대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 E pp. 355~360 KSME 01S573

관 출구로부터 방출되는 펄스파의 수치해석적 연구

김희동* · 김현섭* · 권용훈* · 이동훈**

Computational Study of The Pulse Waves Discharged From The Open End of a Duct

H.D.Kim*, H.S.Kim* Y.H.Kweon* and D.H.Lee**

Key Words: Compression Wave (압축파), Impulse Wave (펄스파), Shock Wave (충격파), Unsteady Flow (비정상 유동), Shock Tube (충격파 관)

Abstract

This study addresses a computational work of the impulsive wave which is discharged from the open end of a pipe. An initial compression wave inside the pipe is assumed to propagate toward atmosphere. The over pressure and wave-length of the initial compression wave are changed to investigate the characteristic values of the impulsive wave. The second order total variation diminishing (TVD) scheme is employed to solve the axisymmetric, compressible, unsteady Euler equations. The relationship between the initial compression wave form and impulsive wave is characterized in terms of the peak pressure of the impulsive wave and its directivity. The results obtained show that for the initial compression wave of a large wave-length the peak pressure of the impulsive wave does not depend on the over pressure of the initial compression wave, but for the initial compression wave of a very short wave-length, like a shock wave, the peak pressure of the impulsive wave is increased with an increase in the over pressure of the initial compression wave. The directivity of the impulsive wave to the pipe axis becomes significant with a decrease in the wave-length of the initial compression wave.

1. 서 론

관내를 전파하는 압축파나 충격파가 관의 출구로부터 대기로 방출하는 경우 펄스형태의 강한 압력파를 발생시키게 되는데 이를 펄스파라고 한다. 이러한 펄스파는 대개 공기의 음속 이상의 속도로 주위로 전파하여, 주변의 생태계나 구조물에 충격적인 외력을 미치게 될 뿐만 아니라 충격성 소음과 구조물의 진동의 원인이 된다.[1, 2]

이와 같은 현상은 자동차의 배기관, 대포나 총기류, 차량의 공기 브레이크, 각종 플랜트의 배관계, 고속철도의 터널문제 등 광범위한 분야에서 발생한다.[3, 4, 5] 예를 들면 고속열차가 터널내로 진입하는 경우, 터널내에 발생한 압축파가 터널출구에서 방출될 때 발생하는 펄스파는 주변으로 전파하며, 거의 발파음에 가까운 강한 충격성 소음을 발생시키며, 이러한 펄스파는 짧은 지속시간과 높은 순간 피크압력으로 특성화 된다.[6, 7] 따라서 이에 대한 펄스파의 유동특성을 조사하여, 이를 적절히 제어하는 문제는 매우 중요한 사항이다.

종래의 연구에 의하면 이러한 펄스파는 관내의 압축파의 강도나 파형에 밀접하게 관련이 되어 있으므로,[8, 9] 관내에서 발생한 압축파나 충격파와 펄스파와의 상관관계를 명확히 규명하는 것은 펄스파의 예측에 있어서 대단히 중요하다.

일반적으로 관의 외부에서 형성되는 펄스파는 관 출구에서 발생하는 압축파나 충격파의 특성에 의하여 결정되며, 펄스파는 거리에 따라 그 강도가 절반으로 감소한다는 것이 잘 알려져 있다.[10, 11]

* 안동대학교 기계공학과
** 서울산업대학교 기계공학과

또 펄스파가 구조물과 간섭을 일으키는 경우의 반사나 회절 등에 관한 연구가 행해졌으나,[4] 이는 극히 제한된 조건에 대한 것 일뿐 실제적인 펄스파의 파동특성에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 TVD Scheme을 이용한 Euler 방정식의 수치해석을 통하여 대기중으로 방출되는 펄스파의 유동특성과 초기의 입력 압축파와 펄스파와의 관계를 조사하였다. 수치해석에는 관내의 압축파의 압력구배와 과잉압력에 따른 펄스파의 유동특성을 조사하기 위하여 압축파의 강도를 4가지로, 압력구배를 8가지로 변화시켜 수치계산을 수행하였다.

