

두 평행한 관의 출구로부터 방출되는 펄스파에 관한 연구

권용훈* · 김희동** · 이동훈***

A Study of the Impulse Wave Discharged from the Exit of Two Parallel Tubes

Yong-Hun Kweon*, Heuy-Dong Kim** and Dong-Hun Lee**

Keywords : Compressible Flow(압축성 유동), Unsteady Flow(비정상 유동), Impulse Wave(펄스파), Shock Wave(충격파)
Shock Tube(충격파 관)

Abstract

The twin impulse wave leads to very complicated flow fields, such as Mach stem, spherical waves, and vortex ring. The twin impulse wave discharged from the exits of the two tubes placed in parallel is investigated to understand detailed flow physics associated with the twin impulse wave, compared with those in a single impulse wave. In the current study, the merging phenomena and propagation characteristics of the impulse waves are investigated using a shock tube experiment and by numerical computations. The Harten-Yee's total variation diminishing (TVD) scheme is used to solve the unsteady, two-dimensional, compressible, Euler equations. The Mach number M_i of incident shock wave is changed below 1.5 and the distance between two-parallel tubes, L/d , is changed from 1.2 to 4.0. In the shock tube experiment, the twin impulse waves are visualized by a Schlieren optical system for the purpose of validation of computational work. The results obtained show that on the symmetric axis between two parallel tubes, the peak pressure produced by the twin-impulse waves and its location strongly depend upon the distance between two parallel tubes, L/d and the incident shock Mach number, M_i . The predicted Schlieren images represent the measured twin-impulse wave with a good accuracy.

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 전파하며, 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 같은 광범위한 분야에서 발생하므로 환경소음의 주된 요인이 되고 있다.

일반적으로 충격성 소음은 비록 지속시간이 짧더라도 순간 피크압력이 매우 높기 때문에 산업현장에서 작업자가 충격성 소음에 노출되면 청력장애를 불러 일으킬 뿐만 아니라 심한 경우 주변 구조물의 진동과파괴까지도 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]

이와 같은 펄스파와 관련된 충격성 소음문제와는 별도로 최근에는 펄스파를 공업적으로 유용하게 이용하려는 기술이 중요한 공학적 과제로 부상하고 있다. 즉, 펄스연소^[5]를 이용한 분립체 건조기술, 반도체 등의 물체표면에 부착한 불순물

제거기술^[6], 펄스제트를 이용한 고효율 연소개발^[7], 강화유리의 제작공정^[8] 그리고 펄스제트 필터장치^[9] 등과 같이 공업적으로 폭넓게 응용되고 있다. 실제 공학적 응용에서는 펄스파가 물체표면에 충돌하여 반사하게 되며, 이때의 파동특성과 충돌면 상에서 발생하는 유동장에 대한 연구^[10,11]도 행해져 있다. 이와 같이, 종래에는 대부분 단일 관 출구로부터 발생하는 펄스파에 대한 연구들이 많이 수행되어져 왔다.

실제로 고성능 제트기의 추진시스템과 같이, 공업의 여러 분야에서는 복수의 펄스파 및 제트가 간섭을 일으키는 것을 자주 발견할 수 있으며, 복수의 평행한 노즐 출구로부터 방출되는 초음속 제트의 상호간섭과 유동특성^[12-14]에 대한 연구들이 수행되어져 왔다. 그러나, 이러한 연구들은 정상유동에 관한 것들이며, 아직까지 비정상 유동에서 발생하는 복수의 펄스파의 상호간섭에 대한 연구^[15]는 거의 행해져 있지 않다. 다수의 펄스파가 상호간섭을 일으킬 때 발생하는 유동현상을 공업적, 산업적으로 적절하게 이용하기 위해서는 이에 대한 명확한 이해와 상세한 정보가 대단히 중요하다.

