

# 원형충돌제트의 순음발생과 유동불안정에 관한 연구

°임정빈\*, 권영필\*\*

## A Study on Tone Generation and Flow Instability of Impinging Circular Jet

°Jung-Bin Im\* and Young-Pil Kwon\*\*

### 1. 서론

제트가 쉘기, 벽면 또는 원통 등의 고체면에 충돌할 때 발생하는 강한 순음(tone)은 다양한 형태의 유동장에서 관찰할 수 있다. 이러한 충돌(순)음(impinging tone)은 난류에 의한 광대역 성분의 음파는 대조되며, 불안정한 제트가 맥동을 하면서 고체면에 충돌하여 발생한 음파가 다시 노즐 출구에서 제트를 교란하게 되는 하나의 되먹임(feed back) 순환을 이룰 때 발생한다.

지금까지 원형제트에 의한 충돌음의 연구는 주로 특정 유속조건에 관하여 되먹임 모델의 검증<sup>(1)</sup>에 주안점을 두거나 초음속 제트<sup>(2,3)</sup>나 저속의 층류 제트<sup>(4)</sup>를 중심으로 충돌음의 주파수 특성과 불안정 모드에 관한 연구가 있었을 뿐 고속의 난류제트에 대한 체계적인 실험이 이루어지지 않았다. 최근 권영필<sup>(5)</sup> 등은 원형제트의 평판 충돌음에 대한 연구에서 plate-tone을 유발하는 고속 원형제트의 불안정 모드에는 저주파 대칭모드, 고주파 대칭모드, 그리고 나선형 모드의 세 가지가 있음을 발견하였고 각 모드에 따라 대류속도가 다른 특성을 나타내는 것을 보여주었다. 또한 임정빈<sup>(6)</sup> 등은 구멍 뚫린 평판에 부딪히는 원형충돌제트의 불안정 특성 및 충돌음의 발생범위에 관한 연구에서 hole-tone은 초기 경계층이 층류인 저속충돌음과 난류인 고속충돌음으로 분류되며 천이영역에서는 충돌음이 발생하지 않음을 보였다. 그러나 평판에 뚫린 구멍의 크기 및 초기 경계층의 형태에 따른 충돌음의 발생범위에 대해서는 연구된 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 원형 충돌제트의 노즐 형상 및 충돌면의 형상에 따른 충돌음의 발생영역과 plate-tone과 hole-tone의 주파수 특성 및 유동 불안정 형태의 차이에 대해서 다루고자 한다.

### 2. 충돌음의 발생영역

#### 2.1. 실험 방법

충돌음을 측정하기 위한 실험 장치는 Fig. 1과 같이 압축기, 서지탱크(surge tank), 소음기, 원형 노즐 그리고 충돌판을 부착한 3차원 이송장치 등으로 구성하였다. 충돌판은 두께 4 mm, 한 변의 길이가 290 mm인 정사각형 평판(flat plate)으로 하였고 중심부에 구멍이 없는 경우와 구멍지름이 3 mm, 8 mm, 10 mm, 14 mm, 20 mm, 그리고 30 mm인 경우를 대상으로 하였다. 원형 축소 노즐은 Fig. 2와 같이 출구지름  $d=10$  mm, 축소부의 입구 지름과 길이는 각각 76 mm, 195 mm, 축소각은  $9.3^\circ$ 이며 노즐 출구 형상에 따른 충돌음의 발생 범위 및 특성의 차이를 고찰하기 위해 노즐 출구의 직선부 길이를 0 mm, 47 mm, 그리고 87 mm의 3가지 형태로 제작하였고 출구단에 철망(wire mesh)을 부착할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 노즐 상류의 정압  $p$ 와 대기압  $p_0$ 의 비인 압력비  $R=p/p_0$ 을 측정하여 제트의 노즐출구속도를 구하였다. 이 때  $R=1.0004\sim 2.30$ 일 때까지 수행하였으며 노즐 출구에서 제트의 이상적인 평균속도로는  $U_j=8\sim 394$  m/s 이다. 한편  $U_j$ 와 노즐 출구지름  $d$ 를 특성 길이로 할 때의 레이놀즈수는  $Re=5,500\sim 270,000$ 의 범위에 해당한다.

충돌음의 측정은 1/4인치 콘덴서 마이크로폰(B&K 4135)을 이용하였으며 측정된 신호는 2 ch.

\* 정희원, (주)디비엔지니어링 기술연구소

\*\* 정희원, 숭실대학교 기계공학과

FFT(ONOSOKKI, CF350)에서 최대 40kHz의 주파수대역까지 분석하였다. 측정시 마이크로폰은 제트가 충돌하는 충돌면의 중심부로부터 300 mm의 거리, 그리고 30°의 방향을 항상 유지할 수 있도록 이송장치에 부착하였다.

