

흡음재가 초음속 제트의 소음특성에 미치는 영향

곽종호[†] · 권용훈* · 青木俊之* · 김희동**

Effect of Sound-Absorbing Materials on the Characteristics of Supersonic Jet Noise

Jong-Ho GWAK, Yong-Hun KWEON, Toshiyuki AOKI and Heuy-Dong KIM

Key Words : Supersonic jet(초음속 제트), Supersonic jet noise(초음속 제트소음), Screech tone(스크리치 톤), Sound-Absorbing material(흡음재), OASPL(전음압 레벨)

Abstract

The effects of absorbing materials on the characteristics of supersonic jet noise were experimentally investigated using a convergent-divergent nozzle with a design Mach number of 2.0. Overall sound pressure levels (OASPL) and noise spectra were obtained at far-field locations. Schlieren optical system was used to visualize the flow-fields of supersonic jets. In order to investigate the effect of absorbing materials, baffle plates of different materials (metal, grass wool and polyurethane foam) were installed at the exit of the nozzle. Experiment was carried out over a wide range of nozzle pressure ratios from 2.0 and 18.0, which corresponds to over- and under-expanded conditions. The results obtained show that the screech tone amplitude and the overall sound pressure level reduce by using the baffle plates of absorbing materials, compared with the metal baffle plate. It is also found that the characteristics of supersonic jet noise are strongly dependent on the size of baffle plate.

1. 서 론

초음속 제트는 로켓노즐의 추력제어⁽¹⁾, 가스절단⁽²⁾, 슈트 블로어⁽³⁾, 구조물의 코팅기술⁽⁴⁾ 등 산업의 여러 분야에서 폭넓게 이용되고 있다. 초음속 제트가 노즐출구로부터 방출될 때, 고주파수의 제트소음이 발생한다. 이러한 유체소음은 환경소음 문제뿐만 아니라, 산업현장에서 유체기계의 피로 파괴⁽⁵⁻⁶⁾를 발생시키는 주요한 원인이 되므로 산업적, 공학적으로 중요한 연구과제로 대두되고 있다.

Fig.1 에 나타나 있듯이, 초음속 제트소음은 난류혼합소음, 충격파 관련소음, 스크리치 톤으로 나뉘어진다. 스크리치 톤은 1953 년 Powell⁽⁷⁾에 의해

서 최초로 연구되었다. 그의 연구결과에 의하면, 스크리치 톤은 ①초음속 제트내부에서 불안정한 파동의 성장, ②불안정한 파동과 충격파 셀의 간섭, ③상류로 전파하는 음파, ④노즐출구에서 반사된 음파에 의한 새로운 교란의 생성으로 이루어진 음향 피드백 루프에 의해 발생한다.

종래에 스크리치 톤에 관해서는 실험적, 이론적으로 많은 연구들이 수행되어 왔다. Umeda 등⁽⁸⁾은 음속노즐로부터 방출되는 스크리치 톤의 음원에 관한 실험적 연구를 수행하였다. Panda⁽⁹⁾와 Raman⁽¹⁰⁾은 부족팽창 초음속 제트에서 스크리치 톤의 생성과 소멸에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

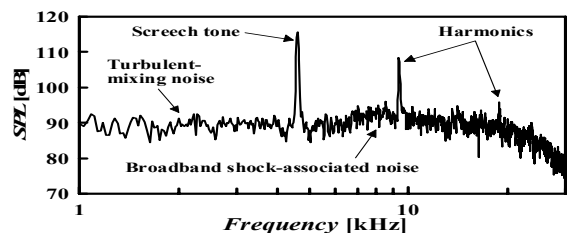


Fig. 1 Typical far-field noise spectrum of supersonic jet

[†] 안동대학교 기계공학과 대학원

* 일본 큐슈대학 총합이공학연구과

** 안동대학교 기계공학부

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

TEL : (054)820-5622 FAX : (054)823-5495

Abdel-Fattah⁽¹¹⁾은 다양한 초음속 노즐을 이용하여 스크리치 톤과 충격파 구조와의 관계를 연구하였다. 또한, Powell 등⁽¹²⁾은 부족팽창 초음속 제트의 진동모드에 관해서 실험적으로 연구하였다. Tam 등⁽¹³⁾은 충격파 관련소음과 스크리치 톤과의 관계를 이론적으로 연구하였다. Suzuki 등⁽¹⁴⁾은 스크리치 톤의 생성 매카니즘에 대한 수치해석적 연구, Jorgenson 등⁽¹⁵⁾은 축대칭 모드 스크리치 톤의 음향학적 특성을 조사하였다. 최근에 Shen 등⁽¹⁶⁾은 계산공력음향학(CAA) 방법으로 스크리치 현상의 3 차원 수치해석을 수행하였다.

