

# 평판에 충돌하는 펄스파에 미치는 관출구 부분폐쇄의 영향

신현동<sup>†</sup> · 이영기<sup>\*</sup> · 김희동<sup>\*</sup> · 瀬戸口俊明<sup>\*\*</sup>

## The Effect of Partial Closure of the Duct Exit on the Impulsive Wave Impinging upon a Flat Plate

Hyun-Dong Shin, Young-Ki Lee, Heuy-Dong Kim and Toshiaki Setoguchi

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

### Abstract

When a shock wave arrives at a duct, an impulsive wave is discharged from the duct exit and causes serious noise and vibration problems. In the current study, the characteristics of the impulsive wave discharged from a partial closed duct exit is numerically investigated using a CFD method. The Yee-Roe-Davis's total variation diminishing(TVD) scheme is used to solve the axisymmetric, unsteady, compressible Euler equations. With several partial closed duct exits, the Mach number of the incident shock wave  $M_s$  and the distance  $L/D$  between the duct exit and a flat plate are varied in the range of  $M_s = 1.01 \sim 1.50$  and  $L/D = 1.0 \sim 4.0$ , respectively. The results obtained show that the magnitude of the impulsive wave impinging upon the flat plate strongly depends upon  $M_s$ ,  $L/D$  and the partial closure of duct exit. The impulsive wave on the flat plate can be considerably alleviated by the partial closure of duct exit and, thus, the present method can be a passive control for the impulsive wave.

### 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.<sup>(1)</sup>

일반적으로 충격성 소음은 지속시간이 짧은 반면, 순간 피크압력이 매우 높기 때문에 산업현장에서 작업자가 충격성 소음에 노출되면 청력장애를 불러 일으킬 뿐만 아니라 심한 경우 주변 구조물의 진동과파까지도 야기할 수 있다. 이러한 충격성 소음은 자동차의 배기관<sup>(2)</sup>, 대포나 총기류<sup>(3)</sup>,

각종 플랜트의 배관계<sup>(4)</sup>, 건설현장의 발파시공을 비롯한 고속철도/터널시스템<sup>(5)</sup> 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 물체표면에 부착한 불순물 제거기술<sup>(6)</sup>, 펄스제트를 이용한 고효율 연소개발<sup>(7)</sup>, 강화유리의 제작공정<sup>(8)</sup>, 그리고 펄스제트 필터장치<sup>(9)</sup> 등과 같이 공업적으로 폭넓게 응용되고 있다. 이와 같이, 종래에 펄스파에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다.

한편, 펄스파를 공업적으로 응용한 산업기기를 개발하기 위해서는 펄스파가 구조물에 충돌하여 반사될 때까지의 파동특성과 충돌면상에서 발생하는 유동장에 대한 상세한 정보가 대단히 중요하다.<sup>(10)</sup> 이러한 관출구로부터 방출하여 충돌면에 부딪히는 펄스파를 피동제어하기 위하여 관출구를 부분폐쇄시키는 방법이 있다. 이 방법은 관 내부의 급격한 압력변동을 야기하므로 관의 피로파괴

\* 안동대학교 기계공학부

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

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

\*\* 사가대학교 기계공학과, 일본

† 안동대학교 기계공학과 대학원

를 발생시킬 위험이 있으나, 관출구로부터 방출하여 평판에 충돌하는 펄스파의 강도를 제어할 수 있는 장점이 있다. 실제로 연소기관의 배기관으로부터 방출되는 소음 저감을 위한 장치개발, 반도체 제조, 충격파에 의한 표면소재 등에 적용할 수 있다.

본 연구에서는 축대칭 수치해석을 통하여, 부분폐쇄된 관출구로부터 방출하여 평판에 충돌하는 펄스파에 대하여 조사하였다. 단, 수치계산은 평판에 충돌하는 펄스파에 미치는 관출구 부분폐쇄의 영향을 조사하기 위한 것으로서 평판에 반사되어 상류로 전파될 때까지의 유동장에 대해 수행하였다. 수치계산 결과는 유용한 실험결과와 비교하였으며, 펄스파의 특성을 이해하기 위하여 수치해석 결과를 이용하여 유동장을 가시화하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 지배방정식

본 수치계산은 축대칭 비정상 압축성 Euler 방정식에 Yee-Roe-Davis의 TVD 법<sup>(11)</sup>을 적용하였으며, 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

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

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

여기에서  $t$ 는 시간,  $\rho$ 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.

