관출구로부터 방출되는 약한 충격파에 관한 3 차원 수치해석

권용훈† · 신현동* · 김희동* · 이동훈**

3-Dimensional Computations of the Weak Shock Wave Discharged from the Exit of Duct

Yonghun KWEON, Hyundong SHIN, Heuydong KIM and Donghoon LEE

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

Abstract

When a shock wave is discharged from the exit of a duct, complicated flow is formed near the duct exit. The flow field is much more complicated under the ground effects or any other objects near the exit of a duct, such as the circumstance near the exit of the high-speed railway tunnel. The resulting flow is essentially three-dimensional unsteady with the effects of strong compressibility. In the current study, three-dimensional flow fields of the weak shock wave which is discharged from the exit of a duct are numerically investigated using a CFD method. Computations are performed for the weak shock wave in the range below 1.5. The results obtained show that the directivity and magnitude of the weak shock discharged strongly depend upon the Mach number of initial shock wave and are significantly influenced by the ground effects.

1. 서 론

관내를 전파하는 압축파나 충격파가 관의 출구로부터 방출하는 경우, 펄스형태의 강한 압력파를 발생시키게 되는데 이를 펄스파라고 한다. 이러한 펄스파에 의한 충격성 소음은 광범위한 분야에서 발생하므로 환경소음[(1)]의 주된 요인이 되고 있으며, 이에 대한 적절한 대응책[(2)]이 요구되고 있는 실정이다. 종래에 펄스파에 관해서 실험적, 수치해석적으로 많은 연구들이 수행되어 왔다. 특히, 충격성 소음의 저감에 관한 연구는 상당한 진전을 이루어 왔으며, 최근까지도 활발히 진행되고 있다.[(3)]

최근에는 펄스파와 관련된 충격성 소음문제와는 별도로, 펄스파를 공업적으로 유용하게 이용하려는 기술이 중요한 공학적 과제로 부상하고 있다. 즉, 펄스연소를 이용한 분립체 건조기술, 반도체 등의 물체표면에 부착한 불순물 제거기술, 펄스제트를 이용한 고효율 연소개발, 강화유리의 제작공정, 그리고 펄스제트 필터장치 등과 같이 공업적으로 폭넓게 응용되고 있다.[(4~7)]

현재까지 펄스파에 관해서 수많은 연구들이 수행되어 있지만, 대부분의 연구들은 관출구가 대기에 완전 개방된 공간으로 전파하는 펄스파를 대상으로 하였다. 실제로, 고속철도의 터널 출구[(8)] 등에서와 같이, 각종 펄스장치의 외부에는 측벽면 및 지면효과와 같은 여러 형태의 물체들이 놓여져 있으며, 펄스파의 전파에 영향을 끼친다. 따라서, 기존의 연구자료만으로 펄스파의 전파특성을 명확히 규명하는 것은 불충분하다.[(9~10)]

본 연구에서는 3 차원 수치해석을 통하여, 관출구에 지면효과 및 측벽면 등이 펄스파에 미치는 영향을 조사하였다. 관출구가 대기에 완전히 개방된 경우를 기준으로, 관출구에 지면(ground)이 있는 경우, 지면과 벽면으로 둘러싸인 경우 및 지면과 측벽면(side-wall)에 의해 공간이 구속된 4 가지 경우에 대해서 수치해석을 수행하였다. 얻어진 결

† 안동대 기계공학부
E-mail : kimhd@andong.ac.kr
TEL : (054)820-5622 FAX : (054)823-5495
* 안동대 기계공학부
** 서울산업대 기계공학과

과는 다른 유용한 실험결과[11]와 비교하였으며, 펄스파의 전파형태를 가시화 하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 3 차원 비정상 압축성 Euler 유동방정식에 Harten - Yee 의 TVD 법[12]을 적용하여 관출구로부터 구속된 공간으로 전파하는 펄스파의 유동특성을 해석하였으며, 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

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

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

위의 식(1)에서 t 는 시간, ρ 는 기체의 밀도, u, v, w 는 각각 x 방향, y 방향과 z 방향의 속도성분, p 는 압력을 나타낸다. 공기의 단위체적당 전에너지를 e 라고 하면, 전에너지 e 는 다음과 같이 주어진다.

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

식(1)은 다음과 같이 무차원 상태량으로 다시 쓰여진다.

