

고속 충돌제트의 불안정 특성 (2) — 원형 제트 —

권 영 필* · 임 정 빈**
(1997년 7월 30일 접수)

Instability of High-Speed Impinging Jets (II) — Circular Jet —

Young-Pil, Kwon and Jung-Bin, Im

Key Words : Circular Jet(원형제트), Instability(불안정), Impinging Jet(충돌제트), Convection Speed(대류속도), Mode(모드)

Abstract

The characteristics of the unstable impinging circular jet is 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. At low speed the S2 mode is dominant and switched by the S1 mode as the speed increases. When the jet speed is high the S1 mode is very active over the impinging distance from half the nozzle diameter to its ten times, while the S2 mode occurs at shorter distance corresponding to stage 2 and 3. The helical mode H seems unstable, likely to be influenced much by the experimental environment, and occurs at relatively high speed with almost the same frequency characteristics as the S2 mode. By estimating the convection speed of the unstable jet, it is found that the ratio of the convection speed to the jet speed decreases with both Strouhal number and Reynolds number and the speed of S2 mode is faster than the S1 mode. When the present experimental results are compared with the previous investigations performed for the hole tone and the impinging tone with a small plate, the S1 mode is found to be associated with the ring vortex of large diameter with low speed, but the S2 mode with the vortex of small diameter with high speed. In addition, the frequency is found to be influenced by the nozzle configuration but the characteristics is almost the same. From the impinging distance and frequency range, it can be deduced that S1 mode is related with the jet column mode and S2 mode with the shear mode.

1. 서 론

원형제트에 의한 충돌음은 평면제트의 경우와 아울러 제트의 대표적 불안정현상의 하나다. 원형 충

돌제트에 관해서는 저속에서 제트가 구멍 뚫린 평판에 충돌할 때 발생하는 hole-tone⁽¹⁾과 고속에서는 초음속 제트가 구멍⁽²⁾이나 충돌면이 넓은 벽,⁽³⁾ 또는 좁은 원판⁽⁴⁾에 충돌할 때의 충돌음에 관한 주파수특성이나 와동의 거동을 가시화한 연구들이 있다. 또한, 충돌면이 제트에 직교하는 가는 원통인 경우⁽⁵⁾와 충돌면이 없는 충격세포(shock cell)에

*회원, 숭실대학교 기계공학과

**회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과

의한 스크리치(screech)음⁽⁶⁾의 연구 등이 있다. 저속제트의 hole-tone을 일으키는 원형제트의 불안정 모드는 모두 축대칭인 것으로 밝혀졌으며⁽¹⁾ 초음속 제트의 경우는 대칭(symmetric) 모드 외에 충격세포의 작용에 의하여 비대칭인 나선형(helical)과 정현파형(sinuous) 모드가 나타나는 것이 밝혀졌으나^(4,6) 각 모드의 불안정 특성에 관한 연구는 발표된 바 없다. 충돌음의 연구와 관련하여 널리 인용되고 있는 마하수 0.9의 고속제트에 관한 Ho와 Nosseir⁽⁷⁾의 연구가 있으나 피드백모델의 검증에 주요점을 두었으며 제트의 불안정특성에 관해서는 다루지 않았다.

이상에서 살펴본 바와 같이 충돌음의 주파수 특성과 불안정모드에 관해서는 초음속 제트나 저속의 층류제트를 중심으로 연구가 있었을 뿐 고속의 난류제트에 대한 체계적인 실험이 이루어지지 않았으며 불안정 제트의 대류속도와 같은 모드특성에 관해서는 연구된 바 없다. 충돌음의 주파수특성을 예측하기 위해서도 대류속도에 관한 모델이 필요하나 지금까지 교란의 대류속도 U_c 는 제트속도 U_j 의 0.6배에 가까운 일정한 값으로 다루어왔다.⁽⁸⁾ Ho와 Nosseir⁽⁷⁾도 대류속도를 이와 같은 상수로 취급함으로써 피드백 조건을 맞추기 위하여 음파의 위상속도 c 가 변화한다고 보았다.

권영필⁽⁹⁾은 전 편에서 충돌음의 주파수특성 실험을 통하여 고속평면제트의 불안정특성을 구하였으며 대칭 모드와 비대칭 모드가 나타나는 불안정 영역을 구하고 교란의 대류속도는 주파수의 강한 함수관계인 것을 발견하였으며 모드에 따라 대류속도가 다른 특성을 나타내는 것을 보여주었다. 본 연구는 같은 연구방법에 의하여 고속 원형제트의 불안정 모드의 종류와 그 특성을 구하고 기존의 실험 데이터와 비교 고찰하였다.

