

<논 문>

곡관출구로부터 방출되는 펄스파의 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Characteristics of the Impulsive Wave Discharged from the Open End of a Bend Pipe

이 동 훈[†] · 김 희 동* · 瀬戸口俊明**

D. H. Lee, H. D. Kim and T. Setoguchi

(2001년 5월 11일 접수 ; 2001년 10월 29일 심사완료)

Key Words : Compressible Flow(압축성 유동), Impulsive Wave(펄스파), Unsteady Flow(비정상유동), Shock Tube(충격파관), Shock Wave(충격파)

ABSTRACT

The current study depicts an experimental work of the impulsive wave discharged from the exit of several kinds of right-angle bend pipes, which are attached to the open end of a simple shock tube. The weak normal shock wave with Mach number from 1.02 to 1.20 is employed to obtain the impulsive wave propagating outside the exit of the pipe bends. The experimental data of the magnitude of the impulsive wave and its propagation directivity are analyzed to characterize the impulsive waves discharged from the right-angle bend pipes and compared with those from a straight pipe. The impulsive waves are visualized by a Schlieren optical system. A computation work using the two-dimensional, unsteady, compressible Euler equation is also carried out to represent the experimented impulsive waves. The results obtained show that a right-angle miter bend considerably reduces the magnitude of the impulsive wave and its directivity toward to the pipe axis, compared with the straight pipe. It is believed that the right angle miter bend pipe can play a role of passive control against the impulsive wave.

1. 서 론

고압가스의 배관계나 자동차의 배기머플러 등으로 부터 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 피크압력 특성을 갖기 때문에 수음자의 청각기

능을 손상시킬 뿐만 아니라, 환경소음의 영향범위를 크게 확대시키고, 심한 경우 주변 구조물을 진동/파괴시키는 주요한 원인이 되기도 한다.⁽¹⁾ 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, 이에 대한 적절한 대응책이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

충격성 소음의 저감대책은 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.⁽²⁾ 지금까지 발표된 충격성 소음의 저감기술은 주

[†] 책임저자, 정회원, 서울산업대학교 기계공학과
E-mail : ldh@duck.snut.ac.kr

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

* 안동대학교 기계공학과

** 佐賀大學 機械工學科(日本)

로 대표나 총기류 그리고 고속열차/터널시스템을 대상으로 연구되어 왔으며,^(3, 4) 특히 이중에서 고속철도의 터널에서 발생하는 충격성 소음의 저감에 관한 연구는 김희동 등⁽⁵⁻⁷⁾의 연구를 통하여 상당한 진전이 이루어 졌다.

한편 고압가스의 배관계 등으로부터 발생하는 소음의 저감에는 종래 배기형 소음기가 이용되어 왔으나,^(8, 9) 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 효과적인 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, 선형음향에서와 같이 거리가 2배 증가할 때마다 펄스파의 강도가 반으로 감소하는 거리감쇠특성,⁽¹⁰⁾ 펄스파가 구조물과 간섭하는 경우에 생기는 반사, 회절 및 지향특성⁽¹¹⁾ 그리고 펄스파 강도에 미치는 배플판의 크기효과⁽¹²⁾ 등이 비교적 상세히 보고되어 있다.

그러나 관로 중간이나 관로 끝에 다양한 단면형상을 갖는 곡관, 분기관, 급속대관 및 급축소관 등의 배관요소로 구성된 고압가스의 배관계로부터 발생하는 펄스파의 전파특성에 대해서는 현재까지 잘 알려져 있지 않다. 특히 이 중에서 관출구 부근에서 유로방향을 갑자기 변화시키는 곡관의 경우는 관내의 모서리부를 통과하는 충격파의 반사 및 회절로 인하여, 단순형태의 직관에 비하여 그 파동특성이 훨씬 복잡해질 것으로 예상된다. 실제의 산업현장에서 관출구가 곡관으로 처리되는 경우는 대단히 많으며, 그 대표적인 예로 화력발전소나 도시가스의 blow-off 라인을 비롯한 각종 화확플랜트의 고압가스 배관계를 들 수 있다. 이와 같이 곡관의 출구로부터 전파하는 펄스파의 전파특성에 대한 정확한 이해와 규명은 충격성 소음의 대책수립에 있어서 매우 귀중한 공학적 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 곡관의 출구로부터 방출되는 펄스파의 전파특성을 조사하기 위하여, 충격파관을 이용