2. 수치계산 방법

본 연구에서는 축대칭 비정상 압축성 Euler 유동방정식에 Harten-Yee의 TVD법을 적용하여 펄스파의 유동특성을 해석하였으며, 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial F}{\partial x}+\frac{\partial G}{\partial y}+W=0 \qquad (1)$$

$$U=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ e\end{bmatrix}, F=\begin{bmatrix}\rho u\\ \rho u^2+p\\ \rho uv\\ (e+p)u\end{bmatrix}, G=\begin{bmatrix}\rho u\\ \rho uv\\ \rho v^2+p\\ (e+p)v\end{bmatrix}, W=\frac{1}{y}\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv\\ \rho v^2\\ (e+p)v\end{bmatrix}$$

위의 수식 (1)에서 t는 시간, ρ는 기체의 밀도, u와 v는 각각 축방향과 반경방향의 속도성분, γ는 공기의 비열비, p는 압력을 나타낸다. 공기의 단위체적당 전에너지를 e라 할 때, 전에너지 e는 다음과 같이 주어진다.

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

수치계산에서 식 (1)은 다음과 같은 무차원 상태량으로 다시 쓰여진다.

$$r'=\frac{r}{D},\quad x'=\frac{x}{D},\quad u'=\frac{u}{a_a/\sqrt{\gamma}},\quad v'=\frac{v}{a_a/\sqrt{\gamma}}$$

$$t'=\frac{t}{D/a_a\sqrt{\gamma}},\quad p'=\frac{p}{p_a},\quad \rho'=\frac{\rho}{\rho_a},\quad e'=\frac{e}{p_a} \qquad (3)$$

위 식에서 a는 음속, 상첨자(′)는 무차원량, 하첨자(a)은 대기상태를 나타낸다.

Fig.1은 수치계산에 적용된 계산영역을 나타내며, 그림중에는 본 계산에서 사용된 경계조건과 초기조건도 함께 나타내고 있다. 계산영역은 관 내부영역과 관 외부영역으로 구성되며, 관의 직경을 D라고 하는 경우 관의 상류방향으로 12D, 그리고 하류경계는 10D로 하였다.

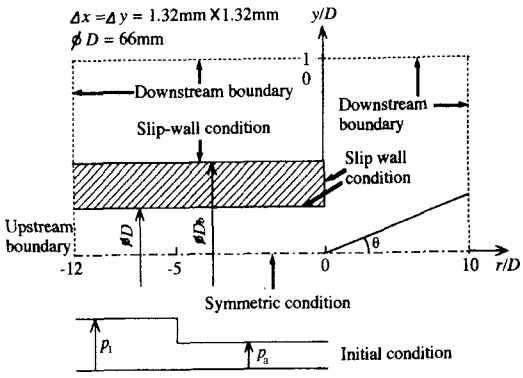

Fig.1 Computational flow field and boundary conditions

수치계산은 그림에 나타낸 계산영역에 대하여 약 500,000개의 정렬격자를 생성하여 수치계산을 수행하였다. Fig.2에는 관내의 초기 압축파의 파형을 나타내었으며, 본 연구에서는 다음의 식 (4)로 나타내는 바와 같이, 초기 압축파의 파형을 arctan 형으로 가정하여 압축파의 파장 L을 8가지로, 과잉압 Δp^*을 5가지로 변화시켜 수치계산을 수행하였다.

$$\frac{\Delta p}{p_a}=\frac{\Delta p^*}{p_a}\left[\frac{1}{2}-\frac{1}{\pi}\tan^{-1}\left\{\frac{\pi D}{L}\left(\frac{x}{D}+\frac{10}{3}\right)\right\}\right] \qquad (4)$$

위의 식에서 D는 관의 직경이며, p_a는 대기압력이다. 위의 식 (4)는 경험을 통해서 얻어진 실제 고속철도 터널에서 발생하는 대표적인 압축파형[10]이며, x는 관축을 따르는 거리를 나타낸다.

