

# 관의 경사출구로부터 방출되는 펄스파의 전파특성

## Propagation Characteristics of the Impulse Wave Discharged from the Inclined Exit of a Pipe

이 동 훈<sup>†</sup> · 이 명 호\* · 권 용 훈\*\* · 김 희 동\*\*  
D. H. Lee, M. H. Lee, Y. H. Kweon and H. D. Kim

(2002년 7월 26일 접수 ; 2002년 11월 14일 심사완료)

**Key Words** : Compressible Flow(압축성 유동), Impulse Noise(충격성 소음), Impulse Wave(펄스파), Shock Tube(충격파관), Shock Wave(충격파), Unsteady Flow(비정상유동)

### ABSTRACT

The propagation of the impulse wave discharged from the inclined exit of a pipe is investigated through shock tube experiment and numerical computations. The pressure histories and directivities of the impulse wave propagating outside from the exit of pipe with several different configurations are analyzed for the range of the incident shock wave Mach number between 1.1 and 1.4. In the shock tube experiments, the impulse waves are visualized by a Schlieren optical system for the purpose of validation of computational work. Computations using the two-dimensional, unsteady, compressible, Euler equations are carried out to represent the experimented impulse waves. Computed Schlieren images predict the experimented impulse waves with a good accuracy. The results obtained show that for the radial direction the peak pressure of the impulse wave discharged depends upon the inclined angle of the exit of the pipe, but for the axial direction it is almost constant regardless of the inclined angle of the pipe exit.

### 1. 서 론

동력보일러나 도시가스의 블로우오프(blow-off)라인을 비롯한 자동차의 배기관내를 전파하는 압축파나 충격파가 관의 출구로부터 대기로 방출하게 되면 강력한 세기의 소음과 함께 펄스형의 강한 압력파를 발생하게 된다. 이 때 대기로 전파하는 압력파의 동적 거동이 펄스형태를 취하기 때문에 통상 펄스파라고 부르며, 펄스파에 의한 소음을 충격성 소음이라 한다.<sup>(1)</sup> 이와 같은 충격성 소음은 고압가스의 배관계와 자동차의 배기관뿐만아니라 대포나 총기류, 건설현장

의 발파시공 그리고 고속열차/터널시스템 등과 같은 광범위한 분야에서 발생되고 있으므로 이에 대한 저감대책 수립이 요구되고 있는 실정이다.<sup>(2)</sup>

충격성 소음의 저감대책은 피동장치를 이용하여 관내를 전파하는 압축파나 충격파의 압력구배를 완화시키거나 강도를 감소시키는 피동제어방식과 대기중으로 전파하는 펄스파에 대하여 역위상을 갖는 펄스파를 발생시켜 충격성 소음을 저감시키는 능동제어 방식으로 나눌 수 있다.<sup>(3)</sup> 지금까지 발표된 충격성 소음의 저감기술은 주로 대포나 총기류 그리고 고속철도/터널시스템을 대상으로 관출구나 관로에 다양한 피동장치를 장착하여 관출구로 방출되는 펄스파의 강도를 감소시키는데 연구의 초점이 맞추어져 왔다.<sup>(4-6)</sup> 그러나 피동장치가 부착되면 장치가 대형화되는 문제점이 뒤따르게 된다.

한편 피동장치의 부착없이 충격성 소음을 저감시키

<sup>†</sup> 책임저자, 정희원, 서울산업대학교 기계공학과  
E-mail : ldh@snut.ac.kr, Tel : 02-970-6331