2. 실험

충돌제트음은 제트와 음파 사이의 피드백작용에 의한 것이므로 제트속도 및 충돌거리에 따라 주파수가 다른 특성을 갖는다.^(10,11) 이러한 주파수특성은 제트속도 U_j 를 일정하게하고 충돌면의 거리 h 를 변화시키거나 거리를 일정하게 하고 유속을 변화시키면서 발생음의 주파수를 측정하여 분석하면 구할 수 있다.

실험은 Fig. 1과 같은 형상의 원형 노즐의 축에

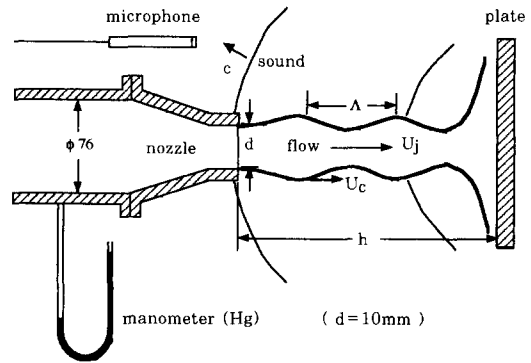


Fig. 1 Configuration of the impinging circular jet.

수직으로 평판을 장착한 후 일정한 충돌거리에 대하여 압축 공기를 분출하여 발생하는 소리를 콘덴서 마이크로폰으로 측정하여 FFT로 주파수를 분석하였다. 노즐은 출구 지름 $d=10$ mm에 직관부의 길이는 47 mm, 테이퍼부의 입구지름 76 mm, 길이 195 mm이며 충돌면으로 사용된 평판은 가로 290 mm, 세로 290 mm, 두께 4 mm인 강철이다. 마이크로폰은 노즐 출구에서 42 mm 상류에 반경 72 mm 위치에 설치하였다. 노즐 상류의 압력 P_j 는 수은을 사용한 액주계를 노즐 출구에서 상류쪽으로 510 mm 위치에 설치하여 측정하였다.

순음성 충돌음은 상류압력이 약 $P_j=0.25$ atg일 때부터 발생하기 시작하였으므로 본 실험은 상류압력 P_j 와 대기압력 P_0 의 비인 압력비($R=P_j/P_0$)가 $1.25 < R < 2.3$ 의 범위에서 실험하였다. 이는 이상적인 등엔트로피 팽창에 의한 제트속도 U_j 의 대기 온도에서의 음속 c 에 대한 마하수 M_j 의 범위로 $0.55 < M_j < 1.04$ 이며 노즐지름과 공기의 동점성계수 ν 로 무차원화한 제트속도의 레이놀즈수, $Re = \frac{U_j d}{\nu}$ 는 $2.7 \times 10^5 < Re < 4.8 \times 10^5$ 의 범위에 해당함으로써 전단층은 난류라고 할 수 있다.

불안정 충돌제트의 모드는 충돌음의 위상특성으로부터 대칭형, 나선형 및 정현파형 중 어느 것에 속하는지 파악할 수 있다. 본 연구에서는 제트의 중심 축에 수직인 원주 상에서 충돌음의 위상분포를 측정하였다. 두 개의 마이크로폰을 사용하여 음압의 상호상관(cross correlation)을 측정하면 두 점 사이의 위상 차를 알 수 있다. 두 마이크로폰 사이의 중심각을 바꾸면서 위상 차를 구하면 원주 전체의 위상 분포를 알 수 있다.

2.1 충돌음의 주파수특성

Fig. 2는 압력비 $R=1.4$ 이며 충돌거리 $h=25$ mm인 경우의 음압 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림에서 평평한 주파수 분포를 갖는 광대역 주파수 성분은 일반적인 난류소음을 나타내며 특정주파수에서 광대역 레벨보다 높은 순음들은 피드백작용에 의한 공진음인 충돌음을 나타내는 것이다. 충돌음은 하나의 순음만이 아니라 그 배음들인 고조파(harmonics)와 아울러 몇 개의 순음들을 가질 수 있다.

Fig. 3은 압력비 $R=1.4$ 에서 충돌거리에 따른 순음의 주파수를 도시한 것으로서 Fig. 2의 f_1 과 같이 음압이 광대역 레벨보다 20dB 이상 높은 주음인 첫째(1st) 순음과 f_3 와 같이 광대역 레벨보다는 매우 높으나 주음에 비해서는 10dB 이내의 차를 갖는 두번째(2nd) 순음을 동시에 나타낸 것이며 f_2 와 같이 주음과의 차가 10dB 이상인 음은 제외하였다. 그림에서 주파수 특성은 피드백작용에 의한 공진음의 특성이라 할 수 있는 불연속적인 계단특성을 나타내고 있는 것을 볼 수 있으며 이러한 계단특성이