한 실험을 수행하였다. 실험에서는 두 종류의 곡관요소, 즉 90° 곡형밴드(right-angle smooth bend)와 90° 각형밴드(right-angle miter bend)를 충격파관의 출구에 부착하여 펄스파의 압력파형, 강도 및 지향성을 측정하였다. 또 직관에 대해서도 동일한 실험을 수행하여 곡관의 결과와 비교하였다. 실험은 실제 고압가스의 배관계, 자동차의 배기계 그리고 각종 화기류 등으로부터 전파하는 펄스파의 발생조건을 참고하여 충격파 전파마하수 $M=1.02\sim 1.20$ 의 범위에서 수행하였다. 특히 펄스파의 전파특성을 보다 분명하게 규명하고 이해하기 위하여 각 관의 출구로 방출되는 펄스파를 설리렌 광학장치를 이용하여 가시화하고, 이들 결과를 TVD법으로 구한 수치계산결과⁽¹³⁾와 비교 고찰하였다.

2. 실험

실험장치는 Fig. 1과 같이 직경 $D=66$ mm인 원형 강관으로 제작된 충격파관을 이용하였으며, 충격파관의 출구에는 Fig. 1(a)의 직관, Fig. 1(b)의 90° 곡형밴드 그리고 Fig. 1(c)의 90° 각형밴드가 각각 부착된다. 실제의 배관계에서는 배관요소의 특성길이가 펄스파에 큰 영향을 미치게 되는 것을 감안하여 본 연구에서는 특성길이가 동일한 밴드를 각형과 곡형으로 구분하여 제작하였다. 그러나 곡형밴드와 각형밴드의 형상차이로 인하여, 중심길이는 서로 다르게 되므로, 본 연구에서는 곡형밴드의 곡률반경 R 을

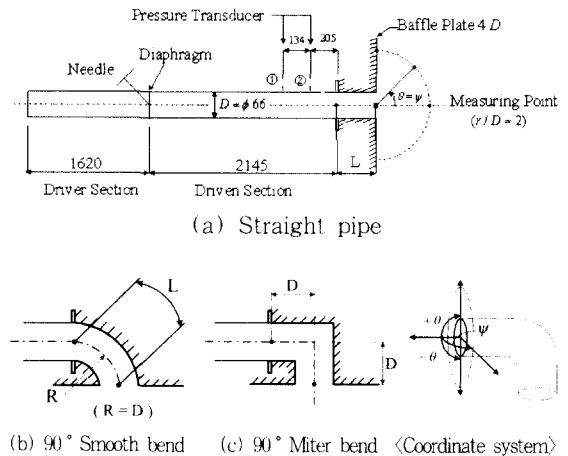


Fig. 1 Experimental apparatus and right-angle bends

충격파관 지름 D 와 같도록 하여 각형밴드와 직관의 제원을 결정하였다. 따라서 곡형밴드의 중심길이 $L \cong 104$ mm이며, 직관의 경우도 이와 동일한 길이로 제작하였다. 그러나 각형밴드의 경우는 관모서리가 직각이 되는 관계로 중심길이 $L \cong 132$ mm($2D$)가 된다. 이로 인해 곡형밴드의 경우는 모서리부의 관지름이 충격파관의 지름과 동일하지만, 각형밴드의 내외측 모서리간의 대각길이는 약 93 mm로 곡형밴드에 비하여 약 30 % 정도가 더 확장되었다.

한편 각 관의 출구에는 파동현상에 대한 판단보정⁽¹²⁾(open end correction)을 위하여 충격파관 지름의 4배 크기인 배플판을 부착하였다. 충격파관의 고압실과 저압실의 길이는 각각 1620 mm와 2145 mm이고, 고압실과 저압실 사이에는 두께 0.03 mm인 셀로판 격막을 설치하였다. 격막 파막시에 저압실내에서 발생하는 충격파의 과잉압력과 충격파의 전파마하수 M 은 저압실의 관출구로부터 339 mm 및 205 mm 상류지점에 설치한 압력센서(PCB pressure transducer 112A21)를 이용하여 측정하였다. 또 관출구로부터 방출되는 펄스파의 압력파형, 강도 및 지향성은 관출구 중심으로부터 축방향과 반경방향으로 $r/D = 2$ 인 지점에 압력센서를 설치하여 측정하였다. 특히 펄스파의 지향성은 Fig. 1의 좌표계에 나타낸 방위각을 따라 반경방향에서의 펄스파의 피크압력을 측정하여 구하였다.

