

# 타원형 제트 스크리치 반사판이 과소팽창 음속 제트에 미치는 영향

김정훈\* · 김진화\*\* · 유정열†

(2003년 4월 22일 접수, 2004년 6월 17일 심사완료)

## Effects of an Elliptic Jet Screech Reflector on an Underexpanded Sonic Jet

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

**Key Words :** Mixing Enhancement(혼합 증진), Jet Screech(제트 스크리치), Elliptic Reflector(타원 반사판), Underexpanded Jet(과소팽창제트), Impact Pressure(충돌압력)

### Abstract

A technique of mixing enhancement by using an elliptic jet screech reflector has been examined experimentally in an underexpanded sonic round jet where jet screech tone is generated. Since jet screech is known to enhance jet spreading, a reflector was designed to focus jet screech waves near the nozzle lip at an underexpanded jet. The reflector has an elliptic cross section of which one focus is located near the nozzle lip and the other in the jet screech source region in a plane including the jet axis. In the jet with the elliptic reflector, the mass flow rate showed a significant increase in the jet entrainment when compared to that for the small disk reflector. This was attributed to the increased screech amplitude near the nozzle lip as well as the mode change of the jet. The jet mixing was also increased by the amplified jet screech at two other underexpanded jets, but the jet oscillation mode did not change.

### 기호설명

$D$  : 노즐 출구직경  
 $M_f$  : 완전팽창마하수[식 (1)]  
 $P_b$  : 배압  
 $P_c$  : 노즐 안정실 정체 압력  
 $P_e$  : 노즐 출구에서의 정압  
 $P_{ij}$  : 제트유동의 충돌압  
 $r$  : 반경방향 좌표  
 $x$  : 주유동 방향 좌표  
 BN : 기본 노즐(baseline nozzle)  
 ER : 타원 반사판(elliptic reflector)  
 LDR : 큰 디스크 반사판(large disk reflector)

SDR : 작은 디스크 반사판(small disk reflector)  
 SER : 홈이 있는 타원 반사판(slotted elliptic reflector)

### 1. 서론

지난 수 십년 동안 고속제트의 혼합 증진을 위해 여러 가지 방법들이 연구되었다.<sup>(1)</sup> 축교차 현상 또는 노즐 모서리에서의 복잡한 유동 현상을 이용하기 위해 원형 노즐 대신 타원형<sup>(2)</sup> 또는 직사각형<sup>(3)</sup> 단면의 노즐을 사용하였으며, 노즐 출구면에 고정된 탭을 사용<sup>(4)</sup>하거나 원주 위를 따라 회전하는 탭을 설치<sup>(5)</sup>하여 주유동 방향의 와류를 발생시켜 혼합을 증진하기도 하였다. 또한 노즐 옆면을 요철 형상으로 제작하여 주유동 방향의 와류를 발생<sup>(6)</sup>시키기도 하였고, 제트 하류에 방해물을 두어 여기서 발생하는 충돌음을 이용하여 제트 전단층의 불안정성을 더욱 가중시키는 동시에 방해물에서 발생하는 후류를 이용하여 혼합을 증진하였다.<sup>(7)</sup> 한편, 제트 스크리치의 발생 원리가 제시<sup>(8)</sup>된 이

\* 회원, LG 전자 DA 연구소

\*\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부 BK21 사업단

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail: jyyoo@plaza.snu.ac.kr

TEL: (02) 880-7112 FAX: (02) 888-2968

후에, 여러 연구자들이 노즐 상류의 형상이 제트 및 제트 스크리치에 영향을 준다고 보고하였다. Poldervaart 등<sup>(9)</sup>은 노즐 상류에 다양한 반사판을 두어 제트가 여러 가지 모드로 진동한다는 사실을 관찰하였고, Nagel 등<sup>(10)</sup> 및 Rice와 Raman<sup>(11)</sup>은 반사판의 위치에 따라 스크리치 톤이 감소 또는 증가하는 현상을 연구하였다. Glass<sup>(12)</sup>는 제트 스크리치 톤에 의해 혼합이 증가하는 현상을 발견하였으며, 중심이 노즐 립(lip)에 위치한 반구 형상의 반사판이 평면 반사판보다 혼합을 크게 증가시키지는 못한다고 하였다. Krothapalli<sup>(13)</sup> 등은 스크리치 톤이 가장 강할 때에 제트의 확산이 커지는 원인이 제트 내의 강하고 규칙적인 유동구조 때문이라고 하였다. Ponton과 Seiner<sup>(14)</sup>는 노즐 립의 두께를 변화시켜가면서 제트 운동량 두께의 변화율이 달라지는 결과를 발표하고, 이는 노즐 립에서 반사된 제트 스크리치 톤에 의한 초기 불안정성의 증폭에 기인할 수 있다고 하였다.

