

## 축소/확대관 출구로부터 방출되는 펄스파에 관한 연구

이동훈\* · 주경민\*\* · 김현섭\*\*\* · 김희동\*\*\*\*

### A Study on the Impulse Waves Discharged from the Exit of the Convergent/Divergent Pipes

D.H.Lee, K.M. Ju, H.S.Kim and H.D.Kim

Key Words: Compression Wave(압축파), Impulse Noise(충격성 소음), Impulse Wave(펄스파), Pulse Jet(펄스제트), Shock Tube(충격파관), Unsteady Flow(비정상유동)

#### Abstract

The present study is to investigate the characteristics of the impulse waves discharged from the exit of the convergent and divergent pipes. An experiment is carried out using a shock tube with an open end and is compared to the computation of the axisymmetric, compressible, unsteady Euler equations, which are solved by the second-order total variation diminishing(TVD) scheme. For the computational work, some initial compression waves are assumed inside the pipe so that those are identical to the experimental ones of the shock tube. The results show that the peak pressures of the impulse waves discharged from the exit of convergent and divergent pipes decrease with an increase in the wavelength of the initial compression wave. All of the impulse waves have a strong directivity toward the pipe axis, regardless of the exit type of the pipe employed. The impulse waves discharged from the divergent pipe are stronger than those from the straight pipe, while the impulse waves of the convergent pipe are weaker than those from the straight pipe. It is believed that the convergent pipe can play a role of a passive control to reduce the peak pressure of the impulse wave. The present computations represent the experimented impulse waves with a good accuracy.

#### 1. 서 론

노즐이나 오리피스 등을 통하여 고압의 유체가 순간적으로 방출될 때 발생하는 펄스제트는 주변을 향해 강한 펄스파를 발생시킨다. 이와 같은 펄스파 현상은 고압가스의 배관계를 비롯한 동력엔진의 배기계, 대포 및 총기류, 고속철도의 터널 등과 같은 다양한 비정상 내부유동 장치에서 경험할 수 있다.<sup>(1)</sup> 특히 강력한 세기의 충격성 소음을 유발시키는 펄스파는 피크압력이 매우 높기 때문에 주변 생태계나 인체에 나쁜 영향을 미치

게 됨은 물론이거니와 심한 경우 주변 구조물을 진동파괴시킬 수도 있다. 따라서 이에 대한 적절한 대응책이 요구되고 있으며, 최근까지도 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(2,3)</sup>

한편 이와 같은 펄스파 방출에 기인한 충격성 소음문제의 해결과는 별도로 최근에 들어와서 매우 강한 강도의 펄스파를 공업적으로 유용하게 이용하려는 펄스제트 응용기술이 중요한 공학적 과제로 부상하고 있다. 이것은 펄스제트에 의한 펄스파가 연속제트에 비하여 구동에너지를 대폭 절감할 수 있는 잇점을 가지기 때문이다. 펄스파 응용기술이 쓰이는 대표적인 예로는 펄스제트를 이용한 고효율 연소기 개발<sup>(4)</sup>, 펄스제트 필터장치<sup>(5)</sup> 및 펄스제트 크리닝<sup>(6)</sup> 등이 있다. 특히 화력 발전소나 반도체와 같은 산업분야에서는 오염방

\* 서울산업대학교 기계공학과  
 \*\* 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과  
 \*\*\* 안동대학교 대학원 기계공학과  
 \*\*\*\* 안동대학교 기계공학과

