

〈논 문〉

Hole-Tone의 발생과 원형제트의 불안정 특성

Instability Characteristics of Circular Jets Producing Hole-Tones

임 정 빈* · 권 영 필**

Jung-Bin Im and Young-Pil Kwon

(1999년 6월 18일 접수 ; 1999년 9월 2일 심사완료)

Key Words : Circular Impinging Jet(원형충돌제트), Instability(불안정), Tone(순음), Strouhal Number(스트로할수), Convection Speed(대류속도), Mode(모드)

ABSTRACT

Generation of hole-tones and the instability of circular impinging jets are investigated based on the frequency characteristics and the radiated sound field. The experiment is carried out with varying hole sizes, jet speeds and impinging distances. It is found that hole-tones occur by both the low-speed laminar jet and the high-speed turbulent jet, but not by the transient jet, while plate-tones without holes are produced only in the high-speed turbulent impinging jet. When the diameter ratio of the hole to the nozzle is nearly one, hole-tones occur most easily. At low speed, it is found that hole-tones are due to the symmetrical unstable jet and the impinging distance decreases with jet speed. And the Strouhal number and the sound pressure level increase with jet speed. At high speed, hole-tones show the same characteristics as plate-tones. It is found that the ratio of the convection speed varies with the Strouhal number and the jet speed.

1. 서 론

유동소음은 난류에 의한 광대역음과 규칙적인 보텍스에 의한 순음(tone)으로 나눌 수 있다. 순음성 충돌음은 노즐 출구의 전단층에 가해진 교란이 조직화된 보텍스로 증폭되어 고체면에 부딪혀 소리를 발생하고 이 소리가 다시 교란의 원인이 되는 되먹임(feedback)작용⁽¹⁾에 의한 것이다. 이러한 충돌음에는 충돌면의 형상에 따라서 edge-tone⁽¹⁾, hole-tone^(2,3), plate-tone^(4,5), cavity-tone등이 있다.

순음성 충돌음에 대한 지금까지의 연구는 주로 특정 유속조건에 관하여 피드백 모델의 검증⁽⁶⁾에 주안

점을 두었을 뿐 제트의 불안정 특성에 관한 체계적인 연구가 없었다. 제트의 거동에 관한 연구는 가시화가 용이한 초음속제트에 관하여 주로 이루어졌고 초음속 제트의 불안정 모드에는 대칭, 비대칭인 나선형(helical) 및 정현파(sinuous)형이 있는 것이 밝혀졌다^(4,5). 유사한 연구가 초음속 제트의 경우 충돌면 대신 충격세포(shock cell)에 의하여 발생하는 스크리치(screech)음⁽⁷⁾에 관해서도 이루어졌다.

저속원형제트의 경우 구멍이 뚫린 평판에 충돌하는 hole-tone에 대한 Chanaud와 Powell⁽²⁾의 연구가 있으며 대칭모드만 나타나는 것으로 알려졌으나 제트의 레이놀즈수, $Re = 2,500$ (노즐지름 기준) 이하의 영역만을 다루었다.

아음속의 고속원형제트의 경우는 마하수 $M = 0.9$ 에서 $Ho^{(6)}$ 등의 평판 충돌음(plate-tone)에 관한 연구와 $M = 0.84$ 에서 Umeda⁽³⁾등의 hole-tone에 관한

* 정회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과
** 정회원, 숭실대학교 공과대학 기계공학과

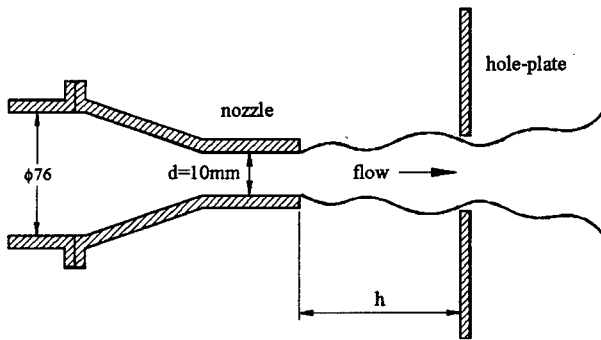


Fig. 1 Configuration of the impinging tones

연구가 있으나 충돌음의 발생기구나 주파수 특성에 주안점을 두었을 뿐이다.

