

## 곡관으로부터 방출되는 펄스파에 관한 실험적 연구

이동훈\* · 김희동\*\* · 瀬戸口俊明\*\*\*

**An Experimental Study of the Impulsive Wave Discharged from a Curved Duct**

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

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

This study depicts an experimental work of the impulsive wave discharged from the open end 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 its magnitude of Mach number from 1.03 to 1.20 is employed to obtain the impulsive wave propagating outside the open end of the bend pipes. 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 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. 서론**

고압가스의 배관계나 자동차의 배기머플러 등으로부터 갑작스런 질량유동이 대기로 방출될 경우에 매우 강력한 세기의 충격성 소음이 발생하게 된다. 충격성 소음은 노즐 또는 오리피스로부터 방출되는 정상 제트유동에서 발생한 제트소음에 비하여 훨씬 낮은 주파수와 매우 높은 피크압력 특성을 갖기 때문에 수음자의 청감기능을 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 같이 광범위한 분야에서 발생되고 있으므로, 이에 대한 적절한 대응책이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 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.<sup>(2)</sup> 충격성 소음의 저감기술은 주로 대포나 총기류 그리고 고속열차/터널시스템을 대상으로 연구되어 왔으며<sup>(3,4)</sup>, 특히 이 중에서 고속철도의 터널에서 발생하는 충격성 소음의 저감에 관한 연구는 김희동 등<sup>(5-7)</sup>의 연구를 통하여 상당한 진전이 이루어 졌다.

한편 고압가스의 배관계 등으로부터 발생하는 소음의 저감에는 일반적으로 배기형 소음기가 이용되어 왔으나<sup>(8,9)</sup>, 이들 배기형 소음기는 정상유동에서 발생하는 제트소음을 저감시키기 위한 것으로, 충격성 소음을 저감시키는데는 적합치 않다고 판단된다. 이것은 배관계로부터 발생하는 충격성 소음의 특성이 지금까지 잘 알려져 있지 않기 때문이다. 따라서 각종 고압가스의 배관계 출구로부터 발생하는 충격성 소음에 대한 저감대책을 수립하기 위해서는 배관계를 전파하는 압력파의 전파 특성과 관출구로부터 발생되어 전파하는 펄스파의

\* 서울産業大學校 機械工學科

\*\* 安東大學校 機械工學科

\*\*\* 佐賀大學校 機械工學科(日本)

전파특성을 보다 명확히 이해할 필요가 있다. 펄스파에 관한 연구는 주로 직관을 대상으로 연구되어 왔으며, 선형음향에서와 같이 거리가 2 배 증가할 때마다 펄스파의 강도가 반으로 감소하는 거리 감쇠특성<sup>(10)</sup>, 펄스파가 구조물과 간섭하는 경우에 생기는 반사, 회절 및 지향특성<sup>(11)</sup> 그리고 펄스파 강도에 미치는 배플판의 크기효과<sup>(12)</sup> 등이 비교적 상세히 파악되어 있다.

그러나 관로 중간이나 관로 끝에 다양한 단면 형상을 갖는 곡관, 분기관, 급확대관 및 급축소관 등의 배관요소로 구성된 고압가스의 배관계로부터 발생하는 펄스파에 관해서는 펄스파의 생성기구, 전파과정 및 전파특성과 같은 제반특성들이 현재까지 잘 알려져 있지 않다. 특히 이 중에서 관출구 부근에서 유로방향을 갑자기 변화시키는 곡관의 경우는 관모서리부에서 관내를 통과하는 충격파의 반사와 회절현상이 필연적으로 발생되므로, 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 화학플랜트의 고압가스 배기관을 들 수 있다. 곡관의 출구로부터 발생하는 펄스파의 전파특성에 대한 정확한 이해와 규명은 충격성 소음의 대책수립에 필요한 매우 귀중한 공학자료로서 활용될 수 있을 뿐만 아니라 곡관출구로부터 발생하는 펄스파의 파동현상에 대한 학술적이해를 증진시키는데에도 그 가치가 매우 클 것으로 판단된다.