종래의 연구에 의하면, 스크리치 톤은 노즐출구의 형태, 반사판의 유무, 노즐립의 두께와 같은 노즐의 외부환경에 매우 민감하다. 실제로, 산업현장의 유체기계는 노즐의 출구근처에 반사판과 같은 물체를 가지고 있다. 반사판 및 노즐립 두께가 스크리치 톤에 미치는 영향에 관해서는 Nagel 등⁽¹⁷⁾, Antonov 등⁽¹⁸⁾, Norum⁽¹⁹⁾, Hammit⁽²⁰⁾과 Ponton 등⁽²¹⁾에 의해서 연구되었다. 이러한 연구들의 대부분은 음속노즐로부터 방출되는 부족팽창 초음속 제트를 연구대상으로 하였으며, 과팽창 제트의 스크리치 톤에 관한 연구는 거의 수행되지 않았다. 최근에, Kweon 등⁽²²⁾의 연구에 의하면, 노즐립 두께의 변화가 초음속 제트소음에 미치는 영향은 부족팽창 제트에 비해서 과팽창 제트의 경우에 더 현저하게 나타난다.

본 연구에서는 흡음재가 초음속 제트의 소음특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 노즐출구에는 금속과 흡음재인 글래스 울(glass wool) 및 폴리우레탄 폼(polyurethane foam)으로 만들어진 배플판을 설치하였다. 초음속 제트 유동장은 쉐리렌 광학장치를 이용하여 가시화 하였으며, 마이크로폰에 의한 음향측정을 통하여 전음압 레벨과 소음 스펙트럼을 얻었다.

2. 실험장치 및 방법

Fig.2 는 본 연구에 사용된 실험장치를 나타내며, 실험은 가로 5250mm, 세로 4900mm, 높이 4900mm의 무향실 내부에서 수행되었다. 압축기에서 압축된 공기는 탱크 내부로 유입된다. 탱크의 용량은 5m³이며, 압축공기를 3.0MPa 까지 저장할 수 있다. 압축공기는 탱크로부터 배관과 수동밸브를 통해서 정체실로 유입된다. 정체실로 유입된 압축공기는 100mm의 직관과 직관 끝에 설치된 80mm의 초음속 노즐을 통해서 무향실 내부에 방출된다.

Fig.3(a)는 실험에 사용된 초음속 노즐을 나타내며, 노즐목 지름이 $D_f=20mm$, 노즐출구 지름이 $D=$

26mm 인 설계 마하수 $M_d=2.0$ 의 축대칭 노즐이 사용되었다. 노즐립의 두께는 2.0mm 이다. 제트유동은 정체실의 압력 p_0 와 배압(대기압) p_b 의 노즐 압력비가 $p_0/p_b=7.8$ 일 때, 이론적으로 적정팽창상태에 도달한다. 노즐 압력비는 $p_0/p_b=2.0\sim 18.0$ 의 범위에서 변화되었다.

Fig.3(b)는 노즐출구에 설치한 배플판의 형상을 나타낸다. 배플판의 크기는 $t/D=1.0$ 과 2.0 이며, 배플판은 금속과 흡음재인 글래스 울과 폴리우레탄 폼(제품명 F-2, F-55)의 네 종류의 재료로 제작되었다. 표 1 에는 실험에 사용된 흡음재의 특성을 나타낸다. 글래스 울의 밀도는 24kg/m³, 폴리우레탄 폼의 밀도는 25kg/m³이며, 흡음재 F-55 는 표면에 얇은 피막이 부착되어 있다.

Fig.4 에는 두께 50mm 인 흡음재의 흡음률을 나타낸다. 흡음률은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\text{흡음률}=(L_a+L_t)/L_i \quad (1)$$

식(1)에서 L_i 는 입사음의 강도, L_a 는 흡수음의 강도, L_t 는 투과음의 강도를 의미한다.

