

# 비원형 관출구로부터 방출되는 펄스파의 특성에 관한 연구

신현동\* · 권용훈\*\* · 이영기† · 김희동†

## Study on the Characteristics of Impulse Wave Discharged from the Tube Exit with Non-Circular Cross-Section

Hyun-Dong SHIN, Yong-Hun KWEON, Young-Ki LEE and Heuy-Dong KIM

**Key Words :** Compressible Flow(압축성 유동), Unsteady Flow(비정상 유동), Shock Wave(충격파), Shock Tube(충격파관), Impulse Wave(펄스파)

### Abstract

When a shock wave arrives at an open end of tube, an impulse wave is discharged from the tube exit and complicated flow is formed near tube exit. The flow field is influenced by the cross-sectional geometry of tube exit, such as circular, square, rectangular, trapezoid and etc. In the current study, three-dimensional propagation characteristics of impulse wave discharged from the tube exit with non-circular cross section are numerically investigated using a CFD method. Total variation diminishing (TVD) scheme is used to solve the three-dimensional, unsteady, compressible Euler equations. Computations are performed for the Mach numbers of the incident shock wave  $M_s$  below 1.5. The results obtained show that the peak pressure of the impulse wave and propagation directivity depends on the cross-sectional geometry of tube exit and the Mach number of incident shock wave.

### 1. 서 론

관내를 전파하는 충격파가 관출구로부터 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 할 뿐만 아니라, 충격성 소음과 구조물의 진동의 원인이 된다<sup>(1)</sup>.

충격성 소음은 자동차의 배기관, 대포나 총기류, 차량의 공기브레이크, 각종 플랜트의 배관계, 건설현장의 발파시공을 비롯한 고속철도 터널 등과 같이 광범위한 분야에서 발생한다<sup>(2)</sup>. 따라서, 관내에서 발생한 충격파의 전파로 인한 압력변동과 충격

성 소음문제는 배관계 자체 및 배관계와 연결된 각종 기기시스템의 성능예측뿐만 아니라, 환경문제 차원에서 시급히 해결되어야 할 중요한 공학적 과제임에 틀림없다.

충격성 소음저감 대책에 관해서, 종래에는 대포나 총기류<sup>(3)</sup>, 고속철도/터널 시스템<sup>(4)</sup>을 대상으로 많은 연구들이 수행되었으며, 상당한 연구의 진전을 이루어 왔다. 그러나, 각종 고압 플랜트의 배관계, 도시가스의 Blow-off 라인 및 자동차 엔진의 배기계로부터 발생하는 충격성 소음에 대해서는 아직까지 적절한 소음저감 대책이 확립되어 있지 않은 실정이다<sup>(5)</sup>.

펄스파에 관한 종래의 연구들은 단순한 직관 출구를 대상으로 실험적, 해석적으로 많은 연구들이 수행되어 왔다<sup>(6,7)</sup>. 실제로 산업현장에서는 곡관, 분기관, 급확대관 및 급축소관 등과 같은 관로요소 뿐만 아니라, 경사출구와 비원형 단면의 배관계도 많이 사용되고 있다. 그러나, 다양한 단면형상의 관출구로부터 방출되는 펄스파에 관해서는 아직까지 잘 알려져 있지 않다. 최근에, Kim 등<sup>(8,9)</sup>

† 안동대학교 기계공학부

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

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

\* 안동대학교 기계공학과 대학원

\*\* 일본 큐슈대학 총합이공학연구과

은 경사출구 및 곡관 출구로부터 방출되는 펄스파의 특성에 관해서 실험적, 수치해석적 연구를 수행하였다. 다양한 단면형상의 관출구로부터 방출되는 펄스파의 특성을 체계적으로 규명하는 것은 환경소음문제, 고압가스 플랜트의 성능개선 및 안정성 확보측면에서 상당히 중요하다.

