

두 평행한 관 출구로부터 방출되는 충격파시스템의 수치해석적 가시화

정성재* · 권용훈** · 김희동† · 강창수***

Numerical Visualization of the Shock Wave System Discharged from the Exits of Two-Parallel Ducts

Sung Jae Jung, Yong Hun Kweon, Heuy Dong Kim and Chang Soo Kang

Abstract

The present study describes a computational work to investigate detailed behaviors of the twin shock waves discharged from the exits of two-parallel ducts. In computations, the Yee-Roe-Davis' s TVD scheme was used to solve the unsteady, three-dimensional, inviscid, compressible, Euler equations. The distance between two ducts is varied and the Mach number of the incident shock wave is changed below 2.0. The results obtained show that on the symmetric axis between two-parallel ducts, the maximum pressure achieved by the merge of twin shock waves and its location strongly depend upon the distance between two-parallel ducts and the Mach number of the incident shock wave. It is also found that the twin shock waves discharged from the exits of two-parallel ducts leads to the complicated flow fields, such as Mach stem, spherical waves, and vertical structures.

Key Words : Compressible flow(압축성 유동), Unsteady flow(비정상 유동), Twin shock wave(트윈 충격파), Shock tube(충격파 관), Impulse wave(펄스파)

1. 서론

관내를 전파하는 압축파나 충격파가 관의 출구로부터 방출되는 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.

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⁽³⁻⁴⁾.

또한, 위에서 설명한 단일 펄스파와는 달리, 고성능 제트기의 추진시스템과 같이 공업의 여러 분야에서는 복수의 펄스파 및 제트가 상호간섭을 일으킨다. 복수의 평행한 노즐출구로부터 방출되는 초음속 제트의 상호간섭과 유동특성⁽⁵⁾에 대해서 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나, 이러한 연구들은 정상유동에 관한 것들이며, 아직까지 다수

† 안동대학교 기계공학부
E-mail : kimhd@andong.ac.kr

* 안동대학교 대학원 기계공학과

** 일본 큐슈대학 대학원 총합이공학 연구과

*** 경북대학교 기계공학과

의 관 출구로부터 방출되는 비정상 충격파의 상호 간섭에 대한 연구는 부족한 실정이다⁽⁶⁾.

따라서, 본 연구에서는 3 차원 TVD 법을 이용하여 두 평행한 관 출구로부터 방출되는 트윈 충격파의 전파특성에 관해서 조사하였으며, 얻어진 수치해석 결과를 이용하여 유동장을 가시화 하였다. 수치해석에서는 초기 충격파의 강도와 두 평행한 관 사이의 거리를 변화시켰다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 3 차원 비정상 압축성 Euler 유동 방정식에 Yee-Roe-Davis 의 TVD 법⁽⁷⁾을 적용하여 두 평행한 관 출구로부터 방출되는 트윈 펄스파의 전파특성을 해석하였으며, 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

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

위의 식 (1)에서 t 는 시간, ρ 는 기체의 밀도, u, v, w 는 각각 x 방향, y 방향, z 방향의 속도성분, p 는 압력을 나타낸다. 공기의 단위체적당 전에너지를 e 라고 하면, $e = p/(\gamma - 1) + 1/2 \cdot \rho(u^2 + v^2 + w^2)$ 으로 표현된다.

식 (1)은 다음과 같이 무차원 상태량으로 다시 쓰여진다.

$$t' = \frac{t}{(D/a_0)\sqrt{\gamma}}, \quad x' = \frac{x}{D}, \quad y' = \frac{y}{D}, \quad z' = \frac{z}{D}, \quad p' = \frac{p}{p_0}$$

$$\rho' = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad u' = \frac{u}{a_0/\sqrt{\gamma}}, \quad v' = \frac{v}{a_0/\sqrt{\gamma}}, \quad w' = \frac{w}{a_0/\sqrt{\gamma}}$$

