

고속 원형충돌제트의 불안정 특성(2)

임정빈*, °김현중*, 권영필**

Instabilities of High-speed Impinging Circular Jets(2)

Jung-Bin Im*, °Hyun-Joong Kim* and Young-Pil Kwon**

1. 서 론

고속의 제트가 고체면에 충돌함으로써 발생하는 충돌음(impinging tone)은 다양한 유동형태에서 관찰되는 현상으로서 충돌면의 형상에 따라 plate-tone, hole-tone, edge-tone, ring-tone 등으로 불리우고 있다.

이러한 충돌음은 광대역의 주파수특성을 보이는 일반적인 유체소음과는 달리 강한 순음성의 성분을 갖고 음파와 제트사이의 케환(feedback)작용에 의해 발생한다. 즉, 불안정한 제트가 맥동을 하면서 고체면에 부딪혀 발생한 음이 상류측으로 전파되어 노즐출구의 전단층을 교란하게 되고 이렇게 증폭된 교란이 성장하여 고체면에 부딪힘으로서 강한 순음성 충돌음이 발생하게 된다.

충돌음에 관한 기존의 연구는 충돌제트의 형태에 따라서 크게 평면제트와 원형제트에 대한 연구로 나눌 수 있으며 그 중 원형 충돌제트에 관한 연구로는 저속의 제트가 구멍 뚫린 평판에 충돌할 때 발생하는 hole-tone에 관한 연구⁽¹⁾가 있고 고속의 초음속 제트가 구멍⁽²⁾이나 충돌면이 넓은 벽⁽³⁾, 또는 좁은 원판⁽⁴⁾에 충돌할 때 발생하는 충돌음의 주파수특성이나 제트의 거동을 가시화한 연구들이 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^(4,5) 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⁽⁶⁾의 연구가 있으나 피드백모델의 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 불안정 제트의 대류속도와 같은 모드특성에 관해서는 연구된 바가 없다.

최근 권영필⁽⁷⁾은 평면제트의 충돌음에 관한 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. 또한 임정빈⁽⁸⁾ 등은 원형제트의 평판 충돌음(plate-tone)에 대한 연구로부터 아음속의 고속 원형충돌제트의 불안정모드에는 고주파의 대칭모드와 저주파의 대칭모드, 그리고 나선형 모드의 3가지가 있음을 발견하였고 각 모드에 따라 대류속도가 뚜렷이 구분됨을 보여주었다.

본 연구에서는 충돌면의 형상에 따른 고속 원형 충돌제트의 불안정 모드를 밝히기 위하여 우선 충돌면의 형상에 따른 주파수 특성을 비교하고자 하였다. 이를 위해 충돌면이 제트의 직경보다 작은 원판(small plate)과 제트의 직경보다 큰 구멍(hole)의 2가지 경우에 대하여 실험을 하였고 평판 충돌음에 대한 연구결과와 비교 검토하였다.

2. 실험

충돌제트음은 제트와 음파 사이의 피드백작용에

* 정회원, 숭실대학교 기계공학과 대학원

** 정회원, 숭실대학교 기계공학과

의한 것이므로 제트속도 및 충돌거리에 따라 주파수가 다른 특성을 갖는다.^(9,10) 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.

Small-plate-tone에 대한 실험은 Fig. 1과 같이 원형 노즐과 동심축상에 직경 끝단의 직경 6mm, 길이 400mm인 원형봉을 장착하고 일정한 충돌거리를 유지한 후 압축 공기를 분출하였을 때 발생하는 음을 콘덴서 마이크로폰으로 측정하여 주파수분석기(FFT)로 분석하였고, hole-tone에 대한 실험은 직경 20mm의 구멍이 뚫린 두께 4mm의 평판을 노즐의 축과 수직하게 장착한 후 마찬가지로 수행하였다. 이 때 small-plate 및 hole의 중심이 노즐의 중심과 일치하도록 하였다.

실험에 사용된 원형노즐은 출구지름 $d=10\text{mm}$, 직관부의 길이 47mm, 테이퍼의 입구지름 76mm, 길이 195mm, 축소각 9.3° 이고 마이크로폰(B&K type 4135)은 충돌면으로부터 반경 280mm, 40° 의 위치에 설치하였다.

한편 본 연구에서는 노즐 출구의 상류쪽으로 510mm 위치에 수은을 사용한 액주계를 설치함으로써 노즐 상류의 압력 P_j 를 측정하였다.

