

다공관으로부터 방출되는 펄스파에 관한 연구

신현동[†] · 권용훈* · 김희동**

A Study of the Impulse Wave Discharged from a Perforated Pipe

Hyun Dong Shin, Yong Hun Kweon and Heuy Dong Kim

Abstract

When a shock wave discharges from an open end of a duct, an impulse wave is generated outside the duct, causing serious noise and vibration problems. The magnitude of the impulse wave can be reduced by installing of a perforated duct. In the current study, the characteristics of the impulse wave discharged from the exit of a perforated duct are numerically investigated. A TVD (total variation diminishing) scheme is used to solve the unsteady, axisymmetric, compressible Euler equations. In computations, the porosity of a perforated pipe (σ) and the Mach number of incident shock wave (M_s) are varied in the range of $\sigma=0\sim 19\%$ and $M_s=1.01\sim 1.50$, respectively. The results show that the directivity and magnitude of impulse wave strongly depend upon the Mach number of incident shock wave and the porosity of the perforated pipe. The present CFD results are in close agreement with experimental results.

Key Words : Compressible Flow(압축성 유동), Impulse Wave(펄스파), Perforated Pipe(다공관), Porosity(기공률), Shock wave(충격파), Unsteady Flow(비정상 유동)

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.

충격성 소음은 자동차의 배기관, 대포나 총기류,

차량의 공기 브레이크, 각종 플랜트의 배관계, 건설현장의 발파시공을 비롯한 고속철도 / 터널시스템 등과 같이 광범위한 분야에서 발생하며, 환경소음의 주된 요인이 되고 있다. 따라서, 현재까지 펄스파의 전파특성 및 소음저감 대책에 관한 많은 연구들이 실험적, 수치해석적으로 수행되어 왔다.⁽¹⁾

여러가지 충격성 소음저감 대책⁽²⁾ 중에서 배기형 소음기는 각종 고압 플랜트의 배관계, 도시가스의 blow-off 라인 및 자동차 엔진의 배기계에 이용되어 왔다. 배기형 소음기는 크게 다공관, 확장실 그리고 흡음형 격벽 등으로 구성되어 있다. 이들 중에서 다공관은 배기형 소음기의 핵심요소이며, 소음저감 효율을 높이기 위해서는 다공관에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 그러나, 아직까지 다공관이 충격성 소음저감에 미치는 영향에 대한 연구는 미비한 실정이다.

[†] 안동대학교 기계공학과 대학원
E-mail : kimhd@andong.ac.kr

* 일본 큐슈대학 총합이공학연구소

** 안동대학교 기계공학부

따라서 본 연구에서는 다공관 기공률의 변화가 다공관 출구로부터 방출되는 펄스파의 전파특성에 미치는 영향에 대해서 수치해석을 통하여 조사하였다. 수치계산 결과는 유용한 실험결과⁽³⁾와 비교하였으며, 얻어진 수치계산 결과를 이용하여 펄스파의 전파형태를 상세하게 가시화하였다.

2. 수치해석 방법

본 수치해석은 비정상, 축대칭, 압축성, Euler 유동방정식에 Harten-Yee's의 TVD 법⁽⁴⁾을 적용하여 수치해석을 수행하였다.

Fig.1은 다공관의 형상을 나타낸다. 그림에서 θ 는 관의 중심축에 대한 방위각, r/D 는 관출구로부터 임의의 지점까지의 거리 r 을 관직경으로 무차원한 값이다. 본 연구에서는 기공률 (σ)=0~19%범위의 4가지 경우에 대해서 수치계산을 수행하였다.

