

# 다공판 소음기의 휘파람소리에 관한 실험적 연구

° 이 동 훈\*, 권 영 필\*

(An Experimental Study on the Whistle of a Perforated Tube Muffler)

(Dong-Hoon Lee, Young-Pil Kwon)

## 1. 서론

흡배기계를 통하여 전달되는 소음은 소음기에 의하여 적절히 감쇠시킬 수 있으나 소음기 자체에서 기류에 의하여 발생하는 기류음(airflow noise)은 또 다른 소음원이 될 수 있다. 일반적으로 기류음은 팽대역 주파수특성을 갖는 난류소음(turbulence noise)과 특정 주파수성분의 강한 순음(pure tone)으로 나눌 수 있으며 난류소음은 유속을 낮게 함으로써 제어되지만 순음은 낮은 유속에서도 강한 음압을 나타내기 때문에 소음기 설계시 이에 관한 고려가 필요하다고 할 수 있다. 특히, 배기 소음기로 쓰이는 다공판 소음기(perforated tube muffler)는 구멍과 유동의 상호작용에 의하여 강한 순음성의 공명음인 휘파람(whistle)을 일으키기 쉽다.<sup>(1,2,3)</sup> 이러한 휘파람의 특성에 대해서는 Fig. 1에 도시한 단일 개구부의 공동으로 설명할 수 있다. 단일 개구부의 공동을 갖는 공동음(cavity tone)<sup>(4,5,6)</sup>에 관해서는 풍동, 덕트, 항공기와 선박 등의 설계와 관련하여 많은 연구가 있어 왔다. 공동의 체적이 무한히 크거나 개방된 경우에 전단류(shear flow)와 모서리(edge)사이에서 발생하는 순음은 노즐에서 나오는 분류(jet)와 모서리 사이에서 발생하는 모서리소리(edge-tone)와 같은 현상으로 설명할 수 있다. 모서리소리는 순음성 기류음의 대표적인 현상으로서 최근까지도 많은 연구자들의 연구대상이 되고 있다. 모서리소리의 발생기구에 관해서는 처음으로 Powell에 의하여 유동과 소리사이의 궤환(feedback)작용으로 설명되었다.<sup>(7)</sup> 즉, 교란된 분류와 모서리의 상호작용에 의하여 소리가 발생하며 이것은 분류의 상류쪽으로 전파하여 노즐 출구의 전단층을 교란하여 새로운 교란을 일으키게 되고 이 교란이 불안정 현상에 의하여 증폭되어 하류쪽에서 다시 모서리와 충돌하게 된다. 이러한 궤환기구는 대부분의 순음성 유동음의 발생에 적용될 수 있다. Fig. 1과 같은 단일 개구부와 유한한 체적의 공동을 갖는 공동음의 경우에는 Elder 등의 일련의 연구에 의하여 발생기구가 어느정도 규명되었다 할 수 있다.<sup>(8,9,10)</sup> 공동음은 분류와 모서리의 작용에서 발생하는 교란에 의한 궤환뿐만 아니라 분류에 의하여 여기된 공동의 음향 모우드에 의한 궤환이 전단류의 상류단에 작용하게 된다. Elder는 분류와 모서리의 상호작용에 의한 소리를 전단음

(shear tone), 판의 음향모우드의 여기에 의한 소리를 관음(pipe tone)으로 분류하고 전단음은 유속의 증가에 따라 주파수가 연속적으로 증가하나 관음은 불연속적인 판의 공명주파수가 전단음의 주파수와 일치할 때 여기되는 것을 보여주었다.

한편, 다수의 개구부와 공동을 갖는 기류음에 관한 연구로는 Tsui와 Flandro<sup>(11)</sup>의 연구를 들 수 있다. 이들은 사각덕트 내에 다공판(perforated plate)을 부착하고 다공판위로 기류를 통과시켰을 때 강한 순음성의 소리가 발생하는 것을 확인하였다. Tsui와 Flandro는 이 기류음을 판의 "울림현상(singing phenomenon)"이라고 하였으며 기류속도의 증가에 따른 기류음의 주파수특성 및 음압레벨의 변화에 대하여 고찰하였다. 특히, 이들의 연구에서 강한 기류음의 발생은 덕트의 차단(cut-off)주파수와 관련이 있다는 것이 알려졌다. 즉, 기류음이 덕트내에서 여기되더라도 그 모우드가 평면파(plane wave)이면 음의 전파는 어렵게 되고, 주파수가 차단주파수 이상으로서 고차모우드로 될 때만 음의 전파가 가능하다는 것이다. 또한, Tsui와 Flandro는 이와 같은 음의 전파조건하에서 구멍에서 떨어지는 와의 주파수가 판의 고차 음향모우드에 대응하는 주파수와 일치하거나 근사할 경우에 강한 기류음이 발생한다고 하였다.

그러나, 다공판 소음기는 하나의 공동에 다수의 개구부가 있으며 개구부에 대하여 절선방향뿐만 아니라 개구부를 관통하는 시간평균 유동이 존재하기 때문에 앞의 두 경우와는 다를 수 있다. 이러한 다공판 소음기의 기류음에 관한 연구로는 Fukuda등<sup>(1,2)</sup>과 Green등<sup>(3)</sup>의 실험적인 연구를 들 수 있다. Fukuda 등은 다공판 소음기에서 발생하는 강한 순음성의 기류음을 휘파람(whistle)이라 하고 먼저 다공판 구멍으로 유입 또는 유출되는 기류의 흐름을 가시화하여 유동형태에 따른 휘파람소리의 특성을 구하려고 하였으나, 구멍주위의 흐름의 경향만으로는 휘파람의 발생기구를 분명하게 설명하는 것이 어렵다는 것을 알았다. 따라서, Fukuda 등은 열선풍속계를 이용하여 다공판 구멍을 통과하는 맥동속도(fluctuating velocity)의 분포와 스펙트럼을 측정하고 미관(tail pipe)에서 방사되는 휘파람소리와와의 상관(correlation)을 분석하였으며, 그 결과 휘파람소리는 구멍을 통과하는 기류의 맥동속도에 기인되며 이 맥동속도는 공동의 공명모우드와 강한 상관이 있다는 것을 보여 주었다. 그러나, 이들의 연구에서는 유속의 변화라든가 공동의 크기, 다공판의 치수 및 구멍분포 등과 같

\* 숭실대학교 기계공학과 (정회원)

\*\* 생산기술연구원 기술교육센터 (정회원)

은 소음기의 각종 설계변수의 영향에 관한 체계적인 연구결과는 제시되지 않았다. Green등의 연구결과에서도 Fukuda 등과 같이 소음기의 설계변수에 따른 휘파람소리의 전반적인 특성에 대한 자세한 언급은 없다. 이와 같이 지금까지 연구된 문헌의 결과만으로는 다공형 소음기에서 발생하는 강한 순음성의 기류음에 대한 전반적인 특성을 파악하기는 미흡하다.