지와 표면청소를 목적으로 이미 펄스제트 장치가 실용화되고 있다.<sup>(7)</sup> 그러나 펄스제트 장치의 성능과 펄스파 특성간의 상호관계가 명확하게 규명되어 있지 않은 현재의 상황에서는 펄스제트 방출시 발생하는 펄스파의 start-up 현상만을 이용하고 있을 뿐이며, 펄스제트 장치의 고성능화와 고효율화를 염두에 둔 펄스기기나 장치의 개발을 위한 연구의 시도는 없었다. 단지 최근에 저자들에 의해 발표된 펄스파 강도증가를 위한 연구만이 제시되었을 뿐이다. 저자들은 강한 펄스파를 얻기 위한 하나의 방안으로 관출구에 형상이 각기 다른 나팔관과 급확대관을 부착한 연구에서 확대부 벽면에서 반사한 충격파가 펄스파의 강도를 증가시키는 주된 요인임을 규명하고, 급확대관과 나팔관 모두 펄스파 강도증가와 더불어 펄스파 강도를 제어할 수 있는 매우 유용한 장치로 쓰일 수 있음을 확인한 바 있다.<sup>(8,9)</sup> 그러나 저자들의 선행연구는 급확대관과 나팔관의 상류측 관내부에서 약한 충격파를 발생시켜 전파시킨 경우였으며, 본 연구에서와 같이 압축파의 전파에 대해서는 검토하지 않았다. 특히 본 연구에서와 같이 압축파가 관내를 전파할 때 관출구의 형상이 정반대인 확대관과 축소관의 확대부와 축소부에서 발생하는 파동현상이 관출구로 방출되는 펄스파의 전파특성에 어떠한 영향을 미치는지를 규명하는 것은 펄스기기의 개발 뿐만아니라 파동현상에 대한 물리적인 이해를 위해서도 대단히 흥미로운 연구의 관심사가 아닐 수 없다.

따라서 본 연구에서는 축소관과 확대관의 출구로 방출되는 펄스파의 전파특성을 파악할 목적으로 관내를 전파하는 초기압축파의 과잉압력과 파장의 크기를 변화시키면서 펄스파의 압력을 측정하고 수치계산하였다. 실험은 충격파관을 이용하였으며, 수치계산은 Harten-Yee의 TVD법<sup>(10)</sup>을 이용하여 관출구로 방출된 펄스파의 압력파형과 피크압력을 구하였다. 또 직관에 대해서도 수치계산과 실험을 수행하여 축소관과 확대관의 결과값과 비교하였다.

## 2. 실험

충격파관은 Fig. 1과 같이 관지름 66mm인 원형 강관으로 제작된 대기개방형 충격파관을 이용하였다. 충격파관의 고압실은 압축된 건조공기로

충진되어 있고, 저압실은 대기에 개방되어 있다. 고압실과 저압실사이에 위치한 격막은 두께 0.03mm인 셀로판시트를 이용하였으며 격막을 파막시키기 위한 격침이 장착되어 있다. 충격파관의 저압실 끝에는 본 연구에서 수행하고자 하는 확대관, 축소관 그리고 직관이 부착된다. 부착된 확대관과 축소관의 길이는 충격파관의 지름  $D$ 와 같게 하였다. 관의 축소부와 확대부의 출구지름은 Fig. 1에서 보듯이  $D/4$ 크기로 축소와 확대를 시켰다. 또한 관의 출구에는 파동현상에 대한 판단보정을 위하여<sup>(11)</sup> 각 관의 출구단에 배플판을 부착하였다.

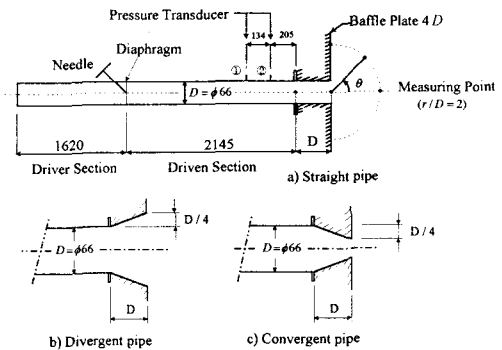


Fig. 1 Shock tube facility and test pipes

한편 관출구로부터 방출되는 펄스파는 관출구 중심축을 기준하여  $r=2D$  거리에서  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$  그리고  $\theta=90^\circ$  방향에 압력센서를 설치하여 펄스파의 압력을 측정하였다. 펄스파의 압력측정시에 유동장의 외란을 가능한 최소화시키기 위하여 선단이 뾰족한 췌기형 지지대에 압력센서를 장착하였다. 압력센서로부터 얻어진 모든 출력신호는 직류증폭기를 거쳐 증폭된 다음에, 파형기록장치에 저장됨과 동시에 X-Y레코더에 기록된다.

