

## 소형제트를 이용한 과소팽창 음속 제트에서의 소음저감

김진화\*\*·김정훈\*·유정열\*\*\*

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

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

**Keywords :** Noise Reduction(소음저감), Jet Screech(제트 스크리치), Microjet(소형제트)

#### 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 10mm. Two micro-nozzles with an inside diameter of 1mm each are installed on the exit plane with an off-axis angle of 45°. Far-field noise was measured at a location 40 diameters off the jet axis. The angles between a microphone and the jet axis are 45° and 90°. For an injection rate less than 1% 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 45° directions, respectively. 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 broken large scale vortical structures by the microjets.

#### 1. 서론

제트에서의 소음을 줄이려는 연구는 반세기동안 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 시키면서 동시에 소음을 저감시키는 연구가 Ahuja & Brown [1] 및 Zaman et al. [2]에 의해 행해졌다. 여기서 탭은 주유동 방향의 와동을 생기게 하여 제트의 확산/혼합을 증가시키고 소음도 줄이는 역할을 하였다. Raman [3]은 노즐 출구형상이 과소팽창된 사각제트 소음장을 크게 변화시킴을 보였다. 노즐 출구 형상을 변경하여 탭사용 시 문제된 추진력의 손실 없이 제트의 혼합을 증대시키고 및 소음을 저감하려는 연구가 Samimy et al. [3], Kim & Samimy [4] 및 Kerechanin et al. [5]등에 의해 행해졌다. 여기서 노즐 출구 형상변경은 노즐출구를 단순히 절단하여 낸 형태여서 유동으로의 돌출물이 없게 되어 추진력의 손실없이 소음이 줄어들었다.

노즐 출구에서 분사 또는 흡입을 이용한 능동적 방법도 다양하게 연구 되었다. Davis [7]는 정상 (steady) 소형제트를 축에 직각방향으로 분사하여 제트의 확산을 촉진하는 연구를 하였다. 소형 플루이드(fluidic)를 이용한 유동 및 소음제어가 Raman [8]에 의해 행해졌다. 과소팽창된 음속노즐에서

Ibrahim et al. [9]은 정상 및 비정상 소형제트를 제트축에 직각으로 분사했을 때 혼합/확산이 증가하고 정상 분사인 경우 소음도 감소함을 보였다.

이 연구의 목적은 소형 제트를 주제트 축에 일정한 각을 두고 분사하여 추진력의 손실을 최소화하면서 제트의 소음을 줄이는 것이다. 주제트로 정상적으로 분사된 소형 제트가 “유체탭” 처럼 역할을 하여 소음이 저감될 것이라 예상을 하여 이 연구를 하게 되었다.

#### 2. 실험 장치

##### 2.1 제트 유동 발생 장치

본 실험에서는 노즐에 공기를 연속적으로 공급하도록 설계 되어졌다. Fig. 1에서와 같이, 스크류타입 압축기에서 발생된

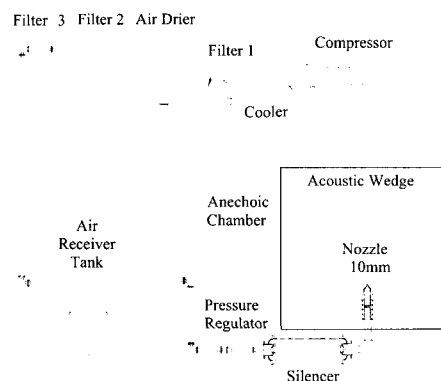


Fig. 1 A schematic of experimental facilities.

\* 서울대학교 기계항공공학부, jeffkim3@snu.ac.kr

\*\* 서울대학교 대학원, windjh@snu.ac.kr

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부, jyyoo@plaza.snu.ac.kr

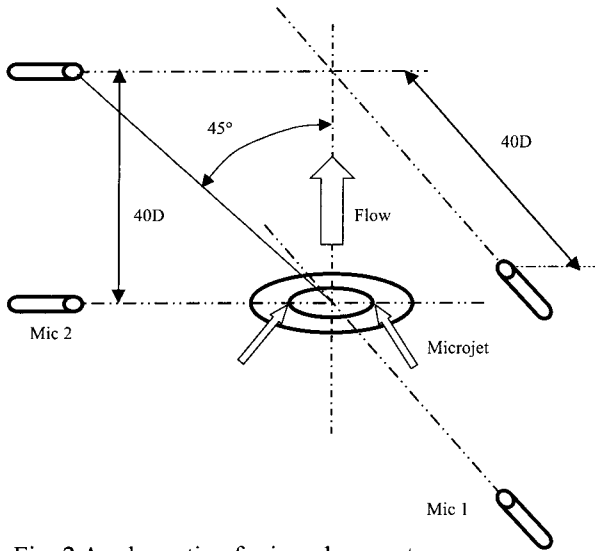


Fig. 2 A schematic of microphone set-up.