따라서 본 연구의 목적은 다공관 소음기의 설계변수인 공동과 다공관의 치수 및 구멍배열의 변화에 따른 휘파람소리의 발생특성을 실험에 의하여 체계적으로 구하는데 있다. 소음기의 각 설계변수마다 유속변화에 따른 휘파람소리가 발생하는가를 확인하고 발생하게 되면 스펙트럼 분석을 통하여 휘파람소리의 주파수특성을 구한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 다공관 소음기의 개략도와 기준치수를 나타낸다. 공동(cavity)은 내경  $D=120\text{mm}$ 이고 길이  $L_c=200\text{mm}$ 이며 다공관의 안지름은  $d=20\text{mm}$ 이며 관두께는  $t=1\text{mm}$ 이다. 다공관의 둘레에는 지름  $d_h=4\text{mm}$ 인 구멍을 공동의 양쪽 끝에서  $L_a=L_b=10\text{mm}$ 인 곳 부터  $\Delta L=20\text{mm}$  간격으로 1열에 4개씩 10열로 뚫었다. 입구측의 배기관과 출구측의 미관은 안지름 20mm에 길이는 각각  $L_1=2180\text{mm}$ 와  $L_2=3760\text{mm}$ 이다. 또한 공동의 재질은 아크릴이며 소음기 배기관과 미관 및 다공관의 재질은 스테인레스강이다.

실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 기류는 15마력의 왕복형 압축기를 이용하여 용량이  $1.5\text{m}^3$ 인 저장용기에  $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 압축한 다음, 유량조절밸브를 이용하여 일정한 유속으로 소음기에 공급하였다. 또한 소음기 상류에 설치되어 있는 유량조절용 밸브, 유량계 및 관로 등에서 발생하는 상류소음을 감소하기 위하여 길이 1000mm이고 지름 600mm인 원통형 소실(chamber)을 갖는 상류음 차단용 소음기를 시험용 소음기의 전방에 설치하였다.

유속은 소음기 출구인 미관 끝에서 200mm앞쪽에 지름 1.5mm의 피토투관(Pitot tube)을 관중앙에 설치하고 해상도가 2m/s인 마이크로 마노메터(micro manometer)와 연결하여 측정하였다. 유속의 범위는 휘파람소리가 발생하기 직전의 기류속도부터 2m/s씩 유속을 증가시키면서 최고 80m/s까지 하였다. 또한, 각 유속단계마다 휘파람소리의 발생여부를 FFT분석기의 스펙트럼상에서 확인하고 휘파람소리가 발생하면 그 때의 주파수와 음압레벨을 측정하였다.

음압은 체적이  $4.75\text{m}^3$ 인 간이 잔향실에서 측정하였다. 잔향실내에서 음압의 측정위치는 저주파역에서는 2dB에서 3dB, 고주파역에서는 2dB이내의 편차를 나타내는 위치에서 행하였다. 또한 음압신호의 검출을 위해서는 1/2인치 콘덴서형 마이크로폰(B&K)을 이용하였으며 마이크로폰에서 검출한 신호는 증폭기 및 소음지시계(sound level meter)를 거쳐서 FFT분석기에서 신호를 분석하였다. 신호의 분석범위는 5kHz로서 해상도를 6.25Hz로 하여 16회의 스펙트럼 평균을 취하였다. 그리고 FFT에서 분석된 데이터는 IEEE-488인터페이스를 이용하여 퍼스날 컴퓨터로 전송시켜 자료를 처리하였다.

## 3. 실험 결과 및 토의

먼저, Fig. 4는 시험부에 소음기를 부착하지 않은 상태에서 기류의 자생소음 특성을 측정한 결과로서 실선은 상류음 차단용 소음기를 통과한 기류음의 스펙트럼을 나타내고 점선은 차단용 소음기를 설치하지 않은 경우 즉, 직관의 상태에서 상류로부터 하류로 전파된 기류음의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 먼저, 소음기의 음압레벨은 전반적으로 만족스러움을 보이며 유속이 증가함에 따라 높은 주파수 영역에서는 음압레벨의 차가 점차 작아짐을 보인다. 그러나 대응되는 주파수에서의 음압레벨 차이는 최소 5dB이상의 차이를 보이므로 상류음이 시험부에서 발생하는 소음에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 다음은 기류음의 주파수특성으로 유속의 증가에 따라 상류음 차단용 소음기가 없는 직관에서는 순음성의 강한 기류음의 성분을 볼 수 있으나 차단용 소음기의 설치로 인하여 이러한 순음성의 강한 기류음 성분은 없어지고 기류음의 주파수특성은 광대역잡음과 같이 평탄해짐을 보여준다.

