

## 다공 초음속 분류소음에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study on the Supersonic Jet Noise from Multihole Jet

권 영 필\*, 서 기 원\*\*  
Y. P. Kwon, K. W. Suh

Key Words : Jet Noise(분류소음), Mach Number(마하수), Screech(스크리치), Confined Jet(관내분류), Free Jet(자유분류)

#### ABSTRACT

The objective of this paper is to study experimentally on the noise characteristics of supersonic jet from multihole orifice in the range of jet pressure from  $a_{t_0}$  to  $a_{t_2}$  in the reverberation room. At first, the single orifice jets are investigated for various hole diameter from 3.8mm to 10mm. Through the noise spectrum, the turbulent mixing noise and the shock associated noise is analyzed. The noise for confined jets into a tube of diameter 30mm or 90mm with length 2m is investigated in comparison with that for the free jets. The sound power level is measured and compared with theoretical models for free jet. At second, multihole orifice jets are investigated to study the effect of multijet on noise reduction. The spectrum and power level of multijets are measured and compared with single jets. The multi-jets in a confined pipe are also investigated. It is found that the noise spectrum is significantly altered by increasing the number of jet with decrease in jet diameter and also by confining the jet into tube.

#### 기호설명

$C_0$ : 음속 (m/s)	S : 오리피스 피치 (mm)
D : 관지름 (mm)	$T_1$ : 오리피스 입구온도 (°K)
M : 질량유동율 (kg/s)	W : 음향파워(W)
$P_1$ : 오리피스 입구압력	$\gamma$ : 비열비
PWL : 음향파워레벨 (dB)	d : 분류지름 (mm)
	$L_w$ : 음향파워레벨 (dB)
	$M_i$ : 분류의 마하수

\* 정희원, 숭실대학교 기계공학과

\*\* 정희원, 대림전문대학 건축설비과

- $P_2$  : 오리피스 출구압력
- R : 오리피스 입구압력과 출구압력과의 비
- SPL : 음압레벨(dB)
- $U_j$  : 분류속도(m/s)
- $\rho$  : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- $\eta$  : 음향효율

## 1. 서 론

오늘날 고압의 증기나 가스를 사용하는 산업 분야에서 많은 장치들이 고압화 되고 있기 때문에 유체 수송계의 감압 및 제어장치부에서 높은 파워의 소음이 발생된다. 이의 대책으로서 소음 발생을 줄이기 위한 설계방법의 개발 및 소음의 전파를 막을 수 있는 대책이 요구 되고 있다. 특히, 임계압 이상의 고압의 압축성 유체가 관내부에서 교축될 때나 대기중으로 배출될 때 초음속 분류로 되며 이러한 초음속 분류의 소음특성에 관해서는 오늘날까지 수많은 연구가 있어 왔다. 초음속 분류소음은 난류혼합소음(turbulent mixing noise)과 충격음(shock associated noise)으로 분류될 수 있다. 난류소음은 레이놀즈 전단응력의 결과로 생기는 것으로 Lighthill<sup>(1)</sup>의 quadrupole 음원모델에 의하여 소음파위가 분류속도의 8승에 비례한다는 이론모델이 세워졌으며 Lush<sup>(3)</sup>, Tanna<sup>(4)</sup> 등에 의하여 유동과 음파의 간섭이 고려되었고, McLaughlin 과 Tam<sup>(5,6)</sup>의 큰 난류구조(large turbulence structure) 또는 불안정파(instability wave) 이론에 의하여 난류소음의 발생기구가 더욱 분명하게 되었다. 충격음은 압력비가 임계값(공기의 경우 1.89) 이상일 때의 축소노즐이나 설계압력비를 벗어난 조건에서 작동하는 축소확대노즐의 분류에서 발생하는 것으로서 일련의 충격세포(shock cell)에 기인되며 두 종류로 구성된다. 즉, 광대역의 충격소음과 궤환(feedback) 루우프를 갖는 순음성의 스크리치(screech)가 그것이다. 충격소음 역시 큰 난류구조 또는 불안정파에 기인되는 것으로서 광대역 성분에 관해서는 최근 Tam과 Tanna<sup>(7)</sup>가 하류로 전파되는 큰 난류구조와 주기적인 충격세포구조와의 상호작용에 의한 것으로 모델링하고 실험과 비교한 결과 잘 일치

함을 보였다. 이러한 상호작용에 의하여 발생한 소리와 유동불안 사이에 궤환(feedback) 작용이 일어날 때는 강한 순음성의 충격음이 발생하게 되는데 이것이 스크리치(screech)로서 Powell<sup>(8)</sup>에 의하여 처음 설명되었다. 이러한 순음성의 스크리치음이 광대역의 충격음의 특별한 경우에 속한다는 것이 최근 Tam<sup>(9)</sup>에 의하여 잘 설명되었다.

