

노즐 중심에 설치한 마이크로 제트에 의한 충격파 관련소음 저감

Shock Associated Jet Noise Reduction by a Microjet on the Centerline of the Main Jet

김진화* · 유정열**

Jin-Hwa Kim and Jung Youl Yoo

Key Words : Microjet (마이크로 제트), Shock Associated Noise (충격파 관련소음), Screech (스크리치).

ABSTRACT

By using a centerbody injection, an effort to reduce shock associated noise is made in an underexpanded sonic nozzle with an exit diameter of 10 mm. The centerbody or micro nozzle, aligned with the axis of the main jet, has an o.d. of 2 mm and i.d. of 1.5 mm. When measured at 90° relative to the main jet, the farfield noise spectra showed that the screech tones and broadband shock associated noise can be significantly reduced simply by varying the length of the centerbody and/or mass fraction of the microjet. The maximum reduction in overall sound pressure level (OASPL) was as much as 9 and 4 dB at fully expanded jet Mach numbers M_j of 1.3 and 1.5, respectively, when the length of the centerbody was varied from 0 to 4 main nozzle diameters without blowing. With the aid of the blowing, the maximum reduction in OASPL increased to 12 and 7 dB at $M_j = 1.3$ and 1.5, respectively. The impact pressure field in the main jet plume strongly suggested that the reduced periodic pressure distribution in the shear layers and/or centerline is responsible for the reduced screech and broadband shock associated noise. Therefore, the steady blowing by a micro centerbody is a promising technique for shock noise reduction in a supersonic jet.

1. 서 론

제트에서의 소음을 줄이려는 연구는 지난 반세기 동안 꾸준히 계속되고 있으며 최근에는 비행장 주변의 소음규제 강화로 인해 그에 대한 연구가 더욱 활발해지고 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(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 과소팽

창된 사각제트 소음장을 크게 변화시킴을 보였다. 노즐 출구 형상을 변경하여 탭 사용시 문제된 추진력의 손실 없이 제트의 혼합을 증대시키면서 소음을 저감하려는 연구가 Samimy et al.(4), Kim & Samimy (5) 및 Kerechanin(6) 등에 의해 수행되었다. 여기서 노즐출구 형상변경은 노즐 출구의 일부를 단순히 절단하여 낸 형태여서 유동으로의 돌출물이 없게 되어 추진력의 손실없이 소음이 줄어들었다. 실과 같은 필라멘트를 노즐의 중심축에 설치했을 때 적정 길이 및 두께에서 충격파 관련 소음이 큰 폭으로 줄어들음을 Bhat et al., (7) 및 Callender와 Gutmark (8)가 보였다.

노즐 출구에서 분사 또는 흡입을 이용한 능동적 방법도 다양하게 연구 되었다. Davis(9)는 정상 (steady) 마이크로 제트를 주제트 축에 직각방향으로 분사하여 제트의 확산을 촉진하는 연구를 하였다. 주제트에 45°가 되게 정상 마이크로 제트를 설치하여 추진력의 손실을 최소화 하면서 충격파 관련 소음 및 혼합소음을 시도한 Kim et al. (10)이 행하였다. 소형 플루이딕 (fluidic)을 이용한 유동 및 소음제어가 Raman(11)에 의해 행해졌다. 과소팽창된 음속노즐에서 Ibrahim et al.(12)은 정상 및 비정상 마이크로제트를 제트 축에 직각으로 분사했을 때 혼합/확산이 증가하고 정상 분사인 경우 소음도 감소함을 보였다.

이 연구의 목적은 마이크로 제트를 주제트 축에 나란하

* 서울대학교 기계공학과
E-mail : jeffkim302@excite.com
Tel : (02)880-1706, Fax : (02)880-1910

** 서울대학교 기계공학과

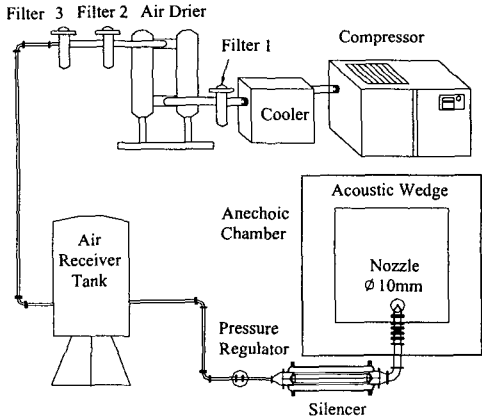


Fig. 1 Schematic of the jet facility.