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

2.2 계산영역 및 경계조건

Fig.1 은 계산영역과 경계조건을 나타낸다. 계산 영역은 높이와 폭이 D 인 두 평행한 관의 내부영역과 외부영역으로 구성되었다. 경계조건으로는 관의 입구에 유입조건, 하류경계에 유출조건, 관의 내부벽면과 외부벽면에 대해서 slip-wall 조건을 적용하였다. 초기조건으로는 관의 내부에서 마하수 M_s 를 갖는 초기 충격파가 관출구를 향해서 전파하여 대기중으로 방출되도록 설정하였다. 본 연구에서 초기 충격파 마하수 M_s 는 1.01 ~ 2.0, 두 평행한 관 사이의 거리 L 은 $1.5D \sim 3.0D$ 의 범위에서 수치계산을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 본 수치해석의 유효성

Fig.2 는 수치계산의 유효성을 검증하기 위하여

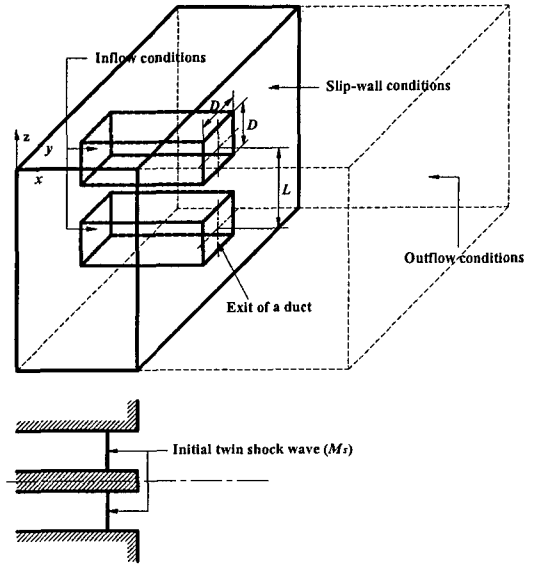
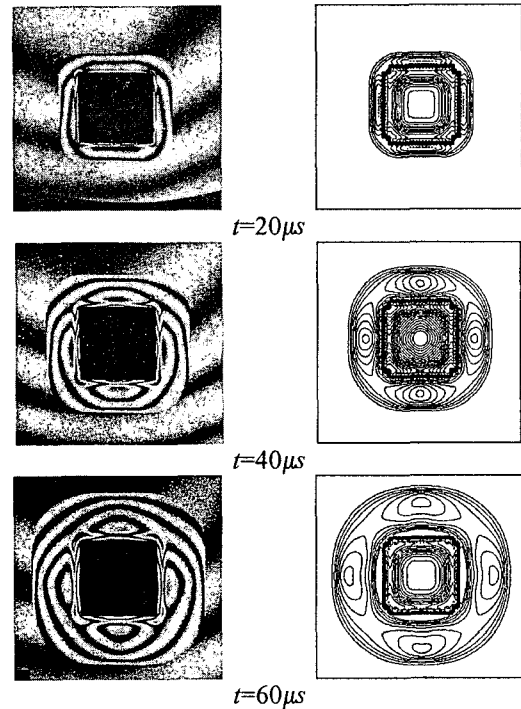
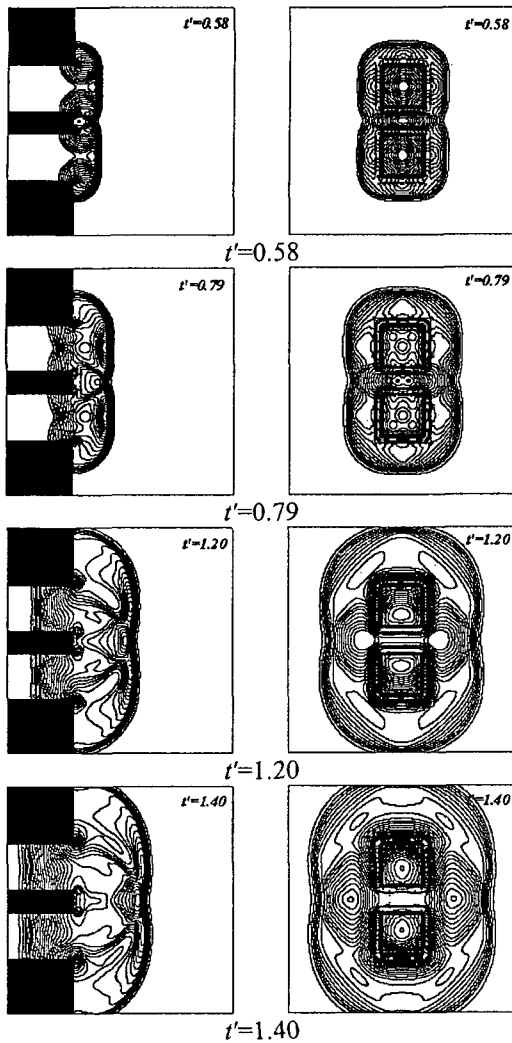