최근 권영필등^(8,9)은 고속충돌제트의 불안정특성에 관하여 발표하였으며 원형제트의 평판 충돌음에 대한 연구⁽⁹⁾에서 충돌음은 $Re=10^5$ 이상의 고속에서만 발생하며 불안정 모드에는 저주파 대칭모드, 고주파 대칭모드와 나선형 모드가 있음을 발견하였고 모드에 따라 대류속도의 특성이 다르게 나타나는 것을 보여주었다.

따라서 본 연구는 Fig. 1과 같이 원형제트가 구멍이 뚫린 평판에 충돌하여 발생하는 hole-tone과 관련하여 충돌음의 주파수 특성과 원형충돌제트의 불안정 특성을 아음속 제트의 전 범위에 걸쳐 체계화하기 위한 것이다. 실험은 충돌판의 구멍 지름, 제트의 속도와 충돌거리 등을 변화시키면서 얻은 실험결과를 선행결과⁽⁹⁾와 종합하여 충돌음의 발생 조건, 범위, 불안정 모드 및 대류속도 등의 불안정 특성을 구하였다.

2. 실험

실험장치는 서지탱크(surge tank), 압축기, 소음기, 3차원 이송장치, 송풍기, 원형노즐 등으로 구성하였다. 충돌면은 두께 4 mm, 한 변의 길이가 290 mm인 정사각형 평판에 $D=8, 10, 14, 16, 20$ mm의 구멍을 뚫어 노즐과 동일 축 상에 위치하도록 하였고 노즐 상류의 소음을 줄이기 위한 소음기와 분류의 안정화를 위한 하니콤(honeycomb)을 설치하였으며 노즐은 선행연구⁽⁹⁾와 같이 출구지름 $d=10$ mm에 직관부의 길이 47 mm, 테이퍼부의 입구지름 76 mm, 길이 195 mm이며 축소각은 9.3° 이다.

본 연구에서는 일정한 충돌거리에서 공기를 분출시켰을 때 발생하는 음을 콘덴서 마이크로폰(B&K, type 4135)으로 충돌면의 선단에서 40° 방향, 구멍의

중심부와 100 mm의 거리를 유지하며 측정하여 주파수 분석기(FFT)로 분석하였다. 또한 충돌음의 지향 특성을 측정하기 위해 충돌면과 마이크로폰 사이의 각도를 변화시킬 수 있도록 하였고, 제트의 불안정 모드를 구하기 위해 두 개의 마이크로폰을 노즐 축 상에 설치하고 두 마이크로폰 사이의 원주각을 변화시킴으로서 제트의 반경방향에서 충돌음의 위상차를 측정할 수 있도록 하였다.

제트속도가 0~4.5 m/s인 범위에서는 노즐의 상류에서 잘 보정된 판형 오리피스로 유량을 계측하여 유속을 조정하였고, 그 이상의 속도 범위는 노즐 출구의 상류 쪽으로 510 mm의 위치에 액주계(manometer)를 설치하여 상류압력과 대기압과의 압력비로 제트속도를 조절하였다. 본 연구에서는 상류압이 2.3기압 일 때까지 수행하였으며 이는 제트의 속도로 $0 < U_0 < 332$ m/s의 범위이고 레이놀즈수로는 $0 < Re < 230,000$ 의 유속범위에 해당한다.

3. 실험결과 및 고찰

상류압 P_i 와 대기압 P_0 의 비인 압력비 $R=P_i/P_0$ 를 이용하면 대기온도 T_0 에 대한 음속기준 제트의 마하수 M_0 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$M_0 = C_v \left[\frac{2}{\gamma-1} \left(R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (1)$$

식에서 비열비 $\gamma=1.4$ 이고 C_v 는 유속계수이다. 제트의 평균속도 U_0 는 $U_0=340 M_0 \sqrt{T_0/288}$ (m/s)로 구할 수 있다. 이동훈등⁽¹⁰⁾은 본 연구와 동일한 노즐을 사용한 실험을 통해 아음속 범위에서 압력비와 속도계수에 대한 다음 실험식을 제시하였다.

$$C_v = 0.995545 \cdot R^{-0.201825} \quad (2)$$

이러한 실험결과는 Maa Dah-you등⁽¹¹⁾이 제시한 실험식 $M_0 \approx (R-1)^{1/2}/(R-0.5)^{1/4}$ 과 잘 일치하는 것이다.

