

## 마이크로 제트를 이용한 과소팽창 음속 제트에서의 소음저감

김진화<sup>†</sup> · 김정훈\* · 유정열\*\*

(2003년 5월 12일 접수, 2003년 8월 7일 심사완료)

### Noise Reduction of an Underexpanded Supersonic Jet via Steady Blowing with Microjets

Jin-Hwa Kim, Jung Hoon Kim and Jung Yul Yoo

**Key Words :** Noise Reduction(소음저감), Jet Screech(제트 스크리치), Microjet(마이크로제트)

#### Abstract

An attempt to reduce supersonic jet noise is carried out by using two steady microjets in a round jet. The jet is issued from a round sonic nozzle with an exit diameter of 10 mm. Two micro-nozzles with an inside diameter of 1 mm each are installed on the exit plane at an angle of 45° relative to the main jet axis. Far-field noise was measured at 40 diameters off the jet axis. The angle between a microphone and the jet axis is 30° or 90°. For an injection rate of 4-6% of the main jet, screech tones were completely suppressed by the microjets. The reduction in the overall sound pressure levels were 2.4 and 2.7 dB for 90° and 30° measuring directions, respectively. However, the enhancement of mixing/spreading of the jet by the microjet was negligible. The reduction of noise is probably due to distorted shock cell structures and/or deformed large scale vortical structures by the microjets.

#### 1. 서론

제트에서의 소음을 줄이려는 연구는 지난 반세기 동안 꾸준히 계속되고 있으며 최근에는 비행장 주변의 소음규제 강화로 인해 그에 대한 연구가 더욱 활발 해지고 있다. 제트의 소음 저감을 위해 시도된 방법은 크게 수동적 및 능동적으로 분류된다.

수동적 방법중에는 노즐출구에 탭이나 베인 같은 돌출물을 붙이거나 노즐의 출구형상을 변경한 것이 있다. 탭을 노즐 출구에 붙여 제트의 확산을 증진시키면서 동시에 소음을 저감시키는 연구가 Ahuja & Brown<sup>(1)</sup> 및 Zaman et al.<sup>(2)</sup>에 의해 행해졌다. 여기서 탭은 주유동 방향의 와동을 생기게 하여 제트의 확산/혼합을 증가시키고 소음도 줄이

는 역할을 하였다. Raman<sup>(3)</sup>은 노즐 출구형상이 과소팽창된 사각제트 소음장을 크게 변화시킴을 보였다. 노즐 출구 형상을 변경하여 탭 사용시 문제된 추진력의 손실 없이 제트의 혼합을 증대시키면서 소음을 저감하려는 연구가 Samimy et al.<sup>(4)</sup>, Kim & Samimy<sup>(5)</sup> 및 Kerechanin<sup>(6)</sup> 등에 의해 수행되

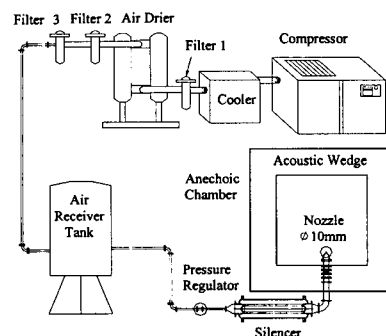


Fig. 1 A schematic of experimental facilities

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : jeffkim3@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1707 FAX : (02)880-1910

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

었다. 여기서 노즐출구 형상변경은 노즐출구의 일부를 단순히 절단하여 낸 형태여서 유동으로의 돌출물이 없게 되어 추진력의 손실없이 소음이 줄어 들었다.

노즐 출구에서 분사 또는 흡입을 이용한 능동적 방법도 다양하게 연구 되었다. Davis<sup>(7)</sup>는 정상 (steady) 마이크로제트를 주제트 축에 직각방향으로 분사하여 제트의 확산을 촉진하는 연구를 하였다. 소형 플루이드 (fluidic)을 이용한 유동 및 소음제어가 Raman<sup>(8)</sup>에 의해 행해졌다. 과소팽창된 음속노즐에서 Ibrahim et al.<sup>(9)</sup>은 정상 및 비정상 마이크로제트를 제트축에 직각으로 분사했을 때 혼합/확산이 증가하고 정상 분사인 경우 소음도 감소함을 보였다.

이 연구의 목적은 마이크로 제트를 주제트 축에 일정한 각을 두고 분사하여 추진력의 손실을 최소화하면서 제트의 소음을 줄이는 것이다. 주제트로 정상적으로 분사된 마이크로 제트가 “유체 탭” 과 같은 역할을 함으로써 소음이 저감될 것이라 예상되어 이 연구를 착수하게 되었다.

