한국소음진동공학회지 제 10 권 제 6 호, pp. 1035~1040, 2000.

〈논 문〉

관출구로부터 방출하는 약한 충격파의 평판충돌에 관한 연구

The Impingement of a Weak Shock Wave Discharged from a Tube Exit upon a Flat Plate

이 동 훈* · 김 희 동** · 강 성 황***

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

(2000년 8월 23일 접수 : 2000년 10월 16일 심사완료)

Key Words : Compressible Flow(압축성 유동), Impulsive Noise(충격성소 음), Pulse Wave(펄스파), Shock Wave (충격파)

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. Computations predicted the experimented results with a good accuracy. The peak pressure on the flat plate was not strongly dependent on the shock wave Mach number in the present range of Mach Number 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 펄스형의 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 각종 플랜트의 배관계, 차량이나 열차의 공압브레이크, 자동차의 배기관, 대포나 총기류 그리고 건설현장의 발파시공을 비롯한 고속철도 터널 등과 같이 광범위한 분야에서 발생하므로 환경소음의 주된 요인이 되고 있다.

충격성 소음은 비록 지속시간이 짧더라도 순간적인 피크 압력이 매우 높기 때문에 산업현장에서 작업자가 충격성 소음에 노출되면 청력장애를 불러 일으킬 뿐만 아니라 심한 경우 주변 구조물의 진동파괴까지도 야기할 수 있다[2]. 따라서 충격성 소음에 대한 적절한 대응책[3]이 요구되고 있는 실정이다. 특히 고속철도의 터널에서 발생하는 충격성 소음의 저감에 관한 연구는 상당한 진전을 이루어 왔으며 최근까지도 활발히 진행되고 있다[4~7]. 지금까지 발표된 충격성 소음의 저감기술을 종합해 보면 관내를 전파하는 압축파나 충격파의 압력구배를 완화시키거나 강도를 감소시키는 피동제어 방식과 대기중으로 전파하는 펄스파에 대하여 역위상을 갖는 펄스파를 발생시켜 충격성 소음을 저감시키는 능동제어 방식으로 대별할 수 있다.

한편 이 같은 펄스파와 관련된 충격성 소음문제와는 별도로 최근에 펄스파를 공업적으로 유용하게 이용하려는 기술이 중요한 공학적 과제로 부상하고 있다. 즉 펄스연소[8]를 이용한 분립체 건조기술, 반도체 등의 물체표면에 부착한 불순물 제거기술[9], 펄스제트를 이용한 고효율 연소기 개발[10] 그리고 펄스제트 필터장치[11] 등과 같이 펄스파를

* 정회원, 서울산업대학교 기계공학과
** 정회원, 안동대학교 기계공학과
*** 정회원, 카톨릭상지대학 Automobile Division

응용한 산업기기의 개발이 주목받고 있다. 이 때문에 종래의 충격성 소음만을 감소시킬 목적으로 관내에서의 압축파나 충격파의 전파특성을 파악하거나 충격파 강도를 감소시키려는 것과는 정반대의 연구가 요구되고 있다. 즉, 강한 펄스파의 확보와 함께 대기중으로 전파하는 펄스파의 특성에 관한 연구가 필요하다 하겠다.