순음성 충돌음은 상류압력이 약 $P_j=0.25\text{atg}$ 일 때부터 발생하기 시작하였으므로 본 실험은 상류압력 P_j 와 대기압력 P_0 의 비인 압력비 ($R = P_j/P_0$)가 $1.3 < R < 2.3$ 의 범위에서 수행하였다.

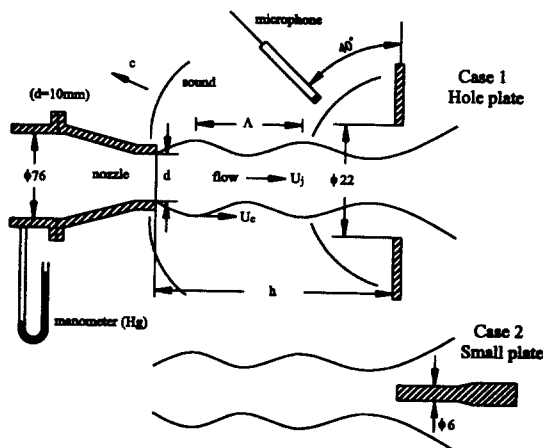


Fig. 1 Configuration of the impinging circular jet.

이는 이상적인 등엔트로피 팽창에 의한 제트속도 U_j 의 대기온도에서의 음속 c 에 대한 마하수 M_j 의 범위로 $0.60 < M_j < 1.03$ 이며 노즐지름과 공기의 동점성계수 ν 로 무차원화한 제트속도의 레이놀즈수, $Re = U_j d / \nu$ 는 $1.4 \times 10^5 < Re < 2.3 \times 10^5$ 의 범위에 해당함으로써 전단층은 난류라고 할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 압력비 $R=2.3$, 충돌거리 $h=30\text{mm}$ 일 때 이전 연구에서 측정된 plate-tone⁽⁹⁾과 본 연구에서 측정된 small-plate-tone 및 hole-tone의 스펙트럼을 자유분류의 경우와 비교한 것으로 이 때 각 경우의 측정위치는 모두 동일하도록 하였다. 그림의 특정주파수에서 매우 높은 레벨의 소음도를 갖는 순음(pure tone)들은 피드백작용에 의한 공진음을

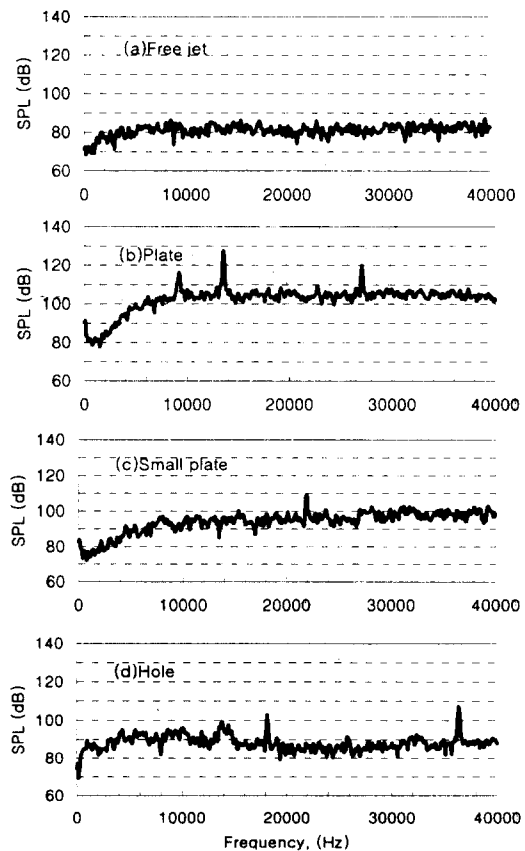


Fig. 2 Sound pressure level spectra from the impinging jet at $R=2.3$ and $h/d=3$.