따라서 본 연구에서는 충격파 관의 실험과 TVD Scheme을 이용한 Euler 방정식의 수치계산을 통하여 두 평행한 관 출구로부터 방출되는 트윈 펄스파 (twin impulse wave)의 상호간섭과 유동특성을 조사하였으며, 트윈 펄스파의 상호간섭에 의해 형성된 유동장을 가시화 하였다. 실험에서는 쉐리렌 가시화 시스템을 사용하여 유동장 변화를 가시화 하였으며, 수치해석에서는 초기 충격파의 강도 M_i , 두 평행한 관 사이의 거리 L/d 를 변화시켜서 계산을 수행하였다.

* 안동대학교 기계공학부, luisfigo132@hotmail.com

** 안동대학교 기계공학부, kimhd@andong.ac.kr

*** 서울산업대학교 기계공학과, ldh@duck.snut.ac.kr

2. 수치계산 방법

본 연구에서는 2차원 비정상 압축성 Euler 유동방정식에 Harten-Yee의 TVD법을 적용하여 두 평행한 관 출구로부터 방출되는 트윈 펄스파(twin impulse wave)의 유동특성을 해석하였으며, 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

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

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

위의 식(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 단위체적당 전에너지를 e 라고 할 때, 전에너지 e 는 다음과 같이 주어진다.

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

식(1)은 다음과 같이 무차원 상태량으로 다시 쓰여진다.

$$x' = \frac{x}{D}, \quad y' = \frac{y}{D}, \quad u' = \frac{u}{a_1/\sqrt{\gamma}}, \quad v' = \frac{v}{a_1/\sqrt{\gamma}}, \quad t' = \frac{t}{\sqrt{\gamma}D/a_1}, \quad p' = \frac{p}{p_1}, \quad \rho' = \frac{\rho}{\rho_1}$$

위의 식에서 a 는 음속, 상첨자(')는 무차원량, 하첨자(1)은 대기상태를 나타낸다.

Fig.1은 수치계산에 적용된 계산영역과 경계조건을 나타낸다. 계산영역은 두 평행한 관의 내부영역과 외부영역으로 구성되었다. 수치계산은 그림에 나타난 계산영역에 대하여 $\Delta x = \Delta y = d/75$ 크기인 정방격자 640,000개를 생성하여 계산을 수행하였다. 그림에서 d 는 관의 지름, L 은 두 평행한 관의 중심축 사이의 거리를 나타낸다. 본 연구에서는 초기 충격파 마하수와 두 평행한 관의 중심축 사이의 거리를 각각 $M_5=1.1\sim 1.5$, $L/d=1.2\sim 4.0$ 까지 변화시켰다. 경계조건으로는 상류경계에 유입조건, 하류경계에 유출조건, 그리고 모든 고체벽면에서는 slip-wall 조건을 적용하였다.