펄스파에 관한 지금까지의 연구에서는 관의 외부에서 형성된 펄스파는 관출구로 방출되는 압축파나 충격파의 특성에 의하여 결정되며, 펄스파는 거리에 따라 그 강도가 절반으로 감소한다는 전파특성[12]의 규명과 함께 펄스파가 구조물과 간섭하는 경우에 생기는 반사 및 회절 특성[13,14]에 관한 극히 제한된 연구내용만이 제시되었을 뿐이다. 실제적으로 펄스파를 응용한 산업기기를 개발하기 위해서는 펄스파가 구조물에 충돌하여 반사될 때까지의 파동특성과 충돌면상에서 발생하는 유동장에 대한 상세한 정보가 대단히 중요하다. 그러나 이러한 관점에서 펄스파에 관한 제반특성을 체계적으로 연구발표한 문헌은 찾아 보기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 펄스파의 제반특성을 규명하기 위한 것으로서 펄스파가 수직평판에 충돌하여 반사될 때 까지의 전파형태와 동특성 그리고 압력진폭값 등을 실측하여 수치계산결과와 비교분석 하였다. 충격파관에서 발생한 약한 충격파를 이용하여 펄스파를 발생시킴에 따라 관내의 충격파강도와 전파마하수가 펄스파의 입력값에 해당된다. 또한 펄스파가 충돌하는 수직평판의 위치는 관출구로부터 충격파관 지름의 4배까지를 이송범위로 설정하였다. 수직평판에 충돌한 펄스파의 상승시간, 피크압력 및 지속시간과 같은 동특성은 평판중심지점과 반경방향지점에 설치한 압력센서를 이용하여 계측하였다. 특히 펄스파가 하류로 전파할 때와 반사할 때의 파의 전파거동을 가시화하기 위하여 고속카메라가 연결된 쉴리렌장치를 이용하였다. 수치계산은 비정상 압축성 유동방정식에 Harten-Yee의 TVD법[15]을 적용하여 펄스파의 동특성과 충돌면에서의 압력진폭을 계산하였다.

2. 실 험

실험장치는 관출구로 펄스파를 방출시킬 수 있도록 한쪽끝이 대기에 개방되어 있는 대기개방형 충격파관을 이용하였으며, 구성과 제원은 Fig. 1과 같다.

충격파관의 지름은 66 mm의 원형관이며, 고압실 및 저압실의 길이는 각각 1620 mm와 2150 mm이다. 고압실과 저압실 사이에 위치한 격막재료로는 두께 0.03 mm인 셀로판시트를 이용하였다. 고압실은 압축된 건조공기로 충진되어 있고 격막을 파막시키기 위한 격침이 장착되어 있다. 또한 대기에 개방되어 있는 저압실에는 관의 출구로부터

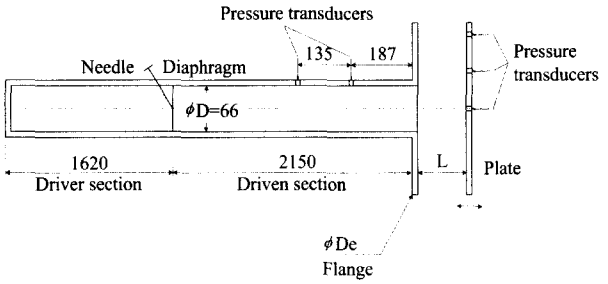

Fig. 1 Experimental apparatus for impulsive wave impinging upon a flat plate.

187 mm와 322 mm위치에 고성능 압력센서(PCB pressure transducer 112A21)를 설치하였다. 이 압력센서는 파막시에 관내에서 발생한 충격파강도 $\triangle p^*$와 하류측으로 전파하는 충격파의 전파마하수 M을 구하는데 이용된다. 특히 관출구에서 발생하는 파동현상에 대한 관단보정(open end correction)[16]을 위하여 관끝에 배플판(baffle plate)을 부착하였다. 배플판의 외경 D_e는 충격파관의 지름 D에 비하여 20배 이상의 크기를 갖기 때문에 무한 플랜지로 간주할 수 있다. 한편 펄스파가 충돌하는 하류측의 수직평판은 배플판과 등가한 크기로서 관출구로부터 수직평판까지의 거리를 L이라 할 때 충격파관 지름으로 무차원화한 $L/D=0.5\sim4.0$범위에서 이송되게 하였다. 이때 평판상에 충돌하는 펄스파의 순간압력을 측정하기 위하여 관중심축을 기준하여 $r/D=0$, $r/D=1$, 그리고 $r/D=2$의 위치에 압력센서를 설치하였다. 압력센서에서 얻어진 모든 출력신호는 직류증폭기를 거쳐 파형기록 장치에 저장된다. 또한 사용된 압력센서의 동적/정적 검정을 통하여 측정오차를 확인한 결과 고압실에서의 측정오차는 거의 무시할 수 있었으나, 저압실내를 전파하는 충격파와 평판에 충돌하는 펄스파의 순간압력 측정에는 약 2%의 오차가 발생하였다. 충격파관의 출구로 방출되는 펄스파의 가시화를 위하여 쉴리렌장치를 이용하였다. 쉴리렌 장치는 고속카메라와 연결하므로서 임의시간에 발생하는 충격파를 촬영할 수 있었다.