Fig.2는 본 수치해석에 적용된 계산영역, 경계조건 및 초기조건을 나타낸다. 계산영역은 관의 내부영역과 외부영역으로 구성되었으며, 중심축을 기준으로 유동장이 상하 대칭이므로, 수치계산은 상반부에 대해서만 수행하였다. 그림에서 다공관

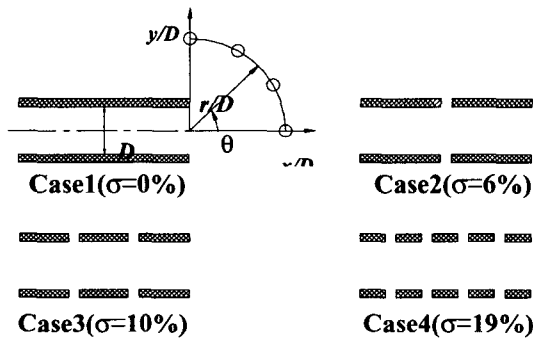


Fig.1 Geometries of the perforated pipe

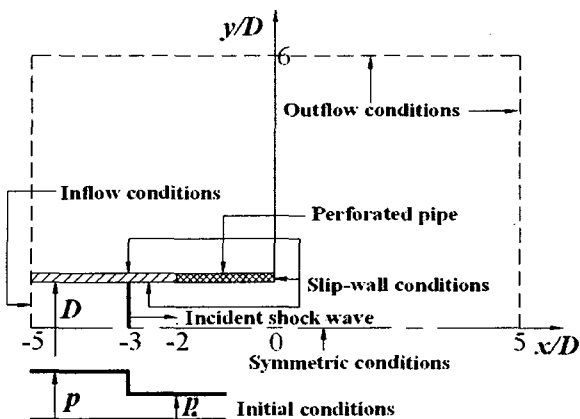


Fig.2 Computational domain and boundary conditions

의 길이는 $2D$ 로 설정하였다. 경계조건으로는 관의 입구에 유입조건, 모든 벽면에 대해서 slip-wall 조건, 하류경계에는 유출조건을 적용하였다. 초기 조건으로는 마하수 M_s 를 갖는 충격파가 $x/D=-3.0$ 에서 관출구를 향해서 전파하여 대기로 방출하도록 설정하였다. 초기 충격파의 마하수는 $M_s=1.01 \sim 1.50$ 까지 변화시켰다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3은 $\sigma=0\%$ 인 경우, 본 수치계산 결과와 실험결과⁽³⁾를 비교한 것이다. 횡축은 초기충격파 마하수 M_s , 종축은 펄스파의 피크압력 Δp_{max} 를 대기압 p_a 으로 무차원한 값 $\Delta p_{max}/p_a$ 를 나타낸다. 계산결과는 실험결과와 정성적으로 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

Fig.4는 기공률이 0%인 경우, 시간의 경과에 따른 펄스파의 전파형태를 나타낸다. 왼쪽 그림은 수치계산 결과로부터 얻은 쉘리엔 이미지이며, 오른쪽 그림은 등압력 선도를 바탕으로 만들어진 압력 조감도이다. $t^*=2.47$ 일 때, 관출구로부터 방출된 충격파의 일부는 펄스파로 대기중으로 방출되며, 나머지 부분은 반사 팽창파로서 관의 상류를 향해서 전파한다. 관 출구의 모서리에서 발생한 와류(vortex)는 시간이 경과할수록 더욱 발달한다.

Fig.5는 기공률이 6%인 경우, 다공관 출구로부터 방출된 펄스파의 전파형태를 나타낸다. $t^*=2.01$ 일 때, 충격파의 일부는 다공관을 통해서 대기중으로 방출되며, 나머지는 관의 출구를 향해서 전파한다. Fig.5(c)와 (d)에서 관찰할 수 있듯이, 다공관 및 관 출구 부근에서는 펄스파, 반사 팽창파 및 와류 등의 상호간섭에 의해서 복잡한 유동장이 형성된다. Fig.6과 Fig.7은 기공률이 각각 10%, 19%인 경우의 펄스파의 유동장을 나타낸 것이다.