분류소음의 억제방법으로서 분류를 다수로 분할하거나 환상분류(coannular jet)로 하는 방법등이 있으며 가장 널리 활용되기는 다공분류(multijet)에 의한 방법이다. 다공분류는 분류간의 간섭에 의하여 소음발생이 억제될 수 있다. 그러나 다공분류의 소음특성에 관해서는 아직 음향학적으로 불분명한 점이 많으며 최근의 Nakano<sup>(10,11)</sup>에 의한 일련의 논문을 주목할 만하다. 다공 오리피스에서 구멍의 배열, 형상등의 영향을 실험하고 초음속 분류의 유동상태를 가시화하여 유동구조로부터 소음특성의 물리적 기구를 설명한 연구이다. 그런데, 대부분의 분류소음의 연구가 그러하듯이 Nakano<sup>(10,11)</sup>의 다공분류 실험도 무향실에서 자유분류에 관한 것이었다. 그러나 배관내부의 분류는 제한공간으로 분출되기 때문에 자유분류의 소음특성의 연구결과가 이러한 제한공간에 그대로 적용될 수는 없다. 관내 분류와 관련된 연구는 벨브의 소음파위를 구하기 위한 연구와 배관의 급확대부에서 발생하는 자려진동음과 관련된 휘슬노즐(whistler nozzle)에 관한 것을 들 수 있다. 벨브의 소음파위에 관하여 Reethof<sup>(12)</sup>가 제시한 계산식이 있으나, 실험적인 뒷받침이 미흡하여 본 연구결과와 비교하기 어려운 것을 발견하였다. 휘슬노즐과 관련된 연구는 주로 유동특성에 치중되어 있고<sup>(13,14)</sup> 소음특성에 관해서는 Selero-wicz<sup>(15)</sup>의 연구가 참고될 수 있다. 노즐에 연결된 급확대관에서 발생하는 강한 맥동류는 순음(pure tone)과 그 고조파(harmonics)를 야기시켜 20dB 이상의 소음레벨의 증가를 가져올 수 있다. 그러나, 확대관의 길이가 극히 짧고 확대비가 낮은 경우에 한하였기 때문에 본 연구와 같이 확대비가 크고 긴 관에 노즐이 연결된 경우와 직접 비교는 어렵다.

따라서, 본 연구는 다공분류가 자유분출 및 관 내부에서 분출될 경우의 소음특성을 실험적으로 구하기 위한 것이다. 먼저, 구멍이 하나인 단공 오리피스에 관하여 자유분출과 관내분출의 소음특성을 비교하고 다공분류에 관하여 실험하여 그 소음특성을 구하려고 한다.

2. 자유분류의 소음파워

초음속 분류음은 충격파가 생기지 않는 이상적인 팽창의 경우에는 난류에 의한 난류 혼합소음(turbulent mixing noise)이 주된 소음원이며 그 파워는 다음과 같이 Lighthill<sup>(1,2)</sup>의 유속의 8승 법칙으로 구할 수 있다.

$$W = 3 \times (10)^{-5} \rho U_j^8 D^2 / c_0^5 \dots \dots \dots (1)$$

식에서 W는 분류소음의 파워(Watt)이며, ρ는 밀도(kg/m<sup>3</sup>), U<sub>j</sub>는 이상적인 분류의 유속(m/s), D는 지름(m), c<sub>0</sub>는 주변에서의 음속(m/s)이다. 비열비 γ인 기체의 이상적인 유동의 경우 분류속도 U<sub>j</sub>와 음속 c<sub>0</sub>의 비인 마하(Mach) 수는 다음식으로 구할 수 있다.

$$M_j^2 = [2 / (\gamma - 1)] [1 - R^{-(\gamma-1)/\gamma}] \dots \dots \dots (2)$$

압력비와 분류의 마하수의 관계를 γ=1.4인 공기의 경우에 도시하면 Fig. 1과 같다. 식(1)을 마하수 M<sub>j</sub>를 사용하여 10<sup>-12</sup> Watt를 기준으로 한 파워 레벨로 나타내면 다음과 같다.

$$L_w = 91.4 + 40 \log(M_j) + 20 \log d \dots \dots \dots (3)$$

식에서 R은 노즐 입구에서의 압력 P<sub>1</sub>과 출구에서의 압력 P<sub>2</sub>의 비, 즉 R=P<sub>1</sub>/P<sub>2</sub>로 정의된 압력비를 나타낸다. 또한, d는 분류의 지름을 mm로 나타낸 값이다.

소음파워 W를 분류의 파워 1/2 M U<sub>j</sub><sup>2</sup>와 음향효율(acoustic efficiency) η를 이용하여 다음과 같이 나타내는 것이 편리할 때가 있다.

$$W = 1/2 \eta M U_j^2 \dots \dots \dots (4)$$

식에서 M은 분류의 유량을 나타낸다. 자유분류소음에 관한 식(1)의 표현에 대한 음향효율을 구하면 다음과 같음을 알 수 있다.