본 연구에서는 곡관의 출구로부터 발생하는 펄스파의 전파특성을 조사하기 위하여, 충격파관을 이용한 실험을 수행하였다. 실험에서는 두 종류의 곡관요소 즉, 90° 곡형밴드(right-angle smooth bend)와 90° 각형 밴드(right-angle miter bend)를 충격파관의 출구에 부착하여 펄스파의 강도 및 전파특성을 측정하였다. 또 곡관출구로부터 전파하는 펄스파의 강도크기와 전파특성을 보다 분명하게 보여주기 위하여, 직관에 대해서도 동일한 실험을 하여 곡관에 대한 실험결과와 비교고찰하였다. 실험은 실제 고압가스의 배관계, 자동차 배기머플러, 각종 화기류 등으로부터 전파하는 펄스파의 발생조건 범위인 충격파의 전파마하수  $M=1.03\sim 1.2$  에서 수행하였다.

## 2. 실험

실험장치는 Fig. 1 와 같이 원형 충격파관을 이

용하였으며, 충격파관의 출구에는 그림 (a)의 직관, 그림 (b)의 90° 곡형밴드 그리고 그림 (c)의 90° 각형밴드가 각각 부착된다. 특히 실제의 배관계에서는 배관요소의 특성길이나 중심길이보다는 배관요소의 형상이 펄스파의 전파특성에 더 큰 영향을 미치게 되는 점을 감안하여 본 연구에서는 특성길이와 동일한 밴드를 각형과 곡형으로 구분하여 제작하였다. 이러한 형상차이로 인하여 곡형밴드와 각형밴드의 중심길이는 서로 다르게 되므로, 본 연구에서는 곡형밴드의 곡률반경을 기준으로 하여 각형밴드와 직관의 제원을 결정하였다. 따라서 곡형밴드의 중심길이  $L$  은 직관의 길이와 같게 제작할 수 있었으며, 각형밴드는 관이음이 직각이 되는 관계로 중심길이가 직관이나 곡형밴드에 비하여 다소 더 길게 제작되었다.

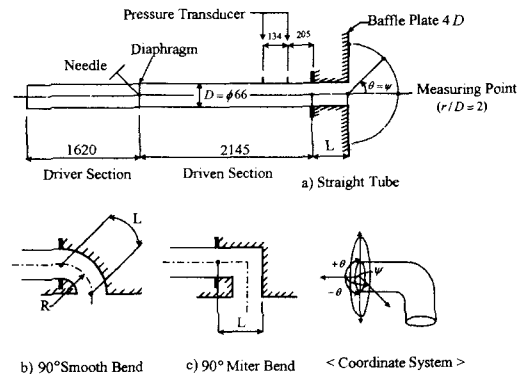


Fig. 1 Experimental apparatus and right-angle bends.

한편 각 관의 출구에는 파동현상에 대한 판단 보정(open end correction)을 위하여 충격파관 지름의 4 배 크기의 배플판을 부착하였다.<sup>(12)</sup> 충격파관은 직경이  $D(=66\text{mm})$ 인 강관으로 제작되어 있으며, 고압실과 저압실의 길이는 각각 1620mm 와 2145mm 이고, 고압실과 저압실 사이에는 두께 0.03mm 인 셀로판 격막을 설치하였다. 격막 파막시에 저압실내에서 발생하는 충격파의 과잉압력  $\Delta p^*$  와 충격파의 전파마하수  $M$  은 저압실의 출구로부터 134mm 및 205mm 상류지점에 설치한 압력센서를 이용하여 측정하였다. 또 관출구로부터 방출하는 펄스파의 강도와 지향성은 관출구 중심점을 기준하여  $r/D=2$  인 축방향과 축중심으로부터 45° 와 90° 의 반경방향 지점에 압력센서를 설치하여 측정하였다. 특히 펄스파의 지향성은 Fig. 1 의 좌표계에서 나타난 방위각을 따라 펄스파의 피크압력을 측정하여 구하였다. 좌표계에서 보듯이  $\psi$  는 관출구면의 수직중심축과 직교하는 수평면상에서의 각도를 나타내며,  $\theta$  는 수평중심