## 2. 실험 장치

### 2.1 제트 유동 발생 장치

본 연구에서는 노즐에 공기를 연속적으로 공급하도록 실험장치가 설계되어졌다. Fig. 1에서와 같이, 스크류타입 압축기에서 발생된 압축공기는 냉각팬과 필터를 지난 후에 이슬점이 약 -20 °C인 공기 건조기를 통과한다. 다시 두 개의 미세 필터를 통과하여 수분 및 유분을 걸러주고, 압축기의 압력변화에 완충역할을 하는 3 m<sup>3</sup>의 공기 저장 용기를 지난다. 이 후 직렬로 연결된 2개의 압력 조정기를 거쳐 밸브 소음을 최소화하기 위해 소음기를 지나 노즐의 안정실로 들어가게 된다. 공기는 이 안정실에서 출구 직경 10 mm, 립 두께 7 mm인 원형 음속 노즐을 통해 대기로 수직으로 방출된다. 안정실 대 노즐의 수축비는 100 : 1이다. 소음반사를 막기 위해 노즐의 출구면을 제외한 면은 흡음재로 덮였다.

노즐은 크기가 2.5 x 1.7 x 2.4 m<sup>3</sup> (가로 x 세로 x 높이)인 무향실 가운데 설치 되어 있고, 무향실의 저음 차단 주파수는 250 Hz 이다. 실험중 노즐 안정실의 압력 변화는 2 개의 압력 조정기에 의해 최대 ±0.7%이내로 조절되었다.

마이크로제트를 만들기 위해 내경 및 외경이 각각 1 및 1.5 mm인 두개의 파이프를 주노즐 출구면에 Fig. 2와 같이 마주보게 설치하였다. 소형 파이프 끝은 주노즐 출구면에 정렬하고 주노즐 축에 대해 45°가 되게 하였다. 마이크로 제트의 질

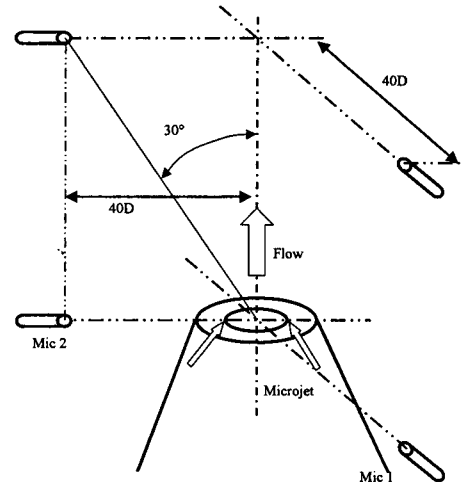


Fig. 2 A schematic of microphone set-up

량유량은 유량계과 압력계를 마이크로제트 상류에 설치하여 측정하였다. 주제트의 질량유량에 대한 마이크로제트의 질량유량비를 이후부터 분사율 (Mass fraction)이라 부르도록 하겠다. 마이크로 제트의 분사율을 1-9% 범위에서 변화시키면서 실험을 하였다. 주제트의 이상 또는 완전팽창 마하수 (Ideally/Fully Expanded Jet Mach Number,  $M_j$ ) 는 1.14, 1.3 및 1.5 이다. 각각의 마하수에 해당하는 제트의 진동모드는 축대칭, 플래핑, 및 헬리컬 모드이다.

### 2.2 계측 및 유동 가시화 장비

제트의 원장소음은 1/4" 지향성 마이크로폰 (Larson & Davies Model 2520) 두개를 사용하여 측정하였다. 각 실험후 마이크로폰은 교정기를 사용하여 검정되었다. 원장소음은 주제트축과의 각이 30° 및 90°가 되고 주제트축에서 주노즐 지경의 40배 떨어진 위치에서 측정되었다 (Fig. 2). 하나의 마이크로폰 (Mic 1)은 Fig. 2와 같이 두 마이크로제트 출구를 이은 선에 직각인 면위에 설치되었고 나머지 하나 (Mic 2)는 이 선과 주제트 축이 만드는데 설치 되었다.

제트의 발달은 슐리렌 장비를 이용하여 측정되었다. 이 장치는 Cooke 사의 Model PalFlash 501 알콘 광원과, 초점거리 2 m 인 두 개의 포물면형 오목거울, 나이프 에지 및 KODAK 사의 Model ES-1.0 8 bit 디지털 사진기로 구성되어있다. 나이프 에지는 유동과 수직방향으로 설치하여 주유동 방향으로 명암변화가 민감하게 하였다. 제트유동내의 전압 (total pressure) 변화는 직경 1.5 mm 인 피토튜브를 2 차원 이송장치에 장착하여 측정하였다.

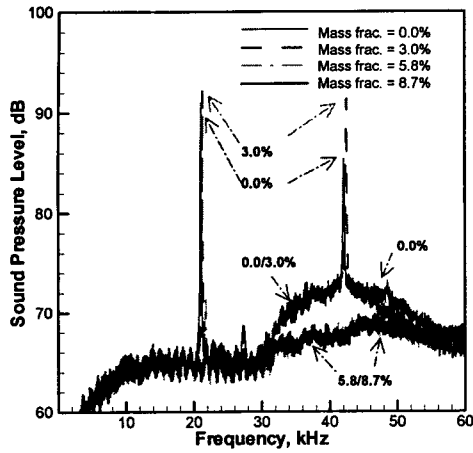


Fig. 3 Far-field Spectra measured at 90° measuring location by Mic 1 at  $M_j = 1.14$

