

〈논 문〉

수직평판에 충돌하는 펄스파에 관한 실험적/수치해석적 연구

Experimental and Computational Studies of the Pulse Wave Impinging upon a Vertical Flat Plate

이 동 훈* · 김 희 동** · 강 성 황***

D.H. Lee, H.D. Kim and S.H. Kang

(2000년 10월 31일 접수 : 2001년 2월 28일 심사완료)

Key Words : Compressible Flow(압축성 유동), Impulsive Noise(충격성소음), Pulse Jet(펄스제트), Pulse Wave(펄스파), Shock Wave(충격파), Unsteady Flow(비정상 유동), Shock Tube(충격파관)

ABSTRACT

The impingement of a weak shock wave discharged from the open end of a shock tube upon a flat plate was investigated using shock tube experiments and numerical simulations. Harten-Yee Total Variation Diminishing method was used to solve axisymmetric, unsteady, compressible flow governing equations. Experiments were carried out to validate the present computations. The effects of the flat plate and baffle plate sizes on the impinging flow field over the flat plate were investigated. Shock Mach number was varied in the range from 1.05 to 1.20. The distance between the plate and shock tube was changed to investigate the effect on the peak pressure. From both the results of experiments and computations we obtained a good empirical equation to predict the peak pressure on the flat plate.

1. 서 론

관내를 전파하는 압축파나 충격파가 관의 출구로부터 대기로 방출하게 되면 강력한 세기의 소음과 함께 펄스형태의 강한 압력파를 발생하게 된다.⁽¹⁾ 이 때 대기로 전파하는 압력파의 동적거동이 펄스형태를 취하기 때문에 통상 펄스파라고 부르며, 펄스파에 의한 소음을 충격성 소음이라 한다. 충격성 소음은 지속시간이 짧으면서 피크압력이 매우 높기 때문에 주변 생태계나 인체에 나쁜 영향을 미치게 되는 물론이거니와 심한 경우 주변 구조물의 진동과파까지도 야기시킬 수 있다. 따라서 충격성 소음에 대한 저감대책이 절실히 요구되고 있는 실정이며⁽²⁾ 아울러 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.^(3,4)

한편 이와 같은 펄스파에 기인한 충격성 소음문제의 해

결과는 별도로 최근에 반도체를 비롯한 각종 물체표면에 부착된 불순입자 제거기술⁽⁵⁾ 및 펄스제트 필터장치⁽⁶⁾ 등과 같이 펄스파를 이용한 산업기기의 개발이 주목받고 있다. 이 때문에 종래의 충격성 소음만을 감소시킬 목적으로 관내에서의 압축파나 충격파의 전파특성을 파악하거나 강도를 감소시키려는 것과는 정반대의 연구가 요구되고 있다. 즉 펄스파를 이용한 각종 산업기기의 개발과 관련하여 펄스파의 강도증강과 함께 펄스파 전파에 대한 물리적 이해와 충돌면상의 유동장특성을 규명하기 위한 연구가 중요한 공학적 과제로 부상하고 있다.

펄스파에 관한 지금까지의 연구결과에 의하면 관 외부에서 형성되는 펄스파는 관출구로 방출되는 압축파나 충격파의 특성에 의하여 결정되며, 관 출구로부터 원거리장에 위치한 펄스파는 거리가 두배로 증가함에 따라 그 강도가 반으로 감소한다는 것이 잘 알려져 있다.⁽⁷⁾ 또한 관출구로부터 방출된 매우 강한 충격파가 구조물과 간섭하는 경우에 발생하는 반사 및 회절특성에 관한 연구결과도 발표된 바 있다^(8~10). 그러나 펄스파를 이용한 실용적 응용기기를 개발하는데는 두가지 측면에서의 연구, 이를테면 매우 강한 펄스파를 발생시킬 수 있는 펄스장치의 개발⁽¹¹⁾ 그리고 대

