다공관 출구로부터 방사된 충격성 소음에 관한 실험적 연구

허성욱† · 제현수* · 양수영* · 이동훈**

An Experimental Study on the Impulse Noise Emitted from the Exit of a Perforated Pipe

Sung-Wook Heo, Hyun-Su Je, Soo-Young Yang and Dong-Hoon Lee

Key Words : Directivity(지향성), Impulse Noise(충격성 소음), Impulse Wave(펄스파), Jet Noise(제트소음), Perforated Pipe(다공관), Shock Wave(충격파), Unsteady Flow(비정상 유동)

Abstract

This experimental study describes the propagation characteristics and suppression of the impulse noise emitted from the exit of a perforated pipe attached to the open end of a simple shock tube. The experiment is performed through the systematic change of the shock wave Mach number and the geometrical parameters such as the porosity, hole diameter and length of the perforated pipe. The experimental results for the near and far sound field are presented and explained in comparison with those for a straight pipe. The results obtained show that for the near sound field the impulse noise strongly propagates toward to the pipe axis, but for the far sound field the impulse noise uniformly propagates toward to the all directions, indicating that the directivity pattern is almost same regardless of the pipe type. Moreover, the noise reduction performance of perforated pipe depends upon the condition of sound field. For the near sound field the perforated pipe has a little performance to suppress the impulse noise, but for the far sound field the perforated pipe has little performance to suppress the impulse noise.

1. 서 론

고압의 가스나 증기를 취급하는 각종 화학플랜트나 발전소 보일러에서는 안전을 위해 가스 또는 증기를 일시에 대기중으로 방출(blow-off)시키는 경우가 많다. 이와 같이 가스 또는 증기가 대기중으로 일시에 방출되면 강력한 세기의 소음과 함께 펄스형의 강한 압력파를 발생하게 된다. 이 때 대기로 전파하는 압력파의 동적 거동이 펄스형태를 취하기 때문에 통상 펄스파라고 하며, 펄스파에 의한 소음을 충격성 소음이라 한다.(1)

Fig. 1은 대기압보다 4배 높은 압력으로 압축된 고압공기를 관로를 통하여 대기중으로 방출시켰을 때의 관출구로부터 전파하는 충격성 소음과 후속되는 제트소음의 총음압레벨을 전파시간대별로 측정하여 도시한 결과이다. 결과에서 실선은 충격파만이 관출구로 방출된 경우이며, 점선은 충격파와 제트유동을 함께 관출구로 방출시킨 경우이다. 결과에서 보듯이 충격성 소음의 세기가 뒤이어 방출되는 정상 제트유동에 의한 제트소음보다도 훨씬 더 높다는 것을 알 수 있다.

† 서울산업대학교 산업대학원, 기계공학과
E-mail : ldh@snut.ac.kr, TEL : (02)970-6331
* 서울산업대학교 산업대학원, 기계공학과
** 서울산업대학교 기계공학과

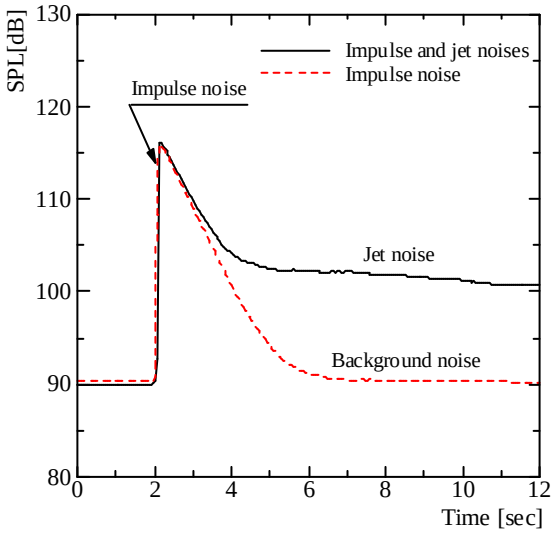


Fig. 1 Sound pressure signals of impulse and jet noises discharged from the open end exit of a straight pipe

