

경사판에 충돌하는 펄스파에 관한 연구

권용훈*, 이동훈**, 김희동*

Study of the Impulse Wave Impinging upon an Inclined Flat Plate

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

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

Abstract

Plate impingement of the impulse wave discharged from the open end of a duct is numerically investigated using a CFD method. Harten-Yee Total Variation Diminishing method is used to solve the unsteady, compressible flow governing equations. The Mach number, the flat plate inclination and the distance between the duct exit and inclined flat plate are changed to investigate their effects on the impinging flow field. The impulse wave impingement on the inclined flat plate depends on Mach number M , and the plate inclination ψ . The pressure distributions on the inclined flat plate show that for a small r/D , the peak pressure at the center of an inclined flat plate decreases with an increase in the plate inclination ψ in the range of ψ from 45° to 60° but for a large r/D , the peak pressure decreases with an increase in ψ in the range of ψ from 75° to 90° . It is also found that for all of r/D , the peak pressure at the center of an inclined flat plate has a maximum value in $\psi=90^\circ$.

1. 서 론

관내를 전파하는 압축파나 충격파가 관의 출구로부터 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)

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

일반적으로 충격성 소음은 비록 지속시간이 짧더라도 순간 피크압력이 매우 높기 때문에 산업현

장에서 작업자가 충격성 소음에 노출되면 청력장애를 불러 일으킬 뿐만 아니라 심한 경우 주변 구조물의 진동과피까지도 야기할 수 있다. 따라서 충격성 소음에 대한 적절한 대응책이 요구되고 있는 실정이다.⁽³⁾ 특히 고속열차가 터널내로 진입하는 경우, 터널내에 발생하는 충격성 소음의 저감에 관한 연구는 상당한 진전을 이루어 왔으며 최근까지도 활발히 진행되고 있다.⁽⁴⁻⁷⁾

이와 같은 펄스파와 관련된 충격성 소음문제와는 별도로 최근에는 펄스파를 공업적으로 유용하게 이용하려는 기술이 중요한 공학적 과제로 부상하고 있다. 즉 펄스연소⁽⁸⁾를 이용한 분립체 건조기술, 반도체 등의 물체표면에 부착한 불순물 제거 기술⁽⁹⁾, 펄스제트를 이용한 고효율 연소개발⁽¹⁰⁾, 강화유리의 제작공정⁽¹¹⁾ 그리고 펄스제트 필터장치⁽¹²⁾ 등과 같이 공업적으로 폭넓게 응용되고 있다. 실제 공학적 응용에서는 펄스파가 물체표면에 충돌하여 반사하게 되므로 이때의 파동특성과 충돌면상에서 발생하는 유동장에 대한 상세한 정보가 대단히 중요하다.

* 안동대학교 기계공학부

** 서울산업대학교 기계공학부

종래의 연구에서는 관의 외부에서 형성되는 펄스파는 관출구에서 발생하는 압축파나 충격파의 특성에 의하여 결정되며, 펄스파는 거리에 따라 그 강도가 절반으로 감소한다는 것이 잘 알려져 있다.^(13,14) 또 펄스파가 구조물과 간섭을 일으키는 경우의 반사나 회절, 수직평판과의 충돌⁽¹⁵⁾ 등에 관한 연구가 행해졌으나, 이는 극히 제한된 조건에 대한 연구내용만이 제시되었다. 그리고 펄스파가 경사진 평판에 충돌할 때 발생하는 유동장에 대해서는 충분히 알려져 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 TVD Scheme 을 이용한 Euler 방정식의 수치해석을 통하여 대기중으로 방출되는 펄스파가 경사진 평판에 충돌하여 반사될 때의 전파형태와 유동특성을 조사하였다. 수치해석에는 관내의 충격파의 강도와 경사면 각도에 따른 유동장 변화와 펄스파의 유동특성을 조사하기 위하여 초기 충격파의 강도 M_s , 충돌판의 경사면 각도 ψ , 관출구와 충돌판의 거리 r/D 를 단계적으로 변화시켜 수치계산을 수행하였다.