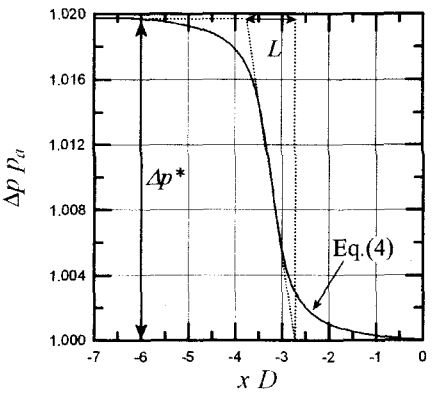

Fig.2 Initial compression wave form

본 연구에서는 초기 압축파의 파장 L/D를 0.01~3.0, 과잉압력 $\Delta p^*(=p_1-p_a)$를 2.0~3.5 kPa 범위에서 변화시켜, 반경방향과 축방향에서의 펄스파의 피크 압력값을 구하였으며, 모든 고체 벽면에는 Slip-wall 조건을, 중심축에서는 대칭조건을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3은 $\Delta p^*=2kPa$이고 L/D가 각각 1.5, 2.5인 경우, 그리고 Fig.4는 L/D=1이고 $\Delta p^*=2kPa$, $3kPa$인 경우에 무차원 시간 t'에 따른 관 출구로부터 방출된 펄스파형을 나타내었다. 여기에서 t'는 관 내부에서 압축파가 관 출구를 향해 전파하는 순간부터의 시간을 의미한다. 그림으로부터 펄스파의 강도가 θ에 관계없이 같은 거리 r일 경우 거의 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있으며, 하류방향으로 갈수록 펄스파 피크 압력값이 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 또 펄스파의 피크 압력값은 L/D와 $\Delta p^*/p_a$에 따라서 다소 변화하는 것으로 보인다.

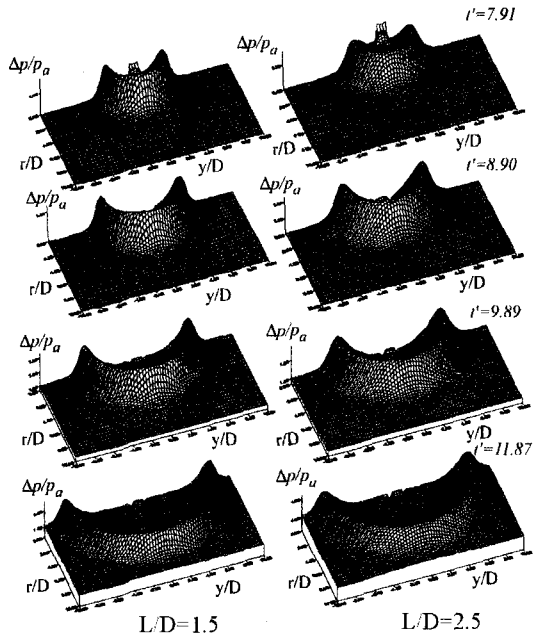

Fig.3 Pulse wave contours ($\Delta p^*=2kPa$)

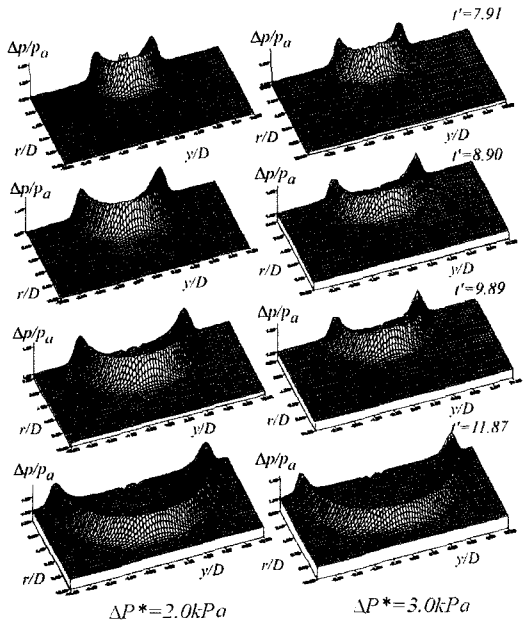

Fig.4 Pulse wave contours (L/D=1)

