는 펄스파에 관한 선형음향이론(linear acoustic theory)과 잘 일치한다. 그러나 고속철도 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음의 발생 메카니즘이나 비정상 압축파의 전파 특성을 해명하기 위해서는 음향이론 보다는 압축성 유체공학에 관한 전문적인 지식이 필요하다.

터널 출구에서 발생하는 충격성 소음은 터널 출구면에서 형성되는 압축파면의 압력구배에 의하여 결정된다는 사실로부터, 종래 충격성 소음의 저감 대책은 주로 압축파면의 압력구배를 완화시키는 방법으로 수행되어 왔다. 김희동⁽³⁾에 의하여 소개된 바와 같이 터널내를 전파하는 압축파면의 압력구배에 대하여 터널 출구, 터널 내부 그리고 터널 입구 부근에 각각 여러 대책을 세울 수 있다. 최근 김희동 등^(15,16)은 충격파관의 출구에 피동적 소음기를 설치하여, 충격성 소음에 대한 피동제어의 효과를 조사하기 위하여 실험과 수치해석을 수행하였다. 또 충격성 소음에 대하여 역위상을 가지는 펄스파를 터널 출구에서 발생시키는 능동적인 방법을 이용하여, 충격성 소음의 저감을 시도한 바 있다.^(17,18) 그러나 열차가 고속화됨에 따라 이와 같은 터널 출구의 대책만으로는 충격성 소음에 대한 저감효과는 한계가 있다는 것을 알았다. 최근 김희동 등⁽¹⁹⁾은 터널내부에 지갱(branch tunnel)을 설치하여, 비정상 압축파의 전파특성을 조사하였다. 그 결과 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음의 저감을 위해서는 매우 큰 지갱이 필요하다는 것을 보고하였다. 또 터널내부에 다공벽을 설치하여 전파하는 압축파의 특성을 실험적으로 조사하였다.⁽²⁰⁾ 그 결과 공벽의 기공율이 약 30% 정도일 때 압축파면의 압력구배의 감소가 가장 크다는 것을 발견하였다.

본 연구에서는 터널내를 전파하는 압축파면의 압력구배를 완화시키기 위하여, 터널 내부에 다공벽을 설치하여 압축파면의 특성을 2차원 비정상 압축성 유동의 지배방정식을 적용하였다. 계산에서는

터널내의 압축파 유동을 모사하기 위하여 대기 개방형 충격파관을 사용하였으며, 충격파관의 저압실에 공동(cavity)을 설치하였다. 공동의 입구에는 다공벽(porous wall)을 적용하여, 다공벽을 전파하는 압축파의 특성을 조사하기 위하여 PLM(piecewise linear method)으로 지배방정식을 차분화하였다. 또 계산에서는 공동의 형상과 다공벽의 기공율(porosity) 등을 변화시켜, 관내를 전파하는 압축파면의 압력구배의 변화를 구하였으며, 공동을 적용하지 않는 직관의 경우와 비교하였다. 본 연구의 결과는 충격성 소음의 저감을 위하여 이용될 수 있을 뿐만 아니라 우리나라의 고속철도 터널내 공조시설 및 기타 구조물의 설계에 매우 유용한 기초 자료가 될 수 있다.

2. 수치해석법

2.1 지배방정식 및 수치계산법

본 연구에서는 다공벽을 전파하는 압축파의 특성을 조사하기 위하여 Fig. 1에 나타난 바와 같은 유동장을 수치해석적으로 조사하였다. 그림에서 관의 왼쪽에 어떤 위치에서 가정된 초기 압축파는 다공벽을 통과하여 오른쪽으로 전파한다. 본 연구에서는 터널출구에서 발생하는 충격성 소음이 압축파의 과잉압보다는 압축파면의 압력구배에 의하여 결정된다는 사실로부터 다공벽이 전파하는 압축파면의 압력구배에 미치는 영향에 주목하였다. 따라서 그림에 나타난 계산영역에 대하여 기체의 마찰이나 열전달의 의한 영향을 무시하여 2차원 비정상 비점성 압축성 유동방정식을 적용하였다. 이 경우 질량, 운동량(x방향과 y방향) 및 에너지 보존의 법칙은 다음으로 주어진다.

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

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 단위체적당 전에너지로 기체의 비열비 k 를 사용하여 다음 식으로 주어진다.

$$e = \frac{p}{k-1} + \frac{1}{2} \rho(u^2 + v^2) \quad (3)$$

위의 식 (2)와 식 (3)의 상태량들을 다음과 같이 무차원화한다.

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x}{D}, \quad y' = \frac{y}{D}, \\ t' &= \frac{t}{kD/a_1}, \quad p' = \frac{p}{p_1} \\ \rho' &= \frac{\rho}{\rho_1}, \quad e' = \frac{e}{p_1}, \\ u' &= \frac{u}{a_1/k}, \quad v' = \frac{v}{a_1/k} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

여기에서 D 는 관의 등가직경이며, 계산에서는 실제 고속철도 터널을 고려하여 $D=9$ m로 가정하였다. 위의 식에서 a 는 음속, 그리고 하첨자 1은 대기의 상태를 의미한다. 식 (4)에서 나타난 무차원량(')에서 단순화를 위해 상첨자 '를 생략하면, 식 (2)는 다음과 같은 보존식으로 쓰여진다.

