

〈논 문〉

다공벽을 전파하는 압축파의 실험적 연구

김희동* · 瀬戸口俊明**

(1996년 6월 1일 접수)

Experimental Study of Compression Waves Propagating Porous Walls

Heuy-Dong Kim and Toshiaki Setoguchi

Key Words: Compressible Flow(압축성 흐름), Compression Wave(압축파), High-Speed Railway(고속철도), Impulsive Noise(충격성소음), Shock Tube(충격파관), Railway Tunnel(철도터널), 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 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. In the purpose of the impulsive noise reduction, the present study tested the effect of porous walls on the compression wave propagating into a model tunnel. Experimental results were obtained using a shock tube with an open end. The results showed that the cavity/porous wall is very effective for the compression wave with a large nonlinear effect. The porosity of 30% is most effective for attenuation and pressure gradient reduction of the compression wave front. Also the impulsive noise reduction increases with increasing the length and height of the cavity, compared with the tunnel equivalent diameter.

1. 서 론

최근 환경오염이나 수송에너지 효율⁽¹⁾의 관점으로 부터 고속 대량 수송기관으로 성능이 뛰어난 고속철도에 관심이 고조되고 있다. 세계 각국에서는

재래식 철도의 고속화뿐만 아니라 새로운 고속철도의 건설에 노력하고 있으며, 이에 따라 철도의 공기역학은 새로운 연구영역으로 부각되고 있다.

열차가 터널을 주행하는 경우에는 터널내부에서 매우 복잡한 압력과 현상이 발생하여, 개활지를 주행하는 경우에 비해 큰 압력변동 및 공기저항이 발생하게 된다.^(2,3) 따라서 차체의 설계나 터널, 역사(station) 및 선로 주변의 구조물의 설계를 위해서

*회원, 안동대학교 기계공학과

**佐賀大學 生産機械工學科

는 터널주행에서 발생하는 풍압, 풍속 등에 관한 정보가 필요하다. 현재 우리나라 고속철도 건설에는 상당수의 터널과 지하역사 건설 등이 계획되어 있어 고속열차의 공기역학^(2,3)에 대한 관심이 절실한 실정이다.

열차가 고속으로 터널에 돌입하는 경우 열차전방에는 압축파(compression wave)가 발생하여 터널 내를 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 알려져 있다. 한편 열차의 돌입에 의해서 형성된 압축파가 관내를 전파하여 일부는 관출구면에서 팽창파(expansion wave)로서 터널내로 반사하게 된다. 이 경우 진행되는 열차와 복잡한 간섭을 일으켜 차체에 큰 압력변동이 발생함은 물론 격심한 공기저항의 변동까지 발생하게 된다.⁽⁴⁾ 이와 같이 터널출구에서 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 압축파에 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 유한의 파장을 가지는 압축파가 관내를 전파하는 경우에 대한 연구는 지금까지 거의 수행되지 않았다.

고속철도뿐만 아니라 관내를 전파하는 압축파의 거동은 공학적으로 매우 흥미로운뿐만 아니라 환경 소음과도 매우 깊은 관련을 가지므로 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 예를 들면 각종 플랜트의 배관계⁽⁹⁾에서나 열차의 공기블레이크,⁽¹⁰⁾ 자동차의 배기관,⁽¹¹⁾ 대포나 기타 총기류⁽¹²⁾ 등에서도 고속철도 터널에서와 유사한 압력과 현상이 발생한다. 종래의 연구^(13,14)에 의하면, 터널입구에서 형성되는 압축파의 강도는 열차속도의 2승에 비례하며, 또 터널출구에서 발생하는 충격성 소음의 크기는 다음 식으로 나타내는 바와 같이 터널내를 전파하여 출구에 도달하는 압축파면의 압력의 시간미분($\partial p /$

∂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 관출구로부터 방출되는 펄스파의 피크 압력, r 은 관출구로부터 반경방향의 거리, 그리고 $(\partial p / \partial t)_m$ 는 관출구면에서 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 메커니즘이나 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⁽⁴⁾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 지적하였다.