나타내며 순음에 비해 음압레벨이 상당히 낮은 광대역 성분의 음은 난류음 및 순수한 의미의 충돌음을 나타낸다. 광대역 성분의 음압레벨의 크기는 $\text{plate-tone} > \text{small-plate-tone} > \text{hole-tone}$ 의 순서이며 이는 충돌면의 면적에 따른 결과임을 알 수 있다. 그 중 hole에 충돌하는 경우는 평판에 뚫린 구멍의 직경이 제트의 직경보다 상대적으로 커서 본 연구에서 대상으로 한 충돌거리 내에서는 제트가 구멍 외부의 플랜지와 충돌하지 않고 그냥 통과하므로 광대역 음압레벨이 plate나 small-plate에 충

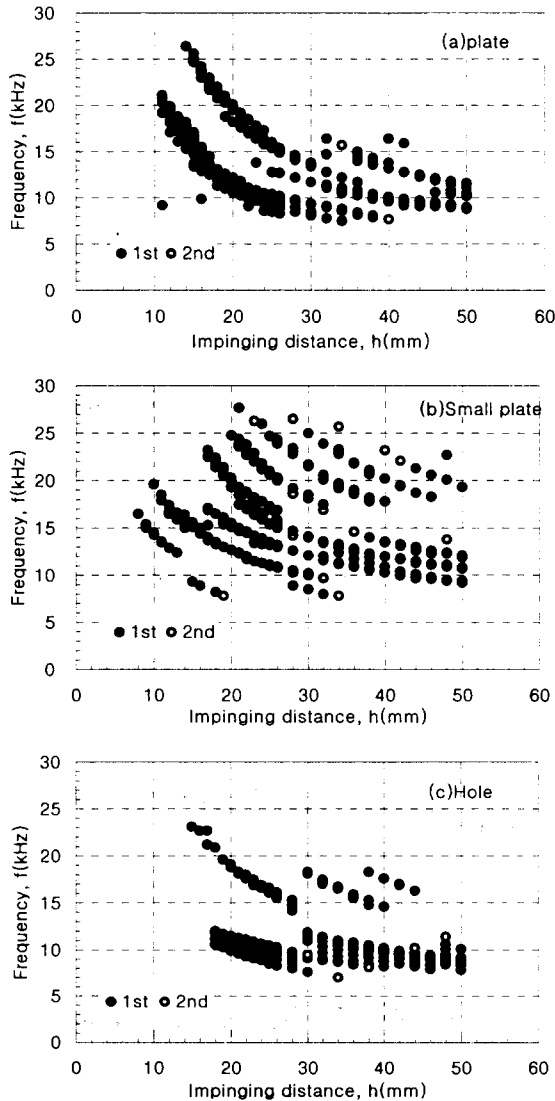


Fig. 3 Variation of the tonal frequencies of the plate, small-plate and hole-tone with the impinging distance at $R=2.3 \sim R=1.3$.

돌하는 경우보다는 낮지만 구멍의 선단에서 발생된 높은 음압의 tone에 의해 자유분류의 경우보다는 전체적으로 높게 나타나며 특히 저주파 대역의 음압레벨이 다른 경우보다도 상대적으로 높은 특징이 있다.

Fig. 3은 충돌거리 h 에 따른 순음성 충돌음의 주파수를 $R=2.3$ 부터 $R=1.3$ 까지 도시한 것으로서 광대역 레벨보다 20dB 이상 높은 주음인 첫번째(1st) 순음과 광대역 레벨보다는 높으나 주음에 비해서 10dB 이내의 차를 갖는 두번째(2nd) 순음을 동시에 나타낸 것이다.

Fig. 3(a)는 평판에 대한 이전 연구결과로서 충돌거리비 1 이상($h/d > 1$)에서 충돌음이 발생하며 주파수 특성이 고주파 대역의 대칭모드(S2)와 저주파 대역의 대칭모드(S1) 그리고 중간에 나선형모드(H)의 세 그룹으로 구분된다고 밝혀진 바가 있다.

Fig. 3(b)는 small-plate에 대한 측정 결과로서 평판의 경우보다 더 가까운 거리에서($h/d > 8$) 충돌음이 발생하기 시작하며 주파수대역이 보다 광범위함을 알 수 있다. 특히 평판의 경우는 $h=20\text{mm} \sim 50\text{mm}$ 의 구간에서 20kHz 이상의 고주파가 나타나지 않지만 small-plate의 경우는 규칙적으로 나타나고 있으며 주파수특성이 약 16kHz를 전후로 하여 2개의 그룹으로 나뉘어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 3(c)는 hole에 대한 측정 결과로서 위의 두 경우보다 더 먼 거리에서 충돌음이 발생하기 시작하며 주파수 대역이 보다 낮음을 볼 수 있다. 이러한 이유는 hole이 제트의 직경에 비해 크기 때문이라고 판단되며 만일 hole의 직경이 작아진다면 보다 가까운 거리에서부터 충돌음이 발생하고 주파수도 높아질 것으로 판단된다. 한편 hole-tone의 주파수특성은 약 13kHz를 전후로 하여 2개의 그룹으로 나뉘어 있음을 명확하게 볼 수 있다.