주파수가 낮은 S1 모드와 높은 S2 모드로 나누어 지는 것을 알 수 있다. 두 그룹은 모두 대칭성 불안정 모드를 갖는 제트에 의한 것이지만 그 특성은 크게 다르다는 것을 뒤에서 밝힐 것이다. 각 모드 별로 단수 n 은 같은 주파수에 대한 충돌 거리의 비로부터 구할 수 있다. 어떤 모드의 주파수특성에서 단이 바뀌는 부분에서 다른 모드가 나타나기 쉽기 때문에 S1 모드와 S2 모드가 교대로 주음을 나타내는 교차적인 특성을 나타내는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 압력비 $R=1.8$, 충돌거리 $h=17$ mm인 경우의 음압 스펙트럼을 나타낸 것이다. 대개 압력비가 높은 경우 충돌거리가 노즐 지름의 1.7배인 구간을 전후하여 가장 많은 순음들이 나타나며 이들의 레벨이 엇비슷하기 때문에 주음의 구별이 어려운 경우도 있다. 그림에서 표시한 6개의 순음들의 주파수는 각각 $f_1=9.4kHz$, $f_2=12.6kHz$, $f_3=18.7kHz$, $f_5=28.1kHz$, $f_6=31.2kHz$ 이다. 이러한 순음들 중에서 f_1 , f_3 , f_5 는 각각 1:2:3의 정수비를 이루므로 f_3 와 f_5 는 기본음인 f_1 의 배음임을

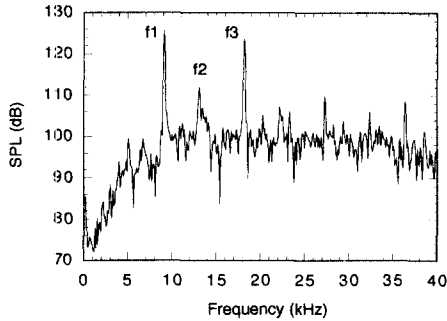


Fig. 2 Sound pressure spectrum at $R=1.4$ and $h=25$ mm.

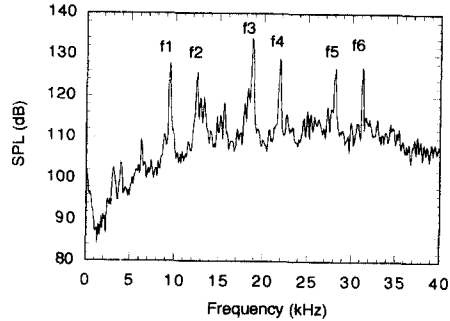


Fig. 4 Sound pressure spectrum at $R=1.8$ and $h=17$ mm.

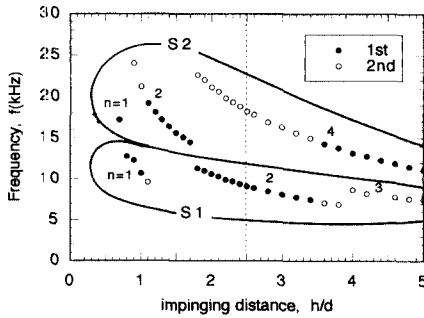


Fig. 3 Variation of the tonal frequencies with the impinging distance at $R=1.4$.

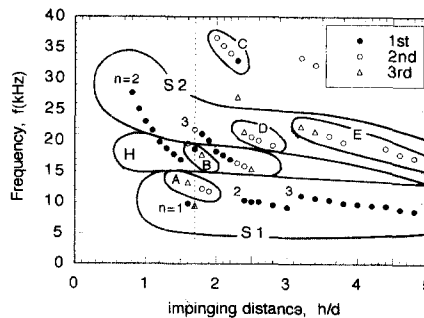


Fig. 5 Variation of the tonal frequencies with the impinging distance at $R=1.8$.

알 수 있다. 대개 배음은 기본음의 파형이 정확한 정현파가 아니기 때문에 나타난 것으로 간주하므로 기본음인 f_1 에만 의미를 두는 것이 일반적이다. 그러나 이 경우에서와 같이 기본음보다 배음의 진폭이 오히려 더 높은 경우는 배음이 다른 단의 주파수를 나타내는 것으로 보인다. 다음에 f_2 과 f_6 는 각각 $f_2=f_4-f_1$, $f_6=f_4+f_1$ 의 관계를 갖는 것을 알 수 있다. 이 경우의 f_2 와 f_6 는 일반적으로 f_1 과 f_4 를 나타내는 모드들의 비선형적인 거동에 의하여 그 차와 합에 해당하는 성분들이 나타난 것으로 볼 수 있다. 그러나 $R=1.9$ 이상에서는 f_2 가 진폭이 가장 큰 주음이 되기도 하는데 이 때 f_2 는 S1 모드의 다른 단을 나타내는 것으로 보인다.