좌표계에서 보듯이 ψ 는 관출구면의 수직중심축과 직교하는 수평면상에서의 중심축으로부터의 각도를 나타내며, θ 는 수평중심축과 직교하는 수직평면상에서의 중심축으로부터의 각도를 나타낸다. 방위각 ψ 는 수직중심축을 기준하여 좌우대칭의 관계이므로 중심축($\psi = 0^\circ$)을 포함한 $\psi = 45^\circ$ 와 $\psi = 90^\circ$ 방향에서만 펄스파의 압력을 측정하였다. 따라서 직관의 경우는 모든 방향으로 대칭이므로 $\theta = \psi$ 가 된다. 그러나 수직평면상에서의 방위각 θ 는 수평중심축을 기준하여 상하대칭 관계가 아니므로 중심축을 기준하여 충격파관 하류쪽을 $\theta = -45^\circ$ 와 $\theta = -90^\circ$ 그리고 그 반대쪽을 $\theta = 45^\circ$ 와 $\theta = 90^\circ$ 로 정하여 펄스파의 압력을 측정하였다. 또한 펄스파 측정시에 외란의 영향을 최소화시키기 위하여 압력센서의 지지대는 선단이 뾰족한 썸기형으로 제작하였다. 압력센서로부터 얻어진 모든 출력신호는 증폭기를 거쳐 증폭된 뒤, 파형기록장치에 저장된다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2부터 Fig. 5까지는 직관, 곡형밴드 그리고 각형밴드로부터 방출된 펄스파의 축방향과 반경방향에서의 압력파형 측정결과로서, 충격파 전파마하수 $M \cong 1.1$ 일 때이다.

Fig. 2에 도시된 직관에 대한 펄스파의 압력파형 결과를 보면, 축방향으로 전파하는 펄스파의 피크압력이 가장 높고 반경방향으로 갈수록 펄스파의 피크압력은 감소하며, 또 압력파형의 피크형상도 완만한 형태로 변화된다.

Fig. 3은 곡형밴드에 대한 펄스파의 압력파형을 나타낸 것으로서 반경방향으로 갈수록 피크압력이 감소하는 추세는 직관의 결과와 유사하지만, 펄스파의 θ 의존성은 Fig. 2의 직관결과와 비교하여 전파방향에 따라 다르다. 즉 $\theta = 45^\circ$ 와 $\theta = 90^\circ$ 에서는 직관과 같이 곧바로 압력이 상승하는 반면에, $\theta = 0^\circ$ 에서의 펄스파는 초기에 점진적인 압력상승을 보이다가 급격히 압력이 상승한다. 이것은 관출구의 중심점으로부터 측정점까지의 거리가 일정한 점을 고려해 볼 때 $\theta = 0^\circ$ 방향으로 전파하는 펄스파가 $\theta = 45^\circ$ 와

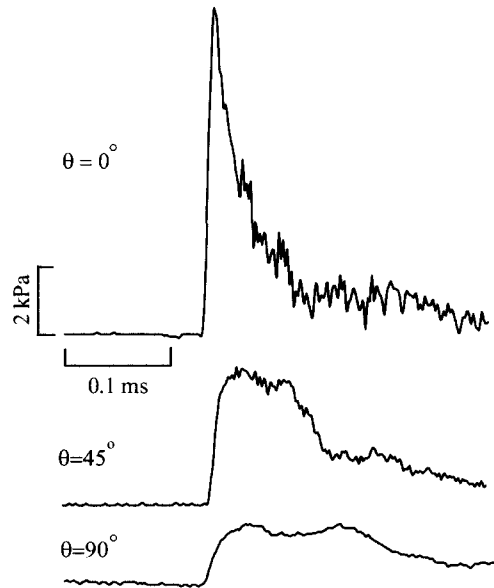


Fig. 2 Pressure signals in θ -direction of the impulsive waves from the exit of the straight pipe

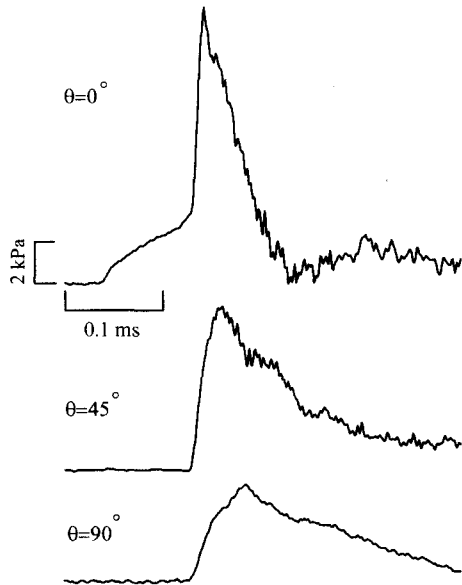


Fig. 3 Pressure signals in θ -direction of the impulsive waves from the exit of the right-angle smooth bend