\* 서울산업대학교 기계공학과

\*\* 안동대학교 기계공학과

기 위한 효과적인 대안으로는 펄스파의 지향성을 제어하는 방식<sup>(7)</sup>을 고려해 볼 수 있다. 실제의 산업현장에서는 방사소음의 전파방향을 제어하기 위하여 직관이나 곡관출구를 경사처리한 사례는 많으며, 대표적인 예로 발전용보일러나 도시가스의 blow-off라인 그리고 각종 화학플랜트의 고압가스 배관계를 들 수 있다. 그러나 관의 경사출구로부터 방출되는 펄스파에 관해서는 최근에 연구가 시작되어 극히 제한된 연구 결과만이 발표되었을 뿐이며,<sup>(8)</sup> 관출구의 경사정도에 따른 펄스파의 전파과정과 전파특성을 상세히 조사 연구한 문헌은 현재까지 발표된 바 없다. 이와 같은 연구동향을 감안해 볼 때 지금까지 산업현장에서 채택한 경사출구에 대한 실제적인 사례는 대부분 경험에 의존하여 설계된 것으로 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 관출구의 경사각을 변화시키면서 출구로 방출되는 펄스파의 전파과정, 동적거동 그리고 지향성 등을 실험과 수치해석을 통하여 조사하고자 한다. 실험은 충격파관의 출구에 경사진 관을 부착하여 펄스파의 압력과형을 측정하였으며, 또한 쉘리렌 광학장치를 이용하여 펄스파의 전파과정을 전파시간대별로 가시화하였다. 수치해석은 Harten-Yee의 TVD법<sup>(9)</sup>을 이용하여 2차원 비정상 압축성 오일러 방정식을 계산하였다. 특히 펄스파의 지향성과 전파과정을 명확히 이해하고 규명하기 위하여 전파방향별로 펄스파의 피크압력을 계산하였으며, 또한 계산결과를 쉘리렌/샤도우그래프로 변환하여 얻은 쉘리렌 영상결과를 쉘리렌 광학장치로 가시화한 결과와 전파시간대별로 상호대비시켜 고찰하였다.

## 2. 수치계산

수치계산은 2차원 비정상 압축성 Euler 방정식에 Harten-Yee의 TVD법<sup>(9)</sup>을 적용하여 Fig. 1에 도시된 유동장을 수치계산하였으며 지배방정식은 다음과 같다.

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

여기서,

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

식 (1)에서  $t$ 는 시간,  $\rho$ 는 기체의 밀도,  $u$ 와  $v$ 는 각각  $x$ 방향과  $y$ 방향의 속도성분,  $\gamma$ 는 공기의 비열비,  $p$ 는 압력을 나타낸다. 또 공기의 단위체적당 전 에너지를  $e$ 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)의 각 물리량은 다음과 같은 무차원 상태량으로 다시 쓰여진다.

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

$$t' = \frac{t}{\sqrt{\gamma} D / c_a}, \quad p' = \frac{p}{p_a}, \quad \rho' = \frac{\rho}{\rho_a}, \quad e' = \frac{e}{p_a} \quad (3)$$

식 (3)에서  $c$ 는 음속, 상첨자 ( $'$ )는 무차원량 그리고 하첨자 ( $a$ )는 관내를 전파하는 충격파 전방의 정지기체 상태인 대기상태를 의미한다.

수치계산의 계산영역과 경계조건을 도식적으로 나타낸 Fig. 1의 유동장에서 유입유동의 초기조건은 충격파 방출로 상류측으로 되돌아 오는 팽창파를 감안하여 출구경사면의 중심점을 기준으로 하여  $x/D = -3$ 인 지점으로 하였으며, 이 지점에서 압력진폭  $p/p_a$ 인 초

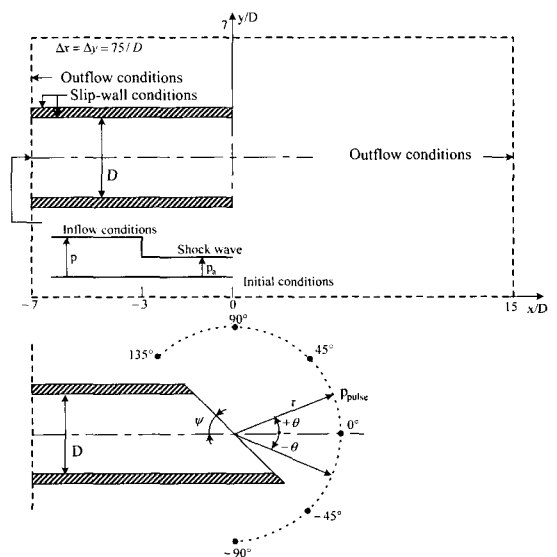


Fig. 1 Computational flow field and boundary conditions

기충격파가 관의 출구단을 향하여 전파하는 것으로 가정하였다. 초기충격파의 전파마하수  $M_s = 1.1 \sim 1.4$  범위로 하였다. 또한 계산영역은 도시된 유동장에서 보듯이 출구면의 중심점을 기준하여  $x/D = -7$ 인 위치를 수치계산의 상류경계 그리고  $x/D = 15$ 와  $y/D = 7$ 을 각각  $x$ 와  $y$ 방향의 하류경계로 설정하였다. 이 때 상류경계에서는 유입유동조건, 하류경계에서는 유출유동조건 그리고 모든 고체벽면에서는 slip-wall조건을 적용하였다. 계산격자는  $\Delta x = \Delta y = 75/D$  크기인 정렬격자 870,000개를 생성하여 수치계산하였다.

