

슬롯관형 초음속 배기노즐의 공력소음에 관한 연구

李東勳* · 瀬戸邦聰**

(1999년 7월 26일 접수)

A Study on the Aerodynamic Noise of a Supersonic Exhaust Nozzle of Slotted Tube

Dong-Hoon Lee and Kunisato Seto

Key Words: Aerodynamic Noise(공력소음), Turbulent Mixing Noise(난류혼합소음), Shock-Associated Noise(충격성소음), Shock Wave(충격파), Slotted Tube(슬롯관)

Abstract

The objective of this study is to experimentally investigate the noise propagating characteristics, the noise reduction mechanism and the performance of a slotted tube attached at the exit plane of a circular convergent nozzle. The experiment is performed through the systematic change of the jet pressure ratio and the slot length under the condition of two kinds of open area ratios, 25% and 51%. The open area ratio calculated by the tube length equivalent for the slot length is defined as the ratio of the total slot area to the surface area of a slotted tube. The experimental results for the near and far field sound, the visualization of jet structures and the static pressure distributions in the jet passing through a slotted tube are presented and explained in comparison with those for a simple tube. The propagating characteristics of supersonic jet noises from the slotted tube is closely connected with the slot length rather than the open area ratio, and its propagating pattern is similar to the simple tube. It is shown that the slotted tube has a good performance to suppress the shock-associated noise as well as the turbulent mixing noise in the range of a limited jet pressure and slot dimension. The considerable suppression of the shock-associated noise is mainly due to the pressure relief caused by the high-speed jets passing through the slots on the tube. Both the strength of shock waves and the interval between them in a jet plume are decreased by the pressure relief. Moreover, the pressure relief is divided into the gradual and the sudden relief depending upon the open area ratio of the slotted tube. Consequently, the shock waves in a jet plume are also changed by the type of pressure relief. The gradual pressure relief caused by the slotted tube with the open area ratio 25% generates the weak oblique shock waves. On the contrary, the weak normal shock waves appear due to the sudden pressure relief caused by the slotted tube with the open area ratio 51%.

1. 서론

고압장치의 배기관이나 노즐로부터 압축가스가 순간방출될 때에는 초음속제트로 인하여 매우 강력한 소음이 발생한다. 이때 주소음원으로는 난류혼합소음보다도 훨씬 강한 소음과위를 갖는 충

격성소음을 꼽을 수 있으며, 순음성의 스크리치음(screech tone)과 광대역소음(broadband noise)이 이에 해당된다. 스크리치음은 단일주파수의 강한 음파로서 배기노즐에서 분출되는 제트기둥내의 충격세포(shock cell)에 대류되는 와류(vortex ring)이 충돌하여 음파를 발생시키고, 이 음파가 다시 상류로 전파되어 노즐출구의 와류에 더 큰 교란을 가하고 교란된 와류가 다시 하류의 충격세포에 충돌하여 음파를 발생시키는 일련의 피드백순환에 의한 것으로서 Powell⁽¹⁾에 의하여 처음으로

* 회원, 서울産業大學校 機械工學科

E-mail : ldh@duck.snut.ac.kr

TEL : (02)970-6331 FAX : (02)949-1458

** 佐賀大學 理工學部 機械工學科



Fig. 1 A Slotted tube attached at a circular convergent nozzle

설명되었다. 이에 반하여 광대역소음은 충격세포에 충돌되어 발생한 음파와 와류간에 피드백작용이 없다는 점에서 스크리치음의 발생기구와 다르고 스펙트럼형태에도 차이를 나타낸다.⁽²⁾ 이와 같이 충격성소음은 제트기동내의 충격파교차에 의하여 생성된 충격세포가 음원역할을 하기 때문에 충격성소음의 억제를 위해서는 충격파제어가 관건이라 할 수 있다. 다시 말해서 제트기동내의 충격파를 제거하든지 아니면 충격파구조 자체를 바꾸거나 충격파강도를 완화시키므로써 충격성소음을 억제시킬 수 있다.

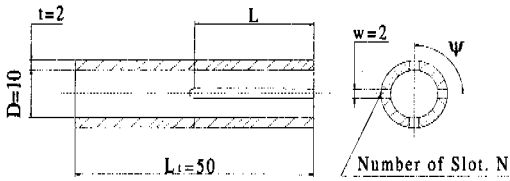
충격성소음을 소음억제원리에 따라 분류하면,⁽³⁾ 노즐출구에 다양한 형상의 기계장치를 부착하여 충격파구조를 변환시키는 방법, 단단팽창으로 배출압력을 경감시키는 방법, 중심제트와 보조제트의 유동간섭을 이용한 방법 그리고 이젝터 슈라우드(ejector shroud)를 장착하거나 다중제트(multi-jets)를 이용하여 소음원을 차폐(shielding)시키는 방법 등이 있다. 이러한 소음억제원리를 토대로 한 소음감소장치로는 슬롯관,⁽⁴⁾ 다공관,⁽⁵⁾ 탭붙은관,⁽⁶⁾ 급확대관,⁽⁷⁾ 다중관,⁽⁸⁾ 환상관⁽⁹⁾ 및 다공플러그⁽¹⁰⁾ 등을 들 수 있다. 특히, 이 중에서 슬롯관은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 대칭성을 갖고 축방향으로 여러개의 홈(slot)이 패인 관으로서 Wlezien과 Kibens⁽⁴⁾ 그리고 Norum⁽¹¹⁾ 등의 연구에 의하여 음향특성 일부가 확인된 바 있다. 즉 Norum은 홈의 두께 및 길이에 따른 스크리치음의 감소정도와 모드특성을 구하고 토의하였으며, Wlezien과 Kibens는 유동가시화 결과와 측정음압의 비교를 통하여 스크리치음의 모드특성과 음감소기구를 고찰하였다. 특히, Wlezien과 Kibens은 슬롯관의 음감소원인을 단순히 압력경감을 통한

출구속도 감소에 의한 것으로 결론지은 바 있다. 그러나 저자들의 연구에 의하면⁽¹²⁾ 슬롯관의 음감소원인은 원주방향으로 개방된 홈의 면적 즉, 원주방향으로 관통하는 제트의 유로면적에 따라 제트구조가 달라지고 이로 인해 음감소기구에 차이가 있음을 확인한 바 있다. 이 외에도 슬롯관에 관해서는 Krothapalli et al⁽¹³⁾ 등의 연구결과가 있으나 소음억제효과를 확인하는 정도에 그치고 있다. 결과적으로 지금까지 발표된 연구결과에 의하면 슬롯관에 대한 음감소원인이 정확히 규명되지 못하였을 뿐만아니라 제트추력을 포함한 소음성능이나 음전파특성과 같은 공력소음에 관한 제반특성을 체계적으로 연구발표한 문헌은 찾아보기 어렵다.