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

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e+p)u \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e+p)v \end{bmatrix} \quad (5)$$

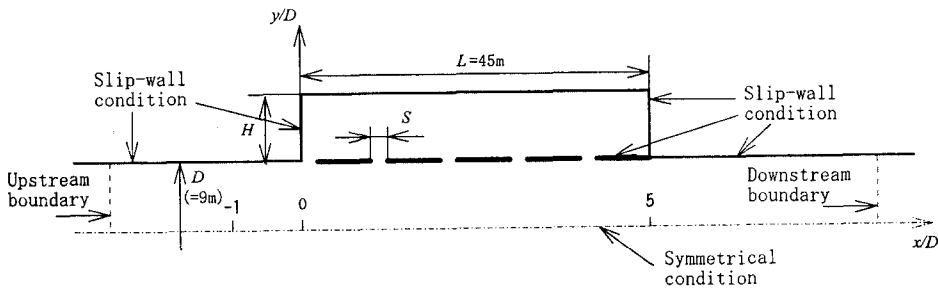


Fig. 1 Calculation model and regime

본 계산에서는 Strang에 의하여 제안⁽²¹⁾된 시간분할법을 이용하였다. 또 x 및 y방향의 차분 연산자를 각각 L_x 와 L_y 로 하여, 시간스텝 n+1에서 계산은 1차정도 차분형으로 다음과 같이 계산하였다.

$$U_{i,j}^{n+1} = L_x(\Delta t) \cdot L_y(\Delta t) \cdot U_{i,j}^n \quad (6)$$

위의 식은 L_x 와 L_y 에 대하여 2번의 연산으로 1회의 시간스텝이 완료하며, 각 연산은 각 시간증분에 대해서 계산된다. 본 연구에서는 위의 식 (6)과 Piecewise Linear Method (PLM)⁽²²⁾을 사용하여 비정상 압축성 유동의 지배방정식 (5)의 해를 구한다. 따라서 식 (5)는 다음과 같은 방법으로 한쌍의 방정식으로 변환된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial t} + A_x(V_x) \frac{\partial V_x}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_y}{\partial t} + A_y(V_y) \frac{\partial V_y}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} V_x &= \begin{bmatrix} \rho \\ u \\ p \end{bmatrix}, \quad V_y = \begin{bmatrix} \rho \\ v \\ p \end{bmatrix}, \quad A_x(V_x) = \begin{bmatrix} u & \rho & 0 \\ 0 & u & \frac{1}{\rho} \\ 0 & kp & u \end{bmatrix}, \\ A_y(V_y) &= \begin{bmatrix} v & \rho & 0 \\ 0 & v & \frac{1}{\rho} \\ 0 & kp & v \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

위의 식 (7)과 (8)에서 첫번째 식들은 각각 x 및 y방향의 일차원 오일러 방정식이며, 두번째 식들은 연속의 식을 사용하여 운동량의 방정식을 비보존형으로 변화시킨 것이므로, 첫번째 식들과는 독립적으로 계산되어진다. 본 연구에서는 먼저 PLM법으로 x방향에 대한 오일러 방정식의 해를 구한 후, 시간전진 공간차분에 의하여 수송항을 계산하며, y방향에 대해서도 같은 방법으로 계산을 수행한다. 이와 같이 4번의 계산을 1회로 하여, 시간스텝을 전진시켜 반복계산을 수행하였다. 이 계산법은 충격파나 기타 불연속면을 수반하는 압축성 흐름을 잘 예측하는 것으로 알려져 있다.⁽²¹⁾

본 계산에서 적용된 좌표는 공동의 상류단을 원

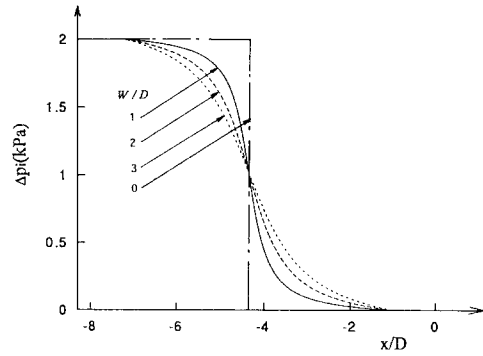


Fig. 2 Initial compression wave forms

점으로 흐름방향을 x, 흐름에 수직인 방향을 y로 정하였으며, 공동의 높이 H, 길이 L, 그리고 슬롯홀의 폭을 S로 하여 이들을 변화시켰다. 한편 계산의 간단화를 위하여 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 공동으로부터 상류의 위치 $x/D = -2.0$ 에서 초기압축파를 다음과 같은 식으로 가정하였다.

$$\frac{\Delta p_i}{p_a} = \frac{\Delta p^*}{p_a} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\pi x}{W} + \frac{5\pi D}{W} \right) \right\} \quad (10)$$