Fig.1 Computational domain and boundary conditions

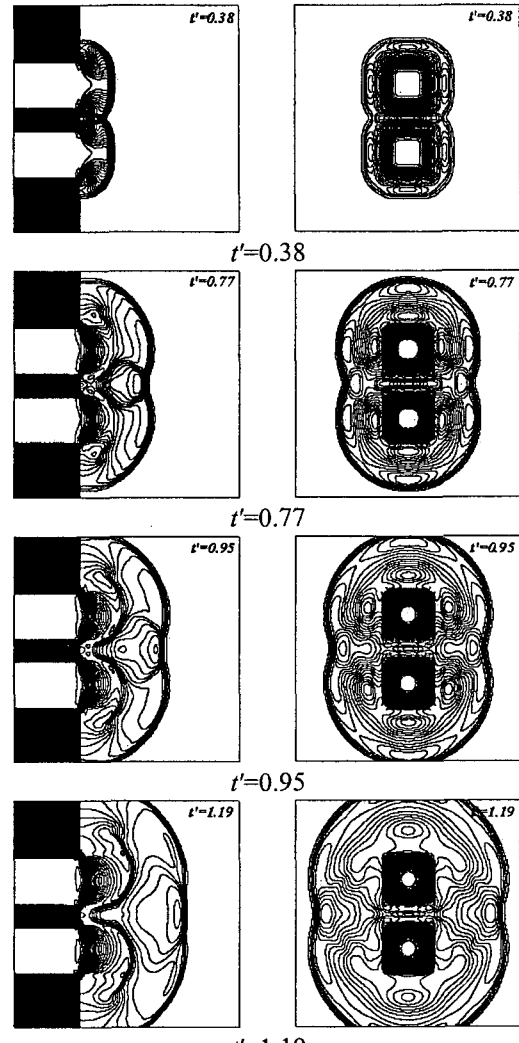


(a) Experiment (Ref.8) (b) Present CFD
Fig.2 Comparison of CFD results with experiment results

Jiang 등의 실험⁽⁸⁾결과와 본 수치계산 결과를 비교한 것이다. 초기 충격파의 마하수는 $M_s=1.29$ 이며, $t=20\mu s$ 일 때 충격파는 펄스파의 형태로 관출구로부터 방출하기 시작한다. 그림에서 외부의 사각형 루프는 펄스파를 나타내며, 내부의 사각형 루프는 관출구의 모서리와 면에서 발달하는 와류(vortex)를 나타낸다. 시간이 경과함에 따라 펄스파는 하류방향으로 전파한다. 실험결과와 비교할 때, 본 수치계산은 펄스파의 전파거동을 잘 예측한다.



(a) ZX-plane (b) XY-plane
Fig.3 Pressure contours ($M_s=1.1, L/D=1.5$)



(a) ZX-plane (b) XY-plane
Fig.4 Pressure contours ($M_s=2.0, L/D=1.5$)