### 3-1. 휘파람소리의 스펙트럼

Fig. 5는 기준치수를 갖는 소음기에서 유속의 변화에 따른 기류음의 스펙트럼을 도시한 것이다. 먼저 유속이 24m/s인 경우에는 특별한 순음이 나타나지 않고 백색잡음(white noise)에 가까운 평탄한 주파수 특성을 보이는 난류음만 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 유속이 26m/s인 경우에는 2287Hz에서 주변음압보다 20dB이상 높은 순음의 휘파람이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 휘파람 주파수는 유속의 증가와 더불어 증가하여 42m/s인 경우에는 2600Hz, 60m/s일 때는 3906Hz로 증가한다. 한편, 음압레벨은 유속과 더불어 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이며 그림에서 42m/s인 경우에는 94dB로서 주변 음압레벨보다 40dB이상이나 큰 것을 알 수 있다. 그러나, 기류속도가 더욱 증가하여 50m/s에 이르면 처음 나타났던 휘파람소리는 약해지며 보다 높은 주파수인 3900Hz에서 더욱 날카로운 또 다른 휘파람이 나타나는 것을 볼 수 있다. 유속이 60m/s인 경우에는 처음 나타났던 휘파람은 완전히 사라지고 새로이 발생한 것만 나타나며 유속이 증가하여도 주파수는 거의 변화가 없고 진폭만 증가한다. 유속이 72m/s까지 강한 순음을 나타내다가 74m/s가 되면 이것도 사라진다. 주파수 범위를 더욱 넓혀서 분석하면 더욱 높은 주파수에서 또 다른 순음이 나타나는 것을 볼 수 있으며 이들은 두번째 나타난 순음처럼 유속이 변화하여도 주파수는 거의 변하지 않는 특성을 보였다.

이상의 결과로부터 다공관 소음기에서 발생하는 순음인 휘파람(whistle)은 두 종류로 분리될 수 있음을 알 수 있다. 즉, 유속에 따라서 주파수가 변화하는 것과 거의 변하지 않는 것이 있다. Elder 등은 유속에 따라 연속적으로 변하는 음을 공동음(cavity tone)중에서 전단음(shear tone)이라고 하였다. 순수한 전단음은 공동과는 상관없이 하류의 구멍 모서리(edge)에서 발생한 음파가 상류로 전파하여 상류의 구멍 모서리

리에서 발생하는 전단류에 교란을 가하고 이 교란이 하류로 이동하면서 증폭되어 또 다시 하류 구멍 모서리와 작용하여 음파를 발생하는 것이다. 이러한 발생기구는 평면 분류가 모서리에 작용할 때 나타나는 모서리 소리(edge tone)<sup>(7)</sup>와 같다고 할 수 있다. 모서리 소리는 유속의 증가에 의하여 주파수가 증가하며 몇 단계(stage)의 불연속적인 변화를 나타낸다. 한편, 유속의 변화에 영향을 거의 받지 않는 휘파람은 하류의 구멍 모서리에서부터 직접 전달되는 음파가 아닌 공동의 공명(resonance)에 의한 개관기구로 설명할 수 있다. 모서리 소리와 같은 전단류의 주파수는 유속에 따라 연속적으로 증가하나 공명주파수는 공동의 음향모우드에 따른 것으로 이것은 기류의 속도에 거의 영향을 받지 않기 때문이다. Elder등은<sup>(10)</sup> 공동이 하나의 관이었기 때문에 이것을 공동음에서 관음(pipe tone)이라고 하였다. 관음은 관의 음향모우드에 해당되는 공명주파수가 여기되기 때문에 불연속적인 주파수특성을 나타내게 되며 기류속도가 변하여도 거의 일정한 주파수를 나타낸다. 이와 같이 다공형 소음기에서 발생하는 순음성의 휘파람은 낮은 유속에서는 모서리소리와 같은 특성을 나타내며 높은 유속에서는 관음의 특성을 갖는다고 할 수 있다. 그러나 유속 증가에 따른 휘파람의 천이과정은 Elder등이 연구한 단일 개구부를 갖는 공동의 경우와는 다른 특성을 보여준다. 즉, 단일 개구부의 경우는 전단류는 연속적으로 변화하고 그 주파수가 관의 공명주파수에 접근할 때 관음이 여기되며 주파수가 일치할 때 전단류에 비하여 훨씬 높은 음압의 관음이 나타나고 전단류의 주파수차가 커지면 관음은 서서히 소멸하는 것을 보여주고 있다. 즉, 전단류는 계속 존재하나 관음은 전단류의 주파수가 공명주파수와 같아질 때만 나타난다. 그러나, 본 연구의 다공관의 경우에는 관음이 나타날 때 계속 존재하는 전단류를 볼 수가 없다. 한편, 휘파람소리가 시작되는 주파수 즉, 전단류가 발생하는 주파수는 2300Hz 근처로서 본 소음기의 지름 120mm에 대한 원형대칭 고차모우드의 차단주파수와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이것은 공동음이 고차모우드에서 여기된다고 하는 Tsui와 Flandro의 연구결과<sup>(11)</sup>와 일치한다고 할 수 있다.

### 3-2. 휘파람소리의 특성

Fig. 6은 공동의 지름이 휘파람소리에 미치는 영향을 보기 위하여 공동의 안지름이 기준치수인 120mm인 경우와 71mm인 경우의 실험결과를 비교 도시한 것이다. 먼저, 그림(a)에서 주파수 특성을 보면 앞에서 고찰한 바와 같이 유속이 증가할 때 주파수가 증가하는 휘파람소리와 주파수변화가 거의 없는 휘파람소리가 분명하게 나타난다. 유속의 증가에 따라 주파수가 증가하는 휘파람은 공동의 음향모우드와는 관계없이 구멍과 유동상태에 따라 결정된다고 할 수 있으며 Elder 등<sup>(10)</sup>이 말한 전단음(shear tone)으로 볼 수 있다. 또한, 유속에 따라 주파수 변화가 거의 없는 휘파람소리는 Elder 등<sup>(10)</sup>과 Tsui와 Flandro 등<sup>(11)</sup>의 연구결과에 의한다면 공동내의 수많은 음향모우드들 중에서 어느 하나가 여기되어서 발생하는 관음(pipe tone)인 것으로 추측된다. 공동지름의 변화에 따라 주파수에

영향이 있는 것은 공동지름에 따라 구멍을 통과하는 유속이 변화하기 때문으로 생각된다. 다음에 그림(b)에서 음압레벨을 보면 공동지름의 치수 변화에 따른 휘파람소리의 크기를 비교할 수 있다. 그림에서 주파수 단계가 변하지 않는 범위내에서 휘파람소리의 음압레벨은 유속에 따라 증가하다가 최고의 음압을 나타낸 후 다시 감소하여 산모양의 형상을 보인다. 공동지름이 71mm인 경우는 전단음인 첫단계에서 최대의 음압레벨을 갖는 휘파람소리가 나타나며 그 이상의 관음의 단계에서는 음압레벨이 크게 감소한다. 그러나, 공동지름이 120mm인 경우는 두번째인 관음의 단계에서 최대의 음압레벨을 갖는 휘파람소리가 나타나며 이 음압레벨은 공동지름 71mm에서 나타난 음압레벨의 최고치보다 10dB이상 높다. 이와 같이 각 단계의 휘파람소리 중에서 어느쪽 음압이 더 높은 가는 공동의 치수와 유속에 따라 다르며 공동지름이 클수록 음압레벨이 커진다고 할 수 있다. 이러한 특성이 단일 개구부를 갖는 공동의 경우와 다른 점이다. 단일 개구부의 공동에서는 전단류에 의하여 관음이 여기되므로 관음의 진폭은 항상 전단류보다 큰 것을 보여 주었다.