압축공기는 냉각팬과 필터를 지난 후에 이슬점이 약  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인 공기 건조기를 통과한다. 다시 두 개의 미세 필터를 통과하여 수분 및 유분을 걸러주고, 압축기의 압력변화에 완충역할을 하는  $3\text{ m}^3$ 의 공기 저장 용기를 지난다. 이후 직렬로 연결된 2개의 압력 레귤레이터를 지나고 밸브 소음을 최소화하기 위해 소음기를 지나 노즐의 안정실로 들어가게 된다. 공기는 이 안정실에서 출구 직경 10mm 릿 두께 7 mm인 원형 음속 노즐을 통해 대기로 수직으로 방출된다. 안정실 대 노즐의 수축비는 100:1이다.

노즐은 크기가  $2.5 \times 1.7 \times 2.4\text{ m}^3$  (가로 x 세로 x 높이)인 무향실 가운데 설치 되어 있고, 무향실의 저음 차단 주파수는 250 Hz이다. 실험중 노즐 안정실의 압력 변화는 2개의 압력 레귤레이터에 의해 최대  $\pm 0.7\%$  이내로 조절되었다. 완전팽창 제트 마하수 (Fully Expanded Jet Mach Number,  $M_f$ , 주노즐 출구압이 대기압으로 팽창될 때를 기준한 값) 1.5 에서 소형제트를 이용한 주제트로의 분사가 제트 및 소음에의 영향을 연구하였다.

소형제트를 만들기 위해 내경 및 외경이 각각 1 및 1.5mm 인 두개의 파이프를 주노즐 출구면에 Fig. 2와 같이 마주보게

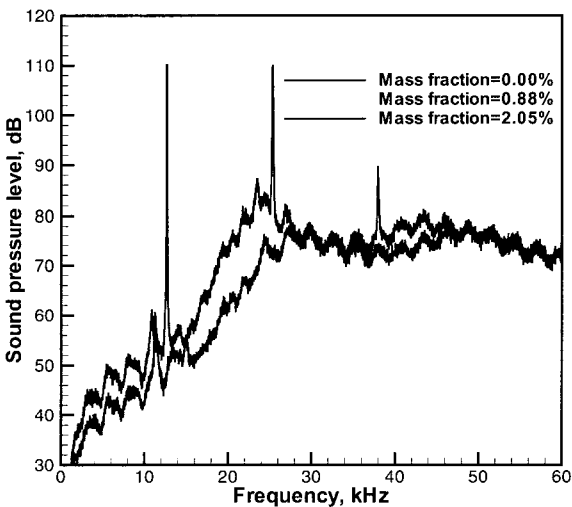


Fig. 3 Spectra of far-field sound pressure levels at a microphone angle of  $90^{\circ}$  relative to the main jet axis. The fully expanded jet Mach number is 1.5.

설치하였다. 소형 파이프 끝은 주노즐 출구면에 정렬하고 주노즐 축에 대해  $45^{\circ}$ 가 되게 하였다. 소형 제트의 질량유량은 유량계과 압력계를 소형제트 상류에 설치하여 측정하였다. 주제트의 질량유량에 대해 소형제트의 분사량은 0.23, 0.88, 및 2.1% 에 대해 실험을 하였다.

## 2.2 측정 및 유동 가시화 장비

제트 소음은 1/4" 무지향성 및 지향성 마이크로폰 (Larson & Davies 2530)을 각각 1개씩 사용하여 원장소음을 측정하였다. 각 실험후 마이크로폰은 교정기를 사용하여 검증되었다. 주제트측과의 각이  $45^{\circ}$  및  $90^{\circ}$ 이면서 주제트축에서 주노즐 지경의 40배 떨어진 위치에서 원장소음이 측정되었다 (Fig. 2). 하나의 마이크로폰 (Mic 1)은 Fig. 2와 같이 두 소형제트 출구를 이은 선에 직각인 면위에 설치되었고 나머지 하나 (Mic 2)는 이 선과 주제트 축이 만드는 면에 설치 되었다.

