

論文

스크린 설치에 따른 초음속 제트유동 변화에 관한 연구

이 열*

Study of Screened Supersonic Jet Flow Fields

Yeol Lee*

ABSTRACT

Screen can provide any disturbed resistance that affects the change in characteristics of turbulence, velocity and pressure distributions of the flow field, and thus it has been widely used to control the flow. Some previous related studies for compressible flows have limitations such as, considering relatively low-Mach-number flows in the range of 0.3 ~ 0.7, and not observing the detailed shock structures of the flow fields. An experimental study on highly compressible axi-symmetric supersonic jet flow fields behind wire-gauze screen has thus been carried out. Continuous/instantaneous flow images by Schlieren flow-visualization technique and the information of Pitot pressure/flow-noise measurements of the flow field behind the screen for various jet expansion conditions have been obtained. Effects of various porosity and inclination angles of the screen at the nozzle exit have also been investigated, and the experimental results have been compared to the case with no screen installed.

초 록

스크린은 유동저항을 일으켜 유동의 난류, 속도 및 압력 특성을 변화시킬 수 있으며, 이에 따라 유동제어 방법으로 널리 사용되어 왔다. 과거 관련 분야 연구들은 마하수가 0.3에서 0.7 사이의 유동에 제한되어 왔고, 초음속 유동에서 나타나는 충격파 구조에 대한 연구는 수행되어진 바 없다. 따라서 본 연구에서는 철선으로 엮어진 스크린 후방에서 나타나는 축대칭 초음속 제트유동장에 대한 실험적 관찰이 이루어졌다. 다양한 제트유동 팽창조건에 대하여 스크린 후방에서 연속 및 순간광원을 이용한 쉐리렌 유동가시화와 피토압력/유동소음 측정이 이루어졌다. 노즐 출구에 설치된 스크린의 다공도와 설치 기울기 변화에 따른 영향도 관찰되었으며, 얻어진 결과는 스크린이 설치되지 않은 경우와 서로 비교되었다.

Key Words : Compressible Flow(압축성 유동), Supersonic Jet(초음속 제트), Screened Flows(스크린유동), Flow Control(유동제어)

1. 서 론

유동의 속도 및 압력분포 제어는 유체공학에서

매우 중요하다. 스크린은 유동의 속도와 압력 분포의 비균일성을 제거하거나 혹은 임의로 만들어 낼 수 있는 유동제어 방법으로 널리 사용되어 왔다. 또한 스크린은 유동저항을 유발시켜 유동방향을 변화시킬 수 있고, 특히 스크린 후방에서의 난류 강도 변화와 관련하여 그 응용성이 매우 크다.

스크린을 통과하면서 나타나는 후방 유동장의 변화는 매우 복잡하기 때문에 초기에 수행되었던 이론적

† 2005년 3월 21일 접수 ~ 2005년 7월 2일 심사완료

* 정희원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail : ylee@hau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

접근 방법들 [1]-[2]은 그 적용이 제한되어 있으며, 기타 과거 스크린 유동 관련 연구들의 대부분은 유동의 속도가 상대적으로 작고 유동의 압축성 효과가 크지 않은 경우에 한정되어 왔다. 압축성 유동의 경우, 스크린 후방 유동의 압력손실 [3] 및 속도분포 제어 [4], 그리고 난류특성 변화에 관한 연구 [5] 등이 진행된 바 있으나, 모두 마하수 0.3에서 0.7사이의 아음속 유동의 경우에 국한되어 있다. 또한 과거 초음속 유동의 경우에 스크린 후방에서 나타나는 항력변화에 관한 연구 [6]와 최근 다공판과 마하수 2.0 유동과의 간섭에 관한 실험적 연구 [7]등이 제한적으로 진행된 바 있으나, 초음속 유동에서 나타나는 충격파의 구조와 관련된 연구는 국내외에서 매우 미약한 실정이다.