이와 같이 고압의 가스 또는 증기가 대기중으로 일시에 방출될 때 Fig. 1과 같은 강력한 세기의 충격성 소음이 전파됨에도 불구하고, 이에 대한 지금까지의 소음대책으로는 정상 제트소음만을 저감대상으로 하여 설계된 배기형 소음기(blow-off silencer)가 이용되어 왔을 뿐이다.[2,3]

배기형 소음기는 주로 다공관(perforated pipe)과 확장실(expansion chamber) 그리고 흡음형 격벽(sound absorptive splitter)으로 구성되어 있다. 다공관과 확장실은 제트분산으로 인한 소음저감과 압력완화를 목적으로 그리고 흡음재가 내장된 격벽은 제트소음의 흡음을 위해 쓰이고 있다. 특히 이 중에서 다공관은 배기형 소음기의 핵심요소로서 제트소음 저감을 위해 그 동안 많은 연구가 수행되어 왔다.[4~6] 그러나 다공관이 충격성 소음의 저감에 어느 정도의 효과가 있는지는 지금까지 알려진 바 없다.

따라서 본 연구에서는 기존 배기형 소음기의 핵심요소로 쓰이고 있는 다공관을 대상으로 하여, 다공관 출구로부터 전파하는 충격성 소음의 전파특성 조사와 함께 소음저감 성능을 실험적으로 파악하고자 한다. 실험에서는 충격파관을 이용하였으며, 공극율, 구멍지름 그리고 관의 길이가 각기 다른 9종류의 다공관을 충격파관 출구에 부착하여, 충격성 소음의 전파특성과 저감효과를 조사하였다. 음압진폭, 지향성 및 거리감쇠 등으로 특성지워지는 충격성 소음의 전파특성은 근음장과 원음장 영역에서 측정조사하였으며, 직관에 대해서도 동일한 실험을 수행하여 다공관 결과와 비교하였다. 충격파 전파마하수는 실제 고압가스의 배관계를 전파하는 충격파 조건을 참고하여 1.02-1.20의 범위로 하였다.

2. 실 험

Fig. 2는 실험장치의 개략도로서 대기 개방형 충격파관을 도시한 것이다. 충격파관은 안지름 66㎜인 원형 강관이며, 고압실과 저압실의 길이는 각각 1854㎜와 2296㎜이다. 저압실과 고압실 사이에 위치한 격막재료로는 두께 0.02㎜인 셀로판 시트를 사용하였다. 고압실은 압축된 건조공기로 충진되어 있고 격막을 파막시키기 위한 격침이 장착되어 있다. 또 충격파관 출구에는 시험대상체인 다공관이 부착된다. 다공관은 Table 1에 도시된 제원을 가지며, 두께와 안지름은 각각 충격파관과 같은 크기인 5㎜와 66㎜의 강관으로 제작하였다.

충격성 소음의 전파특성과 소음저감 정도를 파악하기 위해서는 세가지 종류의 측정이 동시에 수행된다. 먼저 충격파관 내부를 전파하는 충격파의 전파마하수는 다공관 출구로부터 상류방향 390㎜와 525㎜에 설치된 압력센서(PCB type 112A21)를 이용하여 측정하였다. 또 근음장 영역내에서 전파하는 충격성 소음 역시 압력센서를 이용하여 측정하였다. 압력센서는 가급적 외란의 영향을 피하기 위하여 쐐기형 지지대에 설치하여, 중심축 방향과 반경방향으로 지지대의 위치를 이동하면서 측정하였다. 마지막으로 관출구로부터 멀리 떨어진 원음장 영역내를 전파하는 충격성 소음은 1/2인치 콘덴서형 마이크로폰(B&K type 4191)을 이용하여 측정하였다. 원음장 영역에서도 근음장에서와 같이 충격성 소음의 지향성, 음압진폭 그리고 동적거동 등을 측정하였다. 마이크로폰이나 압력센서의 설치높이는 지면으로부터 1500㎜이다. 참고로 원음장 및 근음장 영역의 구분은 음압진폭 측정값이 역이승법칙에 만족하는지의 여부를 조사하여 결정하였다.