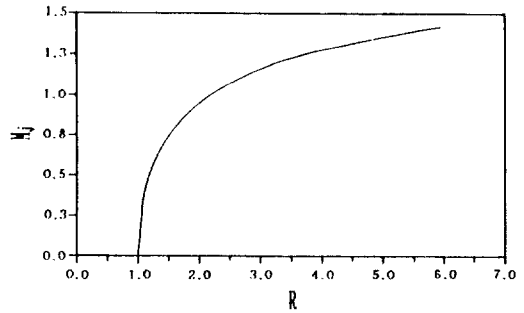


Fig. 1 Jet Mach number vs. pressure ratio for air at 300K

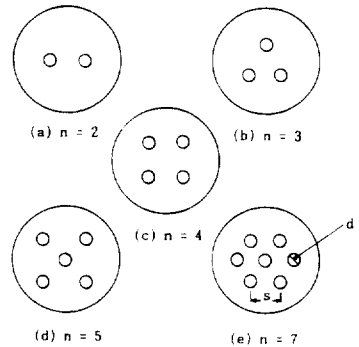
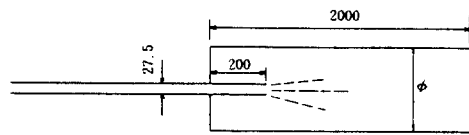


Fig. 2 The jet tube and multihole orifice s/d=2.0, n : number of orifices

$$\eta = 7.6 \times 10^{-5} M_j^5 \dots \dots \dots (5)$$

3. 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 압축기로 공기를 7kg/cm<sup>2</sup>까지 압축하여 탱크에 저장한 후, 오리피스를 통하여 blow down시키면서 실험할 수 있도록 하였다. 오리피스와 압축탱크사이에 소실(chamber)을 장치하여 오리피스의 상류조건이 되도록 단면적을 크게 하고 배관에서 발생하는 유동소음을 흡수할 수 있도록 하였다.

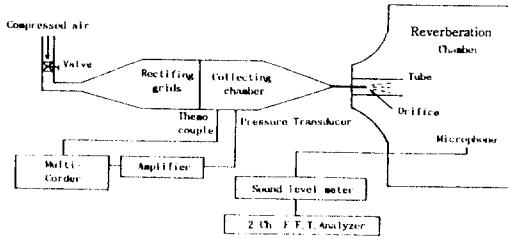


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table. 1 Details of measuring equipments

F. F. T. Analyzer	CF-350, ONO SOKKI
Microphone	TYPE 4155, B & K
Sound level meter	TYPE 2230, B & K
Pressure Transducer	TYPE PG-20KN, KYOWA
Amplifier	TYPE YA-503A, KYOWA
Thermocouple	TYPE JIS C 1604, WOJIN
Multicorder	TYPE MC 6715, GRAPHTEC

소실에는 압력픽업과 온도센서를 부착하여 상류압력  $P_1$  과 온도  $T_1$  을 측정하였다. 오리피스는 두께 3mm의 철판에 지름 3mm에서 10mm까지의 구멍을 한개 또는 여러개 뚫어 제작하였다. 분출조건은 직접 또는 90mm지름에 2m관 및 30mm의 지름에 2m관을 통하여 잔향실로 분출되게 하였다. 구멍의 배열 및 분출관의 치수는 Fig. 2에 도시한 바와 같다. 소음파워의 측정은 잔향실에서 치환법에 의하였다. 무향실의 경우에는 분류음의 지향특성 때문에 여러 위치에서 음압레벨을 구하고 적분하여 소음파워를 구하게 되나 잔향실에서는 지향성이 없기 때문에 한 점에서의 음압레벨을 측정하여 기준음원과 비교 실험하여 쉽게 소음파워를 구할 수 있다. 잔향실의 체적은  $4.75m^3$ , 630Hz까지 음압분포의 최대편차는 4dB 이내 이고 그 이상의 주파수대역에서는 1내지 2dB의 편차를 보였다. 지름 1/2 inch 마이크로폰을 분류의 출구에서 1m거리에서 고정하여 음압을 검출하고 2채널 FFT와 PC를 연결하여 데이터를 처리하였다. 주파수 분석은 20KHz까지 하고 16회 스펙트럼 평균을 취하였다.

#### 4. 실험결과 및 토의

##### 4.1 단공분류의 경우

먼저 오리피스의 구멍이 하나인 경우에 관하여 분출조건에 따라서 소음 스펙트럼의 특성, 소음파워 등의 실험결과를 검토하기로 한다.