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

$$z'=\frac{z}{H},\quad p'=\frac{p}{p_0},\quad \rho'=\frac{\rho}{\rho_0},$$

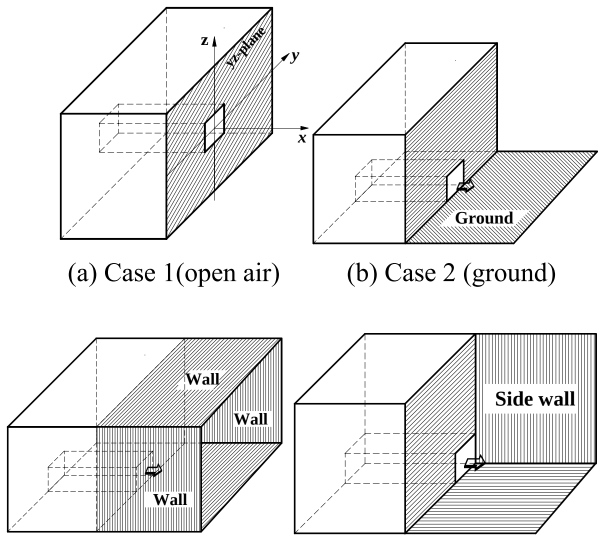
$$u'=\frac{u}{a_0/\sqrt{\gamma}},\quad v'=\frac{v}{a_0/\sqrt{\gamma}},\quad w'=\frac{w}{a_0/\sqrt{\gamma}}$$

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

2.2 계산영역 및 경계조건

Fig.1 은 본 수치계산에 적용된 관출구의 구속된 공간형태를 나타낸다. 그림 중에서 Case 1 은 관출구가 대기에 완전히 개방된 경우이며, Case 2 는 지면에 의해서, Case 3 은 지면과 벽면으로, 그리고 Case 4 는 지면과 측벽면에 의해서 공간이 구속된 경우를 나타난다. Fig.2 에는 계산영역과 경계조건을 함께 나타내었다. 계산영역은 높이와 폭이 각각 H, 길이가 $3H$ 인 관의 내부영역과 외부영역으로 구성되었다. 경계조건으로는 관의 입구에 유입조건, 관의 벽면과 외부벽면에 대해서 slip-wall 조건, 하류경계에는 유출조건을 적용하였다.

초기조건으로는 관 내부에서 마하수 M_s 를 갖는 초기 충격파가 관출구를 향해서 전파하여 대기중으로 방출하도록 설정하였다. 본 연구에서는 초기 충격파의 마하수 M_s=1.1 ~ 1.5 범위에서 수치계산을 수행하였다.



(a) Case 1(open air) (b) Case 2 (ground)

(c) Case 3 (walls) (d) Case 4 (side wall)

Fig. 1 Different geometries near the exit of a duct

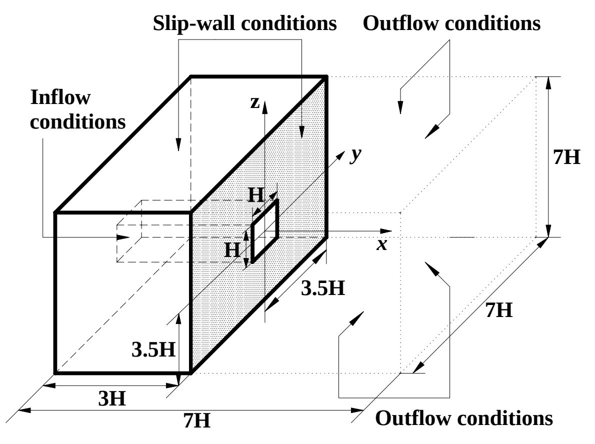
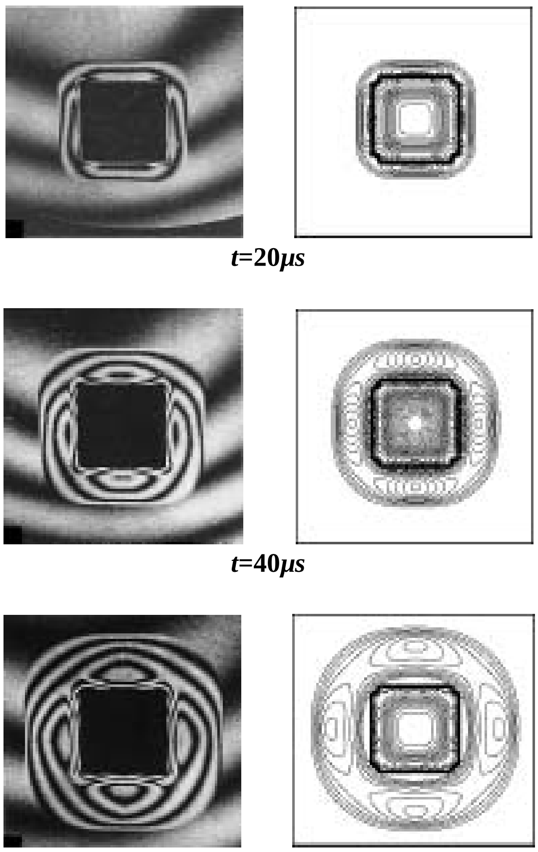


