

초음속 과팽창 제트에서 발생하는 소음현상에 관한 실험적 연구

권용훈* · 임채민** · 김희동***

An Experimental Study on Noise Phenomena in Supersonic Over-expanded Jet

Yonghun Kweon* · Chaemin Lim** · Heuydong Kim***

ABSTRACT

The present paper describes an experimental work to investigate a transonic resonance in supersonic jet that is discharged from a convergent-divergent nozzle. When the nozzle runs at low nozzle pressure ratios, the shock occurs within the divergent section of the nozzle. The transonic resonance of a jet flow is generated by an emission of strong acoustic tones due to the unsteadiness of the shock. A Schlieren optical system is used to visualize the supersonic jet flow. In order to specify the flow resonance of a jet, acoustic measurements are performed to obtain noise spectra. The acoustic characteristics of transonic resonance are compared with those of screech tones. The results obtained show that unlike screech frequency, the transonic resonance frequency somewhat increases with increasing the nozzle pressure ratio.

초 록

본 논문은 초음속 제트에서 발생하는 천음속 공명현상에 대한 실험적 연구를 기술한다. 초음속 노즐이 매우 낮은 압력비에서 작동될 때, 노즐내의 확대부에서 충격파가 발생한다. 천음속 공명현상은 이러한 충격파의 불안정한 진동에 의한 강한 음파의 발생에 기인한다. 제트 유동장은 쉐리엔 광학장치를 이용하여 가시화 하였다. 제트유동의 천음속 공명현상을 조사하기 위하여, 음향측정을 수행하였다. 천음속 공명현상의 음향특성은 스크리치 톤과 비교하였다. 본 연구에서 얻어진 결과에 의하면, 스크리치 톤의 주파수와는 달리, 천음속 톤의 주파수는 노즐 압력비가 증가할수록 증가한다.

Key Words: Supersonic Jet(초음속 제트), Jet Noise(제트소음), Shock Wave(충격파), Transonic Tone(천음속 톤), Screech Tone(스크리치 톤)

1. 서 론

* 일본 큐슈대학 종합이공학부 환경에너지공학과

** 안동대학교 기계공학과 대학원

*** 안동대학교 기계공학부

연락처, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

초음속 제트는 로켓노즐의 추력제어, 가스절단, 슈트 블로어 등 산업의 여러 분야에서 사용

되고 있다[1,2]. 초음속 제트가 노즐출구에서 방출될 때, 고주파수의 제트소음이 발생한다. 이러한 유체소음은 환경소음문제뿐만 아니라, 산업현장에서 유체기계의 피로파괴[3]를 발생시킨다. 초음속 제트소음은 난류소음, 충격파 관련소음, 스크리치 톤으로 나뉘어진다. 특히, 스크리치 톤은 제트 경계층에서 발달하는 불안정 파동과 충격파 셀구조의 간섭에 의해서 발생한다[4].

종래에 스크리치 톤에 관해서는 실험적, 수치해석적으로 많은 연구들이 수행되었다[5]. 이러한 연구결과에 의하면, 스크리치 톤의 음향특성은 노즐 압력비뿐만 아니라, 노즐출구의 형태, 반사판의 유무, 노즐립의 두께와 같은 노즐의 외부환경에 매우 민감하다[6].

한편, 노즐 압력비가 매우 낮은 제트유동의 경우, 노즐내의 확대부에서 충격파가 발생한다. 이때, 노즐내부에서는 충격파의 진동에 의해서 유동소음이 발생하여 노즐출구를 통해서 대기중으로 방출된다. 이러한 소음을 천음속 톤이라고 하며, 노즐출구로부터 생성된 충격파 셀구조에 의한 스크리치 톤과는 음향특성이 다르다[7]. 따라서, 천음속 톤에 관해서는 스크리치 톤과 구분하여 상세히 연구할 필요성이 있다.

