

고속 원형충돌제트의 불안정 특성

°임정빈*, 권영필**

Instabilities of High-speed Impinging Circular Jets

°Jung-Bin Im*, Young-Pil Kwon**

ABSTRACT

The characteristics of the unstable impinging circular jet were investigated based on the frequency characteristics and the sound field of the impinging-tones. Two symmetric modes S1 and S2, associated with low frequency and high frequency respectively, and one helical mode H have been observed by measuring frequency and phase-distribution around the jet. Radiation characteristics of impinging-tone were studied by measuring axial directivity. It was founded that the radiation patterns of symmetric and helical mode are different and it is toward the plate as the impinging distance increased. By estimating the convection velocity of the unstable jet, it was founded that the convection speed decreases with the frequency and its decreasing pattern varies with unstable modes S1, S2 and H, respectively.

1. 서 론

원형제트에 의한 충돌음은 평면제트의 경우와 아울러 제트의 대표적 불안정현상 중 하나이다. 원형 충돌제트에 관한 기존의 연구로는 저속의 제트가 구멍 뚫린 평판에 충돌할 때 발생하는 hole-tone에 대한 연구⁽¹⁾가 있고 고속의 초음속 제트가 구멍⁽²⁾이나 충돌면이 넓은 벽⁽³⁾, 또는 좁은 원판⁽⁴⁾에 충돌할 때 발생하는 충돌음의 주파수특성이나 와동의 거동을 가시화한 연구들이 있다. 또한 충돌면이 제트에 직교하는 가는 원통인 경우⁽⁵⁾와 충돌면이 없는 충격세포(shock cell)에 의한 스크리치(screech)음의 연구⁽⁶⁾ 등이 있다. 저속에서 hole-tone을 유발하는 원형제트의 불안정 모드는 모두 축대칭인 것으로 밝혀졌으며⁽¹⁾ 초음속제트의 경우는 대칭(symmetric)모드 외에 충격세포의 작용에 의하여 비대칭인 나선형(helical)과 정현파형(sinuous) 모드가 나타나는 것이 밝혀졌으나^(4,6) 각 모드의 불안정 특성에 대한 연구는 발표된 바가 없다. 충돌음의 연구와 관련하여 널리 인용되고 있는 연구결과로서 마하(Mach)수 0.9의 고속제트에 대한 Ho와 Nosseir⁽⁷⁾의 연구가 있으나 피드백모델

의 검증에 주안점을 두었을 뿐 제트의 불안정특성에 관해서는 다루지 않았다.

이상에서 살펴본 바와 같이 충돌음의 주파수 특성과 불안정모드에 관해서는 초음속제트를 중심으로 많은 연구가 있었으나 아음속의 고속제트에 대한 체계적인 실험이 이루어지지 않았으며 불안정제트의 대류속도와 같은 모드특성에 관해서는 연구된 바가 없다. 충돌음의 주파수특성을 예측하기 위해서도 대류속도에 대한 모델이 필요하나 지금까지 교란의 대류속도 U_c 는 경험적으로 제트속도 U_j 의 0.6배에 가까운 일정한 값으로 다루어왔다. 권영필은 충돌음의 주파수특성 실험을 통하여 평면제트의 불안정특성 및 대칭 모드와 비대칭 모드가 나타나는 불안정 영역을 구하였고 대류속도가 주파수와 강한 함수관계를 갖고 있음을 발견하였으며 모드에 따라 대류속도가 다른 특성을 나타내는 것을 보여주었다. 본 연구는 같은 연구방법에 의하여 아음속의 고속 원형충돌제트의 불안정 모드의 종류와 그 특성을 구하였다.