축대칭 초음속 제트유동은 비행체 엔진의 추력 설계에서부터 연소기 내부의 연료와 공기의 혼합현상 [8]-[9], 그리고 제트소음(screech) [10]에 이르기까지 유체공학에서 그 응용범위가 넓다. 따라서 본 연구에서는 축대칭 초음속 제트유동이 노즐 출구에 설치된 스크린 후방에서 나타나는 변화가 실험적으로 관찰되었다. 기울어진 스크린 후방에서 유동 방향이 변화하는 [3]-[4] 특성을 이용하여 추력제어 [11]-[12]에 응용할 수 있는 가능성을 관찰하였다.

이를 위하여 축대칭 초음속 노즐 출구에 스크린이 유동방향에 대하여 수직, 혹은 기울어 설치되었을 때, 스크린 후방에서 나타나는 피도압력 변화가 측정되었고 연속광원 및 순간광원을 이용한 쉐리렌 장치에 의한 유동가시화 및 유동소음 변화에 대한 관찰이 이루어 졌다. 실험에서 얻어진 결과는 스크린이 설치되지 않은 초음속 제트 유동장과 서로 비교되었다. 아울러 스크린의 다공도(porosity) 변화, 스크린의 설치 기울기 각의 차이, 그리고 제트유동의 팽창변화에 따른 영향에 관한 관찰이 이루어졌다.

II. 실험장치 및 방법

2.1 초음속 제트유동 장치

본 연구에서는 한국항공대학교 고속공기역학 실험실의 초음속제트 발생장치가 사용되었다. 실험실 외부에 설치된 고압용 공기압축기는 공기를 약 25기압까지 압축시킬 수 있으며, 압축된 공기는 냉각기와 3단계의 필터, 건조기를 통과하여 공기저장탱크(3m³, 25기압)에 저장되고, 탱크의 압축된 공기는 연결 관을 통하여 실험실 내부로 유입된다.

초음속 제트를 만들기 위한 축대칭 수축-확산

노즐은 MOC(Method of Characteristics) 방법을 이용하여 설계 제작되었다. 네 개의 서로 다른 노즐이 제작되어 제트출구 마하수를 1.0, 1.5, 2.0, 2.5로 각각 조절할 수 있으며, 이때 제트노즐 출구의 내경은 모두 26 mm이며, 이를 기준으로 한 레이놀즈수는 7.8E+5 ~ 5.4E+6의 범위에 있다. 노즐유동의 전온은 전압변화에 의한 제트의 팽창에 관계없이 약 293 K로 동일하였다.

2.2 스크린과 설치각도

Fig. 1에는 본 연구에서 응용된 두 가지 스크린의 형상이 나타나 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 스크린은 단면이 원형인 철선이 정사각형 형태로 종횡으로 엮어져 이루어진(wire-gauze) 형태이며, 철선 교차부분에 용접은 되어 있지 않다. 본 연구에서는 스크린의 다공도 변화에 따른 제트유동의 변화를 관찰하기 위하여 다공도가 0.75, 0.62인 두 가지 스크린 경우에 대하여 실험이 수행되었다.

제트노즐 출구에 설치된 스크린은 얇은 두 개의 원판 사이에 위치하여 노즐 출구에 고정되어 있다. 두 개의 원형 철판 사이에 위치한 네 개의 파이프의 길이를 조정함으로써 스크린의 위치를 원하는 곳에 고정시킬 수 있도록 설계되어 있으며, 아울러 제트 유동방향에 대하여 임의의 각도를 가지고 기울어질 수 있도록 설계되어 있다. Fig. 2에는 제트 주유동 방향에 대하여 기울어진 스크린의 설치 구조가 나타나