3.1 충돌음의 주파수 특성

충돌음은 제트의 분출 속도 U_0 와 충돌거리 h 에 따라서 주파수가 다르게 되므로 제트속도를 일정하게 하고 충돌거리를 변하게 하거나, 충돌거리를 일정하게 하고 제트속도를 변화시키면서 충돌음의 주파수 특성을 구할 수 있다.

실험결과 충돌음의 발생영역이 유속의 변화에 따

라서 약 3 m/s 이상 80 m/s 미만에서 발생하는 저속충돌제트음과 160 m/s 이상에서 나타나는 고속충돌제트음의 두 영역으로 나뉘어졌다.

Fig. 2는 원형제트가 충돌거리 34 mm에서 구멍지름 14 mm인 판에 충돌할 때 유속 $U_0 = 7.8$ m/s에서 발생하는 저속충돌음과 $U_0 = 306$ m/s에서 발생하는 고속충돌음의 스펙트럼을 도시한 것이다. 그림에서 평평한 주파수 분포를 갖는 광대역 성분은 일반적인 난류소음을 나타내며 특정주파수에서 광대역 레벨보다 높은 순음들은 되먹임작용에 의한 충돌순음인 hole-tone을 나타낸다. Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)에서 주음 f_1 의 주파수는 각각 635 Hz와 8,700 Hz이며 상음들은 기본음의 정수배인 고조파인 것을 알 수 있다. 또한 유속이 빠른 경우가 유속이 느린 경우에 비하여 주파수 및 음압레벨도 훨씬 높은 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 저속충돌제트음에 대하여 제트의 출구속도, 구멍지름 그리고 충돌거리에 따른 hole-tone의

주파수 변화를 무차원 주파수인 스트로할(Strouhal) 수 $St = fd / U_0$ 로 나타낸 것으로 광대역음의 레벨보다 10 dB이상 높은 순음들 중에서 Fig. 5의 f_1 과 같이 음압이 가장 높은 첫째(1st) 주음을 나타내었다.

Fig. 3(a)는 제트출구속도의 레이놀즈(Reynolds) 수 $Re = U_0 d / \nu$ (ν 는 공기의 동점성계수)가 2,200인 경우로 충돌음이 발생하기 시작하는 최저속도이다. 충돌거리에 따른 주파수 변화는 되먹임작용에 의한 충돌음의 특성인 불연속적인 계단 형태를 나타내고 있으며 단수 $n=3$ 이상에서 충돌음이 발생한다. 여기서 단(stage)수 n 은 같은 주파수에 대한 충돌거리의 비로 결정한다. 그림에서 충돌음이 발생하기 시작하는 충돌거리는 $h/d = 4.0 \sim 8.4$ 이나 구멍의 크기에 따라 다소 변화가 있으며 스트로할수는 $St = 0.5 \sim 0.8$ 의 범위에 있다. 그러나 유속이 빠를수록 구멍 크기에 따른 주파수 특성의 변화는 미미해지며 스트로할수는 증가한다. 한편 구멍지름이 노즐의 지