3. 수치계산

본 연구에서는 비정상 압축성 유동방정식에 Harten-Yee의 TVD법을 적용하여 펄스파의 동특성을 포함하는 유동장을 수치계산하였으며 지배방정식은 다음과 같다.

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

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

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

식 (1)에서 t는 시간, ρ는 기체의 밀도, x와 r는 축방향과 반경방향의 좌표, u와 v는 축방향과 반경방향의 속도성분, p는 압력이다. 또한 공기의 비열비를 γ라 할 때, 단위체적당 전에너지 e는 다음식으로 주어진다.

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

수치계산에서 식 (1)은 다음과 같은 무차원 상태량으로 다시 쓰여진다.

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

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

위 식에서 a는 음속, 상첨자 (′)는 무차원량 그리고 하첨자 1은 관내를 전파하는 충격파 전방의 정지기체 상태(대기상태)를 의미한다.

Fig. 2는 수치계산에 적용한 경계조건과 좌표를 나타낸 것이다. 관출구면을 기준하여 $L/D=-1$인 위치를 수치계산의 상류경계로 설정하여 초기 충격파강도를 $\triangle p^*$로 가정하였다. 하류경계는 초기충격파의 강도에 따라 다소의 변동은 있으나 중심축으로부터 $3D$ 정도로 설정하였으며 유출조건이 적용되었다. 특히 본 연구에서는 수직평판의 이동거리와 충격파의 전파마하수를 각각 $L/D=0.5\sim4.0$와 $M=1.05\sim1.20$범위에서 단계적으로 변화시키면서 반경방향과 축방향에서의 펄스파의 피크압력값 $\triangle p$를 계산하였다. 이때 모든 고체벽면에는 slip-wall조건을 적용하였으며, 대칭성을 고려하여 중심축을 기준하여 반평면만을 계산영역으로 취하였다.

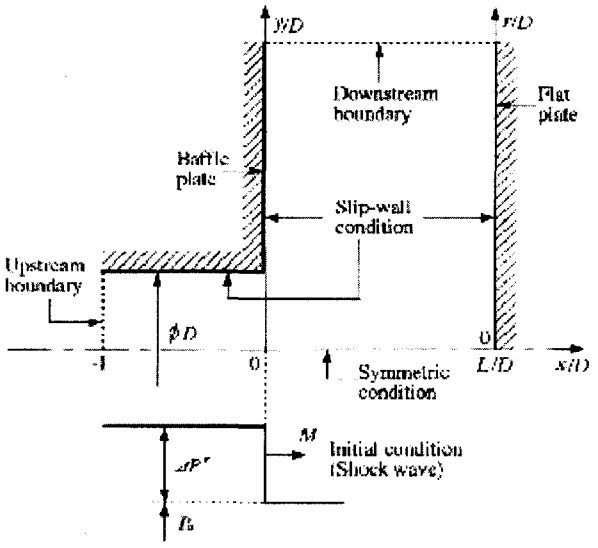

Fig. 2 Computational flow field and boundary conditions

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 평판의 세 지점인 $r/D=0$, $r/D=1$, 그리고 $r/D=2$에 충돌한 펄스파의 특성을 시간축에 대하여 비교 도시한 것이다. 평판의 위치와 충격파의 전파마하수는 $L/D=2.0$와 $M=1.15$일 때이며 그림에서 실선과 파선은 각각 실측값과 수치계산값을 나타낸다.

펄스파는 상승시간(rise time), 피크압력(peak pressure) 그리고 지속시간(duration time)에 의하여 그 특성이 규정되는 것임을 감안할 때, 도시된 파형에서도 이들 특성을 잘 반영하고 있다. 먼저 펄스파의 상승시간을 기준하여 보면 평판의 중심부에서 가장 짧고, 중심부에서 멀어질수록 상승시간이 다소 지연되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 상승시간의 차이는 파형결과에서 곧바로 피크압력 크기, 파의 형태 그리고 지속시간의 변화로 나타난다. 즉 상승시간이 짧은 펄스파는 피크압력이 높으면서 파의 형태가 뾰족한 형상인데 반하여, 상승시간이 다소 큰 펄스파는 피크압력이 감소됨과 동시에 파의 봉우리도 완만해진다. 이와