본 연구에서는 3 차원 수치해석을 통하여, 다양한 단면형상의 관출구로부터 방출되는 펄스파의 전파특성을 조사하였다. 관출구 단면형상으로는 원형, 정사각형, 직사각형 및 부등변 사각형(사다리꼴)의 경우에 대해서 수치해석을 수행하였으며, 얻어진 결과를 이용하여 유동장을 가시화 하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 3 차원 비정상 압축성 Euler 유동 방정식에 Yee - Roe - Davis 의 TVD 법<sup>(10)</sup>을 적용하여 다양한 단면의 관출구로부터 대기중으로 방출되는 펄스파의 전파특성을 해석하였으며, 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

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

위의 식(1)에서  $t$ 는 시간,  $\rho$ 는 기체의 밀도,  $u, v, w$ 는 각각  $x$  방향,  $y$  방향과  $z$  방향의 속도성분,  $p$ 는 압력을 나타낸다. 공기의 단위체적당 전에너지  $e$ 는  $e=p/(\gamma-1)+1/2\rho(u^2+v^2+w^2)$ 로 주어진다.

식(1)은 다음과 같이 무차원 상태량으로 다시 쓰여진다.

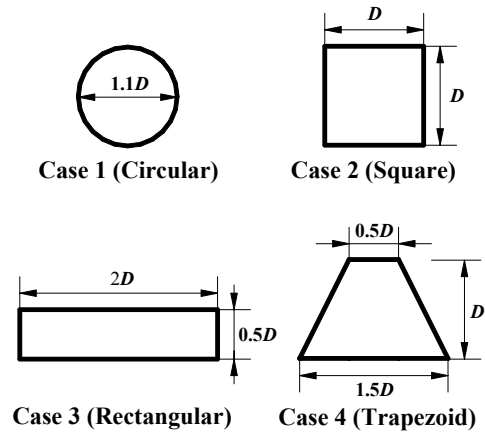
$$t' = \frac{t}{(D/a_s)\sqrt{\gamma}}, \quad x' = \frac{x}{D}, \quad y' = \frac{y}{D}, \quad z' = \frac{z}{D}, \quad p' = \frac{p}{p_a},$$

$$\rho' = \frac{\rho}{\rho_a}, \quad u' = \frac{u}{a_s/\sqrt{\gamma}}, \quad v' = \frac{v}{a_s/\sqrt{\gamma}}, \quad w' = \frac{w}{a_s/\sqrt{\gamma}}$$

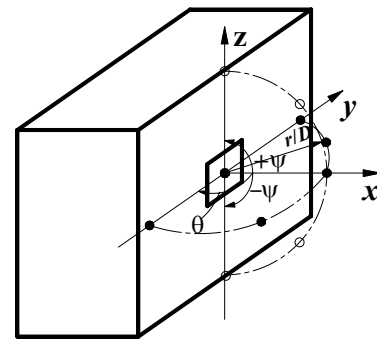
위의 식에서  $a$ 는 음속, 상첨자 ( ' )는 무차원량, 하첨자 ( $a$ )는 대기상태를 나타낸다.

### 2.2 계산영역 및 경계조건

Fig.1 은 본 수치계산에 적용된 4 가지의 관출구 단면형상과 좌표계를 나타낸다. Fig.1(a)에서 Case 1 은 원형 단면, Case 2 는 정사각형 단면, Case 3 은 직사각형 단면, Case 4 는 부등변 사각형



(a) Geometries of the tube exit



(b) Coordinate system

Fig. 1 Geometries of the tube exit with various cross-section and coordinate system

(사다리꼴) 단면의 관출구 형상을 나타낸다. 4 개의 단면은 둘레길이는 다르지만, 단면적은 동일하다.

Fig.1(b)는 좌표계를 나타내며,  $\theta$ 는  $xy$  평면의 방위각,  $\psi$ 는  $zx$  평면의 방위각을 나타낸다. 여기에서, 관 중심축을 기준으로 시계방향의 방위각은 정(+)의 값, 반시계 방향의 방위각은 부(-)의 값으로 설정하였다.  $r/D$ 는 관출구로부터 임의지점까지의 거리를 의미하며, 관출구 단면형상이 다르므로  $D$  값은 수력직경( $D_h$ )을 취하였다.