* 정희원, 서울산업대학교 기계공학과

E-mail : Idh@duck.snut.ac.kr

Tel : (02) 970-6331, Fax : (02) 949-1458

** 안동대학교 기계공학과

*** 카톨릭 상지대학 Automobile Division

기중으로 전파하는 펄스파의 파동특성과 충돌면상에서의 유동장특성을 규명한 상세한 연구정보가 필요하다. 특히 이 중에서 펄스파가 구조물에 충돌하여 반사될 때까지의 파동특성과 충돌면상에서의 유동장특성에 대한 정보는 펄스기기의 설계나 성능을 평가함에 있어서 대단히 중요하다. 이와 관련하여 최근에 저자들⁽¹²⁾은 관출구로부터 약한 충격파가 평판에 충돌하는 경우 평판상에 형성되는 피크압력값은 관출구와 평판사이에서 발생하는 파동특성에 의존한다는 연구결과를 제시한 바 있다. 저자들의 선행연구는 관출구에 부착된 배플판과 하류측에 놓인 수직평판의 크기가 충격파관 지름에 비하여 20배 이상의 크기를 갖는 무한 평판에 관한 것으로서 펄스파가 하류에 놓인 수직평판에 충돌하여 반사될 때까지의 전파형태와 피크압력값을 실측하고 수치계산결과와 비교 분석한 것이었다. 그러나 선행연구에서는 평판크기가 펄스파의 파동특성과 평판상의 유동장특성에 미치는 효과에 대해서는 검토하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 선행연구에서 다루지 못했던 평판의 크기변화가 펄스파의 파동특성 및 평판상의 유동장특성에 미치는 효과를 파악하고자 한다. 이를 위해 평판크기를 다양하게 변화시키면서 펄스파가 수직평판에 충돌하여 반사될 때까지의 파동특성 그리고 충돌시 평판상에서 발생하는 유동장특성을 실측하고 수치계산결과와 비교 검토하였다. 또한 충격파관의 출구에 설치된 배플판의 크기가 평판상의 유동장특성에 미치는 영향에 대해서도 조사하였다. 수치계산에서는 비정상 압축성 유동방정식에 TVD 유한차분법을 적용하였으며, 실험은 대기개방형 충격파관을 이용하였다.

2. 실험

관단으로 방출되는 펄스파를 생성하기 위하여 Fig. 1과 같이 한쪽 끝이 대기에 개방되어 있는 대기개방형 충격파관을 이용하였다. 충격파관은 관경 $D=66$ mm인 원형 충격파관으로서 고압실과 저압실의 길이는 각각 1620 mm와 2150 mm이다. 관출구로부터 방출된 펄스파의 전파특성 그리고 하류측에 위치한 평판상의 유동장특성에 배플판과 평판크기가 미치는 영향을 조사할 목적으로 충격파관의 출구면에 부착된 지름 D_e 인 배플판은 $D_e/D=1.0\sim 20.0$ 그리고 하류측에 설치된 지름 D_p 인 수직평판의 크기는 $D_p/D=0.1\sim 20.0$ 의 범위에서 크기가 조절된다. 배플판의 크기가 충격파관의 지름 D 에 비하여 20배 이상의 크기를 갖는 경우에는 무한플랜지로 간주하여 결과그림에 $D_e/D=\infty$ 로 표기하였다. 또한 충격파관의 출구면과 하류측에 놓인 수직평판까지의 거리 L 는 충격파관 지름을 기준하여

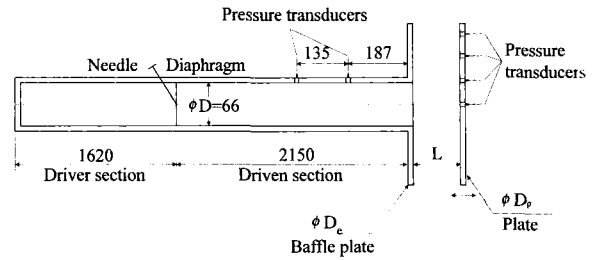


Fig. 1 Schematic diagram of test rig

$L/D=0.5\sim 4.0$ 범위에서 이동되도록 하였다.

실험은 대기압보다 약간 높은 압력의 건조공기가 충전된 고압실과 대기압 상태의 저압실사이에 위치한 격막(두께 0.03 mm의 셀로판막)을 파막시켜 저압실내로 전파하는 충격파를 발생하게 된다. 이 경우 고압실과 저압실의 벽면에는 수개의 압력측정용 정압공을 뚫어 상승시간(rise time)이 매우 짧은 고성능 압력센서(pressure transducer, PCB 112A21)를 설치하였다. 특히 관의 출구로부터 187 mm 및 322 mm 지점에 설치한 압력센서의 출력신호를 이용하여 충격파의 전파마하수 M 을 구하였다. 또한 충격파관 하류에 위치한 수직평판상에 충돌하는 펄스파의 순간압력을 측정하기 위하여 관중심축을 기준하여 $r/D=0$, $r/D=0.5$, $r/D=1$ 그리고 $r/D=2$ 의 위치에 압력센서를 설치하였다. 사용한 압력센서는 실험전후에 각각 동적/정적검정을 통하여 오차를 확인하였으며, 그 결과 고압실에서의 측정오차는 거의 무시할 수 있었으나, 저압실내를 전파하는 충격파와 평판에 충돌하는 펄스파의 순간압력 측정치에는 약 2%의 오차를 포함하였다. 압력센서에서 얻어진 모든 출력신호는 직류증폭기를 거쳐 파형기록 장치에 저장되며 수차례의 반복실험을 통하여 재현성을 확인하였다. 한편 충격파관 출구로 방출되는 펄스파를 가시화하기 위하여 쉐리렌법을 이용하였다. 쉐리렌 장치는 고속카메라와 연결하여 임의시간에 발생하여 전파하는 펄스파의 가시화를 가능하도록 하였다.