Fig. 4(a) 및 (b)에는 구멍지름 10mm와 4mm의 자유분류 경우에 서로 다른 분출압력에 관하여 잔향실내의 소음 스펙트럼을 도시하였다. Fig. 4(a)의 구멍지름 10mm의 경우 압력  $P_1$  이  $6at_g$ 일 때는 강한 스크리치음이 나타나는 것을 볼 수 있으며  $3at_g$ 에서는 두개의 스크리치음이 나타나는 것을 알 수 있다. 스크리치음의 주파수는 구멍지름이 작을 수록 분출압력이 높을 수록 높아지며, 불안정파의 모드에 따라 달라지고 모우드수 만큼 스크리치가 나타나게 된다. 그러나, 압력비가 임계값을 가까스로 넘는  $P_1=1at_g$ 의 경우에는 스크리치음이 나타나지 않는다. 또한, 스크리치 주파수보다 높은 주파수 범위에서 다소 넓은 대역의 강한 소음을 볼 수 있으며 이것은 충격음에 관련된 광대역소음인 것으로 보인다. Fig. 4(b)의 구멍지름 4mm의 경우는 20KHz이상의 주파수에서 스크리치가 나타나므로 그림에서는 도시하지 않았다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 조건에서 분류가 지름 90mm 길이 2000mm의 관내로 분출 될 때 잔향실에서 측정된 음압스펙트럼이다. 그림에서 제한공간으로 분출될 때는 Fig. 4의 자유분류의 경우와 비교할 때 스펙트럼상에 현저한 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 순음성분의 스크리치음은 사라지고 광대역의 충격음도 뚜렷하게 나타나지 않으며 저주파 성분이 강하게 나타나서 중심주파수는 저주파쪽으로 이동한 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 제한 공간의 관지름이 30mm인 경우의 음압스펙트럼을 나타낸 것이다. Fig. 5의 관지름 90mm의 경우와 비교하면 분출압력의 영향이 감소하여 음압레벨은 낮아졌으며 주파수 특성은 더욱 평탄하여진 것을 알 수 있다. 즉, 관 지름이 작아질 때 소음스펙트럼은 평탄해지면서 파워는 감소한다고 할 수 있으며 이러한 경향은 분출압력이 높을 수록 더욱 뚜렷해지는 것을 알 수

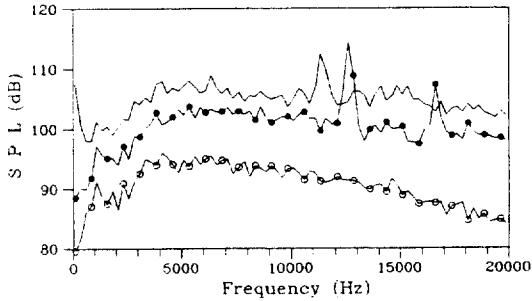
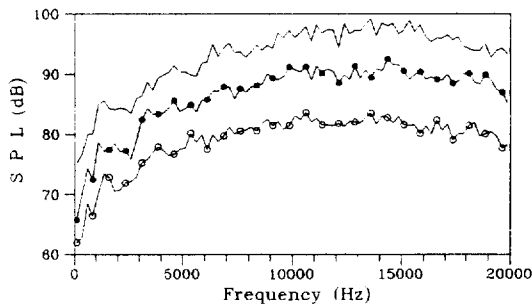
(a)  $d=10\text{mm}$ (b)  $d=4\text{mm}$ 

Fig. 4 Sound spectrum for a single free jet  
 $[P_1=6\text{atg}(-), 3\text{atg}(\bullet), 1\text{atg}(\ominus)]$

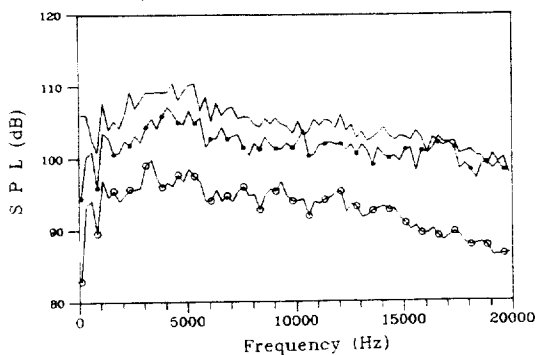


Fig. 5 Sound spectrum for a single confined jet of diameter 10mm into a tube of  $d=90\text{mm} \times I=2000\text{mm}$   
 $[P_1=6\text{atg}(-), 3\text{atg}(\bullet), 1\text{atg}(\ominus)]$

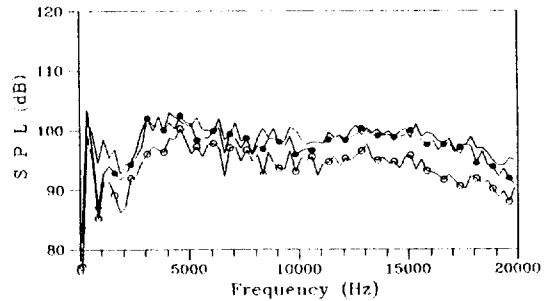
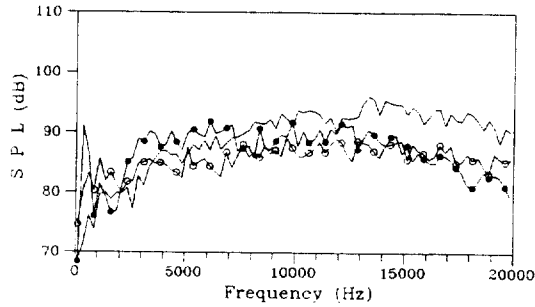


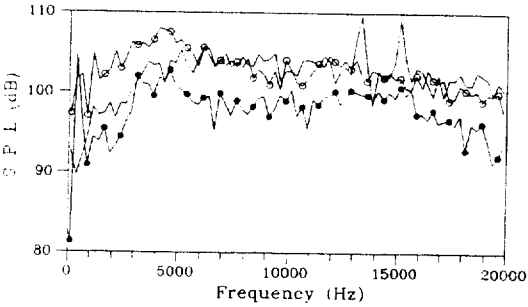
Fig. 6 Sound spectrum for a single confined jet of diameter 10mm into a tube of  $d=30\text{mm} \times I=2000\text{mm}$   
 $[P_1=6\text{atg}(-), 3\text{atg}(\bullet), 1\text{atg}(\ominus)]$