Fig. 4는 제트속도가 일정한 상태에서 충돌면의 종류에 따른 충돌음의 주파수를 비교한 것이다.

Fig. 4(a)는 $R=2.3$ 일 때의 결과로서 평판 충돌음의 주파수특성은 S2, H 그리고 S1의 세 그룹으로 나뉘어 있다고 밝혀진 바가 있다. 그림에서 small-plate-tone은 평판 충돌음의 S2 및 H모드에 해당되는 주파수대역에서 나타나며 hole-tone은 S2, H, S1의 모든 영역에서 나타남을 볼 수 있다. 따라서 압력비가 높은 경우, small-plate-tone을 유발하는 원형제트는 고주파의 대칭모드와 나선형모드의 형태이며 hole-tone의 경우는 나선형과 저주파의 대

칭모드 형태일 것으로 추측할 수 있다. 이는 hole-tone을 유발하는 원형제트의 불안정 모드가 모두 축대칭이라는 기존의 연구와 약간 다른 결과로서 충돌음의 위상측정 등을 통해 좀 더 상세한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 4(b)는 $R=2.1$ 일 때의 결과로서 small-plate-tone은 평판 충돌음의 S2 및 S1모드에 해당하고 hole-tone은 H 및 S1모드에 해당하며 small-plate-tone에 비해 대체로 낮은 주파수 대역에서 발생함을 알 수 있다.

Fig. 4(c)는 $R=1.9$ 일 때의 결과로서 small-plate-tone은 평판 충돌음의 S2, H 및 S1모드에 해당하지만 압력비가 낮아짐에 따라 주로 S1모드에 해당하는 주파수에서 나타나며 hole-tone은 저주파의 대칭모드 S1에서만 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4(d)는 $R=1.7$ 일 때의 결과로서 small-plate-tone과 hole-tone 모두 평판 충돌음의 S1모드에 해당하는 주파수임을 알 수 있고 따라서 압력비가 낮은 경우에 small-plate-tone과 hole-tone을 유발하는 충돌제트의 불안정모드는 저주파의 대칭모드라고 판단할 수 있다. 이는 초음속 제트에 의한 small-plate-tone이 고주파 대역에서만 발생한다는 기존의 연구와 비교되는 결과로서 아음속의 고속 충돌제트에 의한 충돌음은 저주파 대역에서도 발생함을 알 수 있다.

Fig. 4(e)는 $R=1.4$ 일 때의 결과로서 hole-tone은 여전히 저주파의 대칭모드 S1에서만 나타나지만 small-plate-tone은 주파수 대역이 약간 높아짐을 볼 수 있다. 하지만 역시 저주파의 대칭모드에 해당할 것으로 판단되며 small-plate-tone과 hole-tone 모두 평면 충돌음의 주파수와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