Fig.2 에는 계산영역과 경계조건을 나타낸다. 계산영역은 관의 내부영역과 외부영역으로 구성되었다. 경계조건으로는 관의 입구에 유입조건, 관의 내·외부벽면에 대해서 slip-wall 조건, 하류경계에는 유출조건을 적용하였다.

초기조건으로는 관 내부에서 마하수  $M_s$  를 갖는 초기 충격파가 관출구를 향해서 전파하여 관출구에 도달할 때, 대기중으로 방출하도록 설정하였다. 본 연구에서 초기 충격파의 마하수는  $M_s=1.01 \sim 1.5$  범위에서 수치계산을 수행하였다.

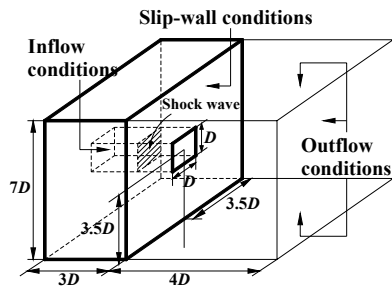
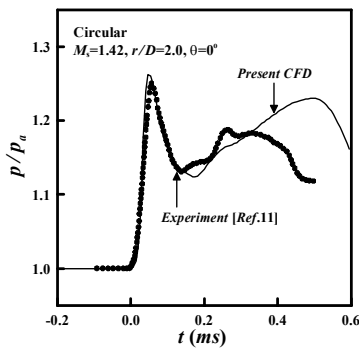


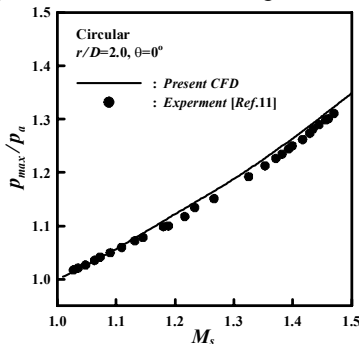
Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

### 3. 결과 및 고찰

Fig.3 은 본 수치해석 결과의 유효성을 검증하기 위하여, 원형단면의 관출구로부터 방출되는 펄스파에 대한 계산결과와 실험결과<sup>(11)</sup>를 비교하였다. Fig.3(a)는  $M_s=1.42$  인 경우, 시간경과에 따른 펄스파의 압력변화를 나타낸 것이다. 펄스파의 후미부분에서 실험결과와 다소 차이가 있으나, 본 수치계산은 실험에서 얻은 펄스파형을 대체적으로 잘 예측한다. Fig.3(b)에는  $M_s$ 에 대한 펄스파의 피크압력값의 변화를 나타낸 것으로, 수치계산 결과와 실험결과가 잘 일치한다. 따라서, 본 수치계산은 비원형 관출구로부터 방출하는 펄스파의 전파특성을 충분히 잘 예측할 것으로 판단된다.



(a) Pressure histories of impulse wave



(b) Peak pressure of impulse wave vs  $M_s$

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

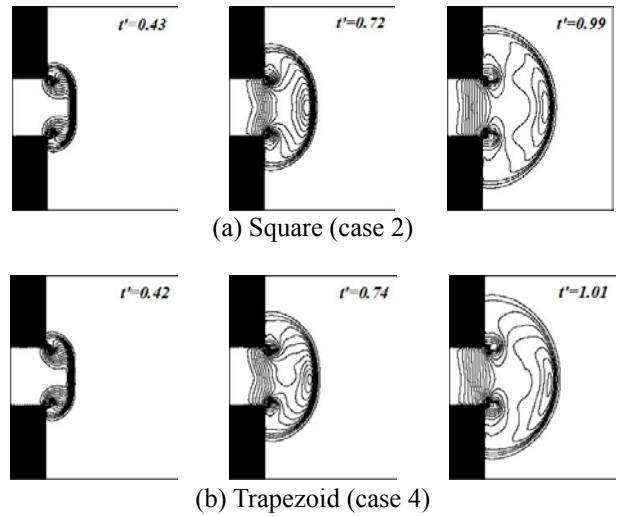


Fig. 4 Pressure contours on  $zx$ -plane ( $M_s=1.3$ )