제트의 발달은 쉘리렌 장비를 이용하여 측정되었다. 이 장치는 Cooke사의 Model PalFlash 501알곤 광원과, 초점거리 2 m 인 두 개의 포물면형 오목거울, 나이프 에지 및 KODAK사의 Model ES-1.0 8 bit 디지털 사진기로 구성되어있다. 나이프 에지는 유동과 수직방향으로 설치하여 주유동 방향으로 명암변화가 민감하게 하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 원장소음

제트 마하수 1.5에서 Mic 1를 이용해서 측정한 원장소음 스펙트럼이 Fig. 3에 나타나 있다. 이 스펙트럼은 두 소형제트 출구를 이은 선에 수직한 면에서 측정한 것이며 주제트 출구면 즉 주제트축과  $90^{\circ}$ 를 이루는 곳에서 측정한 것이다. 이방향은 스크리치의 2차 조화파와 broadband shock associated noise의 주전파 방향이 되므로 중심 주파수 23 kHz의 broadband shock associated noise와 24kHz 스크리치의 2차 조화파가 소형제트 분사가 없는 경우 상대적으로 크게 측정이 되었다. 소형 제트의 분사량이 주제트의 질량유량의 0.88 및 2.0% 인 경우 모두 스크리치가 없어 졌으며 그림에는 나타나 있지 않지만 유량비가 0.23%인 경우는 스크리치의 강도가 조금 줄고 12 kHz 이하의 상대적으로 낮은 주파수 소음이 최대 4 dB 줄어 들었다. 소음저감 효과는 분사량이 증가할수록 커졌으나 대략 분사율이 3% 이상인 경우는 고주파 소음이 증가하여 저감효과가 사라진다. 분사율 2.0%인 경우 42 kHz 부근의 broadband shock associated noise크기가 최대 5 dB 줄었고, 26kHz 보다 낮은 주파수 소음성분의 크기는 스크리치를 제외하면 6-10 dB 감소 하였다.

주제트축과  $45^{\circ}$ 를 이루면서 이 축에서 40D (여기서 D는 주노즐 출구경) 떨어진 곳에서 Mic 1 으로 측정한 원장소음 스펙트럼이 Fig. 4에 나타나 있다. 이 방향에서 원장 소음을 측정한 것은 소형제트의 분사가 확산/혼합에 의한 소음에 미치는 영향을 보기 위한 것이다. 유동의 큰 구조체의 의한 확산/혼합에 의한 소음은 그 주전파방향이 제트축에 대해  $30^{\circ}$ 를 이루지만 여기서는  $45^{\circ}$  에서 측정하였다. Fig. 4의 스펙트럼을 Fig. 3의 그것과 비교해보면,  $45^{\circ}$  위치에서 측정한 소음은 20kHz 이하의 상대적으로 낮은 주파수 성분이 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이는 유동의 큰 구조체의 의한 확산/혼합에 의한 소음은 그 주전파방향이 제트축에 대해  $30^{\circ}$ 를 이루고

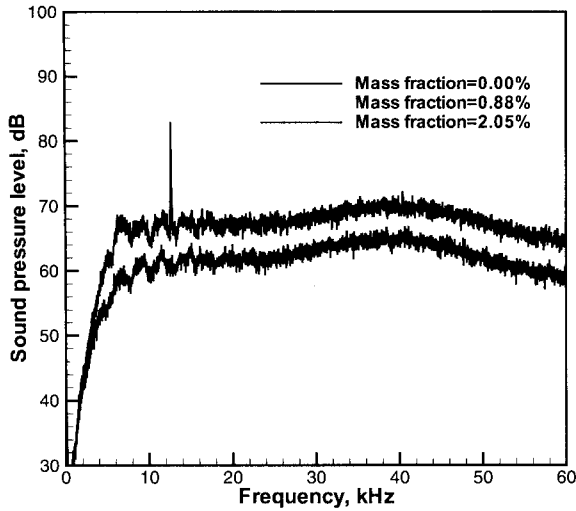


Fig. 4 Spectra of far-field sound pressure levels at a microphone angle of 45° relative to the main jet axis. The fully expanded jet Mach number is 1.5.

큰 구조체의 의한 소음이라서 상대적으로 낮은 주파수를 가지기 때문이다.

소형제트의 분사율이 0.88 및 2.05% 인 경우 38kHz 까지는 소음저감 효과가 비슷하나 이 주파수보다 큰 소음성분은 분사율이 증가함에 따라 감소한다. 그러나 38kHz 이상의 소음성분은 분사율이 2.0%이상 증가해도 추가적인 소음감소는 없었다. 분사율 2.0%에서는 전주파수에서 소음이 4-6dB 정도 고르게 감소하였다. 이 분사율이 2.0% 인 경우가 주어진 분사각과 소형제트수에서 최적의 분사율로 보인다. 왜냐하면 분사율이 이보다 증가하면 이 그림에는 나타나 있지 않지만 40kHz이하의 소음이 증가하기 때문이다.