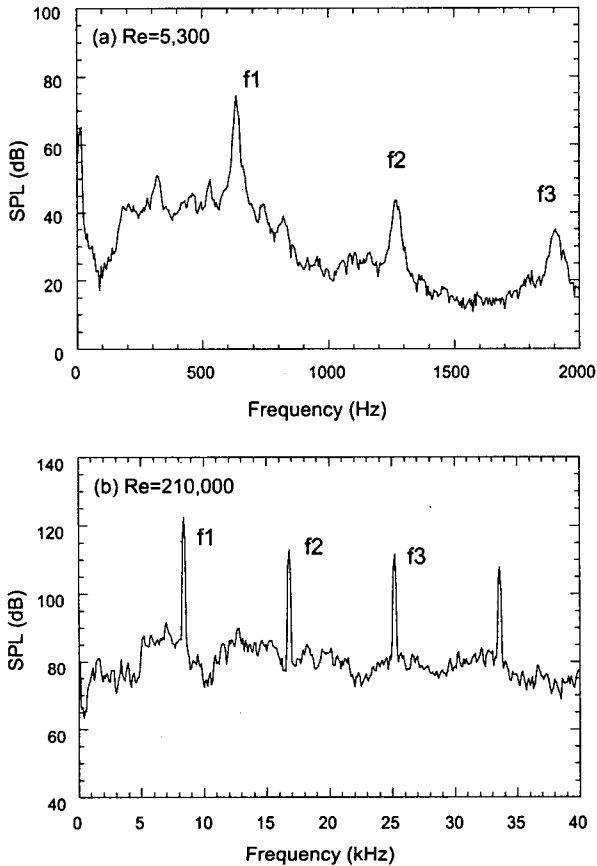


Fig. 2 Sound spectrum of hole-tone at the impinging distance ratio, $h/d = 3.5$

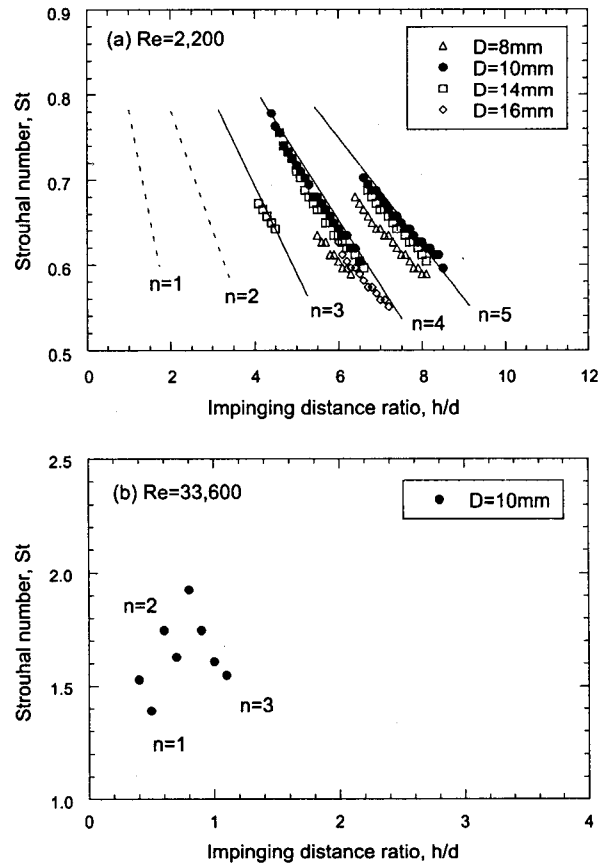


Fig. 3 Strouhal number vs. impinging distance ratio for hole-tones at low-speed jets

름보다 약간 큰 10 mm~14 mm인 경우에 가장 쉽게 충돌음이 나타나며 구멍지름이 6 mm이하나 20 mm이상에서는 충돌음이 나타나지 않았다.

Fig. 3(b)는 $Re=33,600$ 인 경우로서 충돌음의 발생구간이 급격히 줄어들고 있으며 구멍의 크기가 10 mm인 경우에만 $h/d=0.4\sim 1.2$ 사이의 매우 가까운 거리에서 $n=1$ 부터 3까지, $St=1.4\sim 2.0$ 의 충돌음이 발생한다.

Fig. 3(a), (b)를 보면 유속이 증가함에 따라 충돌음이 발생하는 충돌거리가 짧아지며 스트로할수는 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 충돌음이 나타나는 최대 충돌거리도 점차 감소하여 $U_o=80$ m/s, $Re=50,000$ 근처에 이르면 저속충돌음이 전혀 나타나지 않게 된다. 이상에서 보듯이 저속충돌음제트음을 위해서는 반드시 구멍이 뚫린 충돌판이 있어야 함을 알 수 있다.