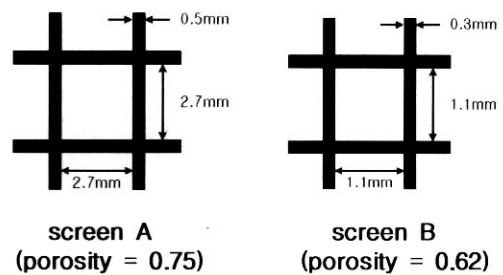


Fig. 1. Rectangular wire-gauze screens

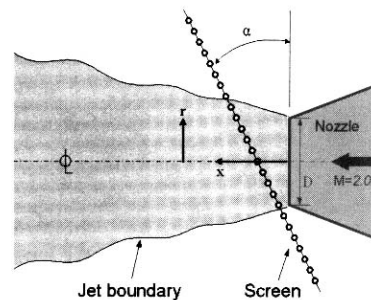


Fig. 2. Installation of screen

있다. 본 연구에서는 스크린이 수직으로 설치된 경우(Fig. 2에서 $\alpha = 0^\circ$)와 기울어져 있는 경우에 대한 후방 유동장 변화의 비교가 수행되었다.

2.3 피토압력 측정 및 유동가시화

제트 유동장의 피토압력 분포를 측정하기 위하여 초음속용 피토관과 정압관이 제작되어 3축 이송장치에 부착되어 사용되었으며, 이때 사용된 피토관의 측정부 내경과 외경은 각각 0.5 mm와 2 mm 이다. 또한 두 개의 쉘리렌 거울(직경 125 mm, focal length=1000 mm)과 두 개의 광학거울을 사용한 변형된 Z-type 쉘리렌 장치를 이용하여 제트유동장의 가시화가 이루어졌다. 사용된 광원은 순간광원(약 1 micro-second)과, 또는 경우에 따라 연속광원(tungsten filament)이 각각 사용되었으며, 쉘리렌 영상은 CCD 카메라(pulnix, TMC-74)를 통하여 컴퓨터에 연결되어 처리, 저장되었다.

또한 스크린이 설치될 때와 설치되지 않을 때의 초음속 제트유동 하류에서 나타나는 소음도(noise level)가 소음계(B&K type 2236 SLM)를 이용하여 측정 비교되었다.

III. 실험결과 및 고찰

3.1 수직스크린 유동

Fig. 3은 마하수 1.5와 2.0 두 노즐의 출구에 스크린(다공도=0.75)이 유동방향에 대하여 수직으로 설치되어 있을 때, 제트유동의 전압(p_t) 변화

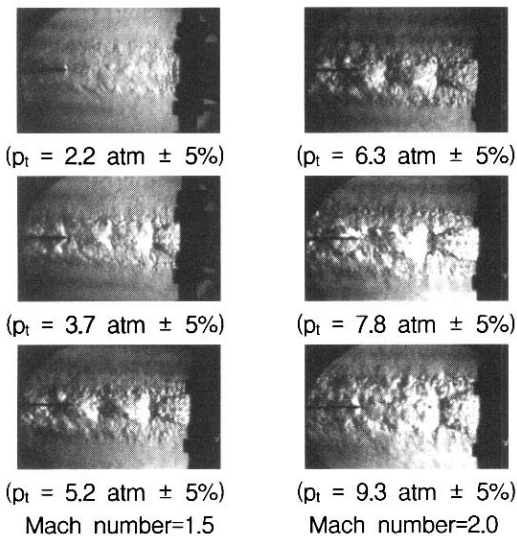


Fig. 3. Schlieren images(vertical screen)

에 따른 제트유동의 유동가시화(순간광원 사용)의 결과가 나타나 있다. 유동의 방향은 오른쪽에서 왼쪽으로 나타나며, 마하수 1.5 노즐의 경우는 유동의 전압이 3.7 atm일 때, 그리고 마하수 2.0 노즐의 경우는 유동의 전압이 7.8 atm일 때 제트 유동은 노즐 출구에서 완전팽창 되고 있다.