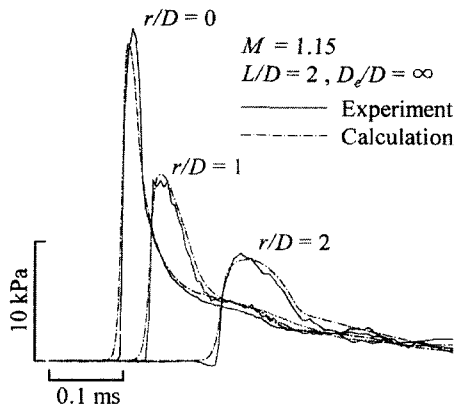

Fig. 3 Comparison of the measured and computed impulsive waves impinging upon a flat plate

함께 지속시간도 점차 길어지게 된다. 이상의 결과에서 평판 중심부에서 펄스파의 상승시간이 가장 짧고 피크압력이 가장 높게 되는 이유는 평판에 충돌하는 충격파의 형태에 기인한 것으로 볼 수 있다. 즉 관축과 일치된 평판중심지점에서는 강한 수직충격파에 가까운 형태로 충돌되는 반면에, 중심으로부터 떨어진 위치에서는 세기가 약한 경사충격파의 형태로 충돌하기 때문이다. 한편 제시된 펄스파의 동특성에 대하여 수치적으로 모사한 계산값과 실측값을 비교해 볼 때 전반적으로 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 이용한 지배방정식에 Harten-Yee의 TVD법을 적용한 수치계산이 매우 신뢰할 수 있음을 입증하는 결과라 할 수 있다.

Fig. 4는 펄스파의 전파형태를 조사할 목적으로 펄스파 구조를 촬영한 결과와 이와 동일조건에서 수치계산한 결과를 상호 비교한 것이다. 수치계산은 실측값과 동일한 무차원시간 t'에서의 등밀도선도를 나타낸 것이다. 도시된 결과에서 Fig. 4(a)는 관출구로부터 하류측으로 전파하는 펄스파를 그리고 Fig. 4(b)는 평판에 충돌한 후 다시 상류측으로 되반사되어 전파하는 반사펄스파를 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 4(a)의 사진에서는 파면이 평면인 실린더형의 펄스파가 하류측으로 전파하는 것을 보여주고 있다. 이 같은 펄스파의 거동은 수치계산 결과에서도 잘 표현되고 있다. 특히 수치계산 결과에서는 밀도분포에 의한 감도문제로 인하여 가시화 사진에서 잘 보여주지 못한 관모서리 부분에서의 회절현상까지 보여주고 있다.

한편 Fig. 4(b)에 도시된 반사펄스파는 Fig. 4(a)의 경우와 비교해 볼 때 파면이 다소 구면형태이면서 전파범위가 반경방향으로 확대되어진 점이 다르다. 수치계산결과에서도 이 같은 현상이 잘 나타나 있다.

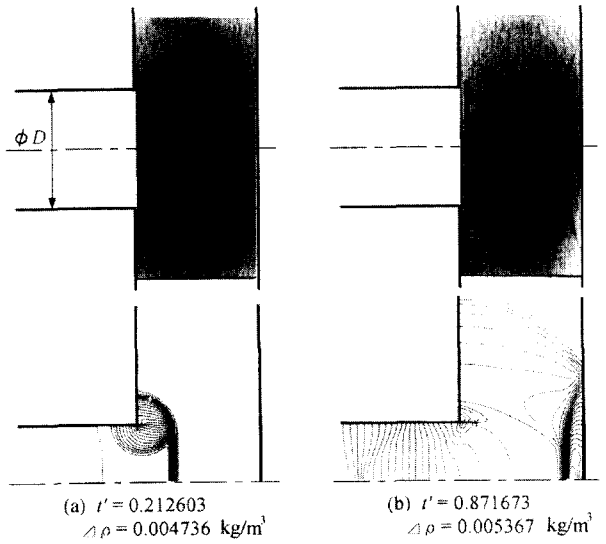

Fig. 4 Flow visualization and computed iso-density contours for the impulsive wave.