2. 실험

실험장치는 Fig. 1과 같이 소음기(muffler), 서지 탱크(surge tank), 원형노즐(circular nozzle), 평판(flat plate), 그리고 3차원 이송대(3D-traverse)로

* 정희원, 숭실대학교 기계공학과 대학원

** 정희원, 숭실대학교 기계공학과

구성된다. 소음기는 상류측의 관로와 유량조절용 밸브에서 발생하는 자생소음(self-noise)을 억제하기 위한 것으로 길이 1000mm, 지름 200mm인 관의 내부에 지름 76mm인 다공관(perforated tube)을 설치하고 다공관과 외관사이에는 흡음재로서 스텐레스울(stainless wool)을 채웠다. 서지탱크는 길이 700mm, 지름 76mm인 원통형 관으로 소음기를 통과한 분류를 안정화시키기 위하여 길이 100mm인 하니콤(honey comb)을 내부에 장착하였다. 서지탱크의 끝에 부착된 원형노즐은 상류단의 지름 76mm, 출구단의 지름 10mm인 축소비(contraction ratio) 57.76의 축소노즐(convergent nozzle)로서 축소각은 9.3° 이다. 실험에 사용된 평판은 한변의 길이가 290mm, 두께 4mm인 장방형 강판이다.

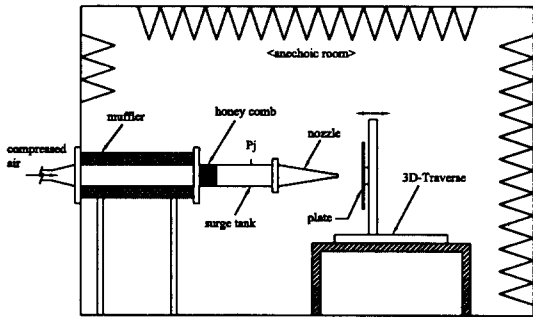


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus in an anechoic room.

모든 실험은 무향실(anechoic room)내부에서 행하였으며 Fig. 1과 같이 원형 노즐의 중심축에 대하여 수직방향으로 평판을 장착하고 충돌거리 h 를 일정하게 한 후 압축공기를 분출하였을 때 발생한 음을 1/4인치 콘덴서 마이크로폰(B&K type 4135)으로 측정하여 FFT로 40kHz까지 분석하였다. 한편 본 연구에서는 노즐의 출구속도를 구하기 위하여 서지탱크에 U형 수은액주계를 설치하였고 압축공기를 분출하였을 때 수은액주계상에서 노즐상류측에 있는 서지탱크내의 압력, 즉 노즐의 분출압력 P_j 와 대기압 P_0 의 비인 압력비 R 이 2.3부터 1.8까지 떨어지는 동안 0.1간격으로 측정을 수행하였다.

주파수 측정시 마이크로폰은 Fig. 2와 같이 평판(90°)으로부터 노즐 상류측으로 30° 만큼 떨어진 120° 방향에 위치하였고 분류가 평판상에 부딪히

는 중심점과 마이크로폰과의 거리는 항상 280mm를 유지하도록 하였다.

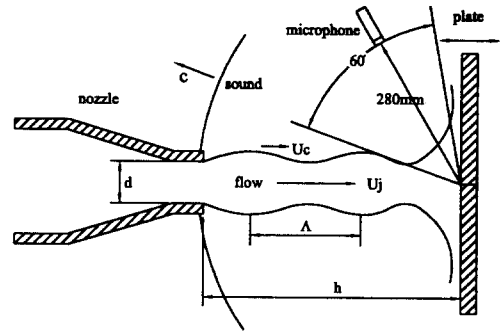


Fig. 2 Configuration of the impinging circular jet.

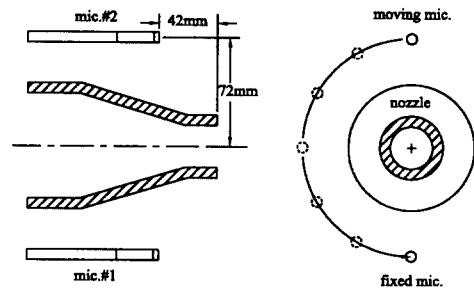


Fig. 3 Configuration of the measuring positions for the circular phase distribution.