본 연구에서는 터널내를 전파하는 압축파면의 압력구배를 완화시키기 위하여, 터널 내부에 다공벽을 설치하여 압축파면의 특성을 실험적으로 조사하였다. 실험은 대기 개방형 충격파관을 사용하였으며, 충격파관의 저압실에 공동(cavity)을 설치하였다. 공동의 입구에는 다공벽을 적용하여, 다공벽을

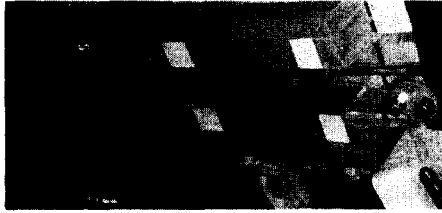


Fig. 2 Photograph showing porous wall and cavity

과는 터널내를 전파하는 임의의 과잉압, 파면의 압력구배 및 파장을 가지는 압축파가 다공벽을 전파하는 경우에 대하여, 압축파면의 압력구배의 변화를 조사하는데 이용되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3에는 압력측정점 ①($x/D=-7$)과 ②($x/D=7$)에서 측정된 압력파형을 나타내었다. 그림 (a)와 (b)는 각각 공동을 적용하지 않은 직관의 경우와 기공률 $P=50\%$ 인 공동($L/D=5, H/D=1, S/D=0.1$)을 설치한 경우의 압력파형이다. 여기에서 S 는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 슬릿홀의 폭이다. 그림의 종축은 게이지 압력(Pa)이며, 횡축은 격막을 파괴한 후부터 경과한 시간 t (s)이다. 그림 (a)에서 압축파가 압력센서에 도달하게 되면 압력은 급격하게 상승하여 어느 최대값에 도달한 후 약간 감소하다가 거의 일정한 값을 가지게 된다. 그림에서 $x/D=-7$ 에서 측정된 초기 압축파형(실선)에 대하여, 압축파의 과잉압(over pressure)은 약 6800Pa 정도이며, 압축파면의 최대압력구배 ($\partial p/\partial t$)_{max}는 $6.06 \times 10^4 \text{kPa/s}$ 이다. $x/D=7$ 에서 압력파형(파선)은 정성적으로 초기 압축파형과 유사하지만, 과잉압은 약 5500Pa 로 초기 압축파에 비해 낮으며, 파면의 압력구배($1.06 \times 10^4 \text{kPa/s}$)는 더 커진다는 것을 알 수 있다. 이것은 각각 압축파의 감쇠(attenuation)와 비선형효과(nonlinear effect)⁽²¹⁾에 의한 것이다. 한편 그림 (b)에 대하여 초기 압축파형은 과잉압과 파면의 최대압력구배에 있어서 그림 (a)의 경우와는 상당히 다르다. 초기 압축파 후미 $t \approx 0.0034\text{s}$ 에서 관찰되는 압력감소와 $t \approx 0.0053\text{s}$ 에서 발생하는 압력증가, 그리고 그후의 압력변동은 다공벽의 edge로부터 발생한 팽창파, 압축파 등 압력파의 영향과 압축파에 의해서 유기되는 흐름에 기인한다. 사실 충격파관에 있어서 격침을 이용하여 격막을 파괴하는 경우 발생하는 압