Fig. 4는 $Re=210,000$ 인 고속충돌음의 경우로서 $h/d=0.8$ 이상의 넓은 영역에서 충돌음이 발생하며 $St=0.3\sim 1.0$ 사이에서 주파수가 다소 높은 그룹과 낮은 그룹으로 나뉜다. 충돌음은 유속이 $U_o=80$ m/s, $Re=50,000$ 부터 약 160 m/s, $Re=110,000$ 근처에 이를 때까지 전혀 나타나지 않다가 $Re=110,000$ 이상의 고속제트가 되면 다시 고속충돌음이 나타나기 시작하는데, 고속충돌음의 경우에는 구멍지름이 0인 평판충돌음(plate-tone)도 발생하는 것을 밝힌 바 있다⁽⁹⁾. 즉, 유속이 80 m/s 이하의 저속제트에서는 hole-tone만 나타나고 160 m/s이상의 고속에서는 hole-tone뿐만 아니라 plate-tone도 발생하며 구멍지름이 노즐지름의 2배인 경우에도 hole-tone이 잘 나타남을 볼 수 있다. plate-tone의

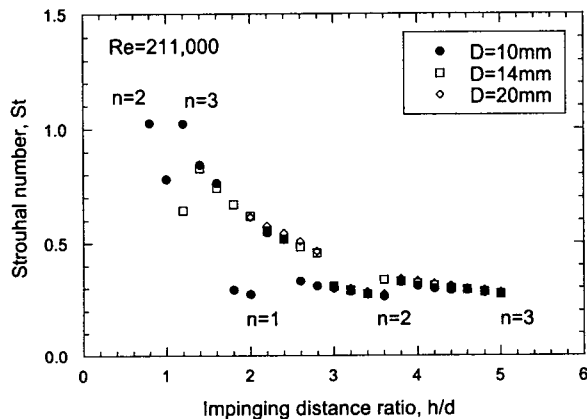


Fig. 4 Strouhal number vs. impinging distance ratio for hole-tones at $Re=211,000$

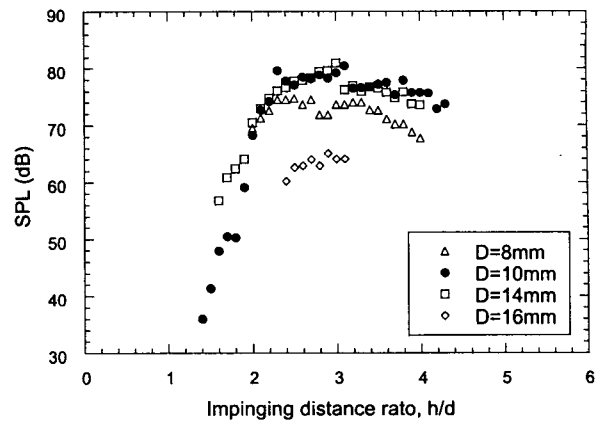


Fig. 5 Sound pressure level vs. impinging distance ratio for hole tones at $Re=6,000$

제반특성은 선행연구⁽⁹⁾에서 밝혀 놓았으며 고속에서 hole-tone의 특성이 plate-tone과 크게 다르지 않다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 $Re=6,000$ 인 저속충돌음에서 충돌음의 음압레벨을 충돌거리와 구멍의 크기에 따라 나타낸 것이다. 구멍의 크기에 상관없이 $h/d=3$ 가까이에서 음압레벨이 가장 높음을 알 수 있으며 $h/d=2$ 근방까지 충돌거리에 비례하여 음압레벨이 증가하는 경향을 보인다. 이것은 노즐 출구에서 시작된 교란이 $h/d=2$ 근방까지는 지수함수적으로 증폭되는 것을 의미하고, $h/d=3$ 정도까지 증폭된 후 감쇠하게 됨을 알 수 있다. 그러나 이러한 충돌거리에 따른 음압세기의 특성은 유속조건에 따라 다르다. 즉, 저속충돌음의 경우 유속이 증가할수록 충돌음이 발생하는 충돌거리가 짧아지므로 Fig. 6에 도시한 바와 같이 음압이 최대인 거리는 가까워지고 레벨은

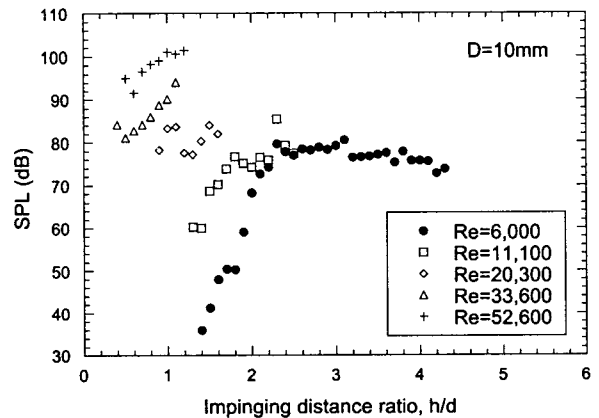


Fig. 6 Sound pressure level vs. impinging distance ratio for hole-tones

점차 높아짐을 볼 수 있다.