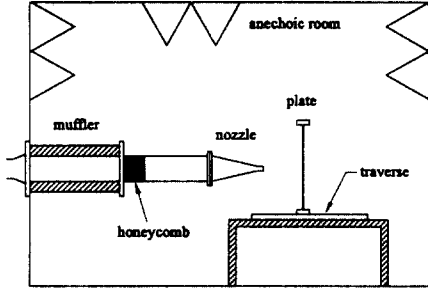


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

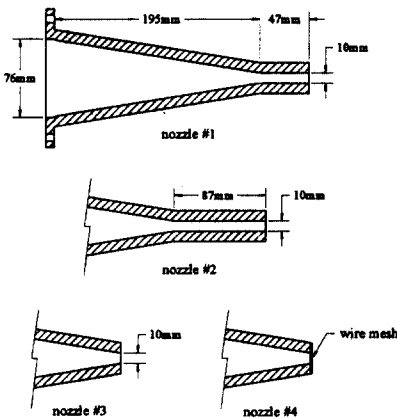


Fig. 2 Configurations and dimensions of circular nozzles

## 2.2. 충돌면 형상의 영향

Fig. 3은  $R=1.89$ 일 때, 즉  $U_j=340 \text{ m/s}$ 인 경우 충돌거리비  $h/d=3.0$ 에서 발생한 hole-tone의 스펙트럼을 동일한 유속 및 충돌거리에서 발생한 plate-tone의 스펙트럼과 비교한 것으로 끝단의 길이가  $L=47 \text{ mm}$ 인 노즐(nozzle #1)을 사용하였다. 그림에서 충돌음의 주파수 및 스펙트럼의 형태는 서로 유사하지만 광대역음의 레벨값은 hole-tone이 plate-tone보다 전체적으로 낮다. 이는 hole-tone의 경우 대부분의 제트가 충돌면에 있는 구멍을 통과

하기 때문에 충돌면에 부딪혀서 발생하는 난류소음의 레벨이 평판의 경우보다 낮기 때문이다.

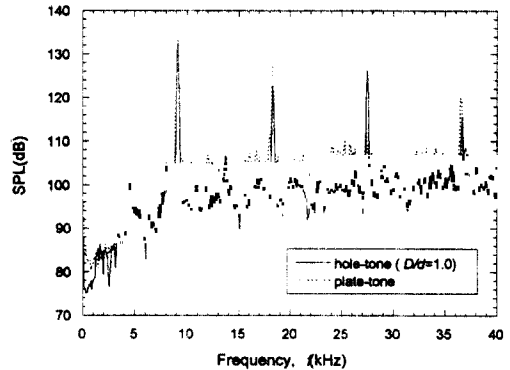


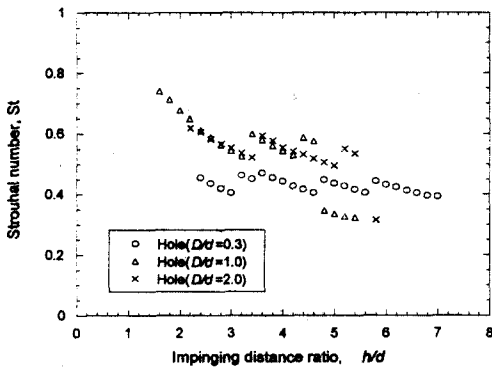
Fig. 3 Comparison of the sound pressure spectrum of hole-tone with that of plate-tone at  $U_j=340 \text{ m/s}$  and  $h=30 \text{ mm}$

Fig. 4는 충돌면상의 구멍 크기에 따른 충돌음의 주파수를 충돌거리에 따라 도시한 것이다. Fig. 4(a)는  $R=1.001$ , 즉  $U_j=13 \text{ m/s}$ 의 저속인 경우로 구멍과 노즐의 직경비가  $D/d=1.0$ 과  $D/d=2.0$ 일 때는 충돌음의 주파수 대역과 특성이 거의 동일하다. 반면에  $D/d=0.3$ 일 때는 충돌음의 주파수 대역에 있어서 다른 경우와 다소 차이가 있지만 유속이 높아질수록 이러한 주파수 대역의 차이는 점차 작아지게 된다. Fig. 4(b)는  $R=1.72$ , 즉  $U_j=311 \text{ m/s}$ 의 고속인 경우로서  $D/d=0$ 인 평판과  $D/d=0.3$ ,  $D/d=1.0$ , 그리고  $D/d=2.0$ 인 경우를 비교한 것이다. 그림에서 구멍의 크기에 따라 충돌음이 발생하는 충돌거리 및 주파수 대역의 차이는 있지만 주파수 특성에는 큰 영향이 없다. 또한 충돌거리에 따른 hole-tone의 주파수 특성은 plate-tone과 매우 유사하며 이로부터 고속영역에서 hole-tone과 plate-tone의 발생기구는 서로 같을 것으로 사료된다.

