

## 곡관출구로부터 방출되는 펄스파에 관한 연구

이동훈\*, 허성준\*\*, 권용훈\*\*\*, 김희동\*\*\*

### A Study on the Impulse Wave Discharged from the Exit of a Right-Angle Pipe Bend

D.H. Lee, S.C.Hur, Y.H.Kweon and H.D.Kim

**Key Words :** Compressible Flow(압축성 유동), Impulse Wave(펄스파), Impulse Noise(충격성 소음), Right-Angle Pipe Bend(곡관), Shock Tube(충격파관), Shock Wave(충격파)

#### Abstract

The current study addresses experimental and computational work of impulse wave discharged from the exit of two kinds of right-angle pipe bends, which are attached to the open end of a simple shock tube. The weak normal shock wave with its magnitude of Mach number from 1.02 to 1.20 is employed to obtain the impulse wave propagating outside the exit of the pipe bends. A Schlieren optical system visualizes the impulse wave discharged from the exit of the pipe bends at an instant. The experimental data of the magnitude of the impulse wave and its propagating directivity are analyzed to characterize the impulse waves discharged from the exit of the pipe bends and compared with those discharged from a straight pipe. Computational results well predict the experimented dynamic behaviors of the impulse wave. The results obtained show that a right-angle miter bend considerably reduces the magnitude of the impulse wave and its directivity toward to the pipe axis, compared with the straight pipe and right-angle smooth bend. It is believed that the right-angle miter bend pipe can play a role of a passive control against the impulse wave.

#### 1. 서론

고압가스의 배관계나 자동차의 배기머플러 등으로부터 갑작스런 질량유동이 대기로 방출될 경우 매우 강력한 세기의 충격성 소음이 발생하게 된다. 충격성 소음은 노즐 또는 오리피스로 방출되는 정상유동에서 발생한 제트소음에 비하여 훨씬 낮은 주파수와 매우 높은 파크압력 특성을 갖기 때문에 수음자의 청각기능을 손상시킬 뿐만 아니라, 환경소음의 영향범위를 크게 확대시키고, 심한 경우 주변 구조물을 진동/파괴시키는 주요한 원인이 되기도 한다.<sup>(1)</sup> 이와 같은 특성을 갖는 충격성 소음은 고압가스의 배관계뿐만 아니라 차량 및 각종 동력기관의 배기계, 화기류, 건설현장의 발파시공

그리고 고속열차/터널시스템 등과 같은 광범위한 분야에서 발생되고 있으므로<sup>(2-6)</sup> 이에 대한 적절한 대응책이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

한편 고압가스의 배관계 등으로부터 발생하는 소음의 저감에는 종래 배기형 소음기가 이용되어 왔으나,<sup>(7,8)</sup> 이들 배기형 소음기는 정상유동에서 발생하는 제트소음을 저감시키기 위한 것으로서, 관출구로 전파하는 펄스파의 특성값이 반영되지 못하였으므로 충격성 소음을 저감시키는데는 적합치 않다. 이것은 배관계로부터 발생하는 펄스파의 특성이 지금까지 잘 알려져 있지 않기 때문이다. 따라서 각종 고압가스의 배관계 출구로부터 발생하는 충격성 소음에 대한 저감대책을 수립하기 위해서는 배관계를 전파하는 압력파의 전파특성과 관출구로부터 발생되어 전파하는 펄스파의 전파특성을 보다 명확히 이해할 필요가 있다.

