

## 평판에 충돌하는 펄스파의 특성에 관한 연구

김희동\* · 이동훈\*\*

### A Study on the Characteristics of the Pulse Wave Impinging upon a Flat Plate

H.D.Kim\* and D.H.Lee\*\*

**Key Words :** *Compressible Flow*(압축성 유동), *Pulse Jet*(펄스 제트), *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<sup>(1)</sup>. 이 때 대기로 전파하는 압력파의 동적거동이 펄스형태를 취하기 때문에 통상 펄스파라고 부르며, 펄스파에 의한 소음을 충격성 소음이라 한다. 충격성 소음은 지속시간이 짧으면서 피크 압력이 매우 높기 때문에 주변 생태계나 인체에 나쁜 영향을 미치게 됨은 물론이거니와 심한 경우 주변 구조물의 진동파괴까지도 야기시킬 수 있다. 따라서 이에 대한 적절한 대응책이 절실히 요구되고 있는 실정이다<sup>(2)</sup>.

한편 이와 같은 펄스파의 방출에 기인한 충격성 소음문제의 해결과는 별도로 최근에 반도체를

비롯한 각종 물체표면에 부착된 불순입자 제거기술<sup>(3)</sup> 및 펄스제트 필터장치<sup>(4)</sup> 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 강한 펄스파의 확보와 함께 펄스파의 물리적 이해와 충돌면상의 유동특성을 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<sup>(5,6)</sup>. 또한 관출구로부터 방출된 매우 강한 충격파가 구조물과 간섭하는 경우에 발생하는 반사 및 회절특성에 관한 연구결과도 발표된 바 있다<sup>(7,8)</sup>. 그러나 지금까지 발

\* 안동대학교 기계공학과 kimhd@andong.ac.kr

\*\* 서울산업대학교 기계공학과

표된 연구결과만을 활용하여 펄스파를 이용한 산업기기를 개발하는데는 많은 어려움이 있다. 실제로 펄스파를 이용한 산업기기를 개발하는데는 두가지 측면에서의 연구, 즉 매우 강한 펄스파를 발생시킬 수 있는 장치개발 그리고 대기중으로 전파하는 펄스파의 파동특성과 충돌면상에서의 유동특성에 관한 상세한 정보가 필요하다. 특히 이 중에서 펄스파가 구조물에 충돌하여 반사될 때 까지의 파동특성과 충돌면상에서의 유동장 특성에 대한 정보는 기기의 설계나 성능을 평가함에 있어서 대단히 중요하다. 이와 관련하여 최근에 이동훈 등<sup>(9)</sup>은 관출구로부터 약한 충격파가 평판에 충돌하는 경우 평판상에 형성되는 피크압력값은 관출구와 평판사이에서 발생하는 파동특성에 의존한다는 연구결과를 제시한 바 있다.

본 연구에서는 평판에 충돌하는 펄스파의 특성을 규명하기 위한 것으로서 관출구에서 약한 충격파의 방출로 발생된 펄스파가 수직평판에 충돌하여 반사될 때 까지의 파동특성 그리고 충돌시 평판상에서 발생하는 유동장 특성을 실측하고 수치계산결과와 비교분석하였다. 특히 본 연구에서는 충격파관 출구에 설치된 배플판과 하류에 놓인 평판의 크기변화에 따른 평판상의 유동장 특성을 조사하기 위하여 배플판과 평판을 다양한 크기로 변화시켰다.

## 2. 실험 및 수치계산

실험에 이용한 충격파관은 Fig.1에 나타난 바와 같이 고압실과 저압실의 길이가 각각 1.62m와 2.15m인 원형관(직경  $D=66mm$ )이다.

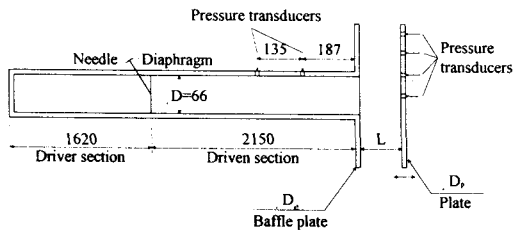


Fig.1 Schematic diagram of test apparatus.

본 연구에서는 배플판과 평판크기의 영향을 조사하기 위하여, 충격파관 출구면에 부착된 지름  $D_e$ 인 배플판을  $D_e/D=1.0\sim 20.0$  범위에서 변화시켰다. 또한 충격파관 출구면으로부터  $L/D$ 에

위치한 수직평판의 지름  $D_p$ 는  $D_p/D=0.1\sim 20.0$ 의 범위에서 변화시켰다.