3. 수치계산

수치계산은 Fig. 2에 도식적으로 나타낸 유동장조건에 대하여 무차원화된 비정상 축대칭 압축성 유동방정식에 TVD 유한차분법⁽¹³⁾을 적용하여 펄스파의 파동특성과 충돌면상의 유동장을 계산하였다.

계산에서 관경 D 인 충격파관의 내부를 전파하는 충격파가 관출구를 향하여 전파한다고 가정한다. 이 때 발생한 펄스파는 충격파관의 출구로부터 거리 L/D 위치에 있는 수직평판에 충돌하여 반사하게 된다. 이와 같은 유동장에 대하여 다음과 같이 쓰여지는 비정상 축대칭 압축성 유동

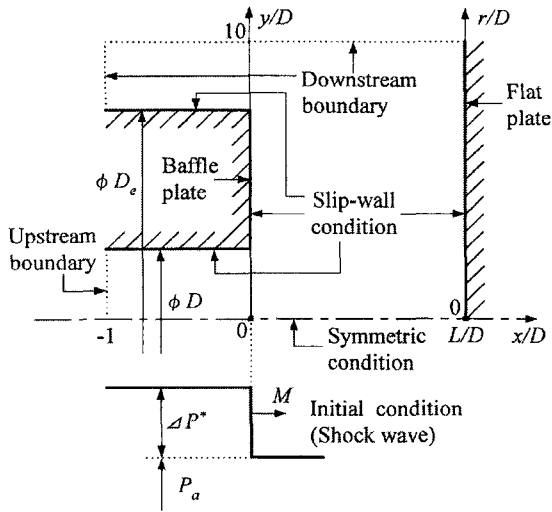


Fig. 2 Computational flow field and boundary conditions

방정식에 Harten-Yee의 TVD법을 적용하여 수치해를 구하였다.

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

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

$$G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e+p)v \end{bmatrix}, \quad H = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (e+p)v \end{bmatrix}$$

여기에서 t 는 시간, ρ 는 기체의 밀도, u 와 v 는 각각 축방향(x) 및 반경방향(r)의 속도성분, p 는 압력이다. 또 e 는 단위체적당 전에너지이며, 공기의 비열비 γ 를 사용하여 표현하면 다음 식과 같다.

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \quad (3)$$

한편 관내를 전파하는 충격파 전방의 정지기체의 상태 (하첨자 1)량으로 각 상태량들을 무차원화하면 다음 식으로 쓰여진다.

$$x' = \frac{x}{D}, \quad r' = \frac{r}{D}, \quad u' = \frac{u}{a_1 \sqrt{\gamma}}, \quad v' = \frac{v}{a_1 \sqrt{\gamma}}$$

$$t' = \frac{t}{\sqrt{\gamma D/a_1}}, \quad p' = \frac{p}{p_1}, \quad \rho = \frac{\rho}{\rho_1}, \quad e' = \frac{e}{p_1}$$

여기에서 a 는 기체의 음속이며, 위의 식들을 사용하여 식 (1)을 변형하면, 식 (2)의 각 물리량에 첨자를 붙인 식 (1)과 같은 형태의 보존식이 얻어진다.