Fig. 5는 충격파 전파마하수 $M=1.1$ 그리고 관출구로부터 평판까지의 거리 $L/D=0.5$인 조건에서 펄스파가 평판에 충돌하여 반사될 때의 압력분포를 수치계산한 결과이다. Fig. 5(a)는 반사펄스파의 압력분포를 2차원 등압선으로 나타낸 것이며, Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)는 각각 축방향과 반경방향에서의 압력값을 대기압력 P_a로 무차원화시킨 압력진폭으로서 비교분석이 용이하도록 Fig. 5(a)의 결과에 각각 대응시켰다. 축방향의 압력진폭 결과인 Fig. 5(b)에서는 충돌면에서 급격하게 압력이 상승하는 것과는 별도로 관출구면보다도 다소 더 상류측인 관내부에서부터 시작된 압력감소가 하류측의 일정범위까지 계속되는 것을 볼 수 있다. 이 같은 압력감소는 관출구에서 발생하는 팽창파가 관의 상류로 전파하기 때문이며, 이것은 관내를 전파하는 충격파가 대기로 방출될 때 수반되는 필연적인 현상이다. 한편 반경방향으로의 압력진폭값을 나타낸 Fig. 5(c)에서는 평판중심에서 최대의 압력진폭을 나타내고 중심에서 벗어날수록 점차 감소되어 대기압에 도달한다. 특히 압력진폭의 영향범위가 충격파관의 지름보다 60%만큼 더 확장된 것은 Fig. 4 결과에서도 언급하였듯이 펄스파가 하류로 전파되어 갈수록 파의 형태가 점차 구면형태로 변환되면서 확대되기 때문이다.

Fig. 6은 관의 출구로부터 평판까지의 거리를 $L/D=0.5$로 고정하고 충격파의 전파마하수만을 0.05씩 증가시키면서 평판상에서 측정한 펄스파의 피크압력 $\triangle p_m$을 충격파의 과잉압력 $\triangle p^*$로 무차원화시킨 압력진폭 결과이다. 또한 이와 동일한 조건에서 수치계산으로 구한 압력진폭

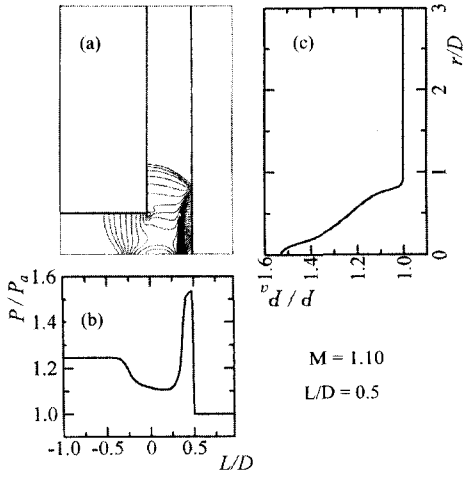

Fig. 5 Pressure variations on flat plate and along tube axis.

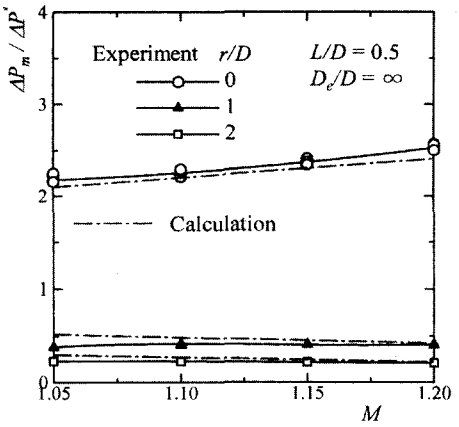

Fig. 6 Effect of M on the magnitude of impulsive wave impinging upon a flat plate.

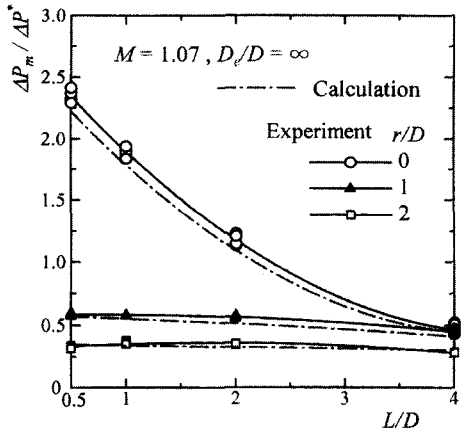

Fig. 7 Effect of L/D on the magnitude of impulsive wave impinging upon a flat plate.