Fig.5에는 L/D가 1인 경우 펄스파의 피크 압력 $\Delta p_{max}/p_a$의 거리 r/D에 대한 변화를 나타내었다.

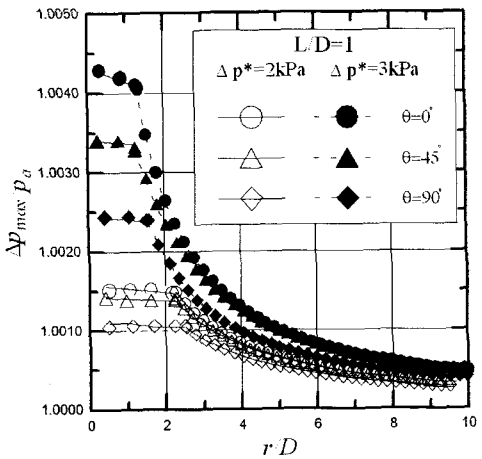

Fig.5 Variation of pulse wave magnitude with distance (L/D=1)

그림의 ●, ◆, ▲는 초기 압축파의 강도 $\Delta p^*=3kPa$에 대한 경우이며, ○, ◇, △는 $\Delta p^*=2kPa$인 경우에 대한 수치계산 결과이다. 그림으로부터 Δp^*가 $2kPa$인 경우 펄스파의 피크

압력값은 θ에 관계없이 r/D가 약 2.2의 위치까지는 r/D가 증가함에 따라 약간씩 감소하다가, r/D가 2.2보다 큰 경우에는 급격하게 감소하여, 거리가 두배로 증가하게 되면 피크 압력값은 반으로 감소하는 경향을 보인다. 또 동일한 r/D의 값에 대하여, 펄스파의 피크 압력값은 관축방향 즉, θ=0° 에서 가장 크며, θ=90° 에서 가장 작은 것으로 나타난다. 펄스파의 피크 압력값의 θ 의존성은 r/D가 증가함에 따라 작아지며, r/D가 10정도 되면 펄스파의 피크 압력은 θ에 관계없이 거의 일정하게 되는 경향을 보인다.

Δp^* 가 $3kPa$ 인 경우에 펄스파의 피크 압력값에 미치는 θ 및 r/D의 영향은 정성적으로 유사하다. 그러나 동일한 r/D에 대하여, 펄스파의 피크 압력은 Δp^*가 클수록 크게 나타난다. 더욱이 Δp^*가 클수록 펄스파의 피크 압력값의 θ 의존성이 크며, 관축방향으로 펄스파의 지향성이 강한 것으로 보인다. 한편 Δp^*가 $3kPa$ 인 경우 r/D가 약 1.7에서 r/D의 증가에 따른 펄스파의 피크 압력값의 감소율이 갑자기 변화하는 것으로 보인다. 이것은 유한의 파장을 가진 압축파가 관 출구로부터 방출되는 경우, 완전히 발달한 펄스파가 형성되기까지 거리가 필요하기 때문이다. 이 거리는 Δp^*가 클수록 짧아지는 것으로 보인다. 따라서 이 거리는 펄스파의 근거리장과 원거리장의 경계라고 생각할 수 있다.