본 연구에서는 제트 혼합을 증가시키기 위해 상류로 전파하는 제트 스크리치 톤을 이용한다. 이를 위해 제트 스크리치의 발생 원리를 바탕으로 하여 새로운 형상의 반사판을 설계하고, 이 반사판이 제트 혼합에 미치는 영향 및 원인을 밝히고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 제트 유동 발생 장치 및 계측 장비

본 실험에 사용된 제트 유동 발생장치는 Fig. 1에서와 같이 제트 유동을 연속적으로 발생하도록 설계되어 있다. 스크류타입 압축기에서 발생한 압축공기는, 냉각팬과 필터를 지난 후에 공기 건조기를 통과하여 이슬점이 약  $-20^{\circ}\text{C}$ 로 낮아진다. 건조된 압축 공기는 다시 두 개의 미세 필터를 통과하여 수분 및 유분이 걸러지고, 압축기의 압력 변화에 완충역할을 하는 부피  $3\text{m}^3$ 의 공기 저장용기를 지난다. 이 후 직렬로 연결된 2개의 압력조정기에 의해 실험 조건에 맞는 압력으로 오차범위  $\pm 0.7\%$  이내로 조절되며, 밸브 소음을 최소화하기 위해 소음기를 지나 제트의 안정실로 들어가게 된다. 수축 원형 노즐이 채택되었는데, 안정실대 노즐의 수축비는 100:1이며 노즐 출구 지름은 10 mm, 노즐 립의 두께는 0.25 mm이다. 노즐 확대 그림에는 좌표축을 도시하였다. 안정실 내의 온도는 조절되지 않았지만, 안정실과 대기와의 온도차는  $4^{\circ}\text{C}$  이내였다.

제트는 수직 방향으로 분사되며, 실험은 무향실 내에서 수행되었다. 무향실의 내부 크기는  $2.5 \times$

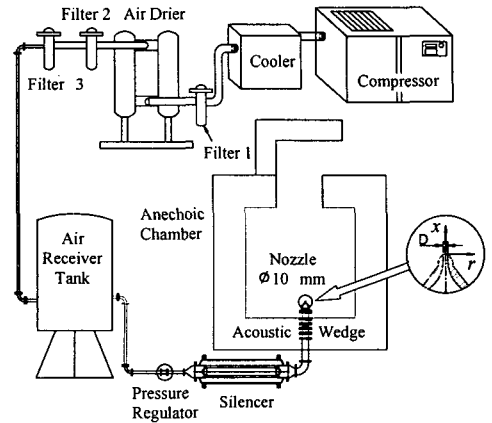


Fig. 1 A schematic of experimental facilities

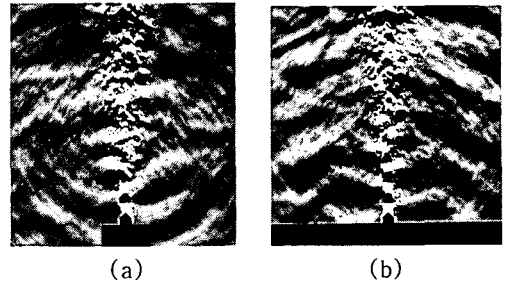


Fig. 2 Instantaneous Schlieren images of the jet at  $M_j=1.5$  with (a) a small disk reflector and (b) a large disk reflector

$1.7 \times 2.4 \text{ m}^3$  (가로 x 세로 x 높이) 이고, 저음 차단 주파수는 250 Hz이며, ISO 3745의 검증절차에 의해 검증되었다.

노즐 립 주위에서의 소음은 1/4" 지향성 마이크(L&D)로 측정되었고, 마이크로폰은 실험 전에 교정기를 사용하여 검정하였다. 제트 유동의 전압은 안쪽 지름 1.5 mm, 바깥 지름 2.5 mm인 피토판으로 측정되었으며, 압력계는 전압 범위에 따라 1000 torr (MKS) 및 100 psi 압력계 (SENSOTEC)를 사용하였고, 피토판의 이송을 위하여 컴퓨터로 제어되는 3축 이송장치를 사용하였다.

솔리덴 기법을 이용하여 유동 및 스크리치 파를 가시화하였다. 빛의 지속 시간이  $1 \mu\text{s}$  이하인 광원(Palfash 501)을 사용하여 유동 구조를 거의 정지된 상태에서 촬영할 수 있었고, 선명도를 높이기 위해 영상을 후처리 하였다.

### 2.2 반사판

제트 스크리치는 Fig. 2(a)에서와 같이 제트의 바깥쪽에서 주 전파방향이 상류가 된다. 제트의 불안정성을 높이기 위해 Fig. 2(b)에서와 같이 노즐

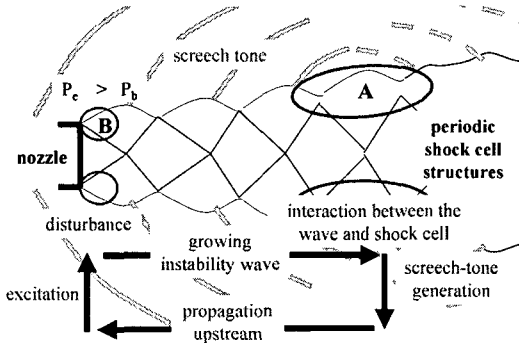


Fig. 3 Feedback mechanism for the jet screech generation

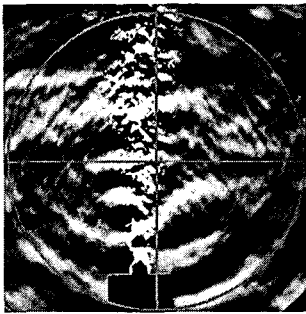


Fig. 4 Approximate definition of a center of jet screech wave front by a graphical method at  $M_f = 1.5$

출구면에 큰 평면 반사판을 설치하면, 제트 스크리치가 이 반사판에 의해 반사된 후에 제트 외곽으로 퍼져 나가는 것을 알 수 있다. 따라서 스크리치를 제트의 불안정한 영역에 모아주는 반사판을 제작하여 제트의 혼합에 미치는 영향을 조사하였다.