여기에서 Δp_i 는 압축파의 과잉압, W는 압축파의 파장, p_a 는 대기압이다. 그림에는 초기압축파의 과잉압(Δp^*)을 2 kPa로 고정한 경우에 대하여 W/D에 따른 파형의 변화를 나타내었다. 참고로 W/D=0인 경우는 약한 강도를 가지는 충격파이다. 한편 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 관벽에서는 모두 slip 조건을, 관의 입구에는 유입조건을 가정하였으며, 관의 출구 즉 하류측 경계는 상태량의 구배가 0으로 되는 유출조건을 적용하였다. 또 계산에는 등간격 격자($\Delta x = \Delta y = 10$ cm)를 적용하였으며, 다공벽의 두께는 5개의 격자점을 할당하였다. 본 계산결과를 실제 터널에 적용하기 위하여, D를 9 m 그리고 Δp^* 를 2 kPa로 가정하였으며, 대기중의 공기의 음속 a_1 를 350 m/s, 온도 T를 305.15 K, 밀도 ρ 를 1.143 kg/m³, 대기압 p_a 를 100.125×10^3 Pa, 공기의 비열비 γ 를 1.4로 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

종래의 연구에 의하면 다공벽을 전파하는 압력파의 특성 즉 과잉압 및 파면의 최대압력구배 등은 다공벽에서 발생하는 압축파와 팽창파의 비선형적인 간섭(interaction)에 의해서 결정된다고 보고하

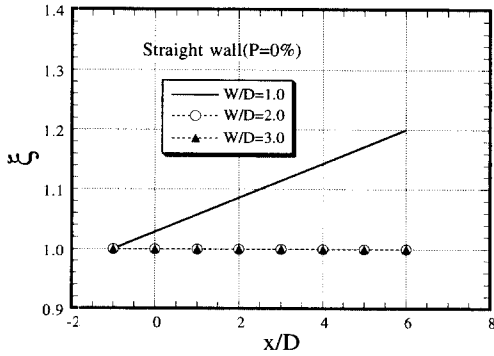


Fig. 3 Maximum pressure gradient of compression wave vs distance

었다.^(23,24) 본 연구는 비점성 압축성 유동장에 대한 것으로 다공벽을 전파하는 압축파의 감쇠 등의 소산과정은 다루지 않았다. 이러한 비점성 계산은 압축파가 다공벽을 통과하는 시간이 매우 짧아 공동 및 다공벽에서 발생하는 열전달이나 점성의 효과가 흐름의 단위체적당 에너지나 운동량에 비해 상대적으로 매우 작다고 볼 수 있는 사실에 근거한다.

Fig. 3에는 초기압축파의 과잉압이 2kPa이고, 무차원 파장 $W/D=1.0, 2.0$ 및 3.0 인 세 가지 압축파가 기공율이 0%인 직관을 전파하는 경우에 파면의 최대압력구배를 나타내었다. 그림의 종축은 다음 식 (11)로 나타내는 바와 같이 초기압축파의 최대압력구배로 무차원한 최대압력구배를 나타내었으며, 그림의 횡축은 공동의 상류단을 원점으로 한 유동방향의 무차원 거리를 나타낸다.

$$\xi = \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max}}{\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max, x/D=-1}} \quad (11)$$

그림으로부터 같은 과잉압을 가지는 압축파라고 할 지라도 압축파의 파장이 작은 경우에 압축파의 비선형효과가 나타난다는 것을 알 수 있다. 그러나 압축파의 파장 $W/D=2.0$ 과 3.0 인 경우에 압축파의 최대압력구배는 일정하다. 이러한 계산결과는 후술하는 바와 같이 다공벽을 전파하는 압축파의 특성과 비교하기 위하여 사용되었다. Fig. 4(a)와 (b)는 $S=0.1D, H=0.5D, L=5D$ 에 대하여 파장이 각각 $W/D=1.0$ 및 2.0 인 압축파가 다공벽을 전파하는 경우를 나타내었다. 그림의 종축은 게이지 압력 P (kPa)를 나타내었으며, 횡축은 무차원 시간(t)을 의미한다. 그림에서 $x/D=-1.0$ 에서 6.0