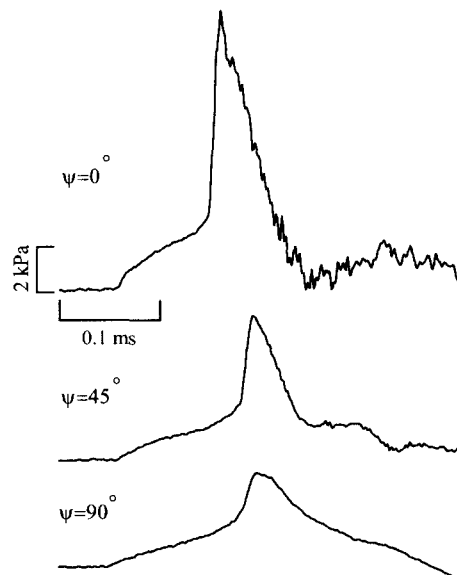


Fig. 4 Pressure signals in ψ -direction of the impulsive waves from the exit of the right-angle smooth bend

$\theta = 90^\circ$ 방향으로 전파하는 펄스파보다 더 빠른 속도로 전파한다는 것을 의미한다. 그러나 Fig. 4에 도시된 ψ 방향으로 전파하는 펄스파는 $\theta = 0^\circ$ 방향으로 전파하는 펄스파와 같이 모두 빠른 속도로 전파하

는 펄스파임을 Fig. 3과의 비교를 통하여 알 수 있다.

Fig. 5에 도시된 펄스파의 압력파형은 각형밴드에 대한 것으로서 직관과 곡형밴드의 압력파형과 비교하여 파형의 형태가 전혀 다르게 되는 것을 알 수 있다. 결과에서 가장 특이한 것은 펄스파의 피크압력이 두 개이상 발생한다는 점이다. 이와 같이 다수의 피크압력이 발생하는 것은 ψ 방향으로 전파하는 펄스파의 압력파형 결과에서도 확인할 수 있었으며, 충격파의 전파마하수가 다른 범위의 실험결과에서도 이와 유사한 압력파형이 재현되는 것을 확인하였다.

이와 같이 곡형밴드나 직관의 경우와는 달리 각형밴드로부터 방출되는 펄스파에서 다수개의 피크압력이 발생하는 것은 충격파가 밴드의 모서리부근을 통과하면서 생긴 파동들의 상호간섭된 결과가 펄스파에 반영된 것으로 볼 수 있다. 이상에서 기술한 펄스파의 전파특성은 Fig. 6에 제시된 충격파관내에서의 실제 압력파형 측정결과와 Fig. 7에 제시된 가시화 및 수치계산 결과와의 비교 고찰을 통해 보다 명확히 이해될 수 있다.

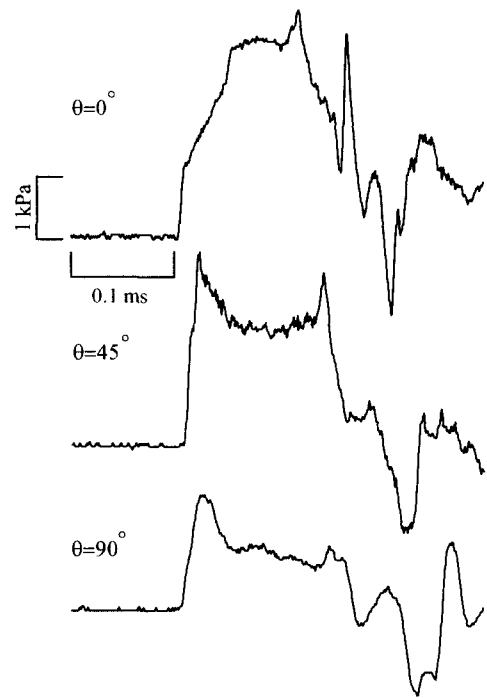


Fig. 5 Pressure signals in θ -direction of the impulsive waves from the exit of the right-angle miter bend