노즐출구에 스크린이 수직으로 설치되어 있는 경우, 스크린 후방에는 마하 디스크를 동반한 경사충격파와 마하반사(Mach reflection) 구조가 제트의 팽창정도에 관계없이 항상 나타나는데, 유동전압이 높아지고 제트유동이 과소팽창 되면서 이러한 마하반사 구조가 점점 커지고 강해지는 것을 알 수 있다. 그림에는 압력측정을 위하여 설치된 피토관이 스크린 후방에 나타나 있는데, 피토관 전방에 충격파가 형성되어 있는 것을 볼 수 있고, 이는 마하 디스크 후방에 급속히 줄어든 제트유동 속도가 다시 초음속으로 재가속되고 있음을 나타내고 있다. 스크린의 다공도가 0.62로 작아질 때 전체적인 제트 유동장의 구조는 Fig. 3에 제시된 바와 큰 차이가 없음이 확인되었다.

Fig. 4에는 다공도=0.75인 스크린이 마하수 2.0인 제트 유동방향에 대하여 수직으로 설치되어 있는 경우와 스크린이 설치되어 있지 않은 경우에 대하여 후방 제트유동장의 중심축 상 피토압력 변화가 비교 되어 있다. 그림에서 피토압력(p_{pitot})은 유동 전압에 대하여 무차원화 되어 있으며, 그림에서 x는 노즐출구로부터 유동방향의 거리, D는 노즐출구 직경을 나타내고 있다(Fig. 2 참조).

스크린이 설치되지 않은 경우에 피토압력은 노즐 출구에서 충격파 구조(diamond cell)를 지나면서 반복적으로 변화하다가 점차 하류 방향으로 점진적으로 감소하고 있다. 노즐 출구에 스크린이 수직으로 설치되어 있는 경우, 피토압력은 스크린 후방 직후 급격히 감소하였다가 서서히 회복되고 있음을 알 수 있다. 이러한 압력변화 결과는 Fig. 3에 나타난 유동 가시화에서 나타난 마하반사 구조와 일치하고 있다. 그러나 스크린 후방에서 나타나는 이러한 압력변화 및 유동의 재가속 현상은 일반적으로 제트가 과소팽창 되었을 때 나타나는 마하반사 구조와는 다름이 확인되고 있다. 아울러 스크린 후방 제트유동의 음속점(sonic point)의 위치는 스크린이 설치되는 경우 상류로 약간 당겨지는 것을 알 수 있다.

또한 별도의 그림으로 제시되어 있지는 않지만, 제트유동의 팽창변화(유동 전압력 변화)에 따른 제트 중심축 상 피토압력의 변화는 제트유동의 팽창정도에 큰 영향을 받지 않으며, 제트유동이 과소팽창 될 때 피토압력의 감소 및 회복의 정도가 약간 둔화되고 있으나 그 차이는 크지 않음이 관찰되었다. 스

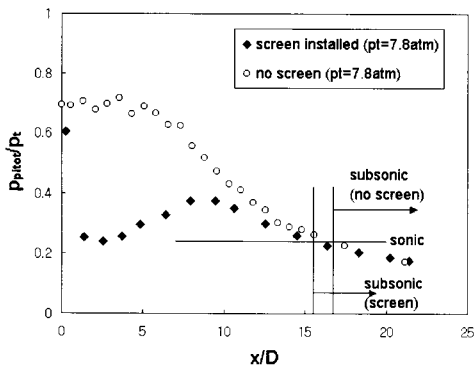


Fig. 4. Pitot pressure along the centerline (Mach 2.0, $p_t = 7.8 \text{ atm}$)

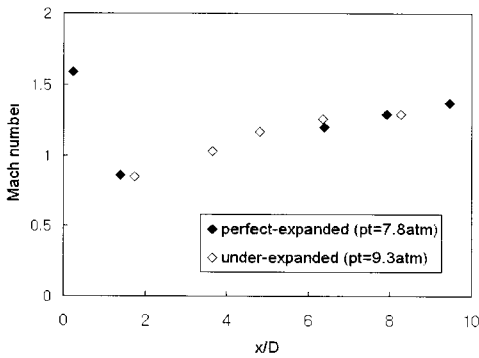


Fig. 5. Flow reacceleration after screen

스크린의 다공도가 0.62(Fig. 1에서 스크린 B)로 달라진 경우에 대하여 얻어진 중심축에서의 피토압력 변화는 역시 Fig. 4에 제시된 내용과 큰 차이가 없음이 확인되었다.