Fig. 3에서와 같이, 제트 스크리치는 되먹임(feedback)과정에 의해 발생된다고 알려져 있다. 여기서 제트 스크리치는 3 - 4 번째 충격파 셀에서 발생('A'영역)되며, 외부 교란에 민감한 노즐 립('B'영역)근처에서 제트 유동에 영향을 준다. 본 연구에서는 'A'영역에서 발생하는 스크리치 톤을 'B'영역에 모을 수 있는 2차원의 반사판 곡선을 얻은 후에, 이를 축대칭 회전시켜 최종 반사판 모양을 설계하였다.

원형의 파면은, 한 개의 초점에 그 원형의 중심에 있는 타원에 반사될 경우에 반사된 경로가 다르더라도 위상이 바뀌지 않고 타원의 다른 초점에 모아질 수 있다. 그런데 Fig. 4에서와 같이, 제트 스크리치는 노즐 근처에서 근사적으로 원형의 파면을 나타낸다. 따라서 타원의 성질을 이용하여

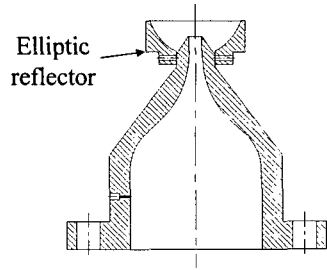


Fig. 5 The nozzle with the elliptic reflector

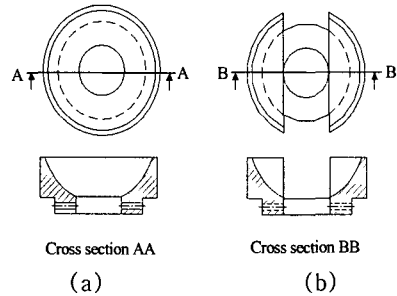


Fig. 6 Top and front views of (a) ER and (b) SER

타원의 한 초점을 파면의 중심에 놓고, 다른 초점을 제트의 민감한 영역 (Fig. 3의 'B' 영역)에 놓으면 제트에 대한 가진 효과가 커질 수 있다. 파면의 중심은 Fig. 4에서와 같이 파면에 근접한 원을 그린 후에 그 원의 중심으로 정한다. 타원의 다른 초점은 제트에서 가장 불안정한 영역으로 알려져 있는 노즐 립으로 정한다. 타원 형상을 결정하기 위해서는 하나의 조건이 더 필요하다. 노즐 립에 직접 도달하는 파와 반사되어 오는 파가 노즐 립에서 서로 보강간섭을 일으키도록 하기 위해서, 두 파의 경로차이가 스크리치파의 한파장이 되도록 하여 타원을 결정하기 위한 나머지 조건을 부과하였다.

본 논문에서는, 과소 팽창정도를 나타내기 위해 완전팽창마하수 ( $M_f$ )를 사용하였다. 완전팽창마하수는 노즐 안정실의 정체 압력 대 배압의 비를 다음의 관계식을 써서 마하수의 형태로 변환하여 정의할 수이다.

$$M_f = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (1)$$

처음 실험은  $M_f = 1.50$ 에서 수행하였고 이 제트에서 발생하는 스크리치파를 기준으로 타원 반사판(ER)을 제작하였다. 노즐에 설치된 ER의 단면도를 Fig. 5에 나타내었다.

ER 을 설치하였을 때의 유동 가시화를 용이하게 하기 위해 홈(slot)이 있는 타원 반사판(SER)을 제작하였다. ER 및 SER 의 평면도와 정면도를 Fig. 6 에 도시하였다. 그러나 SER 이 제트에 미치는 영향은 ER 과는 다른 점이 있었다. 이에 대해서는 실험 결과에서 언급하기로 한다.

한편, ER 이 제트 혼합에 미치는 영향을 비교하기 위해 작은 평면 반사판 (SDR, 안지름 1.1D, 바깥 지름 2.4D)과 큰 평면 반사판 (LDR, 안지름 1.1D, 바깥 지름 25D)을 제작하였고, 가장 큰 스크리치 톤을 발생시키기 위해<sup>(10)</sup> 이들을 제트 출구면에 설치하여 실험하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 $M_f = 1.50$ 인 제트

스크리치 톤이 ER 에 의해 노즐 립 근처로 잘 모이는지 확인하기 위해, 무지향성 마이크를 노즐 립 근처 ( $x/D = 0.5, r/D = 1.2$ )에 노즐 출구 방향을 향하도록 설치하여 음압을 측정하였다. 노즐 원주 방향에 따라 음압의 차이가 있는 경우에는 음압이 큰 원주각 방향에서 측정하였다. Fig. 7 에는 6.4 초 동안 측정한 음압의 스펙트럼을 나타내었다. ER 을 설치하였을 때 음압이 가장 크기 때문에, ER 이 스크리치 톤을 노즐 립 근처에 잘 모을 수 있다는 사실을 확인하였다. 그러나 스크리치 톤의 주파수는 ER 및 기본노즐 (BN)의 경우가 비슷하였고, 이 주파수와 큰 차이를 나타내며 SDR 과 LDR 의 경우가 유사하였다. 노즐 상류 압력을 변화시키면서 제트 및 스크리치 주파수 변화를 관찰하면, 제트의 주 진동 모드와 부 진동 모드의 주파수가 서로 바뀌면서 스크리치 톤 주파수가 크게 변화한다고