## 3. 수치해석

본 연구에서는 비정상 축대칭 압축성 유동방정식에 Harten-Yee의 TVD법<sup>(10)</sup>을 적용하여 Fig. 2에 도시된 유동장을 수치계산하였다. 수치계산의 상류경계는 출구면을 기준으로 하여  $x/D=-5$ 인 위치로

하였으며, 하류경계는 관출구면의 중심점으로부터 5D정도로 설정하였다. 수치계산시 계산격자는  $\Delta x = \Delta y = D/70$ 인 정방형 격자로 하였다. 모른 고체벽면에는 slip-wall조건을 적용하였으며, 대칭성을 고려하여 중심축을 기준으로 상반부만을 계산영역으로 취하였다.

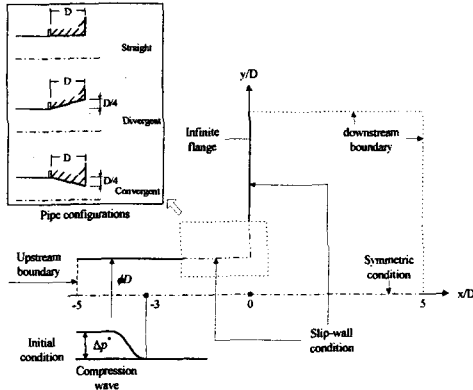


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions.

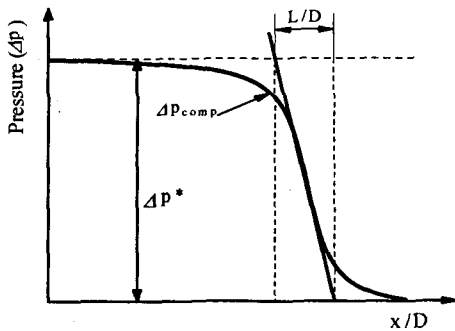


Fig. 3 Definition of the initial compression wave.

한편 초기압축파는 식 (1)에 정의된 압축파가 출구면으로부터  $x/D = -3$ 인 상류지점에서 관출구를 향해 전파하는 것으로 하였다.

$$\frac{\Delta p_{comp}}{p_a} = \frac{\Delta p^*}{p_a} \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{\pi D}{L} \left( \frac{x}{D} + \frac{10}{3} \right) \right\} \right] \quad (1)$$

Fig. 3에 정의된 바와 같이  $\Delta p_{comp}$ 는 관내에서 발생하는 초기압축파의 압력,  $L/D$ 는 관지름  $D$ 로 무차원화한 압축파의 파장,  $\Delta p^*$ 는 과잉압력 그리고  $p_a$ 는 대기압을 뜻한다. 본 연구에서는 초기압축파의 과잉압력  $\Delta p^* = 5.8kPa$ ,  $\Delta p^* = 7.0kPa$  그리고  $\Delta p^* = 7.6kPa$ 인 조건에서 파장  $L/D$ 의 값

을 0.2에서 2.5사이의 범위에서 변화시켰다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 직관, 확대관 그리고 축소관내를 전파하는 압축파가 관출구로부터  $x = -D$ 인 위치에 도달하였을 때 수치계산한 압력파형 결과이다. 초기압축파의 과잉압력과 파장은  $\Delta p^* = 7.6kPa$ 와  $L/D = 1.63$ 이다. 또 횡축의 시간  $t$ 는  $x/D = -3$ 인 위치에서 전파한 초기압축파의 경과시간을 나타내며, 종축의 압력  $\Delta p$ 는  $x/D = -1$ 지점을 통과하는 압축파의 압력을 나타낸다.

