

관출구로부터 방출되는 펄스파에 미치는 관단면적의 영향

신현동[†] · 이영기^{*} · 김희동^{*}

Effect of Tube Area on the Impulse Wave Discharged from the Exit of Tube

Hyundong SHIN, Youngki LEE and Heuydong KIM

Key Words : Compressible Flow (압축성 유동), Impulsive Noise (충격성 소음), Impulsive Wave (펄스파), Shock Tube (충격파관), Shock Wave (충격파), Unsteady Flow (비정상 유동)

Abstract

When a shock wave arrives at an open end of tube, an impulse wave is discharged from the tube exit and causes serious noise and vibration problems. In the current study, the effect of the cross-sectional area of tube on the impulse wave is numerically investigated using a CFD method. The Harten–Yee's total variation diminishing(TVD) scheme is used to solve the axisymmetric, two-dimensional, unsteady, compressible Euler equations. With three different cross-sectional areas of tube, the Mach number of the incident shock wave M_s is varied between 1.01 and 1.5. The results obtained show that the directivity and magnitude of impulse wave strongly depend upon the Mach number of incident shock wave and are influenced by the tube area. It is also known that the tube cross-sectional area significantly affects the magnitude of impulse wave at or near the tube axis.

1. 서 론

관내를 전파하는 압축파나 충격파가 관출구로부터 방출하는 경우, 펄스형태의 강한 압력파가 발생하게 되는데, 이를 펄스파라고 한다. 이러한 펄스파는 대개 공기의 음속 이상의 속도로 주위로 전파하여, 주변의 생태계나 구조물에 충격적인 외력을 미치게 할 뿐만 아니라, 충격성 소음과 구조물의 진동의 원인이 된다.⁽¹⁾

충격성 소음은 자동차의 배기관, 대포나 총기류, 차량의 공기 브레이크, 각종 플랜트의 배관계, 건설현장의 발파시공을 비롯한 고속철도 / 터널시스템 등과 같이 광범위한 분야에서 발생하며, 환경소음의 주된 요인이 되고 있다.

최근 충격성 소음문제와는 별도로, 펄스파를 공업적으로 유용하게 이용하려는 기술이 중요한 공학적 과제로 부상하고 있다. 예를 들면, 펄스연소를 이용한 분립체 건조기술, 반도체 등의 물체표

면에 부착한 불순물 제거기술, 펄스제트를 이용한 고효율 연소개발, 강화유리의 제작공정, 그리고 펄스제트 필터장치 등과 같이 공업적으로 폭넓게 응용되고 있다.⁽²⁻⁵⁾

펄스파의 전파특성에 관해서는 실험적, 수치해석적으로 많은 연구들이 수행되어 왔다. 최근에는 펄스파의 강도증가를 위한 피동제어, 경사관에 충돌하는 펄스파, 경사출구, 곡관출구 및 급확대/급축소 관으로부터 방출되는 펄스파의 전파특성 등의 연구들이 보고되어 있다.⁽⁶⁻¹¹⁾

종래의 연구⁽⁶⁻¹⁵⁾에 의하면, 관출구에서 발생하는 충격성 소음의 크기는 다음 식(1)과 같이 공력음향이론으로 주어질 수 있다.

$$\Delta p_{\max} \propto \frac{S}{\pi a_0 r} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{\max} \quad (1)$$

여기에서 Δp_{\max} 는 관출구로부터 방출되는 펄스파의 피크압력, S 는 관의 단면적, a_0 는 대기상태의 음속, r 는 관출구로부터 반경방향의 거리, 그리고 $(\partial p / \partial t)_{\max}$ 는 관출구면에서 형성되는 압축파의 파면의 압력에 대한 시간미분의 최대값을 의미한다. 위의 식(1)에 의하면 펄스파의 피크압력은 압축파 파면의 압력구배, 관출구면으로부터 거리 및 관출

[†] 안동대 대학원 기계공학과

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

TEL : (054)820-5622 FAX : (054)823-5495

^{*} 안동대 기계공학과

구의 단면적과 관련된다. 그러나 위의 식은 선형 음향이론의 결과로, 관내를 전파하는 충격파가 관 단으로부터 방출되는 경우에 위의 식(1)을 이용하여, 펄스파의 피크압력을 결정하는 것은 곤란하다.