### 3. 실험결과

#### 3.1 90° 측정위치에서의 원장소음

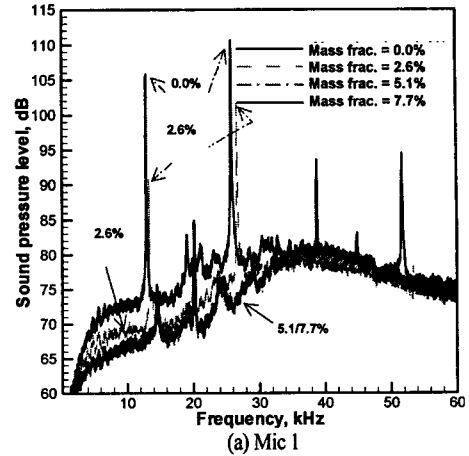
주제트축과의 각이 90°인 Mic 1 으로 측정된 스펙트럼을 제트 마하수 1.14, 1.3 및 1.5 에 대해 Figs. 3-5 에 각각 나타냈다. 여기서 제트 마하수는 정체실의 압력 ( $p_s$ )과 대기압 ( $p_a$ )과의 비를 기준으로 하는 것으로 다음식과 같이

$$M_j = \left[ \frac{2}{\gamma - 1} \left\{ \left( \frac{p_s}{p_a} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right\} \right]^{1/2} \quad (1)$$

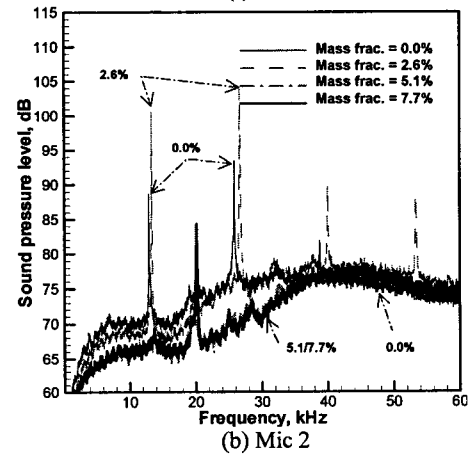
정의되며  $\gamma$ 는 기체 즉 공기의 비열비를 나타낸다. 채널당 샘플링 속도는 125 kHz 이고 원도우크기는 8192 개 이므로 주파수 분해능은 15.3 Hz 이다. 그러나 그림에는 단위 주파수당 크기로 변환된 값을 나타냈다. 노즐출구 상류의 플랜지와 같은 구조물의 영향을 평가한 결과 언급한 대로 흡음재로 덮었을 때 그 효과는 무시가능했다.

#### 3.1.1 마하수 별 원장소음 스펙트럼

제트 마하수 1.14 인 경우 마이크로 제트의 분사율이 3%로 적은 경우 스크리치가 약간 증가하였다 (Fig. 3). 이는 마이크로 제트가 강하지 못해 주제트의 충격파구조를 변형하지 못하고 마이크로 제트와 주제트간의 소음발생관련 상호작용이 증가했기 때문으로 보인다. 분사율이 이것의 두배인 5.8%로 증가했을 때는 스크리치가 억제되었고 33kHz-53kHz 구간의 광역주파수 충격파 관련 소음 (broadband shock associated noise) 도 크게 감소



(a) Mic 1



(b) Mic 2

Fig. 4 Far-field Spectra measured at 90° measuring location by (a) Mic 1 and (b) Mic 2 at  $M_j = 1.3$

하여 최대 감소량은 5.5 dB 정도였다. 분사율이 이 값 이상으로 증가해도 추가적인 효과는 없었다. Mic 2 로 스펙트럼을 측정했을 때 (나타내지 않았음), 40 kHz 이상에서의 마이크로 제트와 주제트간의 상호작용에 의한 소음 증가로 인해 이 주파수 이상에서의 광역소음 감소량은 줄어들었다. 그러나 스크리치 제어효과는 분사율 5.8% 이상에선 Mic 1 으로 측정된 것과 비슷하였다.

제트 마하수 1.3 인 경우 Mic 1 및 2 로 측정된 원장소음 스펙트럼이 Fig. 4 에 나타나 있다. 이 경우 스크리치 크기가 분사율이 증가함에 따라 감소 하지만 분사율이 5.1% 이상에선 추가적인 효과는 없었다. Mic 1 으로 측정된 스펙트럼에서 주파수 8 kHz - 32 kHz 범위의 광역소음은 마이크로 제트에 의해 4 - 5 dB 정도 감소하였다. 그러나 40 kHz 이상의 고주파수 영역에서의 마이크로 제트에 의한 광역주파수 소음저감 효과는 없었다. 이는 마하수 1.14 인 경우와 같이 마이크로 제트와 주제트간의 상호작용에 의한 것으로 보인다. Mic 2 로

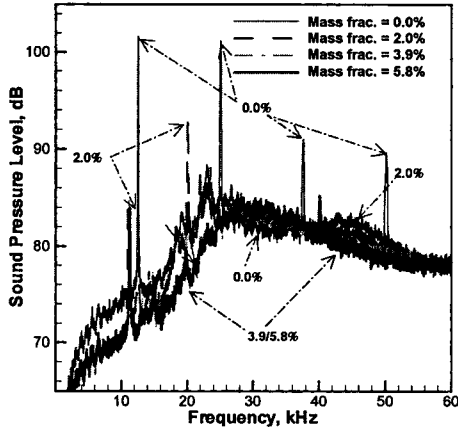


Fig. 5 Far-field spectra measured at 90° measuring location by Mic 1 at  $M_j=1.5$