본 연구는 슬롯관형 초음속 배기노즐의 공력소음에 관한 것으로서 원주방향으로 관통하는 제트의 유로면적에 따른 음전파특성과 음감소원인 그리고 제트추력과 소음성능을 구하고 토의하였다. 제트의 유로면적 크기는 원주상에 패인 홈의 폭, 길이 및 갯수에 좌우되지만, 본 연구에서는 홈의 폭은 고정된 상태에서 홈의 길이와 갯수만을 실험인자로 취하였다. 음의 전파특성이나 감소원인의 규명은 제트내의 충격파구조와 강도 그리고 근음장영역에서 측정된 음압분포결과로부터 밝혀진다. 특히 충격성소음의 감소원인을 보다 분명히 하기 위하여 충격파구조의 촬영과 강도측정이 수행되며, 홈이 없는 단순관(simple tube)의 실험결과와도 비교토의된다. 충격파구조와 강도는 각각 고속비디오 카메라와 정압프로브를 이용하여 구하였다. 또한 소음성능은 초음속 제트소음의 지향성(directivity)을 감안하여 제트축을 기준하여 상류 및 하류측에서 각각 측정되며, 제트추력은 제트기동내의 전압 및 정압측정값으로부터 구해진다.

2. 실험

실험장치는 음압스펙트럼, 충격파강도 그리고 제트구조의 촬영을 위한 단위시스템과 공기공급 시스템으로 구성된다. 실험은 크기가 3.5m x 3m x 2m인 간이무향실(semi-anechoic room)에서 수행하였다. 실험에 사용된 슬롯관은 Fig. 2와 같은 형식과 제원을 가지며 축소각 및 출구지름이 30° 와 10mm인 원형축소노즐⁽⁵⁾에 부착된다. 슬롯관의 두께, 안지름, 길이 그리고 홈의 폭은



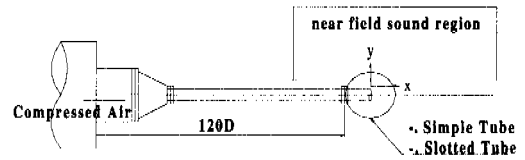
The number of slots, N (open area ratio)	Slot length(L)	Remarks
4(25%)	2, 5, 10, 20, 40	open area ratio: $\frac{w \times L \times N}{\pi \times D \times L} \times 100\%$
8(51%)	2, 5, 10, 20, 40	

Fig. 2 Configuration and specifications of the slotted tube

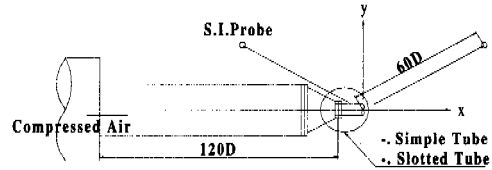
도면상에 도시된 치수들로 고정되어 있다. 원주상에 패인 홈은 분출제트의 대칭성을 고려하여 홈의 갯수를 4개 및 8개로 하고, 일정간격으로 홈(slot)을 배치하였다. 홈의 갯수 4개와 8개는 홈 길이에 상당하는 관표면적에 대한 원주면에 패인 홈의 총면적비로 면적개방비(open area ratio)를 계산하면 각각 25% 및 51%에 상응한다. 따라서 원주방향으로 분출되는 제트통과량은 면적개방비가 일정한 조건하에서 홈의 길이만으로 조절된다. 또한 홈이 없는 단순관의 외형크기는 슬롯관과 동일하다.

압축공기의 공급은 3.2 m³인 공기저장탱크로부터 압력조절밸브를 통해서 서지탱크에 유입된 다음 원형축소노즐에 부착된 슬롯관을 거쳐 방출된다. 제트압력비(jet pressure ratio) R은 대기압에 대한 서지탱크의 절대압력비로 정의된다. 음압분포, 충격파강도, 제트추력 그리고 제트구조의 촬영실험에서는 압력비를 2.6, 3.0, 3.6, 4.4 및 5.4의 다섯단계로 변화시키고, 소음성능 측정시에는 압력비 2.0부터 3.0까지는 0.2씩 그리고 3.0부터 6.0까지는 0.3씩 증가시켰다.

음압스펙트럼은 12mm스페이서(spacer)와 1/4인치 마이크로폰이 장착된 음향인텐시티 프로브(RION, SI-31), 2채널 주파수분석기(A&D, AD-3525), 3축이송대 및 컴퓨터를 이용하여 측정한다. 측정된 음신호는 주파수300Hz에서 50kHz까지의 범위에서 분석되고, 분석된 결과는 컴퓨터에 자동저장된다. 음신호의 분해능을 높이기 위하여



(a) Near field sound measurement



(b) Far field sound measurement

Fig. 3 The experimental apparatus for near and far field sound measurements

주파수분석기의 샘플링(sampling)수는 4096점까지 샘플링할 수 있도록 정하고, 입력신호는 6초에 걸쳐 평균을 취하였다. 또한 3축이송대에 부착된 음향인텐시티 프로브(acoustic intensity probe)는 간이 무향실밖의 컴퓨터에 의하여 측정위치가 원격조정된다.