이상과 같은 주파수특성의 비교를 통해 아음속의 고속제트에 의한 small-plate-tone과 hole-tone

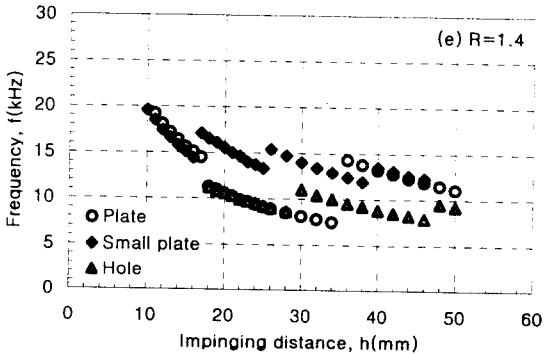
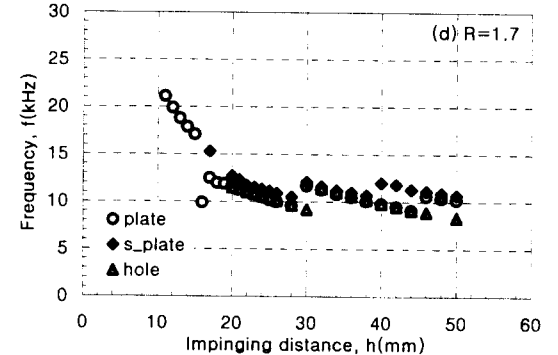
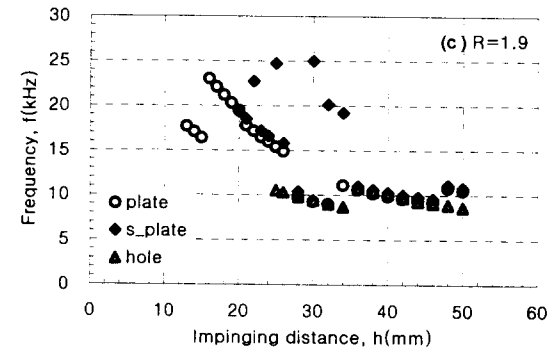
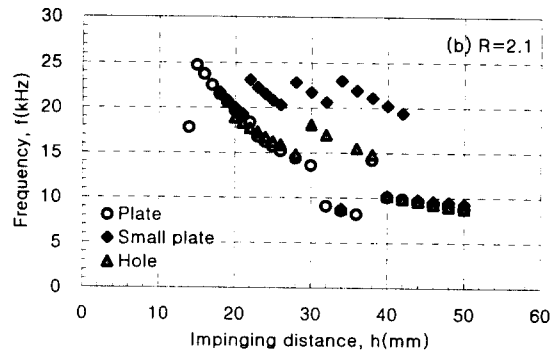
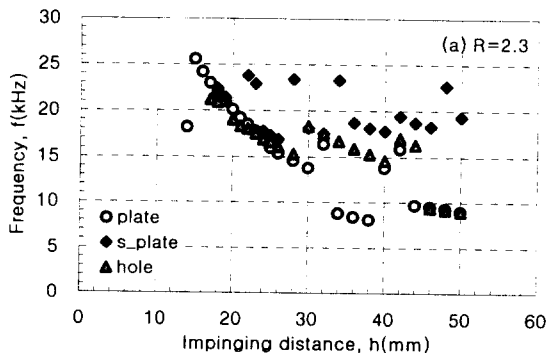


Fig. 4 Comparison of the tonal frequencies of the plate, small-plate and hole-tone

은 거의 모든 주파수 대역에서 나타나지만 압력비가 낮아지고 충돌거리가 멀어질수록 평판 충돌음의 S1모드에 해당하는 주파수 대역에서 주로 발생함을 알 수 있다. 또한 small-plate-tone과 hole-tone은 평판 충돌음의 주파수와 잘 일치하며, 따라서 충돌음의 주파수특성은 충돌면의 형태와 무관하고 노즐과 충돌면과의 특성길이 h 의 함수임을 알 수 있다. 한편 small-plate-tone과 hole-tone을 유발하는 제트의 불안정 모드특성에 관해서는 좀더 추가적인 연구가 요구된다고 하겠다.

4. 결 론

충돌면의 형상에 따른 주파수특성의 차이를 비교하기 위하여 충돌면이 제트의 직경에 비해 작은 원판인 경우와 제트의 직경보다 큰 구멍인 경우에 대하여 충돌음의 주파수를 측정하였고 평판 충돌음에 대한 결과와 비교 검토함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

고속 원형 충돌제트에 의한 small-plate-tone과 hole-tone은 거의 모든 주파수 대역에서 발생하며 small-plate의 경우가 hole에 비해 보다 넓은 주파수 대역에서 충돌음이 발생한다.

충돌음이 발생하기 시작하는 충돌거리는 충돌면이 small-plate인 경우가 가장 짧으며 hole은 다른 경우보다 먼 거리에서 충돌음이 발생하기 시작한다.

Small-plate-tone과 hole-tone은 평판 충돌음의 주파수와 잘 일치하며, 따라서 원형 제트에 의한 충돌음의 주파수특성은 충돌면의 형태와 무관하고 노즐과 충돌면 사이의 특성길이 h 만의 함수이다.

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) 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.

(6) 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.

(7) 권영필, 1998, "고속 충돌제트의 불안정특성(1) -평면제트-", 대한기계학회논문집(B) 제22권 제4호, pp. 452-458.

(8) 권영필, 임정빈, 1998, "고속 충돌제트의 불안정특성(2) -원형제트-", 대한기계학회논문집(B) 제22권 제4호, pp. 459-467.

(9) Kwon, Y. P., 1996, "Phase-locking condition in the feedback loop of low-speed edgetones", J. Acoust. Soc. Am. 100(5), pp. 3028-3032.

(10) 권영필, 1995, "췌기소리의 되먹임 사이클의 위상조건", 대한기계학회논문집(B) 제20권 제3호, pp. 1106-1173.