Fig. 7은 공동길이의 변화에 따른 휘파람소리의 영향을 보기 위한 것으로 공동길이 200mm인 경우와 300mm인 경우의 실험결과를 비교 도시한 것이다. 다공관의 치수는 기준소음기와 같으며 단지, 기준소음기와 차이가 나는 것은 두 경우 모두 공동지름을 71mm로 한 것과 공동길이가 300mm일 때 공동의 양단과 구멍까지의 간격  $L_1$ 와  $L_2$ 를 60mm로 한 것이 다르다. 그림에서도 다른 실험결과와 마찬가지로 유속증가에 따라 휘파람소리의 주파수가 연속적으로 증가하는 전단류와 일정한 주파수를 갖는 관음을 볼 수 있다. 전단류의 주파수는 공동길이에 관계없이 거의 비슷한 경향을 나타내지만 천이과정만은 공동길이가 긴 경우가 짧은 경우보다 더 높은 유속에서 일어난다. 그리고 관음은 공동길이에 따라 주파수특성이 상당히 다르게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 변화는 공동길이의 변화가 구멍을 지나는 유동의 점선속도의 변화에 미치는 영향은 미미하지만 공동의 음향모우드에 미치는 영향은 크기 때문이라고 사료된다.

Fig. 8은 기준치수의 공동과 다공관을 갖는 소음기에서 다공관의 구멍지름만을 변화시켰을 때의 실험결과를 도시한 것이다. 이때 공극율(porosity)은 4%로 일정하게 하였기 때문에 구멍지름의 증가는 곧 구멍수의 감소를 의미하게 된다. 그림에서 휘파람소리는 다른 경우와 마찬가지로 전단류와 관음이 분명히 구분되어 나타나는 것을 알 수 있다. 전단류는 유속증가에 따라 주파수가 증가하고 구멍지름이 커짐에 따라 주파수가 현저히 낮아지는 것을 알 수 있다. 그러나, 관음은 구멍지름의 변화에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 전단류와 관음의 특성을 분명히 나타낸다고 할 수 있다. 즉, 전단류는 구멍의 치수와 유속의 분포에 따라 결정되므로 구멍치수 변화에 크게 영향을 받는다. 그러나, 관음은 음향모우드중 하나가 여기되는 바 구멍지름의 변화가 음향모우드의 변화에 미치는 영향은 미미하기 때문에 구멍지름이 변하여도 같은 모우드의 음이 여기된다면 거의 같은 주파수의 휘파람이 발생하게 된다.

Fig. 9는 기준치수의 공동을 갖는 소음기에서 다공판의 구멍수만을 증가(즉, 공극율의 증가)시켰을 때의 주파수 변화를 도시한 것이다. 다공판에 지름  $d_h=4\text{mm}$ 인 구멍을 열간 간격은  $\Delta L=20\text{mm}$ 로 일정하게 하고 1열에 2개, 4개, 8개 및 10개가 되도록 10열에 걸쳐서 뚫었으며 이것은 곧 공극율이 2%, 4%, 8% 및 10%로 되는 것을 의미한다. 그림에서 구멍의 수는 휘파람의 주파수 특성에 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 즉, 구멍수가 많을수록 전단음의 주파수는 증가하며, 관음이 여기되는 주파수도 구멍수에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이것은 구멍수에 따라서 구멍주위의 유속이 변화하기 때문으로 사료된다. 또한, 관음의 주파수도 공극율이 클 때는 유속의 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 보이는데 이것은 공극율이 클 때 모우드 주파수가 유속에 영향을 받기 때문이라고 생각된다.

Fig. 10은 기준치수의 공동과 다공판을 갖는 소음기에서 다공판의 구멍두께만을 변화시켰을 때의 실험결과를 나타낸 것이다. 휘파람소리의 전단음은 유속증가와 더불어 주파수가 증가하나 관음은 주파수 변화가 거의 없게 되는 것은 앞의 실험결과들과 같다. 또한, 관음에서 전단음으로 주파수 천이는 구멍두께가 작을수록 높은 유속에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히, 구멍두께가 두꺼운  $t=3.6\text{mm}$ 일 때는 휘파람소리가 발생되지 않는 유속범위가 있음을 볼 수 있다. 이것은 천이과정에서 휘파람의 음압이 약하게 되고 더불어 구멍두께가 두꺼울수록 구멍에서 소산되는 소리에너지는 커지는데 그 원인이 있다고 생각된다. 이와 같이 다공판의 구멍두께도 휘파람소리의 변화에 상당한 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 구멍의 열간 간격의 영향에 관한 실험결과를 도시한 것이다. 일정한 구멍지름  $4\text{mm}$ 와 구멍수 40개에 대하여 구멍열간 간격은 기준치수인  $\Delta L=20\text{mm}$ 와  $\Delta L=25\text{mm}$  및  $\Delta L=44\text{mm}$ 에 관하여 실험하였다. 열간 간격  $\Delta L=25\text{mm}$ 인 경우는 1열에 5개씩 8열에  $\Delta L=44\text{mm}$ 인 경우는 1열에 8개씩 5열에 걸쳐서 각각 40개의 구멍이 뚫려 있다. 그림에서 구멍의 열간 간격도 휘파람소리의 주파수 특성에 다소의 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 즉, 같은 유속에 대하여 열간 간격이 다를 때 휘파람의 주파수가 달라지며 휘파람이 발생하는 주파수 및 전단음에서 관음으로 천이가 되는 조건 등에도 변화가 있다. 그러나, 열간 간격의 일정한 변화 즉, 구멍의 분포 변화가 휘파람의 주파수 특성에 미치는 영향은 미약하다고 할 수 있다. 구멍분포의 변화가 유동특성이나 음향모우드의 변화에 큰 영향을 미치지 못하므로 유동특성에 크게 영향을 받는 전단음이나 음향모우드에 영향을 받는 관음의 발생에 크게 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다. 구멍열간 간격변화에 따른 휘파람 주파수의 어떤 규칙성을 발견하기도 어려운 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 다공판 표면에 일정한 간격으로 구멍을 뚫은 기준소음기의 경우와 구멍을 불규칙하게 분포시킨 경우의 실험결과를 비교 도시한 것이다. 공동과 다공판의 치수는 두 경우 모두 기준소음기와 같다. 그림에서 구멍의 분포가 휘파람의 주파수 특성에 다소 영향을 미치지만 크지는 않다고 할 수 있다. 또한, 유속에 따른 음압의 크기의 변화도 구멍분포에 관