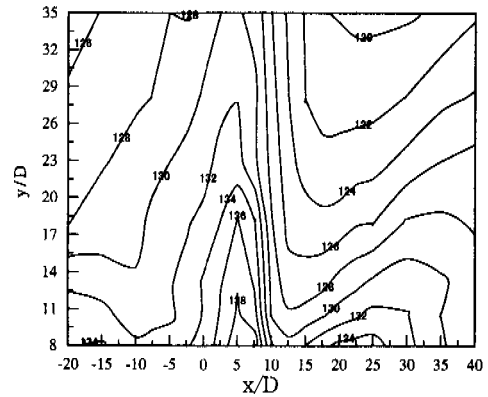
근음장영역에서의 음압분포는 Fig. 3의 그림 (a)와 같이 길이 800mm, 안지름 12mm인 가늘고 긴 관의 끝에 대상관을 부착하고 각 지점의 총음압레벨(overall sound pressure level)을 측정한다. 3축이송대에 의한 인텐시티 프로브의 이동범위는 제트중심축의 수평면상에서 y방향으로 80mm부터 350mm까지 그리고 관끝을 기준하여 x방향으로 상류측 200mm부터 하류측 400mm까지이다. 이때 음향인텐시티 프로브의 이동간격은 충격파영역에서는 10mm, 그 외의 영역에서는 50mm로 하였다.

제트구조, 충격파강도 그리고 소음성능을 얻기 위한 실험은 Fig. 3의 그림 (b)와 같은 장치에서 수행된다. 먼저 소음성능의 경우는 관의 안지름을 D라 할 때 출구로부터 반경 60D인 곳에 인텐시티 프로브를 위치시키고 음압레벨을 측정한다. 이 거리는 초음속 제트소음의 원음장(far field sound)영역의 최소한계거리인 40D를 초과한다.⁽¹⁴⁾ 측정방향은 제트중심축을 기준하여 30°와 150°로 하였다. 제트내의 충격파강도는 정압측정용 프로브(probe), 프로브홀더(probe holder), 직류증폭기(KYOWA, CDV-1A), 전자오실로그래프(SAN-EI,

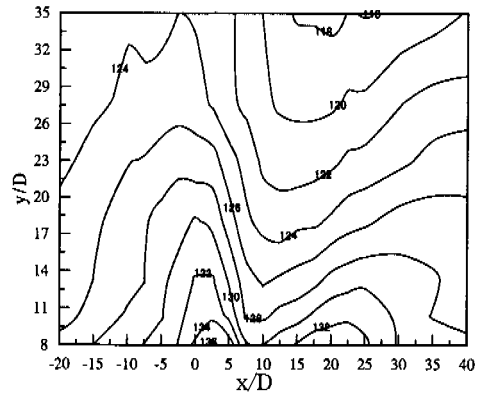
VISIGRAPH 5L30)를 이용하여 측정한다. 정압프로브는 바깥지름 0.7mm, 안지름 0.3mm, 길이 50mm인 스테인리스 튜브로서 선단으로부터 7mm 위치에 지름 0.2mm인 구멍 2개가 대향되게 뚫려 있으며 프로브홀더에 부착되어 사용된다. 측정 위치는 제트중심축선상에서 관출구면으로부터 하류측으로 2mm씩 프로브를 이동시키면서 압력변동이 없어질 때까지 측정한다. 제트구조는 초당 9000프레임을 촬영할 수 있는 고속비디오 카메라를 이용하였다. 제트추력은 충격파의 영향이 거의 없는 관출구로부터 $x/D=14$ 만큼 떨어진 곳에서 제트중심축을 기준으로 반지름방향으로 2mm씩 피토탐관을 이동시키면서 측정반경 20mm까지의 전압과 정압측정값을 이용하여 구하였다.

3. 결과 및 고찰

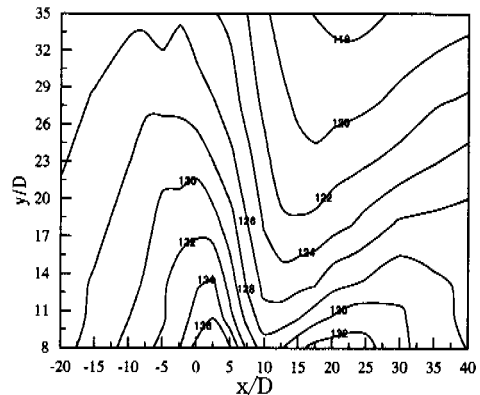
초음속 제트소음의 전파형태는 Fig. 4 및 Fig. 5의 결과에서와 같이 근음장영역에서 측정된 음압 분포결과를 통하여 쉽게 파악할 수 있다. 먼저 Fig. 4는 제트압력비 $R=4.4$ 일 때 단순관과 슬롯관에 대해서 방사된 음의 전파형태를 비교도시한 것이다. 슬롯관의 경우는 면적개방비 25% 및 51%로서 두 경우 모두 길이가 10mm이다. 먼저 단순관의 결과인 그림 (a)를 보면 $x/D=10$ 을 기준으로 음의 전파형태가 분리되고 이와 함께 음원도 하류 및 상류에 각각 위치한다. 즉 하류측에서의 난류혼합소음과 상류측에서의 충격성소음이 이에 해당된다. 이 두 음원을 상호비교하여 보면 충격성소음은 난류혼합소음에 비하여 음압레벨이 높을 뿐만 아니라 상류측으로 강하게 방사되는 지향성을 갖는다. 한편 그림(b)와 그림(c)에 도시된 슬롯관에 대한 결과에서도 면적개방비차에 의한 다소의 음압차이는 있지만 상류측의 충격성소음과 하류측의 난류혼합소음으로 음의 전파형태가 분리되어 나타난다. 다만 단순관과 비교하여 보면 제트측에서 멀어질수록 음원간의 경계가 완만하게 되고, 동일위치를 기준으로 할 때 음압크기가 감소되었다는 점이 다르다. 이는 음압스펙트럼의 측정단계에서도 확인하였듯이 충격성소음원인 광대역소음과 함께 스크리치음이 감소 또는 억제되었기 때문이다. 스크리치음의 감소 또는 억제는 슬롯관의 원주면에 패인 홈이 제트의 불안정성을 야기하므로써 대류되는 와류과 음파간의 피드백