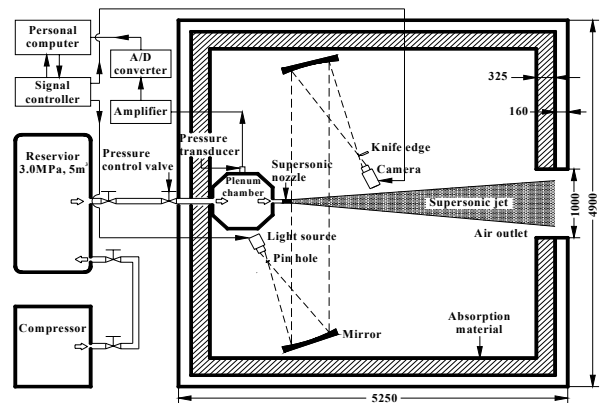


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

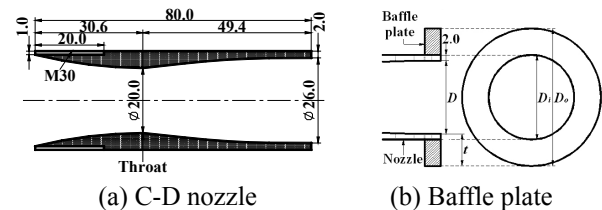


Fig. 3 Convergent-divergent nozzle and baffle plate

Table 1 Sound-Absorbing materials

	Glass wool	Polyurethan foam	
		F-2	F-55
밀도 (kg/m ³)	24	25	25
표면 피막	×	×	○
두께 (mm)	50	50	50

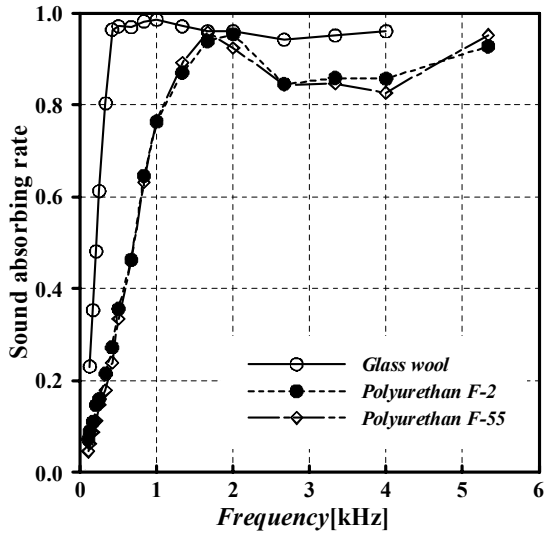


Fig. 4 Variation of sound absorbing rate with frequency

음향측정은 노즐출구에서 1300mm, 제트 중심축에 대해서 제트 상류방향으로 $\theta=96^\circ$ 인 지점에 마이크로폰을 설치하였으며, 마이크로폰의 음압신호는 FFT 스펙트럼 해석을 수행하였다. 제트 유동장은 쉘리렌 광학장치를 이용하여 가시화 하였으며, 광원으로는 스파크의 발광시간이 약 20ns 인 나노스파크를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동장의 가시화

Fig.5 는 노즐 압력비가 $p_0/p_b=4.0$ 일 때, 노즐출구로부터 방출되는 초음속 제트를 나타낸 쉘리렌 가시화 사진이다. Fig.5(a)의 $t/D=0.1$ 와 같이, 노즐출구에 배플판이 없는 경우, 초음속 제트유동은 거의 축대칭이다. Fig.5(b)의 경우, 초음속 제트는 노즐출구에 설치된 배플판의 영향으로 인해서 상하 비대칭적으로 진동하며, 제트 전단층 내부의 커다란 와류와 충격파 셀은 강하게 간섭한다. 이러한 간섭에 의해서 발생한 근거리 음장은 제트경계층 외부에서 밝은 영역과 어두운 영역이 교대로 나타나며, 제트유동의 상·하류로 전파하는 음파가 명확히 관찰된다. 그러나, 흡음재가 초음속 제트의 유동장에 미치는 영향에 관해서는 쉘리렌 가시화 사진을 통해서 명확히 관찰할 수 없었다.