한편 수치계산에 적용된 경계조건들은 Fig. 2와 같다. 충

격파관의 내부 $L/D = -1$ 지점을 수치계산의 상류경계로 설정하여, 초기 충격파강도를 ΔP^* 로 가정하였다. 수치계산에서 반경방향의 하류경계는 초기충격파의 강도에 따라 다소 변화는 있으나, 관중심축으로부터 $20D$ 정도로 설정하였으며 유출조건이 적용되었다. 또한 관출구면과 하류측에 놓인 수직평판까지의 거리 및 충격파의 전파마하수는 각각 $L/D = 0.5 \sim 4.0$ 그리고 $M = 1.05 \sim 1.20$ 범위에서 단계적으로 변화시키면서 평판상의 반경방향과 축방향에서의 펄스파의 피크압력 ΔP_m 을 계산하였다. 이때 모든 고체벽면에는 slip-wall조건을 적용하였으며, 대칭성을 고려하여 중심축을 기준으로 하여 상반부만을 계산영역으로 취하였다. 수치계산시에 계산격자는 $\Delta x = \Delta y = D/70$ 인 정방형 격자로 하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 관출구로부터 방출된 펄스파의 전파형태를 가시화한 셀리렌 사진과 이와 동일한 무차원시간 t' 에서 수치계산으로부터 얻어진 등밀도선도를 나타낸 것이다.

그림에 표기된 t' 는 파막후에 형성되는 충격파가 측정점(관출구로부터 187 mm지점)을 통과한 무차원 시간을 의미한다. 또 관출구로부터 하류에 위치한 수직평판은 배플판의 크기 ($D_e/D = 20$)와 동일하다. 도시된 결과에서 Fig. 3(a)는 펄스파가 관출구로부터 방출된 직후의 상태 ($t' = 0.212603$)이며, Fig. 3(b)는 펄스파가 평판으로부터 반사한 직후의 상태 ($t' = 0.460638$)를 나타낸다. Fig. 3(a)에서는 관중심부분에서 실린더형의 펄스파와 관모서리부분에서 회절하는 파동을 관찰할 수 있다. 또 Fig. 3(b)에서는 평판으로부터 반사한 구면형에 가까운 펄스파를 관찰할

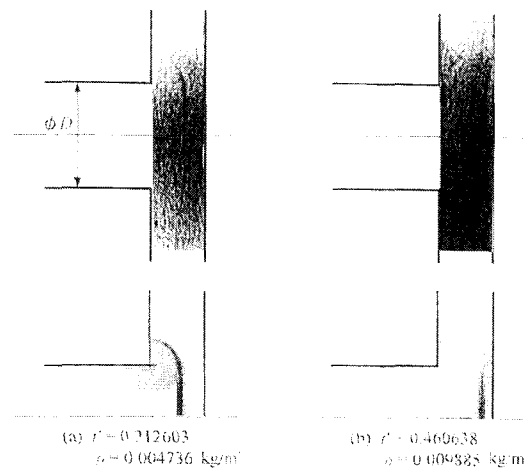


Fig. 3 Flow visualization and computed iso-density contours ($L/D = 0.5$, $D_e/D = 20$, $M = 1.07$)

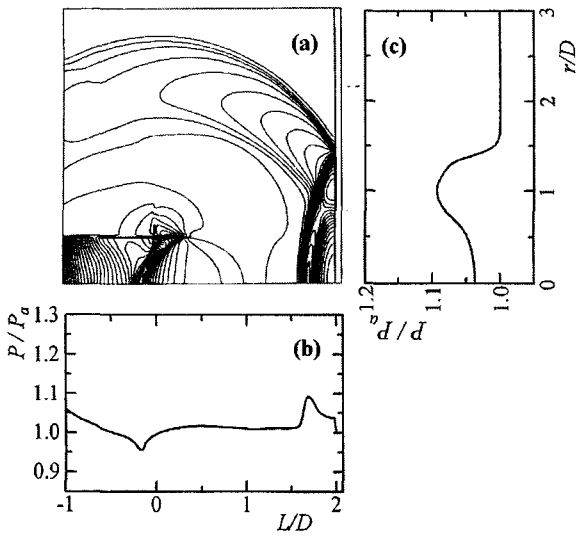


Fig. 4 Pressure variations along the tube axis and on the flat plate ($L/D=2.0$, $D_p/D=1.0$, $M=1.1$)

수 있다. 수치계산에서도 실측한 펄스파를 잘 예측하는 것으로 보인다.

Fig. 4는 Fig. 3과 같은 크기의 수직평판에 펄스파가 충돌하여 반사된 후의 유동장의 압력분포를 수치계산한 결과이다. 이때 배플판의 크기는 $D_p/D=1$, 즉 배플판이 관출구에 부착되지 않은 경우이다. 결과에서 Fig. 4(a)는 펄스파의 압력분포를 2차원 등압선으로 나타낸 것이며, Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 각각 축방향과 반경방향에서의 압력값을 대기압 P_a 로 무차원화시킨 압력진폭값으로서 비교분석이 용이하도록 Fig. 4(a)의 결과에 각각 대응시켰다.