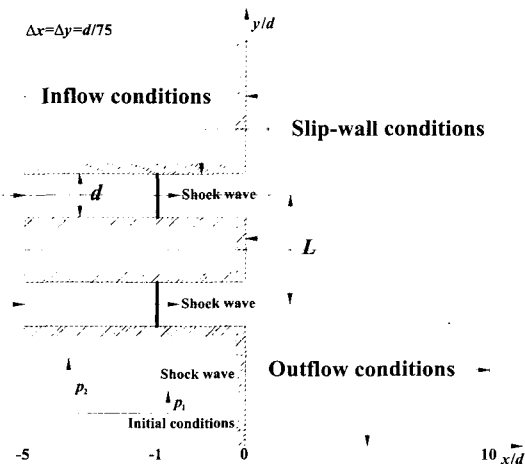


Fig.1 Computational flow field and boundary conditions

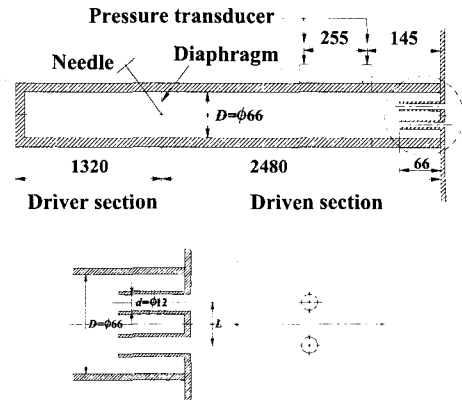


Fig.2 Experimental apparatus and two parallel tube exits

3. 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig.2에서 개략적으로 나타낸 바와 같이, 저압실이 대기에 개방되어 있는 대기 개방형 충격파 관을 이용하였다. 충격파 관의 고압실과 저압실은 지름 $D=66\text{mm}$ 인 원형관으로 제작되었으며, 고압실과 저압실의 길이는 각각 1430mm와 1600mm이다. 그림에서 나타나 있듯이, 두 평행한 관 출구를 모사하기 위해서 충격파 관의 출구에 지름 $d=12\text{mm}$, 길이 66mm인 파이프 두 개를 평행하게 설치하였다.

실험은 충격파 관의 고압실에 압축공기를 충전시켜 고압실과 저압실 사이에 위치한 격막(두께 0.03mm 셀로판)을 파괴하게 되면, 고압실의 공기가 저압실로 급속히 유입하여 충격파가 형성된다. 충격파 관의 저압실을 전파하는 충격파의 전파마하수를 측정하기 위해서 관 출구로부터 145mm와 400mm의 위치에 각각 압력센서(PCB pressure transducer 112A21)를 설치하였다. 압력센서로부터 얻어진 전기적인 출력은 직류증폭기를 거쳐 파형기록장치에 기록된다. 본 실험에서 측정 압력값의 오차는 약 2%이내에서 발생하였다. 두 평행한 관 출구로부터 방출된 트윈 펄스파(twin impulse wave)의 전파과정에 대한 가시화 실험은 쉐리렌 가시화 시스템을 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig.3에는 $M_5=1.32$, $L/d=1.2$ 인 경우, 무차원 시간 t' 의 경과에 따른 두 평행한 관 출구로부터 방출되는 트윈 펄스파의 전파과정을 나타내었다. 여기에서 무차원 시간 t' 은 충격파가 관 출구로부터 관 내부의 400mm인 위치에 도달하는 순간부터의 시간을 의미한다. 위의 그림은 실험에 의해 얻어진 쉐리렌 가시화 사진을 나타내며, 아래의 그림은 수치계산을 통해서 얻어진 쉐리렌 이미지 사진을 나타내었다. $t'=1.07$ 일 때, 두 평행한 관 출구로부터 방출된 트윈 펄스파는 두 평행한 관의 대칭축상에서 서로 교차하면서 대기중으로 전파한다. $t'=1.54$ 일 때는 대칭축상에서 수직인 형태의 마하반사(Mach reflection)가 나타나지만, 시간이 경과할수록 등근형태로 바뀌어서 단일 펄스파의 형태로 전파한다. 그림(d)로부터 관 출구 근처에서는 vortex와 반사 충격파의 간섭에 의한 복잡한 유동장이 형성된다. 본 수치계산의 쉐리렌 이미지 사진은 실험의 쉐리렌 가시화 사진과 잘 일치한다.

Fig.4에는 $M_s=1.32$, $L/d=3.0$ 인 경우, 무차원 시간 t' 의 경과에 따른 트윈 펄스파의 전파과정을 나타내었다. 두 평행한 관 출구로부터 방출된 트윈 펄스파는 시간이 경과함에 따라 대칭축을 향하여 이동하여 서로 교차하면서 대기중으로 전파하며, 관출구 근처에서는 복잡한 유동장이 형성된다. Fig.3의 경우와 비교하면, 트윈 펄스파의 교차는 더 늦게 발생한다.