3.2 충돌음의 발생영역

Fig. 7은 제트의 유속에 따른 hole-tone의 주파수를 레이놀즈수와 스트로할수에 따라 도시한 것으로서 구멍의 지름이 10 mm인 경우이다. 그림에서 충돌음의 발생구간이 $Re = 80,000$ 정도를 경계로 하여 비교적 저속인 영역과 고속인 영역으로 구별됨을 볼 수 있다. 저속 영역에서의 충돌음은 $Re = 10,000$ 을 중심으로 $2,000 < Re < 10,000$ 의 영역(L1)에서는 레이놀즈수의 증가에 따라 스트로할수가 $0.5 < St < 1$ 의 범위에서 약간 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이고, $10,000 < Re < 50,000$ 의 영역에서는 $0.5 < St < 2$ 의 범위에서 스트로할수가 레이놀즈수에 따라 급격히 높아지며 주파수가 높은 그룹(L2)과 다소 낮은 그룹(L3)으로 구분된다. 그러나 $10,000 < Re < 50,000$ 의 영역에서는 충돌음이 발생하는 충돌거리의 구간이 매우 좁으며 가까운 거리에서만 발생한다. $Re > 110,000$ 의 고속 영역(H)에서 충돌음의 주파수는 $0.2 < St < 1.5$ 의 범위에서 레이놀즈수에 따라 감소하는 경향을 보이며 특히 $0.2 < St < 0.5$ 사이에서 주로 발생함을 볼 수 있다. 그림에서 Chanaud⁽²⁾에 의한 hole-tone의 발생영역이 표시되어 있으며 본 연구보다 다소 낮은 유속에서 충돌음이 발생하였음을 알 수 있는데 이는 노즐의 형상이 다른점과 충돌판 후면에 설치한 반사판의 영향 때문이라고 사료된다.

그림과 같은 저속 충돌제트음의 발생영역에 대한 세부적인 특성의 차이를 현재로서 분석할 수는 없다. 그러나 저속충돌음과 고속충돌음의 구분은 분출

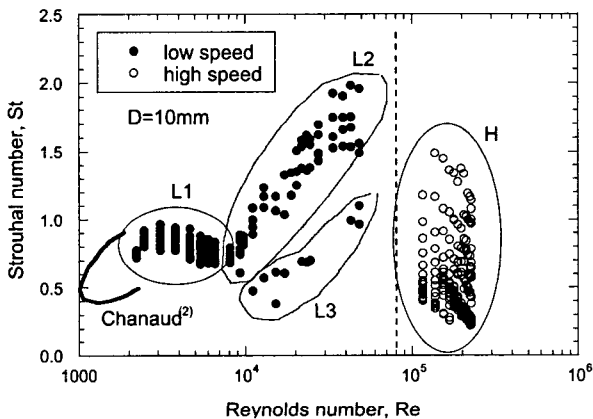


Fig. 7 Strouhal number vs. Reynolds number for hole-tones

제트의 초기 경계층 유동조건과 관계된 것으로 사료된다. 즉, 고속충돌음이 발생하기 시작하는 $Re = 1.1 \times 10^5$ 은 노즐의 출구지름 10 mm를 기준으로 한 경우로서 노즐의 직관부 길이 47 mm를 특성길이라고 하면 5×10^5 인 것을 알 수 있으며 이는 경계층에서 난류로의 천이가 나타나는 조건과 일치한다. 따라서, 고속충돌제트는 난류경계층의 거동에 의한 것이라고 할 수 있으며 저속충돌제트는 층류경계층에 의한 것임을 알 수 있다. 또한 유속증가에 따라서 충돌음의 발생거리가 짧아지는 것은 제트가 하류로 가면서 층류에서 난류로 천이하는 현상과 관련된 것으로 추정된다. 따라서 충돌음의 발생영역은 노즐의 형상에 크게 영향을 받게 된다고 할 수 있다.