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

3. 결과 및 고찰

Fig.3 은 M_s=1.29 인 경우, 관출구로부터 Case 1 의 공간으로 전파하는 펄스파의 전파형태를 나타낸다. 왼쪽의 그림은 Jiang 등의 실험[11]에서 얻어진 Interferogram 이며, 오른쪽 그림은 본 수치계산에서 얻어진 등압력 선도이다. 시간 t=20μs 일 때, 펄스파는 관출구로부터 방출하기 시작한다. 그림에서 바깥쪽의 모서리가 둥근 사각형 루프(loop)는 펄스파를 나타내며, 내부의 사각형 루프는 관출구의 모서리와 면에서 발생하는 와류(vortex)를 나타낸다. 사각형 내부(interferogram 에서 검은 사각형 영역)에 나타나 있는 것은 관출구에서 관 내부로 전파되는 팽창파을 의미한다. 시간이 경과함에 따라, 펄스파의 사각형 루프는 모서리가 점점 둥글게 변하면서 직선부분이 짧아진다. 이것은 펄스파가 관출구로부터 방출될 때, 초기에는 평면형태로 방출되어 전파하지만, 시간이 경과하여 하류로 전파할수록 둥근 형태로 변한다는 것을 의미한다.



t=20μs

t=40μs

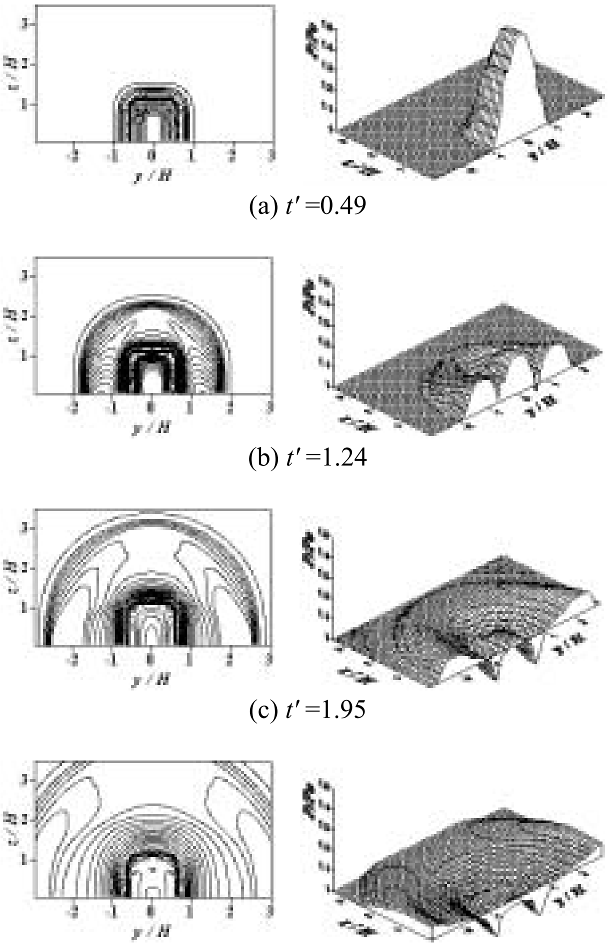
t=60μs

(a) Experiment (Ref.11) (b) Present CFD

Fig. 3 Interferograms and computed pressure contours on yz-plane (Case 1, M_s=1.29)

한편, 와류의 사각형 루프는 펄스파에 비해 특이한 형태로 변하며, 3 차원적 거동을 나타낸다. 본 수치계산 결과는 실험결과와 비교적 잘 일치한다.