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

위의 식(1)와 (2)에서 상태량들은 다음과 같이 무차원 상태량으로 다시 쓰여진다.

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

$$p' = \frac{p}{p_0}, \quad r' = \frac{r}{r_0}, \quad u' = \frac{u}{a_0/\sqrt{g}}, \quad v' = \frac{v}{a_0/\sqrt{g}}$$

위의 식에서  $a$ 는 음속, 상첨자 ( ' )는 무차원량,

하첨자 (0)은 대기상태를 나타낸다.

### 2.2 계산영역 및 경계조건

Fig.1 에는 수치계산에 적용된 수직평판을 가진 관출구의 부분폐쇄된 형상을 나타내었다. 그림에서  $D$ 와  $D_p$ 는 각각 관의 직경과 부분폐쇄된 관출구의 직경을 나타낸다. 본 연구에서는 무차원 직경  $D_p/D = 0.25 \sim 1.00$  범위의 4가지 관출구 형상에 대하여 관출구와 평판간의 무차원거리  $L/D = 1.0 \sim 4.0$ 으로 변화시켜 수치계산을 수행하였다.

Fig.2 에는 계산영역과 경계조건을 나타내었다. 계산영역은 길이가  $5D$ 인 부분폐쇄된 관의 내부영역과 축방향으로 관출구와 평판간의 거리가 변하는 외부영역으로 구성되어 있다. 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  $x/D = -1.0$ 에서 관출구를 향해 전파하여 대기로 방출하도록 설정하였다. 본 연구에서 초기 충격파의 마하수는  $M_s = 1.01 \sim 1.50$  범위에서 변화시켰다.

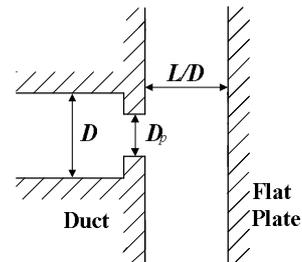


Fig.1 Geometries of partial closed duct exit

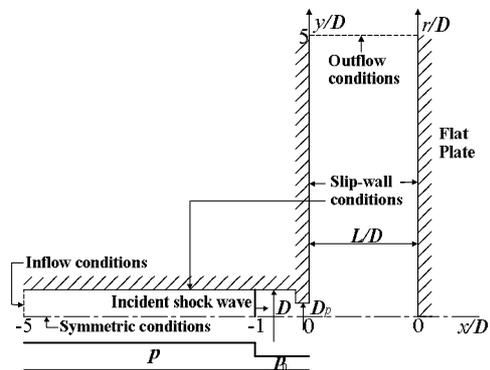


Fig.2 Computational domain and boundary conditions

3. 결과 및 고찰

Fig.3 에는  $D_p/D = 1.00$ ,  $M_s = 1.07$ ,  $L/D = 1.0$  인 경우, 본 수치계산결과와 실험결과를 비교하였다. Fig.3(a)는 실험<sup>(12)</sup>으로부터 얻은 슐리렌사진이며, Fig.3(b)는 본 수치계산으로부터 얻은 슐리렌이미지이다. 여기에서  $t'$ 는 충격파가 관출구를 향하여 전파하는 순간부터의 무차원 시간을 의미한다.  $t'=1.00$  일 때 관출구로부터 방출하여 하류로 전파하는 펄스파와  $t' = 1.71$  일 때 평판에 반사되어 상