일반적으로 관내를 전파하는 충격파의 경우 $(\partial p / \partial t)_{\max}$ 가 거의 무한대에 가까운 값을 가지므로, 공력음향이론의 적용은 한계가 있다. 또 위의 식(1)에 의하면 Δp_{\max} 는 관의 단면적에 비례하므로, 관의 단면적이 매우 크거나 작은 경우에는 식(1)의 타당성은 재검토되어야 한다. 실제로 산업현장에서 쓰이는 관의 크기는 매우 다양하며, 관출구로부터 방출되는 펄스파의 전파특성에 대한 예측은 충격성 소음과 같은 환경문제뿐만 아니라, 내연기관의 배기계, 각종 고압플랜트의 배관계 및 도시가스의 blow-off 라인의 설계측면에서 대단히 중요하다.

본 연구에서는 2 차원 수치해석을 통하여, 펄스파의 전파특성에 미치는 관단면적의 영향과 관출구에 설치된 배플판의 영향을 상세하게 조사하였다. 수치계산 결과는 유용한 실험결과⁽¹⁵⁾와 비교하였으며, 펄스파의 특성을 이해하기 위하여 수치해석 결과를 이용하여 유동장을 가시화하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

수치계산은 축대칭 2 차원 비정상 압축성 Euler 방정식에 Harten-Yee 의 TVD 법⁽¹⁶⁾을 적용하였으며, 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + W = 0 \quad (2)$$

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

여기에서 t 는 시간, ρ 는 기체의 밀도, u, v 는 각각 x, y 방향의 속도성분, p 는 압력을 나타낸다. 공기의 단위체적당 전에너지를 e 라고 할 때, 전에너지 e 는 다음과 같이 주어진다.

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

위의 식(2)와 (3)에서 상태량들은 다음과 같이 무차원 상태량으로 다시 쓰여진다.

$$t' = \frac{t}{(H/a_0)\sqrt{\gamma}}, \quad x' = \frac{x}{H}, \quad y' = \frac{y}{H},$$

$$p' = \frac{p}{p_0}, \quad \rho' = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad u' = \frac{u}{a_0/\sqrt{\gamma}}, \quad v' = \frac{v}{a_0/\sqrt{\gamma}}$$

위의 식에서 a 는 음속, 상첨자 (') 는 무차원량, 하첨자 (0) 은 대기상태를 나타낸다.

2.2 계산영역 및 경계조건

Fig.1 에는 수치계산에 적용된 원형 관출구의 형상과 펄스파의 지향성을 조사하기 위한 측정점의 위치를 나타내었다. Fig.1(a)는 관출구에 배플판이 없는 경우, Fig.1(b)는 무한 배플판이 장착되어 있는 경우를 나타내며, 이러한 관출구 형상에 대해서 관단면적을 변화시켜서 수치해석을 수행하였다.

그림에서 D_i 는 관의 직경(하첨자 i 는 관직경의 크기)을 나타내며, 본 연구에서는 관의 직경을 $1D \sim 3D$ 까지 변화시켰다. 즉, D_1 은 관의 직경이 D 인 경우, D_2 는 $2D$, 그리고 D_3 는 $3D$ 를 의미한다. r/D_i 는 관출구로부터 임의 지점까지의 거리 r 을 관직경으로 무차원한 값을 나타내며, θ 는 관의 중심축에 대한 방위각을 의미한다.