계없이 거의 같은 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 11의 설명에서 언급한 바와 같이 구멍의 분포가 유동특성이나 공동의 음향모우드에 큰 영향을 미치지 않기 때문이다.

Fig. 13은 이상의 실험결과를 주파수와 유속 및 구멍지름으로 무차원화한 스트루할(Strouhal)수  $f d_h/U$ 로 나타내어 도시한 것이다. (a)는 구멍수의 변화에 따른 것이며 (b)는 공동의 지름 및 길이의 변화, (c)는 구멍지름의 변화를 매개변수로 하여 나타낸 것이다. 그림에서 스트루할 수는 유속에 따라 단계(stage)적인 변화를 보여주며 같은 단계에서는 유속의 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나, 어떤 경우에서든지 스트루할 수는 0.2에서 0.35사이에 있는 것을 알 수 있다. 이것은 일반적인 와류이탈(vortex shedding) 주파수에 대한 스트루할수와 같은 범위에 있는 것을 알 수 있으며 유속과 길이의 척도를 각각 관 중앙에서의 속도와 구멍의 지름으로 취한 것이 합리적인 것이 있음을 의미한다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

이상과 같이 다공형 소음기의 휘파람소리에 관하여 실험하고 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 다공형 소음기는 강한 순음성의 소리인 휘파람을 발생하며 유속이 낮을 때는 유속의 증가와 더불어 주파수가 증가하는 전단음이 나타나나 유속이 높을 때는 유속의 변화에 크게 영향을 받지 않는 공동의 음향모우드와 관계된 관음이 나타난다.
2. 휘파람소리는 다공판의 구멍지름과 두께, 구멍수, 구멍분포, 구멍의 열간간격 및 공동의 치수변화 등에 영향을 받는다.
3. 구멍지름과 관 중앙의 유속으로 무차원한 스트루할(Strouhal)수로 나타내면 유속에 따라 계단형을 나타내고 각 단(stage)은 유속이 증가할수록 감소하는 경향을 보이거나 그 범위는 0.20에서 0.35사이에 있다.

#### 참고문헌

1. H. Izumi, N. Kogima and M. Fukuda, "A Study on Mufflers with Air Flow (2nd Report)," Bulletin of the JSME, Vol. 28, No. 238, pp. 631-637, 1985.
2. N. Kojima, Y. Nakamura, and M. Fukuda, "A Study on the Correlation Between Fluctuating Velocity in a Muffler and Air Flow Noise," JSME Inter. Jr., Vol. 30, No. 265, pp. 1113-1120, 1987.
3. A. J. Green and P. N. Smith, "Gas Flow Noise and Pressure Loss in Heavy Vehicle Exhaust Systems," IMechE C17/88, pp. 47-54, 1988.
4. Ronald L. Panton and John M. Killier, "Excitation of a Helmholtz resonator by a turbulent boundary layer," Jr. Acoust. Soc. Am. 58(4), pp. 800-806, 1975.

5. M.L.Pollack, "Flow-induced tones in side-branch pipe resonators," Jr. Acoust. Soc. Am. 67(4), pp.1153-1156, 1980.
6. Ronald L. Panton, "Effect of Orifice Geometry on Helmholtz Resonator Excitation by Grazing Flow," ? , pp.60-65. 1990.
7. Powell,A, "On the edge tone," Jr. Acoust. Soc. Am. 33, pp.395-409, 1961.
8. S.A.Elder, "Self-excited depth-mode resonance for a wall-mounted cavity in turbulent flow," Jr. Acoust. Soc. Am. 64(3), pp.877-890, 1978.
9. S.A.Elder, "Forced oscillations of a separated shear layer with application to cavity flow-tone effects," Jr. Acoust. Soc. Am. 67(3), pp.774-781, 1980.
10. S.A.Elder and F.C.DeMetz, "Mechanisms of flow-excited cavity tones at low Mach number," Jr. Acoust. Soc. Am. 72(2), pp.532-549, 1982.
11. C.Y.Tsui and G.A.Flandro, "Self-Induced Sound Generation by Flow over Perforated Duct Liners," Jr. Sound and Vib., 50(3), pp.315-331, 1977.
12. V.Mason, "Some Experiments on the propagation of sound along a cylindrical duct containing flowing air," Jr. Sound and Vib., 10(2), pp.208-226, 1969.