계 분사하여 추진력의 손실을 최소화하면서 제트의 소음을 줄이는 것이다. 주제트로 정상적으로 분사된 마이크로 제트가 주제트에 생긴 충격파의 구조를 변형 또는 약화시키는 역할을 함으로써 소음이 저감될 것이라 예상된다. 이 방법은 Callender와 Gutmark (8)의 필라멘트를 이용한 소음저감법과 유사하지만 마이크로 노즐이 필라멘트와 달리 유동을 따라 자유롭게 움직이지 않고 이 노즐을 통해 분사가 이루어지는 점이 다르다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 제트 실험장치

본 연구에서는 노즐에 공기를 연속적으로 공급하도록 실험장치가 설계되어졌다. Fig. 1에서와 같이, 스크류타입 압축기에서 발생한 압축공기는 냉각관과 필터를 지난 후에 이슬점이 약 20°C인 공기 건조기를 통과한다. 다시 두 개의 미세 필터를 통과하여 수분 및 유분을 걸러주고, 압축기의 압력변화에 완충역할을 하는 부피 3 m³의 공기 저장 용기를 지난다. 이 후 직렬로 연결된 2개의 압력 조절기를 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. 소음 반사를 막기 위해 노즐의 출구면을 제외한 면은 흡음재로 덮였다.

노즐은 크기가 2.5 m x 1.7 m x 2.4 m (가로 x 세로 x 높이)인 무향실 가운데 설치 되어 있고, 무향실의 저음 차단 주파수는 250 Hz이다. 실험 중 노즐 안정실의 압력 변화는 2개의 압력 조절기에 의해 최대 0.5% 이내로 조절되었다.

마이크로 제트를 만들기 위해 내경 및 외경이 각각 1.5 및 2.0 mm인 하나의 스테인레스 파이프를 주노즐 중심에

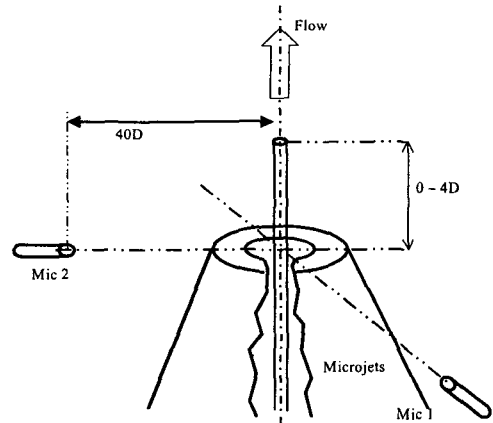


Fig. 2 Schematic of microphone and centerbody setup.

Fig. 2와 같이 나란히 설치하였다. 마이크로 노즐의 길이는 소형 파이프 끝에서 주노즐 출구면까지의 거리로 정하였다. 마이크로 제트의 질량유량은 유량계와 압력계를 마이크로 제트 상류에 설치하여 측정하였다. 주제트의 질량유량에 대한 마이크로제트의 질량유량비를 이후부터 분사율 (Mass fraction)이라 부르도록 하겠다. 마이크로 제트의 분사율은 마하수 1.3 및 1.5에서 각각 1-3.8% 및 0.8-2.9% 범위에서 변화시키면서 실험을 하였다. 주제트의 이상 또는 완전팽창 마하수 (Ideally/Fully Expanded Jet Mach Number, Mj)는 1.3 및 1.5이다. 각각의 마하수에 해당하는 제트의 진동모드는 플래핑, 및 헬릭컬 모드이다.

3. 실험결과

3.1 마이크로 노즐길이 영향

(1) M_j = 1.3

마이크로 노즐이 주노즐 중심축에 있음으로 인한 영향을 보기 위해 마이크로 제트를 끈 상태에서 마이크로 노즐의 길이를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 소음 저감 효과가 좋은 센터노즐 길이 0.5D, 1.5D 및 2.5D인, D는 주노즐 직경, 세 가지 경우에 대한 원장소음 스펙트럼을 Fig. 3에 나타냈다. 센터노즐이 없는 경우를 기준 노즐로 했을 때 센터노즐의 길이가 2.5D인 경우 소음 저감 효과가 가장 크게 나타났다. 이 경우에 있어서 스크리치 소음이 크게 감소했고 광역소음도 측정된 모든 주파수 범위에서 5 dB까지 감소하였다. 그리고 스크리치 주파수도 약간 증가하였다. 센터노즐 길이가 0.5D 및 1.5D인 다른 두 경우도 주파수가 27 kHz - 45 kHz 범위의 충격파관련 광역소음은 2.5D인 경우보다 적게 감소했