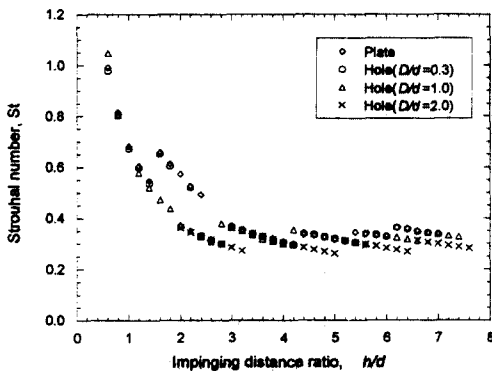
Fig. 5는 충돌음이 발생하는 충돌거리의 구간을 구멍의 직경별로 레이놀즈수에 따라 도시하고 평판에 대한 결과와 비교한 것이다. Fig. 5(a)는  $D/d=0.3$ 의 경우로서 레이놀즈수  $Re>100,000$ 인 고속영역에서 hole-tone이 발생하는 유속 및 충돌거리의 범위는 plate-tone과 거의 일치하지만  $Re<30,000$ 인 저속에서도 충돌음이 발생한다. 한편  $D/d=0.2$ 일 때는 저속영역에서 hole-tone이 발생하지 않으며

$D/d < 0.2$ 인 경우는 충돌면상에서 구멍의 유무에 따른 영향이 없다. Fig. 5(b)는  $D/d=1.0$ 인 경우로서 대부분의 유속구간에서 충돌음이 발생하며 따라서 노즐과 구멍의 직경이 같을 때 충돌음이 발생이 가장 용이함을 알 수 있다. 한편  $Re=70,000$  부근에서 충돌음이 발생하는 충돌거리의 구간이 유속에 따라 불연속적으로 변하는데 이러한 특성은 노즐 출구속도에 따른 초기유동형태의 차이에 기인하는 것으로 사료되며 이에 대해서는 다음절에서 다루도록 하겠다. Fig. 5(c)는  $D/d=2.0$ 인 경우로서 고속뿐만 아니라 저속영역에서 충돌음이 발생하지만 그 발생구간은  $h/d \geq 2.0$ 이다. 이와 같이 구멍의 크기가 노즐 직경의 2배인 경우에도 비교적 가까운 거리에서 충돌음이 발생한다는 사실은 상당히 흥미로운 현상인데 이는 충돌음의 발생이 충돌면에 직접 부딪히는 제트구조만에 의한 것이 아니라는

것을 의미한다. Fig. 5(d)는  $D/d=3.0$ 인 경우로서 저속에서는 충돌음이 전혀 발생하지 않고  $Re \geq 200,000$ 의 고속에서만  $h/d \geq 4.0$ 의 좁은 영역에서 발생한다. 따라서  $D/d > 3.0$ 에서는 충돌음이 전혀 발생하지 않을 것으로 사료된다.

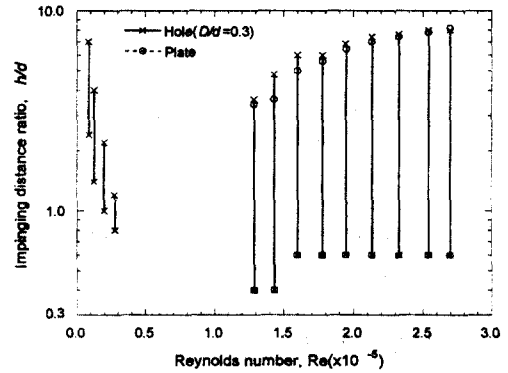


(a)  $U_j=13 \text{ m/s}$  ( $R=1.001$ )

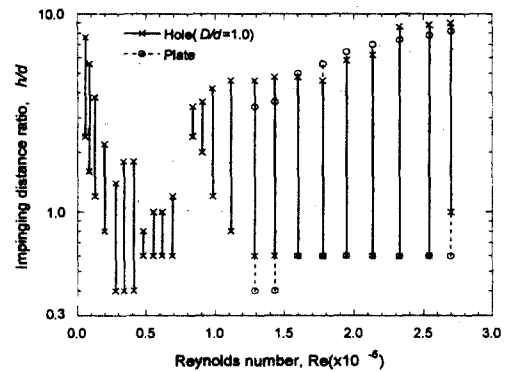


(b)  $U_j=311 \text{ m/s}$  ( $R=1.72$ )