축방향의 지향성을 측정하는 경우는 Fig. 2와 같이 평판(90°)에서 분류 중심축(180°)의 90° 구간 중 100° 부터 160° 까지 60° 의 구간에 대하여 5° 간격으로 음압레벨을 측정하였고 평판과 마이크로폰과의 거리는 주파수측정의 경우와 마찬가지로 280mm를 유지하도록 하였다.

또한 원주방향의 위상분포를 측정하는 경우는 Fig. 3과 같이 노즐 출구단의 중심으로부터 원주방향으로 72mm, 노즐 출구단의 뒤쪽으로 42mm 만큼 떨어진 거리에 위치한 두 마이크로폰 사이의 각도를 180° 부터 30° 까지 30° 간격으로 변화시켜가면서 전달함수의 위상을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

(1) 충돌음의 주파수 특성

충돌제트음은 제트와 음파 사이의 피드백작용에 의한 것이므로 제트속도 및 충돌거리에 따라 주파수가 다른 특성을 갖는다.^(10,11) 이러한 주파수특성은 제트속도 U_j 를 일정하게 하고 노즐출구단과 충돌면과의 거리 h 를 변화시키거나 또는 거리를 일정하게 하고 유속을 변화시킬때 발생하는 충돌음의 주파수를 분석함으로써 구할 수 있다.

Fig. 4는 압력비 $R=2.3$ 일 때 충돌거리 $h=16\text{mm}$, $h=30\text{mm}$, $h=50\text{mm}$ 일 때의 음압 스펙트럼을 비교한 것이다. 그림에서 평평한 주파수 분포를 갖는 광대역 성분은 일반적인 난류소음을 나타내며 특정주파수에서 광대역 성분보다 매우 높은 레벨의 소음도를 갖는 순음(pure tone)들은 피드백작용에 의한 공진음인 충돌음을 나타내고 있다. 또한 충돌거리가 멀어질수록 저주파 대역에서 난류음의 소음도가 증가하고 고주파 대역에서는 감소하여 순음성분을 제외한 광대역음이 점차 백색잡음(white noise)의 형태를 보이고 있으며 이러한 경향은 거의 모든 압력비에서 관찰할 수 있다.

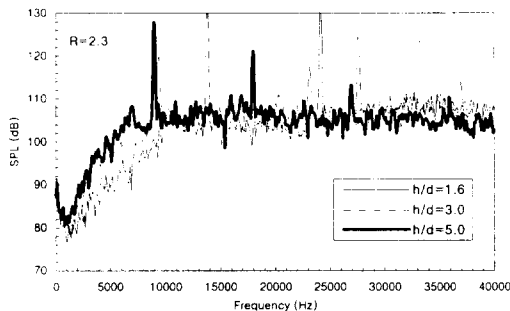
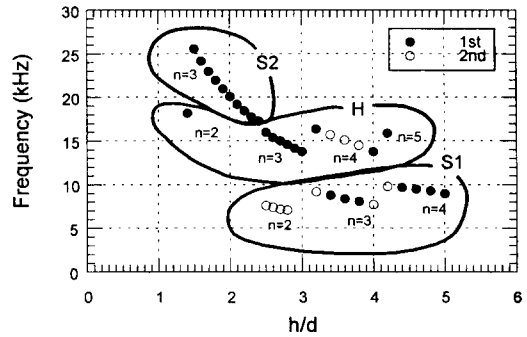


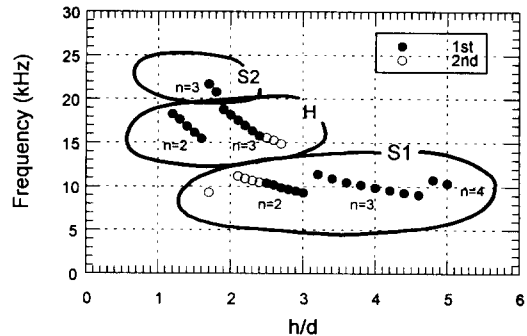
Fig. 4 Sound pressure level spectra from the impinging jet at $R=2.3$ ($M_j=0.98$).