(a) Simple tube



(b) Open area ratio, 25%



(c) Open area ratio, 51%

Fig. 4 Contours of the near field overall sound pressure level of the supersonic jet noise from the simple and the slotted tube for jet pressure ratio $R=4.4$

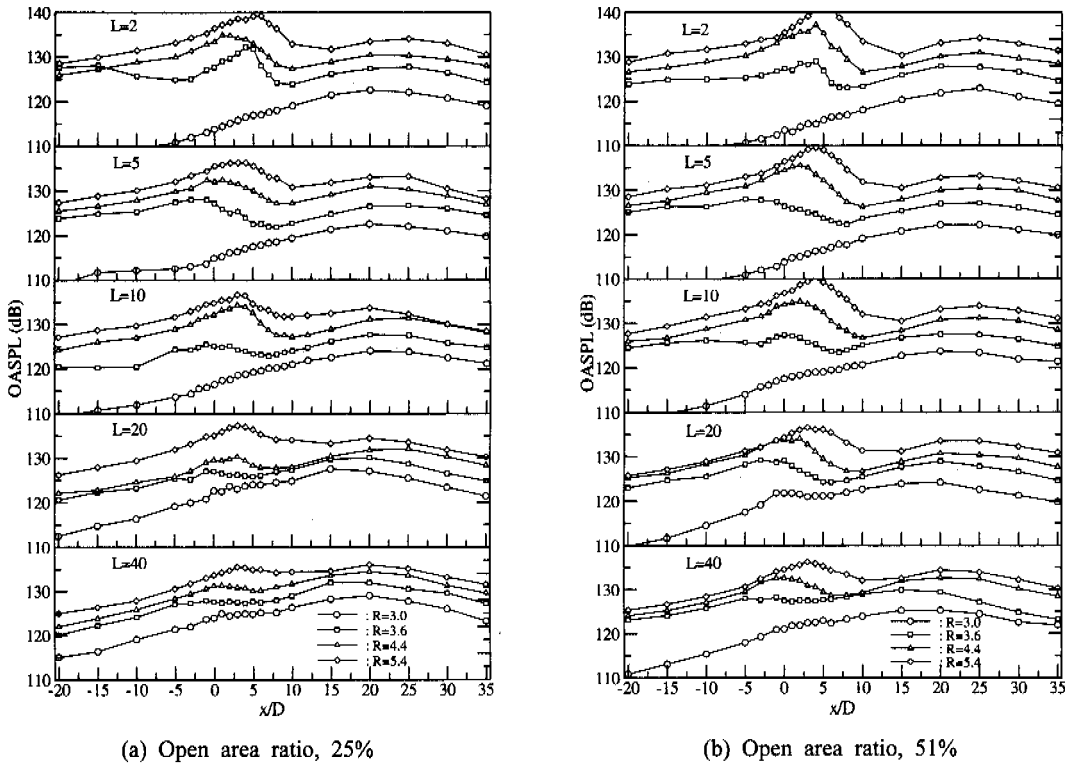


Fig. 5 Variation of the near field overall sound pressure level(OASPL) with jet pressure ratio for the slotted tube

투포가 약화 또는 파괴되었음을 의미한다.

Fig. 5는 서로 다른 제트압력비에서 측정한 근음장영역에서의 총음압레벨을 흡의 길이별로 도시한 것이다. 면적개방비 25%는 그림 (a)에 그리고 51%는 그림 (b)에 나타냈다. 이때 흡의 길이는 2mm, 5mm, 10mm, 20mm 및 40mm이며, 마이크로폰과 제트중심축까지의 거리 $y/D=10$ 이다. 먼저 면적개방비 25%인 그림 (a)의 결과에서 음의 전파형태는 흡의 길이 및 제트압력비에 따라 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉 흡의 길이가 짧으면서 압력비가 높을 때에는 강한 음압레벨의 충격성소음과 난류혼합소음이 동시에 발생되어 전파되는 반면에, 압력비가 낮을 때에는 난류혼합소음만이 방사된다. 그러나 흡의 길이가 관지름의 4배로 매우 길 때에는 압력비의 높고 낮음에 관계없이 음원의 형태는 거의 난류혼합소음으로 전환된다. 한편 면적개방비 51%인 그림 (b)에서도 그림 (a)와 유사한 음의 전파형태를 볼 수 있으나, 충격성소음의 음압진폭이 약간 더 높다는 점

만이 다르다. 다음에 제시되는 Fig. 6부터 Fig. 9까지는 슬롯관의 소음감소원인을 규명할 목적으로 관으로부터 고속제트가 분출될 때 제트구조를 촬영하고 제트기동내의 정압분포를 측정된 결과이다. 먼저 Fig. 6은 단순관에 대한 충격파구조를 담은 사진결과로서 제트압력비는 그림상에 도시한 바와 같다. 결과에서 보듯이 제트압력비가 증가함에 따라 제트기동내의 팽창파와 압축파의 교차에 의한 강한 수직충격파가 발생됨과 동시에 주위유체와 접하는 경계유선이 배열형태를 취한다. 또한 충격파길이도 점차 길어지는 것을 볼 수 있다. 이 같은 충격파구조의 변화는 부족팽창제트(under-expanded jet)의 대표적특징⁽¹⁵⁾으로서 충격성소음의 주요요인으로 작용하게 된다. 한편 Fig. 7은 슬롯관에 대한 것으로서 제트압력비가 $R=4.4$ 로 일정한 조건하에서 흡의 길이만을 변화시키면서 제트구조를 촬영한 결과이다. 도시된 모든 결과에서 보듯이 충격파모양이 단순관의 것과 같지 않을 뿐만 아니라 흡의 길이 및 면적