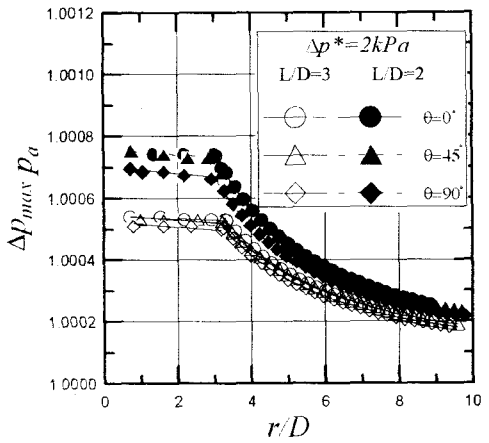

Fig.6 Relationship between $\Delta p_{max}/p_a$ and r/D ($\Delta p^* = 2kPa$)

Fig.6 에는 Δp^* 가 $2kPa$ 인 경우 펄스파의 피크압력에 미치는 L/D의 영향을 나타내었다. 그림으로부터 펄스파의 피크압력은 초기 압축파의 L/D 값에 의존하여 변화하는 것으로 보인다. 예를 들면 모든 r/D의 위치에서 초기 압축파의 L/D 값이 2.0인 경우가 L/D=3.0에 비하여 펄스파의 피크 압력이 크다는 것을 알 수 있다. 또 L/D 값이 작을수록 θ에 대한 피크 압력값의 의존성이 커지게 되므로, 펄스파의 관축방향으로 지향성이 강해지는 것으로 보인다. 한편 Fig.5의 결과와 비교로부터 동일한 과잉압 Δp^*에 대하여, L/D 값이 증가할수록 펄스파의 원거리장 경계는 증가하게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig.7에는 $\Delta p^* = 2kPa$ 인 경우, 동일한 무차원 시간 t'에서 초기 압축파의 L/D 값이 펄스파형에 미치는 영향을 나타내었다. 그림으로부터 L/D 값이 작아질수록 펄스파의 피크 압력값은 커지며, 펄스파형은 보다 예리한 형태 즉 펄스파의 지속시간이 짧아지게 된다는 것을 알 수 있다.

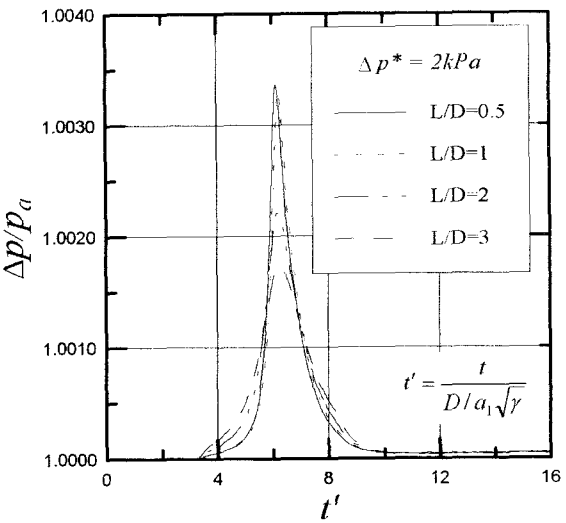

Fig.7 Pressure variation of pulse wave

Fig.8 은 관축 (θ=0°)을 따라서 발생하는 펄스파의 최대압력과 초기 압축파의 L/D의 관계를 나타내었다. 그림에는 참고로 관축상의 r=2D, 4D 그리고 6D인 위치에서 펄스파의 피크 압력을 비교한 것이다. 그림으로부터 L/D 값이 1.0보다 큰 경우 펄스파의 피크 압력은 L/D가 증가할수록 단조롭게

감소한다는 것을 알 수 있다. 그러나 L/D가 매우 작은 값일 경우 즉 초기 압축파가 충격파형과 같은 형태가 되는 경우 펄스파의 피크 압력은 매우 커지게 된다. 또 그림의 결과들은 거리가 두배로 증가하면 펄스파의 피크 압력값은 반으로 줄어든다는 것을 보여준다.