측정한 스펙트럼은 Mic 1 으로 측정한 것과 비슷했으나 전체소음의 크기는 Mic 1 으로 측정된 값이 9 dB 정도 높게 나왔다. 이는 다시 언급하겠지만 주제트의 진동모드가 플레핑이고 이 플레핑면 위에 Mic 1 이 놓여 있고 Mic 2 는 이면에 수직한 면에 놓여있기 때문이다. 그리고 Fig. 4 에서 마이크로 제트에 의해 스크리치가 거의 억제된 경우에도 주파수 10 kHz 에서 50 kHz 범위에서 Mic 2 로 측정된 소음이 약간 낮게 측정된 것은 Mic 2 가 이 영역에서 Mic 1 보다 응답성이 낮기 때문이다.

마하수 1.5 인 경우도 Fig. 5 에 나타난 것처럼 1.3 인 경우와 같은 경향을 보였다. 즉 스크리치가 분사율이 증가함에 따라 감소하다가 어느 값(3.9%) 이상에선 변화가 없었다. 충격파 관련 광역 주파수 소음 최대값이 분사율이 2.0% 이하일 때는 23 및 44 kHz 에서 발견된다. 분사율 3.9% 이상에서 마이크로 제트에 의한 광역주파수 최대소음은 약 3 dB 정도 감소하였다. Mic 2 로 측정하는 스펙트럼은 나타내지 않았지만 다른 마하수에서와 같이 40 kHz 이상의 고주파 영역에서의 소음저감 효과는 미미했다.

### 3.1.2 전체소음크기

분사율의 증가에 따른 전체소음크기 또는 전소음압 (overall sound pressure level)의 변화를 Fig. 6 에 나타냈다. 주제트의 진동모드가 축대칭인 마하수 1.14 인 경우에 있어서, 분사율이 3% 이하일 때 전체소음크기가 약간 증가하였다. 이는 이전에 언급했듯이 낮은 분사율에선 마이크로 제트가 주제트의 충격파를 효과적으로 변형시키지 못하고 오히려 충격파와의 소음을 증가시키는 상호작용을 하기 때문으로 보인다. 다른 마하수에서도 낮은 분사율에선 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다.

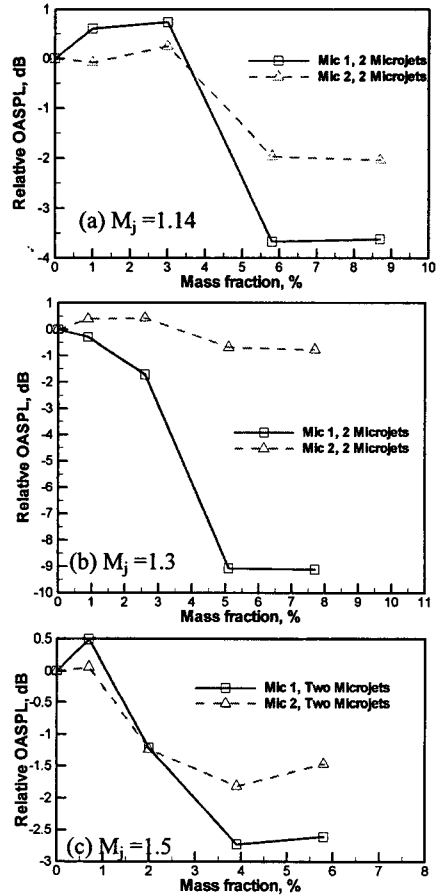


Fig. 6 Variation of overall sound pressure levels, measured at 90° location, with mass fraction at  $M_j=1.14$ ,  $M_j=1.3$ , and 1.5

분사율 5.9% 이상에서는 전체소음크기가 Mic 1 및 2 로 측정된 값이 각각 3.6 및 2 dB 정도 감소하였다. 스펙트럼에서도 알 수 있었듯이 이 분사율 이상에선 분사율 증가에 의한 추가적인 소음감소는 없었다.

마하수 1.3 인 경우 전체소음감소는 Mic 1 및 2 로 측정된 값이 Fig. 6(b) 에 나타나 있다. 분사율 5%이상에서 Mic 1 및 2 로 측정된 전체소음크기의 감소는 각각 9 및 0.5 dB 이었다. Mic 1 으로 측정된 소음감소가 현격히 큰 것은 앞서서도 설명한 대로 이 마하수에선 제어를 하지 않으면 주제트가 플레핑 운동을 하고 그 플레핑 방향이 Mic 1 방향으로 고정되어 있기 때문이다. 그리고 마이크로 제트가 주제트의 충격파를 심하게 변형하게 되면 플레핑 운동이 억제되어 플레핑에 의한 소음이 상대적으로 크게 측정된 (제어를 하지 않은 경우) Mic 1 방향으로의 소음감소가 더 크게 나타나게 된다. 마하수 1.14 인 경우와 마찬가지로 낮은 분