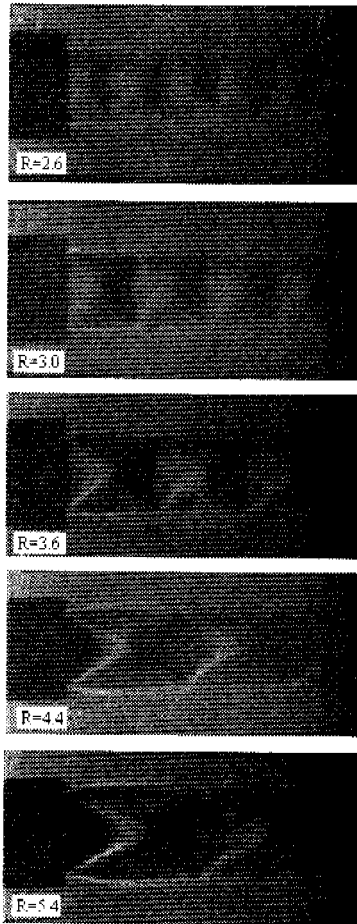


Fig. 6 Photograph of the jet structures with jet pressure ratio for the simple tube.

개방비에 따라 서로 다른 충격파형태를 나타낸다. 먼저 면적개방비 25%인 그림 (a)의 결과를 보면 홈의 길이를 관지름보다 짧게 한 $L=2\text{mm}$ 및 $L=5\text{mm}$ 인 경우에는 강한 X형 경사충격파와 함께 수직충격파가 혼합되어 나타나고, 홈의 길이를 점차 길게 할수록 제트의 과팽창(over-expansion)으로 인하여 충격파의 형태는 X형의 약한 경사충격파인 마하파로 변환된다. 그러나 면적개방비 51%인 그림 (b)의 결과에서는 홈의 길이 변화에도 불구하고 수직충격파의 형태를 보인다. 특히 결과에서 홈의 길이가 길어짐에 따라 충격파가 상류측으로 점차 이동하는 것은 면적개방비 51%인 관에서만 나타나는 특이한 충격파거동이라 할 수 있다. 이는 원주면에 패인 다수의

홈으로 인해서 슬롯관이 마치 급확대관처럼 작용하게 되어 관내에서 발생한 강한 충격파가 홈의 길이에 따라 그 위치가 변동하기 때문이다. 따라서 결과에 도시된 제트기동내의 수직충격파의 위치는 관내 충격파의 위치와 연동되어 이동하는 것으로 간주할 수 있다. 실제로 면적개방비가 51%인 슬롯관에 대한 제트구조 촬영에서 관의 내부에서 발생하는 충격파를 확인할 수 있었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 충격파세기와 거동을 보다 상세히 관찰하기 위하여 제트기동내의 정압변동을 측정된 결과이다. 먼저 Fig. 8은 단순관 및 슬롯관에 대한 결과를 제트압력비별로 도시한 것으로 그림 (a)에는 단순관 그리고 그림 (b) 및 그림 (c)는 슬롯관에 대한 결과로서, 두 경우 모두 홈의 길이는 10mm이다. 그림에서 종축은 대기압(P_0)에 대한 측정된 정압(P_s)의 비로 정의한 충격파의 상대강도를 의미하며, 횡축은 관의 안지름으로 무차원화시킨 제트축방향의 거리를 뜻한다. 먼저 그림 (a)의 결과를 보면 단순관의 사진결과에서와 같이 충격파의 한쌍인 팽창파와 압축파의 거동이 뚜렷이 나타나고, 이들 형태가 마치 정현파처럼 거동한다. 한편 슬롯관에 대한 결과에서는 면적개방비 및 제트압력비에 따라 충격파강도의 크기와 거동이 다르게 된다. 즉 면적개방비 25%인 그림 (b)의 결과를 같은 압력비단계의 그림 (a)의 단순관에 대한 결과와 비교하여 보면 충격파강도가 큰 폭으로 감소되었을 뿐만 아니라 충격파상호간의 간격인 충격파길이도 크게 감소되었음을 알 수 있다. 또한 면적개방비 51%인 그림 (c)의 결과에서도 충격파강도와 충격파길이의 감소를 볼 수 있지만, 면적개방비 25%만큼은 되지 않는다.

Fig. 9는 제트압력비가 $R=4.4$ 로 일정한 상태에서 슬롯관에 대한 충격파강도를 홈의 길이별로 도시한 것이다. 그림 (a)에는 면적개방비 25% 그리고 그림 (b)에는 51%일 때의 결과이다. 참고로 충격파강도의 크기변화를 보다 분명히 대비시키기 위해 홈이 없는 단순관의 자료도 함께 제시하였다. 도시된 두 결과에서도 Fig. 8과 마찬가지로 면적개방비 25%인 관에서는 홈의 길이가 길어질수록 충격파강도와 충격파길이가 현저히 감소하는 반면에, 면적개방비 51%인 관에서는 홈의 길이가 변화해도 면적개방비 25%만큼의 감소