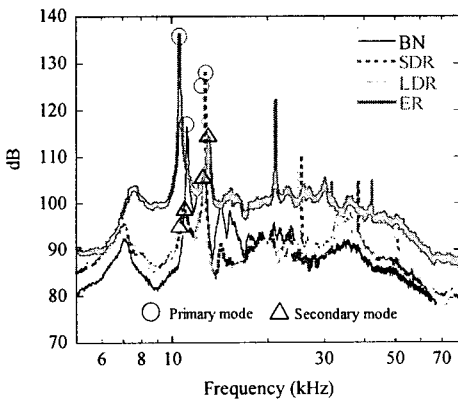


Fig. 7 Pressure spectrum levels of the jet noise at  $(x/D, r/D) = (0.5, 1.2), M_f = 1.50$

알려져 있다.<sup>(14,15)</sup> Fig. 7 에 나타나듯이, 설치된 반사판이 달라져도 주 진동모드와 부 진동 모드의 주파수가 바뀌었다. 따라서, 원주 방향에 따라 마이크를 설치하고 각 마이크 신호의 위상차를 분석하여 진동 모드를 알아내는 기존의 방법<sup>(14-17)</sup>을 이용하여 각 반사판을 설치하였을 때의 진동 모드를 확인하였다. BN 에서 분사된 제트는 빠르게 회전하는 (회전 주파수는 약 33 Hz) 플래핑 모드임을 확인하였고, ER 을 설치한 제트의 경우는 비교적 회전이 없는 플래핑 모드였으며, SDR 을 설치한 경우는 헬리컬 모드였다. 따라서,  $M_f = 1.50$  인 제트인 경우에는, ER 을 설치했을 때 노즐 립 근처에서 스크리치 톤의 크기가 가장 클 뿐만 아니라 진동 모드에도 변화가 있음을 알 수 있었다. 이런 변화가 제트의 혼합에 미치는 영향을 조사하기 위해, 시간 평균된 슐리렌 사진을 얻고 이를 Fig. 8 에 나타내었다.

Fig. 8 은 임의의 순간에 찍은 50 장의 사진을 시간 평균한 슐리렌 사진이다. BN 의 경우는 Fig. 8(a) 에서와 같이 제트의 확산이 적고 검은 색과 흰색이 반복되는 충격파셀 구조가 제트의 먼 하류

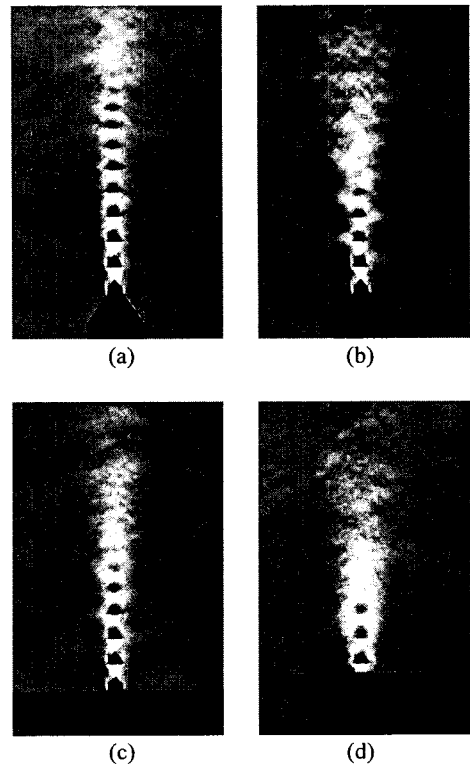


Fig. 8 Time-averaged Schlieren images of the jet at  $M_f = 1.5$ : (a) BN, (b) SDR, (c) LDR and (d) ER

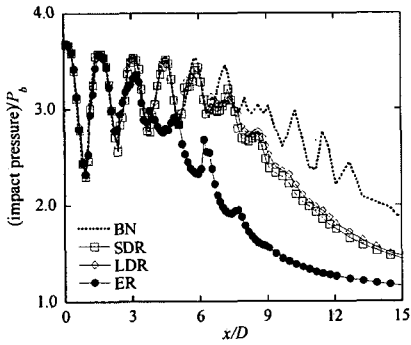


Fig. 9 Distributions of non-dimensionalized impact pressure on the centerline

까지 존재하고 있다. 이는 유동 방향에 대한 제트 속도의 감소가 늦기 때문이며, 제트의 주위 유체에 대한 엔트레인먼트율 (entrainment rate)이 낮다는 것을 의미한다. SDR의 경우, Fig. 8(b)에 보이듯이 제트의 확산은 커지고 충격파셀 구조의 개수도 적어져 약 5개 정도 나타난다. 따라서 주위 유체와의 혼합은, SDR을 설치했을 경우가 BN보다 잘 이루어 진다는 것을 알 수 있다. Fig. 8(c)의 LDR인 경우는 SDR보다 확산이 오히려 적어 보인다. Fig. 8(d)에 나타나듯이, 충격파셀 구조는 ER을 설치했을 때가 SDR보다 더 상류 영역에서 사라졌다. 따라서 슬리렌 사진의 결과로부터 ER의 경우에 제트의 확산이 가장 커서 제트 유동이 제일 먼저 아음속으로 되었다고 유추할 수 있다.