펄스파에 관한 지금까지의 연구는 주로 직관을 대상으로 연구되어 왔으며,<sup>(9-11)</sup> 관로 중간이나 관

\* 서울산업대학교 기계공학과

\*\* 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

\*\*\* 안동대학교 기계공학과

로 끝에 다양한 단면형상을 갖는 곡관, 분기관, 급확대관 및 급축소관 등의 배관요소로 구성된 고압가스의 배관계로부터 발생하는 펄스파의 전파특성에 대해서는 현재까지 보고된 연구문헌은 거의 없다. 단지 최근에 들어 와서 저자들에 의해 수행된 실험적 연구결과만이 있을 뿐이다.<sup>(12)</sup> 저자들은 곡관으로부터 방출하는 펄스파에 관한 실험적 연구를 통해 곡관의 형식, 즉 Fig. 1 에 도시된 90° 곡형밴드(right-angle smooth bend)와 90° 각형 밴드(right-angle miter bend)로부터 방출되는 펄스파의 특성은 곡관의 상세형태에 따라 다르게 되며, 이것은 곡관내를 전파하는 충격파의 전파특성이 관출구로 방출된 펄스파에 반영될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 곡관의 출구로부터 방출되는 펄스파의 특성을 조사하기 위하여, 2 차원 비정상 Euler 방정식을 이용한 수치계산을 수행하였으며, 충격파관을 이용한 실험결과와 비교분석하였다. 실험은 두 종류의 곡관을 충격파관의 출구에 부착하여 펄스파의 압력파형, 강도 및 지향성을 측정하였다. 특히 펄스파의 전파형태를 쉐리렌 시스템을 이용하여 가시화하고 수치계산 결과와 비교하였다. 또 직관에 대해서도 동일한 실험을 수행하여 곡관의 결과와 비교하였다. 수치해석은 Harten-Yee 의 TVD 유한차분법<sup>(13)</sup>을 비정상 비점성 2 차원 압축성 유동방정식에 적용하여 충격파관 출구면을 기준하여 내부와 외부 유동장을 동시에 수치계산하였다

## 2. 실험

실험장치는 Fig. 1 와 같이 직경  $D=66\text{mm}$  인 원형 강관으로 제작된 충격파관을 이용하였으며, 충격파관의 출구에는 그림 (a)의 직관, 그림 (b)의 90° 곡형밴드 그리고 그림 (c)의 90° 각형밴드를 각각 부착하였다. 본 연구에서는 곡형밴드의 곡률반경  $R$  을 충격파관 지름  $D$  와 같도록 하여 각형밴드와 직관의 제원을 결정하였다. 따라서 곡형밴드의 중심길이  $L \approx 104\text{mm}$  이며, 직관의 경우도 이와 동일한 길이로 제작하였다. 그러나 각형밴드의 경우는 관모서리가 직각이 되는 관계로 중심길이  $L=132\text{mm}(2D)$  가 된다. 한편 각 관의 출구에는 파동현상에 대한 판단보정(open end correction)을 위하여 충격파관 지름보다 4 배 큰 크기인 배플판을 부착하였다.<sup>(11)</sup> 격막은 두께  $0.03\text{mm}$  인 셀로판시트를 이용하였으며 파막시에 저압실의 관출구로부터  $339\text{mm}$  및  $205\text{mm}$  상류지점에 설치한 압력센서(PCB pressure transducer 112A21)를 이용하여 충격

파의 과잉압력과 전파마하수  $M$  을 측정하였다. 충격파 전파마하수  $M$  은 실제 고압가스 배관계로부터 전파하는 펄스파 조건을 참고하여 1.02~1.20 의 범위에서 수행하였다. 또 펄스파의 압력파형, 강도 및 지향성은 관출구의 중심으로부터 축방향과 반경방향으로  $r/D=2$  인 지점에 압력센서를 설치하여 측정하였다. 특히 펄스파의 지향성은 Fig. 1 의 좌표계에 나타난 바와 같이,  $\psi$  는 x-z 평면상에서 x 축과 이루는 이루는 각도를 의미하며,  $\theta$ 는 x-y 평면상에서 x 축과 이루는 측정각도를 의미한다. 실험에서 압력센서로부터 얻어진 모든 출력신호는 증폭기를 거쳐 증폭된 뒤, 파형기록장치에 저장된다. 한편 펄스파의 전파거동은 관외경으로부터  $20\text{mm}$  떨어진 배플판상에 부착된 압력센서의 신호를 트리거 신호로 하여 관출구로부터 방출되는 펄스파의 전파형태를 쉐리렌 광학장치를 이용하여 촬영하였다.