실험은 고압실(건조공기충진)과 저압실(대기압 상태) 사이에 위치한 격막(두께 0.03mm의 셀로판막)을 파막시켜 저압실내로 전파하는 충격파를 발생하게 된다. 저압실의 벽면에는 충격파의 전파마하수  $M$ 을 구하기 위하여 관의 출구로부터 187mm 및 322mm 지점에 압력센서(pressure transducer, PCB112A21)를 설치하였다. 또한 충격파관 하류에 위치한 수직평판상에도 충돌하는 펄스파의 순간압력 측정을 위하여 압력센서를 설치하였다. 압력센서에서 얻어진 모든 출력신호는 직류증폭기를 거쳐 파형기록 장치에 저장된다. 또한 충격파관 출구로 방출되는 펄스파의 가시화를 위하여 고속카메라가 연결된 쉘리렌 장치를 이용하였다.

한편, 수치계산은 참고문헌 [1]에서와 같이 무차원화된 비정상 축대칭 압축성 유동방정식에 Harten-Yee의 TVD법을 적용하여 펄스파의 파동특성과 충돌면상의 유동장을 수치계산하였다.

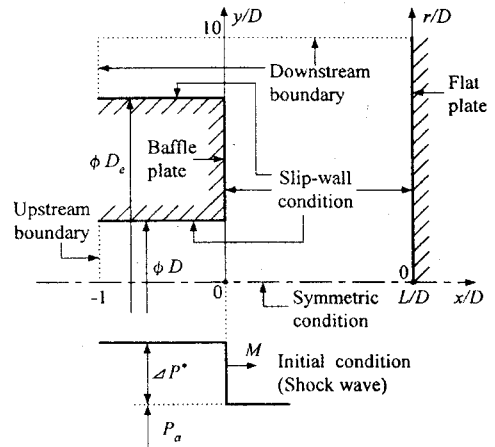


Fig. 2 Computational flow field and boundary conditions.

Fig. 2는 수치계산에 이용한 경계조건과 좌표를 나타낸 것이다. 먼저 관출구면을 기준하여  $L/D=-1$ 의 위치를 수치계산의 상류경계로 설정하여 초기 충격파강도를  $\Delta p^*$ 로 가정하였다. 수치계산의 하류경계는 초기 충격파의 강도에 따라 다소 변화하였으나 출구중심축으로부터  $20D$ 정도

로 설정하였으며 유출유동 조건이 적용되었다. 또한 평판 이동거리와 충격파의 전파마하수를 각각  $L/D=0.5\sim 4.0$ 와  $M=1.05\sim 1.20$  범위에서 단계적으로 변화시키면서 평판상의 반경방향과 축방향에서의 펄스파의 피크압력  $\Delta p_m$ 을 계산하였다. 이때 모든 고체벽면에는 slip-wall조건을 적용하였으며, 대칭성을 고려하여 중심축을 기준하여 반평면만을 계산영역으로 취하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 관출구로 방출된 펄스파의 구조를 촬영하고 이와 동일한 조건에서 수치계산한 결과를 상호 비교한 것이다.

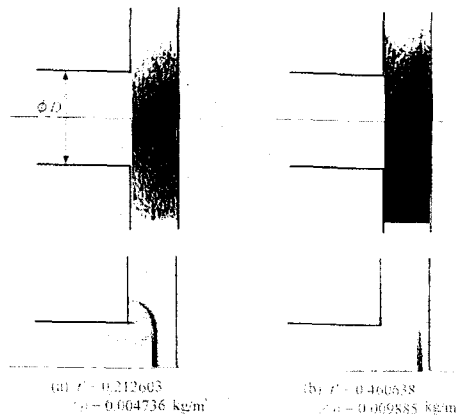


Fig.3 Flow visualization and computed iso-density contours. ( $L/D=0.5$ ,  $D_e/D=20$  and  $M=1.07$ )

그림에 표기된 무차원 시간  $t$ 는 파막후에 형성되는 충격파가 측정점(관출구로부터 187mm지점)을 통과한 직후부터의 시간을 의미한다. 도시된 결과에서 그림 (a)는 펄스파가 관출구로부터 방출된 직후의 상태이며, 그림 (b)는 펄스파가 평판으로부터 반사한 직후의 상태를 나타낸다. 그림 (a)에서는 관중심부분에서 실린더 형의 펄스파와 관모서리부분에서 회전하는 파동을 관찰할 수 있다. 또 그림 (b)에서는 평판으로부터 반사한 구면형에 가까운 펄스파를 관찰할 수 있다. 수치계산에서도 실측한 펄스파를 잘 예측하는 것으로 보인다.