Fig. 9에는 제트의 중심축을 따라 총돌압력 (Pitot pressure, impact pressure)을 측정하여 나타내었다. 제트의 중심축은, 본 실험 전에 아음속 제트에 대해서 측정한 것으로 정하였다. 제트 유동 상류 영역에서는 총돌압력이 주기적으로 변한다. 이는 잘 알려진 바와 같이, 제트의 초음속 영역에서 충격파의 주기적인 반사에 의해 국소 마하수가 변하고 이로 인해 피토크관(Pitot tube)의 총돌압력에 주기적인 변화가 발생하기 때문이다. 충격파에 의한 변화를 제외시키기 위해 무차원화된 전압이 1.8 이하인 영역을 살펴보면, BN의 경우  $x/D \sim 14$ 인 영역까지도 충격파셀의 영향이 나타나며 하류 방향에 따른 전압의 감소율이 제일 낮다. 그 외의 경우에는  $x/D > 11$  영역에서 충격파 셀의 영향이 나타나지 않았고, SDR과 LDR의 전압 감소율은 거의 같으며 BN보다는 크지만 ER의 경우보다는 더 작다. 아음속 영역에서 총돌압력의 감소율이 크다는 것은, 제트의 확산이 커서 유속의 감소가 크다는 것을 나타낼 수 있다.

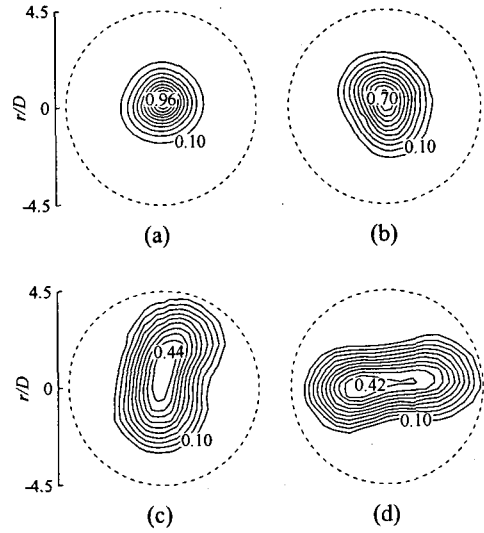


Fig. 10 Mach number contours at  $x/D = 15$ ,  $M_f = 1.50$ : (a) BN, (b) SDR, (c) ER and (d) SER

Fig. 10에는  $x/D = 15$ 인 평면에서 0.1 이상의 마하수 분포를 나타내었다. 마하수 분포는 기존의 방법<sup>(5)</sup>을 사용하여 측정하였다. 이 방법은, 측정 단면에서 유동이 아음속이고 정압이 대기압까지 충분히 팽창되었다는 가정이 필요하다. Fig. 9에 나타난 바와 같이, 이 위치에서 BN의 경우를 제외하면 제트 출구에서 충분히 떨어진 아음속 영역이었다. BN의 경우에도 총돌압력이 최대인 제트 축 영역에서 총돌압력비가 약 1.8이므로 피토크관에 대한 초음속 효과가 매우 작다고 가정해도 오차가 크지 않다고 판단하였다.<sup>(5)</sup> 또한, 제트 출구에서의 정압의 영향을 받지 않을 만큼 충분히 하류에서 측정되었다고 판단하였다. 다만 측정 단면에서 낮은  $Ma$  수가 측정되는 제트 외곽영역의 경우, 낮은 총돌압력 등으로 인한 오차가 클 수 있기 때문에  $Ma > 0.1$ 인 영역만을 나타내었다. 지금부터는 LDR과 SDR이 거의 유사한 경향을 나타내었기 때문에 LDR을 SER로 교체하였다. 마하수가 0.1인 폐곡선의 면적으로 판단할 때, 제트의 확산은 ER 및 SER의 경우에 가장 컸다. BN 및 SDR은 각각 회전하는 플래핑 모드 또는 헬리컬 모드의 특징을 나타냈으며, ER 및 SER의 경우에 일정한 방향으로의 플래핑 모드 특징을 나타냈다. SER에서는 제트가 반사판 홈에 수직인 방향으로 플래핑 운동을 하였다. 가장 높은 마하수는 측정면의 중심 근처에 위치 하였으며, 확산이 클수록 작았다. 마하수 분포를 적분하면 시간 평균된 질량 유량을 구할 수 있다.<sup>(7)</sup> 이를 출구 질량 유량으

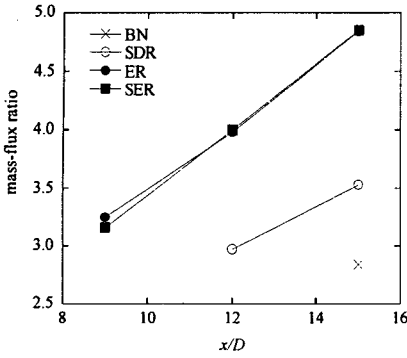
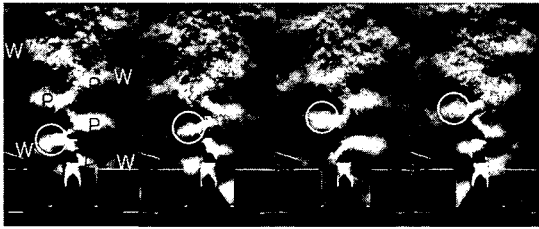
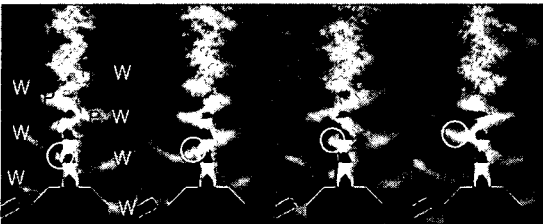