Fig.2 에는 계산영역과 경계조건을 나타내었다. 계산영역은 길이가 $2D_i$ 인 관의 내부영역과 외부

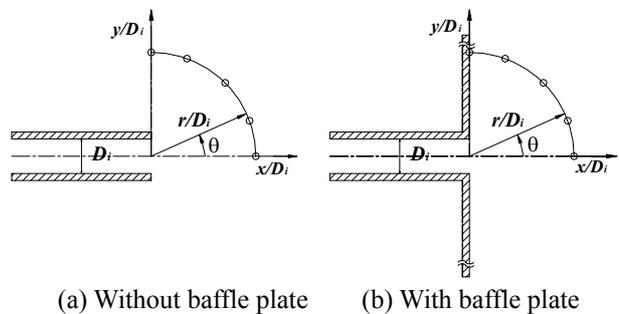


Fig.1 Geometries of the exit of tube

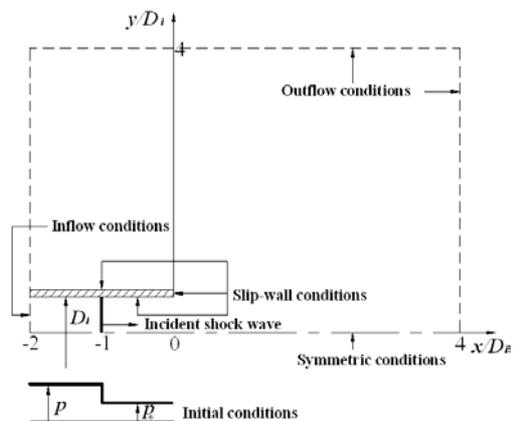


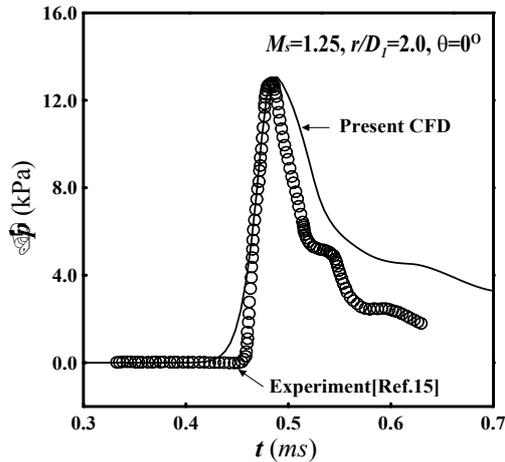
Fig.2 Computational domain and boundary conditions

영역으로 구성되었으며, 중심축을 기준으로 유동장이 상하 대칭이므로, 수치계산은 상반부에 대해서만 수행하였다.

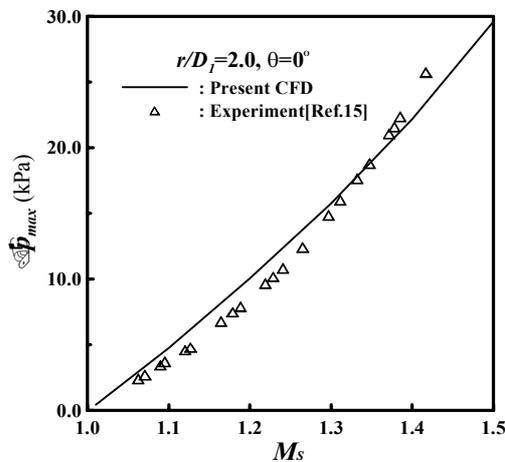
경계조건으로는 관의 입구에 유입조건, 모든 벽면에 대해서 slip-wall 조건, 하류경계에는 유출조건을 적용하였으며, 중심축에 대해서는 축대칭 조건을 적용하였다. 초기조건으로는 마하수 M_s 를 갖는 충격파가 $x/D_i=1.0$ 에서 관출구를 향해 전파하여 대기로 방출하도록 설정하였다. 본 연구에서 초기 충격파의 마하수는 $M_s=1.01\sim 1.5$ 범위에서 변화시켰다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3 에는 본 수치계산 결과와 실험결과⁽¹⁵⁾를 비



(a) Pressure histories of impulse wave ($M_s=1.25$, with baffle plate)



(b) Peak pressure of impulse wave vs M_s (without baffle plate)

Fig.3 Comparison of CFD results with experiment ($r/D_i=2.0, \theta=0^\circ$)