2. 수치계산 방법

본 연구에서는 2 차원 비정상 압축성 Euler 유동 방정식에 Harten-Yee 의 TVD 법을 적용하여 펄스파가 경사평판에 충돌할 때 발생하는 유동특성을 해석하였으며, 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

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

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

위의 수식 (1)에서 t 는 시간, ρ 는 기체의 밀도, u 와 v 는 각각 축방향과 반경방향의 속도성분, γ 는 공기의 비열비, p 는 압력을 나타낸다. 공기의 단위 체적당 전에너지를 e 라 할 때, 전에너지 e 는 다음과 같이 주어진다.

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

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

$$x' = \frac{x}{D}, \quad y' = \frac{y}{D}, \quad u' = \frac{u}{a_1 / \sqrt{\gamma}}, \quad v' = \frac{v}{a_1 / \sqrt{\gamma}},$$

$$t' = \frac{t}{\sqrt{\gamma} D / a_1}, \quad p' = \frac{p}{P_1}, \quad \rho' = \frac{\rho}{\rho_1}, \quad e' = \frac{e}{P_1} \quad (3)$$

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

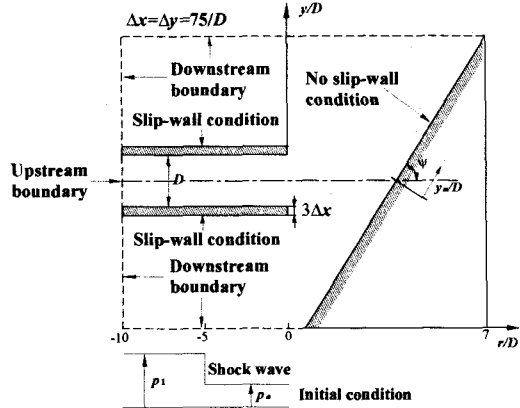


Fig.1 Computational flow field and boundary conditions

Fig. 1 은 본 수치계산에 적용된 계산영역을 나타내고 있으며, 그림중에는 본 계산에서 사용된 경계조건과 초기조건도 함께 나타내고 있다. 계산 영역은 관 내부영역과 경사판을 포함하는 관 외부영역으로 구성되었다. 수치계산은 그림에 나타난 계산영역에 대하여 $\Delta x = \Delta y = 75/D$ 크기인 정렬격자 500,000 개를 생성하여 수치계산을 수행하였다. 본 연구에서는 마하수와 경사판의 경사각을 각각 $M_s = 1.1 \sim 1.5$, $\psi = 45^\circ \sim 90^\circ$, 관출구로부터 경사판의 중심까지의 거리 $r/D = 2.0 \sim 4.0$ 범위에서 단계적으로 변화시키면서 수치계산을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2 에는 펄스파가 경사평판에 충돌하는 경우 수치계산으로부터 얻어진 쉘리렌 이미지 사진을 나타내었다. 충돌판의 경사각도 $\psi = 45^\circ$, 관출구와 충돌판 중심과의 거리 $r/D = 2.0$, 그리고 무차원 시간 $t' = 3.04$ 인 경우에 대하여 마하수 M_s 를 1.1 에서 1.5 까지 변화시켰다. 여기에서 무차원 시간 t' 은 관 내부에서 충격파가 관출구를 향해 전파하는 순간부터의 시간을 의미한다. $M_s = 1.1$ 인 경우, 펄스파는 하류방향으로 전파하여 경사평판에 충돌하면 평판 중심을 기준으로 비대칭적인 유동형태를 나타낸다. 경사평판에서 반사된 펄스파는 다시 상류방향으로 전파하며, 그 일부는 관출구에서 발생한 Vortex 와 간섭을 일으키며 관출구 부근에서 복잡한 유동을 발생시킨다. 이러한 경향은 모든 M_s 대해서 유사하게 나타나며, M_s 가 증가할수록

Vortex 와 펄스파의 간섭은 더 강하게 나타난다는 것을 알 수 있다.