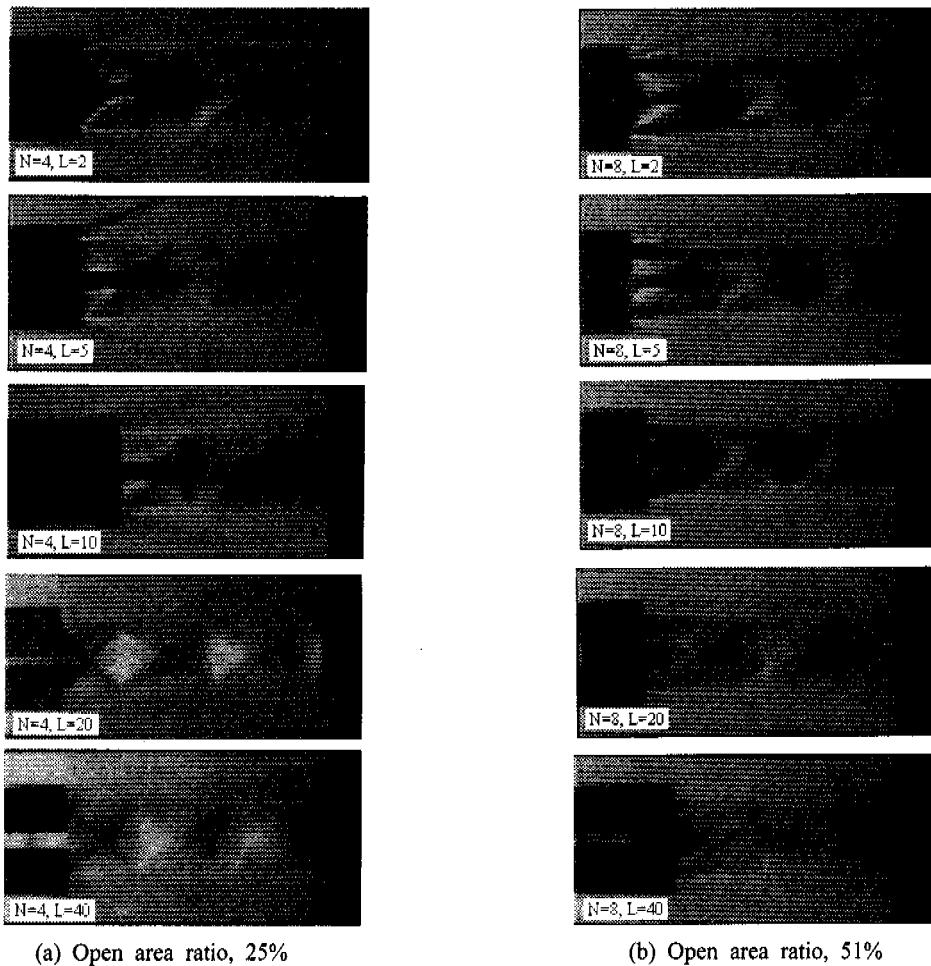
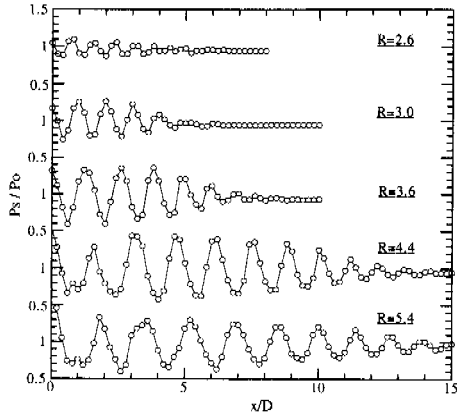


Fig. 7 Photograph of the jet structures with the slot length of the slotted tube for jet pressure ratio $R=4.4$

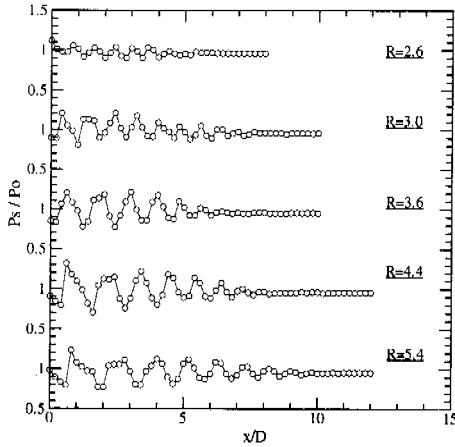
는 수반되지 않는다. 이상의 토의 결과를 요약하면 홈의 길이가 관지름에 비하여 아주 짧을 때는 면적개방비와 상관없이 충격파형태는 다소 복잡한 형태로 나타나며 충격파강도의 감소는 크지 않다. 그러나 홈의 길이를 관지름보다 길게 하면 면적개방비마다 각기 다른 압력완화형태를 취함에 따라 충격파형태도 서로 다르게 된다. 즉, 면적개방비 25%인 관에서는 홈을 통한 고속제트로 인하여 관내압력이 점진적으로 강해지는 반면에, 면적개방비가 상대적으로 더 큰 51%인 관에서는 개방비의 증대로 인하여 관내압력은 급격하게 강해진다. 따라서 점진적으로 압력이 강해지는 면적개방비 25%인 관에서는 세기가 약한 X형의 경사충격파인 마하파로의 충격파변환에 의

한 강도감소가 충격성소음의 감소요인이 되지만, 급격한 압력강하를 겪는 면적개방비 51%인 관에서는 관내에서 발생한 첫번째 충격파에 뒤이은 관외부의 수직충격파의 강도감소가 충격성소음의 감소요인이 된다.

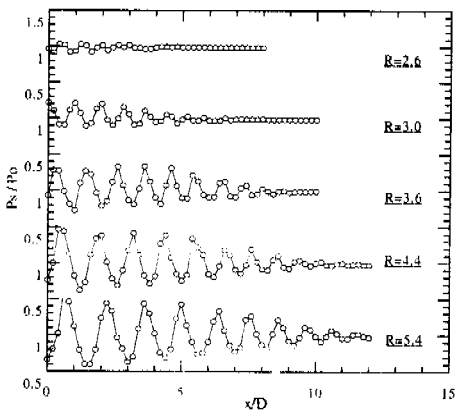
Fig. 10은 원음장영역에서 측정된 면적개방비 25%인 슬롯관의 소음성능 결과로서 제트축으로부터 30° 인 그림 (a)와 150° 인 그림 (b)는 각각 난류혼합소음과 충격성소음의 감소를 대표한다. 그림의 종축은 슬롯관과 원형축소노즐간의 총음압차로서 음의 기호는 슬롯관에 의하여 감소된 총음압레벨을 뜻하며, 횡축의 제트마하수 M_j 는 관을 통과한 제트가 이상팽창(ideally expanded jet)하는 것으로 가정하였을 때이다. 도시된 결과