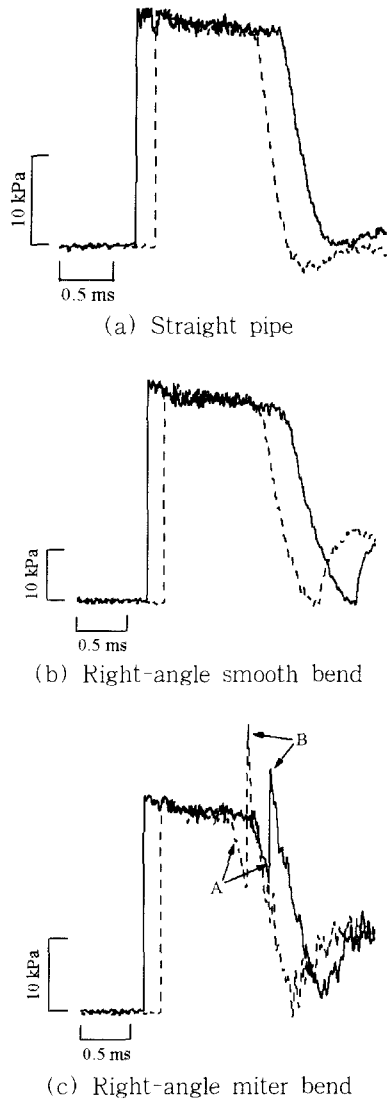


Fig. 6 Pressure signals at the measurement points ① and ② inside the pipe

Fig. 6은 충격파관 출구에 직관, 곡형밴드, 그리고 각형밴드를 부착하고 충격파의 전파마하수 $M \cong 1.1$ 인 조건에서 충격파관의 ① 지점(실선)과 ② 지점(파선)를 통과하는 충격파의 압력파형을 측정된 결과이다. 그림의 종축은 충격파의 과잉압력을 그리고 횡축은 파막후로부터 경과한 시간을 나타낸다.

파형결과에서 급격한 압력상승은 충격파관의 지점 ①과 지점 ②를 통과하는 충격파 때문이며, 다시 급격하게 압력이 감소하는 것은 관출구단에서 발생한 팽창파가 상류측으로 반사되어 다시 충격파관의 지점

②와 지점 ①을 통과하였기 때문이다. 이와 같은 충격파의 전파특성은 Fig. 6(a)에 도시된 직관과 Fig. 6(b)에 도시된 곡형밴드의 경우는 서로 유사하지만, Fig. 6(c)에 도시된 각형밴드의 경우는 파형결과에 A와 B로 표시된 것처럼 재차 급격하게 튀는 피크 압력이 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7에는 직관, 곡형밴드 그리고 각형밴드의 출구로 방출되는 펄스파를 쉐리렌 광학장치를 이용하여 가시화하고, 이들 결과를 TVD법으로 관 내외부의 유동장을 수치계산한 결과¹³⁾와 비교도시하였다. 이 때 충격파의 전파마하수는 $M \cong 1.1$ 일 때이다. 순식간에 관출구로부터 방출되는 펄스파의 전파형태를 정확하게 촬영하기 위해서는 쉐리렌 시스템의 광원과 카메라 셔터를 동시에 작동시키는 트리거 신호가 필요하므로, 본 연구에서는 제시된 그림에서 보듯이 관외경으로부터 20 mm 떨어진 배플판상에 부착된 압력센서로부터 검출된 신호를 트리거 신호로서 수신할 수 있는 별도의 회로를 구성하여 쉐리렌 시스템에 연결하였다. 결과에서 t' 는 무차원시간¹⁴⁾을 뜻하며, 파막후에 생성된 충격파가 펄스파의 형태로 관출구의 측정점(관외경으로부터 20 mm 지점)까지 도달하는데 걸린 시간을 나타낸다.

먼저 Fig. 7(a)는 직관에 대한 것으로 펄스파가 배플판상에 설치된 압력센서로부터 감지되어 50 μ s 지연된 후에 촬영한 것이다. 또 수치계산 결과는 가시화 사진의 촬영시간과 거의 동일한 시간인 무차원시간 $t' = 1.6959$ 조건에서 계산하였다. 두 결과에서 보듯이 수치계산결과는 가시화결과를 잘 예측하고 있다. 또 펄스파는 원형의 최대칭형태로 관축을 향해 강하게 전파하고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7(b)와 (c)는 곡형밴드와 각형밴드에 대한 결과이다. 밴드출구로부터 방출되는 펄스파는 직관에 비하여 훨씬 약하기 때문에 가시화결과에서의 파형이 직관만큼은 뚜렷하지 않으나, 밴드출구로부터 편향되어 전파하는 펄스파의 미약한 거동은 분명히 볼 수 있다. 결과에서 곡형밴드나 각형밴드로부터 방출되는 펄스파는 대칭성을 갖거나 원형형태로 전파하지는 않는다는 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 7(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