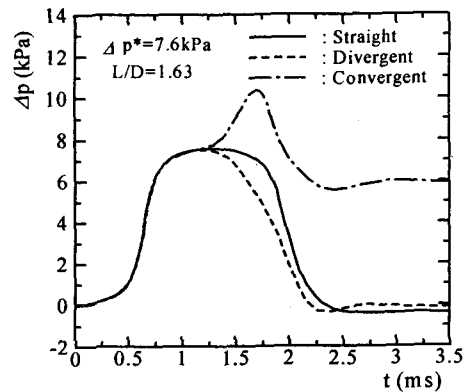


Fig. 4 Computed pressure wave forms at  $x = -D$ .

결과에서 보듯이  $t = 1.2ms$ 를 경계로 관출구형상이 다르더라도 파드는 거의 같은 형태로 상승하여 정점에 이르는 것을 볼 수 있다. 그러나  $t = 1.2ms$ 이후부터는 출구형상에 따라 파형의 형태가 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 먼저 직관에 대한 압력파형을 기준하여 보면, 확대관의 경우는 직관보다 더 일찍이 팽창파의 영향을 받아 압력감소가 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 확대관의 확대단면부가 관출구로부터  $x = -D$ 만큼 앞서 확대되었기 때문에  $x = -D$  거리에 해당하는 시간차만큼 앞서서 발생한 팽창파가 상류측으로 반사되었기 때문이다. 그러나 축소관의 경우는 파みに 해당하는  $t = 1.2ms$ 이후에 재차 압축되어 관출구단 가까이에서 최고의 압력정점에 이르렀다가 직관에서와 같이 압력이 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 파형변화는 관내를 전파하는 압축파의 일부가 관의 축소부에서부터 반사하여, 상류측으로 전파하기 때문이다.

또 압축파의 나머지 부분이 관출구에 도달하게 되면 팽창파로 다시 상류로 전파하게 되므로, 압력의 급격한 감소가 발생하게 된다.

Fig. 5부터 Fig. 7까지 제시된 결과는 직관, 확대관 그리고 축소관의 관내외부를 전파하는 파동의 전파과정을 서로 다른 전파시간대에서 수치계산한 등압선도이다. 도시된 모든 결과는 초기압축파의 과잉압력  $\Delta p^* = 5.8kPa$  그리고 파장  $L/D = 1.0$ 인 조건에서 계산한 것이며, 등압선의 간격은  $\Delta p/p_0 = 0.0012$ 이다.

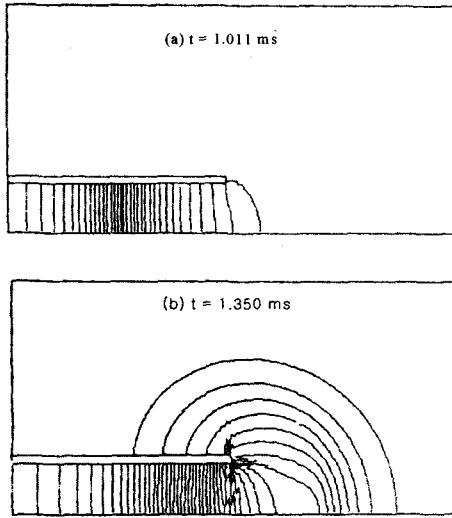


Fig. 5 Pressure contours for the straight pipe.

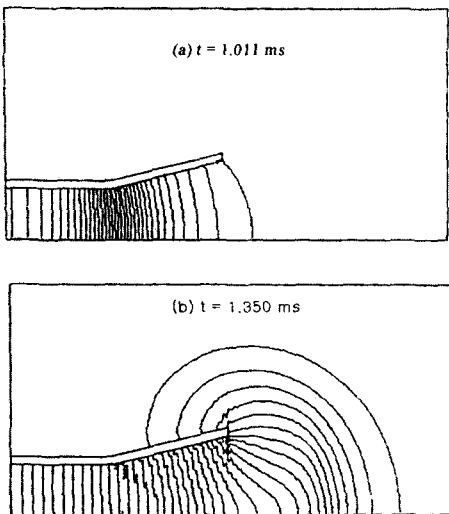


Fig. 6 Pressure contours for the divergent pipe.