Fig.5에는 $M_s=1.32$, $t'=2.47$ 인 경우, 두 평행한 관의 중심축 사이의 거리 (L/d)가 펄스파의 유동장에 미치는 영향을 나타내었다. $L/d=1.2$ 인 경우에는 거의 단일 펄스파의 형태를 취하면서 전파한다. 반면에, L/d 가 증가한 경우에는 두 평행한 관의 대칭축상에서 상당히 하류영역까지 펄스파가 교차하면서 전파한다. 그림(b)에서 트윈 펄스파는 대칭축상에 마하반사를 하지만, (c)와 (d)에서는 아직 정상반사 (regular reflection)를 한다.

Fig.6에는 M_s 가 두 평행한 관 출구로부터 방출된 트윈 펄스파의 교차에 의해서 발생하는 대칭축상의 최대 압력값 p_{max} 에 미치는 영향을 나타내었다. 횡축은 M_s 를 나타내고, 종축에는 두 평행한 관의 대칭축상의 최대 압력값 p_{max} 를 대기압 p_1 으로 무차원한 값 p_{max}/p_1 을 나타내었다. $L/d=1.2$ 인 경우를 보면, M_s 가 증가할수록 최대 압력값이 증가하며, 이러한 경향은 다른 L/d 값에 대해서도 정성적으로 유사하다. 일정한 M_s 에 대해서 L/d 값이 증가할수록, 즉 두 평행한 관 사이의 거리가 멀어질수록 최대 압력값 p_{max}/p_1 은 감소한다. 이것은 L/d 값이 커질수록 트윈 펄스파가 대칭축상에서 교차할 때에는 각각의 펄스파의 강도가 보다 약화되었기 때문이다.

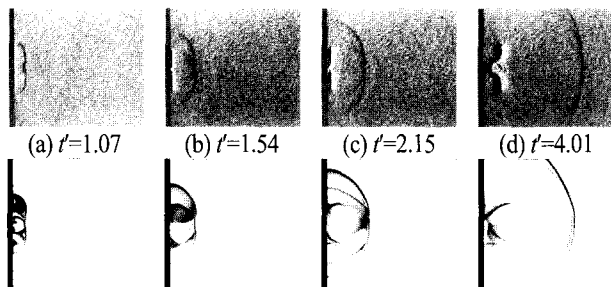


Fig.3 Experimented and computed Schlieren images ($M_s=1.32$, $L/d=1.2$)

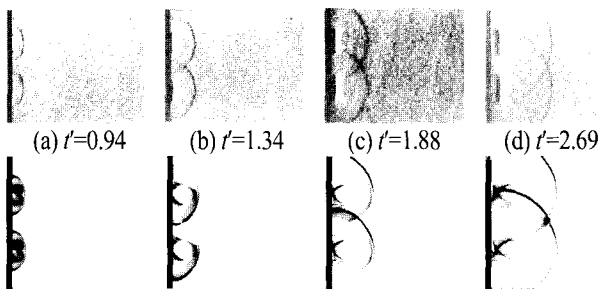


Fig.4 Experimented and computed Schlieren images ($M_s=1.32$, $L/d=3.0$)

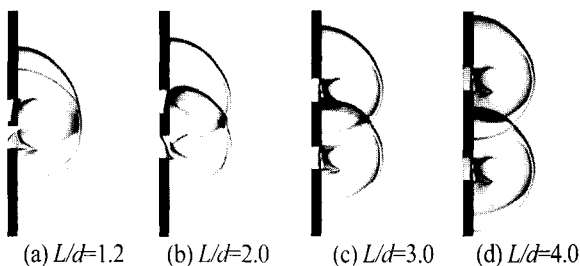


Fig.5 Computed Schlieren images ($M_s=1.32$, $t'=2.47$)