3.3 불안정 모드

Fig. 8은 마이크로폰과 충돌면의 각도를 변화시키면서 측정된 충돌음의 음압레벨이다. 기존의 연구결과⁽²⁾와 마찬가지로 방향에 따라 레벨의 차이가 없는 균일한 지향성이 확인되었다. Fig. 9는 $Re = 11,000$ 에서 저주파수(L2)와 고주파수 모드(L3)에 속하는 충돌제트의 원주 방향 위상을 측정된 결과이며 각도에 따라 위상변화가 없는 축대칭(symmetric)임을 알 수 있다. 즉, 저속충돌제트음은 모두 축대칭 모드의 불안정제트에 의하여 발생하는 무지향성의 방사음임을 알 수 있다. 한편 고속충돌제트의 경우 hole-tone은 plate-tone과 같은 특성을 나타내었다. 저자들은⁽⁹⁾ plate-tone을 유발하는 고속충돌제트는 저주파와 고주파의 대칭형 그리고 높은 레이놀즈수에서 그 중간에 나타나는 나선형의 불안정 모드가 있음을 밝힌 바가 있다.

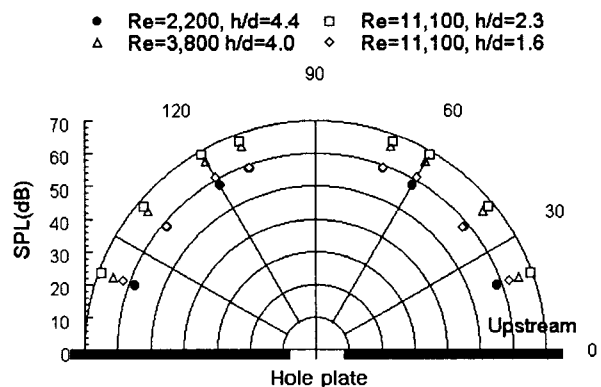


Fig. 8 Directivity of hole-tones radiated from the hole-plate

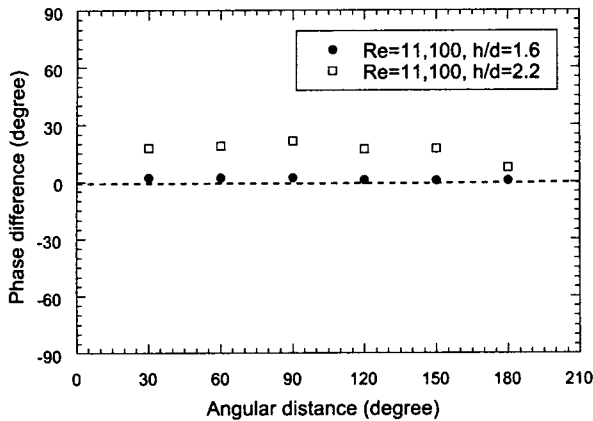


Fig. 9 Circumferential phase distribution around the impinging jet

3.4 대류 속도

충돌면이 음원이므로 충돌음 발생의 위상조건은 다음과 같이 표현된다^(8,12).

$$\frac{h}{U_c} + \frac{h}{c} = \frac{n}{f} \quad (3)$$

식에서 U_c 는 제트를 따라서 전파되는 교란의 위상 속도인 대류속도, 그리고 c 는 음속을 나타낸다. 따라서, 대류속도비는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{U_c}{U_0} = \frac{1}{[\frac{n}{fh} - \frac{1}{c}]U_0} \quad (4)$$

여기서 대류속도는 가속 또는 감속될 수 있기 때문에 평균속도로 해석되어야 한다.

앞 절에서 저속인 경우에는 충돌음의 음압레벨과 주파수 특성이 구멍의 크기에 따라 약간씩 차이를 보이지만 유속이 증가할수록 그 영향이 거의 없음을 알 수 있었다. 따라서, 대류속도는 충돌음이 가장 용이하게 발생하는 직경비 $D/d=1.0$ 의 경우에 대해서만 고찰하였다.