Fig. 11 Mass-flux ratio with  $x/D$  at  $M_f = 1.50$



(a)



(b)

Fig. 12 Phase-averaged Schlieren images at  $M_f = 1.50$ : (a) SER and (b) SDR

로 무차원화한 질량 유량비 (mass flux ratio) 로 정의하고 Fig. 11 에 나타내었다. 여기서 구한 값은 배압을 제트의 어느 위치에서 측정하는가에 따라 민감하게 변할 수 있으므로 다른 실험값과의 비교 보다는 여기서 실험된 경우들간에 상대적인 크기가 더 의미 있다.<sup>(18)</sup> ER 을 설치하였을 때 질량 유량비는 SDR 의 경우보다  $x/D = 15$  에서 약 37% 증가하였다.

평면 반사판이 제트 출구면에 설치된 경우는 제트 스크리치의 입사파와 반사파가 형성하는 정상파의 반노드(anti-node)가 노즐 립 근처에 위치하기 때문에 가장 큰 제트 스크리치를 발생시킨다.<sup>(9)</sup> ER 의 경우에서도 스크리치의 입사파와 반사파가 노즐 립에서 보강 간섭을 하도록 설계하였으나, 설계할 때의 제트와는 다른 진동모드가 형성되어

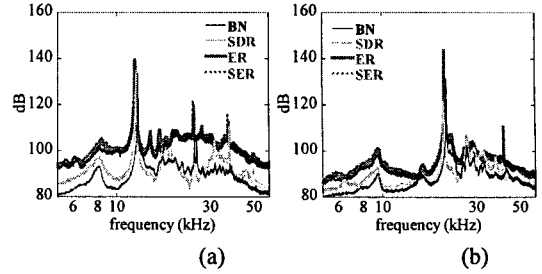


Fig. 13 Pressure spectrum level near the nozzle lip: (a)  $M_f = 1.32$  and (b)  $M_f = 1.14$

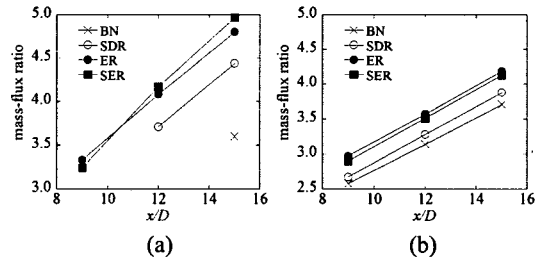


Fig. 14 Mass-flux ratio vs.  $x/D$ : (a)  $M_f = 1.32$  and (b)  $M_f = 1.14$

스크리치 톤의 주파수가 달라졌다. 따라서 가장 큰 보강 간섭 효과를 나타내지는 못한 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 노즐 립 근처에서 스크리치 톤이 SDR 경우보다 강한 이유는, 직접 도달하는 파의 에너지보다 ER 에 의해 모아지는 파의 에너지가 더 크기 때문이라고 생각된다.

Fig. 12 는 노즐 립 근처에서의 스크리치 톤을 기준 신호로 하여 1/4 주기 간격으로 동일한 위상에서의 순간 사진 10 장을 평균한 것이다. 이 사진에서 제트 외곽으로 나와있는 흰색(P) 영역은 유동 구조에 의해서 발생한 압력파<sup>(19,20)</sup> 로 유추되며, 이보다 제트 외곽으로 더욱 멀리 퍼져 있는 파동 형태의 무늬(W)는 상류로 전파하는 스크리치 톤이다. 제트가 적게 확산되어 상대적으로 더 넓은 소음장이 찍힌 Fig. 12(b)의 사진에서 스크리치 톤이 더욱 선명하게 나타난다. Fig. 12 에 나타나듯이, 원으로 표시된 압력파는 유동구조를 따라 하류로 흘러내려간다.

한편, 원으로 표시된 압력파의 크기는 SDR 을 설치했을 때보다 SER 일 때 더욱 크며, 이는 Fig. 12 에 나타난 바와 같이, 유동 구조가 더욱 크고 강하기 때문으로 유추된다. 이렇게 유동 구조가 강해진 이유는 첫째, 노즐 립 근처에 모아진 스크리치가 유동구조를 강하게 가진다고 둘째, 혼합이 더 잘되는 모드로 알려진 플래핑 모드<sup>(18)</sup>로 바뀌