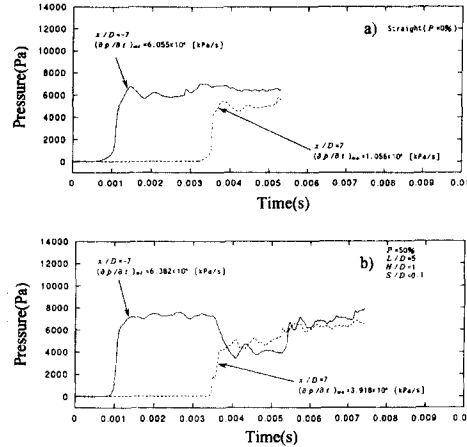


Fig. 3 Propagating compression wave forms

축파형은 일반적으로 충격파형으로 된다. 본 실험에서는 실제 터널입구에서 발생하는 압축파형에 가까운 파형을 얻기 위하여 상당한 시행착오를 거듭하였다. 그 결과 셀로판막에 약간의 홈을 내거나 수증기를 씌인 후에 격막으로 설치하면, 고압실의 압력에 따라 자연 파막이 이루어졌다. 이 경우 발생하는 초기 압축파는 그림에 나타난 바와 같이 실제 터널 입구에서 형성되는 \tan^{-1} 형의 파형⁽¹⁴⁾이 얻어진다는 것을 알았다. 따라서 각 실험에 있어서 $x/D=-7$ 에서 형성되는 임의의 초기 압축파형에 대하여 실험을 수행하였으며, 동일한 초기 압축파형을 얻기 위하여 실험을 수행하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 측정점 ①에서 얻어지는 임의의 압축파에 대한 측정점 ②에서 얻어진 압축파에 상대적인 변화에 주목하였다. 사실 실험에서 초기압축파의 과잉압은 충격파관의 고압실의 압력에 의하여 조절될 수 있었으나, 최대압력구배는 고압실의 압력, 파막의 상태 등에 따라 변화할 수 있으므로, 초기압축파의 최대압력구배의 변화는 수차례 반복 실험을 통하여 얻어진 압축파형으로부터 구하였다. 한편 그림 (b)의 $x/D=7$ 에서 압력파형은 그림 (a)의 점선으로 나타난 압력파형과 유사하지만, 다공벽에서 발생하는 압력파의 영향으로 압축파면의 변화가 발생한다. 즉 압축파는 다공벽의 영향으로 인하여 파면의 평면성이 붕괴되며, 다공벽을 전파한 후의 압력파형에 영향을 미치게 된다. 이것은 저자들에게 의해서 수행된 2차원 수치계산 결과에서도 관찰되었다.⁽²⁰⁾

이와 같이 다공벽을 적용한 경우에 발생하는 파

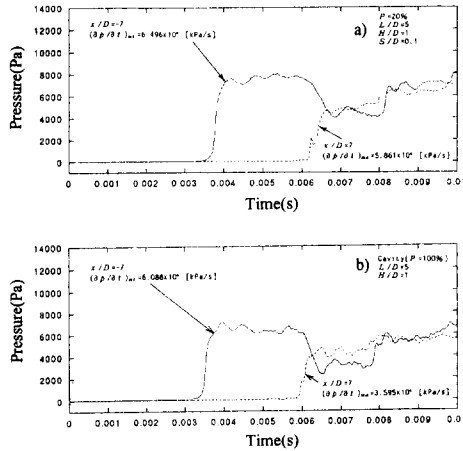


Fig. 4 Propagating compression wave forms

면의 변형은 Fig. 4에서도 관찰된다. Fig. 4의 (a)와 (b)에는 각각 P=20%인 다공벽의 경우와 P=100%(공동만이 설치되어 있는 경우)에 x/D=-7에서 얻어진 초기 압력파형과 x/D=7에서 압력파형을 비교하였다. 그림에 적용된 공동은 Fig. 3과 같이 L/D=5, H/D=1, S/D=0.1이다. 두 그림으로부터 압축파 후미에 압력감소(t=약 0.0061s)와 압력증가(t=약 0.0078s)가 발생하며, 그후의 압력은 약간의 변동을 수반한다. 여기에서 압축파 후미에서 나타난 압력감소와 압력증가는 전술한 바와 같이 다공벽의 모서리(edge)로부터 발생한 팽창파와 공동내부로 들어간 압력파가 반사되어 주류(main stream)의 압력파에 영향을 미치기 때문이다.

Fig. 5에는 Fig. 3과 4에 나타낸 바와 같이 x/D=-7과 7의 위치에서 측정된 압력파형들에 대하여, 압축파의 과잉압에 미치는 다공벽의 기공률 P(%)의 영향을 나타내었다. 그림의 종축은 x/D=-7에서 얻어진 압축파의 과잉압 Δp_{mi} 를 초기 압축파의 과잉압 Δp_{mi0} 로 무차원화한 값을 나타내며, 횡축은 다공벽의 기공률을 나타낸다. 여기에서 P=0% 및 100%의 값은 각각 직관인 경우와 공동만이 설치되어 있는 경우이다. 그림에서 직관인 경우 압축파가 관 등가직경의 14배 정도를 전파하는 동안에 약 19% 정도 감쇠한다는 것을 알 수 있다. 이러한 감쇠는 유체점성과 열전달에 의한 확산작용 때문이다. 그러나 다공벽이 설치된 경우에는 압축파의 감쇠는 다공벽의 기공률이 증가함에 따라 커지다가 P=30%에서 최대로 된 후, 다시 작아진다