먼저 Fig. 4(a)에서 평판에 충돌한 펄스파가 평판상의 $r/D=1.5$ 정도의 위치에서 정상반사되는 것을 볼 수 있다. 이러한 반사형태는 충격파역학 이론에서도 잘 알려진 바와 같이 경사충격파 혹은 곡면형의 충격파가 고체벽면으로부터 반사하는 경우에 나타나는 충격파 반사의 일반적인 형태이다. 또한 충격파관 출구부근에서는 회절하는 펄스파의 반사영향으로 다소 복잡해진 파동현상을 관찰 할 수 있다. Fig. 4(b)의 축방향의 압력분포를 나타낸 결과에서는 $L < 0.2D$ 범위에서 팽창파의 전파로 인한 팽창유동의 발생으로 압력이 점진적으로 감소함을 볼 수 있다. 그러나 $0.2 < L/D < 1.6$ 범위에서는 관출구에서부터 발생하는 회절파의 영향으로 인하여 압력이 약간 증가한 후, 수직평판을 향해 전파하는 펄스파 배후의 유동으로 인하여 압력이 거의 일정하게 유지된다. $L > 1.6D$ 영역에서는 반사펄스파로 인해 압력값이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 반사펄스파의 영향은 Fig. 4(c)에 제시된 평판상의 반경방향 압력분포에 대한 결과에서도 분명하게 확인할 수

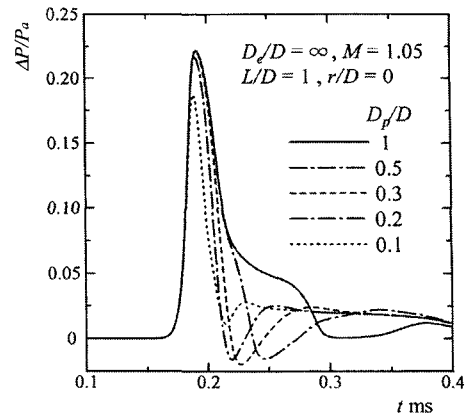


Fig. 5 Effect of the flat plate diameter on the peak pressure at the center of flat plate

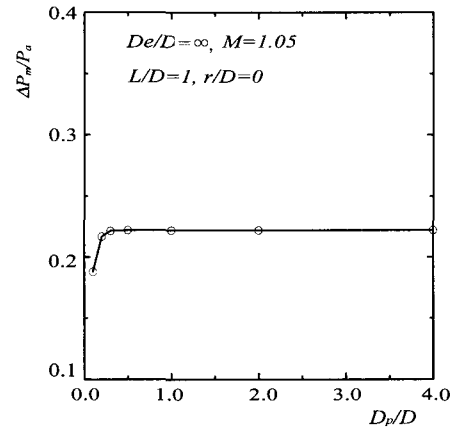


Fig. 6 Relationship between the peak pressure and flat plate diameter

있다. 즉 결과에서 평판중심점으로부터 벗어난 $r/D=1.0$ 부근에서의 압력이 충돌면 중심에서의 압력값보다 오히려 더 높게 되는 것이 이를 증명해 주고 있다. 대기압을 기준하여 $r/D=1.0$ 부근에서는 10 % 정도 그리고 충돌면 중심에서의 압력은 대기압보다 약 4 % 정도 높다.

Fig. 5는 각기 다른 크기의 평판에 펄스파가 충돌할 때의 평판중심점에서의 압력변화값을 시간축에 대하여 비교 도시한 것이다. 그림의 종축은 펄스파의 압력 ΔP 를 대기압 P_a 로 무차원화시킨 압력값이다. 평판중심에서의 압력값은 펄스파가 평판으로부터 반사한 직후부터 급격히 증가하여, 피크값에 도달한 뒤에 다시 급격하게 감소하는 형태를 보인다. 충돌한 펄스파의 압력거동이 평판크기에 따라 각기 다르게 되는 것은 평판의 크기가 유한한 경우 평판모서리에서 발생한 반사파가 평판상의 유동장에 강하게 영향을 미치기 때문이다. 그러나 이러한 반사파의 영향을 받는 평판중심점에서의 피크압력값은 평판이 일정이상의 크기로

되면 그 영향이 점차 반감된다. Fig. 6의 결과에서 평판중심의 피크압력값에 미치는 평판크기의 한계가 제시된다.