결과도 그림에 함께 도시하였다. 도시된 결과에서 펄스파의 압력진폭은 충격파의 전파마하수에 의존하는 경우와 그렇치 않은 경우로 구분된다. 즉 평판의 중심부인 $r/D=0$의 경우에는 펄스파의 압력진폭이 충격파의 전파마하수에 따라 서서히 증가하는 반면에, $r/D=1$이나 $r/D=2$에서의 압력진폭은 전파마하수에 따라 오히려 약간 작아지거나 거의 변화하지 않는다. 또한 $r/D=0$ 위치에서의 펄스파의 압력진폭은 충격파의 과잉압력보다 2.0 내지 2.5배 정도로 크게 되는데 비하여, 평판중심으로부터 떨어진 $r/D=1$이상의 위치에서는 펄스파의 압력진폭값은 충격파의 과잉압력보다 작게 된다. 이러한 경향은 다른 L/D의 조건에서도 동일하게 나타났다.

Fig. 7은 Fig. 6에서 같이 평판상에 충돌한 펄스파의 압력진폭을 구한 결과로서 충격파의 전파마하수를 $M=1.07$로 일정하게 유지한 상태에서 관출구로부터 평판까지의 거리인 L/D만을 변화시킨 경우이다.

결과에서 보듯이 수치계산으로 구한 압력진폭은 Fig. 6의 결과에서와 같이 실측결과와 잘 대응하고 있음을 알 수 있다. 또한 이 경우에도 펄스파의 압력진폭이 평판위치 L/D에 의존하는 경우와 그렇치 않은 경우로 구분된다. 즉 평판의 중심부인 $r/D=0$에서의 펄스파의 압력진폭은 평판위치가 멀어질수록 지수감쇠하는 형태를 보이는 반면에, $r/D=1$이나 $r/D=2$ 지점에서의 압력진폭은 평판의 위치변화에 따라 아주 작은 감소만을 보인다. 특히 평판을 $r/D=4$에 위치시켰을 때 $r/D=0$에서의 펄스파의 압력진폭값은 $r/D=1$의 경우와 같게 된다.

이상의 결과로 볼 때 펄스파는 중심축방향에서 가장 센 빔형태의 지향특성을 갖는다고 할 수 있다. 결과적으로 Fig. 6과 Fig. 7의 토의내용을 종합해 보면 평판의 중심부에 충돌된 펄스파만이 충격파의 전파마하수 M과 관출구로부터 수직평판까지의 거리인 L/D에 따라 그 크기가 좌우되는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 펄스파의 지향특성을 이용하여 M과 L/D를 변수로 취하여 평판중심부인 $r/D=0$ 지점에서의 펄스파의 무차원 압력진폭값을 구할 수 있는 근사식을 도출하면 다음과 같다.

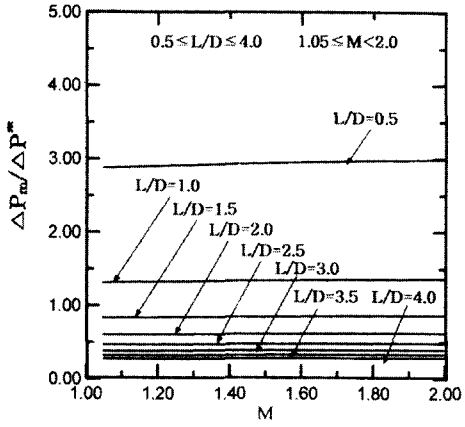

Fig. 8 Relationship between $\Delta p_m/\Delta p^*$ and M for various L/D

$$\Delta p_m / \Delta p^* = 1.31 M^{0.06} (L/D)^{-1.13} \quad (3)$$

Fig. 8은 $1.05 \le M < 2.0$과 $0.5 \le L/D \le 4.0$범위의 값을 식 (3)의 변수로 취하여 $\Delta p_m/\Delta p^*$을 계산한 결과이다. 결과에서 압력진폭값은 $L/D=0.5$조건에서만 M의 영향이 반영되는 것을 관찰할 수 있으나, 그 외의 조건에서는 M에 거의 의존하지 않는다. 또한 압력진폭값은 L/D가 증가할수록 감소하다가 $L/D=2.5$ 이상에서는 감소폭이 크지 않다. 이것은 앞서 언급하였듯이 펄스파의 지향특성이 반경방향보다는 축방향으로 강한 직진성을 갖기 때문이다.