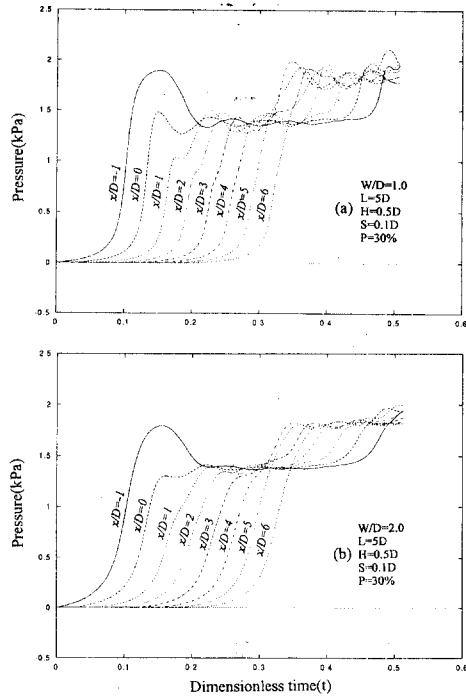


Fig. 4 Propagating compression wave fronts

까지의 각 파형으로부터 다공벽에서 발생하는 압력파로 인하여 압축파는 상당히 변형한다는 것을 알 수 있다. 그림의 실선으로 나타낸 $x/D=-1.0$ 에서의 압축파면은 초기압축파와 거의 같으나, 압축파 후미에서 발생하는 압력감소는 다공벽으로부터 발생한 팽창파가 전파하는 압축파에 영향을 미치기 때문이며, 그리고 $t=0.48$ 부근에서 발생하는 압력 증가는 다공벽으로부터 발생한 압축파에 기인한다. $x/D=0.0$ 에서의 압축파형은 정성적으로 $x/D=-1.0$ 과 매우 유사하다. 그러나 $x/D=1.0$ 보다 하류에서는 압축파면의 변형이 관찰된다. 이것은 다공벽으로부터 발생한 압력파가 관의 오른쪽으로 전파하여 관 축방향으로 전파하는 압축파에 영향을 미치기 때문이다. 그림에 나타낸 일련의 압축파형으로부터 압축파 후방에 압축된 공기가 다공벽을 통하여 공동내로 유입하므로 압축파의 과잉압은 낮아지지만, 압축파 후미에서 압력의 급격한 상승을 나타내고 있다. 이것은 공동내로 유입한 압축파가 공동의 내부벽에서 반사하여 관 축방향으로 진행되는 압축파에 영향을 미치기 때문이다. 그러나 다공벽을 통과한 후의 압축파형에서는 압축파 후미에서 압력은 급상승은 나타나지 않는다. 한편 그림 (b)

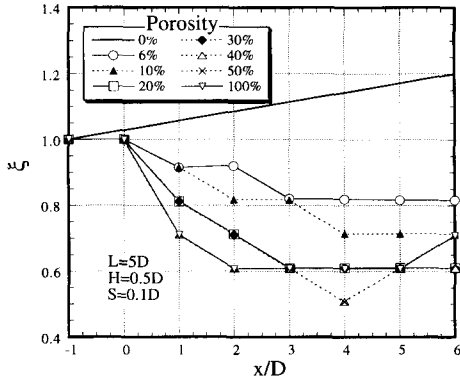


Fig. 5 Maximum pressure gradient vs distance

에 나타낸 바와 같이 $W/D=2.0$ 인 초기 압축파의 경우, 파면의 변형 및 과잉압의 변화는 그림 (a)와 정성적으로 매우 유사하다. 그림에 나타낸 바와 같이 다공벽으로부터 발생한 압력파의 영향으로 압축파의 과잉압을 정의하기가 곤란하다. 본 연구의 목적은 압축파면의 최대압력구배를 조사하는 것이다. Fig. 5에는 $L=5D$, $H=0.5D$, $S=0.1D$ 인 경우 $W/D=1.0$ 인 초기압축파가 다공벽을 전파하는 경우에 파면의 최대압력구배의 변화를 나타내었다. 그림의 종축은 초기압축파의 최대압력구배로 무차원한 값, 횡축은 관측방향으로의 무차원 거리이며, 변수로 다공벽의 기공율 P 를 0%에서부터 100%까지 변화시켰다. 그림으로부터 기공율이 0인 즉 직관인 경우에 ξ 는 전파거리가 길어질수록 단조롭게 증가한다. 그러나 기공율이 증가하면 ξ 는 전파거리에 따라 감소하며, 기공율이 30% 이상으로 증가하는 경우 ξ 는 거의 변화하지 않는다. 구체적으로 $x/D=6.0$ 에서 ξ 의 최대감소는 직관의 경우에 비해 약 50% 정도로 나타난다.

Fig. 6에는 $W/D=1.0, 2.0$ 및 3.0 인 세 압축파형에 대하여, $x/D=6$ 에서 얻어진 압축파면의 최대압력구배를 기공율에 대하여 나타내었다. 그림에서 굵은 실선은 충격파관을 이용한 이전의 평균 실험 값을 나타낸다.⁽²⁰⁾ 그림으로부터 기공율의 증가에 대하여 ξ 는 급격히 감소하다가 어느 최소값에 달한 후, 약간 증가하여 기공율이 50% 이상으로 커지게 되면 거의 일정값을 갖는다. 이러한 경향은 W/D 의 값에 관계없이 거의 일정하게 나타나며, ξ 은 $P=30\%$ 정도에서 최소값을 나타낸다. 본 계산 결과는 충격파관의 실험결과와 매우 유사한 경향을 나타내고 있으며, 압축파의 압력구배를 저감시키는