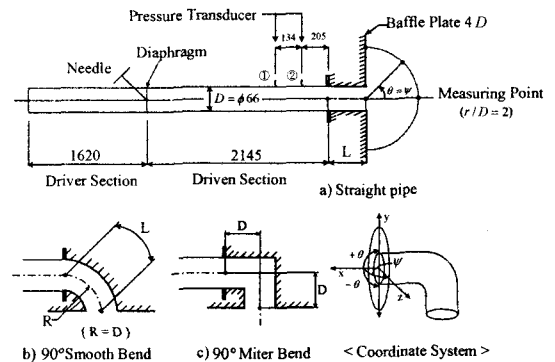


Fig. 1 Experimental apparatus and right-angle bends.

## 3. 수치계산

관출구로부터 펄스파가 방출될 때 관의 내부와 외부의 유동장은 비정상 압축성 유동방정식에 Harten-Yee 의 TVD 법<sup>(13)</sup> 을 적용하여 수치계산 하였으며 지배방정식은 다음과 같다.

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

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

식 (1)에서  $t$  는 시간,  $\rho$  는 기체의 밀도,  $x$  와  $y$  는 축방향과 반경방향의 좌표,  $u$  와  $v$  는 축방향과 반경방향의 속도성분,  $p$  는 압력이다. 또한 기

체의 비열비를  $\gamma$  라 할 때 단위체적당 전에너지  $e$  는 다음과 같이 운동에너지와 내부에너지의 합으로 표현된다.

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

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

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

$$t' = \frac{t}{\sqrt{\gamma}D/a_1}, \quad p' = \frac{p}{p_1}, \quad \rho' = \frac{\rho}{\rho_1}, \quad e' = \frac{e}{p_1} \quad (3)$$

식 (3)에서  $a$  는 음속, 상첨자 (')는 무차원량 그리고 하첨자 1 은 관내를 전파하는 충격파 전방의 정지기체 상태인 대기상태를 뜻한다. 수치계산시 계산격자는  $\Delta x = \Delta y = 75/D$  크기인 정방형 격자를 이용하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 2 부터 Fig. 4 까지는 직관, 곡형밴드 그리고 각형밴드로부터 방출된 펄스파의 압력파형 측정결과로서, 충격파 전파마하수  $M = 1.15$  일 때이다.

Fig. 2 에 도시된 직관에 대한 펄스파의 압력파형 결과에서 축방향으로 전파하는 펄스파가 반경방향으로 전파하는 펄스파에 비해 상승시간이 매우 짧고 피크압력은 매우 높다. 또한 축방향으로부터 반경방향으로 빗겨날수록 펄스파의 피크압력은 감소하며, 피크형상도 점차 완만한 형태로 변화된다.

Fig. 3 은 곡형밴드에 대한 펄스파의 압력파형을 나타낸 것으로서 반경방향으로 갈수록 피크압력이 감소하는 추세는 직관의 결과와 유사하지만, 펄스파의  $\theta$  의존성은 Fig. 2 의 직관결과와 비교하여 다소 다르다. 즉  $\theta = 0^\circ$  에서의 펄스파는 초기에 점진적인 압력상승을 보이는 반면에  $\theta = 45^\circ$  와  $\theta = 90^\circ$  의 결과에서는 곧바로 압력이 급격히 상승한다. 이것은 관의 중심점으로부터 측정점까지의 거리가 동일한 점을 고려해 볼 때  $\theta = 0^\circ$  방향으로 전파하는 펄스파가  $\theta = 45^\circ$  와  $\theta = 90^\circ$  방향으로 전파하는 펄스파보다 더 빠른 속도로 전파한다는 것을 의미한다. 그러나  $\psi$  방향으로 전파하는 펄스파는  $\theta = 0^\circ$  방향으로 전파하는 펄스파와 같이 모두 빠른 속도로 전파하는 펄스파임을 측정결과로부터

확인하였다.

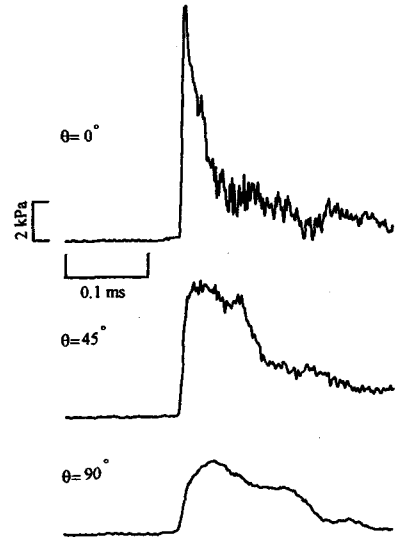


Fig. 2 Pressure signals of the impulse wave at the exit of the straight pipe ( $M = 1.15$ ).