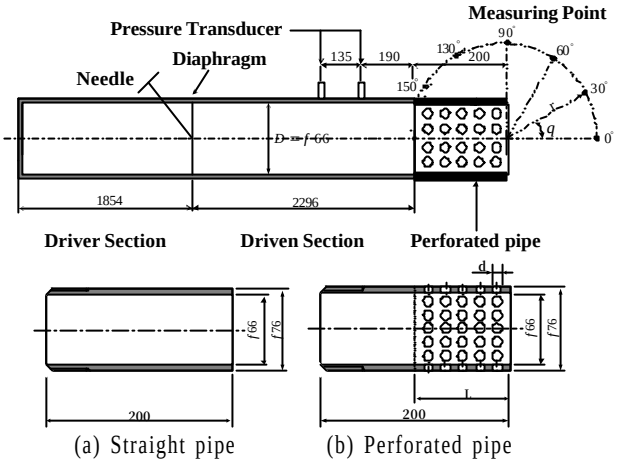


Fig. 2 Experimental apparatus and tested pipes

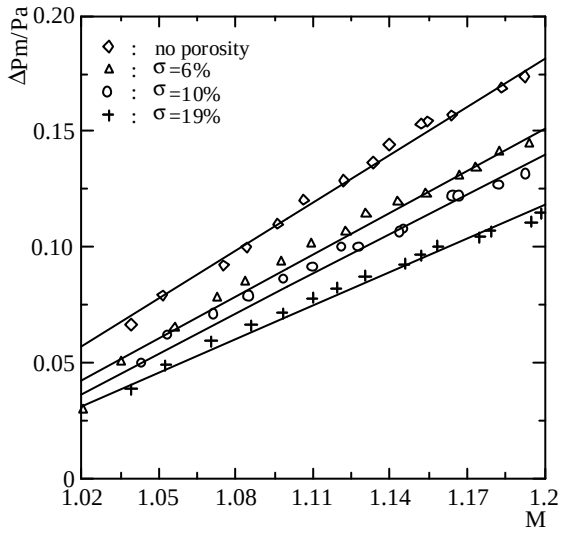
음압값의 분석은 측정센서의 종류에 따라 달리 하였다. 근음장내에서 압력센서(PCB 112A21)를 사용하여 충격성 소음을 측정한 경우는 증폭기를 거쳐 오실로스코프(Lecroy, type LT584)로 음신호를 전송하여 분석한 반면에, 원음장에서 1/2인치 콘덴서 마이크로폰을 이용하여 측정한 경우는 증폭기를 거쳐 주파수분석기(B&K Pulse system, type 2825)로 음신호를 입력하여 분석하였다.

Table 1 Dimensions of perforated pipes

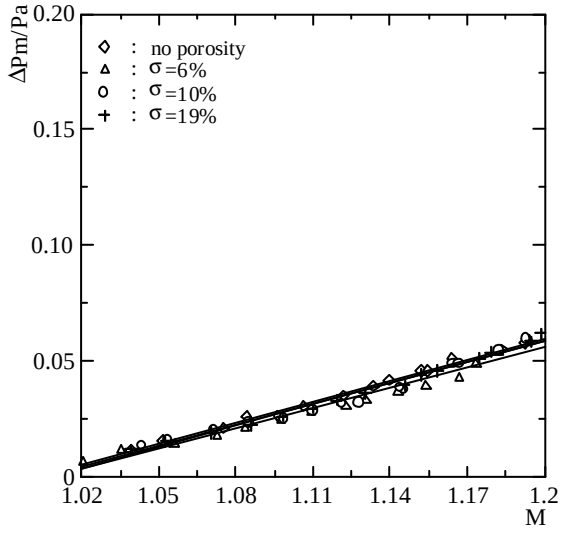
Porosity, s (%)	Hole diameter, d (mm)	Perforated length, L (mm)	Adjusted parameters
6	7	132(=2D)	Porosity
10			
19			
10	3	132(=2D)	Hole diameter
	7		
	12		
10	7	66(=1D)	Perforated length
		132(=2D)	
		198(=3D)	

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 각기 다른 공극율을 갖는 다공관을 충격파 관 출구에 부착한 상태에서 충격파 전파마하수를 변화시키면서 충격성 소음의 피크음압을 측정한 결과이다. 종축의 값 $\Delta p_m / p_a$ 는 충격성 소음의 피크음압 Δp_m 을 대기압 p_a 로 무차원화한 근음장내에서의 음압진폭을 나타내며, 횡축의 값 M 은 충격파 전파마하수를 나타낸다. 또 다공관의 결과와 비교하기 위하여 직관의 결과도 그림에 함께 도시하였으며, 실선은 데이터 구분을 위한 추세선을 나타낸 것이다.