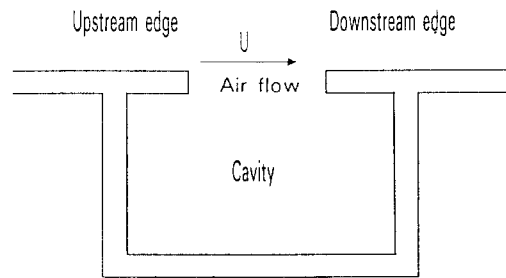


Fig. 1 Cavity resonator

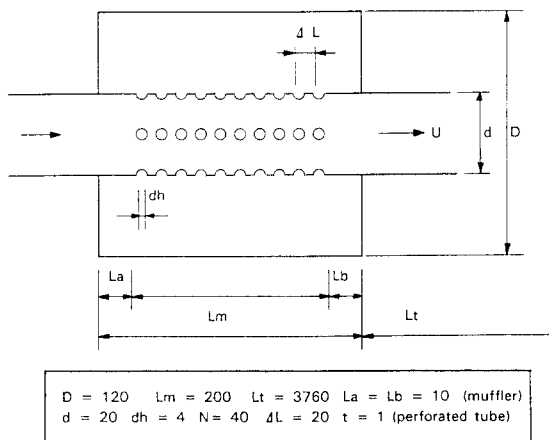


Fig. 2 Reference muffler and its dimensions

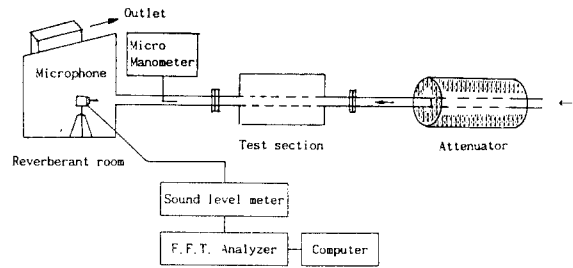


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

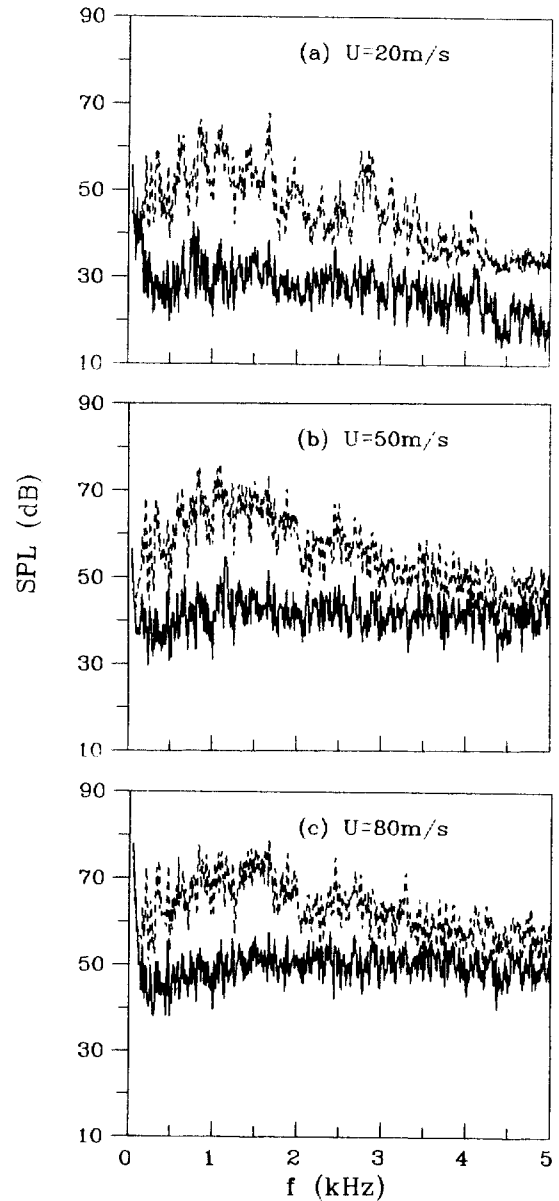


Fig. 4 Comparison of the noise spectra with (—) and without (---) the attenuator

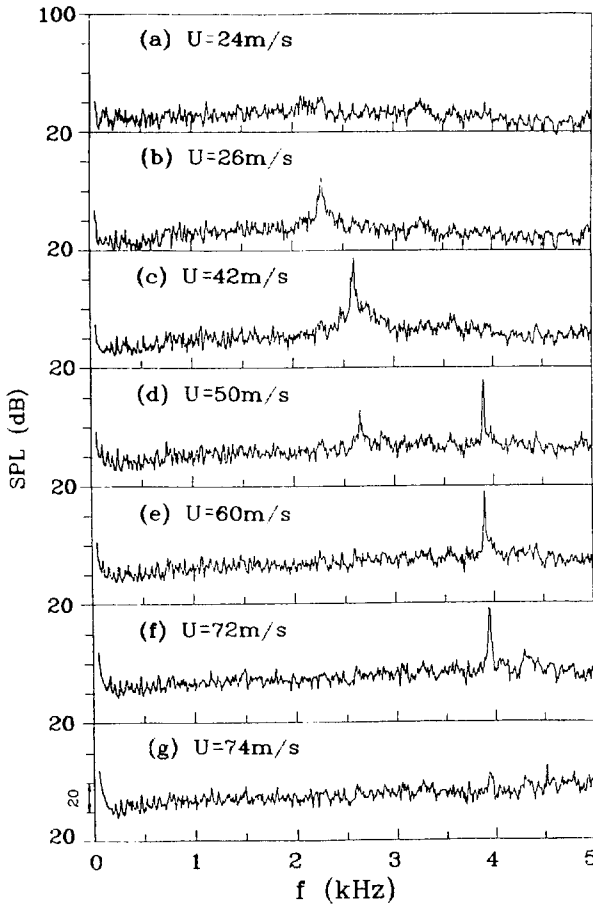


Fig. 5 Effect of the through-flow velocity on the sound spectrum for the reference muffler