Fig.5는 압력비 $R=2.3$ ($M=0.98$), $R=1.8$ ($M=0.84$)에서 충돌거리에 따른 주파수를 도시한 것으로서 광대역음보다 음압레벨이 약 20dB이상 높은 주음인 첫번째(1st) 순음과 주음에 비해 음압레벨이 낮은 두번째(2nd) 순음을 동시에 나타내었고 주파수가 주음의 정수배인 고조파는 제외하였다. 그림에서 거리에 따른 충돌음의 주파수가 피드백작용에 의한 공진음의 특성이라고 할 수 있는 불연속적인

계단특성을 나타내고 있음을 볼 수 있는데 이러한 계단특성은 주파수가 높은 S2모드와 낮은 S1모드 그리고 중간에 H모드로 뚜렷이 나누어지는 것을 알 수 있다. 각 모드별로 단수 n 은 동일한 주파수에 대한 충돌 거리의 비로부터 구할 수 있다.



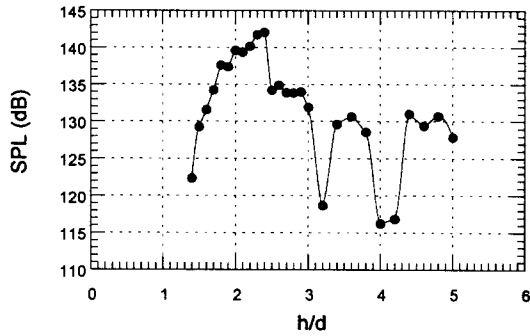
(a) $R=2.3$



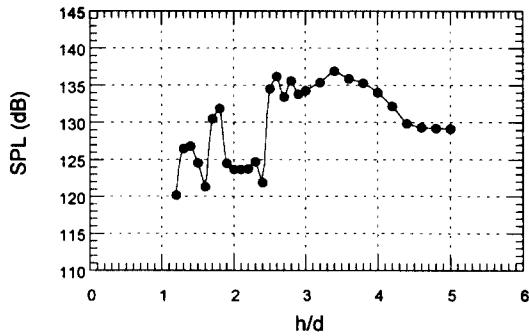
(b) $R=1.8$

Fig. 5 Variation of the tonal frequencies with the impinging distance at $R=2.3$ and $R=1.8$.

Fig. 6은 앞에서 도시한 충돌거리에 따른 주파수의 음압레벨값을 나타낸 것으로서 각 모드 및 단에 해당되는 위치에서 음압레벨의 크기가 점차 증가하여 최대치에 이른 후 다시 감소하는 경향을 볼 수 있으며 압력비가 높은 경우($R=2.3$)에는 S2모드가 그리고 압력비가 낮은 경우($R=1.8$)에는 S1모드의 음압레벨이 대체로 높음을 알 수 있다. 한편 본 연구에서는 $h/d=2$ 에서 가장 강한 소음파워를 갖는다는 Marsh의 실험결과와는 달리 전 압력비($R=2.3\sim 1.8$)에서 최대의 소음파워는 대체로 $h/d=2\sim 3$ 의 구간에서 발생함을 관찰할 수 있었다.



(a) R=2.3



(b) R=1.8

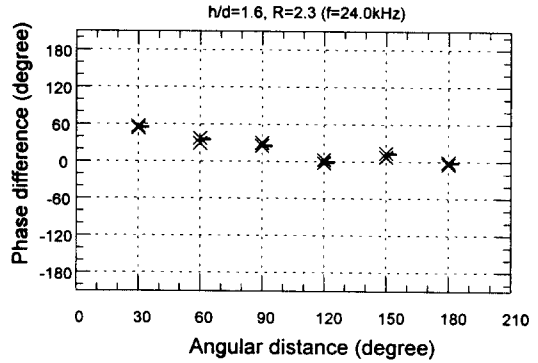
Fig. 6 Variation of SPL with the impinging distance at R=2.3 and R=1.8.