교하였다. Fig.3(a)는 초기 충격파 마하수 $M_s=1.25$ 인 경우, 펄스파의 압력변화를 나타내었다. 여기에서 시간 t 는 충격파가 관출구를 향하여 전파하는 순간부터의 시간을 의미한다. 본 수치계산 결과는 펄스파의 후미부분에서 실험결과와 다소 차이가 발생하지만, 실험의 펄스파형을 잘 예측한다. Fig.3(b)는 M_s 의 변화에 따른 펄스파의 피크압력값을 나타낸 것으로, 계산결과는 실험결과와 대체적으로 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

Fig.4 에는 관직경이 $D_i=D_3$ 인 경우, 시간의 경과에 따른 펄스파의 전파형태를 나타내었다. 왼쪽 그림은 등압력 선도를 나타내며, 오른쪽 그림은 등압력 선도의 압력 조감도를 나타낸다. Fig.4(a)에

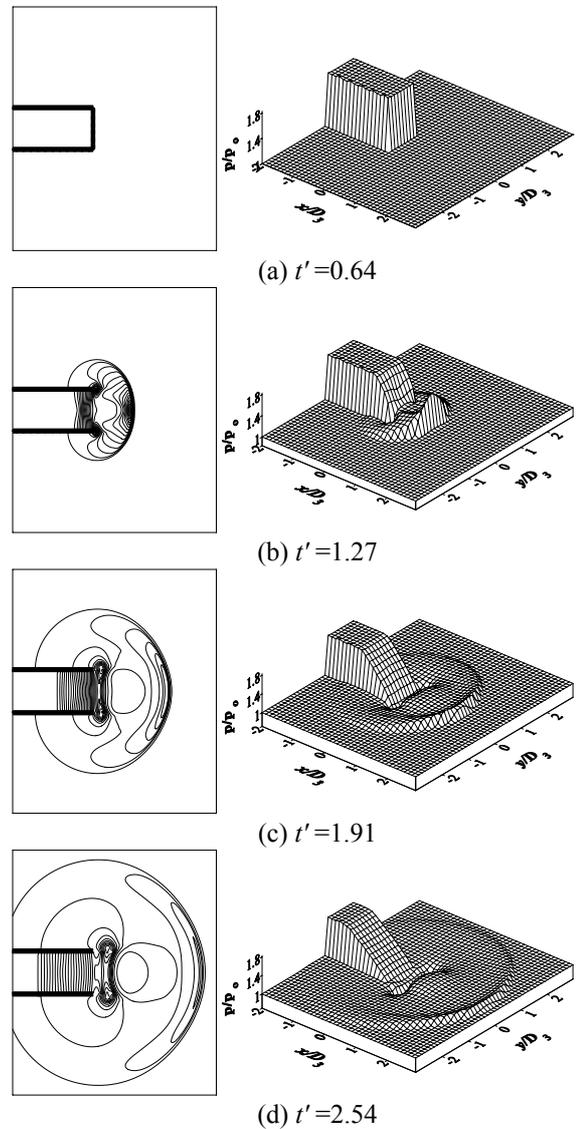


Fig.4 Computed pressure contours ($D_i=D_3, M_s=1.3$, without baffle plate)