Fig. 4는 펄스파가 평판에 충돌하여 반사될 때의 유동장의 압력분포를 수치계산한 결과이다.

그림 (a)는 펄스파의 압력분포를 2차원 등압선으로 나타낸 것이며, 그림 (b)와 그림 (c)는 각각 축방향과 반경방향에서의 압력값을 대기압  $p_a$ 로 무차원화 시킨 압력진폭으로서 비교분석이 용이하도록 그림 (a)의 결과에 각각 대응시켰다.

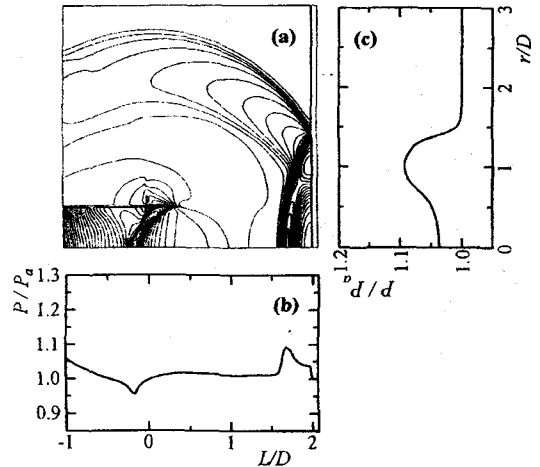


Fig.4 Pressure variations on the flat plate and along tube axis. ( $L/D=2.0$ ,  $D_e/D=1.0$  and  $M=1.1$ )

그림 (a)에서 평판에 충돌한 펄스파가 평판상의  $r/D=1.5$  정도의 위치에서 정상반사되는 것을 볼 수 있다. 이러한 반사형태는 경사충격파가 고체벽면으로부터 반사하는 경우와도 같다. 또한 충격파관 출구부근에서는 회전하는 펄스파의 반사영향으로 다소 복잡해진 파동현상을 관찰할 수 있다. 한편 축방향의 압력분포를 나타낸 그림 (b)에서는  $L < 0.2D$  이하에서 팽창파의 전파로 인한 팽창유동의 발생으로 압력이 점진적으로 감소하고 있다. 그러나  $0.2 < L/D < 1.6$ 에서는 압력이 거의 일정하다. 또한 그림 (c)에서 충돌면상에 발생하는 압력은  $r/D=1.0$ 부근에서 대기압보다 10% 정도 그리고 충돌면 중심에서의 압력은 대기압보다 4% 정도 높다.

Fig. 5는 펄스파가 평판에 충돌할 때 발생하는 유동장내의 압력분포에 평판크기가 미치는 영향을 조사한 것이다. 그림의 종축은 펄스파의 피크압력을 대기압으로 무차원화 시킨 압력진폭 값이다. 결과에서 평판중심에서의 압력진폭은 펄스파가 평판으로부터 반사한 직후부터 급격히 증가하여, 피크값에 도달한 뒤에 다시 급격하게 감소하

는 형태를 보인다. 이 같은 거동이 평판지름에 따라 각기 다르게 되는 이유는 평판모서리에서 발생한 반사파가 평판지름의 크기에 따라 영향을 받기 때문이다.

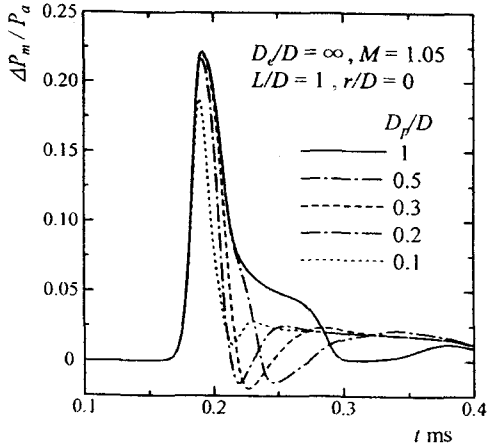


Fig.5 Effect of the flat plate diameter on the pressure magnitude at the center point of flat plate.