축과 직교하는 수직평면상에서의 각도를 나타낸다. 방위각  $\psi$  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  $\theta$  는 수평중심축을 기준하여 상하대칭 관계가 아니므로 중심축을 기준하여 충격파관 하류쪽을  $\theta=-45^\circ$  와  $\theta=-90^\circ$  그리고 그 반대쪽을  $\theta=45^\circ$  와  $\theta=90^\circ$  으로 정하여 펄스파의 압력을 측정하였다. 또한 펄스파 측정시에 외란의 영향을 최소화시키기 위하여 압력센서의 지지대는 선단이 뾰족한 쇠기형으로 제작하였다. 압력센서로부터 얻어진 모든 출력신호는 증폭기를 거쳐 증폭된 뒤, 파형기록장치에 저장된다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2 부터 Fig. 4 까지의 결과는 충격파 전파마하수  $M \cong 1.1$  인 조건에서 직관, 곡형밴드 그리고 각형밴드의 반경방향  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$  및  $\theta=90^\circ$  지점에서 측정한 펄스파의 압력파형을 도시한 것이다. Fig. 2 에 도시된 직관에 대한 펄스파의 압력파형을 보면 중심축선상( $\theta=0^\circ$ )에서의 펄스파 압력이 가장 높고 반경방향으로 갈수록 펄스파의 압력은 감소한다. 또 압력파형의 형상도 완만한 형태로 변화된다.

Fig. 3 은 곡형밴드에 대한 펄스파의 압력파형을 나타낸 것으로서 압력값 변화의 전반적인 추세는 직관과 유사하지만, 파형의 형태는 직관과 비교하여 다소의 차이를 나타낸다. 즉  $\theta=0^\circ$  의 파형결과에서 보듯이 펄스파의 피크치에 이르는 상승시간이 직관에 비하여 한층 더 지연되는 것을 알 수 있다. 이것은 관출구로부터 전파하는 펄스파가 관 중심축을 향해 전파하지 않고 어떤 특정방향으로 편향되어 전파하는 것으로 생각할 수 있다. 이와 같은 추론은  $\theta=45^\circ$  와  $\theta=90^\circ$  의 결과와의 비교로부터 가능하다. 즉  $\theta=45^\circ$  및  $\theta=90^\circ$  결과에서는  $\theta=0^\circ$  에서와 같이 피크치에 이르기 전에 완만한 압력구배의 형태가 나타나지 않는 것이 이를 뒷받침 해주고 있다.

Fig. 4 에 도시된 각형밴드에 대한 펄스파의 압력파형은 앞의 두 경우와는 전혀 다르다는 것을 알 수 있다. 결과에서 가장 특이한 것은 펄스파의 피크치가 두개 또는 다수개가 발생한다는 점이다.

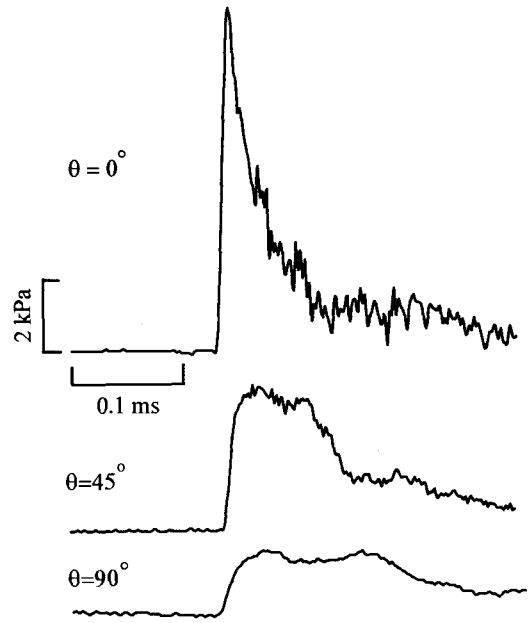


Fig. 2 Pressure histories of the pulse waves in  $\theta$  - direction (straight tube)

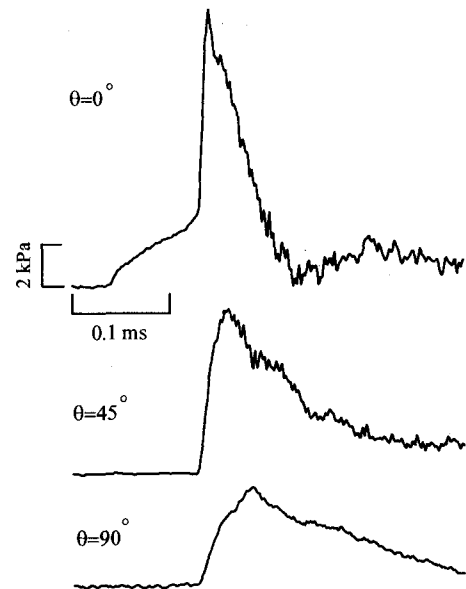


Fig. 3 Pressure histories of the pulse waves in  $\theta$  - direction ( $90^\circ$  smooth bend)