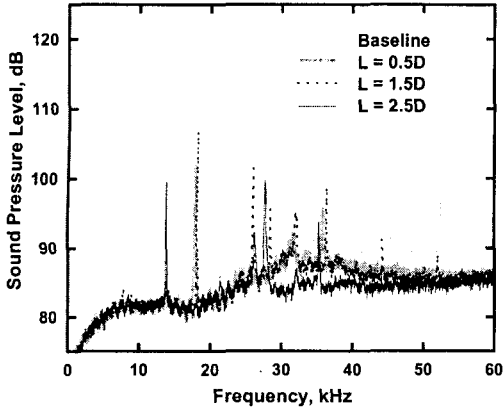


Fig. 3 Variation of far-field spectra with the length of the centerbody at $M_j = 1.3$.

지만 이 밖의 주파수에선 2.5D인 경우와 같이 광역소음이 크게 감소하였다. 이 두 경우에서 스크리치 주파수는 크게 증가하였다.

센터노즐의 전체소음 (OASPL: Overall Sound Pressure Level)에의 영향을 보기위해 OASPL을 길이에 따른 변화를 Fig. 4에 나타냈다. 여기서 기준노즐에 대한 길이는 단지 그림으로 보이기 위해 -0.5D로 나타냈다. 이 후에 나오는 그림에서도 센터노즐의 길이 (L) -0.5D는 센터노즐이 없는 기준노즐을 의미한다. 센터노즐의 길이가 주노즐 직경의 (정수+1/2)배인 0.5D, 1.5D, 및 2.5D 인 경우 OASPL 감소가 컸고, 2.5D인 경우 OASPL이 9dB 까지 감소하였다. 센터노즐의 길이가 4.0D 이상으로 더 증가할 경우는 실용적이지 않아서 이 이상의 길이에 대한 것은 수행하지 않았다. 따라서 이 이상의 길이에서 그 효과가 Callender 와 Gutmark (2000, 2001)의 필라멘트에 의한 경우처럼 수렴할 지는

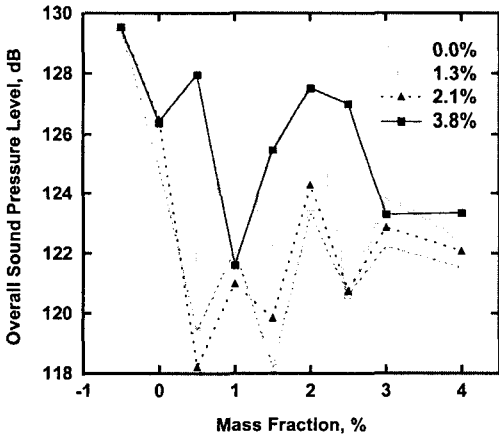


Fig. 4 Variations of overall sound pressure levels with the length of the centerbody at $M_j = 1.3$.

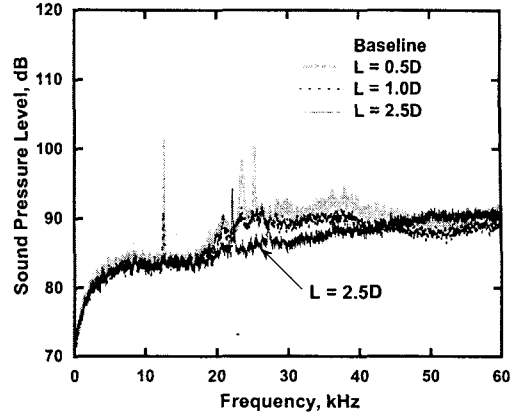


Fig. 5 Effects of the length of the centerbody on far-field spectra at $M_j = 1.5$.

미지수다.