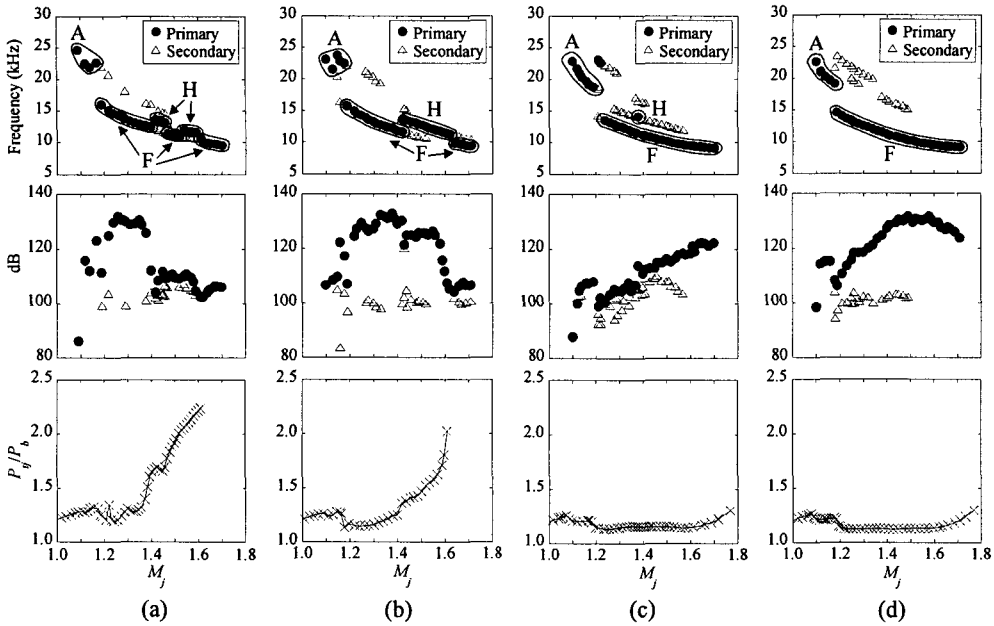


Fig. 15 Variations of jet-screch frequency and amplitude and normalized total pressure on the jet axis at  $x/D = 15$  with  $M_j$ : (a) BN, (b) SDR, (c) ER and (d) SER

었기 때문에 판단된다.

3.2  $M_j = 1.32$  및 1.14 인 제트

설계점과 다른 완전팽창마하수에서도 ER 이 영향을 주는지 알아보기 위해  $M_j = 1.32$  및 1.14 에서 실험하였다.

Fig. 13 에 나타나듯이 ER 을 설치했을 때 노즐 립 근처에서 스크리치 톤의 크기가 가장 컸다. 반사판에 따른 스크리치 톤 주파수의 큰 변화가 없었고, 이는 진동모드가 변하지 않았음을 의미한다.  $M_j = 1.32$  에서는 모두 안정한 플레핑 모드였고  $M_j = 1.14$  에서는 축대칭 모드였다. 제트의 확산에 미치는 영향을 살펴보기 위해  $M_j = 1.50$  에서와 마찬가지로 하류방향 거리에 따른 질량 유량비를 Fig. 14 에 나타내었다. 플레핑 모드로 진동하는  $M_j = 1.32$  인 제트의 경우에는  $x/D = 15$  에서 ER 을 설치하였을 때 SDR 보다 약 11% 증가하였으며, 축대칭 모드인  $M_j = 1.14$  에서는 약 8% 증가하였다. 이로부터 다른 완전팽창마하수에서도 타원 반사판이 확산을 증가시킨다는 사실을 알 수 있었다.

3.3  $M_j$  변화에 대한 타원 반사판의 영향

타원 반사판을 설치하였을 때 완전팽창마하수의 변화가 제트에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위해 음압은 BN 과 SDR 의 경우에는  $(x/D, r/D) = (1.6, 2.0)$ 에서 측정하고, ER 과 SER 경우에는  $(x/D, r/D) = (1.1, 5.1)$ 에서 측정하였다. 전압은  $(x/D, r/D) =$

$(15, 0)$ 에서 측정하였다. Fig. 15 의 위 첫째 줄의 그래프들은 마하수에 따른 스크리치 주 모드와 부 모드의 주파수를 나타낸다. 'A', 'H', 'F' 는 각각 축대칭, 헬리컬, 플레핑 모드를 의미한다.  $M_j$  가 변화할 때 주파수의 급격한 변화 및 부 모드들의 존재는 기존 연구들<sup>(14,15)</sup>에 의해 널리 알려져 있다. BN 의 경우는 SDR 과는 달리  $M_j = 1.50$  부근에서 헬리컬 모드가 아닌 회전하는 플레핑 모드였으며, ER 의 경우는 헬리컬 모드가 아주 적은 영역에서만 존재하였고, SER 의 경우에는 헬리컬 모드가 거의 존재하지 않았다. 이렇게 모드가 달라지는 것은 주 모드와 부 모드의 성장이 노즐 상류 반사판의 형태에 크게 영향 받기 때문인 것으로 보인다. Fig 15 의 둘째 줄에 있는 그래프들은 각 마하수에서 존재하는 모드들의 크기를 나타낸다. SDR 의 경우는 주 모드와 부 모드 사이에 크기가 분명한 차이를 보인다. SDR 의 경우에는 헬리컬 모드를 나타내나 BN 및 ER 의 경우에는 헬리컬 모드를 나타내지 않는 마하수 영역에서는, 주 모드가 확실히 나타나지 않고 주모드와 부모드의 크기가 엇비슷하다 (Mode Competition). SER 의 경우에는 헬리컬 모드가 전혀 나타나지 않으며, 이는 반사판의 형태가 헬리컬 모드 대신 플레핑 모드를 더 잘 발달시키는 형태이기 때문으로 생각된다. 여기서 스크리치 톤의 크기는 근접 소음장에서 측정되었고 측정 위치도 모두 같지 않으므로, 다른 반사판과 스크리

치 크기 비교를 하지 않도록 주의한다.