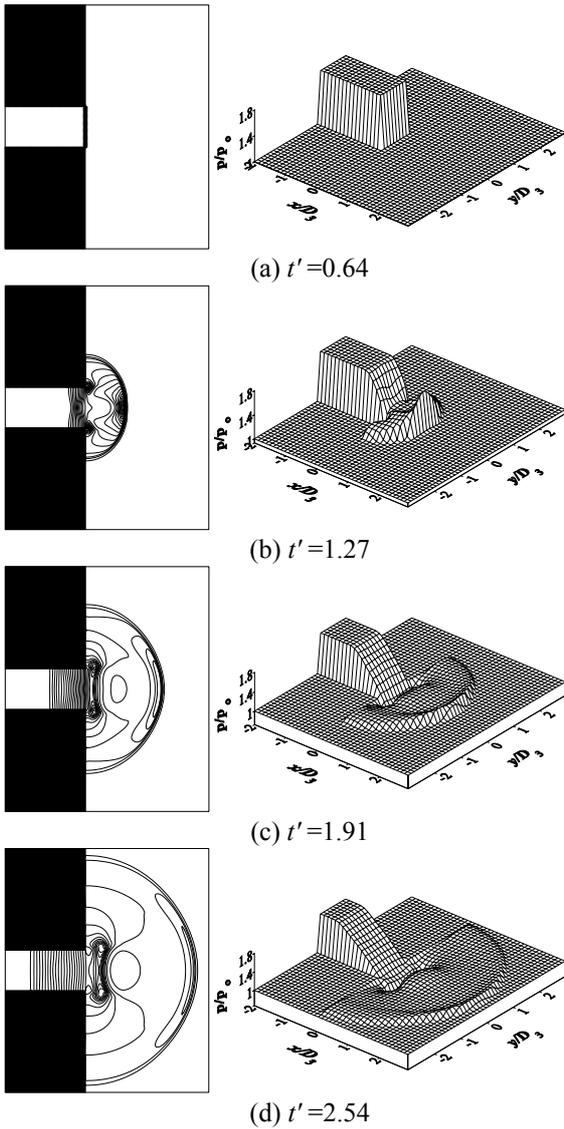


Fig.5 Computed pressure contours ($D_i=D_3$, $M_s=1.3$, with baffle plate)

서 무차원 시간 $t' = 0.64$ 는 관내를 전파하는 충격파가 관출구로부터 방출되기 직전의 상태이다. 그림으로부터 충격파가 관출구로부터 방출할 때, 일부는 펄스파의 형태로 대기중으로 방출되며, 나머지 부분은 반사 팽창파로서 관의 상류를 향해서 전파한다. 이 경우 펄스파 후미의 유동과 정지된 기체사이의 상대속도로 인하여 관출구 부근에는 와류(vortex)가 발생하며, 시간이 경과할수록 와류는 점점 성장한다. 관출구로부터 방출된 펄스파는 시간이 경과할수록 강도가 약해지면서 하류방향으로 전파한다.

Fig.5 는 관출구에 배플판이 있는 경우, 펄스파의 전파형태를 나타낸다. Fig.5(a)는 Fig.4(a)와 동일

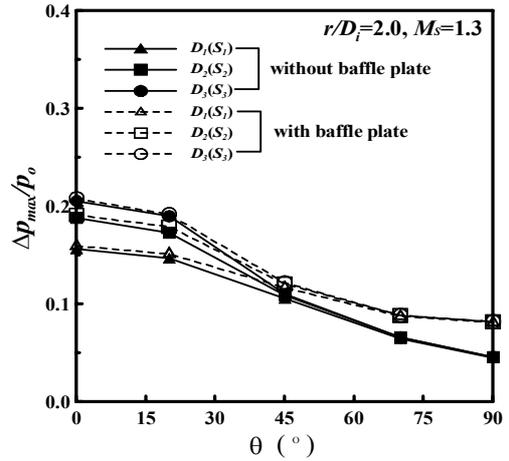


Fig.6 Impulse wave directivity ($r/D_i=2.0$, $M_s=1.3$)

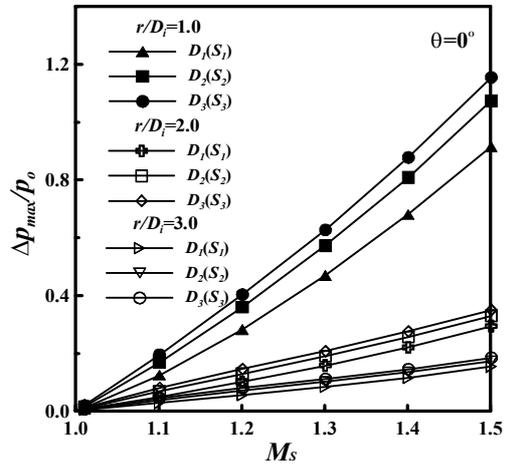


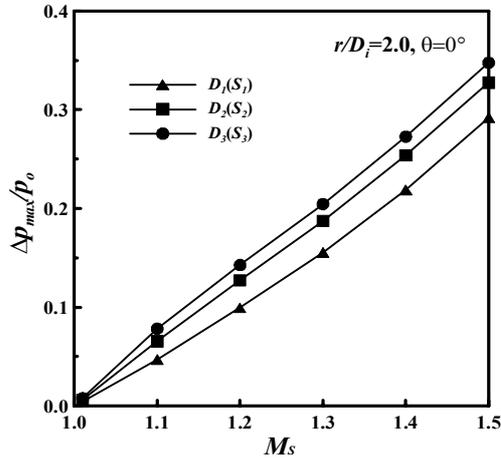
Fig.7 Peak pressure vs M_s ($\theta=0^\circ$, without baffle plate)