Fig. 5는 압력비 $R=1.8$ 인 경우 충돌거리에 따른 충돌음의 주파수를 도시한 것이다. 그림의 주파수 특성은 기본적으로 대칭모드인 S1, S2 외에 나선형모드 H의 3그룹으로 나눌 수 있다. Fig. 4의 스펙트럼에 해당하는 $h/d=1.7$ 인 경우 f_1 은 대칭모드 S1의 $n=1$ 에 속하며 f_4 는 대칭모드 S2의 $n=3$ 에 해당하는 것을 알 수 있다. 그룹B에 속하는 f_3 는 f_1 의 배음으로서 대칭임이 밝혀졌으며 따라서 그룹B는 S1모드 $n=1$ 의 고조파로 보이지만 배음의 진폭이 오히려 기본음보다 더 커서 주음으로 되는 경우도 있기 때문에 단순히 고조파라고 볼 수는 없다. f_1 과 f_4 의 차인 f_2 는 대칭모드인 그룹A에 속하는 것으로서 S1 모드의 $n=2$ 의 연장선상에 놓여 있음을 알 수 있다. 고주파 대칭모드 S2와 나선형모드 H는 단수 $n=2$ 와 3인 경우가 있으며 서로 비슷한 주파수 특성을 나타내지만 나선형 모드가 다소 낮은 주파수에서 나타난다. 나선형 모드가 주음인 경우 대칭모드는 나타나지 않거나 매우 약하게 되는 것을 알 수 있다. 그룹C는 $n=3$ 인 H 모드의 배음과 일치하는 것으로서 앞에서의 그룹B와 마찬가지로 배음이 주음으로 되는 경우도 있기 때문에 단순히 고조파로 볼 수는 없다. 그러나 D와 E그룹은 S1 모드의 배음들로서 진폭이 매우 낮기 때문에 고조파로 볼 수 있다. 이상과 같은 $R=1.8$ 에서의 주파수 특성은 그 이상의 압력비에서도 비슷하게 나타났다. 그룹 A, B, C, D, E의 모드 특성에 대한 자세한 고찰을 위해서는 보다 더 심층적인 연구가 필요할 것으로 보이며 여기서는 주로 S1, S2 및 H 모드에 주안점을 두고 연구하였다.

2.2 모드 특성

방사음의 위상 측정 결과 S1 모드와 S2 모드는 모두 동일한 위상분포를 보여주었으며 그 한 예로서 압력비 $R=2.0$ 에서 S1 모드에 속한 $h/d=3$ 일 때와 S2 모드에 속한 $h/d=2$ 일 때를 보면 Fig. 6과 같다. 음장이 축대칭인 것을 알 수 있으며 따라서 제트의 불안정 모드도 축대칭이라 할 수 있다. 그런데 $R=2.0$ 에서 H 모드의 $n=3$ 에 속한 $h/d=2.2$ 일 때와 $h/d=2.4$ 일 때는 모두 Fig. 7에 도시한 바와 같이 두 측정점의 중심각에 비례하는 위상차를 나타내므로 나선형 모드임을 알 수 있다.

나선형 모드 H는 Fig. 5에서 보면 고주파의 대칭모드 S2보다 주파수가 낮은 편이나 서로 비슷한 주파수 특성을 나타내므로 주파수특성 만으로는 S2 모드와의 구별이 쉽지 않다. 또한 나선형 모드는 좌측 아니면 우측으로 회전하는 모드로서 불안정한 편이기 때문에 실험 분위기에 따라 많은 영향을 받는다. 압력비 $R=1.8$ 미만에서는 관찰되지 않았으며 $R=1.8$ 일 때 $n=2$ 및 3까지 나타나나

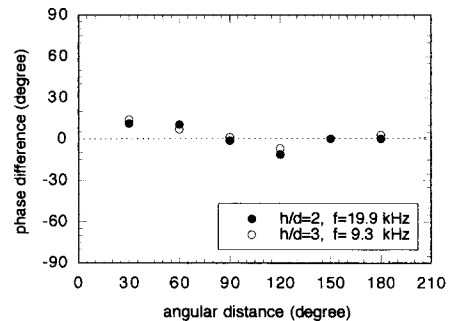


Fig. 6 Phase distribution around the jet of the impinging sound pressure for the symmetrical modes.

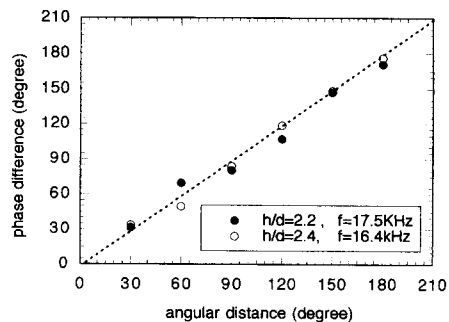


Fig. 7 Phase distribution around the jet of the impinging sound pressure for the helical modes.