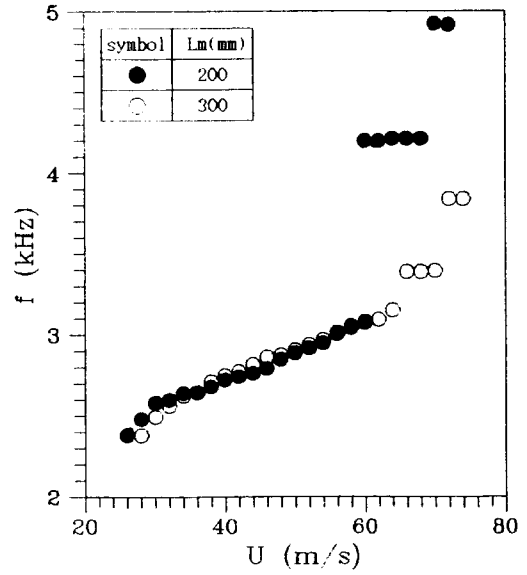


Fig. 7 Effect of the cavity length on the whistle frequency

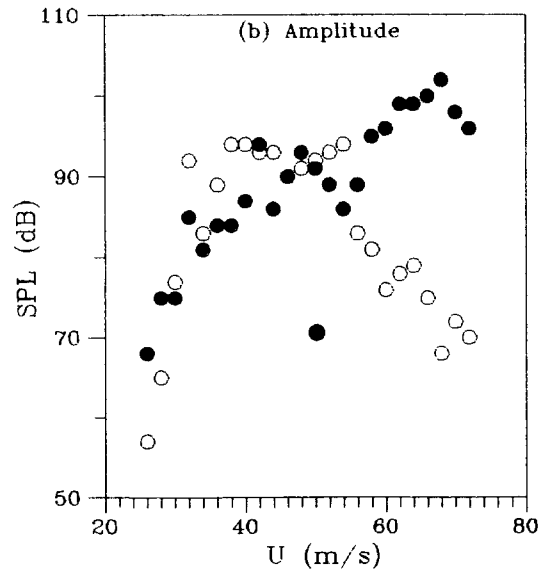
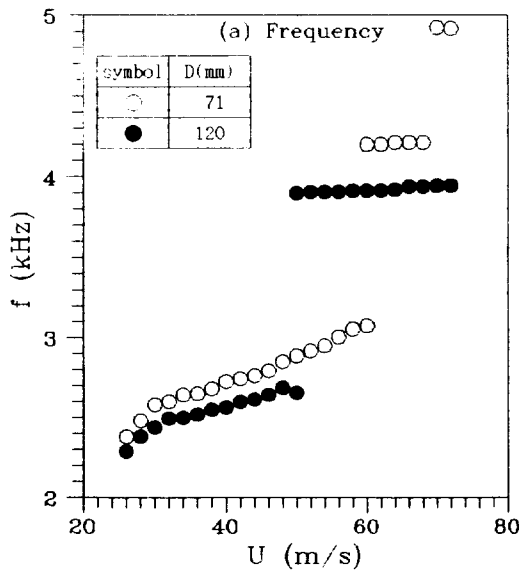