하게 관내를 전파하는 충격파가 관출구에서 방출되기 직전의 상태이다. Fig.5(b)~(d)의 결과로부터 관출구에 배플판을 설치하는 경우, 펄스파의 전파에 관한 공간의 제약으로 인해 더 강한 펄스파가 하류방향으로 전파한다.

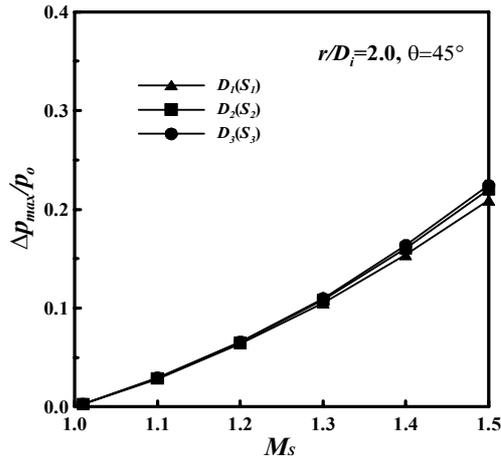
Fig.6 은 $r/D_i=2.0$, $M_s=1.3$ 인 경우, 관단면적의 변화와 배플판이 펄스파의 피크압력에 미치는 영향을 나타낸다. 종축은 펄스파의 피크압력값 Δp_{max} 를 대기압 p_0 로 무차원한 값, 횡축은 방위각을, 또 그림에서 S 는 관단면적을 의미한다. 그림에서 피크압력값은 관의 중심축에서 가장 높으며, 방위각이 증가할수록 피크압력값은 감소한다. 이것은 펄스파가 관의 중심축상에서 강한 지향성을 가진다는 것을 의미한다.

또 관단면적이 증가할수록 펄스파의 피크압력은 증가하지만, $\theta > 45^\circ$ 에 대해서 관단면적의 영향은

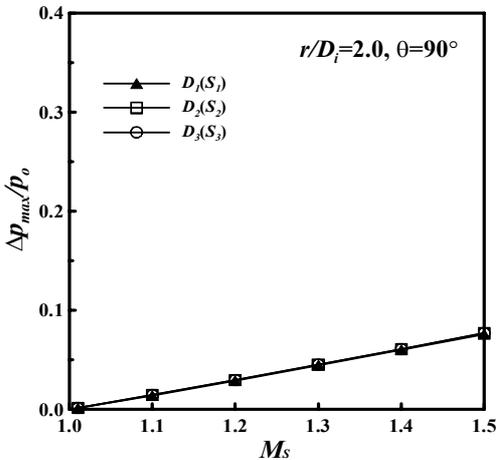
거의 나타나지 않는다. 관출구에 배플판이 설치된 경우, 펄스파의 피크압력은 배플판이 없는 경우에 비해 크며, 이러한 경향은 θ 가 클수록 뚜렷하게 나타난다.



(a) $\theta=0^\circ$



(b) $\theta=45^\circ$



(c) $\theta=90^\circ$

Fig.8 Peak pressure vs M_s
($r/D_i=2.0$, without baffle plate)

Fig.7 에는 $\theta=0^\circ$ 인 경우, 관출구로부터 거리 r/D_i 의 변화가 펄스파의 피크압력에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 $r/D_i=1.0$ 인 경우 펄스파의 피크압력은 관단면적이 커질수록 증가하며, $r/D_i=3.0$ 에서 관단면적이 펄스파의 피크압력에 미치는 영향은 크지 않다. 또 펄스파의 피크압력도 입사충격파의 마하수가 증가할수록 증가하며, 이러한 경향은 r/D_i 가 작은 즉 근거리장에서 뚜렷하게 나타난다.