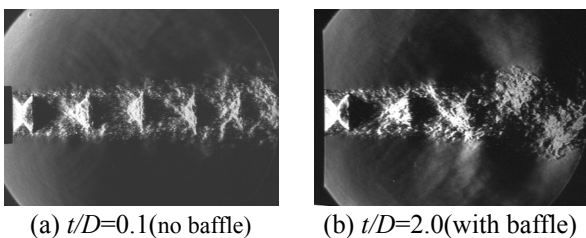


Fig. 5 Schlieren pictures of supersonic jets ($p_0/p_b=4.0$)

3.2 스크리치 주파수 (Screech tone frequency)

Fig.6 은 제트 마하수 M_j 및 노즐압력비 p_0/p_b 에 대한 스크리치 주파수의 변화를 나타낸다. 횡축의 M_j 는 정체실 압력 p_0 인 기체가 노즐을 통하여 배압 p_b 까지 등엔트로피 팽창을 한다고 가정한 경우, 제트유동의 마하수를 의미하며, 다음과 같이 표현된다.

$$M_j = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{p_0}{p_b} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\}} \quad (2)$$

식(2)에서 γ 는 기체의 비열비를 의미하며, 본 연구에서 작동유체는 압축공기이므로 $\gamma=1.4$ 이다. 그림 중의 실선은 Tam 의 스크리치 주파수에 대한 이론⁽¹³⁾식에서 도출된 결과를 나타낸다.

배플판의 크기가 스크리치 주파수에 미치는 영향은 Fig.6 에 나타나 있다. 노즐출구에 배플판이 없는 $t/D=0.1$ 의 경우, M_j 가 증가할수록 스크리치 주파수는 감소하며, Tam 의 이론결과와 잘 일치한다. 이것은 제트 마하수 혹은 노즐 압력비가 증가할 때, 충격파 셀의 길이는 길어지며, 또한 스크리치 주파수는 충격파 셀의 길이에 관련되어 있기 때문이다. 배플판의 크기는 스크리치 주파수에 영향을 끼친다. 스크리치 주파수에 대한 배플판의 영향은 부족팽창 초음속 제트에 비해, 과팽창 초음속 제트의 경우에 현저하게 나타난다.

Fig.7 은 흡음재가 스크리치 주파수에 미치는 영향을 나타낸다. $t/D=1.0$ 의 경우, 금속으로 만들어진 배플판에 대한 스크리치 주파수와 비교할 때,

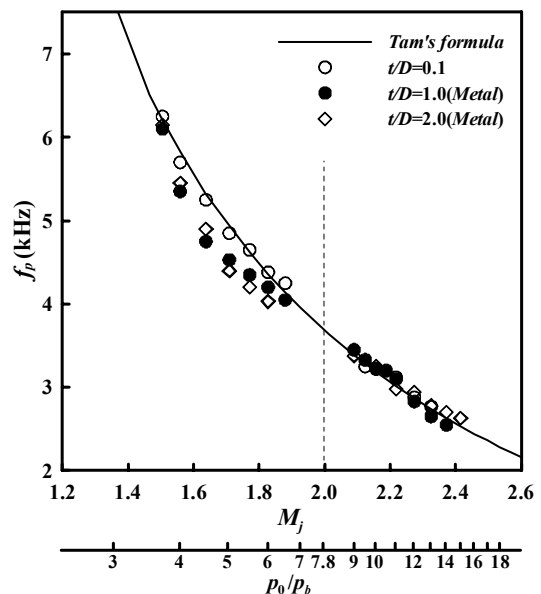
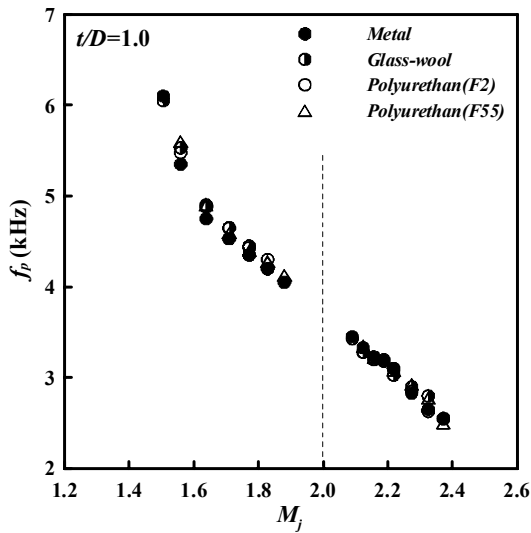
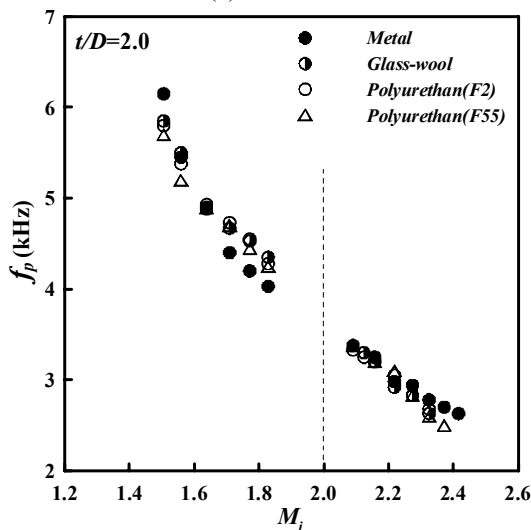