(2) 충돌음의 모드 특성

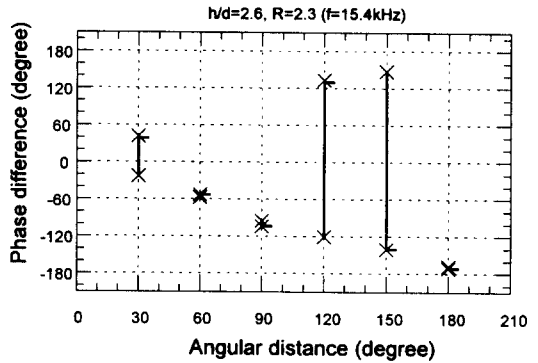
충돌음의 불안정 모드는 크게 대칭모드와 비대칭모드로 나눌 수 있으며 비대칭 모드는 나선형 (helical) 모드와 정현파형 (sinuous) 모드로 나눌 수 있다.⁽⁸⁾ 불안정 충돌음의 모드는 충돌음의 위상 특성으로부터 대칭형, 나선형 및 정현파형 중 어느 것에 속하는지 파악할 수 있다. 즉, 노즐의 중심축으로부터 원주방향으로 일정한 거리만큼 떨어진 두 마이크로폰 사이의 각도를 변화시켜가면서 전달함수의 위상을 측정하면 두 측정위치간의 위상차를 알 수 있고 따라서 원주방향으로의 위상분포를 알 수 있게 된다.

Fig. 7은 위상측정의 대표적인 결과로서 압력비 R=2.3일 때 각각 S2, H, S1모드에 해당하는 충돌거리 h=16mm, h=26mm, h=44mm의 경우이다. 그림에서 보면 h=16mm, h=44mm일 때의 S2, S1모드는 원주방향의 위상이 동일한 축대칭모드임을

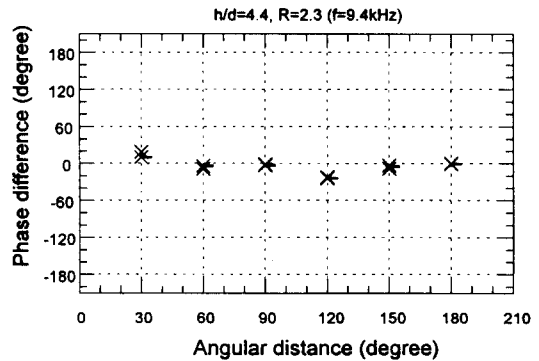
알 수 있고 h=26mm일 때의 H모드는 원주방향의 위상이 180°~0°까지 점차 변화가는 나선형모드임을 알 수 있다.



(a) S2 mode



(b) H mode



(c) S1 mode

Fig. 7 Phase distribution around the impinging jet for the S2, H and S1 mode, respectively.

충돌제트의 불안정 모드에 따른 충돌음의 방사 형태를 알아보기 위하여 분류의 상류측 축방향으로의 지향성을 측정하였다.

Fig. 8은 지향성 측정의 대표적인 결과로서 압력비 $R=2.3$ 이고 충돌거리가 각각 $h=16\text{mm}$, $h=26\text{mm}$, $h=44\text{mm}$ 인 경우이다. 그림에서 실선은 측정된 값이며 점선은 측정값을 분류축을 기준하여 투영한 값이다. 실험결과로부터 충돌소음의 지향특성은 각 모드에 따라서 다른 형태를 보임을 알 수 있었다. 먼저, 그림 (a)의 S2모드에 대한 경우를 보면 분류축(180°) 및 평판(90°)에 가까울수록 음의 세기가 약한 반면 상류측 125° 방향으로 음의 세기가 매우 강한 8자형의 지향성을 나타내고 있다. 이러한 현상은 분류의 속도구배로 인하여 분류의 하류측에서 음선이 분류의 바깥쪽으로 휘어지는 굴절효과(refraction effect)에 기인한다고 할 수 있다. 그림 (b)는 H모드에 대한 경우로서 상류측 115° 와 155° 부근에서 강한 지향성을 나타내는 반면 135° 부근에서는 음의 세기가 최대치에 비해 약 18dB가량 작은 매우 약한 지향성을 보이고 있다. 이러한 현상은 나선형모드의 경우 보텍스가 나선방향으로 돌아가면서 진행하는 성질에 의해 특정한 방사각에서 음의 간섭이 일어나기 때문이라고 사료된다. 그림 (c)는 S1모드에 대한 경우로서 S2모드와 마찬가지로 축대칭이기 때문에 유사한 형태의 지향성을 나타내고 있지만 지향성이 평판쪽으로 기울어진, 즉 평판쪽에 더욱 가까운 110° 방향에서 음의 세기가 최대인 경향을 보이고 있다.