이처럼 다수개의 피크치가 발생하는 것은  $\psi$  방향으로 전파하는 펄스파의 압력파형 결과에서도 확인할 수 있었으며, 충격파의 전파마하수가 다른 조건에서도 이와 유사한 압력파형이 재현되는 것을 확인하였다. 이와 같이 곡형밴드와는 달리 각

형밴드에서 다수개의 피크치가 발생하는 것은 밴드의 모서리부근을 충격파가 통과할 때 반사파와 회절파가 발생하였기 때문이다. 즉 관내를 전파하는 파는 관의 단면이 변하거나 진행방향이 변화하게 되면 필연적으로 반사와 회절현상을 수반하는 파동특성을 갖기 때문이다.

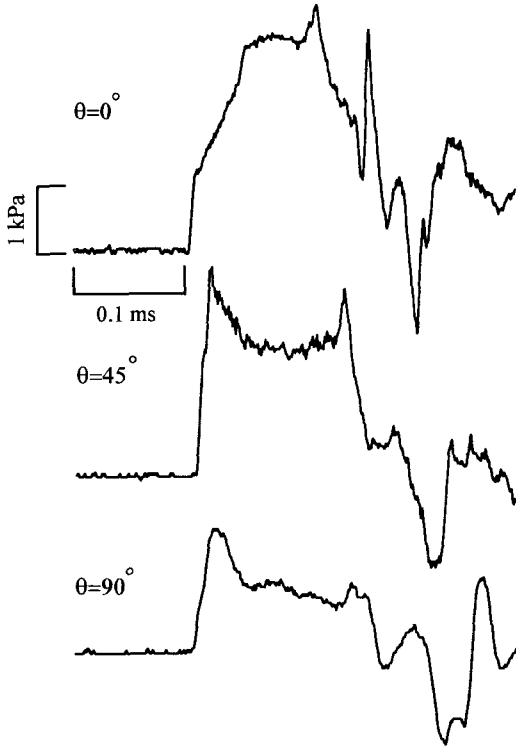


Fig. 4 Pressure histories of the pulse waves in  $\theta$  - direction ( $90^\circ$  miter bend)

Fig. 5 부터 Fig. 7 까지의 결과는 반경방향별로 측정된 펄스파의 강도를 충격파의 전파마하수  $M$  에 대하여 도시한 것이다. 각 결과의 종축은 펄스파의 피크압력  $\Delta p_m$  을 대기압  $p_a$  로 무차원화 한 펄스파의 강도를 나타낸다. Fig. 5 에 도시된 직관의 결과를 보면 충격파의 전파마하수에 비례하여 펄스파의 강도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 중심축방향에서의 펄스파의 강도가 다른 전파방향의 펄스파에 비하여 그 강도가 훨씬 강하게 되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 참고문헌[11]에서도 언급한 바 있듯이 직관으로부터 전파하는 펄스파는 빗형태의 전파특성을 가지기 때문이다.

Fig. 6 에 도시된 곡형밴드의 결과에서도 직관의 경우와 유사한 강도값 변화추세를 볼 수 있다. 그러나 동일한 전파방향 조건에서 곡형밴드와 Fig.6 에 도시된 직관에 대한 펄스파의 강도값을

상호 비교해 보면 축방향을 제외한  $\theta = 45^\circ$  및  $\theta = 90^\circ$  방향에서는 곡형밴드로부터 발생한 펄스파의 강도가 약간 더 강하다는 것을 알 수 있다. 이것은 앞서 토의한 바와 같이 관내의 충격파가 밴드의 모서리부근을 통과할 때 발생하는 반사파 또는 회절파들이 관출구로부터 방출하기 때문으로 판단된다. 따라서 보다 명확한 펄스파의 전파특성을 이해하기 위해서는 관내부에서 발생하는 충격파의 반사/회절 특성을 이해할 필요가 있다.