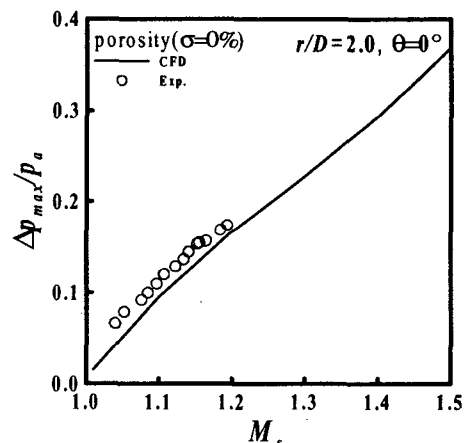


Fig.3 Comparison of the CFD results and experimental results ($r/D=2.0, \theta=0^\circ$)

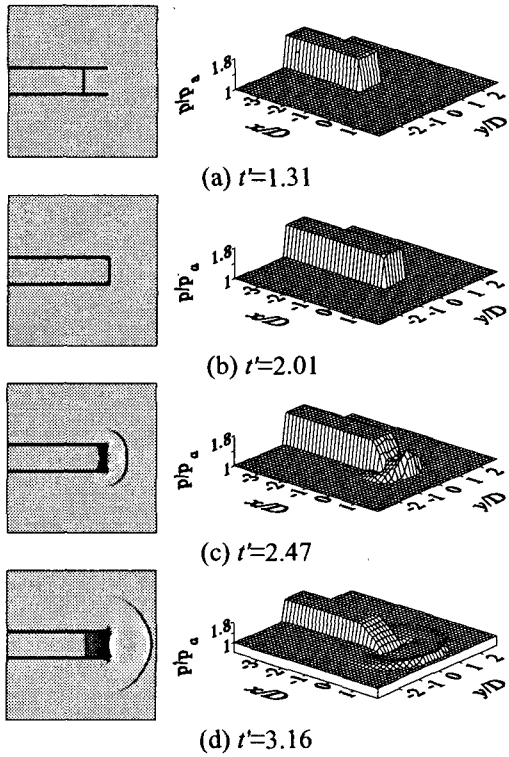


Fig.4 Computed Schlieren images and pressure contours($\sigma=0\%$, $M_s=1.3$)

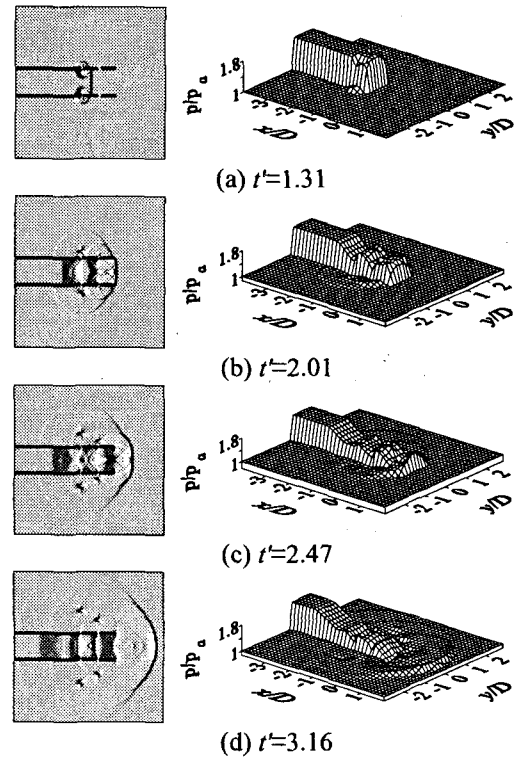


Fig.6 Computed Schlieren images and pressure contours($\sigma=10\%$, $M_s=1.3$)