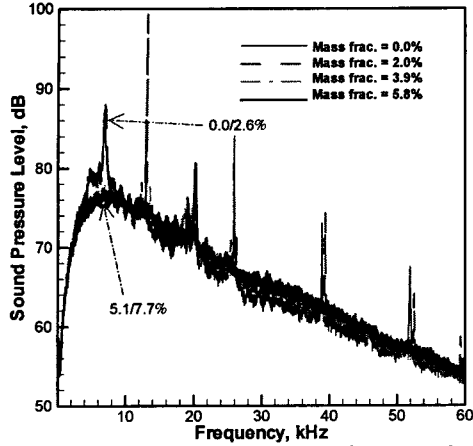


Fig. 7 Far-field spectra at  $M_j = 1.3$  for two microjet case. The spectra were measured at  $30^\circ$  location by Mic 1

사출에선 전체소음크기가 약간 증가하였다.

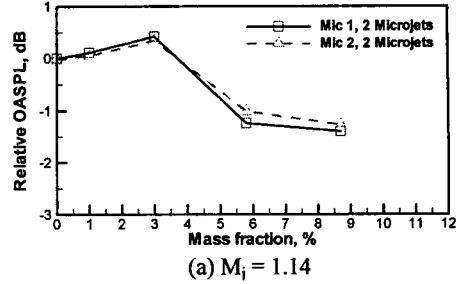
주제트의 진동모드가 헬리컬인 마하수 1.5 인 경우 Mic 1 및 2 로 측정된 전체소음감소는 최대 값은 분사율 4%에서 각각 2.6 및 1.7 dB 이었다. 이 마하수에서도 다른 마하수에서와 마찬가지로 어느 분사율이상에서는 분사의 효과가 포화가 된다.

시험한 모든 마하수에서 낮은 분사율에선 전체소음의 크기가 약간 증가하였으며, 분사율이 어느 값 이상으로 증가해도 추가적인 소음감소는 없었다. 따라서 각 마하수에서 적정 분사율은 마이크로 제트의 효과가 포화되는 점에서 정하는 것이 좋다. 그 효과가 포화가 되는 분사율은 마하수에 따라 4-6% 정도임을 Fig. 6 에서 알 수 있다.

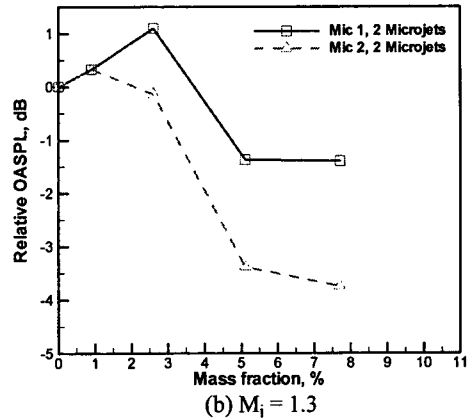
3.2 30° 측정위치에서의 원장소음

만약 스크리치가 억제되면 이 측정방향으로는 주제트와 주변공기간의 혼합에 의한 소음이 주요한 소음원이 된다. 따라서 이 절에서는 마이크로 제트의 혼합 소음에 대한 영향을 주로 살펴 본다. 이 측정방향에서도 Mic 2 로 측정된 소음/스펙트럼이 Mic 1 으로 측정된 것과 25kHz 이상의 고주파영역에선 차이를 보이나, 전체소음에 기여는 미미하여 Mic 1 으로 측정된 것만 다를 것이다.

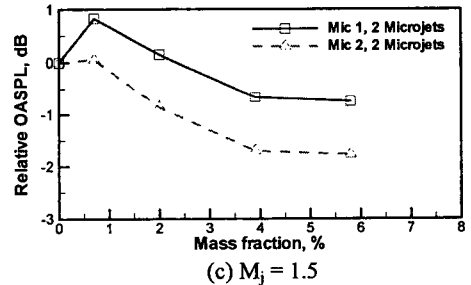
주제트 축과 30°를 이루는 Mic 1 으로 마하수 1.3 에서 측정된 원장소음 스펙트럼이 Fig. 7 에 나타나 있다. 90°방향에서 측정된 것과 마찬가지로 분사율 5.1% 이상에서 스크리치가 억제된다. 일반적으로 알려져 있듯이 스크리치가 발생할 때는 이 스크리치가 모든 측정방향에서 주요한 소음이 되는 것을 알 수 있다. 스크리치를 무시하면 이 방향에선 90° 방향에서 측정된 스펙트럼과는 달리 충격파 관련 광역주파수 소음은 나타나지 않고 6



(a)  $M_j = 1.14$



(b)  $M_j = 1.3$



(c)  $M_j = 1.5$

Fig. 8 Overall sound pressure levels with the injection rate of the microjets

kHz 의 저주파수 소음이 주요한 소음이 된다. 이는 전술한 바와 같이 충격파 관련 광역주파수 소음은 90°방향이 주 전파방향이고 저주파수의 혼합소음 (mixing noise)는 30°방향이 주전파 방향이기 때문이다. 분사율 5%이상에선 혼합소음의 최대 값이 10 dB 정도 감소하였으나 분사량의 효과가 포화가 되어 분사량이 1.5 배인 7.7%로 증가 하여도 더 이상의 혼합소음 감소는 없었다. 상대적으로 높은 주파수 영역인 20 kHz 이상에서 광역주파수 소음이 약간 증가하였다. 이는 마이크로 제트에 의해 작은 유동구조 (small-scale structure)의 활동이 활발해 졌기 때문으로 보인다.