(2) $M_j = 1.5$

이 마하수에서 소음저감 효과가 좋은 센터노즐 길이 0.5D, 1.0D 및 2.5D인 경우에 대한 원장소음이 Fig. 5에 나타나 있다. 센터노즐 길이가 1.0D 및 2.5D인 경우에 스크리치가 거의 제거되었고 기준노즐의 경우에 나타난 15 kHz - 30 kHz 범위의 충격파관련 광역주파수 소음이 큰 폭으로 감소하였다. 이 밖의 광역주파수에선 센터노즐 길이가 0.5D 및 1.5D인 경우 소음감소가 1-3 dB 정도이지만, 2.5D인 경우는 고주파수에서 주파수에 따라 소음이 증가하였다. 더 이상의 주파수에서의 소음크기 변화를 보기 위해 현재의 데이터 획득속도보다 두 배 빠르기로 소음을 측정할 계획이다.

센터노즐 길이에 따른 OASPL의 변화를 Fig. 6에 나타냈다. 마하수 1.3인 경우처럼 센터노즐 길이가 2.5D

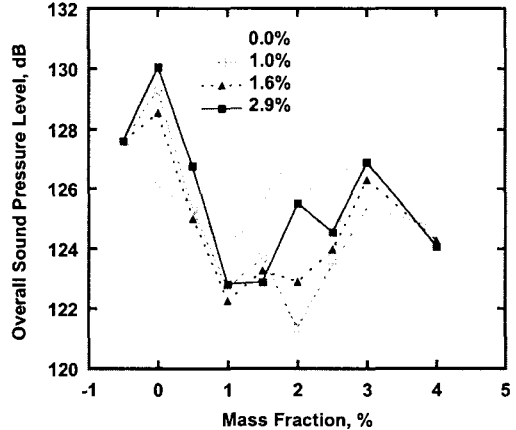


Fig. 6 Variations of overall sound pressure levels with the length of the centerbody at $M_j = 1.5$.

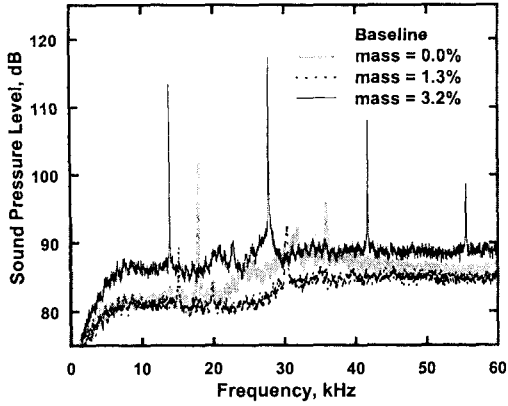


Fig. 7 Effects of the microjets on the far-field spectra for $L = 0.5D$ at $M_j = 1.3$.

인 경우 소음감소가 4 dB로 가장 컸으나 스펙트럼을 보면 소음감소가 고주파수 성분의 증가로 인해 제한적임을 알 수 있다. 센터노즐 길이가 1.0D인 경우도 2.5D인 경우와 비슷한 소음감소를 보였다. 센터노즐 길이가 2.5D 이상으로 증가했을 때 OASPL이 기준노즐의 경우보다 증가하였다.

3.2 분사율의 영향

분사율의 영향이 잘 나타난 센터노즐 길이에 대한 스펙트럼을 살펴보고자 한다. 마하수 1.3에선 센터노즐 길이가 0.5D인 경우 마이크로 제트에 의한 원장소음 스펙트럼이 Fig. 7에 나타나 있다. 낮은 분사율에선 25 kHz - 34 kHz 영역의 충격파관련 광역소음이 5 dB정도로 크게 감소하고 40 kHz 이상에서도 광역주파수소음이 2 - 3 dB 정도 감소하였다. 그러나 분사율이 증가할수록 광역소음 및 스크리치 소음이 증가하여 기준노즐의 경우와

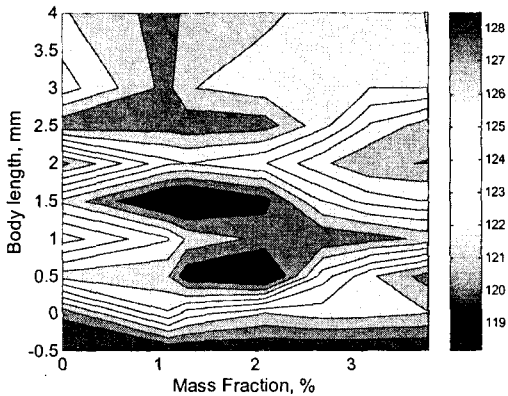


Fig. 8 Variations of overall sound pressure levels with the length of the centerbody and mass fraction at $M_j = 1.3$.