중심축을 따라 측정된 정압과 피토압을 이용하여 계산된 마하수의 변화가 Fig. 5에 나타나 있다. 앞서 설명한 바와 같이 제트의 팽창 정도에 따른 유동의 재가속 경향에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

3.2 기울어진 스크린 유동

Fig. 6은 마하수 2.0 노즐의 출구에 스크린이 유동방향에 대하여 30° 로(Fig. 1에서 $\alpha = 30^\circ$) 설치되어 있을 때, 유동의 전압 변화에 따른 제트 유동의 유동가시화(연속광원 사용)의 결과가 나타나 있다. 노즐의 전압이 7.8 atm일 때 제트의 주유동은 노즐 출구에서 완전팽창 되고 있다. 그림에서는 스크린 다공도의 변화에 따른 영향도 같이 비교되어 있는데, 좌측 단은 스크린의 다공도가 0.75인 경우를, 우측 단은 스크린의 다공도

가 0.62인 경우의 유동가시화 결과를 나타내고 있다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이, 스크린이 기울어지면서 스크린 후방 제트유동 구조의 중심축에 대한 상하 대칭성은 무너지고, 마하 디스크는 위쪽으로 기울어져 나타나고 있음을 알 수 있다. 제트의 전압이 증가하고 유동이 과소팽창으로 바뀌면서 마하디스크가 기울어지는 정도가 더욱 크게 나타나는 것이 확인되고 있다. 또한 스크린의 다공도 변화에 따른 차이는 전체적으로 크지 않으나, 스크린의 다공도가 작아지면서 스크린 후방 유동의 주방향이 아래쪽으로 기울어지는 경향을 관찰할 수 있다.

이러한 경향은 제트 주유동이 과대팽창 될 때($p_t = 4.5 \text{ atm} \pm 5\%$, Fig. 6 우측단) 더욱 확연히 나타나며, 이러한 스크린 후방 주유동 방향의 기울어짐은 비압축성 저속유동이 기울어진 스크린을 통과 하면서 변화하는 유동방향과 동일함을 알 수 있다. 그러나 이러한 초음속 제트 주유동 벡터 변화는 충격파 형성과 그에 따른 3차원 유동의 효과에 의한 것이며, 비압축성 유동의 경우에 스크린을 통과하면서 나타나는 유동벡터 변화에 대한 이론(actuator sheet theory, [3])을 적용하기는 불가능한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 마하수 2.0 노즐의 출구에 스크린이 유동방향에 대하여 45° 로 설치되어 있을 때, 제트 유동의 전압 변화에 따른 유동의 유동가시화(연속광원)의 결과가 나타나 있다. Fig. 6의 경우와

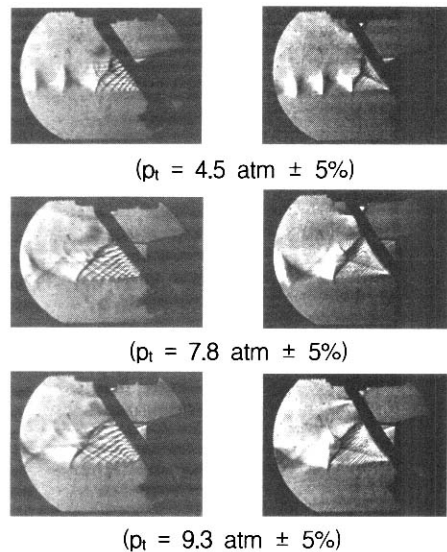


Fig. 6. Schlieren images for 30° -inclined screen (Mach 2.0, left column: porosity of 0.75, right column: porosity of 0.62)