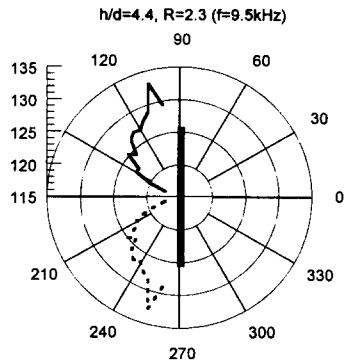
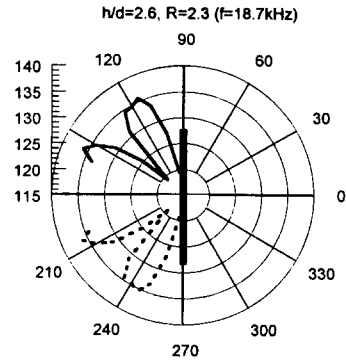
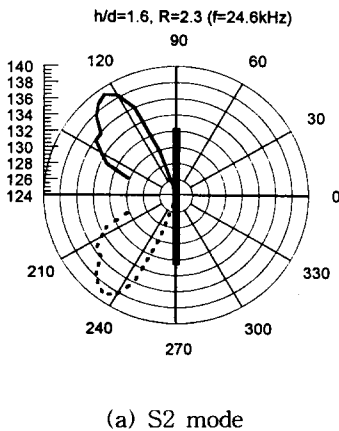


Fig. 8 Radiation pattern of the impinging tone for S2, H and S1 mode, respectively.

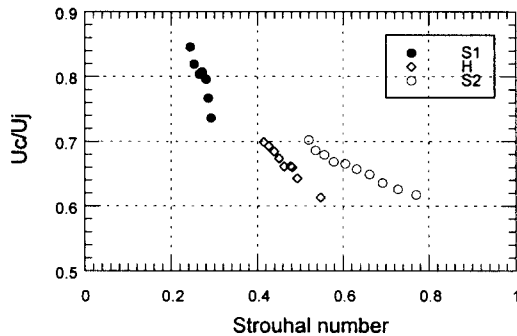
(3) 충돌음의 대류속도

충돌제트의 주파수 특성, 즉 제트의 속도와 충돌면의 거리 h 에 따른 주파수 f 및 단수 n 으로부터 보텍스의 평균 대류속도 U_c 와 제트속도 U_j 의 비는 충돌음의 피드백조건에 의하여 다음식으로 구할 수 있다.⁽⁹⁾

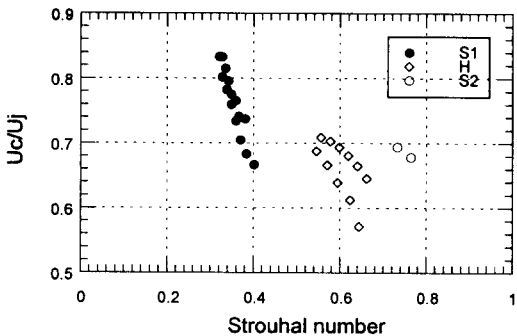
$$\frac{U_c}{U_j} = \frac{1}{\left(\frac{n}{fh} - \frac{1}{c}\right)U_j} \quad (1)$$