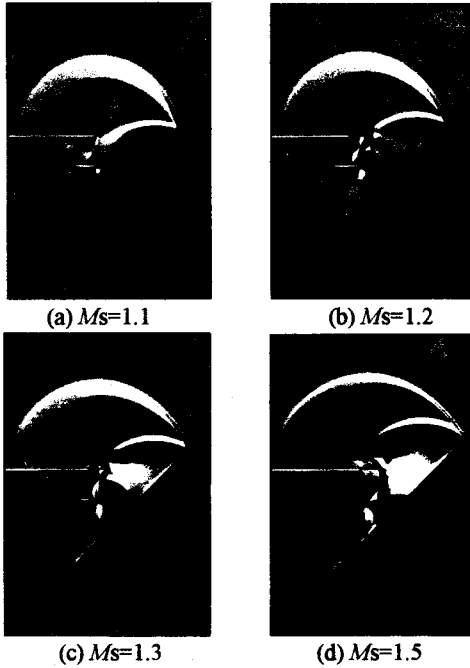


Fig.2 Computed Schlieren images ($r/D=2.0$, $\psi=45^\circ$, $t^*=3.04$)

Fig. 3 에는 $Ms=1.3$ 이고 $r/D=2.0$ 인 경우, 무차원 시간 $t^*=3.04$ 일 때 충돌판의 경사각도에 따른 유동장 변화를 나타내었다. 모든 경사각도 ψ 에 대해서 관측구로부터 방출된 펄스파가 하류로 전파하여 경사진 평판에 충돌한 후 다시 상류로 전파하며, 그 일부는 Vortex 와 간섭을 일으키는 경향을 나타낸다. 그러나 $\psi=45^\circ, 60^\circ$ 및 75° 인 경우에는 평판 중심을 기준으로 비대칭적으로 유동장이 형성되지만, $\psi=90^\circ$ 인 경우는 대칭적인 유동형태가 나타난다.

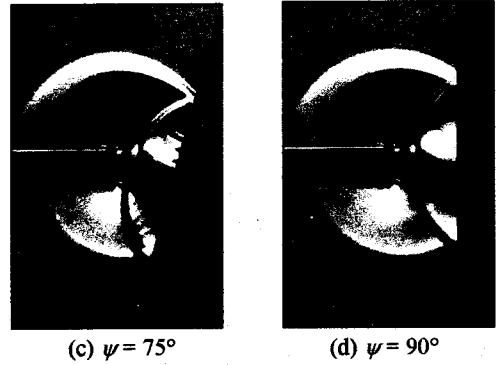
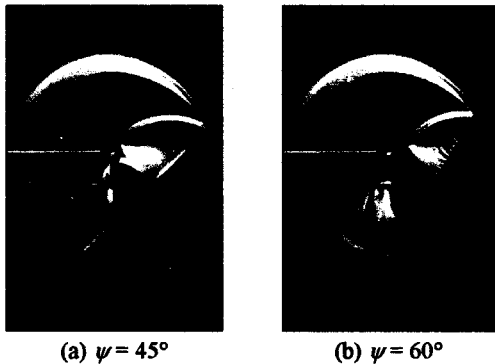


Fig.3 Computed Schlieren images ($Ms=1.3$, $r/D=2.0$, $t^*=3.04$)