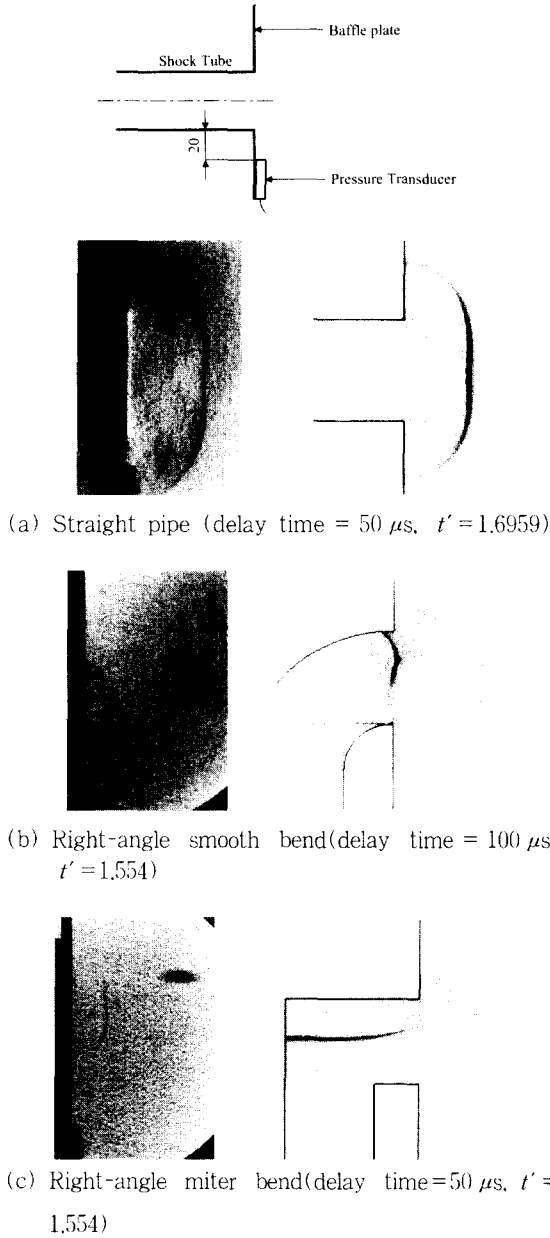


Fig. 7 Schlieren pictures and computed density contours for waves propagating inside and outside the exit of the straight pipe and bend pipes

미치고 있음을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 7(b)의 곡형밴드의 경우는 각형밴드 만큼이나 강한 반사충격파는 아니지만 밴드중심과 $+\theta$ 방향의 출구사이에서 찌그러진 형태의 파동으로 관출구로 전파하는 것을 볼 수 있다. 특히 동일한 무차원시간을 기준할 때 곡형밴드

나 각형밴드의 출구로 방출되는 펄스파가 $+\theta$ 방향보다는 $-\theta$ 방향으로 더 멀리 전파하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 직관, 곡형밴드 그리고 각형밴드의 출구로