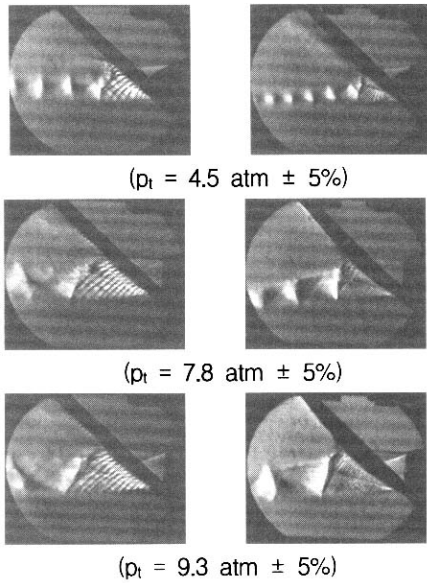


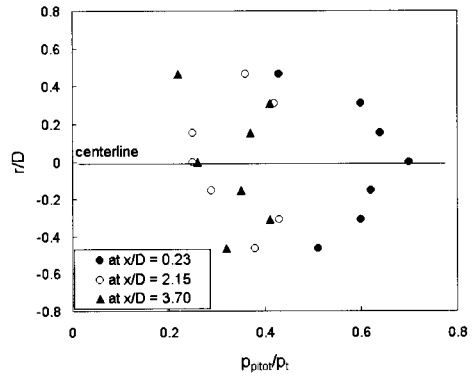
Fig. 7. Schlieren images for 45°-inclined screen (Mach 2.0, left column: porosity of 0.75, right column: porosity of 0.62)

마찬가지로 스크린 다공도의 변화에 따른 영향도 같이 비교하기 위하여, 좌측 단은 스크린의 다공도가 0.75인 경우를, 우측 단은 스크린의 다공도가 0.62인 경우를 나타내고 있다.

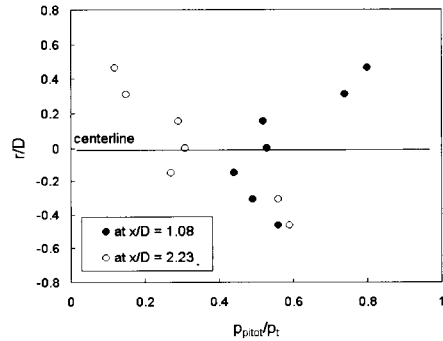
스크린의 기울기가 커짐에 따라 제트유동 구조의 중심축에 대한 상하 대칭성은 무너지고, 마하 디스크의 위쪽 치우침이 더욱 강하게 나타나는 등 전체적인 유동구조는 스크린이 30°로 기울어진 경우와 큰 차이가 없다. 그러나 스크린의 다공도가 0.75에서 0.62로 작아지면서 스크린 전방 경사면을 따라 상부 쪽으로 이동하는 유동의 양이 커지고, 스크린 후방 유동의 주방향도 중심축에 대하여 아래쪽으로 기울어지는 현상이 더욱 확연하게 나타나고 있다. 위에서 제시된 Fig. 6과 Fig. 7에서 초음속 제트유동이 스크린 후방에서 기울어지는 정도에는 스크린의 다공도 및 제트 주유동의 팽창정도가 관여하고 있으며, 향후 각 변수의 영향과 관련한 보다 정량적인 연구가 추가로 진행될 예정이다.