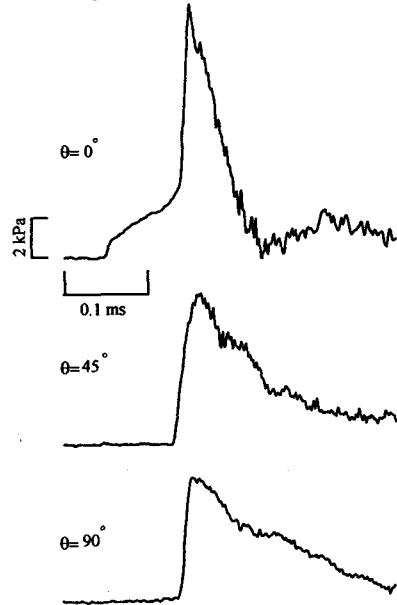


Fig. 3 Pressure signals of the impulse wave at the exit of the right-angle smooth bend ( $M = 1.15$ ).

Fig. 4 에 도시된 펄스파의 압력파형은 각형밴드에 대한 것으로서 직관과 곡형밴드의 압력파형과 비교하여 파형의 형태가 전혀 다르다는 것을 알 수 있다. 결과에서 가장 특이한 것은 펄스파의 피크압력이 두개이상 발생한다는 점이다. 이와 같이 다수의 피크압력이 발생하는 것은  $\psi$  방향으로 전

파하는 펄스파의 압력파형 결과에서도 확인할 수 있었으며, 충격파의 전파마하수가 다른 경우의 실험결과에서도 이와 유사한 압력파형이 재현되는 것을 확인하였다. 이러한 펄스파의 전파특성에 대해서는 뒤에 제시되는 가시화 및 수치계산 결과에서 상세히 토의된다.

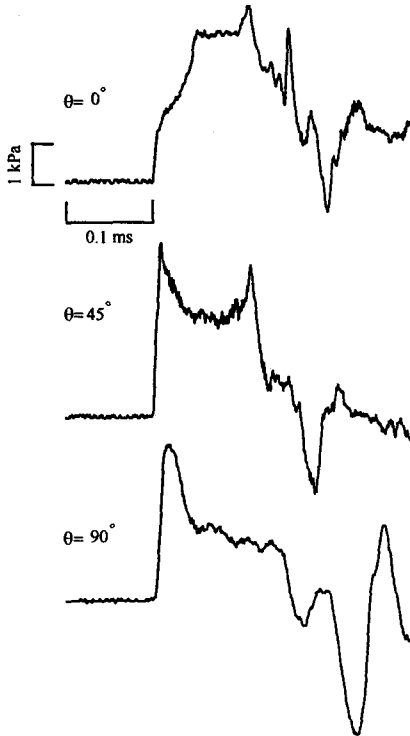
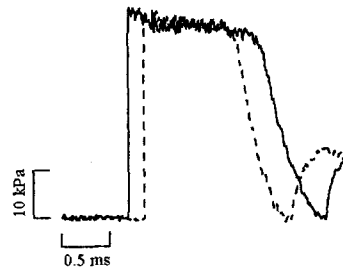
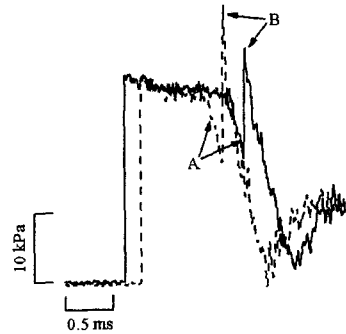


Fig. 4 Pressure signals of the impulse wave at the exit of the right-angle miter bend ( $M = 1.15$ ).