(a) Simple tube

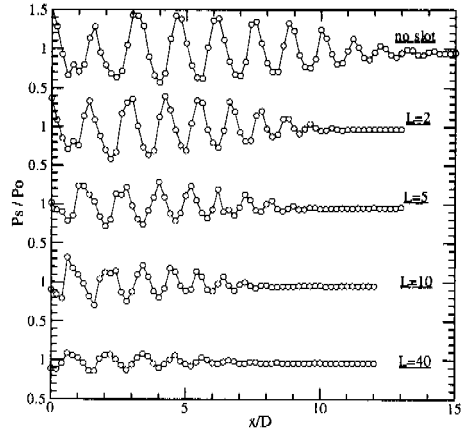


(b) Open area ratio, 25%

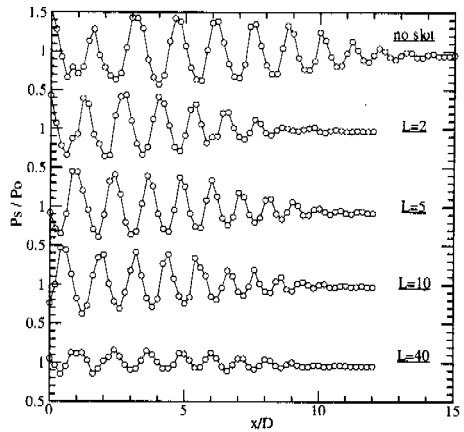


(c) Open area ratio, 51%

Fig. 8 Variation of the static pressures in the jet centerline in each jet pressure ratio for the simple and the slotted tube



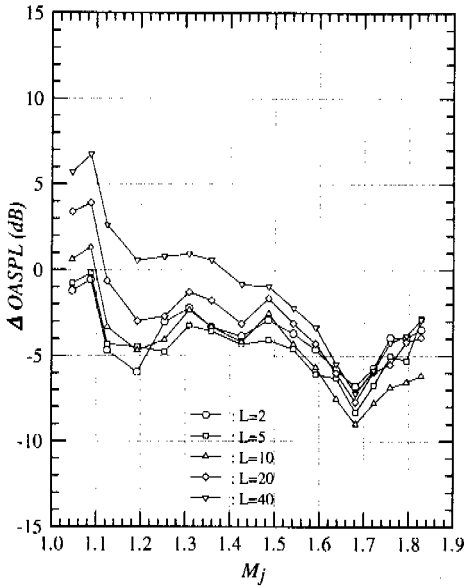
(a) Open area ratio, 25%



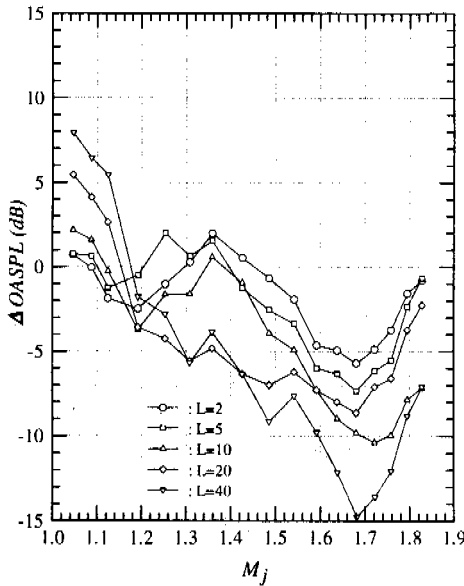
(b) Open area ratio, 51%

Fig. 9 Variation of the static pressures in the jet centerline in each slot length of the slotted tube for jet pressure ratio $R=4.4$

로부터 슬롯관은 Krothapalli et al 등의 연구결과에서도 일부 확인되었듯이 충격성소음의 감소에 특히 탁월할 뿐만아니라 난류혼합소음에 대해서도 우수한 소음억제효과를 갖는다. 먼저 난류혼합소음의 감소를 반영한 그림 (a)를 보면 전유속범위에 걸쳐서 우수한 소음효과를 나타냄과 동시에 특정의 유속조건에서 최고 9dB의 소음억제효과를 갖는다. 또한 결과에서 휴의 길이에 따라 소음성능이 좌우되는 것을 볼 수 있는데 대체적으로 휴의 길이가 짧을수록 좋은 소음억제효과를 갖는 반면에 길어지게 되면 소음억제효과는 반감된다. 이 같은 소음효과의 반감은 판단면



(a) 30deg



(b) 150deg

Fig. 10 The overall sound pressure level(OASPL) of the turbulent mixing noise(a) and the shock associated noise(b) suppressed by the slotted tube

을 통과하는 주제트에 흡의 길이만큼 부가된 흡을 관통한 강한 제트가 난류혼합소음의 세기증가

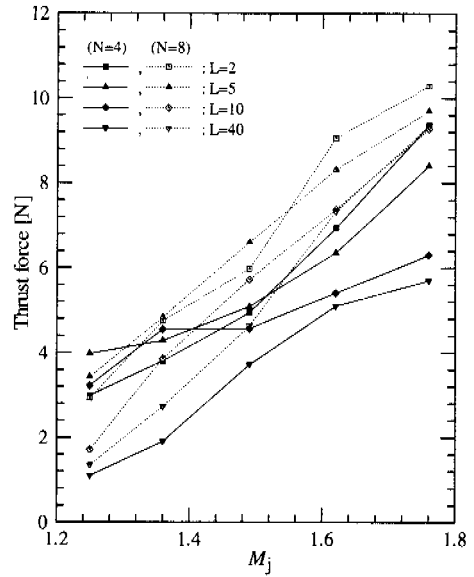


Fig. 11 Comparison of the thrust force between the open area ratios, 25% and 51%, of the slotted tube

에 기여한 것으로 볼 수 있다. 이와는 반대로 제트축으로부터 150° 상류측에서 측정된 충격성소음의 감소결과인 그림 (b)에서는 오히려 흡의 길이가 길수록 탁월한 소음억제효과를 보이며, 최고 15dB에 가까운 소음성능을 보여준다. 이것은 제트구조의 촬영과 강도측정결과에서도 확인하였듯이 압력경감으로 인하여 충격파구조의 변환을 통한 충격파강도가 감소되었기 때문이다. 또한 난류혼합소음이나 충격성소음에 대한 두 결과로부터 제트마하수 1.7부근에서 소음감소폭이 더욱 큰 것은 원형축소노즐에서 발생한 충격성소음의 세기가 이 제트조건에서 더욱 강하였음을 암시한다. 또한 면적개방비 51%인 슬롯관에서도 21%인 관과 유사한 소음결과를 확인할 수 있었으나, 21%의 관과 비교하여 소음감소폭은 다소 적었다.