Fig.4 는  $M_s=1.3$  인 경우, 무차원 시간  $t^*$ 의 경과에 따른 관출구로부터 방출되는 펄스파의 전파형태를  $zx$  평면에 대해서 나타낸 등압력 선도이다. 여기에서, 무차원 시간  $t^*$ 은 관의 내부에서 충격파가 관출구를 향해서 전파하는 순간부터의 시간을 의미한다. Fig.4(a)는 정사각형 단면의 관출구로부터 방출된 펄스파의 전파과정이며, 시간이 경과할수록 초기의 수직 충격파는 상하 대칭인 구형으로 바뀌면서 하류방향으로 전파한다. 또한, 관출구 모서리 부근에서는 와류가 명확히 관찰되며, 시간이 경과할수록 점점 성장한다. Fig.4(b)는 사다리꼴형 단면의 관출구로부터 방출된 펄스파를 나타낸다. 시간이 경과할수록, 펄스파는 단면형상의 비대칭으로 인해서 아랫 방향으로 편향된다.

Fig.5 에는 원형단면 관출구의 경우,  $M_s=1.3$ 의 초기 충격파가 관출구로부터 방출될 때 시간의 경과에 따른  $yz$  평면상에서의 압력분포를 나타내었다. 왼쪽 그림은 등압력 선도를 나타내며, 오른쪽 그림은 등압력 선도를 바탕으로 만들어진 조감도이다. Fig.5(a)는 관내를 전파하는 충격파가 관출구에 도달하는 순간을 나타내며, 압력상승은 관출구면 전체에 대해서 일정하게 나타난다. Fig.5(b)는 관출구 모서리에서 발생한 팽창파가 전파하여 관 중심축 방향에 영향을 끼치게 되므로, 압력은 낮아지게 되고 뾰족한 형태로 변한다. Fig.5(c)와 (d)에서 명확하게 나타나 있는 움푹 들어간 부분은 관출구의 모서리에서 발생한 와류가 성장하는 부분이다. 시간이 경과할수록 펄스파는 하류방향으로 전파하며, 펄스파의 강도는 점점 약화된다. 하류방향으로 전파하는 펄스파의 형태는 대칭적이며, 구형의 형태를 나타낸다.

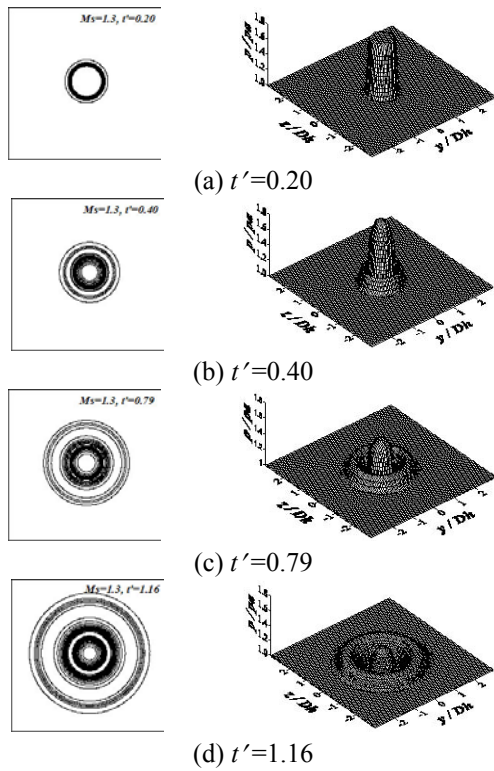


Fig. 5 Computed pressure contours on  $yz$ -plane (Circular,  $M_s=1.3$ )