Fig.3 에는 M_s=1.2 인 경우, 관출구로부터 Case 2 의 공간으로 전파하는 펄스파를 yz 평면상에 나타낸 등압력 선도이다. 오른쪽 그림은 등압력 선도를 바탕으로 만들어진 조감도이다. 조감도에서 불룩하게 튀어나온 부분은 전파하는 펄스파를 나타낸 것이며, 오목하게 들어간 부분은 관출구에서 발생한 와류를 나타낸다. 시간이 경과할수록, 와류 영역은 점점 넓어지며, 펄스파는 하류로 전파하면서 그 강도는 점차로 약화된다. 그림에 나타나 있듯이, 지면효과에 의한 공간의 제약으로 펄스파는 상반부로만 전파되며, 지면 및 관출구 근처에서 펄스파의 등압력 선도가 밀집되어 있음을 관찰할 수 있다. 특히, 와류 루프는 Case 1 의 경우에 비해 더 복잡한 형태를 나타낸다.



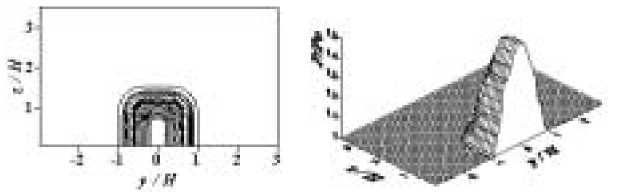
(a) t' =0.49

(b) t' =1.24

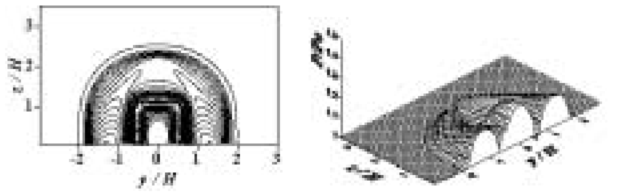
(c) t' =1.95

(d) t' =2.63

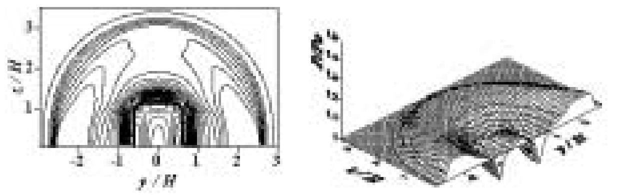
Fig. 4 Pressure contours on yz-plane (Case 2, M_s=1.2)



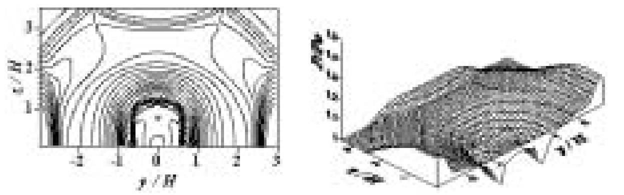
(a) t' =0.49



(b) t' =1.24



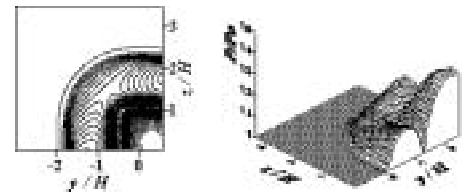
(c) t' =1.95



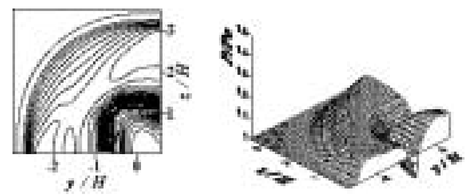
(d) t' =2.63

Fig. 5 Pressure contours on yz-plane (Case 3, M_s=1.2)

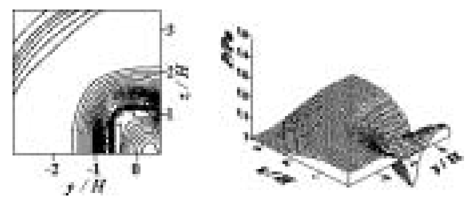
(a) t' =0.49



(b) t' =1.24



(c) t' =1.95



(d) t' =2.63

Fig. 6 Pressure contours on yz-plane (Case 4, M_s=1.2)