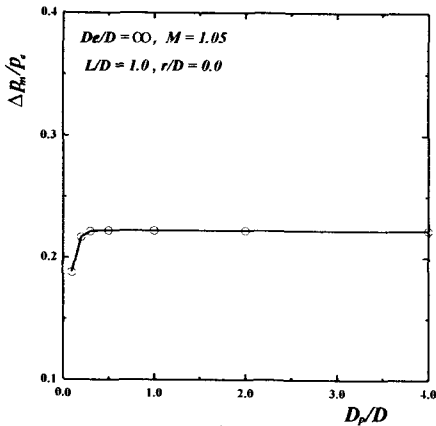


Fig.6 Relationship between the pressure magnitude and flat plate diameter.

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 조건에서 구한 펄스 파의 압력진폭값을 평판지름에 대하여 도시한 것이다. 평판지름이  $D_f/D < 0.3$ 인 조건에서는 평판지름 변화에 따른 압력진폭값의 큰 변화를 볼 수 있으나, 평판의 지름이  $D_f/D > 0.3$  이상인 범위에서는 평판지름에 따른 압력변화는 나타나지 않는다. 이것은 평판지름의 크기가  $D_f/D > 0.3$  이상이

되면 평판모서리에서 발생한 파동이 유동장에 미치는 영향은 거의 없다는 것을 의미한다. 따라서 평판중심의 유동장을 고찰할 때는  $D_b/D > 0.3$  이상의 크기를 갖는 평판을 무한충돌판으로 간주할 수 있다.

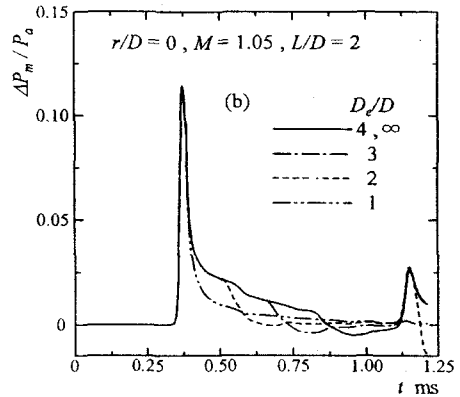
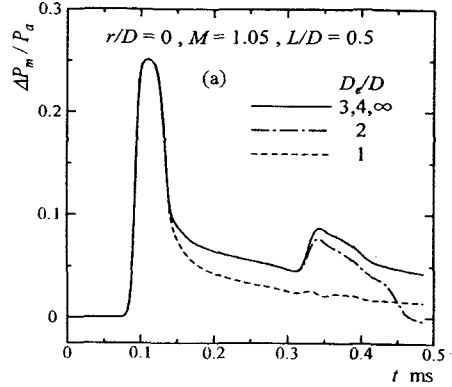


Fig.7 Effect of the baffle plate diameter on the pressure magnitude at the center point of flat plate.

Fig. 7은 평판중심의 피크압력값에 배플판 크기가 미치는 영향을 조사한 결과이다. 그림 (a)와 그림 (b)는 각각  $L/D = 0.5$  및  $L/D = 2$ 에 대한 결과값을 나타낸 것이다. 결과에서 보듯이 평판 중심에서의 피크압력값은 배플판의 크기에 큰 영향을 받지 않는 것으로 보인다. 다만 배플판의 크기는 일정시간이 지난후의 유동장에만 영향을 미치고 있다. 즉 그림 (a)에서는  $D_e < 3D$  그리고 그림 (b)에서는  $D_e < 4D$  이하의 배플크기에서만 압력진폭이 변동하는 것을 볼 수 있다.