R=1.9에서는 $n=3$ 만 나타나며 R=2.1 이상에서는 배음들이 모두 주음이 되는 것으로 나타났다. 이상과 같이 나선형 모드는 제한된 조건에서만 나타나며 S2 모드와 비슷한 주파수특성을 나타내므로 본 연구에서는 대칭모드인 S1과 S2의 특성에 관해서만 더 자세히 다루기로 하였다.

Fig. 8은 서로 다른 압력비에서 무차원 충돌거리 h/d 에 대한 주음의 무차원 주파수인 스트로할 (Strouhal) 수, $St_i = \frac{fd}{U_j}$ 의 변화를 도시한 것이다.

충돌음은 R=1.2에서부터 관찰되기 시작하며 압력비가 낮은 경우에는 S2 모드가 지배적이며 압력비가 높아짐에 따라 중간 거리에서 S1 모드가 주음이 되다가 $R > 1.7$ 으로 높아지면 S2 모드는 $h/d < 3$ 인 충돌거리에만 나타나고 S1 모드는 h/d 가 1 이하에서 10 이상일 때까지 안정적으로 나타난다. 그림에서 보인 바와 같이 R=1.3인 경우에는 단수 $n=1$ 에서 5까지의 S2 모드가 나타나며 R=1.6에서 S1은 $n=1$ 에서 3까지 나타나고 S2는 $n=3$ 을 뛰어넘어 $n=2$ 와 4에서 주음이 나타나는 것을 볼

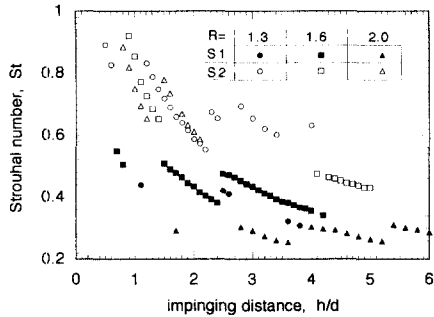


Fig. 8 Strouhal number as a function of the normalized impinging distance for the main tones.

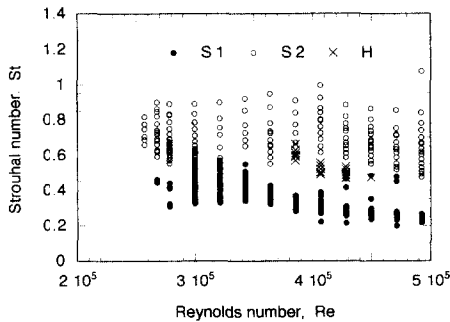


Fig. 9 Strouhal number vs. the Reynolds number for the main tones.

수 있다. 이와 같이 R=1.4에서 1.6인 범위에서는 충돌거리가 멀어도 S2 모드가 나타나는 경향을 보이지만 압력비가 더욱 높아지면 $h/d > 3$ 에서는 S1 모드만 나타난다. 또한, 같은 모드 같은 단에 대하여 압력비가 높을수록, 즉 제트의 속도가 빠를수록 스트로할수 St_i 는 감소하는 경향을 나타낸다.

Fig. 9는 두 대칭모드가 주음으로 나타나는 범위를 레이놀즈수의 함수로 나타낸 것이다. R=1.3, 1.6 및 2.0에 대응하는 레이놀즈수는 각각 $Re = 2.8 \times 10^5$, 3.4×10^5 , 4.3×10^5 이다. 그림에서 주음의 스트로할수는 0.2에서 1 사이에 있고 S2 모드가 S1 모드보다 더 높은 스트로할수에서 나타나며 레이놀즈수가 증가할수록 S2 모드가 나타나게 되는 스트로할수의 범위가 더욱 크게 되고 레이놀즈수가 높은 경우 S1 모드와 S2 모드 사이에 나선형의 H 모드가 나타난다.

3. 대류속도와 파장

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 다음 식으로 구할 수 있다.⁽⁹⁾

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

Fig. 8의 주파수특성으로부터 식 (1)에 의하여 구한 대류속도비 $\frac{U_c}{U_j}$ 를 스트로할수의 함수로 도시하면 Fig. 10과 같다. 그림에서 대류속도는 주파수

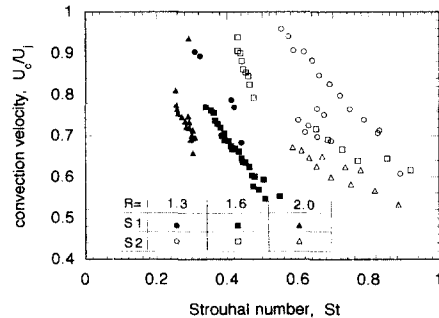


Fig. 10 Convection velocity of the unstable jet as a function of Strouhal number for the main tones.