한편 Fig. 1의 경사면에 표시된 관출구의 경사각도  $\psi$ 는 중심축을 기준하여  $45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  그리고  $90^\circ$ 로 하였다. 경사출구로부터 방출되는 펄스파의 압력파형은 경사면의 중심점으로부터 관축방향으로  $x/D = 1, x/D = 2$  그리고  $x/D = 3$ 인 지점에서 구하였다. 지향성은 경사면의 중심점으로부터  $x/D = 2$ 인 위치에서 중심축을 기준하여  $\theta = 0^\circ \sim 135^\circ$  (단변쪽)와  $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$  (장변쪽)방향으로 전파하는 펄스파 피크압력을 계산하여 구하였다. 특히 관출구로부터 방출되는 펄스파의 전파과정에 대한 쉐리렌 영상결과는 수치계산값을 쉐리렌/샤도우그래프로 변환하여 구하였다.

### 3. 실험

실험장치는 Fig. 2와 같이 경사출구를 갖는 관의 부착이 용이하도록 제작된 대기 개방형 충격파관을 이용하였다.

충격파관은 안지름 66 mm인 원형강관이며, 고압실 및 저압실의 길이는 각각 1620 mm와 2150 mm이다. 저압실과 고압실 사이에 위치한 격막재료로는 두께 0.03 mm인 셀로판 시트를 사용하였다. 고압실은 압축된 건조공기로 충전되어 있고 격막을 파막시키기 위한 격침이 장착되어 있다.

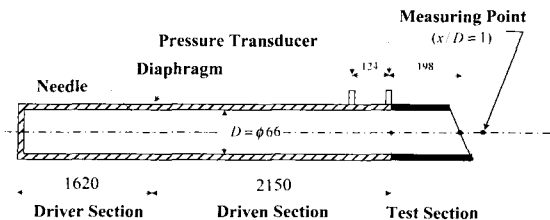


Fig. 2 Experimental apparatus and inclined exits

압력센서(PCB pressure transducer 112A21)는 파막시에 관내에서 발생한 충격파의 강도  $p/p_0$ 와 충격파 전파마하수  $M_s$ 를 구하기 위하여 출구경사면의 중심점으로부터 상류방향의 198 mm와 322 mm 위치에 설치하였다. 또 펄스파의 압력파형은 경사출구각  $\psi = 45^\circ$ 와  $\psi = 90^\circ$ 인 관의 중심점으로부터 관축방향( $\theta = 0^\circ$ )으로  $x/D = 1$ 인 위치에서 측정하였다. 압력센서로부터 얻어진 모든 출력신호는 직류증폭기를 거쳐 증폭된 후 파형기록장치에 기록되고 동시에 컴퓨터에 저장된다. 한편 경사출구로 방출된 펄스파의 전파과정에 대한 가시화 실험은 쉐리렌 광학장치를 이용하였다. 펄스파의 전파과정을 전파시간별로 정확하게 촬영하기 위해서 경사면의 중심점으로부터 상류방향  $x/D = -3$ 의 위치에 설치된 압력센서로부터 검출된 신호를 쉐리렌 광학장치에 연결하여 트리거신호로 사용하였다. 이 때 관내를 전파하는 충격파가  $x/D = -3$ 인 위치에 도달하는 순간의 시간  $t$ 를 전파 시간 0으로 취하였다. 또 펄스파의 압력파형 측정과 가시화 실험은 충격파 전파마하수  $M_s = 1.2$ 인 조건에서 수행하였다.