(a) $q = 0^\circ$, r/D=2, d=7, L=2D

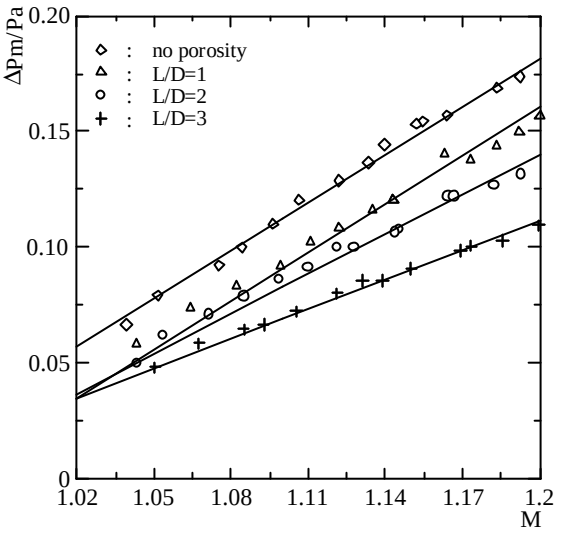


(b) $q = 60^\circ$, r/D=2, d=7, L=2D

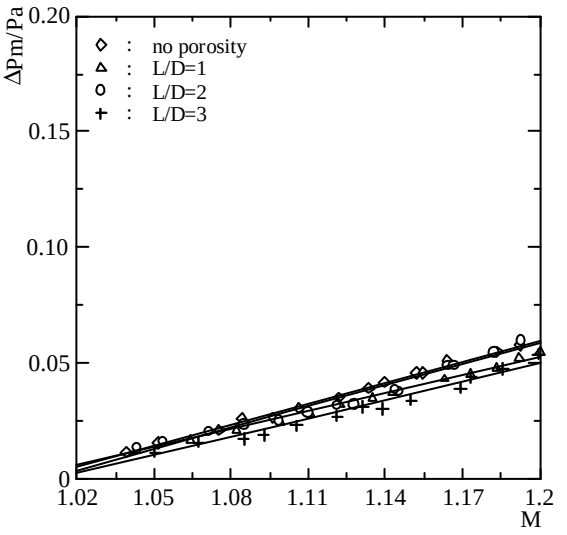
Fig. 3 Variation of the peak sound pressure with porosity for the perforated pipe.

먼저 그림 (a)에 도시된 $q = 0^\circ$ 결과에서는 다공관 출구로 방사된 충격성 소음의 피크음압이 직관에서와 같이 충격파 전파마하수에 의존하여 증가하는 경향을 보여주고 있다. 또한 다공관의 공극율 증가에 따른 충격성 소음의 감소폭은 충격파 전파마하수가 증가할수록 더 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 관내를 전파하는 충격파가 다공관을 통과하는 과정에서 다공구멍을 통하여 압력이 감소되기 때문이다.

한편 그림 (b)에 도시된 $q = 60^\circ$ 방향으로 전파하는 충격성 소음에 대한 결과에서는 다공관과 직관 출구로 방사된 충격성 소음의 피크음압 모두가 그림 (a)에 도시된 관축방향의 결과와 비교하여 훨씬 감소된 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 근음장내를 전파하는 충격성 소음이 관축방향으로 강한 지향성을 갖기 때문이다. 이러한 관축방향으로의 강한 지향성 때문에 그림 (b)의 결과에서 보듯이 반경방향으로 전파하는 충격성 소음의 피크음압은 관의 형태와 다공관의 공극율이 변화하더라도 큰 차이를 나타내지 않는 것을 알 수 있다.