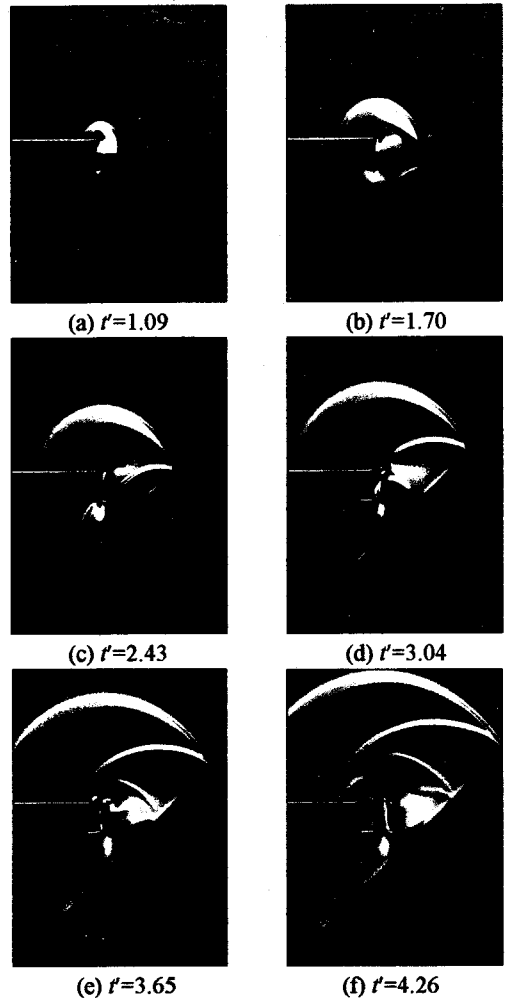


Fig.4 Computed Schlieren images ($Ms=1.3$, $r/D=2.0$, $\psi=45^\circ$)

Fig. 4 는 $Ms=1.3$, $r/D=2.0$ 그리고 $\psi=45^\circ$ 인 경우, 무차원 시간 t^* 의 경과에 따른 펄스파의 전파과정

및 경사 평판과의 충돌을 나타낸다. $t'=1.09$ 일 때 펄스파는 하류방향으로 전파하여 $t'=1.70$ 일 때 경사 평판과 충돌하기 시작한다. $t'=3.04$ 에서는 경사 평면에서 반사된 펄스파가 상류로 전파하면서 관 출구에서 생성된 Vortex 와 간섭하며, 시간이 경과함에 따라 그 영역이 넓어진다.

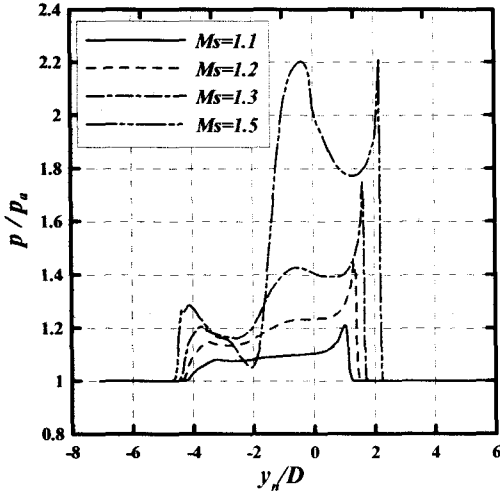


Fig. 5 Static pressure distribution on the inclined flat plate ($r/D=2.0$, $\psi=45^\circ$, $t'=3.04$)

Fig. 5 는 $r/D=2.0$, $\psi=45^\circ$, $t'=3.04$ 인 경우, M_s 의 변화에 따른 경사 평판을 따르는 정압분포를 나타낸다. 횡축은 경사 충돌판상의 거리 y_n 를 판 직경 D 로 무차원하여 나타내었으며, 종축은 평판상의 정압을 대기압 p_a 로 무차원하여 나타내었다. $y_n/D=0$ 은 경사 평판의 중심을 의미한다. 모든 M_s 에 대하여 최대 압력값은 충돌판의 중심에 있지 않고 중심에서 벗어난 위치에서 발생한다. $-y_n$ 방향에서는 반복되는 팽창파와 충격파로 인해 압력이 크게 변동하지만, $+y_n$ 방향에서는 펄스파로 인하여 압력은 날카로운 피크값을 갖는다. M_s 가 증가함에 따라 경사 평판상의 최대 압력값은 증가하며, 최대 압력값이 나타나는 지점은 평판 중심에서 점점 멀어진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6 에는 $M_s=1.3$, $r/D=2.0$, $t'=3.04$ 인 경우, 충돌판의 경사각도 ψ 의 변화에 따른 경사 평판을 따르는 정압분포를 나타내었다. 모든 ψ 에 대해서 Fig. 5 에서와 마찬가지로 $-y_n$ 방향에서는 반복되는 팽창파와 충격파로 인해 압력이 크게 변동하지만, $+y_n$ 방향에서는 펄스파로 인하여 압력은 날카로운 피크값을 갖는다. 그럼으로부터 $\psi=90^\circ$ 인 수직 충돌판을 제외한 경사 평판에 대해서는 ψ 값이 작을수록 최대 압력값이 크다. 충돌판상의 최대 압력값은 ψ 값이 커질수록 감소하며, 최대 압력값의 위

치는 평판 중심에서 점점 벗어나게 된다.