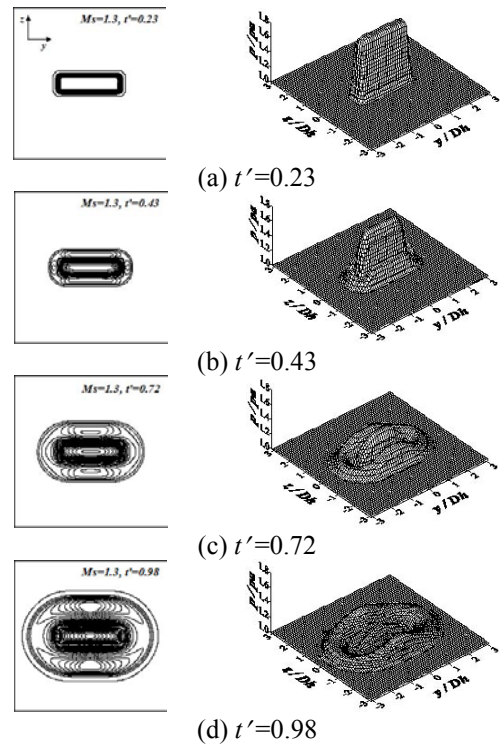


Fig. 7 Computed pressure contours on  $yz$ -plane (Rectangular,  $M_s=1.3$ )

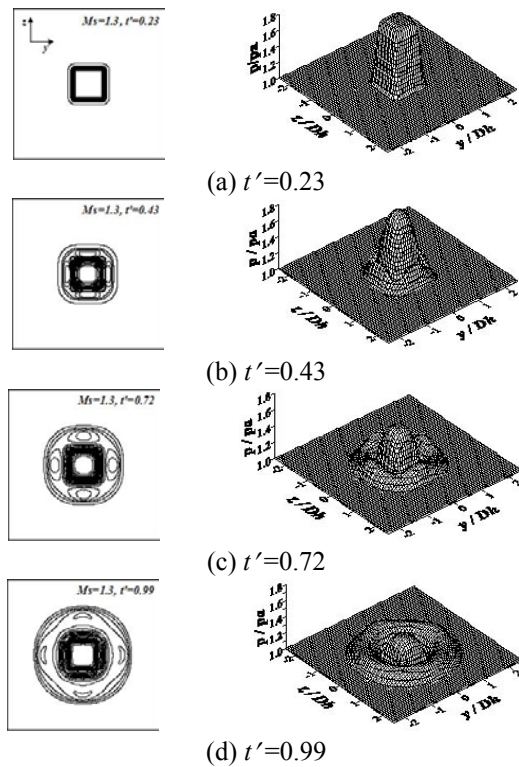


Fig. 6 Computed pressure contours on  $yz$ -plane (Square,  $M_s=1.3$ )

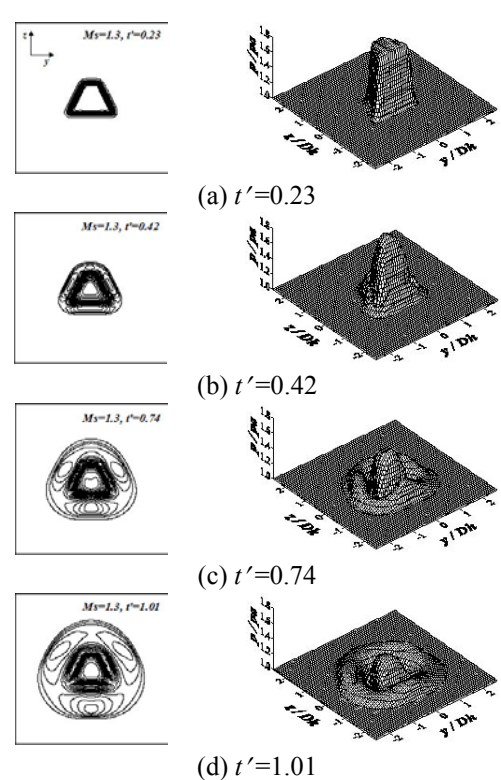


Fig. 8 Computed pressure contours on  $yz$ -plane (Trapezoid,  $M_s=1.3$ )