Fig. 5는 충격파의 전파마하수  $M = 1.15$ 인 조건에서 충격파관의 지점 ①(실선)과 지점 ②(파선)를 통과하는 충격파의 압력파형을 측정한 결과이다. 그림의 종축은 충격파의 과잉압력을 그리고 횡축은 파막후로부터 경과한 시간을 나타낸다. 그림 (a)에 도시된 곡형밴드의 파형결과에서의 급격한 압력상승은 충격파관의 지점 ①과 지점 ②를 통과하는 충격파 때문이며, 다시 급격하게 압력이 감소하는 것은 관출구에서 발생한 팽창파가 상류측으로 반사되어 다시 충격파관의 지점 ②와 지점 ①을 통과하였기 때문이다. 이와 같은 충격파의 전파특성은 직관의 결과와 서로 유사하지만, 그림 (b)에 도시된 각형밴드의 경우와는 큰 차이를 보인다. 각형밴드의 경우는 그림에 A와 B로 표시된 것처럼 충격파관내를 전파하는 충격파의 압력파형에서도 재차 급격하게 튀는 피크압력이 나타난다.



(a) Right-angle smooth bend



(b) Right-angle miter bend

Fig. 5 Pressure signals at the measurement points ① and ② inside the pipe.

Fig. 6은 Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5의 결과에서 토의한 곡형밴드와 각형밴드내를 통과하는 충격파와 관출구로 방출된 펄스파의 전파특성을 명확히 이해할 목적으로 가시화결과와 수치계산 결과를 상호 비교한 것이다.

먼저 Fig. 6의 그림 (a)는 직관에 대한 것으로 펄스파가 배플판상에 설치된 압력센서로부터 감지되어  $50\mu s$  지연된 후에 촬영한 것이다. 또 수치계산 결과는 가시화 사진의 촬영시간과 거의 동일한 시간인 무차원시간  $t' = 1.6959$  조건에서 계산하였다. 두 결과에서 보듯이 수치결과는 가시화결과를 잘 예측하고 있다. 또 펄스파는 원형의 축대칭형태로 관축을 향해 강하게 전파하고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6의 그림 (b)와 그림 (c)에 도시된 결과는 곡형밴드와 각형밴드에 대한 결과이다. 도시된 수치결과는 가시화결과와 정확히 동일한 무차원시간에서 계산하지는 않았다. 결과에서 곡형밴드나 각형밴드로부터 방출되는 펄스파는 대칭성을 갖거나 원형형태로 전파하지는 않는다는 것을 알 수 있다. 직관의 결과와 비교해 보더라도 펄스파 강도는 크게 약화되어 밴드출구로부터 크게 편향되어 전파

하는 것을 알 수 있다. 먼저 그림 (c)에 도시된 각형밴드에 대한 수치계산 결과에서 초기의 수직충격파 일부가 밴드출구로부터 방출되어 펄스파를 발생시키고, 충격파의 또 다른 일부는 밴드의 하류벽에 충돌하여 반사되어 밴드출구로 방출되는 펄스파에 영향을 주고 있음을 볼 수 있다. 그러나 그림 (b)의 곡형밴드의 경우는 각형밴드 만큼이나 강한 반사충격파는 아니지만 밴드중심과  $+\theta$  방향의 출구사이에서 찌그러진 형태로 관출구로 전파하는 것을 볼 수 있다. 특히 동일한 무차원시간을 기준할 때 곡형밴드나 각형밴드의 출구로 방출되는 펄스파가 Fig. 3의 토의에서 언급한 바와 같이  $+\theta$  방향보다는  $-\theta$  방향으로 더 멀리 전파하는 것을 확인할 수 있다.