스크린의 다공도가 작아진 경우에 대한 보다 자세한 유동관찰을 위하여, Fig. 8-a에서는 스크린(다공도=0.62)이 노즐 출구에서 수직으로 설치되어 있는 경우 스크린 후방의 서로 다른 축 방향 위치에서 피토압력 분포 변화가 나타나 있다. 스크린이 설치되어 있지 않은 경우 일반적으로 피토압력은 노즐 출구에서 반경방향으로 거의 균일하게 나타나는 것에 비하여, 노즐 출구에 스크린이 설치된 경우 피토

압력은 스크린 바로 후방($x/D = 0.23$) 중심축에서 크게 나타나다가, 측정위치가 후방으로 이동되면서($x/D = 2.15, 3.70$), 마하디스크의 영향으로 중심축에서 낮은 압력이 나타나는 결과를 보여 주고 있다. Fig. 8-b에서는 동일한 스크린이 노즐 출구에서 $\alpha = 30^\circ$ 로 기울어진 경우 피토압력의 변화가 나타나 있는데, Fig. 8-a와는 달리 피토압력은 중심축에 대하



(a) vertical screen ($\alpha = 0^\circ$)



(b) inclined screen ($\alpha = 30^\circ$)

Fig. 8. Radial variation of Pitot pressures (Mach 2.0, screen porosity=0.62, $p_t = 7.8$ atm)

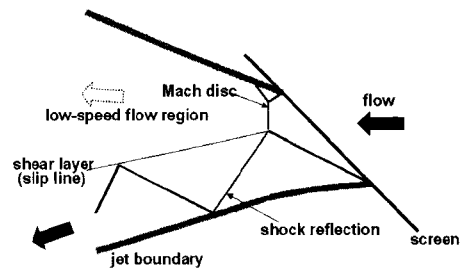


Fig. 9. Flow model of the inclined-screened supersonic flow

여 비대칭으로 나타나고, 상부의 높은 피토압력은 ($x/D = 1.08$) 마하디스크의 영향으로 후방으로 가면서 ($x/D = 2.23$), 갑자기 감소하는 경향을 볼 수 있다.

이러한 유동가시화 및 압력측정 결과를 이용하여 기울어진 스크린 후방의 충격파와 관련된 유동구조를 Fig. 9에 제시하였다. 즉 스크린 다공도가 0.62로 작고 45° 로 기울어진 스크린 후방 유동에서, 상부로 치우쳐진 마하디스크 후방에서 저속유동이 나타나고, 이 저속유동과 그 하부에서 나타나는 고속유동 사이에 전단층이 형성된다. 마하반사로 나타난 하부 경사충격파가 이 전단층에서 반사되면서 전체적인 주유동 벡터가 아래쪽으로 기울어져 나타나고 있다. 마하디스크 이후 상부에서 나타나는 충격파와 제트경계와의 반사구조는 매우 약하여 제트경계와 뚜렷한 구분이 되고 있지 않다.

3.3 유동소음 변화

일반적으로 유동소음은 그 측정방향에 따라 민감하게 나타날 수 있다. 본 연구의 소음측정은 소음계 (B&K type 2236 SLM)를 제트유동 축에 수직으로 1m 간격을 유지한 채로 다양한 유동하류 위치에 대