본 연구에서는 매우 낮은 노즐 압력비를 갖는 제트유동에서 발생하는 소음현상의 음향특성을 실험적으로 조사하였다. 또한, 천음속 톤과 스크리치 톤의 음향특성을 비교함으로써, 그 차이점을 명확히 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

Figure 1은 본 연구에 사용된 실험장치를 나타내며, 실험은 무향실 내부에서 수행되었다. 압축기에서 압축된 공기는 고압탱크로 유입된다. 압축공기는 고압탱크로부터 배관과 수동밸브를 통해서 정채실 내부로 유입되어, 초음속 노즐을 통해서 대기상태인 무향실 내부로 방출된다.

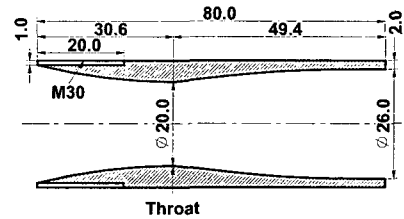


Fig. 2 Convergent-divergent Nozzle (unit : mm)

Figure 2는 실험에 사용된 설계 마하수가 2.0인 초음속 노즐을 나타낸다. 노즐 압력비는 정채실의 압력(p_0)과 배압(p_b)의 비율($NPR=p_0/p_b$)로 정의된다. 제트유동은 노즐 압력비가 $NPR=7.8$ 일 때, 이론적으로 적정팽창상태에 도달한다. 본 연구에서는 노즐내부에서 충격파가 존재하는 제트유동 및 과팽창 제트유동을 조사하기 위하여, 노즐 압력비를 1.0~7.8의 범위에서 변화시켰다.

음향측정은 노즐출구에서 1000 mm, 제트의 상류방향으로 98° 의 지점에 수행하였다. 마이크로 폰의 음압신호는 FFT 스펙트럼 해석을 수행하였다. 또한, 제트의 유동장은 쉐리렌 광학장치를 이용하여 가시화 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 천음속 공명현상

Figure 3은 노즐 압력비가 매우 낮은 경우의 제트 유동장을 나타낸다. $NPR=2.0$ 의 경우, 노즐 내부에서 충격파가 발생하며, 노즐출구로부터 아음속 상태의 제트유동이 방출된다. 노즐 압력비를 조금씩 높일 경우, 노즐내부에서 발생한 충격파는 노즐출구를 향해서 이동한다. $NPR=3.0$ 인

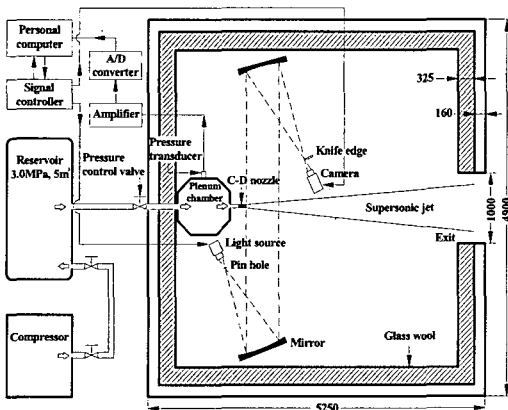


Fig. 1 Experimental apparatus (unit : mm)

경우, 노즐내부에서 발생한 충격파의 일부는 노즐출구로부터 방출된다. 그러나, 본 실험에서는 노즐내부의 유동장은 관찰할 수 없었다.

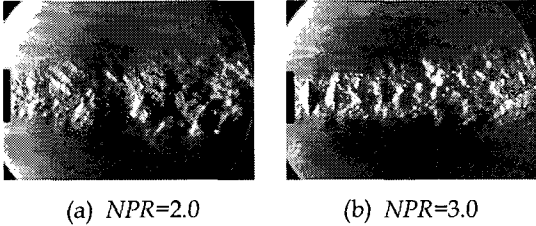


Fig. 3 Schlieren pictures of jet flows with a shock in the divergent section of a nozzle