Fig.7에는 트윈 펄스파의 교차에 의해서 발생하는 대칭축상의 최대 압력값 p_{max} 과 초기 충격과 후방의 과잉압력 p_2 의 관계를 나타내었다. 횡축은 M_s 를 나타내고, 종축에는 최대 압력값 p_{max} 를 초기 충격과 후방의 과잉압력 p_2 로 무차원한 값 p_{max}/p_2 를 나타내었다. 모든 L/d 값에 대해서 p_{max}/p_2 는 M_s 에 관계없이 일정한 값을 갖는다. $L/d=1.2, 2.0, 3.0, 4.0$ 의 p_{max}/p_2 의 값은 각각 대략 1.0, 0.98, 0.94, 0.89이다. 그림으로부터 모든 M_s 에 대해서 L/d 값이 증가할수록 p_{max}/p_2 의 값은 감소한다.

Fig.8에는 $L/d=3.0$ 인 경우, 두 평행한 관의 대칭축을 따르는 최대 압력값의 분포를 나타내었다. 횡축에는 관 출구로부터 대칭축을 따르는 거리 x/d 를 나타내었고, 종축은 무차원 최대 압력값 p_{max}/p_1 을 나타내었다. 여기에서 $x/d=0.0$ 은 관출구를 의미한다. 일정한 M_s 에 대해서 p_{max}/p_1 의 값은 관 출구로부터 멀어질수록 약간 감소하다가 서서히 증가하여 최대값을 가진 후 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 경향은 M_s 가 증가할수록 현저하게 나타나며, 약한 충격파의 경우 p_{max}/p_1 의 분포는 아주 완만하게 변화한다. 그림중의 점선은 p_{max}/p_1 의 값이 최대인 위치를 선으로 연결한 것이다. 점선으로부터 M_s 가 증가할수록 p_{max}/p_1 의 최대값이 나타나는 위치는 관 출구 근처로 이동한다.