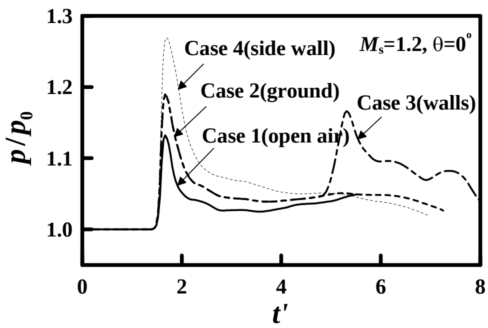
Fig.5 에는 Case 3 의 공간으로 전파하는 펄스파를 나타낸 등압력 선도이다. 펄스파가 벽면에 반사되기 이전인 t'=1.95 까지는 Case 2 의 경우와 거의 동일한 전파형태를 나타낸다. t'=2.63 일 때, 펄스파는 측벽면과 윗벽면에 반사하게 되며, 반사된 충격파는 관의 중심축을 향해서 전파한다. Fig.4(d)에 나타나 있듯이, Case 1 과 2 에서 형성되는 유동장에 비해, Case 3 의 내부에서는 반사 충격파의 상호간섭에 의해서 더욱 복잡한 유동장이 형성된다.

Fig.6 에는 Case 4 의 공간으로 전파하는 펄스파를 나타낸 등압력 선도이다. 관출구로부터 방출된 펄스파는 Case 1 과 Case 2 에 비해 각각 1/4 과 1/2 만큼 좁은 영역으로 전파하게 된다. t'=1.24 일 때의 등압력 선도 및 조감도를 보면, 다른 경우에 비해서 펄스파는 관 중심축 방향으로 강한 지향성을 가지며, 관출구 부근에서는 강한 와류가 발달한다.

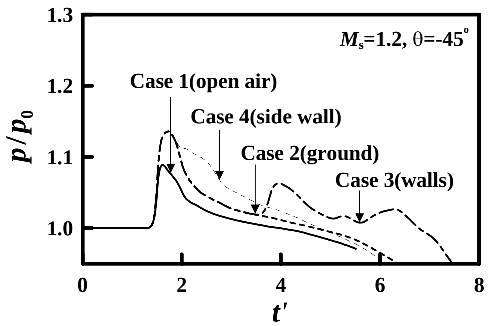
Fig.7 에는 M_s=1.2 인 경우, xy 평면의 x/H=2.0 인 지점에서 시간의 경과에 따른 압력변화를 나타내었다. θ=0°인 경우, 압력변화는 Case 3 (walls)의 경우를 제외하고는 거의 유사한 경향을 나타낸다. Case 3 의 경우, 펄스파가 도달하는 순간에 급격한 압력상승으로 인하여 1 차 피크압력이 나타나며, 그 이후에 벽면에서 반사된 충격파가 관의 중심축에 도달할 때 2 차 피크압력이 나타난다. 본 수치해석에 적용된 4 가지의 경우 중, 관의 중심축 방향, 즉 θ=0°인 지점에서 피크 압력값은 Case 4(side wall)의 경우가 가장 크게 나타난다. 관의 중심축에서 벗어난 지점인 θ=45°, 90°의 경우, Fig.7(b)와 (c)에 나타나 있듯이 Case 3 에서는 여러 개의 피크압력이 나타난다. 피크 압력값은 θ=0°와는 달리 Case 2, 3, 4 의 경우에 거의 동일하다.

Fig.8 에는 M_s=1.2 인 경우, 관출구의 공간 제약이 펄스파의 지향성에 미치는 영향을 나타내었다.