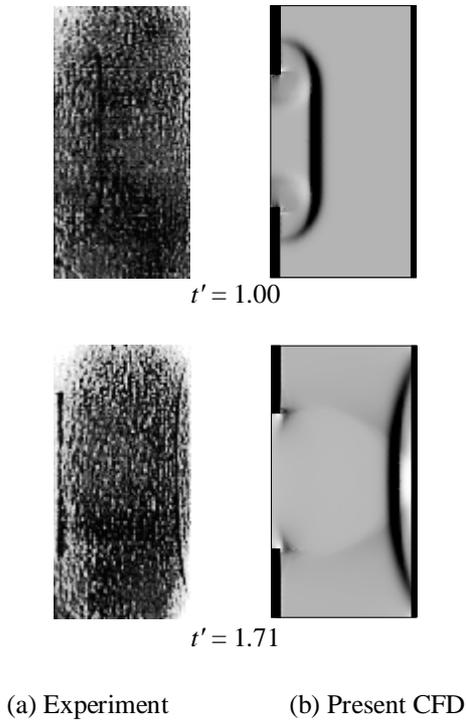


Fig.3 Comparison of CFD results with experimental results ( $D_p/D = 1.00$ ,  $M_s = 1.07$ ,  $L/D = 1.0$ )

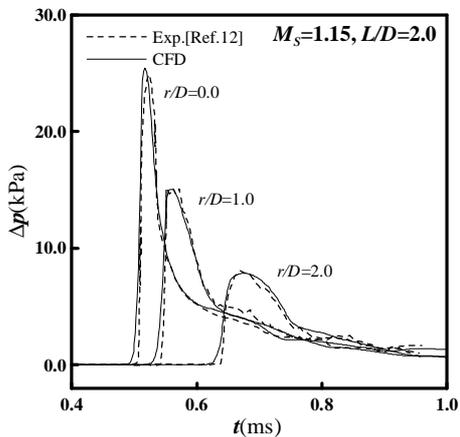


Fig.4 Pressure histories of impulsive waves ( $D_p/D = 1.00$ ,  $M_s = 1.15$ ,  $L/D = 2.0$ )

류로 다시 전파하는 반사펄스파의 실험결과와 수치계산결과가 잘 일치한다.

Fig.4 는  $D_p/D = 1.00$ ,  $M_s = 1.15$ ,  $L/D = 2.0$  인 경우, 시간의 경과에 따른 펄스파의 압력변화를 나타내었다. 본 수치계산결과는 평판의  $r/D = 0.0$ ,  $1.0$ ,  $2.0$  인 세지점에서 측정된 펄스파의 파형들<sup>(12)</sup>을 잘 예측하고 있다.

Fig.3 과 Fig.4 의 결과들로부터, 본 수치계산기법을 이용하여 부분폐쇄된 관출구로부터 방출하여 평판에 충돌되는 펄스파의 전파특성을 잘 파악하리라 기대된다.

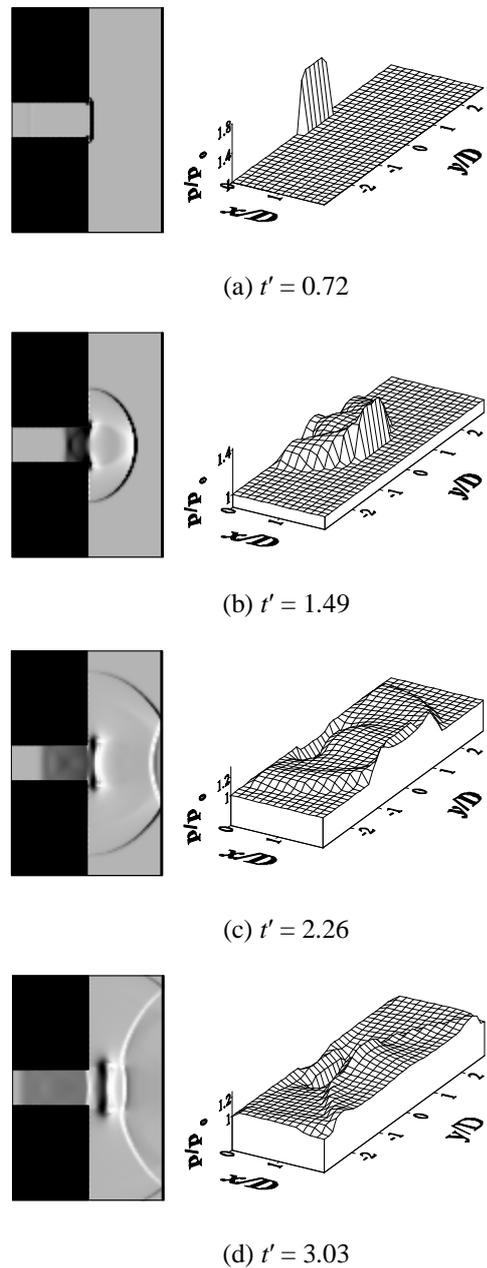
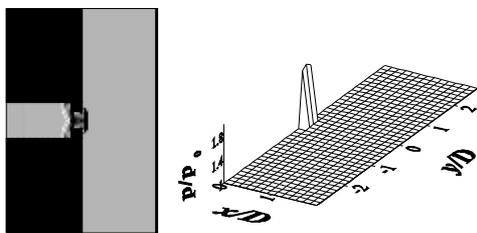
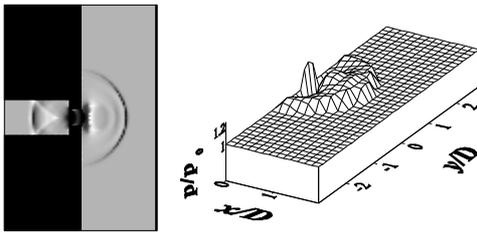