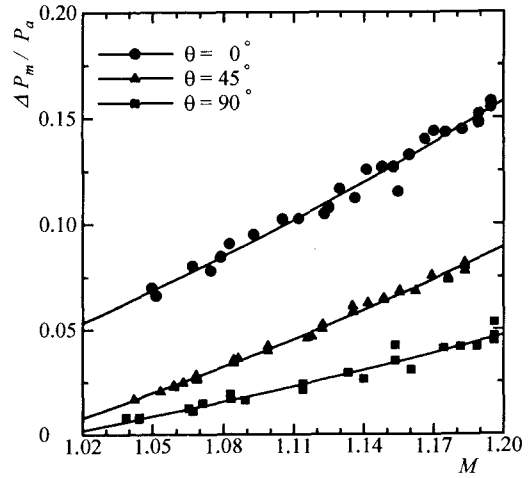


Fig. 5 Relationship between  $\Delta p_m / p_a$  and  $M$  for the straight tube.

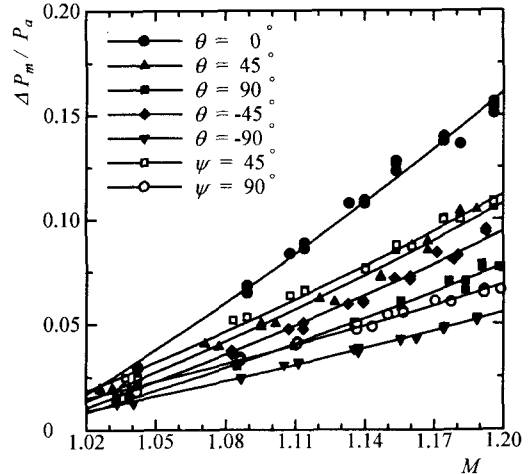
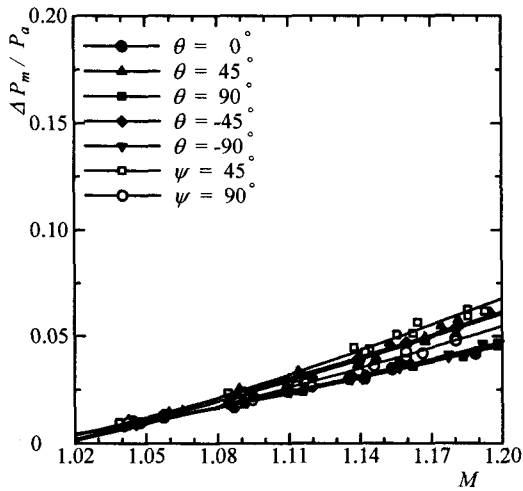


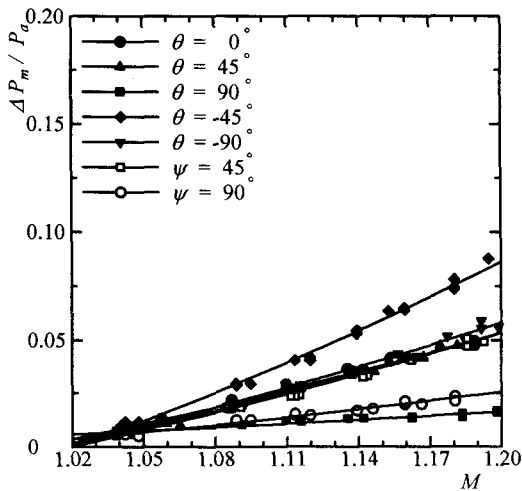
Fig. 6 Relationship between  $\Delta p_m / p_a$  and  $M$  for the  $90^\circ$  smooth bend.