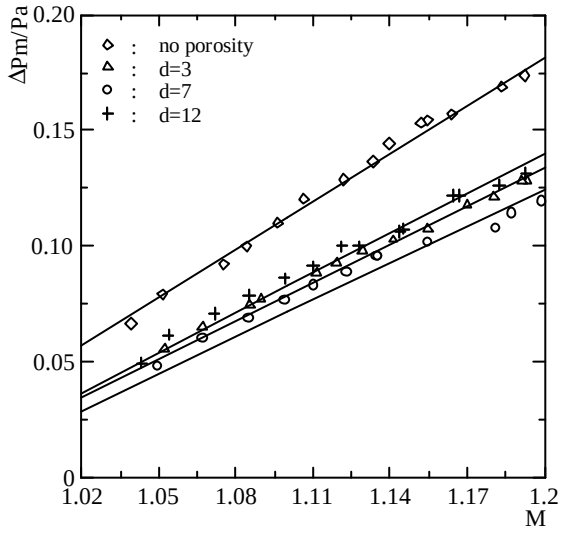
(a) $q = 0^\circ$, r/D=2, d=7, $s = 10\%$



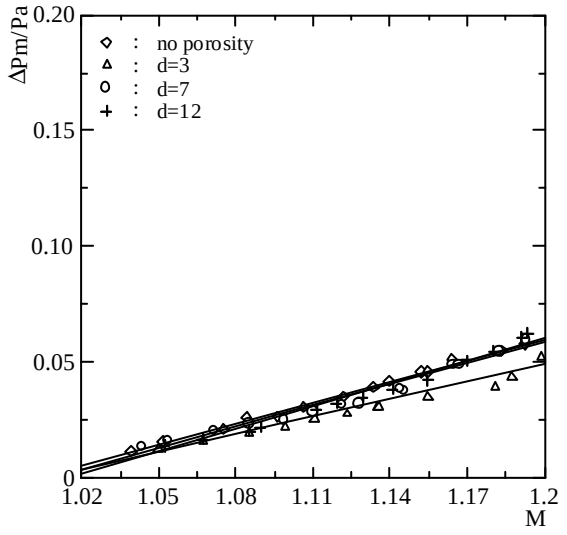
(b) $q = 60^\circ$, r/D=2, d=7, $s = 10\%$

Fig. 4 Variation of the peak sound pressure with perforated length for the perforated pipe.

Fig. 4는 서로 다른 관길이를 갖는 다공관을 충격파관 출구에 부착한 상태에서 충격파 전파마하수를 변화시키면서 충격성 소음의 피크음압을 측정한 결과이다. 도시된 그림 (a)의 결과에서도 Fig. 3의 그림 (a)에 도시된 공극율 결과에서와 같이 다공관의 길이가 길어질수록 관내를 전파하는 충격파의 압력감소로 인하여 충격성 소음의 피크음압이 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 함께 그림 (b)의 $q = 60^\circ$ 반경방향으로 전파하는 충격성 소음의 피크음압 역시 Fig. 3의 그림 (b)와 거의 같은 크기를 나타내고 있다.