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 충격파 전파마하수  $M_s = 1.2$ 인 조건에서 관출구가 수직인 관(경사각  $\psi = 90^\circ$ )으로 방출된 펄스파의 전파과정을 구한 쉐리렌 영상결과와 쉐리렌 광학장치로 촬영한 실험결과를 전파시간대별로 비교하여 도시한 것이다. 상단에 도시한 결과는 실험결과

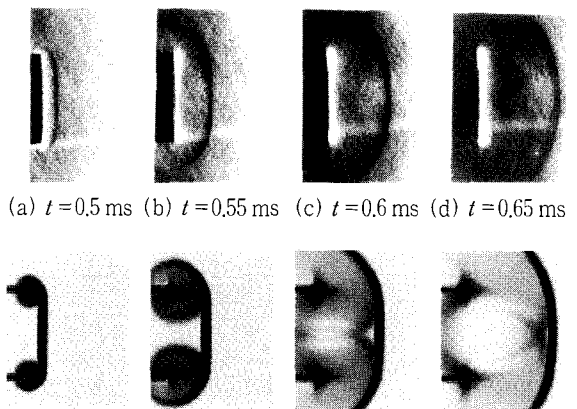


Fig. 3 Experimented and computed Schlieren images ( $M_s = 1.2$  and  $\psi = 90^\circ$ )

를 그리고 하단에 도시한 결과는 수치계산으로 구한 쉐리렌 영상결과이다.

먼저 하단에 도시된 쉐리렌 영상결과를 보면 관출구 양쪽모서리에서의 팽창파 발생으로 펄스파의 파면이 회절되기 시작하며, 전파초기에는 평면파형태로 전파되다가 시간이 지남에 따라 점차 구면파형태의 파형으로 전환되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 파동전파과정을 쉐리렌 광학장치로 촬영한 실측결과와 전파시간대별로 상호비교해 보면 두 결과는 거의 일치된 전파과정을 갖는다.

Fig. 4는 충격파 전파마하수  $M_s = 1.2$ 인 조건에서 경사각  $\psi = 45^\circ$ 인 관출구로 방출된 펄스파의 전파과정을 수치계산한 쉐리렌 영상결과(좌측)와 쉐리렌 광학장치로 촬영한 실측결과(우측)를 전파시간대별로 비교하여 도시한 것이다.

Fig. 4(a)에 도시된  $t = 0.45$  ms일 때의 쉐리렌 영상결과를 보면 관내의 충격파가 관출구의 위쪽(단변)

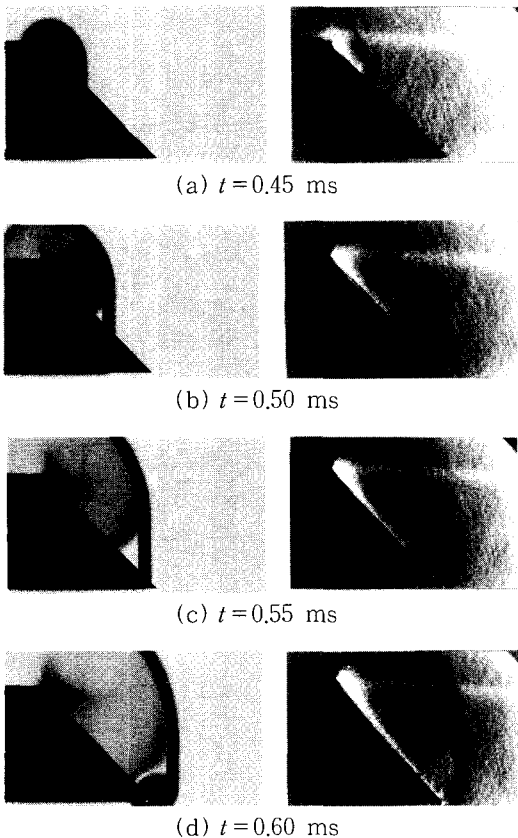


Fig. 4 Experimented and computed Schlieren images ( $M_s = 1.2$  and  $\psi = 45^\circ$ )

모서리에 먼저 도달하므로서 단변모서리에서 발생한 팽창파에 의해 펄스파의 파면이 회절되기 시작한다. 또 이 펄스파는 시간이 지남에 따라 점차 하류로 전파되어 관출구의 아래쪽(장변)모서리에 이르게 되면 모서리에서 또 다시 팽창파가 발생하게 되어 펄스파의 파면이 재차 회절되기 시작한다. 이와 같은 펄스파의 전파과정에 대한 쉐리렌 영상결과는 쉐리렌 광학장치로 가시화한 실험결과와 매우 잘 일치한다.