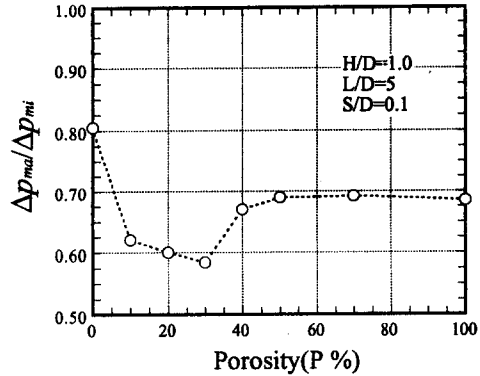


Fig. 5 Attenuation of compression wave vs porosity

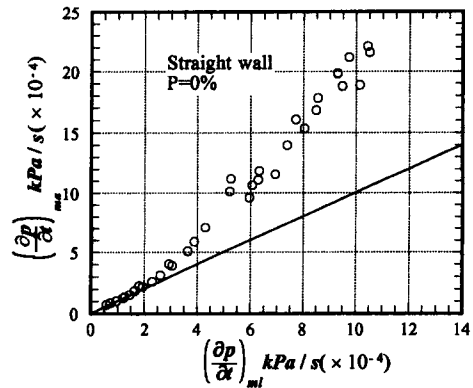


Fig. 6 Variation in maximum pressure gradient of propagating compression wave

는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 H/D, L/D, S/D의 다른 값에 대해서도 거의 유사하게 나타났다. 그림으로부터 다공벽의 기공률 P를 50% 이상으로 높이는 경우에 일어나는 압축파의 감쇠는 거의 일정하며, 공동만을 설치한 경우(P=100%)와 거의 같다. 따라서 압축파 과잉압의 감소의 측면에서 보면 다공벽의 기공률이 30%일 때 감쇠가 가장 크며, 최적의 기공률이라고 생각된다. 본 실험에서는 P>50%의 범위에 대해서는 더 이상 실험을 수행하지 않았다.

Fig. 6에는 직관의 경우에 x/D=7에서 측정된 압축파면의 최대압력구배 $(\partial p / \partial x)_{mi}$ 를 초기압축파의 최대압력구배 $(\partial p / \partial x)_{mi0}$ 에 대하여 나타내었다. 그림에서 실선은 압축파가 관내를 전파함에 따라 파면의 압력구배가 일정한 선을 나타내었다. 그림의 실험값으로부터 초기압축파의 $(\partial p / \partial x)_{mi0}$ 가 2

$\times 10^4 \text{kPa/s}$ 보다 작은 경우에는 관내를 전파함에 따라 파면의 구배는 거의 변화하지 않는다. 그러나 초기압축파의 $(\partial p / \partial t)_{mi}$ 가 $2 \times 10^4 \text{kPa/s}$ 보다 큰 경우에는 압축파의 비선형효과에 의하여 파면의 압력구배는 급격하게 증가한다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 초기압축파의 압력구배가 클수록 현저하게 나타난다.

Fig. 7에는 압축파의 최대압력구배의 변화를 다공벽을 적용한 경우와 직관의 경우에 비교하였다. 그림의 종축과 횡축은 Fig. 6과 같으며, 실험값 \circ 및 \times 는 각각 직관의 경우($P=0\%$)와 공동만의 경우($P=100\%$)를 나타낸다. 또 그림 중에 나타낸 다공벽의 경우 공동은 $L/D=5, H/D=1, S/D=0.1$ 이다. 그림의 실험값으로부터 초기압축파의 $(\partial p / \partial t)_{mi}$ 가 비교적 작은 경우에는(구체적으로 $2 \times 10^4 \text{kPa/s}$ 보다 작은 경우에는) 다공벽의 효과는 나타나지 않는다. 그러나 초기압축파의 $(\partial p / \partial t)_{mi}$ 가 비교적 큰 경우에는 다공벽을 적용한 경우가 직관에 비해 $(\partial p / \partial t)_{mi}$ 가 작다는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 $(\partial p / \partial t)_{mi} > 2 \times 10^4 \text{kPa/s}$ 인 경우에 압축파의 비선형효과가 크게 나타났다. 따라서 다공벽의 효과는 압축파의 비선형효과가 큰 경우에 효과적이며, 반대로 압축파의 비선형효과가 크지 않는 경우에 다공벽을 적용한다고 하더라도 효과가 없다는 것을 알 수 있다. 더욱이 본 실험값으로부터 다공벽의 기공률 P 가 클수록 압축파면의 압력구배는 작아지지만, 그러나 $P \geq 30\%$ 에서는 압축파면의 압력구배는 거의 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 비교적 큰 비선형효과를 가지는 압축파

가 관내를 전파하는 경우에 파면의 압력구배를 완화시키기 위해서 다공벽의 기공률을 $P=30\%$ 로 하는 것이 바람직하다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 압축파의 감쇠의 관점으로부터 얻어진 Fig. 5의 결과와 잘 일치한다.