Fig. 6 Variation of screech tone frequency with M_j



(a) $t/D=1.0$



(b) $t/D=2.0$

Fig. 7 Effect of sound-absorbing materials on screetch tone frequency

흡음재는 스크리치 주파수에 거의 영향을 미치지 않는다. $t/D=2.0$ 의 경우, M_j 가 1.7~1.9인 영역에서 금속 배플판의 경우에는 동일한 M_j 에 대해서 두 개의 스크리치 주파수⁽²²⁾이 동시에 나타나지만, 흡음재로 만들어진 배플판의 경우에는 하나의 스크리치 주파수가 존재한다.

3.3 스크리치 강도

Fig.8은 배플판의 크기가 스크리치 강도에 미치는 영향을 나타낸다. 과팽창 초음속 제트의 경우, M_j 가 증가할 때 스크리치 톤의 크기는 증가하여 $M_j=1.6\sim1.7$ 사이에서 극대값에 도달한 후 감소한다. 이러한 경향은 부족팽창 초음속 제트에서도 유사하게 나타난다. 배플판의 크기는 스크리치 강도에 크게 영향을 끼치며, 스크리치 강도를 증가시킨다.

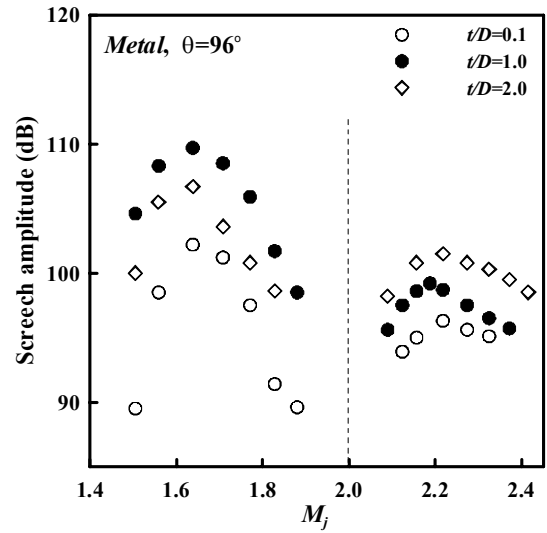
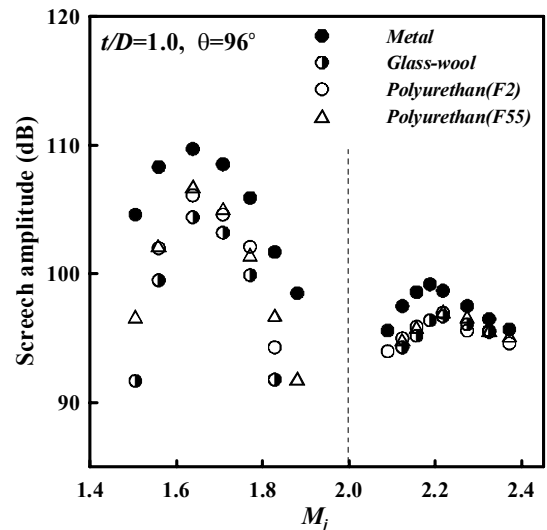
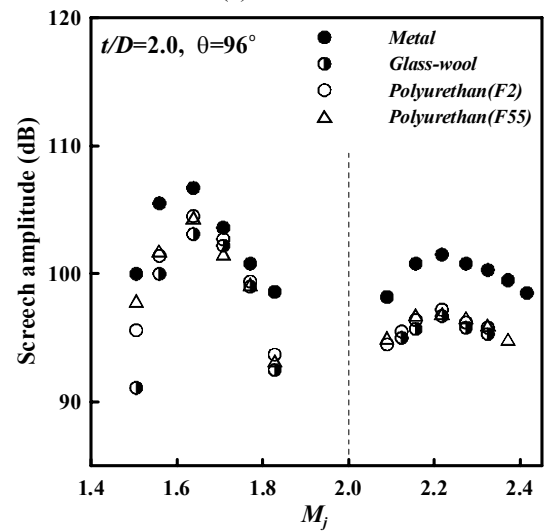