Fig. 5는 충격파 전파마하수  $M_s = 1.2$  그리고 전파시간  $t = 0.65$  ms 인 조건에서 관출구의 경사각을 변화시키면서 펄스파의 전파형태를 수치계산한 쉐리렌 영상결과이다. 도시된 결과에서 관내의 충격파가 대기로 방출되어 펄스파형으로 전환되는 과정에서 관의 아래쪽(장변)과 위쪽(단변)모서리에서의 팽창파 발생으로 펄스파의 파면이 회절되어 전파하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 파동전파현상은 관출구의 경사각 크기에 크게 의존하게 된다.

즉 Fig. 5(a)와 같이 출구경사각이 작은 경우는 장변모서리보다 단변모서리에서 더 일찍 팽창파가 발생하게 됨에 따라 펄스파의 파면이 장변보다 단변의 위쪽방향으로 더 크게 회절되어 펄스파의 중심이 단변쪽으로 편향되어 전파된다. 이와 같은 파동전파현상은

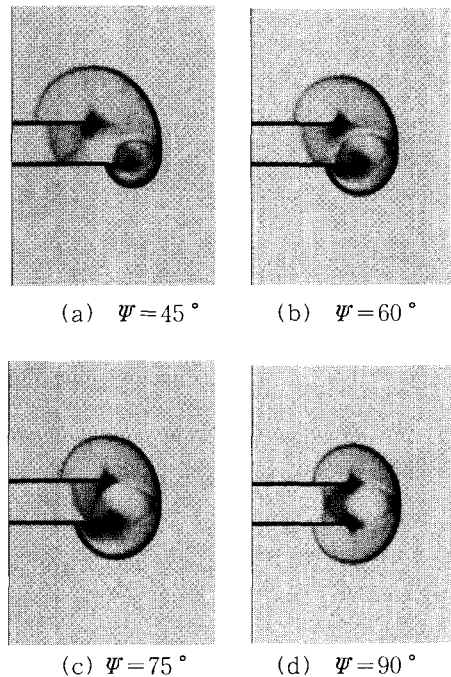


Fig. 5 Computed Schlieren images ( $M_s = 1.2$  and  $t = 0.65$  ms)

관출구의 경사가 수직에 가까워질수록 장변과 단변의 길이차가 적어지게 되므로 단변방향을 향하는 펄스파의 전파중심이 점차 관축방향으로 이동하게 된다. 마침내 장변과 단변의 길이차가 없는 Fig. 5(d)와 같이 관출구가 수직으로 되면 관의 양쪽모서리에서 동시에 발생한 팽창파로 인해 펄스파는 정확히 축대칭형태로 관축방향을 향해 전파하게 된다.

Fig. 6은 출구경사각  $\psi=45^\circ$  그리고 전파시간  $t=0.60$  ms인 조건에서 관내를 전파하는 충격파의 전파마하수를 변화시키면서 펄스파의 전파형태를 구한 실험 영상결과이다. 그림결과에서 보듯이 충격파의 전파마하수가 증가할수록 Fig. 5에서와 같이 펄스파의 파면이 단변의 위쪽방향으로 더 강하게 회절되어 전파하는 것을 볼 수 있다. 또 동일한 전파시간에서 충격파 전파마하수가 증가할수록 펄스파가 더 멀리 전파하게 되고 세기도 더 강하게 되는 파동현상을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 충격파 전파마하수  $M_s=1.2$ 인 조건에서 경사출구로부터 방출되는 펄스파의 압력파형을 수치 계산하여 실측값과 비교한 것이다.

결과의 종축은 펄스파의 압력  $p_{pulse}$ 를 대기압  $p_a$ 로 무차원화한 압력진폭을 그리고 횡축의  $t$ 는 전파

시간을 의미한다. 또 펄스파의 압력파형을 구한 위치는 경사면의 중심점으로부터 관축방향으로  $x/D=1$ 인 지점이다.

실측결과만을 보면 관출구의 경사각이 다르더라도 펄스파의 동적거동은 거의 비슷한 경향을 나타내며, 다만 피크압력값의 크기만이 달라진다. 이것은 앞서 제시된 펄스파의 전파과정에 대한 실험 영상결과에서도 보았듯이 관출구의 경사각에 따라 펄스파의 지향특성이 달라지기 때문이다. 또 계산결과와 실측결과를 비교해 보면 피크압력값에 대한 계산값과 실측값은 거의 일치하지만, 정점에 이르는 상승시간과 정점 이후의 시간영역에서의 압력진폭 크기는 계산값과 실측값간에 차이를 보인다.