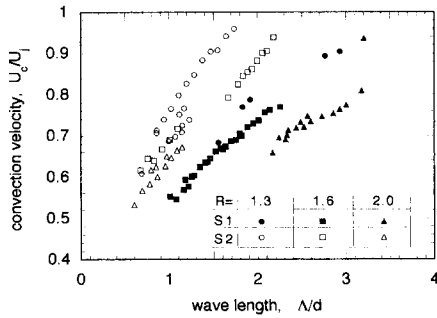
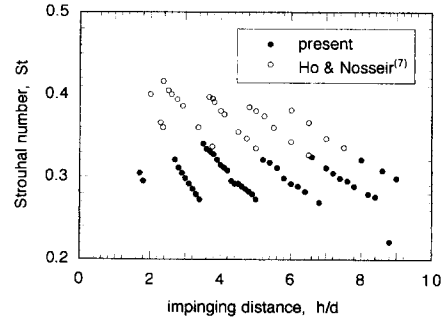


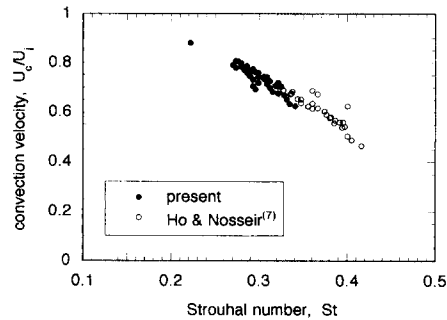
Fig. 11 Convection velocity of the unstable jet as a function of the normalized wavelength for the main tones.

에 따라서 감소하는 함수로 나타나며 S1 모드와 S2 모드의 대류속도가 뚜렷이 구별되고 같은 대류속도에 대하여 S2 모드가 S1 모드의 2배에 가까운 주파수를 나타내는 것을 알 수 있다. 대류속도는 주파수 즉, 스트로할수에 대하여 감소함수를 나타내며 같은 스트로할수에서는 제트의 속도가 빠를수록 즉, 레이놀즈수가 높을수록 대류속도비가 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 평면제트에서도 나타난 현상이다.⁽⁹⁾ 제트의 속도가 낮은 경우에는 단수에 따라서도 다소의 편차를 보이나 제트 속도가 증가함에 따라서 단의 영향은 감소한다. 대류속도가 단에 따라서 영향을 받지 않는다는 것은 보텍스의 거동이 충돌하기까지의 거리에 관계없이 오로지 주파수와 제트속도만의 함수가 되는 것을 의미한다. 이런 특성은 S2 모드에 비하여 S1 모드가 더욱 현저하다. 그러나 $n=1$ 인 경우는 $n \geq 2$ 인 경우에 비하여 상당히 높은 대류속도를 나타내는 것을 알 수 있으며 이것 또한 평면제트의 경우에서도 관찰된 현상이다.

Fig. 11은 불안정 모드의 파장 λ 와 대류속도의 관계를 나타낸 것이다. 파장 λ 은 대류속도를 주파수로 나눈 $\lambda = \frac{U_c}{f}$ 에 의하여 구할 수 있다. Fig. 11에서 파장이 길수록 대류속도가 증가하는 것을 알 수 있고 S1 모드의 파장이 S2 모드에 비하여 길며 전자의 파장은 노즐 지름의 1배에서 4배 사이에 있으나 후자는 0.5배에서 2배 사이에 존재하는 것을 알 수 있다. 대류속도가 같은 경우 S1 모드는 S2 모드에 비하여 Fig. 10에서 보면 주파수가 0.5배에 가깝고 Fig. 11에서 보면 파장이 2배에 가까운 것을 알 수 있다.



(a) Frequency data



(b) Estimated convection velocity

Fig. 12 Comparison of the present data with that by Ho and Nosseir⁽⁷⁾ for the jet speed of $M_j=0.9$.

4. 노즐과 충돌면 형상의 영향

유동의 불안정 현상은 교란이 가해지기 전의 기초유동(base flow)의 속도분포에 의존한다. 노즐의 형상에 따라서 노즐 근처에서 전단층의 속도분포가 다르고 충돌면의 형상에 따라서 방사음의 특성이 다르게 되므로 제트에 가해지는 교란의 형태가 다르게 된다. 따라서, 노즐이나 충돌면의 형상이 불안정 특성에 어떠한 영향을 미치는지 조사할 필요가 있다. 본 연구에서 사용한 Fig. 1과 같은 형상의 노즐과 충돌면을 이용한 실험데이터와 선행 연구자들에 의하여 발표된 다른 조건에서의 충돌음 데이터를 비교하여 고찰하고자 한다.

Ho와 Nosseir⁽⁷⁾는 출구지름은 본 연구에서와 같은 $d=10$ mm이나 단면이 지수함수적으로 감소되는 축소비 289:1인 노즐과 수직평판에 대하여 제트 속도의 마하(Mach)수가 0.9인 경우를 연구하였으며 같은 유속에 대하여 본 연구에서 구한 데이터 중 S1 모드와 주파수특성을 함께 도시하면 Fig.