Fig. 8 Variation of screetch tone amplitude with M_j



(a) $t/D=1.0$



(b) $t/D=2.0$

Fig. 9 Effect of sound-absorbing materials on screetch tone amplitude

금속의 배플판에 비해서, 흡음재로 만들어진 배플판을 노즐출구에 설치할 때, 스크리치 강도는 감소한다. Fig.9 에서 $t/D=1.0$ 의 경우, 흡음재의 배플판을 노즐출구에 설치함으로써, 스크리치 강도는 과팽창 초음속 제트의 경우에 약 5~10dB, 부족 팽창 초음속 제트의 경우에 2~4dB 정도 감소된다. 그러나, 흡음재의 종류에 따른 스크리치 강도의 저감효과는 크지 않다.

3.4 전음압 레벨(OASPL)

Fig.10 은 제트 중심축에 대해서 유동의 상류방향으로 96° 지점에서 측정된 전음압 레벨(OASPL)의 변화를 나타낸다. M_j 가 증가할 때, 전음압 레벨은 증가하여 약 $M_j=1.6\sim 1.7$ 에서 극대값에 도달한 후 감소한다. 전음압 레벨은 적정팽창상태에 해당하는 $M_j=2.0$ 근처에서 극소값에 도달하며, 그 이후에 M_j 가 증가할 때 다시 증가하기 시작한다. 전음압 레벨의 감소는 초음속 제트내부에 존재하는 충격과 구조의 강도약화로 인한 충격과 관련소음의 감소에 기인한다. 특히, $M_j=2.0$ 근처에서 전음압 레벨의 극소값은 적정팽창 초음속 제트의 경우에는 제트내부에 충격과 구조가 존재하지 않으며, 초음속 제트소음은 전적으로 난류혼합소음만이 존재하기 때문이다. $M_j > 2.0$ 인 경우, M_j 가 증가할 때 제트내부에는 다시 충격과 구조가 형성되며, 이로 인해서 충격과 관련소음 및 스크리치 톤이 발생하므로 전음압 레벨은 다시 증가한다. 배플판의 크기가 커질 때, 전음압 레벨은 다소 증가한다.

Fig.11 은 흡음재가 전음압 레벨에 미치는 영향을 나타낸다. 금속의 배플판에 비해서, 흡음재로 만들어진 배플판이 노즐출구에 설치된 경우가 다소 전음압 레벨이 감소한다. 전음압에 미치는 흡음재의 영향은 부족팽창 초음속 제트에 비해서, 과팽창 초음속 제트의 경우에 명확하게 나타난다. 과팽창 초음속 제트의 경우, 흡음재를 사용함으로써, 금속 배플판에 비해 약 1~3dB 정도 전음압 레벨이 감소한다. 그러나, 흡음재의 종류가 전음압 레벨에 미치는 영향은 크지 않다.