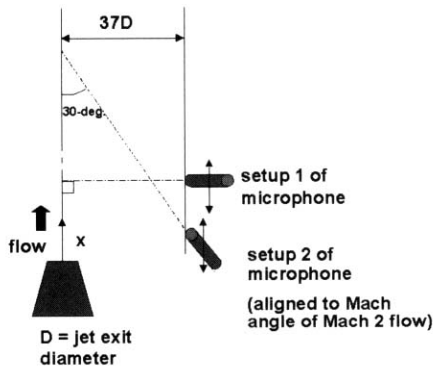


Fig. 10. Setup of the sound level meter

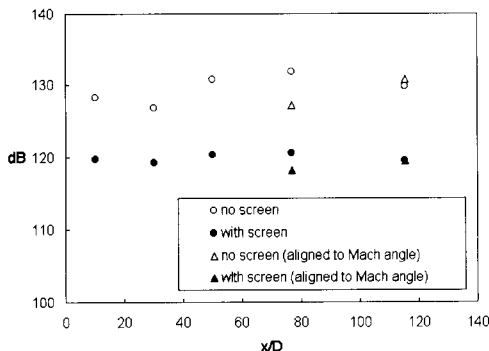


Fig. 11. Noise levels for $M=2.0$, $p_t=7.8atm$

하여 진행되었다. 아울러 소음계의 설치방향이 제트 출구 마하수 2.0의 마하각(Mach angle)인 30° 로 기울어 있을 경우 소음도의 변화도 측정되었고(Fig. 10 참조), 완전팽창 되는 마하수 2.0 제트유동에 대한 측정결과가 Fig. 11에 제시되어 있다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 제트유동 후방에서 나타나는 소음도는 노즐 후방의 측정위치와 소음계의 설치방향에 따라 크게 달라지지는 않으나, 스크린을 설치함으로써 전반적인 유동소음의 감소를 확인할 수 있었다.

III. 결론

초음속 노즐 출구에 설치된 스크린의 다공도와 설치각도 변화에 따른 스크린 후방유동 변화에 대한 관찰이 이루어졌다. 노즐출구에 스크린이 설치된 경우, 스크린 후방 제트 유동장은 마하디스크를 동반한 경사충격파 구조가 형성되고, 기울어진 스크린 후방에서는 마하반사로 인한 후방 하부 경사충격파가 전단층에서 반사되면서 전체적인 주유동 벡터가 아래쪽으로 기울어지는 현상이 관찰되었다. 이러한 스크린 후방의 유동방향 변화 구조는 스크린의 다공도와 제트 주유동의 팽창정도에 영향을 받고 있음이 확인되었다. 또한 스크린을 설치함으로써 전반적인 유동소음의 감소가 관찰되었다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국항공대학교 교비지원 연구비에 의하여 지원된 연구의 결과임.

참고문헌

- 1) Elder, J. W. "Steady flow through non-uniform gauzes of arbitrary shape", *J. Fluid Mech.*, Vol. 5, 1959, pp. 355-363.
- 2) J.-K. Koo and D. F. James, "Fluid flow around and through a screen", *J. Fluid Mech.*, Vol. 60, 1973, pp. 513-538.
- 3) Pinker, R. A., Hervert, M. V., "Pressure loss associated with compressible flow through square-mesh wire gauzes", *J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 9, 1967, pp. 11-23.
- 4) Livesay, J. L., Laws, E. M., "An approximate method for the design of shaped gauze screen velocity profile generators", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 29, pp. 29, 1974, pp. 306-308.
- 5) P. J. Zwart, R. Budwig, and S. Tavoularis,

- "Grid Turbulence in Compressible Flows", *Experiments in Fluids*, Vol. 23, Springer-Verlag, 1997, pp. 520-522.
- 6) E. R. Benton and D. A. Knapton, "Supersonic drag of porous wire screens", *ARS Journal*. Vol. 32, 1962, pp. 1608-1610.
- 7) S. V. Guvernuyuk, K. G. Savinov, G. S. Ulyanov, "Supersonic Flow Round Blunt Perforated Screens", translated from *Izvestiya Akademi Nauk SSSR, Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, No. 1, 1985, pp. 143-149.
- 8) Zaman K. B. M. Q., "Spreading Characteristics of Compressible Jets from Nozzles of Various Geometries", *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 383, 1999, pp. 197-228.
- 9) M. Samimy, Zaman, K. B. M. Q., M. F. Reeder, "Effect of Tabs on the Flow and Noise Field of an Axisymmetric Jet", *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 4, 1993, pp. 609-619.
- 10) Yu, Y.-K., Chen, R.-Y., Chew, L., "Screech Tone Noise and Mode Switching in Supersonic Swirling Jets", *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 11, 1998, pp. 1968-1974.
- 11) David J. Wing, "Static Investigation of Two Fluidic Thrust-Vectoring Concepts on a Two Dimensional Convergent Divergent Nozzle", NASA Technical Memorandum 4574, 1994.
- 12) R. Balu, "Analysis of performance of a hot gas injection thrust vector control system", *Journal of propulsion and power*, Vol. 7, No. 4, 1991, pp. 580-585.