(a) $q = 0^\circ$, r/D=2, $s = 10\%$, L=2D

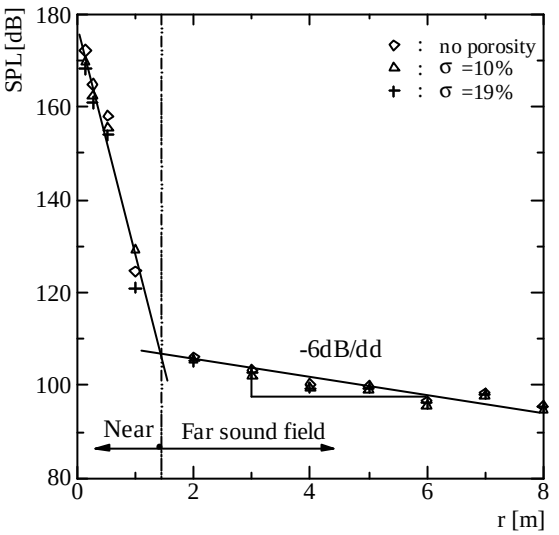


(b) $q = 60^\circ$, r/D=2, $s = 10\%$, L=2D

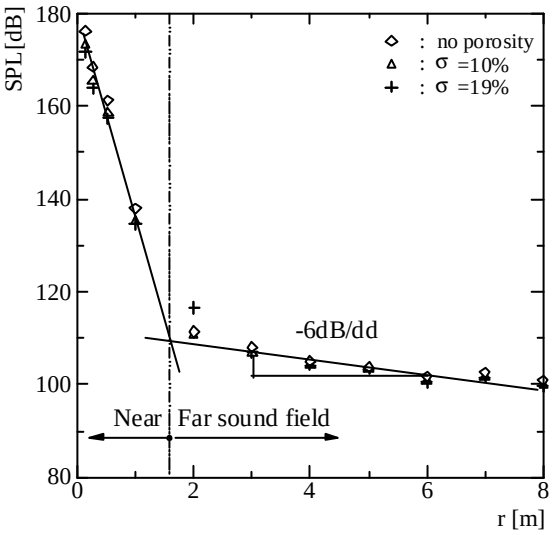
Fig. 5 Variation of the peak sound pressure with hole-diameter for the perforated pipe.

Fig. 5는 서로 다른 크기의 구멍지름을 갖는 다공관을 충격파관 출구에 부착한 상태에서 충격파 전파마하수를 변화시키면서 충격성 소음의 피크음압을 측정한 결과이다. 그림 (a)에 도시된 결과를 보면 구멍지름이 바뀌더라도 충격성 소음의 피크음압 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 이것은 충격성 소음의 저감에 구멍지름이 미치는 효과가 작다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 전파거리별로 측정한 충격성 소음의 피크음압레벨을 나타낸 것이다. 피크음압은 충격파관 안지름을 D라 할 때, 관의 출구로부터 관축방향으로 2D, 4D, 8D 지점에서 그리고 1m에서 8m까지는 1m씩 거리를 증가시키면서 측정하였다. 그림 (a)는 충격파 전파마하수 $M = 1.1$일 때이며, 그림 (b)는 $M = 1.2$일 때이다.



(a) $q = 0^\circ$, M=1.1, d=7, L=2D



(b) $q = 0^\circ$, M=1.2, d=7, L=2D

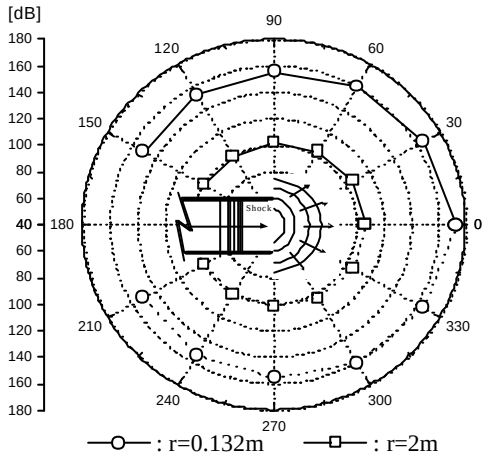
Fig. 6 Measured peak sound pressure level vs. propagation distance.

도시된 두 결과에서 보듯이 추세선이 교차하는 1m와 2m사이가 근음장과 원음장을 구분짓는 경계가 됨을 알 수 있다. 즉 근음장에서는 전파거리가 증가함에 따라 음압레벨이 급격히 감소하는 반면에, 원음장에서는 전파거리가 2배로 증가할 때마다 음압레벨이 약 6dB씩 감

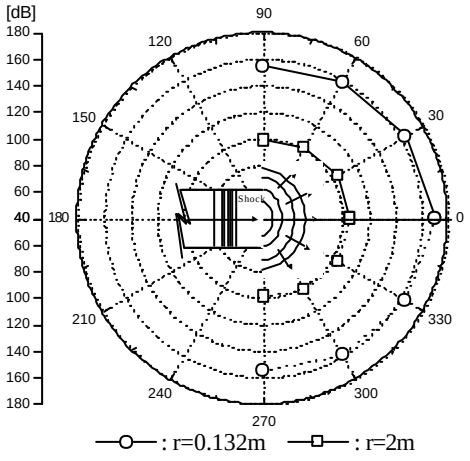
소하는 경향을 보여주고 있다.