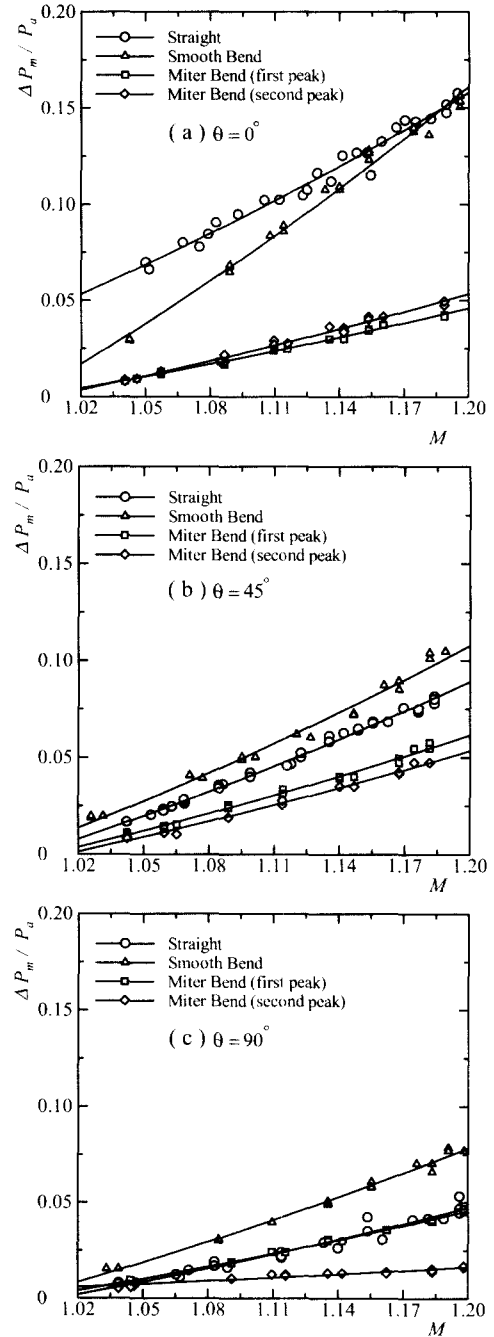


Fig. 8 Variations of the strength of impulsive waves in θ -direction

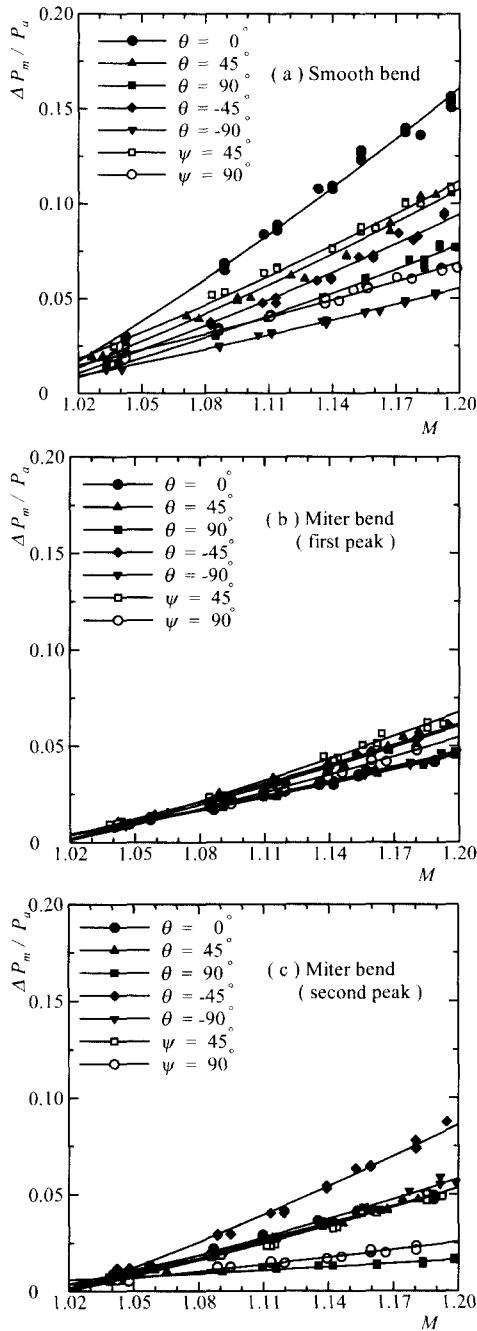


Fig. 9 Variations of the strength of impulsive waves in θ - and ψ directions

부터 $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$ 및 $\theta = 90^\circ$ 방향으로 전파하는 펄스파의 강도를 측정하여 충격파의 전파마하수 M 에 대하여 도시한 것이다. 종축의 값 $\Delta p_m / p_a$ 는 펄스파의 피크압력 Δp_m 을 대기압 p_a 로 무차원화

한 펄스파의 강도를 나타낸다. 또 각형밴드에서는 다수개의 피크압력이 발생하므로, 본 연구에서는 펄스파의 강도에 가장 큰 영향을 미치는 첫번째 피크압력과 두 번째 피크압력만을 정리하여 결과에 나타내었다.

먼저 Fig. 8(a)에 도시된 $\theta = 0^\circ$ 방향의 결과에서 직관으로부터 방출된 펄스파가 곡형밴드나 각형밴드로부터 방출된 펄스파에 비하여 그 강도가 훨씬 강하다는 것을 알 수 있다. 이것은 참고문헌 (14)에서도 언급한 바 있듯이 직관으로부터 방출되는 펄스파는 관축방향으로만 강하게 전파하는 지향성을 갖기 때문이다. 그러나 $\theta = 0^\circ$ 에 대한 결과를 제외한 Fig. 8(b)와 Fig. 8(c)의 $\theta = 90^\circ$ 결과에서는 오히려 곡형밴드로부터 방출된 펄스파가 직관이나 각형밴드에 비하여 다소 더 강하게 나타난다. 이것은 Fig. 7의 수치계산 결과에서도 보았듯이 관출구로 방출되는 펄스파는 $+\theta$ 방향으로 더 강하게 전파하기 때문이다