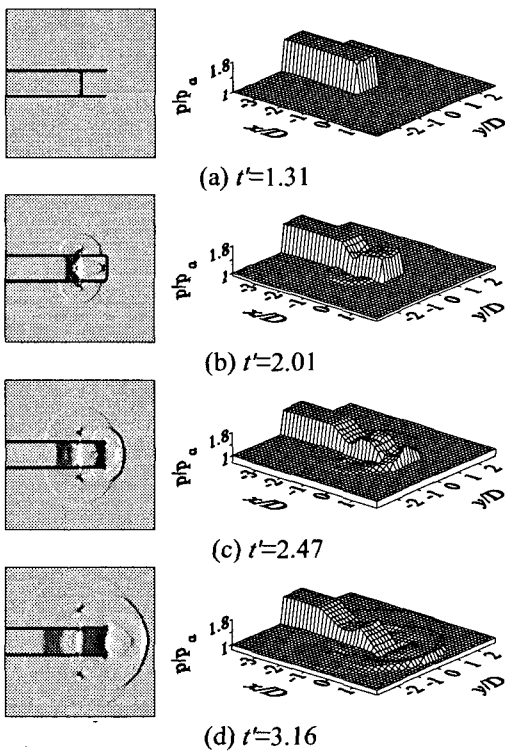


Fig.5 Computed Schlieren images and pressure contours($\sigma=6\%$, $M_s=1.3$)

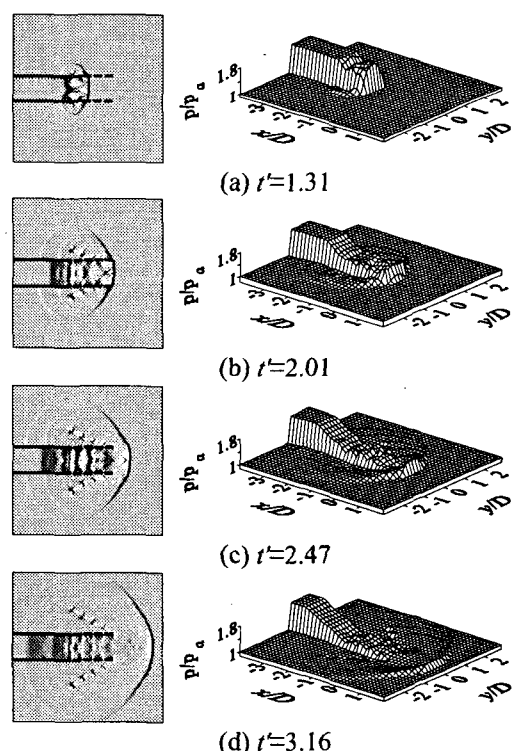


Fig.7 Computed Schlieren images and pressure contours($\sigma=19\%$, $M_s=1.3$)

그림으로부터 기공률이 클수록 더욱 복잡한 유동장이 형성되며, 관 외부뿐만 아니라 관 내부에서

도 각각의 기공에서 발생한 파동들이 강한 상호간섭을 일으킨다. 특히, 각각의 기공에서 발생한 복

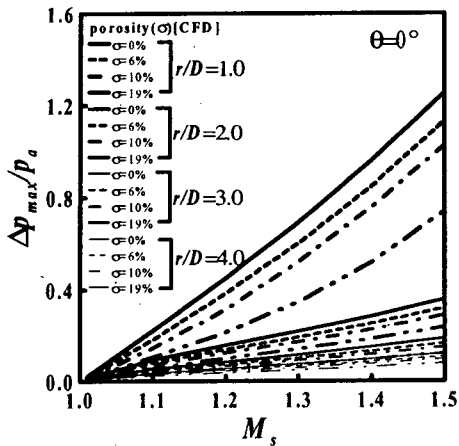


Fig. 8 Peak pressure of impulse wave vs M_s ($\theta=0^\circ$)

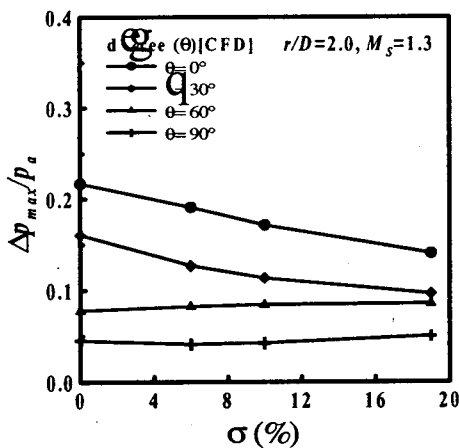


Fig. 9 Directivity of impulse wave vs porosity ($r/D=2.0, M_s=1.3$)