Fig.5 Computed Schlieren images and iso-pressure contours ( $D_p/D = 1.00$ ,  $M_s = 1.3$ ,  $L/D = 2.0$ )

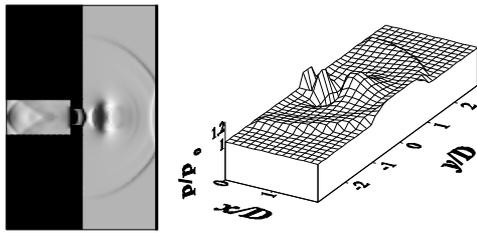
Fig.5는  $M_s = 1.3, L/D = 2.0$  인 경우,  $D_p/D = 1.00$  인 관출구로부터 방출하여 평판에 충돌하는 펄스파의 전파형태를 나타낸다. 왼쪽 그림은 슈리렌 이미지를 나타내며, 오른쪽 그림은 등압력 선도를 바탕으로 만들어진 압력 조감도를 나타낸다. 압력 조감도에서 펄스파의 전파형태를 자세히 나타내기 위하여 관출구에서 하류평판까지의 영역을 나타내었다.  $t' = 0.72$  일 때, 관내를 전파하는 충격파는 관출구로부터 방출한다.  $t' = 1.49$  일 때, 관출구로부터 방출된 충격파의 일부는 펄스파로서 반구형 형태로 대기중으로 전파하며, 나머지는 반사평창파



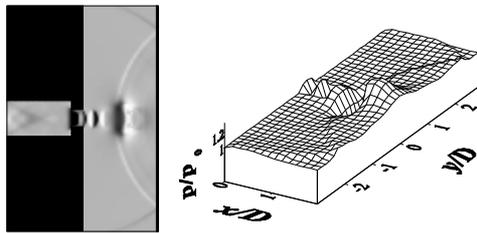
(a)  $t' = 0.72$



(b)  $t' = 1.49$



(c)  $t' = 2.26$



(d)  $t' = 3.03$

Fig.6 Computed Schlieren images and iso-pressure contours ( $D_p/D = 0.50, M_s = 1.3, L/D = 2.0$ )

로서 관의 상류로 전파한다. 이 경우 펄스파 후미의 유동과 정지된 기체사이의 상대속도로 인하여 관출구 부근에는 와류가 발생하며, 시간이 경과할수록 와류는 점점 성장한다. Fig.5(c)에서는 관출구로부터 방출된 펄스파가 하류에 위치한 평판의 중심부에서 먼저 반사되어 상류로 다시 전파함을 볼 수 있다. Fig.5(d)에서 상류로 전파하는 반사펄스파는 관출구에서 방출된 유동과 간섭하여 복잡한 유동장을 형성한다.