Fig. 11은 슬롯관에 대한 제트추력값을 나타낸 것으로서 면적개방비 25% 및 51%에 대한 결과를 흡의 길이별로 비교도시하였다. 추력은 충격파영향이 거의 없는 $x/D=14$ 만큼 떨어진 곳에서 제트 운동량을 측정하여 구하였다. 도시된 결과에서 흡의 길이가 짧아질수록 추력성능은 더 좋아지는 것을 알 수 있다. 또한 동일길이의 흡을 갖는 슬롯관에 대하여 면적개방비 25% 및 51%에

대한 추력값을 상호비교해 볼 때 제트마하수가 낮은 일부구간을 제외하고는 면적개방비 51%인 슬롯관이 전체적으로 더 좋은 추력성능을 유지한다. 이는 면적개방비 51%인 관에서는 제트가 원주면에 패인 흐름을 관통하기 보다는 제트의 대부분이 하류제트축으로 분출되기 때문이다.

4. 결 론

슬롯관형 초음속 배기노즐의 공력소음에 관한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 슬롯관에서 방사된 초음속 제트소음은 흐름의 길이 및 제트압력비에 따라 음의 전파특성이 다르게 나타난다. 즉 흐름의 길이가 짧으면서 압력비가 높을 때에는 상류측의 충격성소음과 하류측의 난류혼합소음으로 분리되어 전파되지만, 흐름의 길이가 관지름의 4배정도 길거나 압력비가 낮을 때에는 난류혼합소음만이 방사된다.

(2) 슬롯관은 흐름의 길이가 관지름에 비하여 길어질수록 충격성소음의 감소에 특히 탁월한 반면에, 흐름의 길이가 관지름보다 짧을 때는 난류혼합소음에 대한 우수한 억제효과를 갖는다. 또한 흐름의 길이가 짧아질수록 추력성능도 향상된다.

(3) 충격성소음이 큰 폭으로 억제되는 주된 원인은 압력완화로 인한 충격파강도와 충격파상호간의 간격인 충격파길이가 감소되었기 때문이다. 특히 압력완화는 면적개방비의 대소에 따라 두가지 형태로 구분되며, 이로 인해 두가지 형태의 충격파가 발생된다. 즉 면적개방비가 25%인 관에서는 관내의 점진적인 압력완화로 인해 세기가 약한 X형 경사충격파가 발생하는 반면에, 면적개방비 51%인 관에서는 관내에서의 급격한 압력강화로 인하여 형상이 다소 왜곡되고 세기가 약한 수직충격파가 발생된다.

후 기

이 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었으며, 실험을 도와준 佐賀大學의 高瀬 直之 君에게 감사를 표한다.

참고문헌

(1) Powell, A., 1953, "On the Mechanism of Choked Jet Noise", *Proceedings of the Physical Society*, 66,

pp. 1039~1056.

(2) Harper-Bourne, M. and Fisher, M.J., 1973, "The Noise from Shock Waves in Supersonic Jets," *Proceedings(No. 131) of the AGARD Conference on Noise Mechanisms, Brussels, Belgium*, pp. 11-1~11-13.

(3) Dosanjh, D.S., Yu, J.C. and Abdelhamid, A.N., 1971, "Reduction of Noise from Supersonic Jet Flows," *AIAA Journal*, Vol. 9, No. 12, pp.2346~2353.

(4) Wlezien, R.W. and Kibens, V., 1988, "Influence of Nozzle Asymmetry on Supersonic Jets," *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 1, pp. 27~33.

(5) Seto, K., 1988, "Modification of the Characteristics of Underexpanded Jets by Using an Extended Perforated Tube as a Noise Suppressor," *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 119~125.

(6) Samimy, M., Zaman, K.B.M.Q. and Reeder, M.F., 1993, "Effects of Tabs on the Flow and Noise Field of an Axisymmetric Jet," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 609~619.

(7) Meier, G.E.A., Selerowicz, W.C. and Szumowski, A.P., 1990, "A Nozzle Generating Low Jet Noise," *Jr. of Sound and Vibration*, Vol. 136, No. 1, pp. 65~73.

(8) Nagamatsu, H.T., SHEER Jr., R.E. and Gill, M.S., 1972, "Characteristics of Multitube Multishroud Supersonic Jet Noise Suppressor," *AIAA Journal*, Vol. 10, No. 3, pp. 307~313.

(9) Fujii, S., Nishiwaki, H. and Takeda, K., 1981, "Suppression of Jet Noise Peak by Velocity Profile Reshaping," *AIAA Journal*, Vol. 19, No. 7, pp. 872~877.

(10) Kibens, V. and Wlezien, R.W., 1985, "Noise Reduction Mechanisms in Supersonic Jets with Porous Centerbodies," *AIAA Journal*, Vol. 23, No. 5, pp. 678~684.

(11) Norum, T.D., 1983, "Screech Supression in Supersonic Jets," *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 2, pp. 235~240.

(12) Seto, K., Lee, D.H., Zhi, Xiang XU and Takase, N., 1998, "A Study on the Mechanism of Noise Reduction of the Slotted Nozzle," 日本航空宇宙學會, 第29期年會講演會, 講演集, pp. 66~67.

- (13) Krothapalli, A., McDaniel, J. and Baganoff, D., 1990, "Effect of Slotting on the Nozzle of an Axisymmetric Supersonic Jet," *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 12, pp. 2136~2138.
- (14) Nagel, R.T., Denham, J.W. and Papatnasiou, A.G., 1983, "Supersonic Jet Screech Tone Cancellation," *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 11, pp. 1541~1545.
- (15) Abdel-Fattah, A.M., 1988, "Discrete Tone Emission from High-Pressure Ratio Supersonic Jets from Convergent-Divergent Nozzles," *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 3, pp. 283~291.