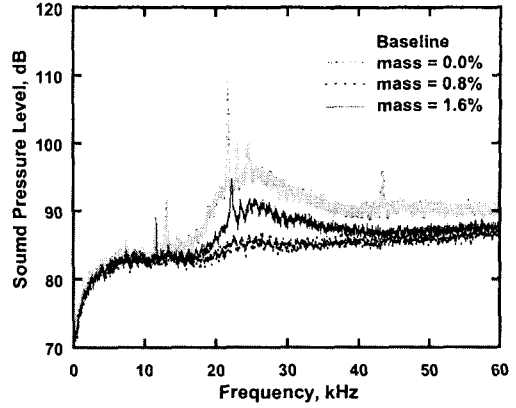


Fig. 9 Far-field spectra for $L = 2.0D$ at $M_j = 1.5$.

비슷하게 되었다. 이는 다음에 자세히 살펴보겠지만 주 제트 내의 충격파 구조가 분사율에 따라 약화되다가 다시 강화되기 때문으로 보인다.

마하수 1.3에서의 센터노즐 길이 및 분사율에 따른 OASPL을 Fig. 8에 나타내었다. 이를 Fig. 4와 같이 이용하여 길이 및 분사율의 영향을 알 수 있다. 센터노즐 길이가 0.5D 및 1.5D인 경우 각각 분사율 2% 및 1.1%에서 4 dB의 추가적 소음감소가 분사에 의해 이루어 졌다.

이는 단순히 센터노즐만으로 얻을 수 있는 것보다 3 dB 더 낮은 값이다 (Fig. 4). 마이크로 제트를 끈 경우 센터노즐 길이가 2.0D일 때 소음감소가 가장 컸으나 이 길이에서 마이크로 제트에 의한 소음감소는 없었으며 오히려 분사율에 따라 증가하였다. 이 마하수에서 센터노즐 길이 및 분사율에 의해 OASPL이 11.3 dB나 크게 감소하여 센터노즐 길이에 의해서만 얻을 수 있는 최대 OASPL 감소보다 3 dB이나 더 감소하였다.

마하수가 1.5일 경우 센터노즐 길이가 2.0D일 때 마

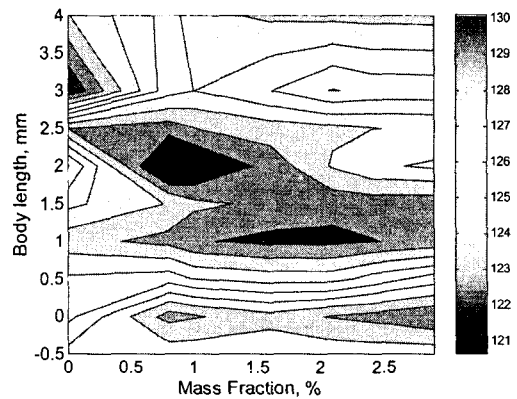


Fig. 10 Variations of overall sound pressure levels with the length of the centerbody and mass fraction at $M_j = 1.5$.

이므로 제트의 효과가 최대로 측정되었으며 이 때의 원장소음 스펙트럼을 Fig. 9에 나타냈다. 이 경우 분사율 0.8%에서 분사로 인해 스크리치가 완전히 제거되었으며 19 kHz - 33 Hz 범위의 주파수 영역에서 충격파 관련 광역 주파수 소음이 거의 사라졌다. 그리고 37 kHz 이상의 고주파수 영역에서 광역소음이 4 - 5 dB 감소하였다. 그러나 분사량이 증가할수록 스크리치가 다시 발생하며 광역소음이 분사가 없는 경우의 값으로 접근하였다. 이에 대한 원인은 다음에 다루기로 한다.

마하수 1.5에서의 분사율 및 센터노즐 길이의 OASPL에 대한 효과를 Fig. 10에 나타내었다. 센터노즐 끝이 주노즐 출구면과 나란할 경우 마이크로 제트는 오히려 소음을 증가시켰다 (Fig. 6). 센터노즐 길이가 0.5D 및 2.5D에서는 마이크로 제트의 영향이 미미하였다. 마이크로 제트에 의한 OASPL감소가 4 dB 이상인 경우는 센터노즐 길이가 2.0D, 3.0D 및 4.0D에서였다. 길이가 1.0D, 1.5D, 및 4.0D인 경우는 분사율이 증가에 따라 OASPL이 감소하는 경향을 보였다. 센터노즐 길이 및 분사율의 효과에 의해 OASPL이 최대 7 dB까지 크게 감소하였다.