소형제트에 의한 분사가 주제트의 전반적인 소음에의 영향을 보기위해 전소음압 (Overall Sound Pressure Level)을 계산하여 Fig. 5에 나타냈다. 소음은 Mic 1을 이용하여 두 소형제트를 연결하는 선에 수직인 면에서 주제트축과 이루는 각이 각

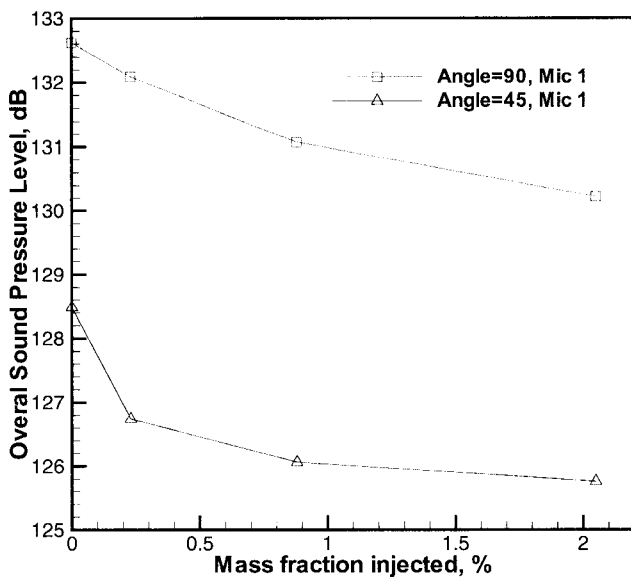


Fig. 5 Overall sound pressure levels with the injection rate of the microjets.

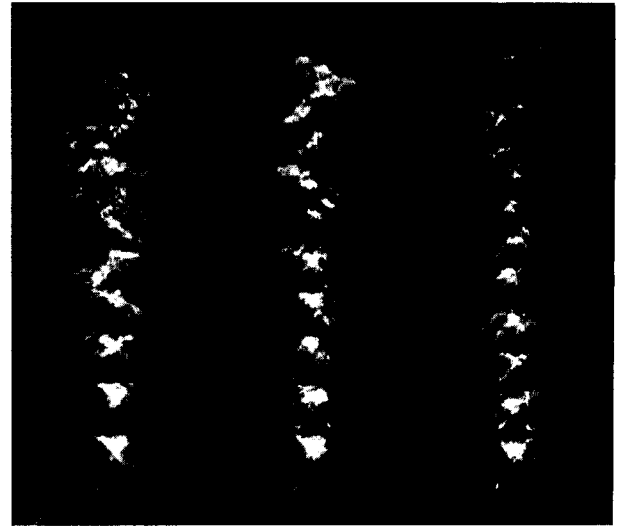


Fig. 6 Instantaneous Schlieren images for the relative injection rates of 0.0, 0.88, and 2.05% from left to right.

각 45° 및 90° 인 위치에서 측정된 것이다. 두 방향에서 전소음압은 분사량이 증가할수록 감소하였다. 제트축과 90°를 이루는 곳에서의 최대 음압감소는 2.4 dB 이고 45°위치에선 2.7 dB 이다.

### 3.2 제트 유동장

쉴리렌 이미지를 통하여 소형제트에 의한 분사가 주유동장에 미치는 영향을 조사하였다. 쉴리렌 광원에서 나온 빛이 두 소형노즐이 정렬된 방향의 직각으로 주제트를 통과할 때의 쉴리렌 이미지를 Fig. 6에 나타내었다. 여기에서 소형제트의 분사는 주노즐의 좌우에서 45°로 이루어진다. 유동은 아래에서 위로 향하고, 상대적으로 어두운 부분은 밀도가 감소하는 부분이고 밝은 부분은 증가하는 부분이다. 제트하류 방향으로 팽창 및 압축파가 순차적으로 진행하면서 반복적인 충격파의 구조가 분사가 없는 왼쪽 그림에 잘 관찰된다. 가운데 이미지는 분사율이 0.88% 인 경우인데, 두번째 충격파 구조부터 변형이 심해짐을 알 수 있다. 분사율이 2.0%로 증가 했을 때는 오른쪽 이미지에 나타난 것처럼 충격파구조가 더욱 심하게 변형이 되었다.