Fig. 8에는 공동의 $H/D=1, S/D=0.1$ 그리고 다공벽의 기공률 $P=50\%$ 로 고정한 경우에 공동의 길이 L 이 압축파의 압력구배에 미치는 영향을 나타내었다. 그림의 실험값은 각각 L/D 가 2.5와 5.0인 경우를 나타내었다. 그림으로부터 공동의 L/D 가 클수록 압축파의 압력구배는 완만해지며, 이러한 경향은 압축파의 비선형효과가 클수록 현저하게 나타난다는 것을 알 수 있다. 예를 들면 초기압축파의 $(\partial p / \partial t)_{mi} = 10 \times 10^4 \text{kPa/s}$ 에 대하여 L/D 의 값을 2배로 하는 경우에 압축파 최대압력구배의 감소는 약 40% 정도이며, 따라서 이에 상응하는 충격성 소음의 감소가 기대된다. Fig. 9에는 공동의 $L/$

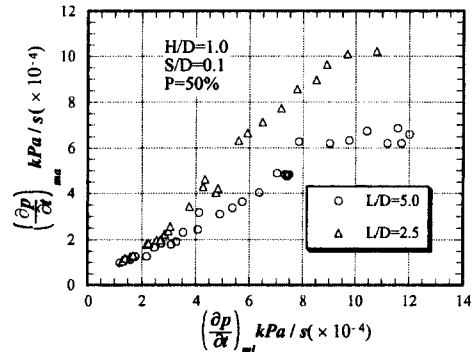


Fig. 8 Effect of cavity length on maximum pressure gradient of propagating compression wave

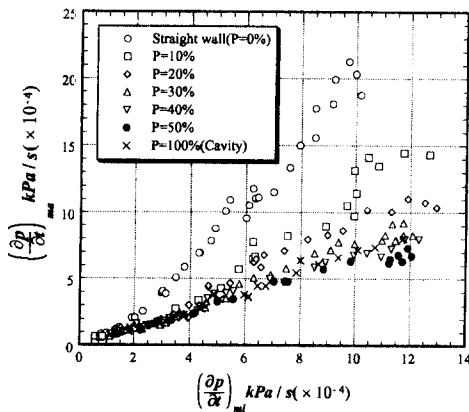


Fig. 7 Effect of porosity on maximum pressure gradient of propagating compression wave

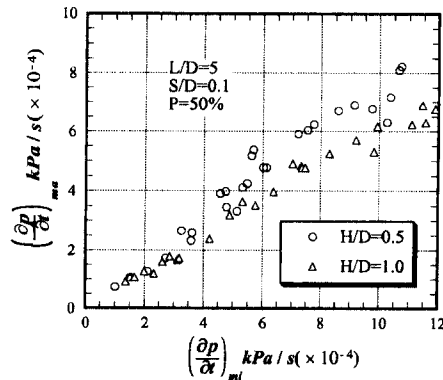


Fig. 9 Effect of cavity height on maximum pressure gradient of propagating compression wave

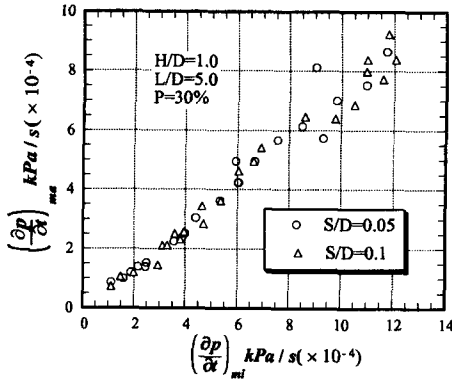


Fig. 10 Effect of slit width on maximum pressure gradient of propagating compression wave