Fig.6 은 정사각형 단면 관출구로부터 방출된 펄스파의 전파형태를 나타낸다. Fig.6(a)의  $t=0.23$  일 때, 정사각형의 평면 충격파는 관출구로부터 방출하기 시작한다. 모서리가 둥근 외부의 사각형 루프(loop)는 펄스파면을 나타내며, 내부의 사각형 루프는 관출구의 모서리와 면에서 발생하는 와류를 나타낸다. Fig.5(c)와 Fig.6(c)에서 관찰할 수 있듯이, 원형관 출구에서는 관출구면 전체에 걸쳐서 일정한 팽창과가 발생하지만, 정사각형 출구에서는 출구면의 모서리에서 상대적으로 강한 팽창과가 발생한다. 시간이 경과함에 따라 초기 정사각형 형태의 펄스파는 점점 구형으로 변하면서 하류 방향으로 전파한다.

Fig.7 과 8 은 각각 직사각형, 사다리꼴형 단면 관출구로부터 방출된 펄스파의 전파형태를 나타낸다. 펄스파는 원형관 및 정사각형 단면의 관출구로부터 방출된 펄스파에 비해, 비대칭적으로 하류 방향으로 전파한다. Fig.7(c), (d)와 Fig.8(c), (d)에 나타나 있듯이, 펄스파의 강도는 전파하는 방향에 따라서 다르게 나타나지만, 시간이 경과할수록 점점 구형으로 바뀌면서 거의 동일한 강도를 갖게 된다.

Fig.9 는  $M_s=1.3$  인 경우, 관출구의 단면형상이 펄스파의 지향성에 미치는 영향을 나타낸다. 횡축에는 방위각  $\theta$ (xy 평면)와  $\psi$ (zx 평면), 종축에는 대기압으로 무차원한 펄스파의 피크압력값  $p_{max}/p_a$ 를 나타낸다. Fig.9(a)의 원형 관출구인 경우, 주어진  $r/D_h$ 에 대해서 펄스파의 피크압력은 관 중심축( $\theta=\psi=0^\circ$ )에서 가장 크며, 방위각이 커질수록 피크압력은 감소한다.  $r/D_h$ 가 증가할수록, 모든 방향에 대한 펄스파의 피크압력은 감소하며, 관 중심축에 대한 펄스파의 지향성도 상대적으로 감소한다. Fig.9(b)의 정사각형 관출구의 경우, 펄스파의 지향 특성은 원형 관출구의 경우와 유사하게 나타나지만,  $r/D_h=1.0$ 에서 펄스파의 강도는 정사각형 관출구의 경우가 원형관에 비해 크다.

Fig.9(c)는 직사각형 관출구의 경우, 펄스파의 지향성은 원형관 및 정사각형 관출구에 비해서 복잡하다.  $r/D_h=1.0$ 인 경우, xy 평면의 펄스파의 강도가 zx 평면보다 강하게 나타난다. 이것은 관출구의 단면형상에 의한 것으로, 출구단면의 횡축길이가 상대적으로 긴 xy 평면의 펄스파는 여전히 수직충격파 형태를 유지한다. 그러나, 상대적으로 출구단면의 종축길이가 짧은 zx 평면에서는 관출구면에서 발생한 팽창과의 영향을 받게 되므로, zx 평면에서 펄스파의 강도는 xy 평면에 비해 약화된다.  $r/D_h=2.0$ 과  $3.0$ 에서는 zx 평면의 펄스파의 강도는 xy 평면에 비해 강하게 나타난다.