Figure 4는 노즐 내부에서 충격파가 존재하는 경우, 제트소음 스펙트럼을 나타낸다. Fig. 4(a)의

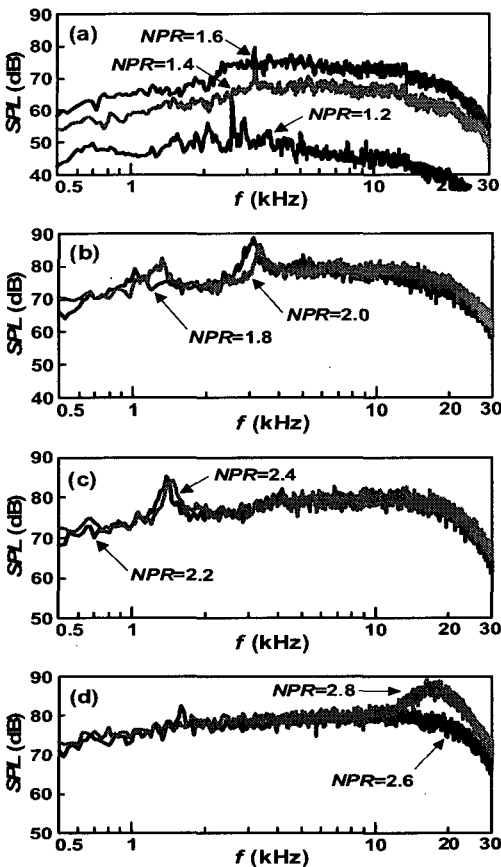
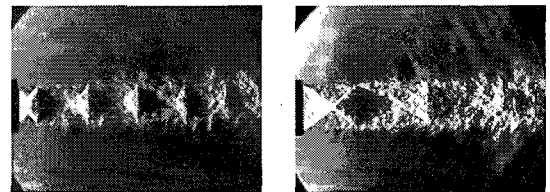


Fig. 4 Noise spectra showing transonic resonance phenomena of jet flows

$NPR=1.2$ 일 때, $f=2.6$ kHz에서 약 64 dB 정도의 크기를 갖는 스파이크가 관찰된다. 이것은 노즐 내부에 존재하는 충격파에 의해서 발생한 천음속 톤을 나타낸다. 노즐 압력비가 증가할 때, 천음속 톤의 크기와 주파수는 변화한다. Fig. 4(b)에서 $NPR=1.8, 2.0$ 의 경우, 천음속 톤은 다른 두 개의 주파수 영역에서 나타난다. Fig. 4(c)에서 노즐 압력비를 증가시키면, 고주파수의 천음속 톤은 사라지고, 저주파수의 천음속 톤만 나타난다. 또한, 이러한 천음속 톤의 크기와 주파수는 노즐 압력비에 크게 의존한다.

3.2 제트 스크리치

Figure 5는 과팽창 초음속 제트의 유동장을 나타낸다. 노즐내부에는 충격파가 존재하지 않는다. Fig. 5(a)에서 관찰할 수 있듯이, 노즐출구 부근에서 경사충격파, 마하 디스크 및 반사충격파가 발생하며, 제트내부에서는 충격파 셀구조가 형성된다. 노즐 압력비가 증가할 때, 충격파 셀의 길이는 길어지며, 첫번째 충격파 셀에서 나타나는 마하반사는 정상반사로 바뀐다.



(a) $NPR=4.0$ (b) $NPR=6.0$

Fig. 5 Schlieren pictures of over-expanded jets

Figure 6은 과팽창 초음속 제트유동의 소음 스펙트럼을 나타낸다. Fig. 6(a)의 노즐 압력비가 $NPR=4.0$ 보다 작은 경우, 스크리치 톤은 발생하지 않으나, 충격파 셀구조에 의한 충격파 관련소음이 $f=10\sim 20$ kHz의 주파수 영역에서 명확히 관찰된다. Fig. 6(b)의 $NPR=4.0$ 인 경우, 스크리치 톤은 $f=5.8$ kHz에서 발생한다. 노즐 압력비가 증가할 때, 제트소음 스펙트럼 분포는 전반적으로 증가한다. 또한, 스크리치 톤의 크기와 주파수는 노즐 압력비에 크게 의존하면서 변화한다.