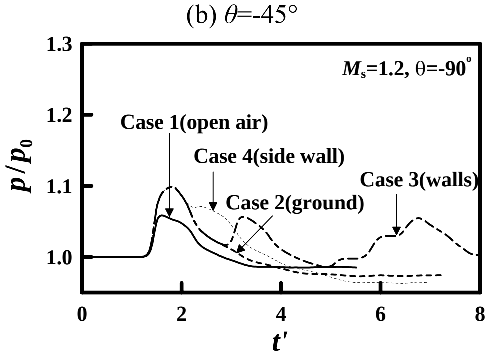
여기에서 방위각 θ 는 관의 중심축을 기준으로 시계방향을 부(−)의 값으로 설정하였다. Fig.8(a)의 x/H=1.0 인 경우, Case 1(open air)의 피크 압력값은 모든 방향에 대해서 다른 경우에 비해 작게 나타난다. θ=0°에서는 Case 4(side-wall)의 피크 압력값이 가장 크며, 관의 중심축에서 벗어날수록 거의 동일한 피크 압력값을 갖는다. Fig.8(b)의 x/H=2.0 인 경우, 펄스파의 지향성은 x/H=1.0 과 거의 유사한 경향을 나타내지만, Case 1 에 대한 피크 압력값의 편차가 커진다는 것을 관찰할 수 있다. Fig.8(c)의 x/H=3.0 에서는 위의 두 경우와는 다른 경향이 나타난다. θ=-45°이상의 영역에서 Case 3(walls)의 피크 압력값이 가장 크게 나타났는데, 이것은 박스의 벽면에서 반사된 충격파가 유동장에 영향을 미쳤기 때문이다. x/H 가 증가할수록 모든 방향에 대한 피크 압력값은 감소한다.



(a) θ=0°



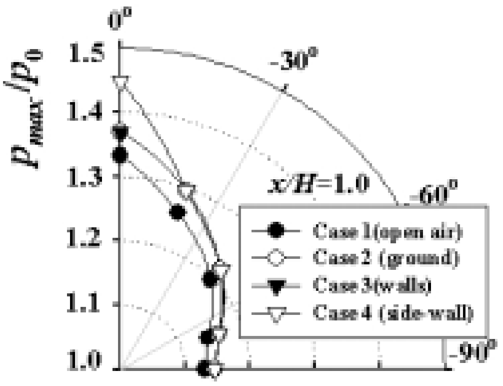
(b) θ=-45°



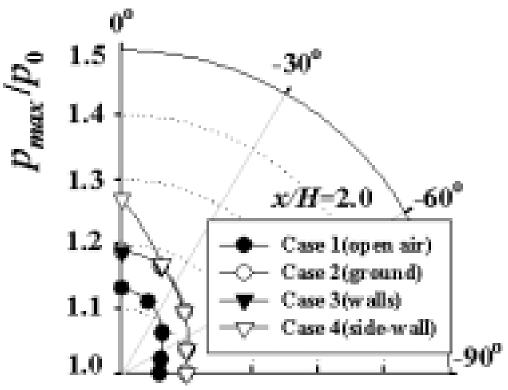
(c) θ=-90°

Fig. 7 Pressure histories on xy-plane at x/H=2.0

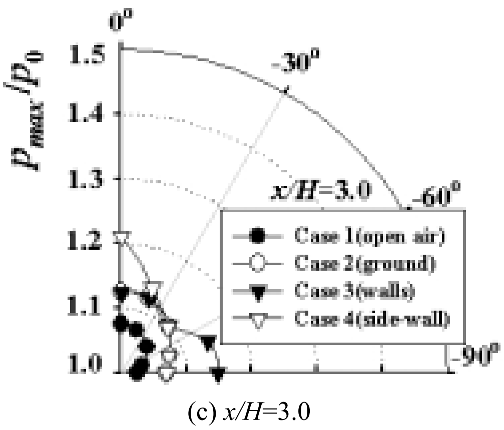
Fig.9 에는 Case 3(walls)의 경우, 초기 충격파의 마하수 M_s 의 변화가 피크 압력값에 미치는 영향을 나타내었다. Fig.9(a)에 나타나 있듯이, θ=0°의 위치에서는 2 개의 피크압력이 나타난다. 1 차 피크압력($\Delta p_{max,1}$)은 초기 펄스파가 도달하는 순간에 나타난 것이며, 2 차 피크압력($\Delta p_{max,2}$)은 벽면에 반사된 충격파가 관의 중심축에 도달할 때 발생한 것이다. Fig.9(b)에는 초기 충격파 마하수 M_s 와 피크압력의 관계를 나타낸다. 종축에는 1 차 피크 압력값과 2 차 피크 압력값의 차를 대기압으로 무차원한 값, $(\Delta p_{max,1} - \Delta p_{max,2})/p_0$ 를 나타내었다.