있다. 이와 같이 분출공간의 영향은 관의 지름 및 분출압력에 영향을 받는다. 다음으로 관내 분류의 주파수 특성에서 특기할 수 있는 것은 저 주파수역에 강한 순음과 그 배음들이 나타나는 것이다. 그 주파수는 압력과 관의 지름에 상관없이 400Hz를 기본음으로 하고 1200Hz, 2000Hz 등의 배음들이다. 이 주파수는 오리피스와 확대관 사이 환상공간의 축방향 음향모드와 일치하는 주파수임을 알 수 있다. 길이가 2000mm인 확대관의 기본진동수가 45Hz임을 고려할 때 이러한 저주파음들은 오리피스 주위의 음향모드와 분류의 상호작용에 의한 진동음으로서 휘슬노즐의 경우<sup>(15)</sup>와 같이 해석할 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 7(a), (b), (c) 및 (d)는 분출 공간의 영향을 비교해 본 것으로서 분출압력  $P_1$ 이 4atg 및 1atg인 경우에 직접 분출, 30mm관 및 90mm관으로 분출할 때를 비교하였다. 오리피스의 지름이 4mm인 Fig. 7(a)에서는 90mm관으로 분출되면 자유분류에 비하여 고주파 성분이 감소되고 저주파 성분은 증폭되는 것을 알 수 있다. 분출 공간의 지름이 더 작은 30mm관 일때는 광대역음도 더욱 평탄한 주파수 특성을 보이고 레벨은 다소 감소하나 전체적인 음압레벨은 90mm관의 경우보다 증가하는 것을 알 수 있다. 그것은 저주파의 강한 순음의 음압레벨이 30



(a)  $d=4\text{mm}$

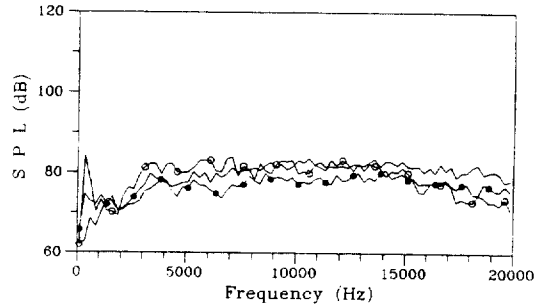


(b)  $d=10\text{mm}$

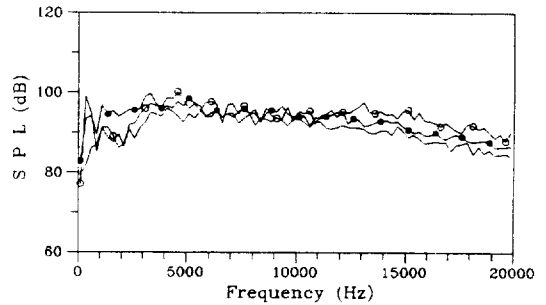
Fig. 7 Effect of the jet space on the sound spectrum at  $P_1=4\text{atg}$  from a single jet [free(-), {confined  $d=90(\bullet)$ ,  $d=30(\circ)$ }]

mm관일 때 90mm관보다 더욱 크게 나타나기 때문이다. 오리피스 지름이 10mm인 Fig. 7(b)의 경우는 Fig. 7(a)와 대체적으로 유사한 경향을 보이나 자유분류에 비하여 30mm 및 90mm관으로 분출될 경우는 전 주파수 영역에서 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)를 비교할 때 오리피스 지름이 큰 경우가 작은 경우보다 음압레벨의 감소폭이 큼을 알 수 있다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(c) 및 Fig. 7(b)와 Fig. 7(d)를 비교하면 분출압력이 낮아질수록 스펙트럼이 더욱 평탄해지고 음압레벨은 낮아지며 분출공간의 영향이 감소되어 Fig. 7(d)의 경우에는 관내분류의 소음도가 자유분류보다 오히려 약간의 증가를 보이고 있다.

Fig. 8은 지름 10mm분류의 소음파위에 미치는 분출공간의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 자유공간으로 분출될 때인 식(3)에 따른 난류소음의 파워레벨을 계산한 것이다. 자유분류의 실험결과를 볼 때 식(3)과 비교적 잘 일치하나 압력비 3인 경우는 계산보다 현저히 높게 나타나는데 그 원인은 Fig. 4에서 보듯이 스크



(c)  $d=4\text{mm}$



(d)  $d=10\text{mm}$

Fig. 7 Effect of the jet space on the sound spectrum at  $P_1=1\text{atg}$  from a single jet [free(-), {confined  $d=90(\bullet)$ ,  $d=30(\circ)$ }]

리치움에 의한 것임을 알 수 있다. 분류가 제한된 공간인 90mm관내로 분출될 때에는 스크리치가 나타나지 않으나 저주파 성분이 크게 나타나므로 소음파위에는 큰 변화가 없다. 그러나, 30mm관으로 분출될 때는 1000Hz에서 3000Hz사이의 감소에 의하여 파워레벨이 다소 낮아지나 압력비 2, 즉  $P_1=1\text{atg}$  일 경우는 Fig. 4, Fig. 5와 Fig. 6을 비교하면 알 수 있듯이 전 주파수 대역에서 관내로 분출될 때 지름이 작을수록 음압이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 분출압력이 높을 때는 제한공간으로 분출될 때가 자유공간으로 분출될 경우보다 소음이 감소되나 분출압력이 낮은 경우는 그 반대현상으로 된다.