Fig. 10은 아음속의 전 범위에서 발생한 모든 hole-tone의 스트로할수를 대류속도비의 관계로 도시한 것이다. 그림에서 스트로할수가 증가할수록 대류속도비가 감소하는 일반적인 특성을 발견할 수 있다. 그러나 저속충돌제트음의 경우 $St=0.8$ 부근의 넓은 범위에 걸친 대류속도비를 발견할 수 있다. 대류속도비가 1을 넘는 경우가 있는 것은 보텍스가 제트에 실려 내려간다고 하면 이해하기 힘든 현상이다. 그러나 원형보텍스가 자기가속력을 갖는 것에 원인이 있는 듯 하다. 즉 충돌거리가 멀면 주파수는

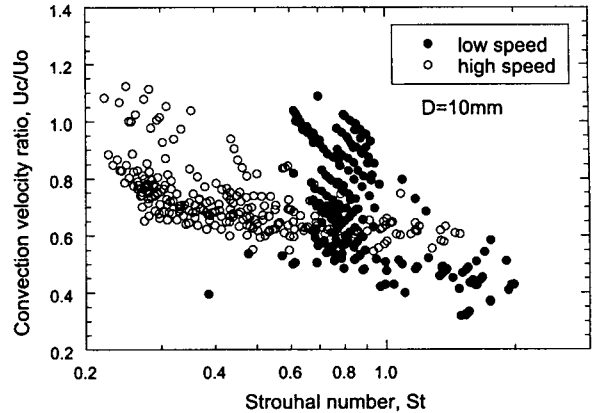


Fig. 10 Convection velocity ratio of the unstable impinging jets as a function of Strouhal number

낮아지고 대류속도는 빨라진다. 따라서 대류속도는 주파수와 충돌거리에 영향을 받는다고 할 수 있다.

4. 결 론

이상과 같이 아음속의 원형제트가 구멍 뚫린 평판에 충돌할 때 발생하는 hole-tone에 대한 연구로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 충돌제트음은 초기 경계층이 층류인 저속충돌음과 난류인 고속충돌음으로 분류되며 천이영역에서는 충돌음이 발생하지 않는다.
- (2) 충돌면에 구멍이 없는 경우는 고속충돌음만 발생하고, 충돌면에 구멍이 있는 경우에 고속충돌음과 아울러 저속충돌음이 발생할 수 있으며 구멍지름이 노즐지름과 가까울 때 가장 쉽게 충돌음이 발생한다.
- (3) 저속충돌음은 대칭모드의 불안정 제트에 의해 발생하며 유속이 증가함에 따라 충돌음이 발생하는 충돌거리가 짧아지고 음압 및 스트로할수가 증가한다.
- (4) 충돌음의 대류속도는 스트로할수 및 레이놀즈수에 따라 변하는 경향을 나타낸다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원에 의하여 수행된 것임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- (1) Powell, A., 1953, "On edge tones and associated phenomena," *Acoustica* 3, pp. 67~94.

(2) Chanaud, P. C. and Powell, A., 1965, "Some Experiments Concerning the Hole and Ring Tone," J. Acoust. Soc. Am. 37, pp. 901~911.

(3) 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.

(4) Powell, A., 1988, "The Sound-Producing Oscillations of Round Underexpanded Jets Impinging on Normal Plates," J. Acoust. Soc. Am. 83(2), pp. 515~533.

(5) Umeda, Y., Ishii, R. and Powell A., 1991, "Change of Oscillation Modes of Circular Under-expanded Jet by Impingement on a Small Plate," Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ. 53(4), pp. 195~214.

(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) 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.

(8) 권영필, 1998, "고속 충돌제트의 불안정특성 (1) -평면제트-, 대한기계학회논문집(B), 제 22 권, 제 4 호, pp. 452~458.

(9) 권영필, 임정빈, 1998, "고속 충돌제트의 불안정특성(2) -원형제트-, 대한기계학회논문집(B), 제 22 권, 제 4 호, pp. 459~467.

(10) 이동훈, 권영필, 한희갑, 1997, "평판에 충돌하는 원형분류의 공력소음에 관한 실험적 연구," 한국소음진동공학회지, 제 7 권, 제 1 호, pp. 71~79.

(11) Maa, D. Y. and Li, P. Z., 1981, "Pressure Dependence of Jet Noise and Silencing of Blow-offs," Noise Control Engineering, 17(2), pp. 104~112.

(12) Kwon, Y. P., 1996, "Phase-Locking Condition in the Feedback Loop of Low-Speed Edgetones," J. Acoust. Soc. Am. 100(5), pp. 3028~3032.