Fig.9(d)는 사다리꼴형 관 출구로부터 방출되는

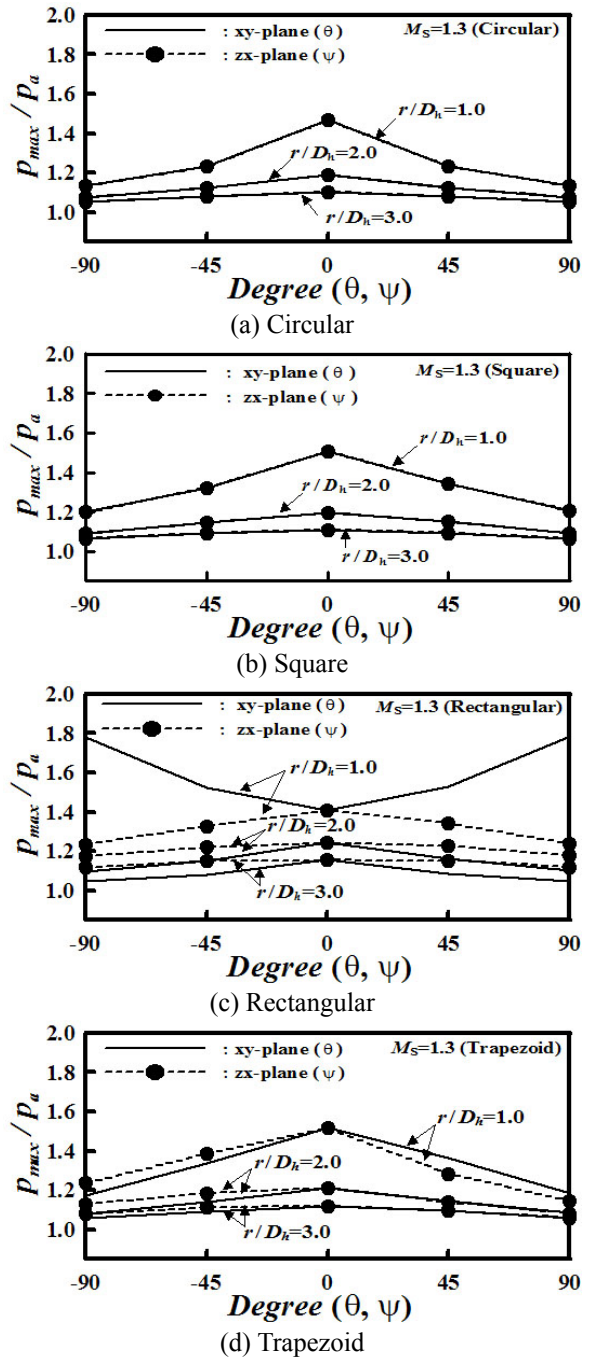


Fig. 9 Impulse wave directivity ( $M_s=1.3$ )

펄스파의 지향성을 나타낸다. xy 평면에서 펄스파의 지향성은 관 중심축을 기준으로 대칭적으로 나타나지만, zx 평면에서는 비대칭적인 지향성이 나타난다. (+)의 방위각에 대해서는 xy 평면의 펄스파 강도가 zx 평면에 비해서 크지만, (-)값의 방위각에서는 반대로 zx 평면의 펄스파의 강도가 xy 평면보다 크다.  $r/D_h$ 가 증가할수록, 이러한 펄스파의 비대칭성은 점점 약화된다.

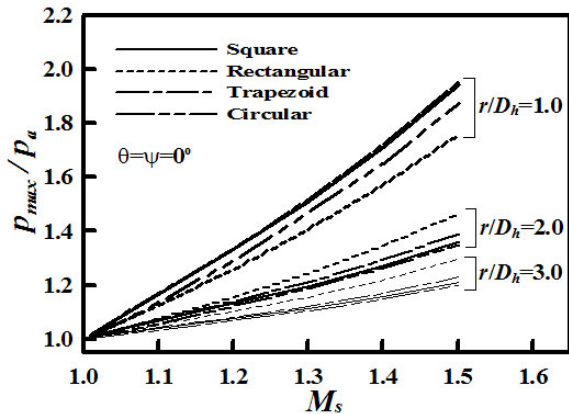


Fig. 10 Peak pressure variations vs  $M_s$  ( $\theta=\psi=0^\circ$ )