Fig. 8은 각기 다른 경사각을 갖는 관출구로부터 방출된 펄스파를 전파방향별로  $r=2D$ 에서 지향성을 수치계산한 결과이다. 종축은 펄스파의 피크압력  $p_{max}$ 을 대기압  $p_a$ 로 무차원화한 압력진폭을 나타내며, 횡축은 충격파 전파마하수를 나타낸다. Fig. 8(a)는 중심축을 기준하여  $\theta=0^\circ \sim 135^\circ$ (단변쪽)방향으로 전파하는 지향성 결과이며, Fig. 8(b)는 중심축을 기준하여  $\theta=0^\circ \sim -90^\circ$ (장변쪽)방향으로 전파하는 지향성 결과이다.

먼저 Fig. 8(a)를 보면 관축방향으로 전파하는 펄스파는 관출구 경사각의 변화와 관계없이 거의 동일한 피크압력값을 갖지만, 반경방향으로 전파하는 펄스파의 피크압력은 관출구 경사각에 좌우된다. 즉 반경방향에서는 관출구의 경사각이 작은 경우가 큰 경우보다 펄스파의 피크압력값이 더 높다.

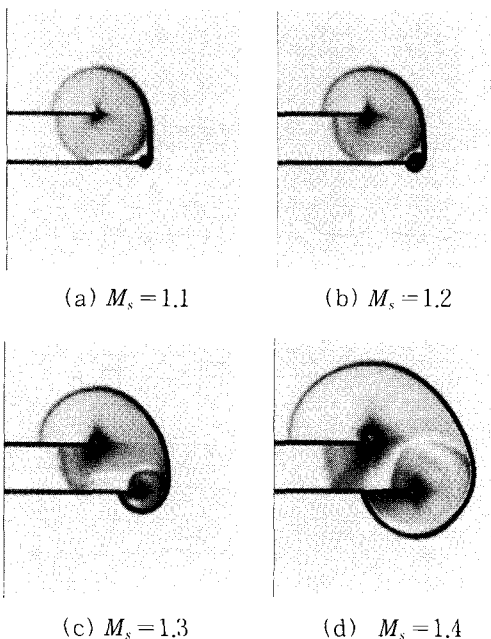


Fig. 6 Computed Schlieren images ( $\psi=45^\circ$  and  $t=0.60$  ms)

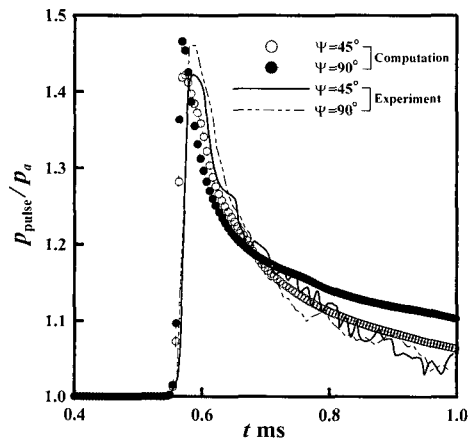
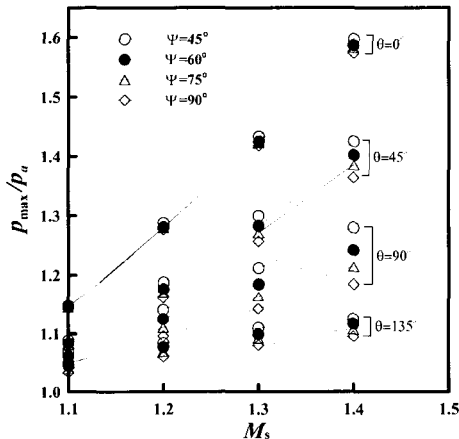
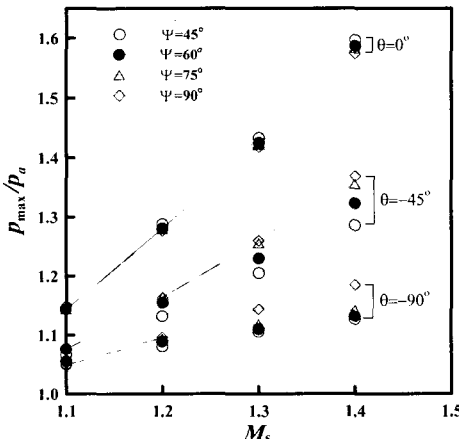