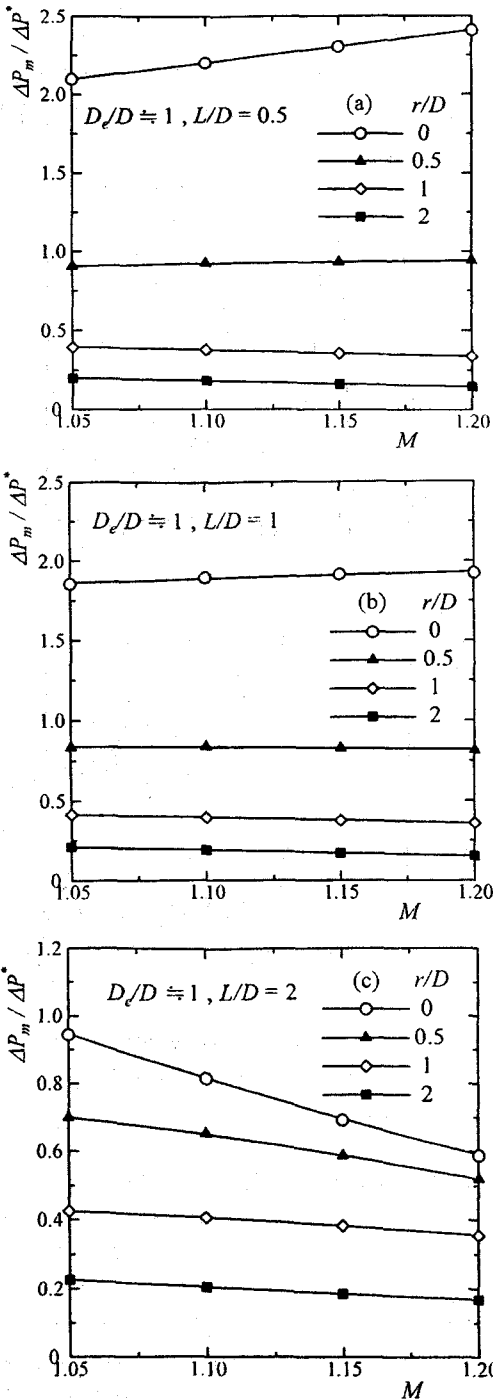


Fig.8 Relationship between non-dimensional peak pressure and shock wave Mach number.

Fig. 8은 각각의  $L/D$ 조건에서 실측한 평판의 반

경방향지점에서의 피크압력값을 충격파의 전파마하수에 대하여 나타낸 것이다. 도시된 그림의 종축은 피크압력값  $\Delta p_m$ 을 충격파의 과잉압력  $\Delta p^*$ 로 무차원하였다. 먼저  $L/D=0.5$ 인 그림 (a)의 결과를 보면 평판중심에서의 피크압력값은 충격파의 전파마하수가 커질수록 증가하게 되지만, 평판중심으로부터 벗어난 위치에서의 피크압력값은 거의 변화하지 않거나 약간 감소하는 것으로 나타난다. 이러한 경향은  $L/D=1$ 의 결과인 그림 (b)에서도 관찰할 수 있다. 그러나 평판을 하류측으로 더 멀리 위치시킨  $L/D=2$ 인 그림 (c)의 결과에서는 평판상의 모든 측정점에서의 피크압력값은 충격파 마하수가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 특히 이 결과에서 충격파 마하수 증가에 따른 피크압력값의 감소율은 평판중심에서 가장 크며, 중심으로부터 벗어날수록 감소율이 작아진다. 이상의 토의결과를 정리하면 평판중심에서의 피크압력값은 충격파 마하수와  $L/D$ 의 함수로 그리고 평판중심으로부터 벗어난 위치에서의 피크압력값은 평판중심에서의 피크압력값과 중심점으로부터 반경방향까지의 거리의 함수로 정리할 수 있다.

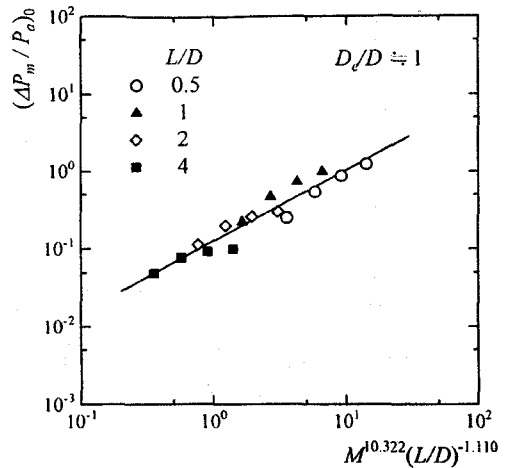


Fig.9 The dependence of the peak pressures at the center point of flat plate on the  $M$  and  $L/D$ .