3.2 트윈 충격파의 전파형태

Fig.3 은 $M_s=1.1$ 의 초기 충격파가 두 평행한 관 ($L/D=1.5$)의 출구로부터 방출될 때, 시간경과에 따른 트윈 충격파의 전파형태를 나타낸다. 무차원 시간 t' 는 초기 충격파가 관 출구에 도달하는 순간부터의 시간을 의미한다. $t'=0.58$ 일 때, 트윈 충격파는 두 평행한 관의 출구로부터 방출하기 시작하며, 출구의 모서리에서는 충격파의 회절, 와류 및 반사 팽창파가 발생한다. 시간이 경과함에 따라, 트윈 충격파는 펄스파의 형태로 하류로 전파하며, 상호간섭을 일으킨다. 이러한 상호간섭으로 인하여, 두 평행한 관의 대칭축 상에서 마하반사(Mach reflection)가 나타나며, 시간이 경과할수록 초기의 수직한 형태에서 둥근 형태로 바뀐다. $t'=1.40$ 일 때, 대칭축 상에서 반사된 충격파는 관 출구 근처에서 발달하는 와류와 간섭하며 복잡한 유동장을 형성한다. 한편, 관 출구의 모서리에서 발생한 반사 팽창파는 관의 상류로 전파한다.

Fig.4 는 $M_s=2.0$ 의 초기 충격파가 두 평행한 관

의 출구로부터 방출될 때의 전파형태를 나타낸다. Fig.3 의 약한 충격파의 경우에 비해, 대칭축 상에서 보다 강한 반사가 발생하며, 펄스파와 관 출구 사이의 큰 압력차이로 인해서 2 차 충격파(secondary shock wave)가 발생한다. 이러한 2 차 충격파는 관 출구 모서리에서 발생한 와류와 연결되며, 대칭축에서 반사된 충격파와 간섭하여 복잡한 유동장이 형성된다. 또한, $M_s=2.0$ 인 경우, 관 출구의 모서리에서는 $M_s=1.1$ 인 경우에 비해 강한 팽창파가 발생하지만, 팽창파는 관 출구면에서 유속이 음속에 도달하므로, 관의 상류로 전파되지 못한다.

Fig.5 는 $L/D=1.5$ 와 2.5 인 경우, 관 출구로부터 방출되는 트윈 펄스파의 전파형태를 나타낸다. 초기 충격파의 마하수는 $M_s=1.1$ 이며, 무차원 시간은 $t'=1.0$ 이다. 오른쪽 그림은 등압력 선도를 바탕으로 만들어진 조감도이다. 조감도에서 불룩하게 나타난 부분은 펄스파를 나타내며, 오목한 부분은 관 출구의 모서리에서 발생한 와류를 나타낸다.

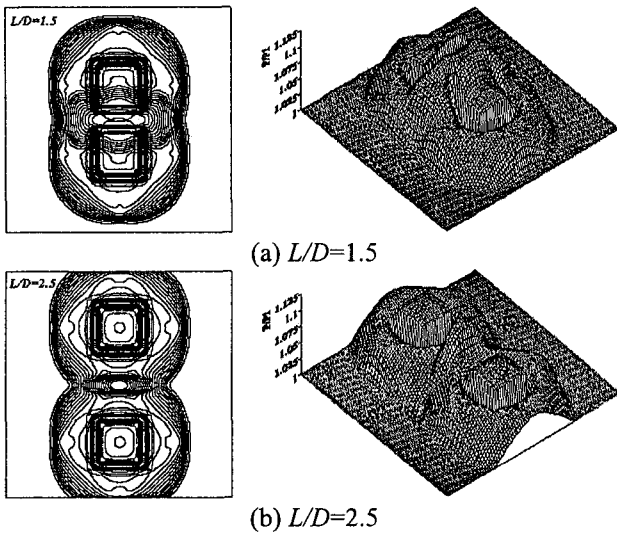


Fig.5 Pressure contours on XY-plane ($M_s=1.1$, $t'=1.0$)

두 평행한 관 출구로부터 방출된 트윈 충격파가 대칭축 상에서 교차할 때, 강한 압력상승이 발생하며, L/D 가 작은 경우가 더 복잡한 유동장이 형성된다.