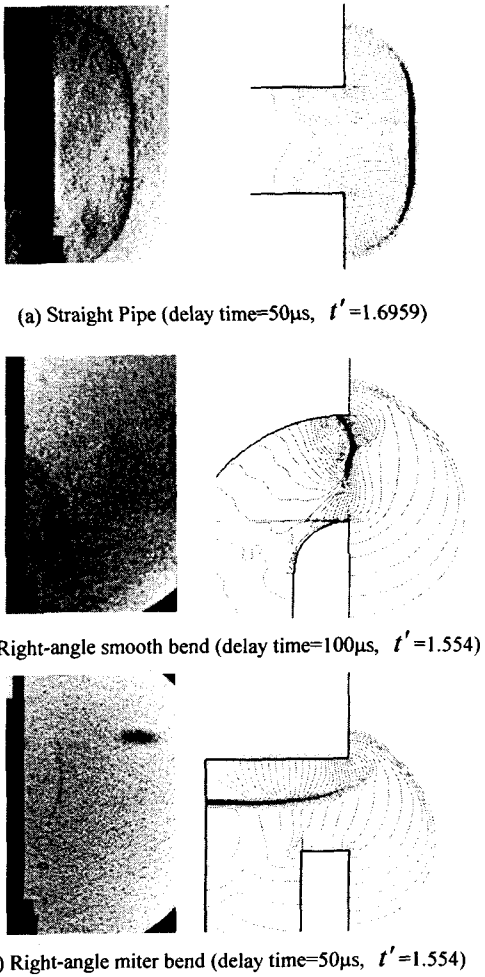


Fig. 6 Schlieren pictures and computed density contours for waves propagating inside and outside the exit of the straight pipe and pipe bends.

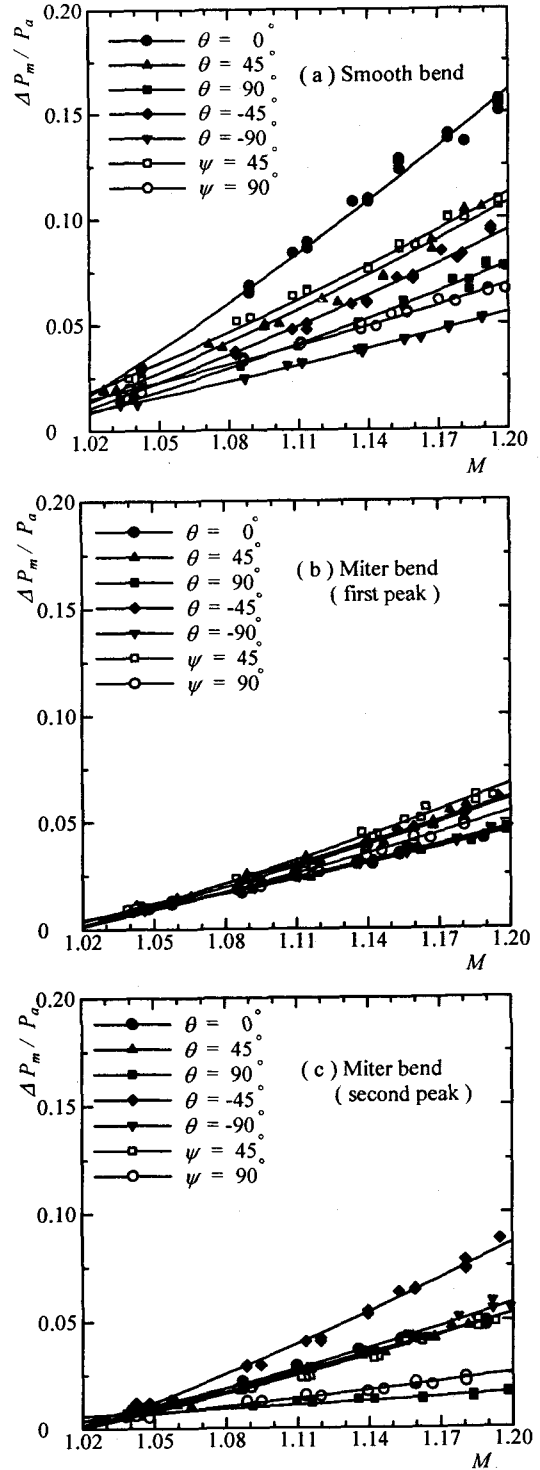


Fig. 7 Variations of the strength of impulsive waves on  $\theta$ - and  $\psi$ -directions.