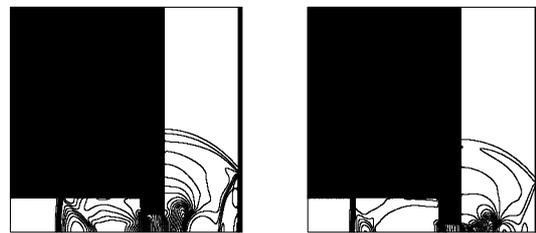
Fig.6에는  $M_s = 1.3, L/D = 2.0$  인 경우,  $D_p/D = 0.50$  인 부분폐쇄된 관출구로부터 방출되는 펄스파의 전파형태를 나타내었다.  $t' = 0.72$  일 때, 관내를 전파하는 충격파의 일부는 관출구로부터 방출되며, 나머지는 부분폐쇄된 관출구 내부벽면에 반사된다. Fig.5(b)에서 반사평창파가 관의 상류로 전파하는 것과는 달리 Fig.6(b)에서는 부분폐쇄된 관출구 내부벽면에 반사된 충격파가 관의 상류로 전파한다. Fig.6(c)~(d)에서는 부분폐쇄된 관출구로부터 방출된 펄스파는 평판에 반사되어 상류로 전파하며, 출구면으로부터 하류로 발달하는 와류와 상호간섭한다. 또한 관출구의 부분폐쇄로 인한 관 내·외부의 큰 압력차는 관출구로부터 제트유동을 발생시킨다.

Fig.7은  $M_s = 1.3, L/D = 1.0, t' = 1.54$  인 경우,  $D_p/D$  변화에 따른 등압력 선도를 나타내었다. 여기에서 등압력 선도는 관의 중심축을 기준으로 상반부에 대해서만 나타내었다. Fig.7(a)의 관내부의 등압력



(a)  $D_p/D = 1.00$

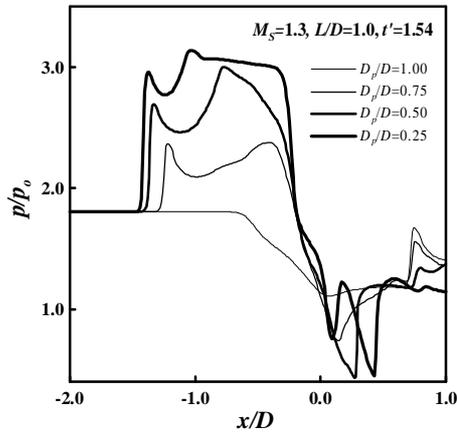
(b)  $D_p/D = 0.75$



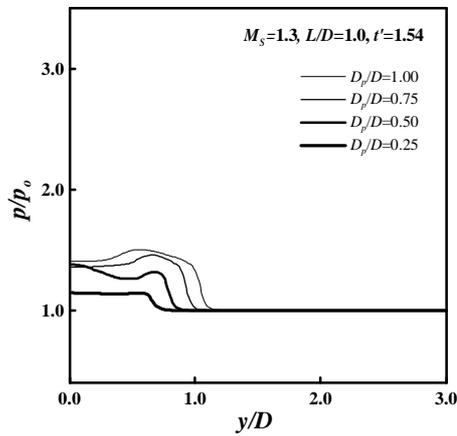
(c)  $D_p/D = 0.50$

(d)  $D_p/D = 0.25$

Fig.7 Iso-pressure contours ( $M_s = 1.3, L/D = 1.0, t' = 1.54$ )