Fig.8 은 관출구에 배플판이 없는 경우, 펄스파의 지향성을 나타낸다. Fig.8(a)의 $\theta=0^\circ$ 인 경우, M_s 가 증가할수록 그리고 관단면적이 증가할수록 펄스파의 피크압력은 증가한다. $\theta=45^\circ$ 와 $\theta=90^\circ$ 에서 M_s 가 증가할수록 펄스파의 피크압력은 증가하지만, 펄스파의 피크압력에 미치는 관단면적의 영향은 거의 나타나지 않는다. 더욱이 $\theta=45^\circ$ 와 90° 인 경우 M_s 가 작은 경우에 관단면적의 영향도 무시할 수 있을 정도로 작은 것으로 보여진다.

한편 펄스파의 피크압력값 Δp_{max} 에 미치는 관단면적의 영향을 보다 상세하게 조사하기 위하여, 본 수치계산으로부터 얻어진 결과를 음향이론의 결과와 비교하였다. 이를 위하여 관단면적이 각각 S_i 와 S_1 인 두 관으로부터 방출되는 펄스파의 피크압력을 각각 $\Delta p_{max,i}$ 와 $\Delta p_{max,1}$ 이라고 하는 경우 다음의 식이 성립한다.

$$\frac{\Delta p_{max,i}}{\Delta p_{max,1}} = \frac{S_i/\pi a_0 r}{S_1/\pi a_0 r} \cdot \frac{(\partial p/\partial t)_{max,i}}{(\partial p/\partial t)_{max,1}} \quad (4)$$

위의 식(4)에서 $(\partial p/\partial t)_{max,i}/(\partial p/\partial t)_{max,1}=1$ 라고 하면, 즉 동일한 형태의 충격파가 단면적이 다른 관출구로부터 방출된다고 가정한다.

Fig.9 에는 $r/D_i=2.0$, $\theta=0^\circ$ 인 경우, S_i/S_1 와 $\Delta p_{max,i}/\Delta p_{max,1}$ 의 관계를 나타내었다. 위의 식(4)에

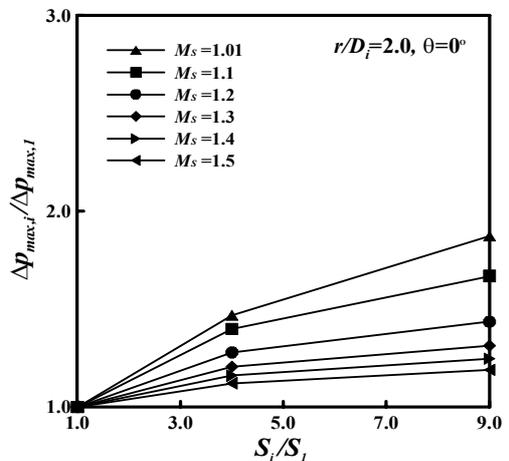


Fig.9 Peak pressure vs S_i/S_1
($r/D_i=2.0$, $\theta=0^\circ$, without baffle plate)

서 공력음향이론에 의한 펄스파의 피크압력은 S_2/S_1 에 선형적으로 비례한다. 그러나 유한의 진폭을 가지는 충격파의 경우 피크압력은 S_2/S_1 가 증가하지만, 공력음향이론과는 상당히 다른 특성을 가진다. 구체적으로 충격파의 마하수 M_s 가 작은 경우 펄스파의 피크압력은 공력음향이론값과 거의 유사하게 나타나지만, M_s 가 증가할수록 그 차이는 크다. 따라서 충격파가 관출구로부터 방출되는 경우에 발생하는 펄스파의 피크압력의 예측을 위해서는 관의 단면적효과를 고려하지 않으면 안된다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Harten-Yee 의 TVD 법을 이용한 2 차원 축대칭 Euler 방정식의 수치해석을 통하여 관출구로부터 방출되는 펄스파에 미치는 관단면적과 배플판의 영향을 조사하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 유용한 실험값과 비교한 결과, 본 수치해석은 실험결과를 잘 예측하였으며, 계산결과의 타당성을 검증할 수 있었다.
2. 펄스파의 피크압력에 미치는 관단면적의 영향은 관의 중심축 부근에서는 강하게 나타나지만, 중심축에서 벗어난 영역에서는 크지 않다.
3. 근거리장에서 펄스파의 피크압력은 관단면적에 크게 영향을 받지만, 원거리장에서는 작다.
4. 펄스파의 피크압력에 미치는 배플판의 영향은 관의 중심축에서 벗어난 영역일수록 크게 나타난다.