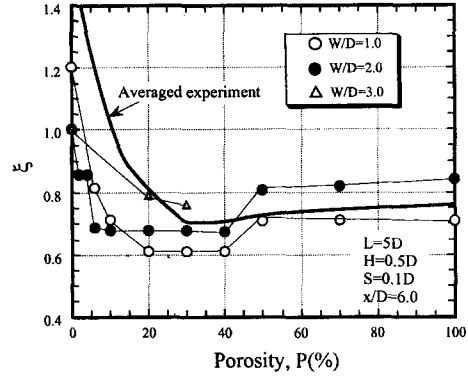


Fig. 6 Effect of porosity on maximum pressure gradient

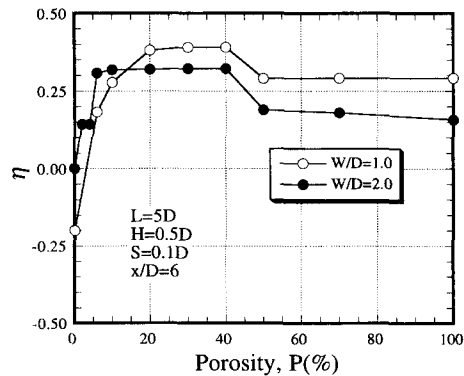


Fig. 7 Relation between porosity and benefit parameter

최적의 기공율은 30%이다는 것을 알 수 있다. 최적의 기공율에서 ξ 의 값은 W/D 의 값이 작을수록 작다.

한편 직관에 대한 다공벽의 상대적인 효과를 나타내기 위하여 본 연구에서는 이득인자(benefit parameter) η 를 다음 식으로 정의하였다.

$$\eta = \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max, \text{straight}} - \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max, \text{porous}}}{\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max, \text{straight}, x/D=-1}} \quad (12)$$

여기에서 $(\partial p/\partial t)_{\max, \text{straight}, D=1}$ 는 직관인 경우($P=0\%$) $x/D=-1.0$ 에서의 최대압력구배이며, $(\partial p/\partial t)_{\max, \text{straight}}$ 와 $(\partial p/\partial t)_{\max, \text{porous}}$ 는 $x/D=6.0$ 에서 각각 직관과 다공벽의 경우에 대한 최대압력구배이다. Fig. 7에는 기공율과 이득인자 η 의 관계를 나타내었다. 그림으로부터 초기압축파의 파장에 관계없이 기공율 P 가 증가할 때 η 는 증가하다가 P 가 약 30% 정도일 때 최대가 되며, P 가 더욱 커지게

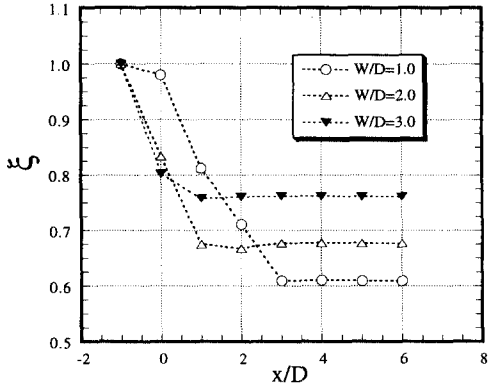


Fig. 8 Effect of W/D on maximum pressure gradient

되면 η 는 작아져서 거의 일정값을 갖는다. η 의 최대값은 $W/D=1.0$ 인 경우 약 0.4 정도로 다공벽을 적용하는 경우 압축파면의 압력구배를 약 40% 정도까지 감소시킬 수 있다. 이러한 사실은 이전 김희동 등⁽²⁰⁾에 의해서 수행된 실험결과와 일치한다. 따라서 본 연구로부터 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음을 저감하기 위해서 터널내에 다공벽을 설치하는 경우, 기공률 P 를 30% 정도로 하는 것이 가장 효과적이란 결론을 얻을 수 있다. 한편 공동의 물리적인 크기가 주어지는 경우 압축파의 파장이 짧아질수록 이득인자 η 는 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 비선형효과가 큰 압축파일수록 다공벽의 피동제어의 효과가 커진다는 것을 의미한다. 압축파면의 압력구배는 다공벽으로부터 발생하는 압력파와의 간섭에 의하여 결정되므로, 비선형효과가 큰 압축파일수록 압력파의 간섭이 증대하기 때문이다.

Fig. 8에는 $L=5D$, $H=0.5D$, $S=0.1D$, $P=30\%$ 인 경우 압축파의 파장 W/D 가 ξ 에 미치는 영향을 나타내었다. 그림으로부터 본 연구에서 적용된 모든 W/D 에 대하여 ξ 는 거리의 증가에 따라 급격히 감소하여 거의 일정값으로 된다. 또 W/D 가 작을수록 ξ 의 감소비율은 커지게 되며, 압축파의 W/D 가 2배로 증가하는 경우 ξ 는 약 11% 정도 감소한다. 일반적으로 고속철도 터널에서 발생하는 압축파의 파장은 열차의 속도, 열차와 터널의 단면적비(우리나라의 경우 약 0.1정도로 계획되어 있음), 선로의 특성, 열차의 선두부 형상 등에 의해서 결정되는 것으로 알려져 있다. 이 중에서 열차와 터널의 단면적비, 선로, 열차 등이 결정되어 있는 경우 열차의 속도가 증가할수록 압축파의 파장