Fig. 5의 주파수특성으로부터 식(1)에 의하여 구한 주음의 대류속도비 U_c/U_j 를 주음의 무차원 주파수인 스트로할(Strouhal)수 $S_i=fd/U_j$ 의 함수로 나타내면 Fig. 9와 같다. 그림에서 대류속도는 주파

수에 따라 감소하는 함수로 나타나며 S2, H, S1모드의 대류속도가 뚜렷이 구별됨을 볼 수 있다. 또한 같은 대류속도에 대하여 S2모드가 S1모드의 2배에 가까운 주파수를 나타내며 H모드는 S1과 S2모드의 중간에 해당되는 주파수임을 알 수 있다. 한편 같은 스트로할수에 대해서는 제트의 속도가 빠를수록 즉, 레이놀즈수가 높을수록 대류속도비가 감소하는 것을 알 수 있는데 이러한 특성은 평면제트에서도 나타난 현상이다.⁽⁹⁾



(a) R=2.3



(b) R=1.8

Fig. 9 Convection velocity of the unstable jet as a function of Strouhal number for the main tones.

4. 결 론

아음속의 원형 충돌제트에 의한 충돌음의 주파수를 측정함으로써 고주파의 대칭모드 S2와 저주파의 대칭모드 S1 및 나선형모드 H의 3가지 불안

정모드가 존재함을 발견하였고 원주방향의 위상측정을 통해 이를 확인하였다. 또한 충돌음의 방사특성을 알기 위해 축방향의 지향성을 측정하였고 이로부터 축대칭 모드와 나선형 모드의 방사특성이 상이하며 충돌거리가 멀어질수록 지향성이 평판쪽으로 이동함을 알 수 있었다. 한편 충돌음의 대류속도는 주파수에 따라 감소하며 각 모드의 대류속도가 뚜렷이 구분됨을 확인하였다.

참고문헌

1. Chanaud, P. C. and Powell, A., 1965, "Some experiments concerning the hole and ring tone", J. Acoust. Soc. Am. 37, pp. 901-911.
2. Umeda, Y., Maeda, H. and Ishii, R., 1988, "Hole tone generated from almost choked to highly choked jets", AIAA jr. 26(9), pp. 1036-1043.
3. Powell, A., 1988, "The sound-producing oscillations of round underexpanded jets impinging on normal plates", J. Acoust. Soc. Am. 83(2), pp. 515-533.
4. Umeda, Y., Ishii, R. and Powell, A., 1991, "Change of oscillation modes of circular underexpanded jet by impingement on a small plate", Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. 53(4), pp. 195-214.
5. Umeda, Y., Maeda, H. and Ishii, R., 1987, "Discrete tones generated by the impingement of a high-speed jet on a circular cylinder", Physics Fluids 30(8), pp. 2380-2388.
6. Powell, A., Umeda, Y. and Ishii, R., 1992, "Observations of the oscillation modes of choked circular jets", J. Acoust. Soc. Am. 92(5), pp. 2823-2836.
7. Ho, C. M. and Nosseir, N. S., 1981, "Dynamics of an impinging jet : Part 1. The feedback phenomenon", J. Fluid Mech. 105, pp. 119-142.
8. Blake, W. K., 1986, Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration vol.1, pp. 130-218.
9. 권영필, 1997, "고속 충돌제트의 불안정 특성(1)-평면제트-", 대한기계학회 1997년도 춘계학술대회 논문집(B), pp. 615-618.

10. Kwon, Y. P., 1996, "Phase-locking condition in the feedback loop of low-speed edgetones", J. Acoust. Soc. Am. 100(5), pp. 3028-3032.
11. 권영필, 1995, "썰기소리의 되먹임 사이클의 위상조건", 대한기계학회논문집(B) 제20권 제3호, pp. 1106-1173.
12. 권영필, 임정빈, 1997, "원형 충돌제트의 불안정 모드", 한국소음진동공학회 1997년도 춘계학술대회 논문집, pp. 551-556