Fig. 9는 Fig. 8과 같은 조건으로 분류의 지름이 4mm인 경우를 도시한 것이다. 자유분류의 경우 식(3)으로 계산한 값과 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 관내부로 분출될 때는 구멍지름 10mm의 경우와 유사하게 파워레벨이 감소하나 Fig. 7에서 보았듯이 가청범위의 저주파음이 강해지기 때문에 소음도는 더 높아진다고 할 수 있다.

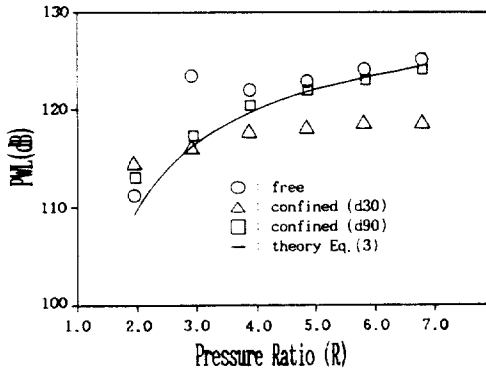


Fig. 8 Sound power level from a single jet of diameter 10mm

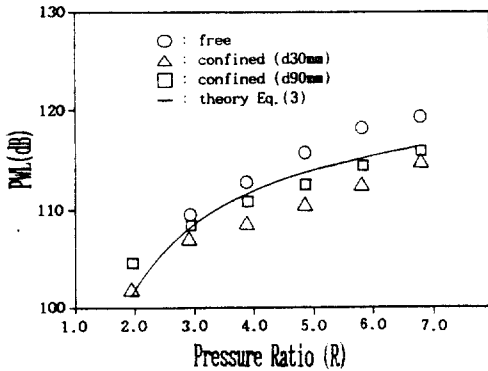


Fig. 9 Sound power level from a single jet of diameter 4mm

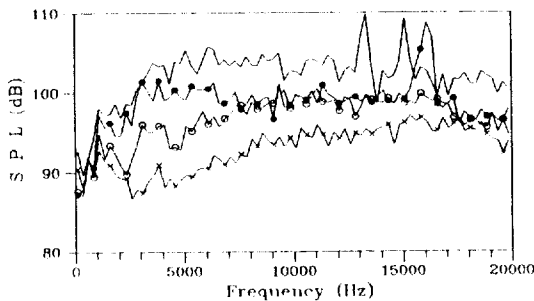


Fig. 10 Sound spectrum at  $P_1=4atg$  from multihole free jets of the equivalent diameter 10mm [ $n=1$ (—),  $2$ (●),  $3$ (⊕),  $7$ (×)]

### 4.2 다공분류의 경우

다공분류에 관해서는 지름 10mm의 단공분류와 같은 분류면적을 갖는 다공분류와 4mm의 일정한 지름을 갖는 다공분류에 관하여 실험하였다.

Fig. 10은  $P_1=4atg$ 에서 같은 분류면적에 대하여 구멍 수의 증가에 따른 소음 스펙트럼을 나타낸다. 그림에서 분류의 수가 증가함에 따라서 주파수 특성에 현저한 변화가 있는 것을 알 수 있다. 구멍 수의 증가, 즉 구멍지름의 감소에 따라 전체적인 소음파위의 변화보다는 난류 혼합 소음의 중심주파수 이동에 따른 가청범위 소음도에 큰 변화를 나타내게 된다. 그림의 경우에는 분류수가 1개에서 7개로 증가할 때 5000Hz 대역에서 20dB에 가까운 소음도의 감소가 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 지름 4mm의 분류의 대하여 분류의 수를 증가시킬 때  $P_1=4atg$ 에서의 소음 스펙트럼을 도시한 것이다. 이론상 구멍의 수가 배로 될 때마다 분류사이에서 간섭이 없다면 3dB의 소음레벨 증가가 있을 것이나 그림에서 보듯이 저주파에서는 현저한 증가가 있으나 고주파 영역에서는 증가가 3dB에 훨씬 못미치는 것을 알 수 있다. 이것은 분류에 의한 음의 차폐효과(shielding effect)로 사료된다. 차폐효과는 고주파에서 현저하고 저주파에서는 분류 수의 증가가 큰 스케일의 난류를 만들어 저주파음의 증가를 가져오게 된다.<sup>(10)</sup>