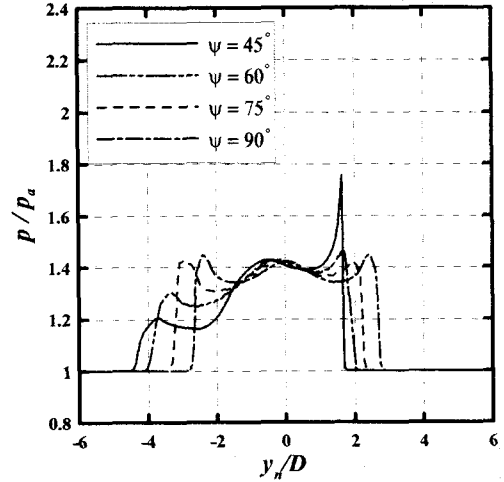


Fig. 6 Static pressure distribution on the inclined flat plate ($M_s=1.3$, $r/D=2.0$, $t'=3.04$)

Fig. 7 에는 마하수 M_s , 충돌판 경사각도 ψ , 무차원 시간 t' 의 변화에 따른 경사 평판에 발생하는 모멘트의 변화를 나타내었다. 횡축은 M_s 를 나타내며, 종축은 충돌판에 발생하는 모멘트 M_o 를 나타내며, 평판 중심을 기준으로 반시계 방향의 모멘트를 정(+)의 값으로 취하였다. 모든 무차원 시간 t' 에 있어서 $\psi=45^\circ$ 인 경우의 모멘트가 가장 크며, $\psi=90^\circ$ 인 경우가 가장 작다. 특히 $\psi=90^\circ$ 인 경우는 모멘트의 값이 거의 0 에 가까우며, 이것은 펄스파가 경사 평판에 충돌하면 평판 중심을 기준으로 대칭적인 유동장을 형성하기 때문이다. 주어진 ψ 값에 대하여 M_s 이 증가할수록 경사 평판상에 발생하는 모멘트는 증가한다.

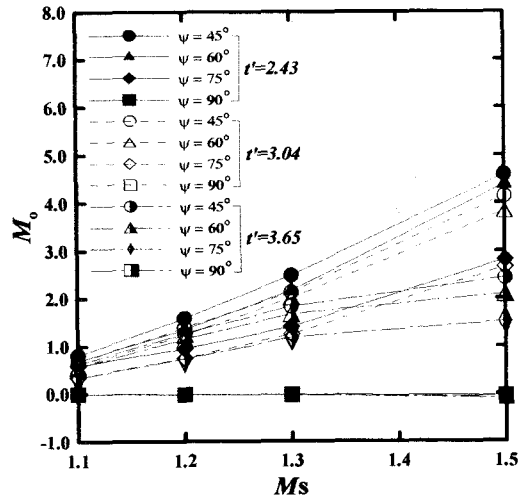


Fig. 7 Moment on the inclined flat plate ($r/D=2.0$)

Fig. 8 은 관 출구로부터 경사진 평판 중심까지의 거리 r/D 가 경사평판 중심의 최대 압력값에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 횡축은 M_s 를 나타내며, 종축에는 경사평판 중심의 최대 압력값 p_{max} 를 대기압 p_a 로 무차원한 값 p_{max}/p_a 을 나타내었다. 주어진 M_s 에 대하여 $r/D=2.0$ 인 경우, $\psi=45\sim60^\circ$ 인 범위에서는 ψ 값이 증가함에 따라 평판 중심의 최대 압력값은 감소하지만, $\psi=75\sim90^\circ$ 인 범위에서는 ψ 값이 증가할수록 평판 중심의 최대 압력값이 증가한다. 이러한 경향은 다른 r/D 에 대해서도 유사하게 나타난다. 그림으로부터 주어진 ψ 값에 대해서 r/D 가 증가할수록 평판 중심의 최대 압력값은 감소한다.