Fig. 7 은 각형밴드에 대한 펄스파의 강도를 나타낸 것이다. 각형밴드에서는 다수개의 피크치가

발생하므로, 본 연구에서는 펄스파의 강도에 가장 큰 영향을 미치는 첫번째 피크와 두번째 피크만을 정리하여 그 결과를 각각 그림 (a)와 그림 (b)에 나타내었다. 결과에서 보듯이 충격파의 전파마하수가 증가함에 따라 펄스파의 강도값이 증가하는 추세는 직관이나 곡형밴드의 경우와 같다. 그러나 펄스파의 강도가 전체적으로 Fig.5의 직관과 Fig.6의 곡형밴드에 비하여 훨씬 약하다는 것을 알 수 있다. 이상의 실험결과로 볼 때 곡형밴드는 펄스파의 강도를 증가시키는 요인으로 작용하는 반면에, 관로의 모서리부가 급격하게 처리된 각형밴드는 펄스파의 강도를 약하시키는 요인으로 작용하고 있음을 알 수 있다.



(a) First peak value



(b) Second peak value

Fig. 7 Relationship between  $\Delta p_m / p_a$  and  $M$  for the  $90^\circ$  miter bend.

이것은 각형밴드를 전파하는 충격파가 관의 모서리 부분에 도달하여 일부분은 회절로 인하여 출구로 방출되어 첫번째 피크를 형성하게 되며, 두번째 피크는 충격파가 관의 모서리 부분에서 충돌 반사한 후에 방출되기 때문으로, 이 과정에서 충격파의 강도가 상당부분 약해지기 때문이다. 따라서 Fig. 6과 Fig. 7의 결과로부터 각형밴드는 펄스파의 강도를 감소시키는 피동제어의 역할을 하는 관요소임을 알 수 있다.

Fig. 8 부터 Fig. 10까지는 충격파 전파마하수  $M=1.03 \sim 1.2$  범위에서 측정된 펄스파의 지향성을 나타낸 결과이다. 결과에서 방위각별로 도시된 각각의 축은 펄스파의 강도를 나타낸 축이다.

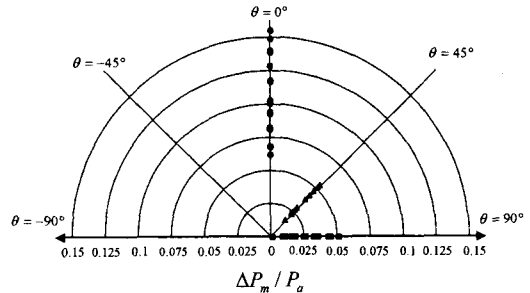


Fig. 8 Distributions of the peak pressures in  $\theta$ -direction for the straight tube.

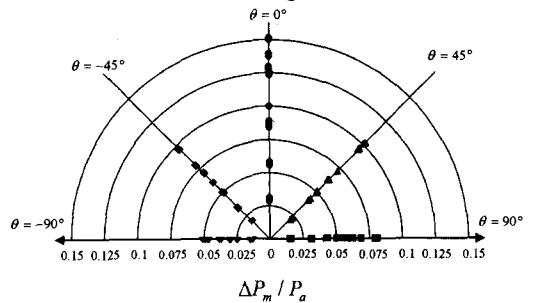


Fig. 9 Distributions of the peak pressures in  $\theta$ -direction for the  $90^\circ$  smooth bend.

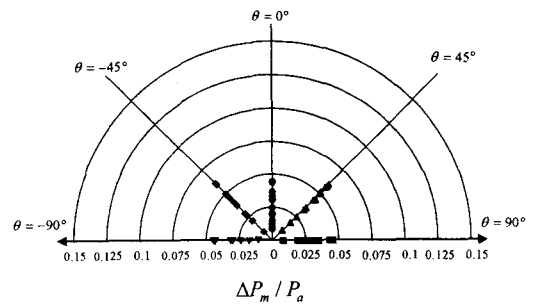


Fig. 10 Distributions of the peak pressures in  $\theta$  direction for the  $90^\circ$  miter bend.