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 조건에서 구한 평판중심에서의 피크압력값 ΔP_m 을 평판크기에 대하여 도시한 것이다. 평판지름이 $D_p/D < 0.3$ 인 경우에는 평판중심에서 발생하는 피크압력값은 평판의 크기가 증가할수록 증가하지만, 평판크기가 $D_p/D > 0.3$ 범위에서는 평판크기의 영향은 전혀 나타나지 않는다. 이것은 평판의 크기가 $D_p/D > 0.3$ 조건이 되면 평판모서리에서 발생한 파동이 유동장에 미치는 영향은 거의 없다는 것을 의미한다. 따라서 평판중심의 유동장을 고찰할 때는 $D_p/D > 0.3$ 이상의 크기를 갖는 평판을 무한평판으로 간주할 수 있으며, 이하부터 제시되는 결과는 평판크기가 무한평면인 $D_p/D = \infty$ 조건에서 수행한 연구결과들이다.

Fig. 7은 배플판의 크기에 따른 평판중심에서의 압력변화를 시간축에 대하여 도시한 결과로서, 그림의 종축은 Fig. 5와 마찬가지로 대기압 P_a 로 무차화시킨 압력값을 뜻한다. 그림 (a)는 평판을 관출구 가까이 위치시킨 $L/D = 0.5$ 일 때이고, 그림 (b)는 관출구에서 다소 떨어진 $L/D = 2$ 에 위치시킨 경우이다. 특히 펄스파의 전파거리에 따른 시간차 때문에 각 그림의 횡축에 제시된 시간구간을 다르게 표시하였다. 두 결과에서 보듯이 배플판의 크기를 달리하더라도 평판중심에서의 피크압력값의 차이는 나타나

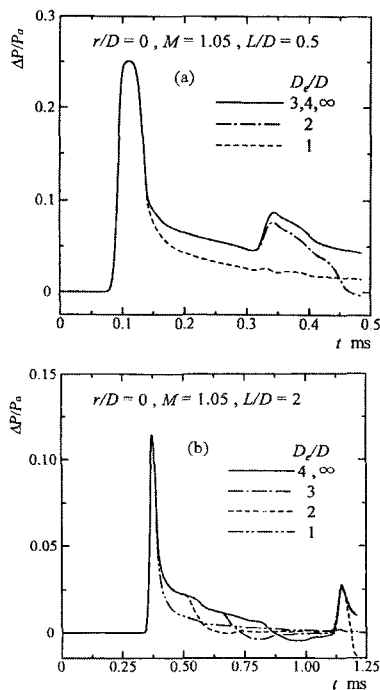


Fig. 7 Effect of the baffle plate diameter on the peak pressure at the center of flat plate

지 않는다. 다만 일정시간이 경과되고 난 뒤에야 배플판의 영향이 유동장에 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이러한 배플판의 영향은 펄스파의 동특성을 고찰한 선행연구⁽¹²⁾의 관점에서 고려해 볼 때 평판중심을 벗어난 위치에서도 이와 유사한 펄스파의 동적거동이 나타날 것으로 예상된다.

Fig. 8은 배플판의 크기가 $D_p/D = 1$ 인 조건에서 평판이 $L/D = 0.5$, $L/D = 1$ 및 $L/D = 2$ 에 위치할 때 마다 평판의 반경방향 지점에서 실측한 펄스파의 피크압력값을 충격파의 전파마하수에 대하여 나타낸 것이다. 이 때 그림의 종축은 평판상의 피크압력값 ΔP_m 을 충격파의 과잉압력 ΔP^* 로 무차원화시킨 압력진폭값이다. 먼저 평판위치 $L/D = 0.5$ 인 Fig. 8(a)의 결과를 보면 평판중심에서의 피크압력값은 충격파의 전파마하수가 커질수록 증가하게 되지만, 평판중심으로부터 벗어난 위치에서의 피크압력값은