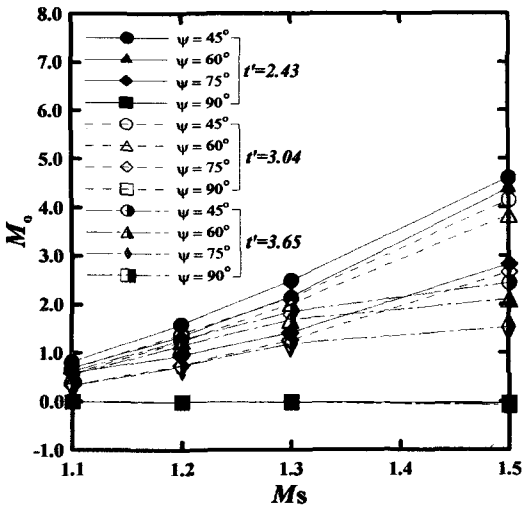


Fig.8 Pressure variations at the center of the inclined flat plate ($\psi_r/D=0$)

Fig. 9 에는 무차원 시간 t' 의 변화에 따른 경사 평판 중심에서의 압력변화를 나타내었다. $r/D=2.0$ 인 경우, $\psi=45\sim60^\circ$ 까지는 ψ 값이 증가함에 따라 경사평판 중심의 최대 압력값은 감소하지만, $\psi=75\sim90^\circ$ 에서는 ψ 값이 증가함에 따라 최대 압력값은 증가한다. 그러나 r/D 가 큰 경우에는 ψ 값이 증가함에 따라 최대 압력값은 감소하지만, 모든 r/D 에서 $\psi=90^\circ$ 일 때 최대 압력값이 가장 크다. 모든 ψ 값에 대하여 r/D 가 증가하면 최대 압력값이 감소하며, r/D 가 두배 증가하면 최대 압력값은 거의 절반으로 감소한다는 것을 알 수 있다. 그림으로부터 ψ 값이 작은 경우에는 일단 압력이 감소하였다가 다시 급격하게 압력이 상승하는 형상을 나타내고 있으나 ψ 값이 커지면 이러한 형상이 점점 없어진다. 이것은 관출구로부터 방출된 펄스가 전파하여 경사 평판에 충돌할 때 평판 중심을 기준으로 비대칭적인 유동장이 형성되므로 평판 중심의 아래 방향에서 발생한 팽창파의 영향 때문이다.

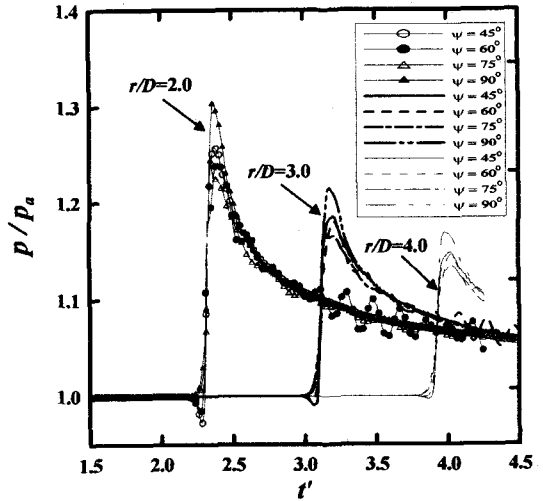


Fig.9 Pressure histories at the center of the inclined flat plate ($M_s=1.1$)

Fig.10 에는 $r/D=2.0$, $\psi=45^\circ$ 인 경우, M_s 의 변화가 경사 평판 중심에서의 압력변화에 미치는 영향을 나타내었다. 그림으로부터 M_s 가 증가함에 따라 경사 평판 중심에서의 피크 압력값은 비례하여 증가하며, 평판에 충돌하는 시간이 빨라진다. 그리고 M_s 가 증가할수록 초기 압력강하값이 커진다.