다른 마하수 1.14 및 1.5 에서도 분사율에 따른 스펙트럼의 변화는 1.3 인 경우와 비슷한 경향을 보여 나타내지 않았다. 이 마하수에서 분사율이

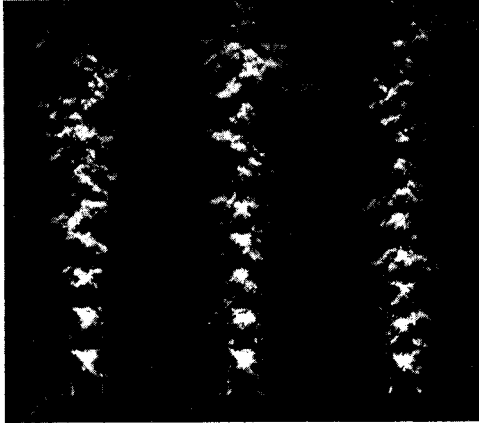


Fig. 9 Instantaneous Schlieren images for mass fractions of 0, 2.0, and 4.0% from left to right at  $M_j=1.5$

전체소음에 미치는 영향은 다음 절에서 다룬다.

### 3.2.2 전체소음크기

마이크로 제트의 전반적인 혼합소음에의 영향을 알아보기 위해 전체소음크기 (overall sound pressure level)을 Fig. 8 에 나타내었다. 모든 마하수에서 낮은 분사율에선 스크리치가 주요한 소음이기 때문에 90°방향에서 측정된 전체소음크기에서와 같이 마이크로 제트에 의해 소음이 약간 증가하였다.

마하수 1.14 에서 Mic 1 및 2 로 측정된 전체소음크기는 분사율 5.6% 이상에서 1 dB 정도 감소하였다. 플래핑 모드의 마하수 1.3에선 Mic 1 및 2 로 측정된 전체소음 감소는 분사율 5.1% 이상에서 각각 1.2 및 3.4 dB 로 Mic 2 로 측정된 소음감소가 더 컸다. 헬리컬 운동을 하는 마하수 1.5 에서도 분사율 3.9% 이상에서 Mic 2 로 측정된 소음감소가 1.6 dB 로 Mic 1 으로 측정된 0.5 dB 보다 컸다. 마하수 1.3 및 1.5 에서 Mic 2 방향으로 소음저감이 큰 것은 마이크로 제트에 의한 큰 유동구조 (large-scale structure) 의 성장이 마이크로 제트가 있는 방향 (Mic 2 가 설치된 방향) 에서 더 크게 억제되었기 때문으로 보인다. 90° 방향에서 측정된 것과 마찬가지로 분사율의 효과는 모든 마하수에서 어느 값 이상에서 포화가 되어 이 분사율 이상에서는 전체소음 감소는 미미했다.

### 3.3 유동장

슐리엔 이미지를 통하여 마이크로 제트에 의한 분사가 주유동장에 미치는 영향을 조사하였다. 스크리엔 광원에서 나온 빛이 두 마이크로 노즐이 정렬된 방향의 직각으로 주제트를 통과할 때 (즉

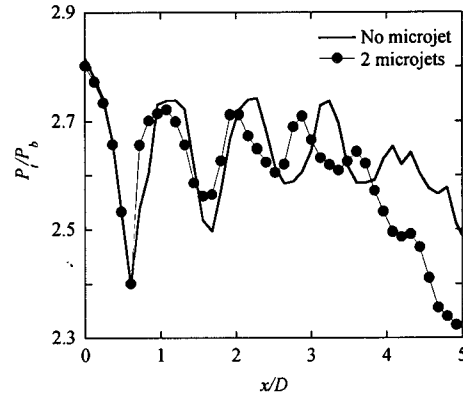


Fig. 10 Distribution of Pitot pressures on the centerline at  $M_j=1.3$

Mic 1 위치에서 주제트 방향)의 스크리엔 이미지를 Fig. 9에 나타내었다. 여기에서 마이크로 제트의 분사는 Fig. 2에 나타냈듯이 주노즐의 좌우에서 45°로 이루고 주제트의 마하수는 1.5이다. 유동은 아래에서 위로 향하고, 상대적으로 어두운 부분은 밀도가 감소하는 부분이고 밝은 부분은 증가하는 부분이다. 제트하류 방향으로 팽창 및 압축과 순차적으로 진행하면서 반복적인 충격파의 구조가 분사가 없는 왼쪽 그림에 잘 관찰된다. 가운데 이미지는 분사율이 2% 인 경우인데, 두번째 충격파 구조부터 변형이 심해짐을 알 수 있다. 분사율이 이 값의 두배인 4.0%로 증가했을 때의 이미지가 오른쪽에 나타나 있다. 이 분사율에선 충격파구조가 더욱 심하게 변형이 되었다.