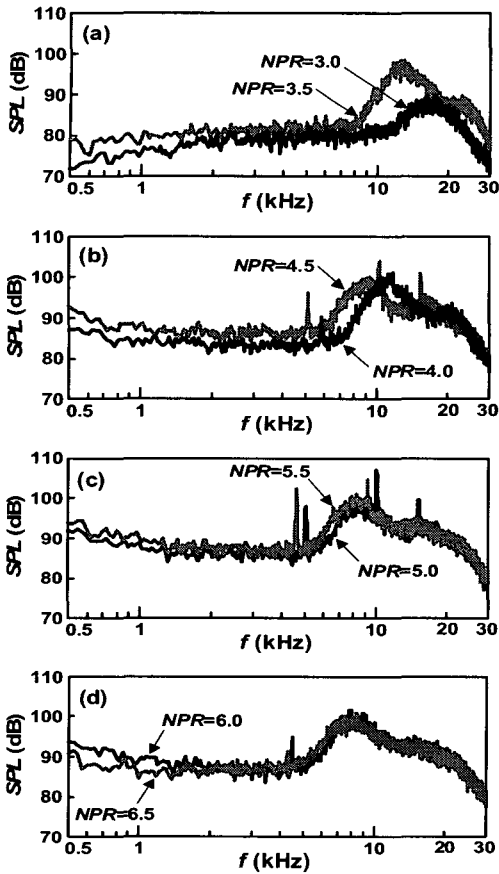


Fig. 6 Noise spectra showing screech tones of over-expanded supersonic jets

4. 결 론

본 연구에서는 초음속 노즐내부에 충격파가 존재하는 제트유동과 과팽창 초음속 제트유동에서 발생하는 소음현상에 대해서 실험적으로 조사하였다. 천음속 톤과 스크리치 톤의 음향특성을 조사하기 위하여, 마이크로 폰을 이용한 음향 측정 및 설리렌 광학장치에 의한 유동 가시화를 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 노즐 압력비가 매우 작은 경우, 초음속 노즐 내부에는 충격파가 발생하며, 이러한 충격파의 불안정한 진동에 의해서 천음속 톤이 발생한다.

2. 천음속 톤은 노즐내부에 충격파가 존재하는 제트유동뿐만 아니라, 약한 과팽창 초음속 제트유동에서도 발생한다.
3. 노즐 압력비가 증가할 때, 천음속 톤의 주파수는 증가하며, 다른 두 단계의 주파수 변화가 나타난다.
4. 천음속 톤과는 달리, 스크리치 톤의 주파수는 노즐 압력비가 증가할수록 감소한다.

참 고 문 헌

1. Chen, K., Yao, Y. L. and Modi, Y., "Gas Jet-Workpiece Interactions in Laser Machining," J.Manufacturing Sci. and Engg., Vol.122, 2000, pp.429-438.
2. Rameel, M. I., Cormack, D. E. and Tran, H., "Sootblower Optimization (Part 1 : Fundamental Hydrodynamics of a Sootblower Nozzle Jet)," TAPPI J., Vol.77, No.5, 1994, pp.135-142.
3. Hay, J. A. and Rose, E. G., "In Flight Shock Cell Noise," J. Sound and Vib., Vol.11, No.4, 1970, pp.411-420.
4. Powell, A., "On the Mechanism of Choked Noise," Proc. Physics Society, Series B, Vol.66, 1953, pp.1039-1056.
5. Raman, G., "Advances in Understanding Supersonic Jet Screech : Review and Perspective," Prog. Aerospace Sci, Vol. 34, 1998, pp.45-106.
6. Aoki, T., Kweon, Y.-H., Miyazato, T., Kim, H.-D. and Setoguchi, T., "An Experimental Study of the Nozzle Lip Thickness Effect on Supersonic Jet Screech Tone," KSME Int. J., Vol.20, No.4, 2006, pp.522-532.
7. Zaman, K. B. M. Q., Dahl, M. D., Bencic, T. J. and Loh, C. Y., "Investigation of a Transonic Resonance with Convergent-Divergent Nozzles," J. Fluid Mech., Vol. 463, 2002, pp.313-343.