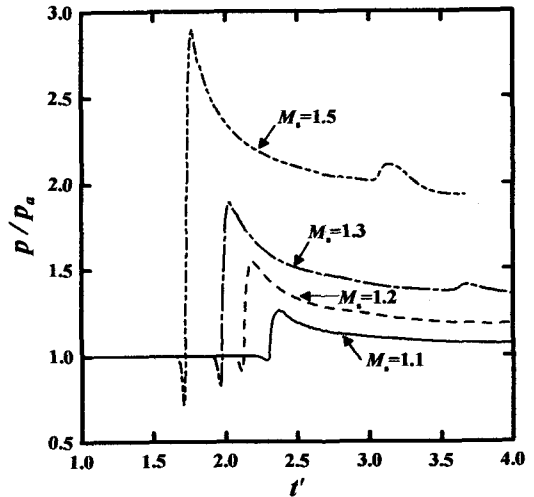


Fig.10 Pressure histories at the center of the inclined flat plate ($r/D=2.0$, $\psi=45^\circ$)

4. 결론

본 연구에서는 배플판이 설치되어 있지 않은 관출구로부터 방출되는 경우 발생하는 펄스파가 경사 충돌판에 충돌할 때 발생하는 유동특성에 대

해서 Harten-Yee 의 TVD 기법을 이용하여 수치 해석을 하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 평판에서 발생하는 압력분포는 M_s 와 경사각도 ψ 에 크게 영향을 받았으며 평판상의 최대 압력값의 위치는 충돌판의 중심에서 벗어난 지점에서 나타났다.

2) r/D 가 작은 경우, 경사평판 중심의 피크 압력값은 $\psi=45^\circ\sim 60^\circ$ 까지는 ψ 값이 증가함에 따라 감소하지만, $\psi=75^\circ\sim 90^\circ$ 에서는 ψ 값이 증가함에 따라 피크 압력값은 증가한다. 그러나 r/D 가 큰 경우에는 ψ 값이 증가함에 따라 최대 압력값은 감소하지만, 모든 r/D 에서 $\psi=90^\circ$ 일 때 최대 압력값이 가장 크다.

3) 일정한 M_s 에 대해서 r/D 가 증가할수록 경사평판상의 최대압력값과 경사 평판의 중심의 피크 압력값은 감소한다.

후 기

이 논문은 2001 년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (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) Setoguchi, T., Matsuo, K., Nakatomi, R. and Kaneko, K., 1996, "A Study of a Negative Impulsive Wave Generator," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.197, No.5, pp.573 ~ 587.
- (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., 1997, "Numerical Study on the Interaction Between Unsteady Compression and Unsteady Expansion Wave," *KSME International Journal*, Series B, Vol.21, No.11, pp.1413 ~ 1421.
- (8) Kentfield, J.A.C., 1993, *Nonsteady, One-*

- Dimensional, Internal, Compressible flows (Theory and Applications)*, Chapter 7, Oxford University Press.
- (9) Smedly, G.T., Phares, D.T. and Flagan, R.C., 1998, "Entrainment of Fine Particles from Surfaces by Impinging Shock Waves," *Experiments in Fluids*, 26, pp.116 ~ 125.
- (10) Zeutzius, 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.
- (11) Aratani, S., Narayanswami, N., Ojima, H. and Takayama, K., 1995, "Studies of Supersonic Jets and Shock Waves Generated during Glass Tempering Process," *Trans. JSME*, Series B, Vol.61, No.590, pp.3706.
- (12) Morris, W. J., 1984, "Cleaning Mechanisms in Pulse Jet Fabric Filters," *Proc. Of the Filtration Society, Filtration and Separation*, 21, pp.52 ~ 54.
- (13) 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).
- (14) 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.
- (15) Kim, H.D. and Setoguchi, T., 2001, "Study of the Impingement of Impulse Wave upon a Flat Plate," *Journal of Sound and Vibration* (in press).