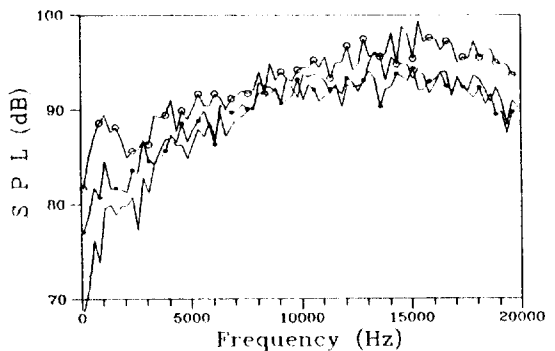


Fig. 11 Sound spectrum at  $P_1=4atg$  from multihole free jets of the same diameter 4mm [ $n=1$ (—),  $2$ (●),  $4$ (⊕)]

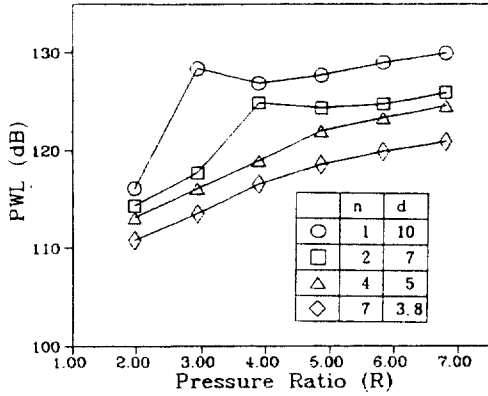


Fig. 12 Sound power level from multihole free jets of the equivalent diameter 10mm

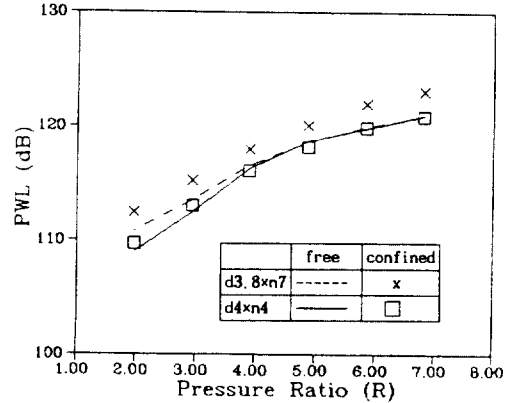


Fig. 15 Effect of the jet space on the sound power level from multihole jets

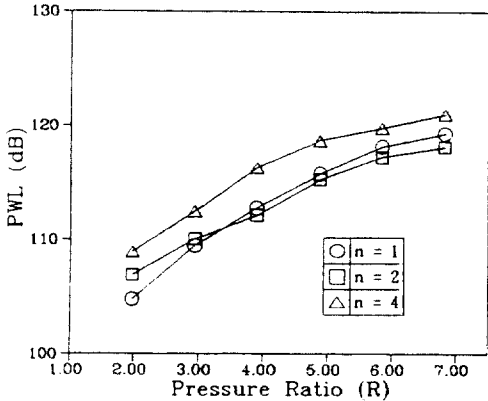


Fig. 13 Sound power level from multihole free jets of the same diameter 4 mm

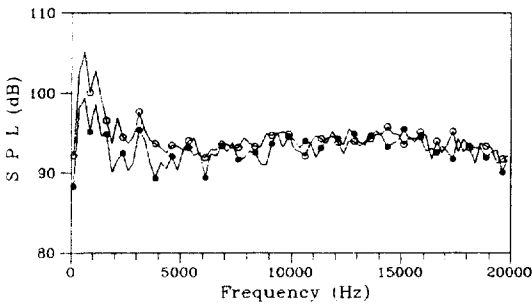


Fig. 14 Sound spectrum from multihole confined jets at  $P_1=4atg$  in a tube of  $d=90mm \times l=2000mm$  [d4xn4 (●), d3.8xn7(○)]

Fig. 12는 같은 분류면적에 대하여 분류의 수를 늘려갈 때 소음파워를 압력비에 따라 도시한 것이다. 그림에서 구멍수의 증가에 따라 소음 파워가 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 지름 7mm의 분류가 2개일 때도 스크리치음이 나타나 지름이 더 작아지면 스크리치 주파수가 20 KHz 이상으로 증가하므로 그 영향이 나타나지 않는다. 앞에서 언급한 바와 같이 분류가 7개로 증가할 때 파워레벨에서는 10dB 정도 감소하나 주파수 이동에 따라 가청범위의 소음은 20dB 정도 감소된다.

Fig. 13은 지름이 4mm인 분류의 수를 변화시킬 때 압력비에 따른 파워레벨을 도시한 것이다. Fig. 11에서 보았듯이 고주파음에서는 구멍수가 증가 하여도 차폐효과에 의하여 음압레벨에 큰 변화가 없으나 저주파음은 난류강도의 증가로 음압레벨의 증가를 가져오며 전체적인 파워레벨은 그림에서 보듯이 약간씩 증가한다.