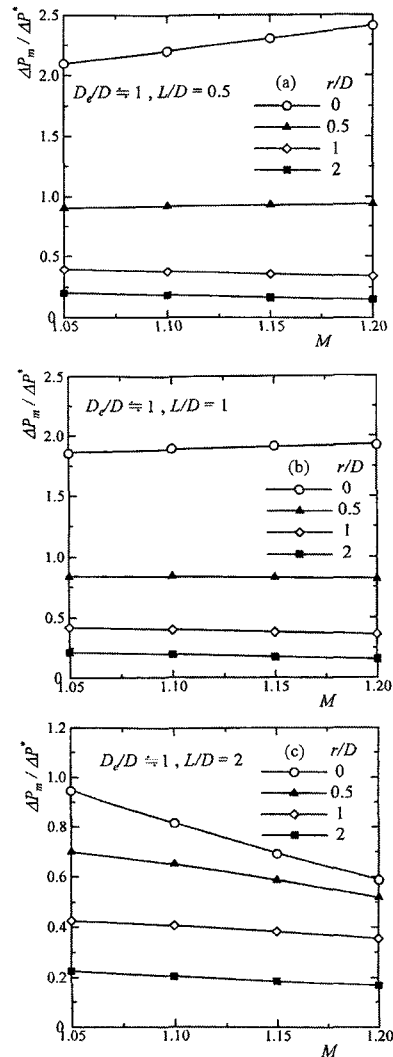


Fig. 8 Relationship between non-dimensional peak pressure and shock Mach number

거의 변화하지 않거나 오히려 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 경향은 평판위치가 $L/D=1$ 인 Fig. 8(b)의 결과에서도 관찰할 수 있지만 평판중심의 피크압력값이 Fig. 8(a)만큼 증가하지는 않는다.

그러나 평판을 하류측으로 더 멀리 위치시킨 $L/D=2$ 인 Fig. 8(c)의 결과에서는 평판상의 모든 지점에서 실측한 피크압력값이 충격파의 전파마하수가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 특히 이 결과에서 충격파 전파마하수에 따른 피크압력값의 감소율은 평판중심에서 가장 크며, 중심으로부터 벗어날수록 감소율이 작아진다.

이상의 토의결과로부터 평판중심에서의 피크압력값은 충격파의 전파마하수 M 과 평판위치인 L/D 의 함수로 그리고 평판중심으로부터 벗어난 위치에서의 피크압력값은 평판중심에서의 피크압력값과 중심점으로부터 반경방향까지의 거리인 r/D 의 함수로 정리할 수 있다. 이들 함수관계를 이용하여 평판중심부인 $r/D=0$ 지점과 평판중심부를 벗어난 임의의 r/D 위치에서의 펄스파의 무차원 압력진폭값을 구할 수 있는 경험식을 구하면 각각 다음과 같다.

$$\left(\frac{\Delta P_m}{P_a}\right)_{r/D=0} = 0.10 M^{10.322} \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{-1.110} \quad (4)$$

$$\left(\frac{\Delta P_m}{P_a}\right)_{r/D} = 0.31 \left(\frac{\Delta P_m}{P_a}\right)_{r/D=0} \cdot \left(\frac{r}{D}\right)^{-0.85} \quad (5)$$

참고로 식 (4)는 참고문헌 (12)의 경험식에 비하여 더 한층 개선된 경험식임을 밝혀둔다.

Fig. 9는 각기 다른 L/D 조건에서 측정된 평판중심에서의 피크압력값을 식 (4)의 경험식을 이용하여 구한 결과값과 대비시킨 것이다. 결과에서 보듯이 본 연구에서 측정된 모든 측정값들은 충격파의 전파마하수 M 과 평판위치를 나타내는 L/D 의 함수로 잘 정리되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 평판중심을 벗어난 위치에서 측정된 피크압력값을 경험식 (5)를 이용하여 구한 결과값과 대비시킨 것이다. 이 결과에서도 평판상의 임의위치에서의 압력진폭값