5. 결 론

충격파관 끝에서 방출된 펄스파가 하류에 놓인 수직평판에 충돌하여 반사되기까지의 전파형태와 동특성 그리고 압력진폭값을 실측하고 수치계산결과와 비교분석한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 비정상 압축성 유동방정식에 Harten-Yee의 TVD법을 적용하여 수치계산한 결과는 펄스파의 동특성을 잘 묘사하며 실측결과와도 좋은 일치를 보인다.

(2) 초기에 파면이 평면인 펄스파는 하류로 전파되어 갈수록 점차 구면형태로 변환되면서 반경방향으로 확대되는 전파거동을 나타낸다.

(3) 평판에 충돌한 펄스파는 평판중심지점에서 가장 높은 피크압력을 가지며, 반경방향으로 갈수록 피크압력이 감소되고 파의 봉우리가 점차 완만해진다. 이것은 평판에 충돌되는 충격파의 형태가 평판중심지점에서는 세기가 강한 수직충격파에 가까운 형태로 그리고 중심에서 떨어진 지점에서는 세기가 약한 경사충격파의 형태로 충돌하기 때문이다.

(4) 펄스파는 축방향에서 가장 센 빔형태의 지향특성을 갖는다. 이러한 펄스파의 지향특성을 이용하여 평판중심에서 펄스파의 강도를 구할 수 있는 근사식을 도출하였다.

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) Rice, C. G., 1996, "Human Response Effects of Impulse Noise," Journal of Sound and Vibration, Vol. 190, No.3, pp. 525~543.

(3) Raghunathan, S., Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1998, "Impulse Noise and Its Control," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 34(1), pp. 1~44.

(4) Setoguchi, T., Matsuo, K., Nakatomi, R. and Kaneko, K., 1996, "A Study of a Negative Impulsive Wave Generator," Journal of Sound and Vibration, Vol.197, No.5, pp. 573~587.

(5) 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).

(6) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1997, "Passive Control of Unsteady Compression Wave Using Vertical Bleed Ducts," KSME Journal , Series B, Vol. 21, No. 9, pp. 1095 ~1104(in Korean).

(7) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1997, "Numerical Study on the Interaction Between Unsteady Compression and Unsteady Expansion Wave," KSME Journal, Series B, Vol. 21, No. 11, pp. 1413~1421(in Korean).

(8) Kentfield, J. A. C., 1993, Nonsteady, One-Dimensional, Internal, Compressible Flows (Theory and Applications), Chapter 7, Oxford University Press.

(9) Smedly, G. T., Phares, D. T. and Flagan, R. C., 1998, "Entrainment of Fine Particles from Surfaces by Impinging Shock Waves," Experiments in Fluids, 26, pp. 116~125.

(10) Zeutzius, M., Terao, K., Setoguchi, T., Matsuo, S., Nakano, T. and Fujita, Y., 1998, "Active Control of Twin-Pulse Conbustors," AIAA Journal, Vol.36, No.5, pp. 823~829.

(11) Morris, W. J., 1984, "Cleaning Mechanisms in Pulse Jet Fabric Filters," Proc. of the Filtration Society, Filtration and Separation, 21, pp. 52~54.

(12) 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.

(13) Bazhenova, S. V., 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.

(14) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 2000, "Characteristics of an Impinging Shock Wave," JSME Fluid Engineering Conference, July.

(15) Yee, H. C., 1987, Upwind and Symmetric Shock Capturing Schemes, NASA TM-89464.

(16) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 2000, "Weak Shock Reflection from an Open End of a Tube with Baffle Plate," AIAA Journal, in press.