Fig. 8 에 도시된 직관에 대한 지향성 결과를 보면 중심축( $\theta = \psi = 0$ )으로부터 반경방향으로 갈수록 급격하게 강도가 감소하는 지향특성을 나타낸다. 이것은 관출구 모서리에서 발생한 팽창파가 반경방향으로 전파하는 펄스파의 강도를 감소시켰기 때문이다. Fig. 9 는 곡형밴드에 대한 지향성 결과를 나타낸 것으로 직관에 대한 지향성 결과와 비교해 보면 반경방향으로 약간 더 강하게 전파하는 지향특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한  $\psi$  방향에 대한 지향성 결과도  $\theta$  방향의 결과와 거의 같다는 것을 확인하였다. Fig.10 은 각형밴드로부터 전파하는 펄스파의 피크들 중에서 첫번째 피크치만을 정리하여 나타낸 지향성 결과이다. 결과에서 직관이나 곡형밴드의 지향성과는 완전히 다른 지향특성을 나타내고 있다. 즉 관중심축으로 강한 지향특성을 갖기 보다는 중심축을 기준하여  $45^\circ$  대칭인 방향으로의 지향특성을 갖는 매우 특이한 전파형태를 보여준다. 두번째 피크치에 대한 지향성 결과에서는 관중심축을 기준하여  $\theta = -45^\circ$  방향으로 강한 지향특성을 갖는 것을 확인하였다. 이상의 결과에서와 같이 관의 형상에 따라 지향특성이 다르게 되고, 특히 각형밴드의 경우는 펄스파의 피크치마다 서로 다른 형태의 지향특성을 갖는 것은 앞의 토의에서도 언급하였듯이 관내부에서 발생한 충격파의 반사와 회절현상 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는  $90^\circ$  곡형밴드와  $90^\circ$  각형밴드의 출구로부터 발생하는 펄스파의 피크압력과 지향성 측정결과를 동일조건에서 구한 직관의 결과와의 비교분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 직관과 곡형밴드의 출구로부터 발생하는 펄스파는 단일피크를 갖는 반면에, 각형밴드로부터 발생하는 펄스파는 다수의 피크를 가지며, 이 중에서 첫번째와 두번째 피크압력값이 펄스파 강도에 가장 큰 영향을 미친다.

2) 직관, 곡형밴드 그리고 각형밴드의 출구로부터 발생하는 펄스파는 충격파의 마하수가 증가할수록 펄스파 강도 역시 증가하는 전반적인 추세는 거의 유사하지만, 강도값의 크기를 비교해 보면 각형밴드가 직관이나 곡형밴드에 비하여 훨씬 작다. 따라서 각형밴드는 충격성 소음을 저감시키는 피동제어 요소로 쓰일 수 있다.

3) 직관과 곡형밴드로부터 발생하는 펄스파는 관축방향으로 강한 지향특성을 갖는 반면에, 각형

밴드의 출구로부터 발생하는 펄스파는 관축방향으로의 지향성을 갖지 않고 관축으로부터 각각  $+45^\circ$  와  $-45^\circ$  방향으로의 지향성을 갖는다.

#### 후 기

“이 논문은 2001 년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었습”

#### 참고문헌

- (1) S.Raghunathan, H.D.Kim and T.Setoguchi, 1998, “Impulse Noise and Its Control, Progress in Aerospace Science, Vol.34, pp.1-44.
- (2) H.D.Kim, T.Setoguchi, and S.Matsuo, 2001, “Augmentation of the Magnitude of the Impulsive Wave Discharging from a Tube,” Journal of Mechanical Engineering Sciences, IMech Part C (in press).
- (3) J.L.Stollery, K.C.Phan and K.P.Garry, 1981, “Simulation of Blast Fields by Hydraulic Analogy,” Proceedings of 13<sup>th</sup> 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) H.D.Kim, T.Setoguchi and K.Matsuo, 1997, “Reduction of Impulsive Noise Caused by Unsteady Compression Wave,” JSME International Journal, Series B, Vol.40, No.2, pp.223-229.
- (6) 김희동, T.Setoguchi, 1996, “고속철도 터널출구에서 발생하는 충격성 소음의 저감을 위한 실험적 연구,” 대한기계학회논문집(B), 제 20 권, 제 7 호, pp.2375-2385
- (7) T.Setoguchi, H.D.Kim, S.Yu and S.Raghunathan, 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) J.K.Floyd, 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) H.Kashimura, H.D.Kim and T.Setoguchi, “Emission of a Propagating Shock Wave from an Open End of a Tube,” JSME Journal, Vol.65, No.633, pp.161-167.
- (11) H.D.Kim and T.Setoguchi, 2001, “Study of the Impingement of Impulse Wave upon a Flat Plate,” Journal of Sound and Vibration, (in press).
- (12) H.D.Kim and T.Setoguchi, 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.