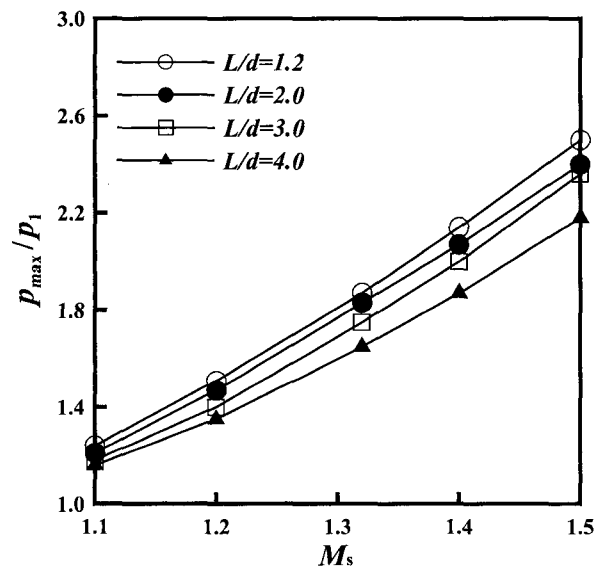


Fig.6 Peak pressure vs M_s

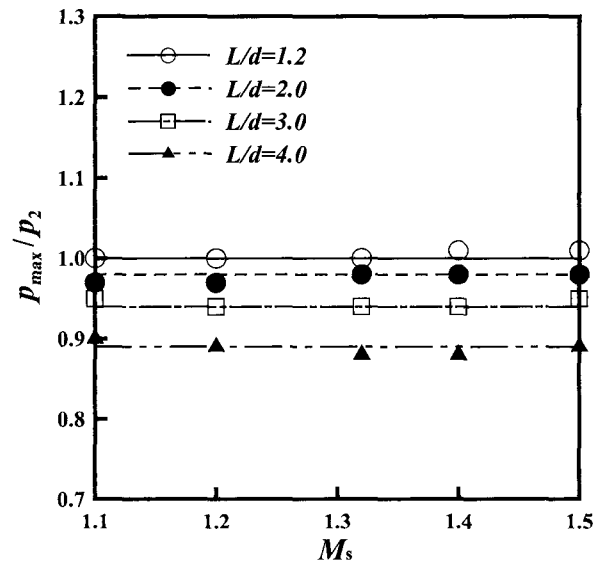


Fig.7 Peak pressure vs M_s

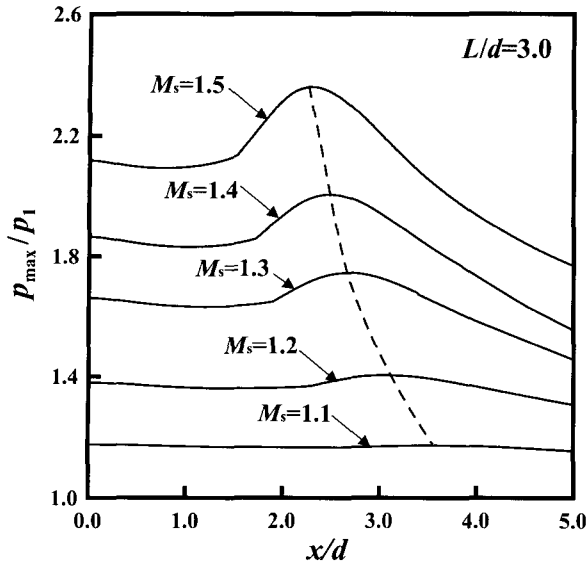


Fig.8 Variation of peak pressure along the symmetric axis between the two parallel tubes

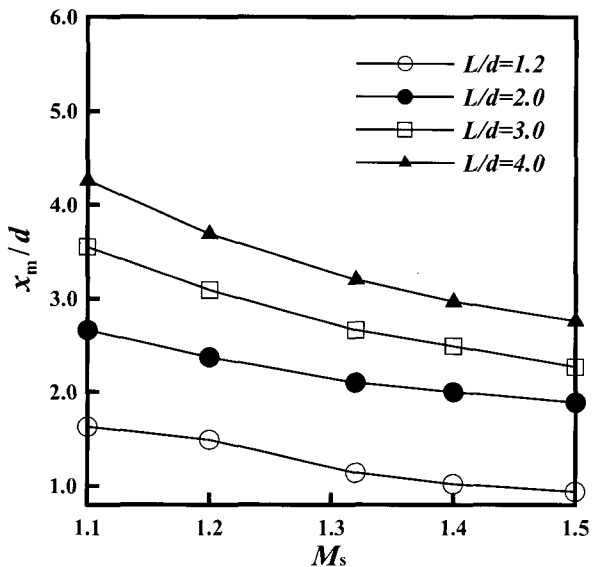


Fig.9 Location of peak pressure vs M_s

Fig.9에는 M_s 가 트윈 펄스파의 교차에 의해 발생한 최대 압력값의 위치에 미치는 영향을 나타내었다. 횡축은 M_s 를 나타내고, 종축에는 최대 압력값이 발생하는 위치 x_m 을 관의 지름 d 로 무차원한 값 x_m/d 를 나타내었다. $L/d=3.0$ 인 경우, M_s 가 증가할수록 x_m/d 값은 감소한다. 이것은 Fig.8의 점선으로부터 확인할 수 있다. 이러한 경향은 다른 L/d 값에 대해서도 정성적으로 유사하게 나타난다. 일정한 M_s 에 대해서, 두 평행한 관 사이의 거리 (L/d)가 멀어질수록 트윈 펄스파의 교차에 의해 발생하는 최대 압력값의 위치(x_m/d)는 관 출구에서 가까워진다.

5. 결론

본 연구에서는 두 평행한 관 출구로부터 방출된 트윈 펄스파의 전파특성에 대해서 충격파 관의 실험과 Harten-Yee의 TVD법을 이용한 수치해석을 수행하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 일정한 L/d 의 경우, M_s 가 증가할수록 트윈 펄스파의 교차에

의해 발생하는 대칭축상의 최대 압력값 p_{max} 는 증가하며, 최대 압력값이 나타나는 위치 x_m 은 관 출구 근처로 이동한다.