먼저 Fig. 5에 도시한 직관에 대한 결과에서 전파 시간  $t = 1.011ms$ 일 때는 압축파의 중심이 관내에 있는 것을 볼 수 있다. 그러다가 시간이 경과되어  $t = 1.350ms$ 가 되면 관출구로부터 구면파 형태의 펄스파가 방출되어 대기중으로 전파하는 것을 볼 수 있다. 확대관에 대한 결과인 Fig. 6에서도 Fig. 5와 유사한 형태로 전파하는 펄스파를 볼 수 있으나, 방출된 펄스파의 등압선 간격이 더 조밀해진 것을 알 수 있다. 이것은 곧 확대관으로부터 방출된 펄스파가 직관에 비해 더 강하다는 것을 의미한다. 즉 확대관의 경우는 확대부로부터 반사된 압축파가 출구를 향해 전파하는 압축파와 상호간섭하여 펄스파의 세기를 강하게 하는 것으로 볼 수 있다.

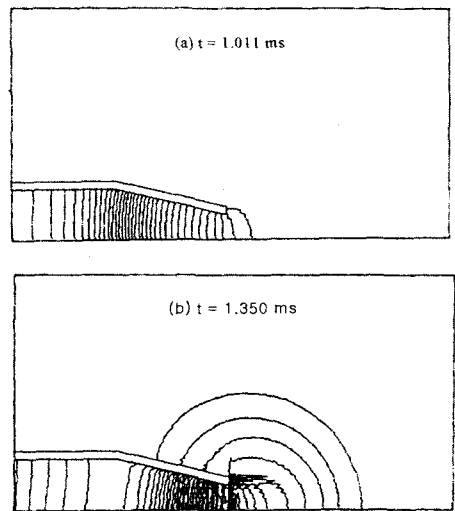


Fig. 7 Pressure contours for the convergent pipe.

그러나 Fig. 7에 도시된 축소관의 전파시간  $t = 1.350ms$ 일 때의 파동형태를 동일시간대의 Fig. 5 및 Fig. 6의 두 결과와 비교해 보면 대기중으로 전파하는 펄스파가 매우 약하다는 것을 알 수 있다. 이것은 제시된 그림결과에서도 나타나 있듯이 단면축소로 인해 관내를 진행하는 압축파의 일부가 축소부에서 상류측으로 반사되기 때문이다.

Fig. 8은 직관, 확대관 그리고 축소관의 출구로부터 전파하는 펄스파의 압력파형을  $r/D = 2$ 인 거리에서 전파방향별로 측정하여 수치계산값과 상호비교한 결과이다. 압축파의 과잉압력과 파장은 각각  $\Delta p^* = 5.8kPa$ 과  $L/D = 1.0$ 일 때이다.