후 기

이 논문은 한국과학재단 2003 년도 지역대학 우수과학자 지원사업(과제번호 : R05-2003-000-10003-0)에 의해 지원되었음.

참고문헌

- (1) Rice, C. G., 1996, "Human Response Effects of Impulse Noise," *Jour. of Sound and Vibration*, Vol.190, No.3, pp.525~543.
- (2) 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.
- (3) Zeutizius, M., Terao, K., Setoguchi, T., Matsuo, S.,

- Nakano, T. and Fujita, Y., 1998, "Active Control of Twin-Pulse Combustors," *AIAA Journal*, Vol.36, No.5, pp.823~829.
- (4) Aratani, S., Narayanswami, N., Ojima, H. and Takayama, K., 1995, "Studies of Supersonic Jets and Shock Waves Generated during Glass Tempering Process," *JSME, Series B*, Vol.61, No.590, pp.3706.
- (5) Morris, W. J., 1984, "Cleaning Mechanisms in Pulse Jet Fabric Filters," *Proc. of the Filtration Society*, Filtration and Separation, Vol.21, pp.52~54.
- (6) Lee, D. H., Kim, H. D. and Kang, S. H., 2001, "Passive Control for the Augmentation of a Pulse Wave," *Jour. KSNVE(The Korea Society for Noise and Vibration Engineering)*, Vol.11, No.2, pp.241~248.
- (7) Kim, H. D., Lee, D. H. and Kweon, Y. H. 2001, "Study of the Impulse Wave Impinging upon an Inclined Flat Plate," *KSME(B)*, pp.438~443.
- (8) Kim, H. D., Kweon, Y. H. and Setoguchi, T., 2003, "A Study of the Impulsive Wave Discharged from the Inclined Exit of a Tube," *IMEchE, Part C*, Vol.217, pp.271~279.
- (9) Kim, H. D., Lee, D. H. and Setoguchi, T., 2003, "Study of the Impulse Wave Discharged from the Exit of a Right-Angle Pipe Bend," *Jour. Sound and Vibration*, Vol.259, No.5, pp.1147~1161.
- (10) Lee, D. H., Lee, M. H., Kweon, Y. H., Kim, H. D. and Pack, J. H., 2002, "A Study on the Impulse Wave Discharged from the Exit of the Convergent and Divergent Pipes," *Jour. KSNVE(The Korea Society for Noise and Vibration Engineering)*, Vol.12, No.5, pp.346~354.
- (11) Kashimura, H., Setoguchi, T., Kim, H. D., Kweon, Y. H. and Matsuo, K., 1999, "Emission of a Propagating Shock Wave from an Open End of a Tube (Effects of Diameter of Flange on Magnitude of Impulse Wave)," *JSME(B)*, Vol.65, No.633, pp.1665~1670.
- (12) Raghunathan, S., Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1998, "Impulse Noise and Its Control," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol.34(1), pp.1~44.
- (13) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1996, "Interaction of Unsteady Expansion Wave with the Change of Cross-sectional Area in Tube," *KSME(B)*, Vol.10, No.4, pp.489~497.
- (14) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1996, "Numerical Study on the Interaction between Unsteady Compression and Unsteady Expansion Wave," *KSME(B)*, Vol.21, No.11, pp.1413~1421.
- (15) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1999, "Study of the Discharged of Weak Shocks from an Open End of a Duct," *Jour. Sound and Vibration*, Vol.226, No.5, pp.1011~1028.
- (16) Yee, H. C., 1987, "Upwind and Symmetric Shock Capture Scheme," NASA TM-89464.