12(a)와 같고 Fig. 12(b)는 대류속도를 계산하여 도시한 것이다. Ho와 Nosseir⁽⁷⁾의 경우에도 S1과 S2 모드가 모두 발생하였을 것이나 S1 모드에 관한 것만 다른 것으로 보인다. 주파수특성을 보면 본 연구에서 사용한 노즐이 다소 낮은 주파수를 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 스트로할수에 따른 대류속도비의 변화를 비교하여 보면 S1 모드에 대하여 거의 일치하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서, 노즐의 형상은 주파수 범위에 영향을 미치나 그 특성에는 큰 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

Ho와 Nosseir⁽⁷⁾는 대류속도를 직접 측정된 후 그 평균치인 $\frac{U_c}{U_j} = 0.62$ 를 사용하여 피드백 모델에서 각 단계에 대응하는 단수 n 이 정수로 되는가를 확인하려고 하였다. 그러나 주파수에 따라서 변하는 대류속도를 상수로 고정하였으므로 단수가 정수로 될 수가 없었고 따라서 그는 음파의 위상속도를 보정하여 정수가 되게 하였으나 음속이 변할 수는 없기 때문에 불합리하다고 할 수 있다.

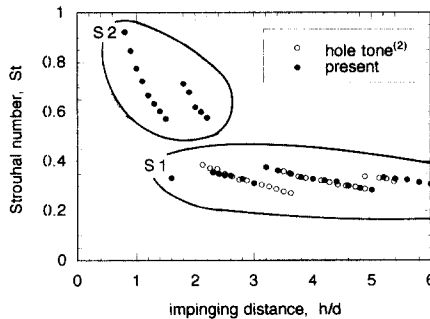


Fig. 13 Comparison of the present data with that of hole-tone by Umeda et al.⁽²⁾ for $R=1.77$.

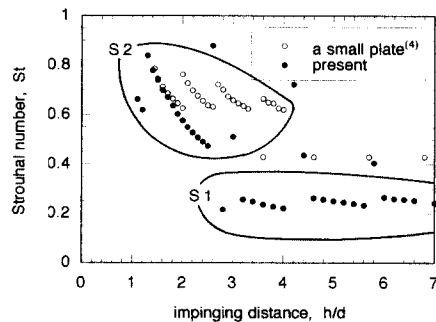


Fig. 14 Comparison of the present data with that with a small plate by Umeda et al.⁽⁴⁾ for $R=2.26$.

Umeda 등⁽²⁾은 본 연구와 형상이 비슷한 지름 10 mm의 노즐과 지름 22 mm 구멍이 동축상에 뚫린 판에 의하여 발생하는 충돌음인 hole-tone에 관하여 연구한 바 있다. 이들은 주로 초음속 유동을 대상으로 하였으나 압력비 $R=1.77$ 에서의 주파수특성을 제시하였기 때문에 본 연구와 비교할 수 있으며 도시하면 Fig. 13과 같다. 그림에서 hole-tone은 저주파 모드인 S1만 나타나나 고주파의 S2 모드가 나타나지 않는 것을 알 수 있으며 이것은 S1 모드와 S2 모드에 관련된 보텍스의 구조가 다르기 때문으로 사료된다. 즉, S2 모드에 관련된 보텍스는 지름이 큰 구멍과는 충돌을 일으키지 않는다고 할 수 있다.

또한, Umeda 등⁽⁴⁾은 hole-tone⁽²⁾의 경우와 같은 노즐에 대하여 구멍 뚫린 판 대신 노즐보다 단면이 좁은 지름 3.5 mm의 원판을 충돌면으로 하였을 때의 충돌음에 관하여 연구하였다. Fig. 14는 압력비 $R=2.26$ 에서의 주파수특성을 같은 압력비에서 본 연구의 결과와 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 제트가 좁은 충돌면에 작용하는 경우는 S2 모드만 발생하고 S1 모드는 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 앞에서의 hole-tone과는 반대 현상으로서 모드 S1에 관련된 보텍스는 노즐보다 훨씬 좁은 단면과는 충돌을 일으키지 않는다고 할 수 있다.