Fig. 9는 평판중심의 피크압력값을 충격파의 전파마하수와  $L/D$ 의 함수로 나타낸 것이다. 결과에서 보듯이 본 연구에서 실측한 모든 결과값은 충격파의 전파마하수  $M$ 과  $L/D$ 의 함수로 잘 정

리되고 있다. 따라서 이들 함수관계를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\Delta P_m}{P_a}\right)_{r/D=0} = 0.10 M^{10.322} \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{-1.110} \quad (1)$$

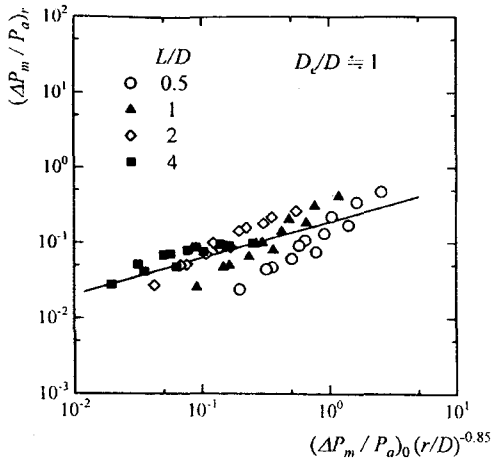


Fig.10 The dependence of the peak pressure at free positions on the peak pressure at the center point as a function of radial distance,  $r/D$ .

Fig. 10은 평판의 임의지점에서 측정된 피크압력값을 평판중심에서의 피크압력값과 반경방향 거리인  $r/D$ 의 함수로 정리한 것이다. 이들 관계를 이용하여 평판상의 임의지점에서의 피크압력값을 예측할 수 있는 경험근사식을 도출하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\Delta P_m}{P_a}\right)_{r/D} = 0.31 \left(\frac{\Delta P_m}{P_a}\right)_{r/D=0} \cdot \left(\frac{r}{D}\right)^{-0.85} \quad (2)$$

식 (2)는 식 (1)를 이용하여 평판상의 모든 임의 지점에서의 피크압력값을 구할 수 있는 아주 유용한 경험근사식이다.

#### 4. 결론

관출구에 부착된 배플판과 하류에 놓인 평판의 크기를 변화시키면서 관출구와 평판사이의 파동특성과 평판상의 유동장 특성을 수치계산하고 실험결과와 비교분석하였다. 규명된 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 평판중심의 피크압력값은 평판모서리에서 발

생하는 반사파의 영향때문에 평판크기의 영향을 받지않지만, 배플판의 크기변화에는 전혀 영향을 받지 않는다.

2) 평판상에 충돌한 펄스파의 피크압력에 대한 실측값과 수치계산값을 이용하여 평판중심점을 비롯한 평판상의 모든 지점에서의 피크압력값을 예측할 수 있는 매우 유용한 경험근사식을 도출하였다.

3) 관출구로부터 방출된 펄스파가 평판에 충돌할 때 발생하는 관출구와 평판사이의 파동현상과 평판상의 유동장특성은 수치계산으로 잘 예측할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1]Kim,H.D. and Setoguchi,T., Study of the Discharge of Weak Shocks from an Open End of a Duct, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.226, No.5, 1999, pp.1011-1028.
- [2]Raghunathan,S.and Kim,H.D., Impulse Noise and Its Control, *Progress in Aerospace Sciences*, 1998, 34(1), pp.1-44.
- [3]Smedly,G.T., Phares,D.T. and Flagan,R.C., Entrainment of Fine Particles from Surfaces by Impinging Shock Waves, *Experiments in Fluids*, 1998, 26, pp.116-125.
- [4]Morris,W.J., Cleaning Mechanisms in Pulse Jet Fabric Filters, *Proc. of the Filtration Society, Filtration and Separation*, 1984, 21, pp.52-54.
- [5]Kashimura,H., Kim.H.D. and Setoguchi, T., Emission of a Propagating Shock Wave from an Open End of a Tube, *JSME Journal*, Vol.65, No.633, 1999, pp.161-167.
- [6]Kim,H.D. and Setoguchi,T., Weak Shock Reflection from an Open End of a Tube with Baffle Plate, *AIAA Journal*, 2000, in press.
- [7]Bazhenova,S.A., Golub,V.V., Shulmeister,A.M., Bormotova,T.A., Bazarov,S.B. and Pichugin, S.V., 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, 1995
- [8]Kim,H.D. and Setoguchi,T., Characteristics of an Impinging Shock Wave, *JSME Fluid Engineering Conference*, July, 2000.
- [9]이동훈,김희동,강성황,“관출구로부터 방출하는 약한 충격파의 평판충돌에 관한 연구,”소음진동공학회 논문집, 심사중, 2000.