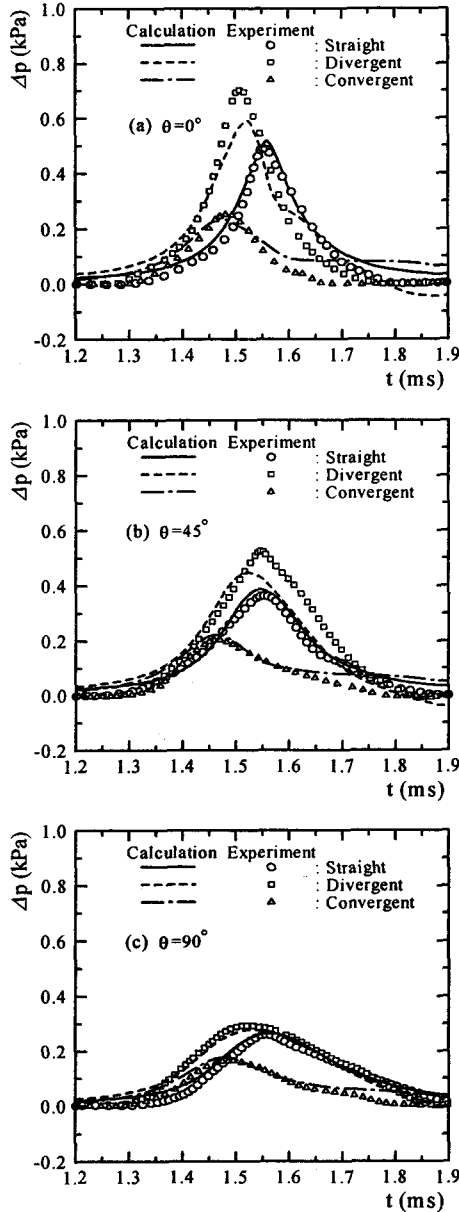


Fig. 8 Comparison of the computed and measured impulse waves at  $r/D=2$ .

먼저 그림 (a)에 도시된 관측방향으로 전파하는 압력파형 결과에서 펄스파의 압력은 직관을 기준하여 확대관의 경우가 가장 높고, 축소관의 경우가 가장 낮게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 펄스파의 압력거동은 반경방향으로 전파하는 그림 (b)와 그림 (c)의 결과에서도 찾아 볼 수 있으나,

반경방향으로 갈수록 출구형상에 따른 압력값의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 이것은 펄스파가 관측방향으로만 전파하는 강한 지향성을 갖기 때문이다. 또한 직관과 축소관에 대한 수치계산값과 측정값은 대체로 잘 일치하나, 그림 (a)와 그림 (b)에 도시된 확대관의 경우는 약  $100p_0$  정도의 차이를 나타낸다.

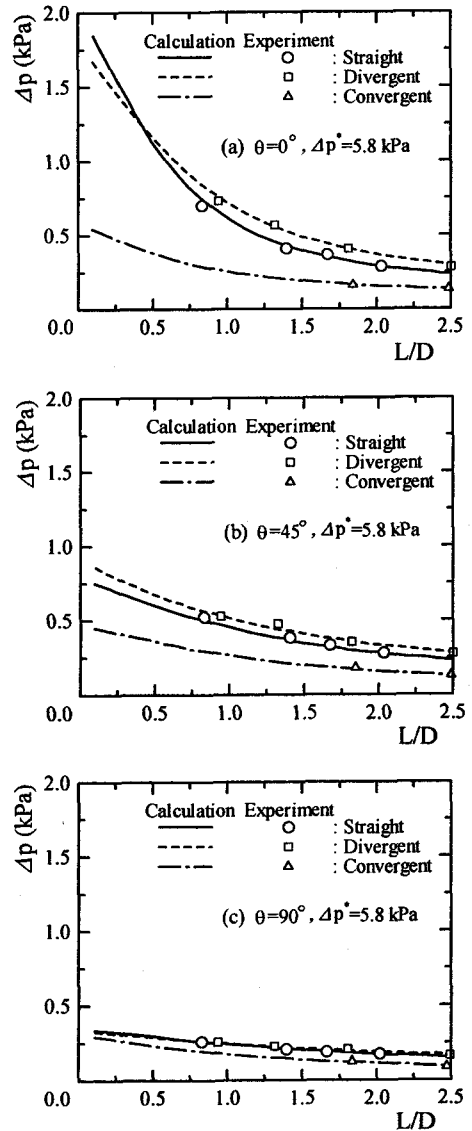


Fig. 9 Comparison of the computed and measured peak pressures at  $r/D=2$ .