(a) Pressure distributions along the duct axis

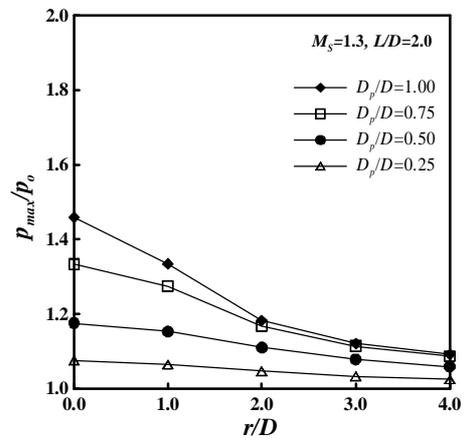


(b) Pressure distributions on the flat plate

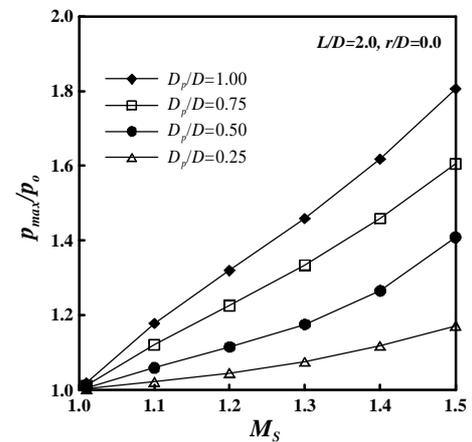
**Fig.8** Pressure distributions ( $M_s = 1.3, L/D = 1.0, t' = 1.54$ )

선은 반사팽창파를 나타내며, Fig.(b)~(d)의 등압력 선은 관출구의 부분폐쇄된 내부벽면에 반사되어 관 상류로 전파하는 충격파를 나타낸다. 관출구의 부분폐쇄가 커질수록, 즉 관출구단면적이 작아질수록 평판에서 반사하는 펄스파의 강도가 저감됨을 관찰할 수 있다.

Fig.8 에는  $M_s = 1.3, L/D = 1.0, t' = 1.54$  인 경우, 압력분포를 나타내었다. 먼저 Fig.8(a)의 관의 중심축을 따르는 압력분포를 살펴보면, 관출구의 부분폐쇄가 커질수록 관의 내부압력은 증가하는 반면, 관출구로부터 방출되어 하류 평판에 반사되어 상류로 전파하는 펄스파의 강도는 약화됨을 알 수 있다. 또 관출구부분에서는 관출구 부분폐쇄가 커질수록 급격한 압력변동을 야기한다. 한편, Fig.8(b)의 평판을 따르는 압력분포에서는 부분폐쇄가 클수록 평판에 충돌하는 펄스파의 영역은 작게 나타난다. 또  $D_p/D = 0.75$  이상인 경우는 평판 중심점의



**Fig.9** Peak pressures on the flat plate ( $M_s = 1.3, L/D = 2.0$ )



**Fig.10** Peak pressures vs  $M_s$  ( $L/D = 2.0, r/D = 0$ )

압력보다 벗어난 지점인 펄스파가 반사하는 지점에서 압력이 더 높은 반면,  $D_p/D = 0.50$  인 경우에는 중심부의 압력이 벗어난 지점압력보다 더 크게 나타난다.

Fig.9 는  $M_s = 1.3, L/D = 2.0$  인 경우, 평판에 충돌하는 펄스파의 피크압력을 나타낸다. 그림에서 펄스파의 피크압력  $p_{max}$  는 대기압  $p_0$  으로 무차원화하였다. 동일한  $r/D$  에서  $D_p/D = 1.00$  인 경우 피크압력이 가장 크며,  $D_p/D$  가 작아질수록 피크압력은 감소한다.  $D_p/D$  의 변화가 펄스파의 피크압력에 미치는 영향은 평판의 중심부에서 가장 크며, 중심부에서 멀어질수록 감소한다. 또한  $D_p/D = 1.00$  과  $D_p/D = 0.75$  인 경우, 펄스파의 피크압력이  $r/D = 2.0$  이상인 지점에서는 거의 동일하다.

Fig.10 은  $L/D = 2.0, r/D = 0.0$  인 경우, 입사충격파 마하수 변화에 따른 평판에 충돌하는 펄스파의 피크압력을 나타내었다. 모든  $D_p/D$  값에 대해 입사충격파 마하수가 증가할수록 펄스파의 피크압력은

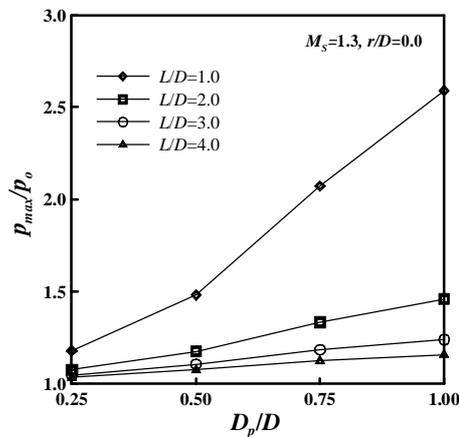


Fig.11 Peak pressures vs  $D_p/D$  ( $M_s = 1.3, r/D = 0.0$ )

증가하며, 관출구 부분폐쇄가 커질수록 평판에 충돌하는 펄스파의 피크압력이 감소함을 알 수 있다.