Fig. 7의 결과는 곡형밴드 그리고 각형밴드

의 출구중심축으로부터  $\theta$ 와  $\psi$  방향으로 전파하는 펄스파의 피크압력을 측정하여 충격파의 전파마하수  $M$ 에 대하여 도시한 것이다. 종축은 펄스파의 피크압력  $\Delta p_m$ 을 대기압  $p_a$ 로 무차원화한 펄스파의 강도를 나타낸다. 그림 (a)는 곡형밴드에 대한 것이고, 그림 (b)와 그림 (c)는 각각 각형밴드의 첫번째 피크와 두번째 피크를 정리한 결과이다. 도시된 모든 결과에서 펄스파 강도는 충격파의 전파마하수와 전파방향에 좌우되는 것을 알 수 있다. 그림 (a)의 곡형밴드의 결과에서는 직관과 같이 중심축방향으로 전파하는 펄스파의 강도는 가장 세지만, 관내에서 생성된 변형된 충격파 방출로 인하여 중심축을 기준하여 상하와 좌우방향으로 전파하는 펄스파의 강도값은 서로 다르게 된다. 또한 그림 (b)와 그림 (c)에 도시된 각형밴드의 경우는 펄스파의 강도가 곡형밴드의 경우와 비교하여 훨씬 약해졌을 뿐만 아니라 반경방향으로 강하게 전파하는 지향성을 갖는다. 이것은 Fig. 6의 그림 (c)의 결과고찰에서도 언급하였듯이 각형밴드 내를 통과하는 충격파의 반사와 함께 밴드모서리부의 회절현상때문이다. 따라서 각형밴드의 경우는 펄스파 강도를 크게 약화시키는 피동제어 기능을 갖는 것으로 결론지을 수 있다.

## 5. 결 론

곡형밴드와 각형밴드로부터 방출되는 펄스파의 전파특성에 관한 선행연구의 실험적 결과를 본 연구에서 수행한 가시화 및 수치계산 결과와의 비교분석을 통하여 선행연구의 해석결과에 대한 타당성을 입증하였다. 수치계산 결과는 가시화결과와 잘 일치하였으며 계산결과를 통해 펄스파의 전파특성을 충분히 파악할 수 있었다. 수치계산과 가시화 결과와의 비교를 통해 곡형밴드의 경우는 밴드의  $+\theta$  방향의 출구에서 생성된 반사충격파가 그리고 각형밴드의 경우는 밴드의 하류벽에 충돌하여 반사된 충격파가 밴드출구로 방출된 펄스파의 전파특성을 좌우시키는 주된 요인임을 확인하였다. 이러한 관내의 충격파 전파특성에 좌우되어 곡형밴드의 경우는 직관에서와 같이 관축방향으로 강한 지향성을 갖지만, 각형밴드의 경우는 반경방향으로 약한 지향성을 갖는다. 따라서 각형밴드의 경우는 직관이나 곡형밴드에 비하여 모든 방향에서 펄스파 강도를 크게 감소시키는 좋은 피동제어 요소인 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구의 네번째 저자는 본 연구가 두뇌한국 BK21 사업의 지원으로 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사를 표합니다.

## 참고문헌

- (1) Raghunathan, S., Kim, H.D. and Setoguchi, T., 1998, "Impulse Noise and Its Control, Progress in Aerospace Science, Vol.34, pp.1-44.
- (2) 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.
- (3) 김희동, 1994, "고속철도 터널에서 발생하는 유체역학적 파동현상," 대한기계학회지, 제 34 권, 제 10 호, pp.796-807
- (4) 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.
- (5) 김희동, Setoguchi, T., 1996, "고속철도 터널출구에서 발생하는 충격성 소음의 저감을 위한 실험적 연구," 대한기계학회논문집(B), 제 20 권, 제 7 호, pp.2375-2385
- (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) Floyd, J.K., 1978, "Control of Steam Venting Noise in Power Plants," Transactions of ASME, Journal of Engineering for Power, Vol.100, pp.369-373.
- (8) Maa Dah-you, LiPei-zi, 1981, "Pressure Dependence of Jet Noise and Silencing of Blow-Offs," Noise Control Engineering, Vol.17, No.3, pp.104-112.
- (9) 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, pp.161-167.
- (10) Kim, H.D. and Setoguchi, T., 2001, "Study of the Impingement of Impulse Wave upon a Flat Plate," Journal of Sound and Vibration, (in press).
- (11) 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, 226(5), pp.1011-1028.
- (12) 이동훈, 김희동, Setoguchi, T., 2001, "곡관으로부터 방출되는 펄스파에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(E), pp.317~322.
- (13) Yee, H.C., 1987, "Upwind and Symmetric Shock Capturing Schemes," NASA TM-89464.