소형제트에 의한 분사로 인한 주제트의 혼합/확산은 증가하기 보다 조금 감소한 듯하다. 이 이미지 면과 직각되는 면에서의 제트 혼합/확산도 Fig. 6와 대동소이 했다. 다만 이 면에서는 충격파의 구조가 세 경우 다 잘 나타났다. 이는 소형분사 노즐을 연결하는 선이 쉴리렌 빛의 경로와 일치하기 때문이다. 그래서 빛의 경로에 직각방향으로는 압축 및 팽창파의 발달이 소형제트의 분사에 의한 영향을 적게 받았기 때문이다.

실험을 하기 전에 소형제트가 “유체 탭” 제트 출구에 생기게 하여 기계적 탭과 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. 쉴리렌장비로 큰 유동 구조체의 발달을 기록하긴 곤란하지만, 전반적인 제트의 혼합으로 미루어 볼 때 충분한 강도를 가진 축방향 와동은 형성되지 않은 것으로 보인다.

만약 항공기의 연소실 가스중 2%를 이용해서 이 연구에서와 같은 소형제트를 설치했을 때 대략적인 추진력 손실은 0.6%에 불과하다. 이는 탭에 의한 추진력 손실의 1/6~1/5에 불과하다. 따라서 소음저감에 관한한 소형 제트 분사에 의한 유체탭이 기계적 탭보다 유리하다 할 수 있다.

### 3.3 소음 제어 메커니즘

초음속 제트의 주요한 소음성분은 스크리치, broadband shock associated noise, Mach wave에 의한 소음 및 혼합에 의한 소음이다. 제트축의 직각방향에선 Fig. 3 에서 나타난 것처럼 스크리치 및 broadband shock associated noise가 주요한 소음성분이다. 이 스펙트럼에 나타난 것처럼 분사를 했을 때 스크리치 및 broadband shock associated noise 가 줄어들었고, 이 두 소음 성분과 밀접한 충격파구조가 Fig. 6에 나타난 것처럼 심하게 변형 되었다. 따라서 제트 직각 방향에서의 소음저감은 분사로 인한 충격파구조가 변형되었기 때문으로 추정된다. 스크리치 및 broadband shock associated noise는 둘 다 제트내의 충격파구조와 큰 유동구조간의 상호작용에 의해 생기기 때문에 이러한 설명이 가능하다.

이 제트 마하수에선 헬리컬 와동에 의한 헬리컬 모드가 제트의 거동 및 소음장을 지배한다. 그래서 소형제트로 인해 헬리컬 와동발달이 방해된 것도 하나의 원인이 될 수 있다.

주제트축과의 45°방향에서의 소음감소에 원인에 대한 분석은 추가적인 실험 자료를 얻은 후로 미루는 것이 좋을 듯 하다.

### 4. 결론

소형제트를 과소 팽창된 제트에 분사하여, 소음저감 및 제트의 확산/혼합에 상당히 효과적인 기계적 탭과 같은 효과를 얻으려는 실험을 제트 마하수 1.5에서 하였다. 소형제트는 정상상태로 주제트 축에 대해 45°로 분사되었다. 주제트의 질량유량에 대한 분사량이 2.0% 일 때 전소음압이 90 및 45°방향에서 각각 2.4 및 2.7 dB 감소하였다. 단지 1% 미만의 상대적 분사량만으로도 스크리치를 완전히 없앨 수 있었다. 기계적 탭에서와는 다르게 소형제트에 의한 유체탭은 소음저감 효과는 기계탭에서와 비슷했으나 제트의 확산/혼합에의 효과는 미미하였다.

추진력은 측정하지 않았으나 항공기의 연소실 가스중 2%를 이용해서 이 연구에서와 같은 소형제트를 설치했을 때 대략적인 추진력 손실은 0.6%에 불과하다. 이는 탭에 의한 추진력 손실의 1/6~1/5에 불과하다. 따라서 소음저감에 관한한 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 J.*, Vol. 31, 609-619.
- [3] Raman, G., 1996, "Screech Tones from Rectangular Jets with Spanwise Oblique Shock-Cell Structure," AIAA-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 J.*, Vol. 36, No. 7, 1230-1239.
- [5] Kim, J.-H., Samimy, M., 1999, "Mixing Enhancement via Nozzle Trailing Edge Modifications in a High Speed Rectangular Jet," *Phys. Fluids*, 2731-2742.
- [6] Kerechanin II, C. W., Samimy, M., and Kim, J.-H., 2001, "Effects of Nozzle Trailing Edge Modifications in Noise Radiation a Supersonic Rectangular Jet," *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 6, 1065-70.
- [7] Davis, M.R., 1982, "Variable Control of Jet Decay," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 5, 606-609.
- [8] Raman, G., 1997, "Using Controlled Unsteady Fluid Mass Addition to Enhance Jet Mixing," *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 4, 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, 681-688.