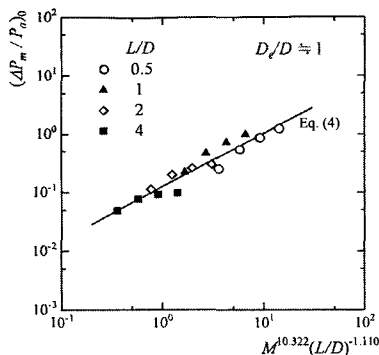


Fig. 9 Correlation of the peak pressures at the center of flat plate

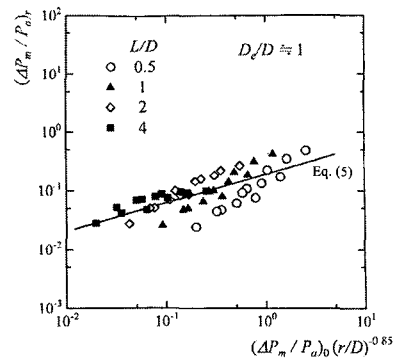


Fig. 10 Correlation of the peak pressures on the flat plate

$(\Delta P_m/P_a)_r$ 는 평판중심에서의 압력진폭값 $(\Delta P_m/P_a)_0$ 과 반경방향 거리인 r/D 의 함수로 잘 근사화됨을 알 수 있다. 이상의 결과로 미루어 볼 때 식 (4)와 식 (5)는 평판중심점을 비롯한 평판상의 모든 지점에서의 피크압력값을 손쉽게 예측할 수 있는 아주 유용한 경험식이라 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 평판크기가 펄스파의 파동특성 및 평판상의 유동장특성에 미치는 효과를 규명한 것으로서 펄스파가 수직평판에 충돌하여 반사될 때 까지의 파동특성 그리고 충돌시 평판상에서 발생하는 유동장특성을 실측하고 수치계산결과와 비교 검토하였다. 또한 충격파관의 출구에 설치된 배플판의 영향에 대해서도 조사하였다. 연구를 통하여 규명된 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 평판중심의 피크압력값은 평판크기가 작은 경우에만 평판모서리에서 발생하는 반사파의 영향을 받지만, 평판크기가 충격파관 지름의 0.3배 이상이 되면 평판모서리에서 발생하는 파동의 영향을 거의 받지 않는다. 또한 관출구에 부착된 배플판의 크기변화는 평판중심에서의 피크압력값에 전혀 영향을 주지 않는다.

(2) 평판상에 충돌한 펄스파의 피크압력에 대한 실측값과 수치계산값을 이용하여 평판중심점을 비롯한 평판상의 모든 지점에서의 피크압력값을 예측할 수 있는 매우 유용한 경험식을 도출하였다. 경험식의 적용범위는 $L/D=0.5 \sim 4.0$ 그리고 $M=1.05 \sim 1.20$ 이다.

(3) 하류측에 위치한 수직평판과 관출구에 부착된 배플판의 크기를 각기 다르게 한 상태에서도 펄스파가 평판에 충돌할 때 발생하는 파동현상과 평판상의 유동장특성을 수치계산으로 잘 예측할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Kim,H.D. and Setoguchi,T., 1999, "Study of the Discharge of Weak Shocks from an Open End of a Duct," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 226, No. 5, pp. 1011~1028.
- (2) Raghunathan,S. and Kim,H.D., 1998, "Impulse Noise and Its Control," *Progress in Aerospace Sciences*, 34(1), pp. 1~44.
- (3) Kim,H.D. and Setoguchi,T., 1996, "Experimental Study on Reduction of Impulsive Noise Generating at Exit of High-Speed Railway Tunnel," *KSME Journal, Series B*, Vol. 20, No. 7, pp. 2375~2385(in Korean).
- (4) Kim,H.D. and Setoguchi, T., 1997, "Passive Control of Unsteady Compression Wave Using Vertical Bypass Ducts," *KSME Journal, Series B*, Vol. 21, No. 9, pp. 1095~1104(in Korean).
- (5) 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.
- (6) Morris,W.J., 1984, "Cleaning Mechanisms in Pulse Jet Fabric Filters," *Proc. of the Filtration Society, Filtration and Separation*, 21, pp. 52~54.
- (7) Kashimura,H., Kim,H.D. and Setoguchi, T., 1999, "Emission of a Propagating Shock Wave from an Open End of a Tube," *JSME Journal*, Vol. 65, No. 633, pp. 161~167.
- (8) Kim,H.D. and Setoguchi,T., 2000, "Weak Shock Reflection from an Open End of a Tube with Baffle Plate," *AIAA Journal*, in press.
- (9) Bazhenova,S.A., Golub,V.V., Shulmeister,A.M., Bormotova,T.A., Bazarov,S.B. and Pichugin, S.V., 1995, "The Interaction of a Shock Wave Discharged from the Open End of a Shock Tube with a Flat Plate," *Proc. 20th International Symposium on Shock Waves*, Vol. 1, July.
- (10) Kim,H.D. and Setoguchi,T., 2000, "Characteristics of an Impinging Shock Wave," *JSME Fluid Engineering Conference*, July.
- (11) 이동훈, 김희동, 강성황, 2001, "펄스파의 강도증가를 위한 피동제어," *한국소음진동공학회지*, 제 11 권, 제 2 호, pp. 241~248.
- (12) 이동훈, 김희동, 강성황, 2000, "관출구로부터 방출하는 약한 충격파의 평판충돌에 관한 연구," *한국소음진동공학회지*, 제 10 권, 제 6 호, pp. 1035~1040.
- (13) Yee,H.C., 1987, "Upwind and Symmetric Shock Capturing Schemes", *NASA TM-89464*.