제어가 되지 않은 즉 분사율 0%에서 주제트의 하류영역에서 (2차원으로 나타내어진) 헬리컬 모양의 유동 구조가 뚜렷이 발견되나 분사율이 증가함에 따라 이 유동구조가 사라졌다. 이 마하수에서의 원장소음 스펙트럼 (Fig. 5)에도 나타났듯이 이 분사율 4.0%에선 스크리치가 소멸되었다. 이 마하수에서의 스크리치 발생은 헬리컬 유동구조체와 충격파간의 상호작용으로 생기므로 유동장에서 일어나는 현상으로도 소음장이 어떻게 영향을 받을 지도 예측가능하다.

마이크로제트에 의한 분사로 인한 주제트의 혼합/확산은 증가하기 보다 조금 감소한 듯하다. 이 이미지 면과 직각되는 면 (Mic 2 축과 주제트 축이 만드는 면)에서의 제트 혼합/확산은 나타내지 않았지만 Fig. 9와 대동소이 했다. 다만 이 면에서는 충격파의 구조가 세 경우 다 잘 관찰된다. 이는 마이크로분사 노즐을 연결하는 선이 스크리엔 빛의 경로와 일치하기 때문이다. 그래서 빛의 경로에 직각방향으로는 압축 및 팽창과의 발달이 마이크로 제트의 분사에 의한 영향을 적게 받았기 때문이다.

마이크로 제트의 충격파에 대한 영향을 알아보고 주제트의 중심선을 따라 전압 (Pitot pressure)을 측정하여 Fig. 10에 나타내었다. 여기서 마하수는 1.3 이고 분사율은 5.1%이다. 솔리덴 이미지에도 나타났듯이 (마하수는 다름) 마이크로 제트에 의해 주기성을 띤 충격파구조간의 거리가 짧아지고 충격파의 강도도 줄어들었다.

실험을 하기 전에 마이크로 제트가 “유체 탭” 같은 역할을 하리라 예상하였다. 만약 이 유체 탭이 기계적 탭의 역할을 흉내낼 수 있다면, 유체 탭은 서로 반대로 회전하는 주유동 방향의 와동을 생성하여 제트의 혼합/확산을 증가 시키고 소음을 감소시킬 것이다. 쉘리덴장비로 큰 유동구조의 발달을 기록하긴 곤란하지만, 전반적인 제트의 혼합으로 미루어 볼 때 충분한 강도를 가진 축방향 와동은 형성되지 않은 것으로 보인다. 이를 확인하기 위해 주노즐 출구경 (D)의 15배하류에서 마하수 분포를 측정하여 Fig. 11에 나타냈다. 주제트의 마하수는 1.5이고 마이크로 제트의 분사율은 5.8%이다. 만약 마이크로 제트가 “유체 탭”의 역할을 하였다면 주유동 방향의 와동 (vortex)에 의해 등마하수 곡선이 기계적 탭을<sup>(2)</sup> 사용한 경우처럼 심하게 변형이 되었을 것이다. 그러나 Fig. 11에서는 예상된 변형은 없고 마이크로 제트가 사용되었을 때나 사용되지 않았을 때의 차이가 거의 없었다. 이로부터 마이크로 제트는 예상과 달리 “유체 탭”의 역할을 못한 것으로 보인다.

만약 항공기의 연소실 가스중 4 - 6%를 이용해서 이 연구에서와 같은 마이크로 제트를 사용할 때 대략적인 추진력 손실은 1.2 - 1.8%에 불과하다. 기계적 탭인 경우는 추진력 손실이 12% [2] 이고, 베인형의 회전식 탭에선 7%에 달한다. 따라서 소음저감에 관련한 마이크로 제트 분사에 의한 유체 탭이 기계적 탭보다 유리하다 할 수 있다.

### 3.4 소음 제어 메커니즘

초음속 제트의 주요한 소음성분은 스크리치, 충격파에 의한 광역주파수 소음 (broadband shock associated noise), Mach 파에 의한 소음 및 혼합에 의한 소음이다. 제트축의 직각방향에선 Figs. 3-5에서 나타난 것처럼 스크리치 및 광역 충격파관련 소음이 주요한 소음성분이다. 이 스펙트럼에 나타난 것처럼 분사를 했을 때 스크리치 및 광역 충격파 관련 소음이 줄어들었고, 이 두 소음 성분과 밀접한 충격파구조가 Fig. 9에 나타난 것처럼 심하게 변형 되었다. 따라서 제트 직각 방향에서의 소음저감은 분사로 인한 충격파구조가 변형되었기 때문으로 추정된다. 스크리치 및 광역 충격파관련 소음은 둘 다 제트내의 충격파구조와 큰

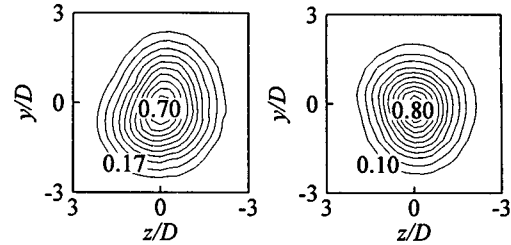


Fig. 11 Cross-sectional distributions of Mach number at  $x/D = 15$  at  $M_j = 1.5$  for not-controlled (a) and controlled case with two microjets with a mass fraction of 5.8% (b). The contours are what they look like when viewed from a downstream location

유동구조간의 상호작용에 의해 생기기 때문에 이러한 설명이 가능하다.