이상과 같이 충돌면에 따라서 대칭모드 S1과 S2의 발생특성이 다른 것은 두 모드의 특성을 파악할 수 있는 관건이 된다고 본다. Umeda 등⁽⁵⁾은 원형 제트가 가는 원통에 수직으로 충돌하는 경우의 Schlieren사진에서 지름이 큰 보텍스와 지름이 작으면서 속도가 보다 빠른 보텍스가 함께 나타나는 것을 관찰하였다. 따라서, 대류속도가 낮은 S1 모드는 지름이 큰 보텍스에 의한 것이며 대류속도가 빠른 S2 모드는 지름이 작은 보텍스에 의한 것으로 판단된다. 따라서 제트의 지름보다 훨씬 큰 지름의 구멍에 의한 hole-tone에서는 높은 주파수의 그룹인 S2 모드가 전혀 나타나지 않는 것은 지름이 작은 보텍스가 구멍과 아무런 충돌을 일으키지 않고 통과하기 때문이라 할 수 있다. 한편, 충돌면이 노즐보다 지름이 더 작은 원형 막대일 때 고주파 모드 S2만 나타난 것은 지름이 큰 보텍스는 막대와 충돌을 일으키지 않기 때문으로 사료된다. 반면에, 지름이 가는 원통을 제트에 수직으로 놓은 경우에는 본 연구의 평면벽과 같이 S1 모드와 S2 모드가 동시에 나타났다.

원형제트의 불안정모드에 관한 선행 연구^(12,13)에 의하면 축대칭모드는 노즐 가까이에서 불안정한 전단층에 의한 전단모드(shear layer mode)와 상류 조건에 관계없이 지름의 1배이상의 거리에서 나타나는 칼럼모드(jet column mode)로 분류된다. 또한 칼럼모드의 스트로할 수는 $0.3 < St < 0.5$ 의 범위에 있는 것으로 알려져 있다. S1 모드는 발생하는 충돌거리와 스트로할수의 범위로 볼 때 칼럼모드인 것으로 보이며 S2 모드는 대체로 노즐출구에 가까운 곳에서 발생하고 주파수가 높은 것으로 보아 전단모드일 것으로 추정된다. 이 두 모드들의 거동이 충돌제트에서 어떻게 본 연구에서의와 같은 특성을 보이는지는 설명하기 어렵다. 이 두모드의 발생과정과 거동특성에 관해서는 보다 심층적인 연구가 필요하다고 본다.

5. 결 론

아음속의 원형 충돌제트의 불안정 모드에는 저주파의 대칭 모드 S1과 고주파의 대칭모드 S2 및 나선형 모드 H가 존재한다. 제트 속도가 낮을 때는 고주파의 S2 모드가 지배적으로 나타나며 속도가 증가함에 따라서 저주파의 S1 모드가 충돌거리에 따라서 교차적으로 나타난다. 제트속도가 충분히 높아지면 S1 모드는 충돌거리가 노즐 지름의 1배에서 10배에 이르는 범위에 걸쳐 강하게 나타나며 S2 모드는 짧은 충돌 거리에서만 나타나고 나선형의 H 모드는 불안정하게 나타나나 주파수 특성이 S2 모드와 비슷한 경향을 나타낸다. 대류속도비는 스트로할수와 레이놀즈수의 감소함수를 나타내나 제트속도가 낮은 경우는 단수에 따라서도 편차를 보이며 특히 S1 모드에서 $n=1$ 인 경우 현저히 높은 대류속도의 특성을 나타낸다. 파장은 S1 모드가 노즐지름의 1배에서 4배에 걸쳐 있으나 S2 모드는 그 절반에 가까운 값을 나타내고 같은 대류속도에서 S1 모드는 S2 모드에 비하여 주파수는 0.5 배, 파장은 2배에 가깝다. S1 모드는 지름이 큰 저속 보텍스에 의한 것으로서 충돌면의 지름이 노즐지름보다 훨씬 작은 경우는 나타나지 않는다. 한편, S2 모드는 지름이 작은 보다 빠른 보텍스에 의한 것으로서 노즐 지름보다 큰 구멍이 뚫린 충돌면에 의한 hole-tone에서는 나타나지 않는다. 또한, 노즐의 형상이 변하면 주파수범위가 다르나 그 특성에는 변화가 없다. 발생하는 충돌거리와 스트

로할수의 범위로 볼 때 S1 모드는 칼럼모드인 것으로 보이며 S2 모드는 대체로 노즐출구에 가까운 곳에서 발생하고 주파수가 높은 것으로 보아 전단모드일 것으로 추정된다. 그러나 이 두 모드의 발생과정과 거동특성에 관해서는 보다 심층적인 연구가 필요하다고 본다.

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 Nasseir, 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, 1998, "고속 충돌제트의 불안정 특성 (1) — 평면 제트 —," 대한기계학회 논문집 B권, 제22권 제4호 pp. 452~458.
- (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, "췌기소리의 되먹임 사이클의

- 위상조건,” 대한기계학회논문집(B) 제20권 제3호, pp. 1106~1173.
- (12) Hussain, A. K. M. F., 1983, “Coherent Structures-Reality and Myth,” *Physics of Fluids* 26, pp. 2816~2850.
- (13) Bridges, J. E. and Hussain, A. K. M. F., 1987, “Roles of Initial Condition and Vortex Pairing in Jet Noise.” *Journal of Sound and Vibration* 117(2), pp. 289~311.