3.3 대칭축 상에서의 압력변화

Fig.6 은 두 평행한 관의 대칭축을 따르는 피크 압력값의 분포를 나타낸다. 횡축의 x/D 는 관 출구로부터 대칭축을 따르는 거리이며, $x/D=0$ 은 관 출구를 의미한다. 피크 압력분포는 하류로 갈수록 점차적으로 상승하여 최대값을 가진 후, 감소하는 경향을 가진다. 초기 충격파의 마하수 M_s 가 증가할 때, 대칭축 상에서 트윈 펄스파의 교차로 인해서 더욱 강한 압력상승이 발생한다.

Fig.7 은 트윈 펄스파의 교차에 의해서 발생하는 대칭축상의 최대 압력값을 나타낸다. Fig.6 에 잘 나타나 있듯이, 일정한 L/D 에 대해서 최대 압력값은 M_s 가 증가할수록 커진다. 또한, 일정한 M_s 에 대해서 L/D 가 증가할수록 최대 압력값은 감소한다. 이것은 L/D 가 커질수록, 강도가 약해진 트윈 펄스파가 대칭축상에서 교차하기 때문이다.

4. 결 론

두 평행한 관 출구로부터 트윈 충격파가 방출될 때, 출구 근처에서는 충격파의 회절, 반사 충격파 및 와류의 발달, 대칭축상에서 트윈 충격파의 교차 등에 의해서 복잡한 유동장이 형성된다. 두 평행한 관의 대칭축 상에서 트윈 충격파의 교차로 인해서 마하반사 및 높은 압력상승이 발생한다. 대칭축 상의 최대 압력값은 초기 충격파의 마하수가 증가할수록, 두 평행한 관 사이의 거리가 가까울수록 크게 나타난다.

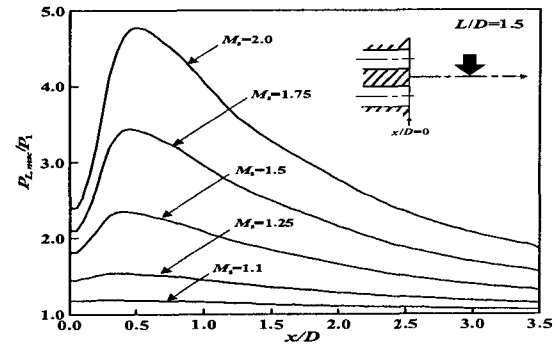


Fig.6 Peak pressure distribution along the symmetric axis between two-parallel ducts ($L/D=1.5$)

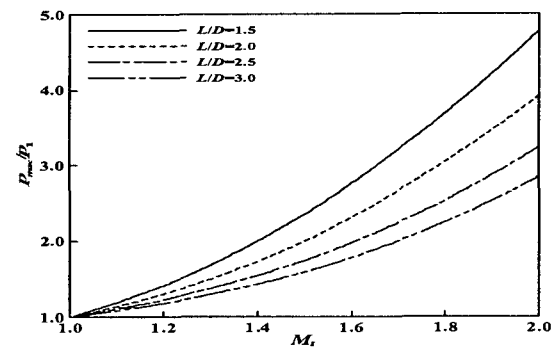


Fig.7 Maximum pressure vs M_s

참 고 문 헌

- 1) Rice, C. G., 1996, "Human Response Effects of Impulse Noise," J. Sound and Vibration., Vol.190(3), pp.525 ~ 543.
- 2) Raghunathan, S., Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1998, "Impulse Noise and Its Control," Prog. in Aerospace Sciences, Vol.34(1), pp.1 ~ 44.
- 3) Kentfield, J. A. C., 1993, Nonsteady, One-Dimensional, Internal, Compressible Flows (Theory and Applications), Chapter 7, Oxford University Press.
- 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) Moustafa, G. H., 1995, "Interaction of Axisymmetric Supersonic Twin Jets," AIAA J., Vol.33(5), pp.871 ~ 875.
- 6) Honma, H., Ishihara, M., Yoshimura, T., Maeno, K. and Morioka, T., 2003, "Interferometric CT Measurement of Three-Dimensional Flow Phenomena on Shock Waves and Vortices Discharged from Open Ends," Shock Waves, Vol.13, pp.179 ~ 190.
- 7) Yee, H. C., 1987, "Upwind and Symmetric Shock Capture Scheme," NASA TM-89464.
- 8) 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.