정성적으로 확산의 효과를 보기 위해 제트 중심부를 선택하여 전압을 측정<sup>(11)</sup>하고 이를 Fig. 15의 세번째줄의 그래프에 나타내었다. 제트의 중심이 크게 편향되지 않거나 제트가 갈라지지 않는 경우에는 중심부 제트 충돌압의 감소가 엔트레인먼트율의 증가를 나타낼 수 있다. 그림에 나타나듯이 ER 및 SER 을 설치하였을 때는 거의 전 마하수 영역에서 낮은 전압이 계속 되어 제트의 엔트레인먼트율이 높음을 간접적으로 알 수 있다.

#### 4. 결론

제트 스크리치의 되먹임 발생이론을 기본으로 하여 노즐 립 주위로 스크리치 톤을 모아주는 새로운 반사판을  $M_f = 1.50$  인 제트의 스크리치 파를 기준으로 제작하였다. 제트축을 포함한 단면에서 반사판 곡면은 타원 형상이고, 그 타원의 두 초점은 각각 스크리치 파면의 생성부 및 노즐 립 영역에 위치한다.  $M_f = 1.50$  인 제트에서 노즐 립 근처의 음압은 ER 을 설치하였을 때 가장 크게 증가하였고 진동모드도 바뀌었으며, 그로 인해 제트의 확산이 크게 증가하였다. 반사판의 영향에 따라 진동모드가 바뀌지 않는  $M_f = 1.32$  (플래핑 모드)와  $M_f = 1.14$  (축대칭 모드)에서도  $M_f = 1.50$  제트에서 설계한 ER 을 설치하였을 때 제트의 확산은 증가하였다. 그러나 증가량은  $M_f = 1.50$  제트인 경우보다는 작았다.  $M_f$ 의 변화에 따른 영향을 살펴볼 때, 타원반사판을 설치한 제트의 진동모드는 평면반사판을 설치한 제트와는 달리 헬리컬 모드가 잘 발달하지 못했으며, 축대칭 모드인 영역을 제외하면 확산이 크게 증가하는 것으로 계속되었다.

#### 참고문헌

- (1) Gutmark, E., Schadow, K. C. and Yu, K. H., 1995, "Mixing Enhancement in Supersonic Free Shear Flows," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 27, pp. 375 ~ 417.
- (2) Schadow, K. C., Gutmark, E. and Wilson, O. K., 1989, "Combustion Related Shear Flow Dynamics in Elliptic Supersonic Jets," *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 10, pp. 1347 ~ 1353.
- (3) Guirguis, R. H., Grinstein, E. F., Young, T. R., Oran, E. S. and Kailasath, K., 1987, "Mixing Enhancement in Supersonic Shear Layer," *AIAA Paper* 87-0373.
- (4) 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.
- (5) Ibrahim, M. K. and Nakamura, Y., 2001, "Effects of Rotating Tabs on Flow and Acoustic Fields of Supersonic Jets," *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 4, pp. 745 ~ 748.
- (6) 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.
- (7) Raman, G. and Rice, E. J., 1995, "Supersonic Jet Mixing Enhancement Using Impingement Tones from Obstacles of Various Geometries," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 454 ~ 462.
- (8) Powell, A., 1953, "On the Mechanism of Choked Jet Noise," *Proceeding of Physical Society of London*, Vol. B66, pp. 1039 ~ 1056.
- (9) Poldervaart, L. J., Wijnands, A. P. J. and Bronkhorst, L., 1973, "Aerosonic Games with the Aid of Control Elements and Externally Generated Pulses," *AGARD CP-131*, (20), pp. 1 ~ 4.
- (10) Nagel, R. T., Denham, J. W. and Papathanasio, A. G., 1983, "Supersonic Jet Screech Tone Cancellation," *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 11, pp. 1541 ~ 1545.
- (11) Rice, E. J. and Raman, G., 1997, "Feedback and Receptivity During Jet Screech: Influence of an Upstream Reflector," *AIAA Paper* 97-0144.
- (12) Glass, D. R., 1968, "Effects of Acoustic Feedback on the Spread and Decay of Supersonic Jets," *AIAA Journal*, Vol. 6, No. 10, pp. 1890 ~ 1897.
- (13) Krothapalli, A., Hsia, Y., Baganoff, D. and Karamcheti, K., 1986, "The Role of Screech Tones in Mixing of an Underexpanded Rectangular Jet," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 106, No. 1, pp. 119 ~ 143.
- (14) Ponton, M. K. and Seiner, J. M., 1992, "The Effects of Nozzle Exit Lip Thickness on Plume Resonance," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 154, No. 3, pp. 531 ~ 549.
- (15) Powell, A., Umeda, Y. and Ishii, R., 1992, "Observations of the Oscillation Modes of Choked Circular Jets," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 92, No. 5, pp. 2823 ~ 2836.
- (16) Ponton, M. K. and Seiner, J. M., 1995, "Acoustic Study of B Helical Mode for Choked Axisymmetric Nozzle," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 413 ~ 420.
- (17) Gutmark, E., Schadow, K. C. and Bicker, C. J., 1989, "Mode Switching in Supersonic Circular Jets," *Physics of Fluids*, Vol. 1, No. 5, pp. 868 ~ 873.
- (18) Zaman, K. B. M. Q., 1999, "Spreading Characteristics of Compressible Jets from Nozzles of Various Geometries," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 383, pp. 197 ~ 228.
- (19) Panda, J., 1999, "An Experimental Investigation of Screech Noise Generation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 378, pp. 71 ~ 96.
- (20) Umeda, Y. and Ishii, R., 2001, "On the Sound Sources of Screech Tones Radiated from Choked Circular Jets," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 110, No. 4, pp. 1845 ~ 1858.