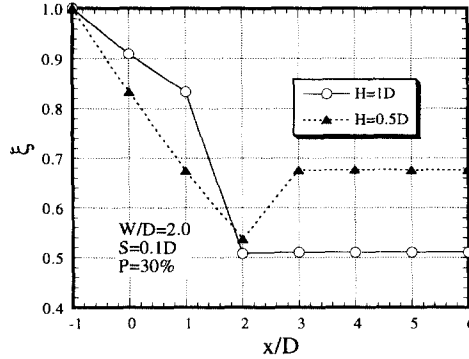


Fig. 9 Effect of H/D on maximum pressure gradient

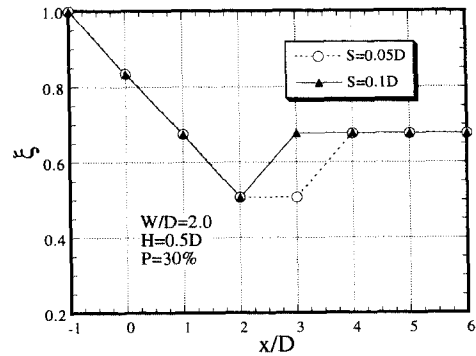


Fig. 10 Effect of S/D on maximum pressure gradient

은 짧아지게 되므로 본 연구에서 시도된 다공벽은 열차가 고속화될수록 그 효과가 커지게 된다. 따라서 본 연구의 다공벽은 장래 열차의 고속화에 수반되어 나타나는 충격성 소음을 저감시키는데 유력한 방법이 될 수 있다.

다공벽의 효과에 미치는 공동의 물리적인 크기를 조사하는 것은 실제 터널을 설계하는데 있어서 매우 중요하다. Fig. 9에는 공동의 높이 H 가 ξ 에 미치는 영향을 나타내었다. 그림은 $L=5D$, $S=0.1D$, $P=30\%$, $W/D=2.0$ 으로 고정하고 H 를 0.5D와 1D로 변화시킨 경우를 나타내었다. 그림으로부터 ξ 는 공동의 높이 H 가 증가할수록 작아진다. 구체적으로 공동의 높이가 두배로 증가하는 경우 ξ 는 약 25% 정도 감소한다. 한편 Fig. 10에는 슬롯홈의 폭 S 의 효과를 나타내었다. 그림은 $L=5D$, $H=0.5D$, $P=30\%$, $W/D=2.0$ 로 고정하고 S/D 를 0.05D와 0.1D로 변화시킨 경우이다. 그림으로부터 슬롯홈의 폭이 변화하여도 압축파의 최대압력구배 ξ 는 거의 같다. 따라서 슬롯홈의 폭은 압축파의 최대압력구배에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판

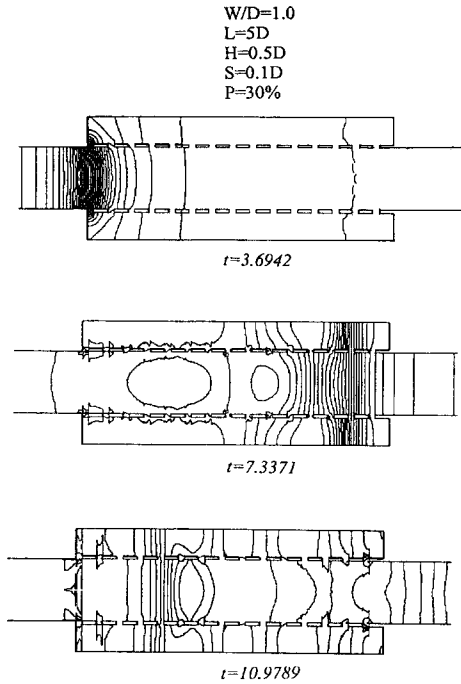


Fig. 11 Isobar contours

단된다. 본 연구결과로부터 터널출구에서 발생하는 충격성 소음을 저감시키기 위해서는 공동의 높이를 가능한 한 크게 하고, 다공벽의 기공율을 약 30% 정도로 하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11에는 공동 및 다공벽 부근에서 흐름을 상세히 관찰하기 위하여 등압력선도를 나타내었다. 그림은 $L=5D$, $H=0.5D$, $P=30\%$, $W/D=1.0$, $S=0.1D$ 인 경우 각 무차원 시간(t)에 대한 압축파의 전파과정을 나타내었다. 그림 (a)는 무차원 시간 $t=3.70$ 인 경우 압축파면(초기압축파의 파인압은 2kPa, 최대압력구배는 44.831 kPa/s)이 공동의 상류단 부근에 도달한 상태이며, 그림 (b)와 (c)는 각각 압축파가 공동의 하류단 부근에 도달한 상태 및 하류쪽으로 전파한 압축파가 공동의 하류단에서 반사하여 상류로 전파하고 있는 상태를 나타내었다. 그림 (a)에서 다공벽을 전파하는 압축파는 다공벽을 통하여 공동내로 침입하게 되며, 공동의 내부벽에서 압축파로 반사하는 것을 관찰할 수 있다. 또 그림 (b)에서는 관의 출구쪽으로 전파하는 압축파가 공동의 하류단에 도착하여 일부는 관 출구쪽으로 전파하며, 나머지 일부는 공동의 하류단에서 상류방향으로 압축파로 반사한다. 그림 (b)의 압축파는 그림 (a)와 비교하여 파면의 압력