Fig. 7 Pressure histories at  $x/D=1$  ( $M_s=1.2$ )

그러나 Fig. 8(b)의 결과에서는 Fig. 8(a)의 결과와는 대조적으로 관출구 경사각이 클수록 펄스파의 피크압력값이 더 높아진다. 이와 같이 관중심축을 기준하여 정반대의 지향특성을 보이는 것은 관출구로 방출되는 펄스파가 경사출구의 장변과 단변의 길이차이(관출구의 경사각 차이)의 영향을 받기 때문이다. 즉 Fig. 5의 결과에서 보듯이 장변과 단변의 길이차가 작아질수록 단변방향으로 전파하는 펄스파 영역은 점차 감소하는 반면에, 장변방향으로 전파하는 펄스파 영역은 오히려 증가하게 된다. 이와 같은 지향성 추세는 충격과 전파마하수가 낮은 경우에는 큰 차이가 없으나, 전파마하수가 높아질수록 더욱 뚜렷한 차이를 나타낸다.



(a)  $\theta = 0^\circ \sim 135^\circ$



(b)  $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$

Fig. 8 Peak pressure variations for different Mach numbers ( $x/D = 2$ )

## 5. 결 론

(1) 경사출구로 전파하는 펄스파의 전파과정에 대한 수치계산결과를 쉘리렌/사도우그래프로 변환하므로 펄스파의 파동전파현상을 명확하게 파악할 수 있었으며, 또 쉘리렌 영상결과는 실험으로 구한 가시화결과와 정확히 일치하였다.

(2) 경사출구의 장변과 단변의 길이차가 커질수록 장변모서리보다 단변모서리에서 더 일찍 팽창파가 발생하게 되어 펄스파의 파면이 단변의 위쪽방향으로 더 크게 회절되면서 펄스파의 중심이 단변쪽으로 편향되어 전파한다. 그러나 장변과 단변의 길이차가 없는 직관의 경우는 관의 양쪽모서리에서 동시에 발생한 팽창파로 인해 펄스파는 정확히 축대칭형태로 관 축방향으로 전파한다.

(3) 제 2)항에서 언급한 펄스파의 전파특성 때문에 관축방향으로 전파하는 펄스파의 피크압력은 관출구의 경사각이 변화하더라도 거의 같은 크기의 압력값을 갖는 반면에, 반경방향으로 전파하는 펄스파의 피크압력은 관출구 경사각에 크게 의존한다.

## 참 고 문 헌

- (1) 이동훈, 김희동, 강성황, 2000, "관출구로부터 방출하는 약한 충격파의 평판충돌에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 10 권, 제 6 호, pp. 1035~1040.
- (2) 이동훈, 김희동, 이명호, 박종호, 2002, "관출구로부터 방출하는 펄스파 특성에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 1 호, pp. 48~56.
- (3) Rauhunathan, S., Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1998, "Impulse Noise and Its Control," Progress in Aerospace Science, Vol. 34, pp. 1~44.
- (4) Stollery, J. L., Phan, K. C. and Garry, K. P., 1981, "Simulation of Blast Fields by Hydraulic Analogy," Proceedings of 13<sup>th</sup> International Symposium on Shock Tubes and Waves, pp. 781~789.
- (5) 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.

(6) Setoguchi, T., Kim, H. D., Yu, S. and Raghunathan, S., 1999, "Passive Control of an Impulsive Wave Using a Cavity/Helical Vane System," Jr. of Thermal Science, Vol. 8, No. 1, pp. 1~8.

(7) 이동훈, 김희동, Setoguchi, T., 2001, "곡관출구로부터 방출되는 펄스파의 특성에 관한 실험적 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 9호, pp.

406~413.

(8) Suzuki, K. and Takayama, K., "Motion of a Shock Wave Emitted from a Staggered Open-end of a Shock Tube," Proceedings of Shock Wave Symposium, pp. 39~42.(in Japanese)

(9) Yee, H.C., 1987, "Upwind and Symmetric Shock Capturing Schemes," NASA TM-9464.