3.3 마이크로 제트의 유동장에서의 영향

이제 센터노즐 길이 및 분사율의 제트 유동장에서의 영향을 피토포를 이용하여 측정된 충돌압력을 통해 살펴보고자 한다. 마하수 1.3에서 센터노즐의 길이에 따

른 제트의 충돌압력장을 길이 0.5D 및 1.5D일 경우를 센터노즐이 없는 기준노즐의 경우와 같이 Fig. 11에 나타내었다.

센터노즐 길이 0.5D 및 1.5D에서의 압력장을 센터노즐이 없는 경우와 비교해보면 노즐중심에서의 압력이 주기성이 거의 사라졌다. 그리고 혼합층 (Mixing layer)에서의 압력도 주기성이 감소되고 압력변동량도 감소하였다. 이는 충격파의 강도가 센터노즐에 의해 감소됨을 의미한다. 주기적이며 강한 충격파는 충격파관련 소음인 스크리치 및 광역주파수 소음을 발생시키는 데에 필수적인 요소이므로, 이의 강도 및 주기성의 약화는 곧 충격파관련 소음의 약화를 가져오게 된다. 따라서 이전의 다른 충격파관련 소음의 큰 감소는 센터노즐의 존재에 의한 충격파의 주기성 및 강도 약화에 그 원인이 있다고 볼 수 있다.

이 마하수 1.3에서 마이크로 제트의 분사량에 따른 충돌압력장을 Fig. 12에 나타내었다. 여기서 센터노즐의 길이는 1.5D이고 분사량은 왼쪽부터 0, 2.1, 및 3.2%이다. 이 길이에서 분사량이 2.1%일 때 분사가 없을 때 측정된 혼합층에서의 충돌압력의 제트축 방향으로의 주기성이 거의 소멸되었다. 이 때의 OASPL은 Figs. 4 및 8에서 확인할 수 있듯이 분사율 0%일 때보다 4 dB정도 크게 감소하였다. 분사율이 증가하여 3.2%가 되었을 때 주제트 중심선 및 혼합층에서의 압력이 축방향을 따라 분사가 없는 경우보다 더 강한 주기성을 나타내었다. 이 때의 스펙트럼의 분사율에 따른 변화경향 및 양이

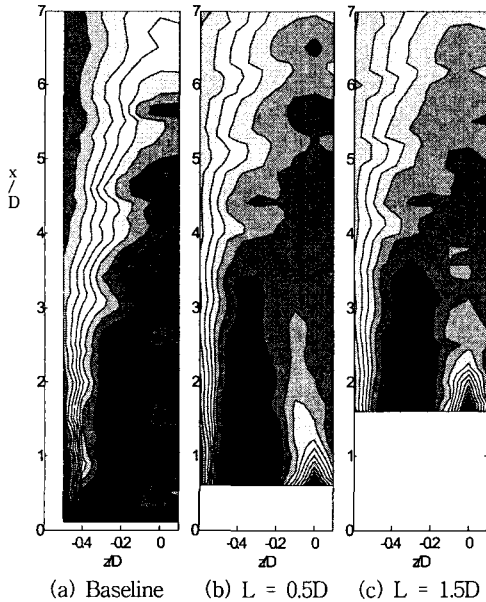


Fig. 11 Effects of the length of the centerbody on impact pressure fields at $M_j = 1.3$.

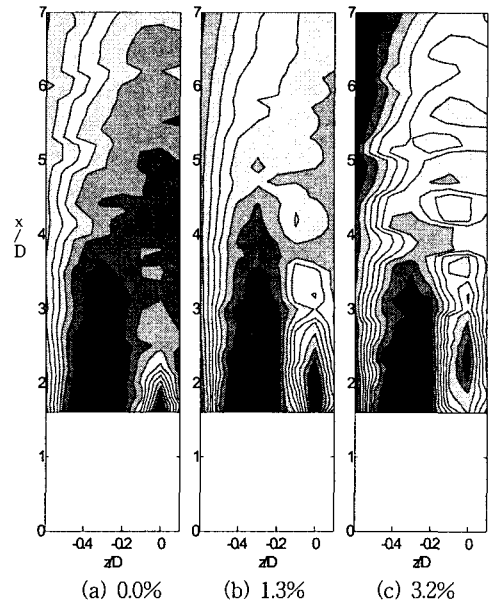


Fig. 12 Effects of the mass fraction on impact pressure fields at $M_j = 1.3$ for $L = 1.5D$.