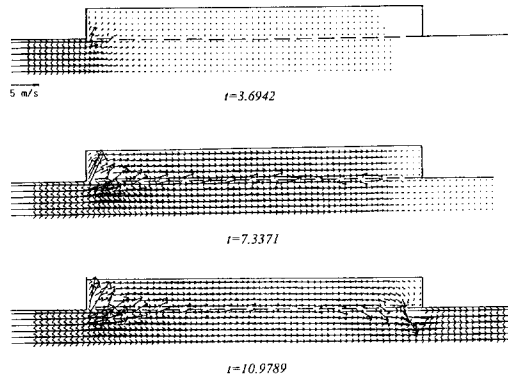


Fig. 12 Velocity vector distributions

구배가 약해지며, 다공벽의 슬롯홈으로부터 발생한 팽창파 및 압축파와 간섭하여 압축파면의 압력구배가 그림 (a)와 비교하여 약해지는 것이 관찰된다. 한편 그림 (c)에서 공동의 하류단으로부터 반사한 압축파는 상류로 전파하게 되며, 압축파의 강도 및 압력구배는 초기압축파에 비해 상당히 약해진다. 공동부근에서는 위의 그림 (a), (b), (c)에서 나타낸 바와 같이 압력파의 반사가 반복하게 되어 유동장은 시간적으로 크게 변동하게 되므로, Fig. 4(a)와 (b)에 나타낸 바와 같은 압력분포로 된다는 것이 이해된다.

한편 Fig. 12에는 Fig. 11의 압축파에 의해서 유기되는 흐름의 속도벡터를 나타내었다. 그림의 속도분포로부터 압축파에 의해서 유기되는 흐름은 다공벽을 통하여 공동내로 유입하며, 공동의 상류단에서 유속은 약 8 m/s정도에 달하게 된다. 공동으로 유입한 흐름은 그림 (b)에서 나타난 바와 같이 다공벽의 하류쪽에서 다공벽을 통하여 공동밖으로 유출하여 주류(main stream)의 흐름과 간섭(interaction)하는 것이 관찰된다. 더욱이 그림 (c)의 다공벽의 하류쪽에서는 공동내의 흐름이 약 7.5 m/s의 속도로 유출되며, 주류의 흐름과 강한 간섭을 일으키는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 유출에 의하여 Fig. 4의 압축파 후미부에서 나타난 바와 같이 주류에서의 압력은 급상승하게 된다.

압축파가 공동의 하류단에서 반사되는 과정을 상세히 조사하기 위하여 Fig. 13에는 $L=5D$, $H=0.5D$, $P=30\%$, $W/D=0$ 인 약한 충격파의 전파과정을 나타내었다. 무차원 시간 $t=3.65$ 에서 충격파는 하류 방향으로 볼록한 형태의 파면으로 전파하며, 또 일부는 공동으로 전파하여 공동내부벽에서 반사

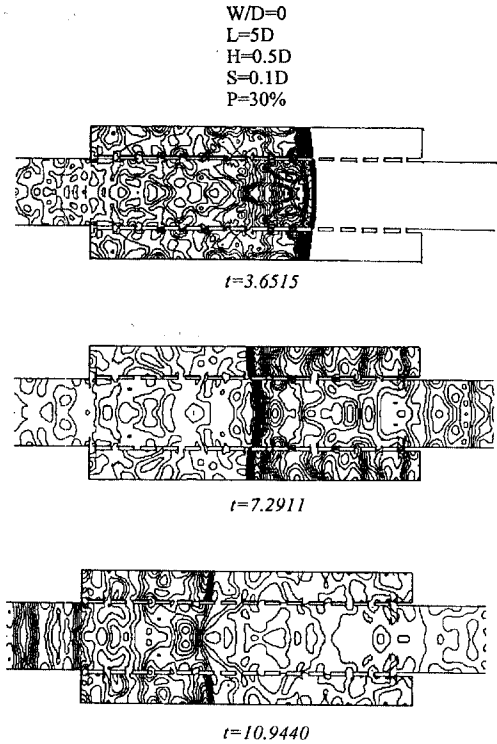


Fig. 13 Isobar contours

한 결과 충격파 후방에 반사 충격파가 형성된다. 그리고 $t=7.29$ 에서는 공동의 하류단에서 반사하여 상류쪽으로 전파하는 반사 충격파를 보이고 있다. 이 충격파는 하류방향으로 볼록한 형태의 파면으로, 공동내부에도 반사 충격파가 뚜렷하게 관찰된다. 한편 $t=10.95$ 에서는 상류방향으로 전파하는 충격파의 대부분은 입구쪽으로 전파하고 나머지 일부는 공동의 상류단에서 다시 반사하여 매우 약한 압축파로 된다. 그러나 공동내에서 상류방향으로 전파하는 충격파는 공동의 상류단에서 반사하여 주류의 충격파보다 강한 반사충격파를 형성한다는 것을 관찰할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 고속철도 터널출구에서 발생하는 충격성소음을 저감시킬 목적으로, 터널내의 다공벽을 이용한 압축파의 파동제어를 수치계산적으로 시험하였다. 계산에서는 충격파관의 2차원 유로의 공동을 설치하여, 그 입구에 여러 기공율을 가지는 다공벽을 적용하였다. 계산결과는 압축파면의 최대