한편 도시된 근음장의 결과에서는 Fig. 3의 그림 (a)에서도 확인하였듯이 직관보다는 다공관의 경우가 그리고 다공관의 경우라도 공극율이 증가할수록 피크음압이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 원음장에서는 관의 형태가 바뀌거나 공극율이 바뀌더라도 충격성 소음이 감소하는 것을 찾아 볼 수 없다. 이와 같은 결과는 다공관이 충격성 소음을 저감시키는데 큰 효과가 없다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 직관과 다공관 출구로부터 전파하는 충격성 소음의 피크음압레벨을 근음장과 원음장에서 방위각도별로 측정하여 비교도시한 지향성 결과이다. 참고로 도시된 두 결과에서 실선은 측정값의 결과를 나타내며, 점선으로 표시된 부분은 대칭성을 고려하여 관축방향을 기준으로 해서 측정값을 투영시킨 가상값의 결과를 나타낸 것이다.



(a) Straight pipe (M=1.1)



(b) Perforated pipe (M=1.1, s =10%)

Fig. 7 Directivities of the impulse noise for the straight and perforated pipes.

그림 (a)에 도시된 직관의 결과에서 보듯이 충격성 소음은 근음장 조건에서는 관축방향으로 강한 지향성을 보이지만, 원음장 조건에서는 모든 방향으로 거의 같은 세기로 전파되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 음장조건에 따라 지향성이 서로 다른 것은 충격성 소음원인 펄스파가 관출구가까이에서는 평면파 형태로 전파되다가 일정한 시공간이 지난 후에는 구면파 형태로 전환되어 전파되기 때문이다.[7] 또한 그림 (b)에 도시된 다공관의 결과를 직관과 비교해 보면 다공관의 경우도 직관의 지향특성과 거의 유사한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

1. 충격성 소음에 관한 다공관의 저감성능은 음장조건에 좌우된다. 근음장 조건에서는 다공관의 공극율과 관의 길이가 소음저감에 다소간의 영향을 미치지만, 원음장 조건에서는 이들 기하학적 인자들이 소음저감에 거의 기여하지 못하는 것을 확인하였다.
2. 다공관이나 직관으로부터 방사된 충격성 소음의 지향성 역시 음장조건에 따라 다르다. 즉 근음장 조건에서는 관축방향으로 강한 지향성을 보이지만, 원음장 조건에서는 모든 방향으로 같은 세기로 전파하는 지향특성을 갖는다. 이와 같은 지향성 차이는 충격성 소음원인 펄스파가 관출구 가까이에서는 평면파 형태로 전파되지만, 관출구로부터 멀리 전파해가면서 평면파는 점차 구면파 형태로 전환되기 때문이다.

참고문헌

(1) D.H.Lee, H.D.Kim, S.H.Kang, 2000, "The Impingement of a Weak Shock Wave Discharged from a Tube Exit upon a Flat Plate," Journal of KSNVE, Vol.10(6), pp.1035~1040.

(2) P Floyd, J. K., 1978, "Control of Steam Venting Noise in Power Plants," Transactions of the ASME, J. of Engineering for Power, Vol.100, pp.369~373.

(3) Maa, D.Y. and Li, P.Z., 1981, "Pressure Dependence of Jet Noise and Silencing of Blow-Offs," Noise Control Engineering, Vol. 17, pp.104~112.

(4) K.Seto, 1988, "Modification of the Characteristics of Underexpanded Jets by Using an Extended Perforated Tube as a Noise Suppresor," Noise Control Engineering Journal, Vol. 30, No.3, pp.119~125.

(5) G.C. Jeong, S.I. Hyun, J.W. Lee, Y.P. Kwon, 1994, "Performance of Absorption Diffuser Silencers, Journal of KSNVE, Vol.4(3), pp.377~384.

(6) D.H.Lee, 1999, "A Study on the Aerodynamic Noise of a Supersonic Exhaust Nozzle of Perforated Tube," Journal of KSNVE, Vol.9(1), pp.113~120.

(7) D.H.Lee, H.D.Kim, M.H.Lee, J.H.Park, 2002, "Astudy on the Characteristics of the Impulse Wave Discharged from the Exit of a Pipe," Journal of KSNVE, Vol.12(1), pp.48~56.