4. 결론

본 연구에서는 흡음재가 초음속 제트의 소음특성에 미치는 영향에 대해서 실험적 방법으로 조사하였다. 노즐출구에는 금속, 흡음재인 글래스울 및 폴리우레탄 폼으로 만들어진 배플판을 설치하였다. 음향측정을 통하여 전음압 레벨과 소음 스펙트럼을 얻었으며, 쉘리렌 광학장치를 이용하여 초음속

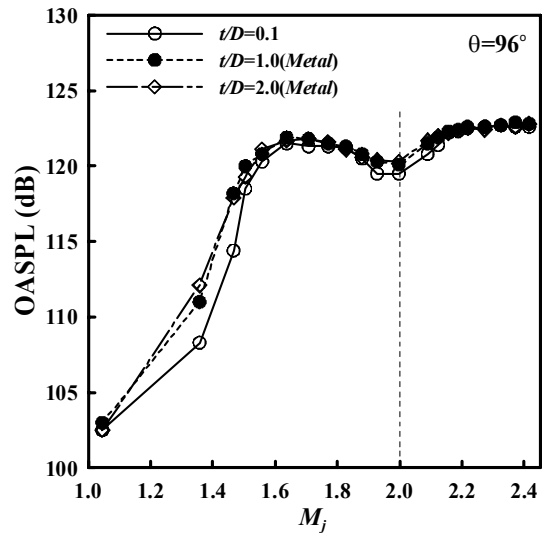
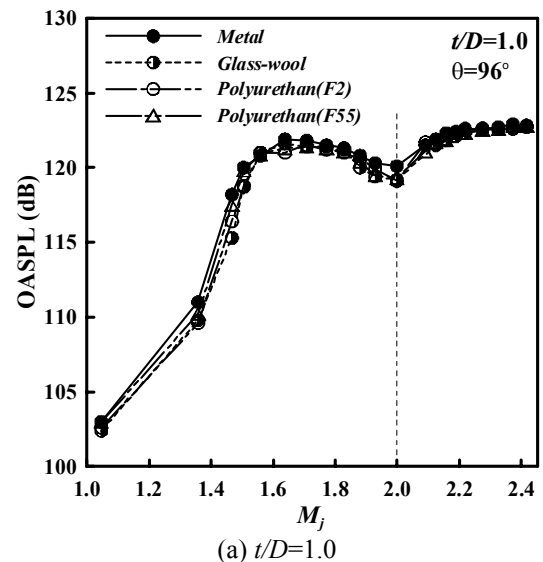
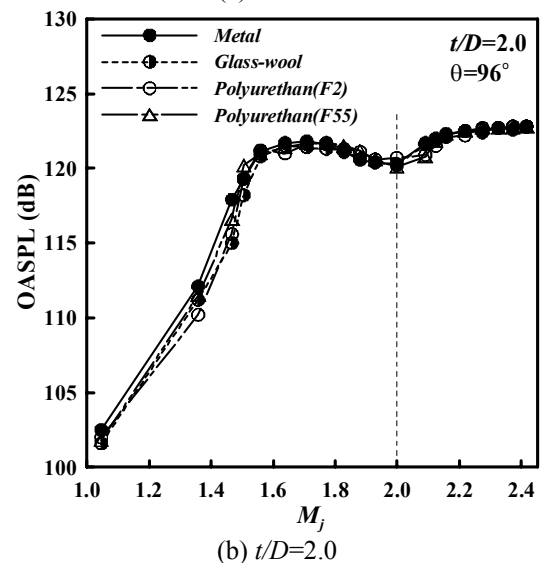


Fig. 10 Variation of overall sound pressure level (OASPL) with M_j



(a) $t/D=1.0$



(b) $t/D=2.0$

Fig. 11 Effect of sound-absorbing materials on OASPL

제트 유동장을 가시화하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 노즐출구에 설치된 배플판의 크기는 스크리치 주파수, 스크리치 강도 및 전음압 레벨에 영향을 끼친다.
2. 금속의 배플판에 비해서, 흡음재로 만들어진 배플판은 스크리치 주파수에 크게 영향을 끼치지 않으나, 스크리치 강도 및 전음압 레벨을 저감시킨다.
3. 본 연구에서 사용된 세 종류의 흡음재에 대해서, 각각의 흡음재가 초음속 제트의 소음특성에 미치는 영향의 차이점은 크지 않았다.