Fig.10 은 초기 충격파와 마하수  $M_s$  의 변화가 펄스파의 피크압력에 미치는 영향을 나타낸다.  $r/D_h=1.0$  일 때, 정사각형과 부등변 사각형의 관출구로부터 방출되는 펄스파의 피크압력값이 가장 크며, 직사각형 관출구의 경우가 가장 작다.  $r/D_h=2.0, 3.0$  인 경우, 직사각형 관출구로부터 방출되는 펄스파의 피크압력값이 가장 크며, 다른 3 가지의 출구단면 형상에서는 거의 비슷한 피크압력값을 갖는다. 모든 관출구 단면형상에 대해서,  $M_s$  가 증가할수록 펄스파의 피크압력값은 증가한다. 관출구로부터 멀어질수록, 펄스파의 피크압력값은 감소한다.

4. 결 론

본 연구에서는 관출구의 단면형상이 펄스파의 전파특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Yee - Roe - Davis 의 TVD 법을 이용하여 3 차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서는 원형, 정사각형, 직사각형, 그리고 부등변 사각형(사다리꼴)의 4 가지의 출구 단면형상을 적용하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 원형 관출구의 실험값과 비교한 결과, 본 수치 해석은 실험결과를 잘 예측하였으며, 계산결과와 타당성을 검증할 수 있었다.
2. 비원형 관출구로부터 방출된 펄스파는 초기에는 비대칭적으로 대기중으로 전파하지만, 시간이 경과할수록 구형으로 바뀌면서 하류방향으로 전파한다.
3. 관출구로부터 근거리장의 경우, 펄스파의 지향성은 관출구 단면형상에 크게 영향을 받지만, 원거리장에서 관출구 단면형상의 영향은 약화된다.
4. 본 연구에서 적용된 4 가지 관출구 단면형상 중, 근거리장에서 관 중심축을 따르는 펄스파의 피크압력은 정사각형과 사다리꼴형의 경우가 가장 크

며, 원거리장에서는 직사각형의 경우가 가장 크게 나타났다.

5. 적용된 4 가지의 모든 관출구 단면형상에 대해서, 펄스파의 피크압력은 초기 충격파 마하수가 증가할수록 증가하며, 관출구로부터 거리가 멀어질수록 작아진다.

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. Sound and Vibration, Vol.190, No.3, pp.525~543.
- (2) Sekine, N., Matsumura, S., Aoki, K. and Takayama, K., 1989, "Generation and Propagation of Shock Waves in the Exhaust Pipe of a Four Cycle Automobile Engine," 17<sup>th</sup> ISSW, pp.671~676.
- (3) Klingenberg, G. and Heimerl, J. M., 1992, "Gun Muzzle Blast and Flash," Progress Astronautics and Aeronautics, AIAA Educational Series.
- (4) Raghunathan, R. S., Kim, H. D. and Setoguchi, T., 2002, "Aerodynamics of High-Speed Railway Train," Progress in Aerospace Sciences, 38, pp.469~514.
- (5) Floyd, J. K., 1978, "Control of Steam Venting Noise in Power Plants," Jour. Engineering for Power, Vol.100, pp.369~373.
- (6) 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.
- (7) Jiang, Z., Onodera, K., and Takayama, K., 1999, "Evolution of Shock Waves and the Primary Vortex Loop Discharged from a Square Cross-Sectional Tube," Shock Waves, Vol.9, pp.1~10.
- (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) Yee, H. C., 1987, "Upwind and Symmetric Shock Capturing Scheme," NASA TM-89464.
- (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 Impulsive Wave)," JSME, Series B, Vol.65, No.633, pp.1665~1670 (in Japanese).