Fig. 7에 나타난 센터노즐 길이 0.5D인 경우와 거의 같으므로 Fig. 7을 분사량의 의한 스펙트럼의 변화를 살펴볼 때 쓰도록 한다. 증가된 분사량 3.2%에서의 스펙트럼 (Fig. 7)에서 알 수 있듯이 광역소음 및 스크리치가 낮은 분사율 2.1%인 경우보다 상당히 증가하였고 분사가 되지 않은 경우보다도 훨씬 크게 측정되었다. 분사량에 따른 OASPL도 Figs. 4 및 8에서 확인이 되듯이 분사율 3.2%에서는 낮은 분사율 2.1%인 경우보다 OASPL이 6 dB이나 증가하였다. 이러한 소음의 증가 및 감소는 충돌압력장에 나타난 충격파의 주기성 및 강도와의 변화와 매우 밀접한 관계가 있다.

여기에 나타내지 않았지만 마하수 1.5인 경우도 마하수 1.3에서 관측되었듯이 소음장의 변화가 압력장의 변화와 밀접한 관계가 있었다. 즉 이 마하수에서도 혼합층이나 주체트중심부의 압력 주기성 및 압력 변동량이 증가하면 소음이 증가하고 이들이 감소하면 소음도 감소하였다.

4. 결 론

과소팽창된 음속노즐에서 충격파관련 소음을 줄이기 위해 중심에 마이크로 제트를 축과 일치되게 설치하여 완전팽창 마하수는 1.3 및 1.5에 대해 실험을 행하였다. 원장소음은 주노즐 출구에서 90°를 이루는 곳에서 측정하였다. 원장소음은 마이크로 노즐의 길이 및 마이크로 제트의 분사량에 따라 크게 변화하였다. 분사가 없는 경우 마이크로 노즐의 길이에 의해 스크리치 및 충격파 관련 광역소음이 마하수 1.3 및 1.5인 경우 모두 큰폭으로 감소하였다. 마이크로 노즐의 길이 변화만으로 OASPL이 마하수 1.3 및 1.5에서 각각 9 및 4 dB 씩 크게 감소하였다.

마이크로 제트를 사용했을 때 길이의 효과 위에 분사량을 효과도 같이 나타나서 추가적인 스크리치 및 충격파관련 광역소음의 변화가 있었다. 마이크로 노즐 길이 변화와 분사량 변화로 얻은 최대 OASPL의 감소는 마하수 1.3 및 1.5에서 각각 12 및 7 dB로 길이변화로만 얻을 수 있는 소음감소 보다 3 dB 더 줄일 수 있었다.

이 방법이 실용적이기 위해선 마이크로 노즐이 짧을수록 좋은데, 분사를 통해 마이크로 노즐의 효과적인 길이를 줄일 수 있다. 마하수 1.3에선 분사를 통해 길이를 2.5D에서 0.5D로 줄일 수 있고, 마하수 1.5에선 2.5D에서 2.0D로 줄일 수 있다. 따라서 필라멘트보다 상당히 짧은 마이크로 노즐로 필라멘트와 같은 효과를 거둘 수 있으므로 실용적이고 효과적인 소음제어 방법이라 할 수 있다.

후 기

This research was supported by the Brain Korea 21 Project at School of Mechanical and Aerospace Engineering, and by the Micro Thermal Systems Research Center at Seoul National University.

참 고 문 헌

- (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) Bhat, T.R.S., Anderson, B.A., and Gutmark, E., 2000, "Flexible Filaments in Jets and the Interaction Mechanisms," *AIAA Meeting Paper* No. 2000-0083.
- (8) Callender, B. and Gutmark, E., 2000, "Reduction of Underexpanded Jet Noise by Flow/Filament Interaction," *AIAA Meeting Paper* No. 2000-0082.
- (9) Davis, M.R., 1982, "Variable Control of Jet Decay," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 5, pp. 606 ~ 609.
- (10) Kim, Jin-Hwa, Kim, Jung-Hoon, and Yoo, J.Y., 2003, "Noise Reduction in a Non-Ideally Expanded Round Jet via Steady Blow," *AIAA Paper* No. 2003-1202.
- (11) Raman, G., 1997, "Using Controlled Unsteady Fluid Mass Addition to Enhance Jet Mixing," *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 4, pp. 647 ~ 656.
- (12) 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 ~ 68.