참고문헌

- (1) Strykowski, P. J., 1996, "Counterflow Thrust Vectoring of Supersonic Jets", AIAA J., Vol.34, No.10, pp.2306-2314.
- (2) Kai Chen, Y. Lawrence Yao and Vijay Modi, 2000, "Gas Jet - Workpiece Interactions in Laser Machining", J. Manufacturing Science and Engineering, ASME, Vol.122, pp.429-438.
- (3) Rameel, M. I., Cormack, D. E. and Tran, H., 1994, "Sootblower Optimization (Part 1 : Fundamental Hydrodynamics of a Sootblower Nozzle Jet)", TAPP J., Vol.77, No.5, pp.135-142.
- (4) Yumoto, A., Hiroki, F., Shiota, I. and Niwa, N., 2003, "In Situ Synthesis of Titanium-Aluminides in Coating with Supersonic Free-Jet PVD using Ti and Al Nanoparticles", Surface & Coating Technology, Vol.169-170, pp.499-503.
- (5) Hay, J. A. and Rose, E. G., 1970, "In Flight Shock Cell Noise", J. Sound and Vibration, Vol.11, No.4, pp.411-420.
- (6) Seiner, J. M., Manning, J. C. and Ponton, M. K., 1988, "Dynamic Pressure Loads Associated with Twin Supersonic Plume Resonance", AIAA J., Vol.26, No.8, pp.954-960.
- (7) Powell, A., 1953, "On the Mechanism of Choked Jet Noise", Proc. Physics Society, Series B, Vol.66, pp.1039-1056.
- (8) Umeda, Y. and Ishii, R., 2001, "On the Sound Sources of Screech Tones Radiated from Choked Circular Jets", J. Acoustical Society of America, Vol.110, No.4, pp.1845-1858.
- (9) Panda, J., 1999, "An experimental Investigation of Screech Noise Generation", J. Fluid Mechanics, Vol.378, pp.71-96.
- (10) Raman, G., 1997, "Cessation of Screech in Under-expanded Jets", J. Fluid Mechanics, Vol.336, pp.69-90.
- (11) Abdel-Fattah, A. M., 1988, "Discrete Tone Emission from High-Pressure Ratio Supersonic Jets from Convergent-Divergent Nozzles", AIAA J., Vol.26, No.3, pp.283-291.
- (12) Powell, A., Umeda, Y. and Ishii, R., 1992, "Observation of the Oscillation Modes of Choked Circular Jets", J. Acoustical Society of America, Vol.92, No.5, pp.2823-2836.
- (13) Tam, C. K. W., Seiner, J. and Yu, J. C., 1986, "Proposed Relationship between Broadband Shock Associated Noise and Screech Tones", J. Sound and Vibration, Vol.110, No.2, pp.309-321.
- (14) Suzuki, T. and Lele, S. K., 2003, "Shock leakage through an Unsteady Vortex-Laden Mixing Layer : Application to Jet Screech", J. Fluid Mechanics, Vol.490, pp.139-167.
- (15) Jorgenson, P. C. E. and Loh, C. Y., 2002, "Computing Axisymmetric Jet Screech Tones using Unstructured Grids", AIAA paper 2002-3889.
- (16) Shen, H. and Tam, C. K. W., 2002, "Three-Dimensional Numerical Simulation of the Jet Screech Phenomenon", AIAA J., Vol.40, No.1, pp.33-41.
- (17) Nagel, R. T., Denham, J. W. and Papathanasiou, A. G., 1983, "Supersonic Jet Screech Tone Cancellation", AIAA J., Vol.21, No.11, pp.1541-1545.
- (18) Antonov, A. N., Shalaev, S. P. and Yudelovich, M. Y., 1977, "Influence of Acoustic Reflections on the Discrete Component in the Noise Spectrum of a Supersonic Off-Design Jet", Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Mekhanika Zhidkosti i, Gaza, No.6, pp.157-160.
- (19) Norum, T. D., 1983, "Screech Suppression in Supersonic Jets", AIAA J., Vol.21, No.2, pp.235-240.
- (20) Hammitt, A. G., 1961, "The Oscillation and Noise of an Overpressure Sonic Jet", J. Aerospace Sciences, Vol.28, No.9, pp.673-680.
- (21) Ponton, M. K. and Seiner, J. M., 1992, "The Effects of Nozzle Exit Lip Thickness on Plume Resonance", J. Sound and Vibration, Vol.154, No.3, pp.531-549.
- (22) Kweon, Y.-H., Aoki, T., Miyazato, Y., Kim, H.-D. and Setoguchi, T., 2004, "Effect of Nozzle-Lip Thickness on Screech Tones Radiated from a Convergent-Divergent Nozzle", ISTP-15, pp.39-44.