제트 마하수 1.5에선 헬리컬 와동에 의한 헬리컬 모드가 제트의 거동 및 소음장을 지배한다. 그래서 마이크로제트로 인해 헬리컬 와동 발달이 방해된 것도 하나의 원인이 될 수 있다.

주제트축과의 30°방향에서의 혼합 소음감소 원인은 아마도 마이크로 제트가 주제트의 큰유동 구조 (large scale structures)를 잘게 부셔 작은 유동구조 (small-scale structure)로 변하게 했기 때문으로 보인다. 이 방향에서 측정된 스펙트럼 (Fig. 7)에서 큰유동 구조에 의한 6 kHz 근처의 주요 혼합소음이 감소하고 고주파영역의 소음 증가가 이를 뒷받침한다고 볼 수 있다.

## 4. 결론

마이크로제트를 파소 팽창된 제트에 분사하여, 소음저감 및 제트의 확산/혼합에 상당히 효과적인 기계적 탭과 같은 효과를 얻으려는 실험을 제트 마하수 1.14, 1.3 및 1.5에서 수행하였다. 마이크로 제트는 정상상태로 주제트 축에 대해 45°로 분사되었다. 주제트의 질량유량에 대한 마이크로 제트의 분사율이 4% ( $M_j = 1.5$ ), 5% ( $M_j = 1.3$ ) 및 6% ( $M_j = 1.14$ )일 때 전체소음크기가 90°방향에서 크게 감소하였고 스크리치도 억제되었다. 그러나 모든 마하수에서 분사량을 이 값 이상 증가 시켜도 추가적인 소음감소는 없었다.

주제트축에 30°방향에서 측정된 원장소음도 마이크로 제트에 의해 마이크로폰의 위치와 마하수에 따라 최대 1 - 3dB 정도 감소했다. 90°방향에서 측정된 충격파 관련 소음에서와 마찬가지로 마이크로 제트의 혼합소음에의 영향도 어떤 분사율에서 포화되었다.

예상과는 다르게 마이크로 제트에 의한 주제트의 혼합은 증가하지 않았다. 이는 마이크로 제트가 유체탭과 같은 역할을 하지 못하여 충분한

세기의 주유동 방향의 와동을 생성하지 않았기 때문으로 추정된다. 마이크로 제트에 의한 소음저감 효과는 기계탭에서와 비슷했으나 제트의 확산/혼합에의 효과는 미미하였다.

추진력은 측정하지 않았으나 항공기의 연소실 가스중 4 - 6%를 이용해서 이 연구에서와 같은 마이크로제트를 설치했을 때 대략적인 추진력 손실은 1.2 - 1.8%에 불과하다. 이는 기계적 탭에 의한 추진력 손실의 1/6 ~ 1/5 정도로 아주 적은 양이다. 따라서 소음저감에 관련한 분사에 의한 유체탭이 기계적 탭보다 유리하다 할 수 있다.

### 참고문헌

- (1) Ahuja, K.K. and Brown, W.H., 1989, "Shear Flow Control by Mechanical Tabs," *AIAA Paper* 89-0994.
- (2) Samimy, M., Zaman, K.B.M.Q., and Reeder, M.F., 1993, "Effect of Tabs on the Flow and Noise Field of an Axisymmetric Jet," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 609 ~ 619.
- (3) Raman, G., 1996, "Screech Tones from Rectangular Jets with Spanwise Oblique Shock-Cell Structure," *AIAA Paper* 96-0643.
- (4) Samimy, M., Kim, J.-H., Clancy, P.S., and Martens, S., 1998, "Passive Control of Supersonic Jets via Nozzle Trailing Edge Modifications," *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 7, pp. 1230 ~ 1239.
- (5) Kim, J.-H., and Samimy, M., 1999, "Mixing Enhancement via Nozzle Trailing Edge Modifications in a High Speed Rectangular Jet," *Physics of Fluids*, Vol. 11, No. 9, pp. 2731 ~ 2742.
- (6) Kerechanin II, C. W., Samimy, M., and Kim, J.-H., 2001, "Effects of Nozzle Trailing Edges on Acoustic Field of Supersonic Rectangular Jet," *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 6, pp. 1065 ~ 1070.
- (7) Davis, M.R., 1982, "Variable Control of Jet Decay," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 5, pp. 606 ~ 609.
- (8) Raman, G., 1997, "Using Controlled Unsteady Fluid Mass Addition to Enhance Jet Mixing," *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 4, pp. 647 ~ 656.
- (9) Ibrahim, M.K., Kunimura, R., and Nakamura, Y., 2002, "Mixing Enhancement of Compressible Jets by Using Unsteady Microjets as Actuators," *AIAA Journal* Vol. 40, No. 4, pp. 681 ~ 688.