Fig. 14는 다공분류가 지름 90mm 관 내부로 분출될 때  $P_1=4atg$ 에서 소음 스펙트럼을 나타낸 것이다. 저주파역에서는 강한 순음과 그 배음들이 나타나고 고주파역에서는 백색잡음과 같이 평탄한 스펙트럼을 나타낸다. Fig. 10 및 Fig. 11의 자유분류의 경우와 비교하여 보면 스펙트럼상의 현저한 변화를 볼 수 있다. 즉, 다공분류가 관 내부로 분출될 때는 자유분류와 비교하여 고주파음은 다소 감소하지만 저주파음은 현저히 증



폭되는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 Fig. 7에서 볼 수 있는 바의 단공분류의 경우와 비슷한 경향이긴 하나 더욱 현저히 된다고 할 수 있다. 즉, 다공분류의 경우 관내분출에 의하여 저주파음이 더욱 크게 발생되고 단공분류보다 소음도가 더욱 커질 수 있다.

Fig. 15는 분출공간에 따라 소음파위를 비교한 것이다. 자유공간과 제한공간의 경우에 스펙트럼상에서는 현저한 차이가 있었으나 파워레벨에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 즉, 제한공간으로 분출되는 경우에 고주파음이 감소되는 반면 저주파음이 증폭됨으로서 파워레벨은 비슷하나 가청주파수 범위의 소음도는 크게 증가할 수 있다.

## 5. 결 론

다공 초음속 분류의 소음특성에 관하여 잔향실 실험을 통하여 소음 스펙트럼 및 파워레벨을 구하고 검토한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 관내분류는 자유분류에 비하여 저주파역에서 강한 진동음과 그 배음들이 나타나며 이것은 관의 음향모우드와 분류사이의 궤환작용에 의한 공진음으로서 휘슬노즐과 같은 현상이라 할 수 있다.

2. 다공 분류는 단공분류에 비하여 자유분류의 경우 중심주파수 이동과 차폐효과에 의하여 소음도가 감소하나 관내분류의 경우에는 저주파음의 강한 증폭으로 인하여 소음도가 오히려 크게 될 수 있다.

3. 관내분류의 소음특성은 분출압력, 관의 지름 및 길이에 크게 영향을 받으며 분출압력이 클수록, 오리피스 지름과 관의 지름의 비가 클수록 관의 영향이 커진다.

## 후 기

본 연구는 대림재단 학술연구비 지원과 숭실대학교 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 재단에 심심한 사의를 표합니다. 또한, 본 실험을 도와준 박경영군에게 감사한다.

## 참 고 문 헌

1. Lighthill, M. J., 1952, "On sound generated aerodynamically. I : General theory", Proc. Roy. Soc. A., 211, pp.564-587.
2. Lighthill, M. J., 1954, "On sound generated aerodynamically. II : Turbulence as a source of sound", Proc. Roy. Soc. A., 222, pp.1-32.
3. Lush, P. A., 1971, "Measurements of subsonic jet noise and comparison with theory", J. Fluid Mech., 46, pp.477-500.
4. Tanna, H. K., 1976, "An experimental study of jet noise Part I : Turbulent mixing noise", J. Sound & Vib., 50, pp.405-428.
5. McLaughlin, D. K., Morrison, G. L., and Troutt, T. R., 1975, "Experiments on the instability waves in a supersonic jet and their acoustic radiation", J. Fluid Mech., 69, pp.73-95.
6. Tam, C. K. W. and Burton, D. E., 1984, "Sound generated by instability waves of supersonic flows. part 1. Two dimensional mixing layers part 2. Axisymmetric jets", J. Fluid Mech., 138, pp.249-271 and 273-295.
7. Tam, C. K. W. and Tanna, H. K., 1982, "Shock associated noise of supersonic jets from convergent-divergent nozzles", J. Sound & Vib., 81, pp.337-358.
8. Powell, A., 1953, "On the mechanism of choked jet noise", Proceedings of the physical Society, 66, pp.1039-1056.
9. Tam, C. K. W., Seiner, J. M. and Yu, J. C., 1986, "Proposed relationship between broadband shock associated noise and screech tones", J. Sound & Vib., 110, pp.309-321.
10. Nakano, M., Tajima, K. and Kumaido, K., 1988, "A study on the improvement of noise suppression in a low-noise valve of the multiple supersonic parallel-flow jets", Jr. JSME, 54(500), pp.907-915.
11. Nakano, M., Tajima, K. and Kumaido, K.,

- 1989, "A study on the improvement of noise suppression in a low-noise valve of the multi-hole type. 2nd report, noise reduction by modifying the exit shape of each hole", Jr. JSME, 55(20), pp.3716-3724.
12. Reethof, G. and Ward, W. C., 1986, "A theoretically based valve noise prediction method for compressible fluids", J. Vib., Acous., Stress, and Reliability in Design, 108, pp.329-337.
13. Anderson, J. S., Jungowski, W. M., Hiller, W. J. and Meier, G. E. A., 1977, "Flow oscillations in a duct with a rectangular cross-section", J. Fluid Mech., Vol. 79, pp.769-784.
14. Sakeda, S. and Iwamoto, J., 1991, "Flow oscillations in duct with an abrupt enlargement", FED-Vol. 106, Measuring and Metering of Unsteady Flow, ASME 1991, pp.1-6.
15. Selerowicz, W. C., Szumowski, A. P. and Meier, G. E. A., 1991, "Self-excited compressible flow in a pipe-collar nozzle", J. Fluid Mech., Vol. 228, pp.465-485.