2. 일정한 M_s 에 대해서, 두 평행한 관 사이의 거리 L/d 값이 커질수록 대칭축상의 최대 압력값 p_{max} 는 감소하며, 최대 압력값이 나타나는 위치 x_m 은 관 출구로부터 멀어진다.

3. p_{max}/p_2 의 값은 M_s 에 상관없이 일정한 값을 가지며, L/d 가 커질수록 p_{max}/p_2 의 값은 작아진다.

후기

이 논문은 2002년 한국과학재단 신진연구자 연수지원사업(과제번호 KOSEF 2001-1-30500-003-3)에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- [1] Kim, H. D. and Setoguchi, T., "Study of the Discharge of Weak Shocks from an Open End of a Duct," Jour. Sound and Vibration, Vol.226, No.5 (1999), pp.1011~1028.
- [2] Rice, C.G., "Human Response Effects of Impulse Noise," Jour. Sound and Vibration, Vol.190, No.3 (1996), pp.525~543.
- [3] Raghunathan, S., Kim, H. D. and Setoguchi, T., "Impulse Noise and Its Control," Progress in Aerospace Sciences, Vol.34, No.1 (1998), pp.1~44.
- [4] Setoguchi, T., Matsuo, K., Nakatomi, R. and Kaneko, K., "A Study of a Negative Impulsive Wave Generator," Jour. Sound and Vibration, Vol.197, No.5 (1996), pp.573~587.
- [5] Kentfield, J. A. C., Nonsteady, One-Dimensional, Internal, Compressible flows (Theory and Applications), Chapter 7, Oxford University Press (1993).
- [6] Smedly, G. T., Phares, D. T. and Flagan, R. C., "Entrainment of Fine Particles from Surfaces by Impinging Shock Waves," Experiments in Fluids, Vol.26 (1998), pp.116~125.
- [7] Zeutzius, M., Terao, K., Setoguchi, T., Matsuo, S., Nakano, T. and Fujita, Y., "Active Control of Twin-Pulse Combustors," AIAA Journal, Vol.36, No.5 (1998), pp.823~829.
- [8] Aratani, S., Narayanswami, N., Ojima, H. and Takayama, K., "Studies of Supersonic Jets and Shock Waves Generated during Glass Tempering Process," JSME, Series B, Vol.61, No.590 (1995), pp.3706.
- [9] Morris, W. J., "Cleaning Mechanisms in Pulse Jet Fabric Filters," Proc. of the Filtration Society, Filtration and Separation, Vol.21 (1984), pp.52~54.
- [10] Kweon, Y. H., Lee, D. H. and Kim, H. D., "Study of the Impulse Wave Impinging upon an Inclined Flat Plate," Proc. KSME, Fall Annual Meeting, series B (2001), pp.438~443.
- [11] Kim, H. D. and Setoguchi, T., "Study of the Impingement of Impulse Wave upon a Flat Plate," Jour. Sound and Vibration, 2001 (in press).
- [12] Kojima, T. and Matsuoka, Y., "Study on Interference of Underexpanded Jet (Interference Characteristics of Two Parallel Jets)," JSME, Series B, Vol.54, No.503 (1987), pp.1560~1566.
- [13] Kojima, T. and Matsuoka, Y., "Study on Interference of Underexpanded Jet (Interference Characteristics of Three Parallel Jets)," JSME, Series B, Vol.54, No.506 (1988), pp.2738~2743.
- [14] Gamal H. Moustafa, "Interaction of Axisymmetric Supersonic Twin Jets," AIAA Journal, Vol.33, No.5 (1995), pp.871~875.
- [15] Jiang, Z. and Takayama, K., "Reflection and Focusing of Toroidal Shock Waves from Coaxial Annular Shock Tube," Computers & Fluids, Vol.27, No.5-6 (1998), pp.553~562.