Fig.11 에는  $M_s = 1.3, r/D = 0.0$  인 경우, 관출구의 부분폐쇄가 평판에 충돌하는 펄스파의 피크압력에 미치는 영향을 나타내었다. 본 수치계산에 적용된 모든  $L/D$  값에 대해  $D_p/D$  가 작아질수록 펄스파의 피크압력은 감소한다. 관출구의 부분폐쇄가 평판에 충돌하는 펄스파의 피크압력에 미치는 영향이  $L/D = 1.0$  인 경우 뚜렷이 나타나며,  $L/D$  가 클수록 작아진다. 또한  $D_p/D = 1.00$  인 경우 평판에 충돌하는 펄스파의 피크압력은  $L/D$  의 영향이 큰 반면, 관출구 단면적이 작은  $D_p/D = 0.25$  에서는  $L/D$  영향이 작게 나타난다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Yee-Roe-Davis 의 TVD 법을 이용한 축대칭 Euler 방정식의 수치해석을 통하여 부분폐쇄된 관출구로부터 방출하여 평판에 반사되는 펄스파에 대하여 조사하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 수치해석결과는 실험결과를 잘 예측하였으며, 계산결과의 타당성을 검증할 수 있었다.
2. 관출구의 부분폐쇄가 평판에 충돌하는 펄스파의 피크압력에 미치는 영향은 관출구와 평판간의 거리가 짧은 경우 크게 나타나지만, 클수록 작아진다.
3. 관출구의 부분폐쇄가 클수록 평판에 충돌하는 펄스파의 피크압력은 감소한다.
4.  $D_p/D$  의 변화가 평판에 충돌하는 펄스파의 피크압력에 미치는 영향은 평판의 중심부에서 가장 크며, 중심축에서 멀어질수록 감소한다.

5. 입사충격과 마하수가 증가할수록 평판의 반사하는 펄스파의 피크압력은 증가한다.

#### 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) N. Sekine, S. Matsumura, K. Aoki and K. Takayama, 1989, "Generation and Propagation of Shock Waves in the Exhaust Pipe of a Four Cycle Automobile Engine," *17<sup>th</sup> International Symposium on Shock Wave and Shock Tubes*, pp.671~676.
- (3) G. Klingenberg and J. M. Heinerl, 1992, "Gun Muzzle Blast and Flash," *Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA Educational Series*.
- (4) Floyd, J. K., 1978, "Control of Steam Venting Noise in Power Plants," *Jour. Engineering for Power*, Vol.100, pp.369~373.
- (5) K. Mastuo and T. Aoki, 1992, "Wave Problems in High-Speed Railway Tunnel," *18<sup>th</sup> International Symposium on Shock Wave and Shock Tubes*.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Morris, W. J., 1984, "Cleaning Mechanisms in Pulse Jet Fabric Filters," *Proc. of the Filtration Society, Filtration and Separation*, Vol.21, pp.52~54.
- (10) D. H., Lee, H. D., Kim and S. H. Kang, 2000, "The Impingement of a Weak Shock Wave Discharged from a Tube Exit upon a Flat Plate," *Jour. KSNVE*, Vol.10, No.6, pp.1035~1040.
- (11) Yee, H. C., 1987, "Upwind and Symmetric Shock Capture Scheme," *NASA TM-89464*.
- (12) Setoguchi, T., Kim, H.-D., Kasimura, H., 2002, "Study of the Impingement of Impulse Wave upon a Flat Plate," *Jour. Sound and Vibration*, Vol.256(2), 197~211.