Fig. 9는 초기압축파의 파인압력  $\Delta p^* = 5.8$  kPa

로 일정한 상태에서 압축파의 파장  $L/D$ 만을 변화시키면서 직관, 확대관 그리고 축소관의 출구로부터  $r/D=2$  거리에서 전파방향별로 측정된 펄스파의 피크압력을 수치계산값과 비교한 결과이다. 모든 결과에서 펄스파의 피크압력은 압축파의 파장이 길어질수록 점진적으로 감소하며, 관측방향에서 그 감소폭이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 또한 본 연구의 압축파의 파장범위내에서는 축소관으로부터 방출하는 펄스파가 직관이나 확대관에 비하여 피크압력이 낮아지는 것을 알 수 있다. 이상의 연구결과를 종합하여 볼 때 확대관의 경우는 펄스파의 압력을 증가시키는 역할을 하는 반면에, 축소관의 경우는 펄스파의 압력을 감소시키는 역할을 하는 것으로 결론지을 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 축소관과 확대관의 출구로부터 방출되는 펄스파의 전파특성을 파악할 목적으로 충격파관을 이용한 실험과 수치계산을 수행하여 비교고찰하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

1) 직관, 확대관 그리고 축소관의 출구로부터 방출되는 펄스파의 압력파형과 피크압력에 대한 측정결과는 수치계산 결과와 잘 일치한다.

2) 확대관과 축소관에 대한 펄스파의 피크압력 결과를 직관의 결과와 비교하여 볼 때 확대관의 경우는 펄스파 압력을 증폭시키는 역할을 하는 반면에, 축소관의 경우는 펄스파 압력을 감소시키는 역할을 한다.

3) 확대관과 축소관으로부터 방출된 펄스파는 직관에서와 같이 관측방향으로만 전파하는 강한 지향성을 갖는다. 또한 이들 관출구로부터 방출된 펄스파의 피크압력은 초기압축파의 파장이 길어질수록 감소한다.

## 후 기

본 연구의 네 번째 저자는 본 연구가 두뇌한국 21사업의 지원으로 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사를 표합니다.

## 참고문헌

- (1) Raghunathan, S., Kim, H.D. and Setoguchi, T., 1998, "Impulse Noise and Its Control," Progress in Aerospace Science, Vol.34, pp.1~44.
- (2) Kim, H.D. and Setoguchi, T., 1999, "Study of the Discharge of Weak Shocks from an Open End of a Duct," Journal of Sound and Vib., Vol.226, No.5, pp.1011~1028.
- (3) 김희동, Setoguchi, T., 1996, "고속철도 터널출구에서 발생하는 충격성 소음의 저감을 위한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집(B), 제20권, 제7호, pp.2375~2385.
- (4) Kentfield, J.A.C., 1993, Nonsteady, One-Dimensional, Internal Compressible Flows (Theory and Applications), Chap. 7, Oxford University Press.
- (5) Klingel, R. and Loffler, F., 1983, "Dust Collection and Cleaning Efficiency of a Pulse Jet Fabric Filters," Proc. of the Filtration Society, Vol.20, pp.205-208.
- (6) Morris, W.J., 1984, "Cleaning Mechanisms in Pulse Jet Fabric Filters," Proc. of the Filtration Society, Vol.21, pp.52-54.
- (7) Smedly, G.T., Phares, D.T. and Flagan, R.C., 1998, "Entrainment of Fine Particles from Surfaces by Impinging Shock Waves, Experiments in Fluids, Vol.26, pp.116-125.
- (8) 이동훈, 김희동, 강성황, 2001, "펄스파 강도증가를 위한 피동제어," 한국소음진동공학회지, 제11권, 제2호, pp.241-248.
- (9) Kim, H.D., Setoguchi, T. and Kashimura, H., 2001, "Augmentation of the magnitude of the impulsive wave discharging from a tube," Journal of Mechanical Engineering Sciences, IMechE Part C, 215, pp.191-199.
- (10) Yee, H.C., 1987, "Upwind and Symmetric Shock Capturing Schemes," NASA TM-89464.
- (11) Kim, H.D., et al, 1998, "Studies on Reflection of Weak Shock Waves from an Open End of a Tube with Baffle Plate," Proceedings of 11th International Symposium on Transport Phenomena, ISTP-11, Taiwan, pp.94~99.