Fig. 9는 곡형밴드 그리고 각형밴드의 출구중심축으로부터 θ 와 ψ 방향으로 방출되는 펄스파를 측정 한 결과로서 Fig. 8과 같이 종축은 펄스파의 피크압력 Δp_m 을 대기압 p_a 로 무차원화 한 펄스파의 강도를 나타내며, 횡축의 M 은 충격파 전파마하수를 나타낸다. Fig. 9(a)는 곡형밴드에 대한 것이고, Fig. 9(b)와 (c)는 각각 각형밴드의 첫번째 피크압력과 두 번째 피크압력값을 정리한 결과이다. 도시된 모든 결과에서 펄스파의 강도는 충격파의 전파마하수와 전파 방향에 크게 좌우되는 것을 알 수 있다. Fig. 9(a)의 곡형밴드의 결과에서는 직관과 마찬가지로 중심축 방향으로 전파하는 펄스파의 강도가 가장 세지만, 관내에서 생성된 반사충격파로 인해 중심축을 기준하여 상하와 좌우방향으로 방출되는 펄스파의 강도값은 서로 다르다. 그리고 Fig. 9(b)와 (c)에 도시된 각형밴드의 경우는 펄스파의 강도가 직관이나 곡형밴드의 경우와 비교하여 훨씬 약해졌을 뿐만 아니라 관축방향보다는 반경방향으로 다소 더 강하게 전파하는 특성을 갖는다.

4. 결론

본 연구에서는 곡관의 출구로부터 방출되는 펄스파의 전파특성을 조사하기 위하여 충격파관의 출구에 90° 곡형밴드 그리고 90° 각형밴드를 부착하고 펄스파의 파형, 강도 그리고 지향성을 측정하였다. 또 직

관에 대해서도 동일한 실험을 수행하여 곡관의 결과와 비교하였으며, 충격파 전파마하수 $M=1.02\sim 1.20$ 의 범위에서 수행하였다. 특히 펄스파의 전파특성을 보다 분명하게 이해하기 위하여 각 관의 출구로 방출되는 펄스파를 쉘리엔 광학장치를 이용하여 가시화하고, 이들 결과를 TVD법으로 구한 수치계산결과⁽¹³⁾와 비교 고찰하였다.

수치계산과 가시화결과와의 비교로부터 곡형밴드의 경우는 밴드의 $+\theta$ 방향의 출구에서 생성된 반사충격파가 그리고 각형밴드의 경우는 밴드의 하류벽에 충돌하여 반사된 충격파가 밴드출구로 방출되는 펄스파의 전파특성을 좌우시키는 주된 요인임을 확인하였다. 이와 같은 관내의 충격파 전파특성에 좌우되어 직관과 곡형밴드의 출구로부터 방출된 펄스파는 단일 피크를 갖는 반면에, 각형밴드로부터 방출된 펄스파는 다수개의 피크를 갖는다. 또한 관내의 충격파 전파특성에 좌우되어 곡형밴드의 경우는 직관에서와 같이 관축방향으로 강한 지향성을 갖지만, 각형밴드의 경우는 모든 방향에서 펄스파 강도를 크게 약화시키는 피동제어의 역할과 함께 관축방향보다 반경방향으로 다소 더 강하게 전파하는 특성을 갖는다.

후 기

본 연구의 두 번째 저자는 본 연구가 두뇌한국 BK21사업의 지원으로 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사사를 표합니다.

참 고 문 헌

- (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) Kim, H. D., Setoguchi, T. and Matsuo, S., 2001, "Augmentation of the Magnitude of the Impulsive Wave Discharging from a Tube, Journal of Mechanical Engineering Sciences", IMech Part C, Vol. 215, pp. 191~199.
- (3) Stollery, J. L., Phan, K. C. and Garry, K. P., 1981, "Simulation of Blast Fields by Hydraulic Analogy", Proceedings of 13th International Symposium on Shock Tubes and Waves, pp. 781~789.
- (4) 김희동, 1994, "고속철도 터널에서 발생하는 유체역학적 파동현상," 대한기계학회지, 제 34 권, 제 10 호, pp. 796~807.
- (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) 김희동, Setoguchi, T., 1996, "고속철도 터널출구에서 발생하는 충격성 소음의 저감을 위한 실험적 연구," 대한기계학회논문집(B), 제 20 권, 제 7 호, pp. 2375~2385.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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).
- (12) 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.
- (13) Kim, H. D., Lee, D. H. and Setoguchi, T., 2001, "Study of the Impulse Wave Discharged from the Exit of a Right-Angle Pipe Bend", Journal of Sound and Vibration, (in press).
- (14) 이동훈, 김희동, 강성황, 2000, "관출구로부터 방출하는 약한 충격파의 평판충돌에 관한 연구," 한국소음진동공학회지, 제 10 권, 제 6 호, pp. 1035~1040.