압력구배에 미치는 다공벽의 효과를 조사하는데 이용되었다. 본 연구로부터 다공벽은 압축파의 비선형효과가 큰 경우에 효과적이라는 것을 알았다. 또 압축파면의 최대압력구배의 감소는 다공벽의 기공율이 30%일 때 가장 크게 나타났으며, 공동의 높이가 클수록 충격성 소음의 저감에 효과적이라는 것을 알았다. 그러나 슬릿홀의 폭은 압축파의 압력구배에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 이전 저자들에 의해서 수행된 실험결과와 잘 일치하였다. 한편 최적의 기공율을 가지는 다공벽을 적용하는 경우에 압축파면의 최대압력구배는 직관에 비해 약 40% 정도 감소되며, 본 연구의 결과는 터널내의 압력과 현상들을 경감시키고 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음을 저감하는데 유력한 방법이 될 수 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 學會誌 第36卷1號, 第36卷3號, 第36卷5號.
- (2) 김희동, 1996, "터널내를 走行하는 1列車의 空氣力學的 解析," 大韓機械學會論文集 投稿中.
- (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 學會誌, 第34卷10號.
- (4) 金義東, 外1人, 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8卷, 第10號.
- (5) Martin, W. A., 1958, "An Experimental Study of the Turbulent Boundary Layer Behind the Initial Shock Wave in a Shock Tube," *Journal of the Aerospace Sciences*, Vol. 25, No. 10.
- (6) Mirels, H., 1956, "Boundary Layer Behind Shock or Thin Expansion Wave Moving into Stationary Fluid," *NACA TN 3712*.

- (7) Kage, K., Miyake, H., Ishimatsu, K. and Kawagoe, S., 1993, "Numerical Study of Shock Waves Propagating in an Elbow," *Transactions of JSME, Series B*, Vol. 59, No. 562, pp. 1980~1987 (in Japanese).
- (8) Igra, O., Falcovitz, J., Reichenbach, H. and Heilig, W., 1996, "Experimental and Numerical Study of the Interaction Between a Planar Shock Wave and a Square Cavity," *Journal Fluid Mech.*, Vol. 313, pp. 105~130.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Sekine, N., et. al., 1988, "Initiation and Propagation of Shock Waves in the Exhaust Pipe of an Internal Combustion Engine," *Transactions of JSME, Series B*, Vol. 54, No. 498 (in Japanese).
- (12) Klingenberg, G. and Heimerl, J. M., 1992, "Gun Muzzle Blast and Flash," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, AIAA Educational Series.
- (13) 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.
- (14) 原, 1967, "トンネル内を走る列車の空氣抵抗," 鐵道技術總研報告, No. 608.
- (15) 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).
- (16) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1996, "Experiment on Passive Control of Impulsive Noise Generating at Exit of High-Speed Railway Tunnel," *KSME Journal*, Vol. 20, No. 7.
- (17) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1996, "Interaction of Unsteady Expansion Wave with Cross-Sectional Area Change in Tube," *KSME Journal* (submitted).
- (18) Kim, H. D., Setoguchi, T. and Matsuo, K., 1996, "Model Test of Negative Impulsive Wave Generator for Noise Reduction," *Journal of Vibration and Acoustics* (submitted).
- (19) 金義東, 瀬戸口俊明, 1996, "垂直坑을 이용한 터널내 壓縮波의 被動制御," 大韓機械學會論文集, 第21卷, 第9號.
- (20) 金義東, 瀬戸口俊明, 1996, "多孔壁을 傳播하는 壓縮波의 實驗的 研究," 大韓機械學會論文集, 第20卷, 第12號.
- (21) Strang, G., 1968, "On the Construction and Computation of Difference Schemes," *Journal Numerical Anal.*, Vol. 5, No. 3.
- (22) Glimm, J., 1965, "Solution in the Large for Nonlinear Hyperbolic System of Equations," *Communications of Pure and Applied Mathematics*, Vol. 18, pp. 697~715.
- (23) Kage, K., Okubayashi, T., Imada, K. and Kawagoe, S., 1993, "Numerical Study of Compression Waves Produced by High-Speed Trains Entering a Tunnel(3rd Report, Effects of Constant Area and Perforated Hood)," *Transactions of JSME, Series B*, Vol. 59, No. 560 (in Japanese).
- (24) Skews, B. W. and Takayama, K., 1996, "Flow Through a Perforated Surface due to Shock-Wave Impact," *Journal Fluid Mech.*, Vol. 314, pp. 27~52.