(a) x/H=1.0

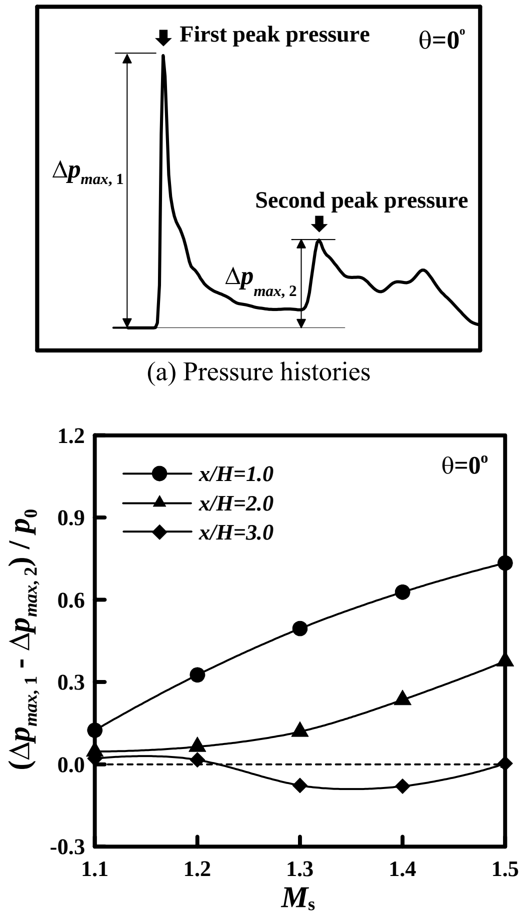


(b) x/H=2.0



(c) x/H=3.0

Fig. 8 Impulse wave directivity (M_s=1.2)



(a) Pressure histories

(b) Difference between first and second peak pressures

Fig. 9 Peak pressure vs M_s (Case 3)

x/H=1.0 과 2.0 인 경우, 피크 압력값의 편차는 마하수 M_s 가 증가할수록 커진다. *x/H*=3.0 의 경우, M_s=1.2 까지는 1 차와 2 차의 피크압력은 거의 동일하지만, 마하수가 더욱 증가할 때 2 차의 피크압력이 1 차의 피크압력보다 더 커지는 경우가 발생한다. 이것은 관출구에서 멀어질수록 벽면에서 반사된 충격파의 상호간섭이 유동장에 크게 영향을 끼친다는 것을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 관출구로부터 방출되는 3 차원 펄스파에 미치는 지면효과 및 측벽면의 효과를 수치해석적으로 조사하기 위하여 Harten-Yee 의 TVD 법을 이용하여 3 차원 수치해석을 수행하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Case 1(open air)을 기준으로, 관출구에 지면효과 및 측벽면에 의한 공간의 제약은 펄스파의 지향성을 관의 중심축 방향으로 더욱 강하게 만든다. 본 연구에 적용된 4 개의 Case 중에서, Case 4 (side-wall)가 관의 중심축 방향에 대한 펄스파의 피크 압력이 가장 크다.

2. Case 3(walls)의 경우, 벽면에 반사된 충격파에 의해 다수의 피크압력이 나타났으며, 관의 중심축에서 벗어난 영역에서의 피크압력은 다른 경우에 비해 크다.

3. 얻어진 결과를 이용하여 펄스파의 전파형태를 가시화 할 수 있었으며, 펄스파와 와류의 발달은 공간의 제약 및 초기 충격파 마하수에 크게 의존한다.

참고문헌

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

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

(3) 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.

(4) 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.

(5) 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.

(6) 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.

(7) Morris, W. J., 1984, "Cleaning Mechanisms in Pulse Jet Fabric Filters", Proc. of the Filtration Society, Filtration and Separation, Vol.21, pp.52-54.

(8) Aoki, T., and Matsuo, K., 2001, "Impulse Sound Caused by Discharging Compression Wave from High-Speed Railway Tunnel", 8^{th} Intl'. Cong. on Sound and Vibration, pp.2289-2296.

(9) Abe, A., and Takayama, K., 1989, "A Peculiar Shape in Transition Process of a Shock Wave Discharged from an Open End of a Shock Tube", Natl'. Symposium on Shock Wave Phenomena, pp.41-54.

(10) 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", Journal of Sound and Vibration, Vol.259(5), pp.1147-1161.

(11) 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.

(12) Yee, H. C., 1987, "Upwind and Symmetric Shock Capture Scheme", NASA TM-89464.