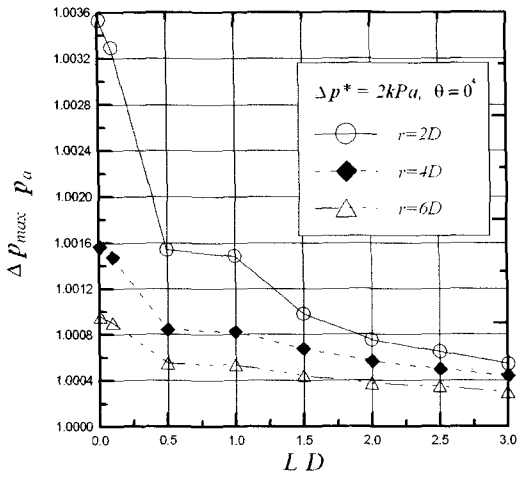

Fig.8 Relationship between $\Delta p_{max}/p_a$ and L/D

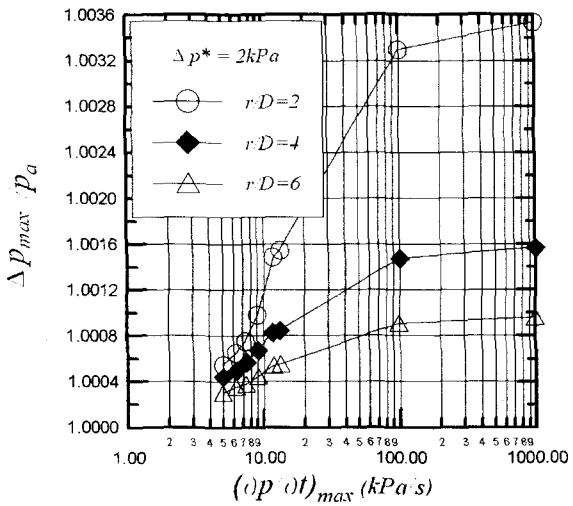

Fig.9 Relationship between $(\partial p/\partial t)_{max}$ and $\Delta p_{max}/p_a$

공력음향 이론에 의하면, 펄스파의 피크 압력 $(\Delta p_{max}/p_a)$은 관 출구면에서 형성되는 압축파면의 압력구배 $(\partial p/\partial t)_{max}$에 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있다. Fig.9에는 초기 압축파의 최대 압력구배 $(\partial p/\partial t)_{max}$와 펄스파의 피크 압력 $(\Delta p_{max}/p_a)$과의 관계를 나타내었다. 그림의 횡축은 대수값으로 주어졌다는 것에 주의를 필요로 한다. 그림으로부터 초기 압축파의 최대 압력구배 $(\partial p/\partial t)_{max}$가 증가할수록 펄스파의 피크 압력은 선형적으로 증가하는 것을 보여준다. 그러나 초기 압축파가 충격파형과 같은 형태로 되는 경우에 펄스파의 피크 압력 예측에 공력음향 이론을 적용할 수 없다는 것에 주의를 요한다.

Fig.10에는 L/D=0.1과 2.0인 두 경우에 대하여, 초기 압축파의 피크 압력 Δp^*이 펄스파의 피크 압력 $\Delta p_{max}/p_a$에 미치는 영향을 나타내었다. 그림으로부터 초기 압축파의 L/D가 작은 경우 펄스파의 피크 압력값은 초기 압축파의 과잉압력의 증가에 비례하여 증가하는 경향을 보이지만, 초기 압축파의 L/D가 큰 경우에는 펄스파의 피크 압력값은 초기 압축파의 과잉압력에 크게 의존하지 않는다는 것을 보여준다. 이 결과는 공력음향 이론과 잘 일치한다.