$D=5$, $S/D=0.1$ 그리고 다공벽의 기공률 $P=50\%$ 로 고정한 경우에 공동의 높이 H/D 가 압축파의 최대압력구배에 미치는 효과를 나타내었다. 그림에서 압축파의 최대압력구배는 H/D 가 클수록 작아진다. 예를 들어 초기 압축파의 $(\partial p/\partial t)_{mi}=8 \times 10^4$ kPa/s에 대하여 압축파의 최대압력구배의 감소는 약 20% 정도 얻어진다. 따라서 본 실험의 결과로부터 압축파면의 최대압력구배는 다공벽의 기공률이 30% 정도이고, 가능하면 공동의 길이와 높이를 크게 하는 것이 터널출구에서 발생하는 충격성 소음을 저감시키는데 효과적이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에는 $L/D=5$, $H/D=1$, $P=30\%$ 로 고정한 경우에 슬릿폭의 무차원 폭 S/D 가 압축파의 최대압력구배에 미치는 영향을 나타내었다. 그림의 실험값으로부터 슬릿폭의 무차원 폭이 변화하더라도 압축파면의 압력구배는 거의 변화하지 않는다. 본 실험에서는 S/D 의 다른 값에 대해서도 유사한 결과가 얻어졌다. 이것은 슬릿폭의 폭은 압축파면의 압력구배에 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속철도 터널출구에서 발생하는 충격성소음을 저감시킬 목적으로, 터널내의 다공벽을 이용한 압축파의 피동제어를 시험하였다. 실험에서는 충격파관의 2차원 유로의 양측벽에 공동을 설치하여, 그 입구에 여러 기공률을 가지는 다공벽을 설치하였다. 실험결과는 압축파면의 최대압력구배에 미치는 다공벽의 효과를 조사하는데 이용되었

다. 본 실험으로부터 다공벽은 압축파의 비선형효과가 큰 경우에 효과적이란 것을 알았다. 그러나 비선형효과가 크지 않은 압축파에 대하여서는 다공벽을 이용한 피동제어의 방법은 효과적이지 못하다. 본 연구에서 압축파면의 최대압력구배의 감소 및 과잉압의 감소는 다공벽의 기공률이 30%일 때 가장 크게 나타났으며, 공동의 길이 및 높이가 클수록 충격성 소음의 저감에 효과적이라는 것을 알았다. 그러나 슬릿폭의 폭은 압축파의 압력구배에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 터널내의 압력과 현상들을 경감시키고 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음을 저감하는데 활용될 수 있다.

후 기

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

참고문헌

- (1) 김희동, 1996, "고속철도의 空氣力學 I," 大韓機械學會誌 第36卷, 第1號.
- (2) 김희동, 1996, "고속철도의 空氣力學 II ~ III," 大韓機械學會誌 第36卷, 第3號, 第36卷, 第5號.
- (3) 김희동, 1996, "터널내를 주행하는 1열차의 공기역학적 해석," 大韓機械學會論文集 投稿中
- (4) 김희동, 1994, "고속철도 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.
- (5) Mirels, H., 1956, "Boundary Layer Behind Shock or Thin Expansion Wave Moving into Stationary Fluid," *NACA TN 3712*.
- (6) 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.
- (7) Kashimura, H., Iwata, N. and Nishida, H., 1986, "Numerical Analysis of the Wave Propagation in a Duct with an Area Change by Random Choice Method," *Bull. of JSME*, Vol. 29, pp. 1140~1445 (in Japanese).

- (8) 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).
- (9) Brandmaier, H. E. and Knebel, M. E., 1976, "Steam Flow Through Safety Valve Vent Pipes," *ASME 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의 壓縮空氣의 減壓特性에 關する 研究(第3報, 分岐管付長大管의 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*, 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의 實態," 鐵道技術研究報告, No. 1023.
- (14) 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.
- (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, "Study on Reduction of Impulsive Noise Caused by Unsteady Compression Wave," *JSME International Journal*, Series B (to be published).
- (17) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1996, "Interaction of Unsteady Expansion Wave with the Change of Cross-Sectional Area in Tube," *KSME Journal* (to be published).
- (18) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1996, "Model Test on Negative Impulsive Wave Generator for Noise Reduction," *ASME Journal Vib. and Acoustics* (submitted).
- (19) 金義東, 瀬戶口俊明, 1996, "垂直坑을 利用한 터널내 非定常 壓縮波의 被動制御," 大韓機械學會論文集, 投稿中.
- (20) 金義東, 瀬戶口俊明, 1996, "多孔壁을 傳播하는 壓縮波의 數值解析的 研究," 大韓機械學會論文集, 投稿中.
- (21) 金義東, 1995, "高速鐵道 터널에서 發生하는 波動現象에 關한 衝擊波管의 研究2(壓縮波의 非線形效果와 減衰)," 大韓機械學會論文集, 第19卷, 第8號.