Fig. 6 Effect of the cavity diameter on the whistle

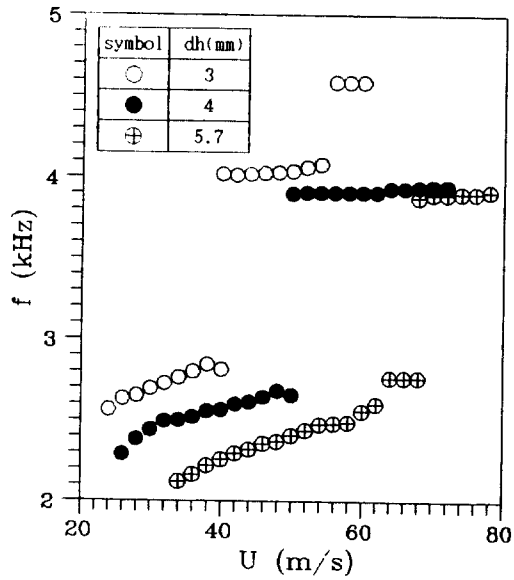


Fig. 8 Effect of the hole diameter on the whistle frequency

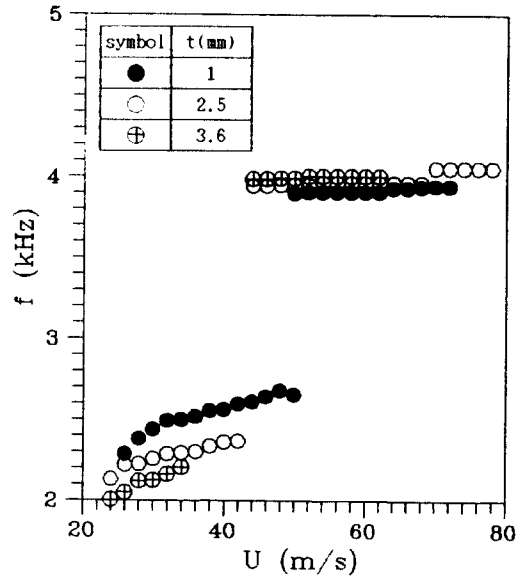


Fig. 10 Effect of the hole thickness on the whistle frequency

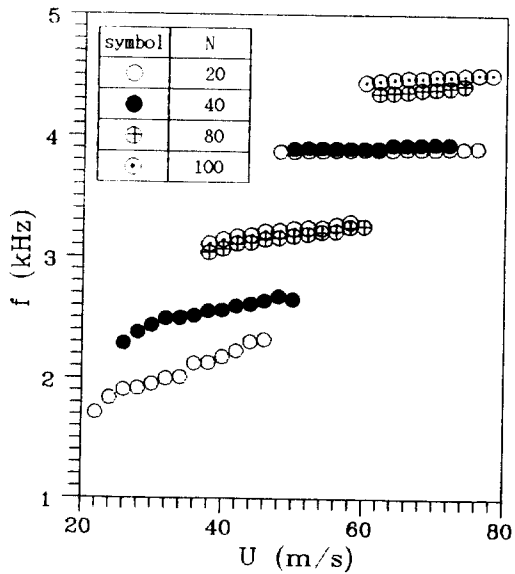


Fig. 9 Effect of the number of holes(i.e. porosity) on the whistle frequency

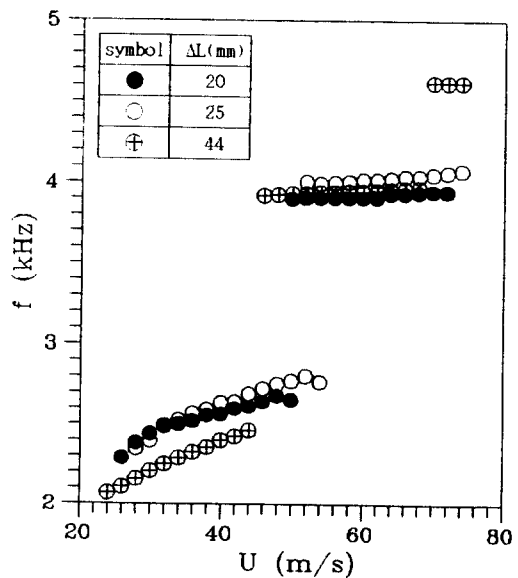


Fig. 11 Effect of the spacing between hole-rows on the whistle frequency

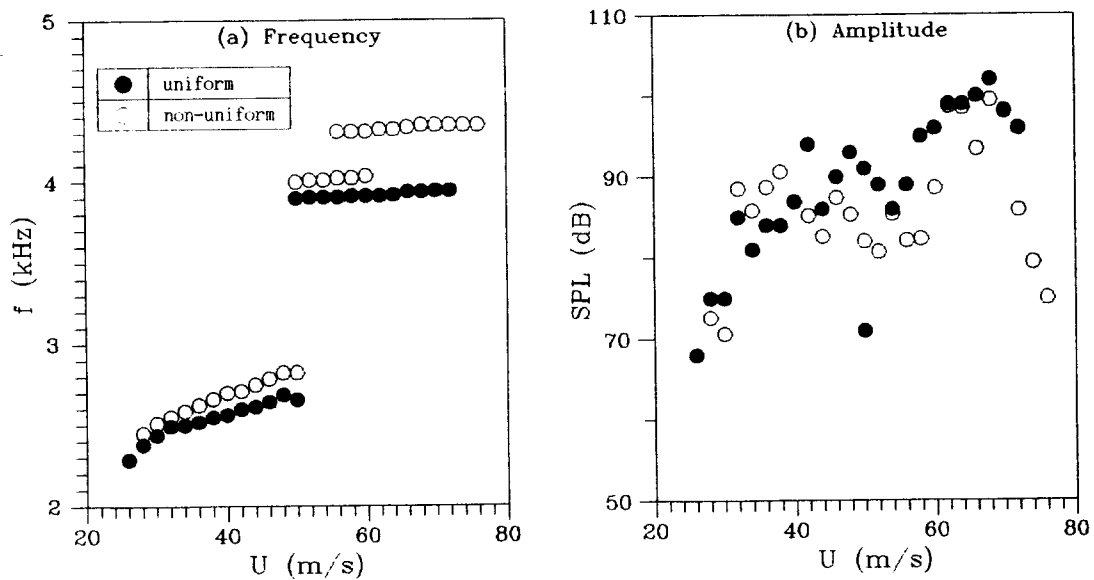


Fig. 12 Effect of the hole distribution on the whistle

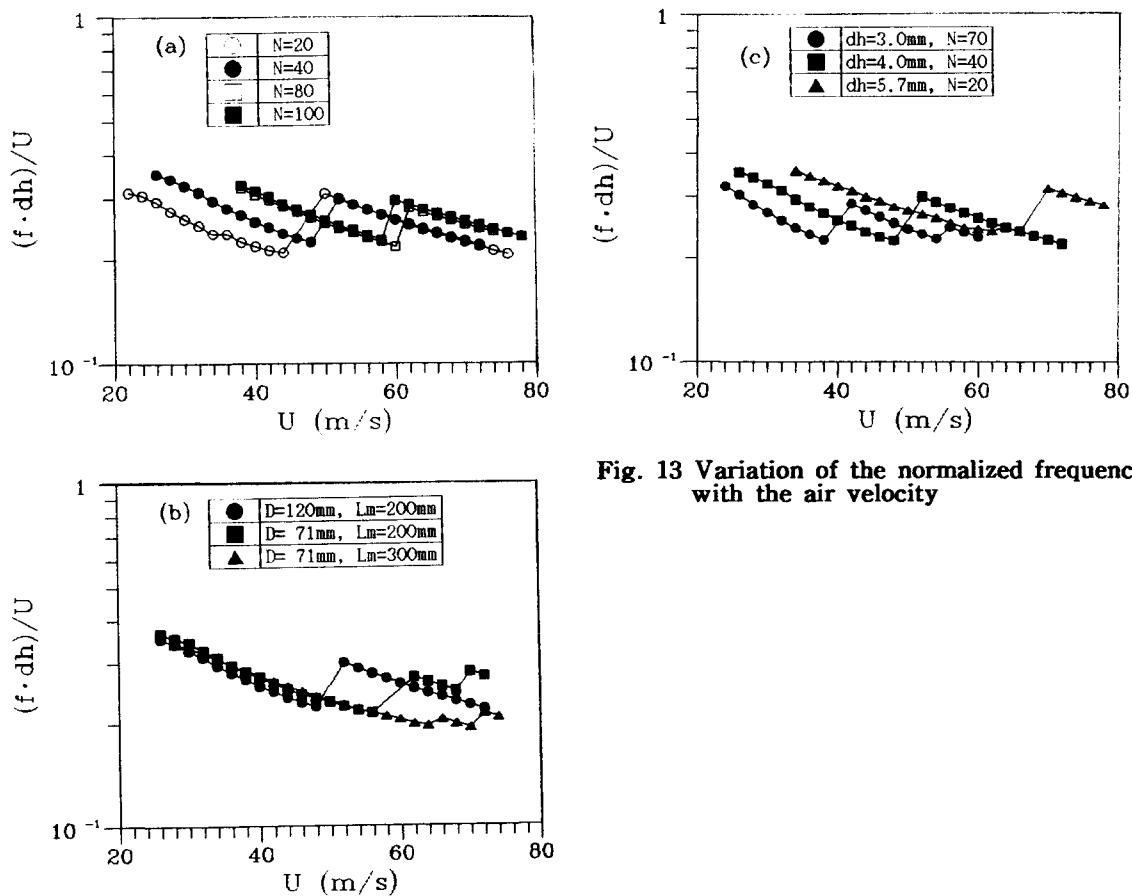


Fig. 13 Variation of the normalized frequency with the air velocity