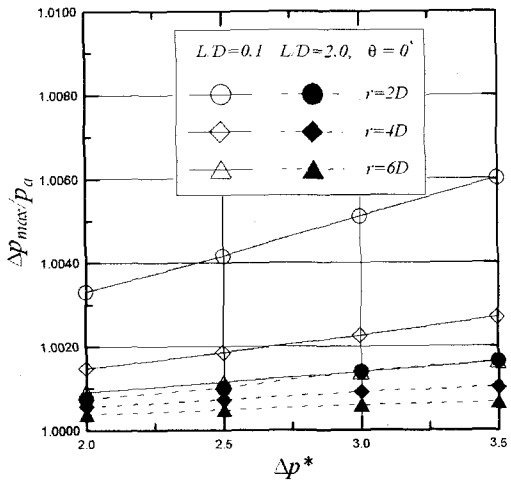

Fig.10 Relationship between $\Delta p_{max}/p_a$ and $\Delta p^*/p_a$

4. 결 론

본 연구에서는 압축파가 무한 배플판이 설치된 관 출구로부터 방출되는 경우에 발생하는 펄스파의 특성에 대해서 Harten-Yee의 TVD 기법을 이용하여 수치해석을 하였다. 얻어진 중요결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 초기 압축파의 파장(L/D)이 작은 경우, 펄스파의 피크 압력값은 초기 압축파의 과잉압력(Δp^*)의 증가에 비례하여 증가하지만, 초기 압축파의 파장이 큰 경우에는 펄스파의 피크 압력값은 초기 압축파의 과잉압력에 크게 의존하지 않는다. 관 출구로부터 거리가 두배로 증가하면 펄스파의 피크 압력값은 반으로 줄어든다는 것을 알 수 있었다.

2) 초기 압축파의 파장이 작을수록 θ에 대한 펄스파의 피크 압력값의 의존성이 커지게 되므로, 펄스파는 반경방향보다는 관축방향으로 강한 지향성을 나타낸다.

3) 동일한 초기 압축파의 과잉압력에 대하여, 초기 압축파의 파장이 증가할수록 펄스파의 원거리장 경계는 증가하게 된다는 것을 알 수 있었다.

후기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

(1) 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 Vibration, Vol.226, No.5, pp. 1011~1028.

(2) Rice, C. G., 1996, "Human Response Effects of Impulse Noise," Journal of Sound and Vibration, Vol.190, No.3, pp. 525~543.

(3) Raghunathan, S., Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1998, "Impulse Noise and Its Control," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 34 (1), pp. 1~44.

(4) Kim, H. D., Setoguchi, T. and Matsuo, S., 2001, "Augmentation of the Magnitude of the Impulsive Wave Discharging from a Tube," Journal of Mechanical Engineering Sciences, IMech, Part C (in press).

(5) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1996, "Experimental Study on Reduction of Impulsive Noise Generating at Exit of High-Speed Railway Tunnel," KSME Journal, Series B, Vol.20, No.7, pp. 2375~2385 (in Korean).

(6) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1997, "Passive Control of Unsteady Compression Wave Using Vertical Bleed Ducts," KSME Journal, Series B, Vol. 21, No.9, pp.1095~1104 (in Korean).

(7) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1999, "Study of the Discharge of Weak Shocks from an Open End of a Duct," JSV, Vol.226(5), pp.1011~1028.

(8) Kentfield, J. A. C., 1993, "Nonsteady, One-Dimensional, Internal, Compressible Flows (Theory and Applications)," Chapter 7, Oxford University Press.

(9) Kashimura, H., Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1999, "Emission of a Propagating Shock Wave from an Open End of a Tube," JSME Journal, Vol.65, No.633, pp. 161~167.

(10) Matsuo, K, Aoki, T., Kashimura, H., and Nonaka, Y., 1992, "Emission of a Propagating Compression Wave from an Open End of a Tube (1st Report, Analytical Study)," JSME, Serise B, Vol. 58, No. 546, pp. 331~337

(11) Kim, H. D., Setoguchi, T. and Matsuo, K., 1997, "Reduction of Impulsive Noise Caused by Unsteady Compression Wave," JSME International Journal, Series B, Vol. 40, No. 2, pp. 223~229.