수의 와류들은 관의 대칭축에 대해서 약 150° 방향으로 대기 중으로 전파한다. Fig. 4 및 5의 기공률이 작은 경우와 비교할 때, 관의 중심축 방향으로 전파하는 펄스파의 강도가 많이 약화되어 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 8는 $\theta=0^\circ$ 인 경우, 초기 충격파 마하수 M_s 의 변화가 펄스파의 피크압력에 미치는 영향을 나타낸다. 주어진 기공률에 대해서, 펄스파의 피크압력은 초기 충격파 마하수 M_s 가 증가할수록 증가하며, 관출구로부터 거리 r/D 가 멀어질수록 감소한다. 동일한 M_s 와 r/D 에 대해서, 펄스파의 피크압력은 기공률 σ 이 커질수록 감소한다. 기공률이 펄스파의 피크압력에 미치는 영향은 다공관 출구로부터 거리가 멀어질수록 작아진다.

Fig. 9는 기공률이 펄스파의 지향성에 미치는 영향을 나타낸다. 동일한 기공률에 대해서, 펄스파의 지향성은 관의 중심축 방향으로 강하게 나타난다. 기공률이 증가할 때, 관 중심축 방향으로 펄스파의 지향성은 약화된다. 관 중심축에 대해서 $\theta=60^\circ$

이상의 방위각에서 기공률은 펄스파의 지향성에 거의 영향을 미치지 않는다. 이것은 Fig. 5~7에서 볼 수 있듯이, 다공관에서 방출된 펄스파 및 와류는 거의 관의 상류방향으로만 전파하기 때문이다.

4. 결 론

1. 본 수치계산 결과로부터, 다공관 출구 및 기공에서 방출되는 펄스파의 유동장을 가시화 할 수 있었다.
2. 주어진 기공률에 대해서, 펄스파의 피크압력은 초기 충격파 마하수 M_s 가 증가할수록 증가하며, 관출구로부터 거리 r/D 가 멀어질수록 감소한다.
3. 동일한 M_s 와 r/D 에 대해서, 펄스파의 피크압력은 기공률 σ 이 커질수록 감소한다. 기공률이 펄스파의 피크압력에 미치는 영향은 다공관 출구로부터 거리가 멀어질수록 작아진다.
4. 동일한 기공률에 대해서, 펄스파의 지향성은 관의 중심축 방향으로 강하게 나타난다. 기공률이 증가할 때, 관 중심축 방향으로 펄스파의 지향성은 약화된다.
5. 관 중심축에 대해서 $\theta=60^\circ$ 이상의 방위각에서 기공률은 펄스파의 지향성에 거의 영향을 미치지 않는다.

후 기

이 논문은 한국과학재단 2003년도 지역대학 우수과학자 지원사업(과제번호 : R05-2003-000-10003-0)에 의해 지원되었음.

참 고 문 헌

- 1) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1999, "Study of the Discharged of Weak Shocks from an Open End of a Duct," Jour. Sound and Vibration, Vol.226, No.5, pp.1011~1028.
- 2) Raghunathan, S., Kim, H.D. and Setoguchi, T., 1998, "Impulse Noise and Its Control," Progress in Aerospace Sciences, Vol.34, No.1, pp.1~44.
- 3) Heo, S.W., Je, H.S., Yang, S.Y. and Lee, D.H., 2003, "An Experimental Study on the Impulse Noise Emitted from the Exit of a Perforated Pipe," Proceedings of the KSME fall annual meetings, pp. 2066~2070.
- 4) Yee, H. C., 1987, "Upwind and Symmetric Shock Capturing Scheme," NASA TM-89464.