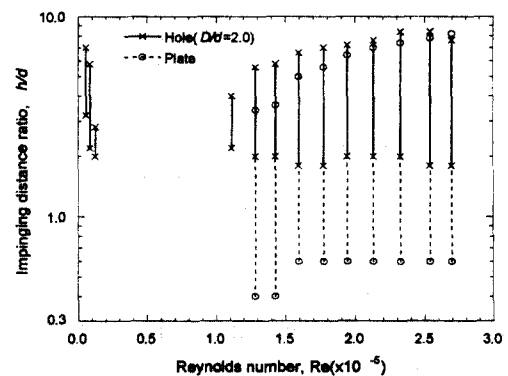
Fig. 4 Effect of hole size on the frequency characteristics



(a)  $D=3 \text{ mm}$

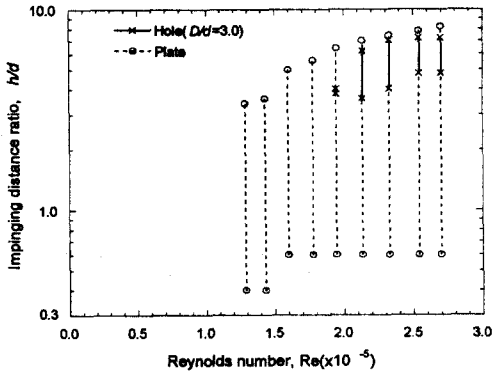


(b)  $D=10 \text{ mm}$



(c)  $D=20 \text{ mm}$

Fig. 5 (Continued)



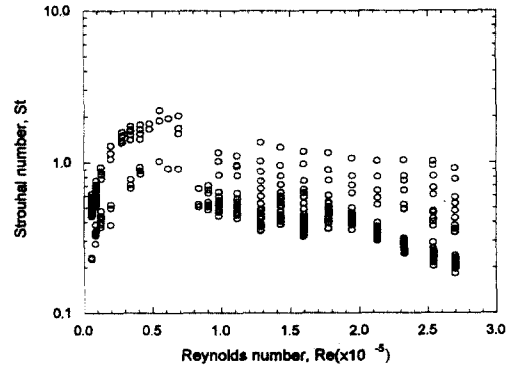
(d)  $D=30\text{ mm}$

Fig. 5 Variation of impinging distance with Reynolds number for the hole-tone

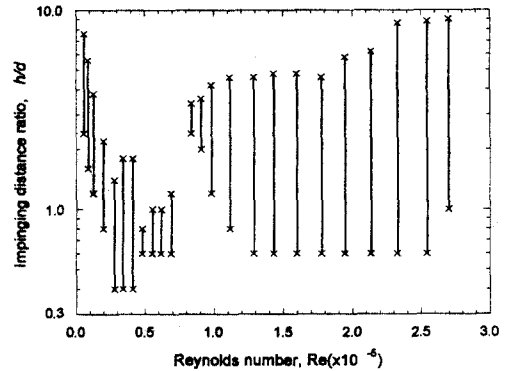
### 2.3. 노즐 형상의 영향

Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 hole-tone의 주파수 및 발생하는 충돌거리의 구간을 각각 제트의 속도에 따라 표시한 것으로서 끝단의 직선부 길이  $L=47\text{ mm}$ , 출구직경  $d=10\text{ mm}$ 인 노즐(nozzle #1)을 사용하였고 구멍의 크기는 앞 절에서 충돌음의 발생이 가장 용이하였던  $D=10\text{ mm}$ 를 대상으로 하였다. Fig. 6(a)에서 hole-tone은 대부분의 유속 범위에서 발생하였지만 레이놀즈수  $Re=70,000$  부근을 전후로 하여 주파수 특성이 비교적 저속인 영역과 고속인 영역으로 구분된다. 즉, 충돌음의 주파수 특성이 충돌제트의 유동구조(충류 또는 난류)에 따라 달라지게 된다. Fig. 6(b)의  $Re<70,000$ 인 영역에서는 유속이 높아질수록 충돌음이 발생하는 거리가 점차 짧아지다가  $Re=70,000$  부근을 경계로 하여 점차 길어지는 불연속적인 특성을 나타낸다. 이러한 현상은 제트의 노즐출구속도가 증가할수록 충류 영역이 짧아지다가 난류로의 천이가 일어나기 때문이며  $Re>70,000$ 의 고속에서는 유속이 높을수록 초기 교란의 강도가 증가하여 보다 먼 충돌거리에서도 되먹임 작용을 유지할 수 있는 진폭조건을 만족하기 때문에 충돌음의 발생구간이 넓어지게 된다. 따라서 고속 영역에서는 충돌거리비  $h/d=0.4\sim 10.0$ 에서 충돌음이 발생하며 유속이 높아질수록 충돌음이 발생하는 충돌거리와 주파수대역도 점차 확대된다.

Fig. 7은 노즐의 축소비와 출구지름은 동일하지만 노즐 끝단의 직선부 길이를  $87\text{ mm}$  (nozzle #2)로 하였을 때 발생하는 hole-tone의 주파수와 충돌거리의 구간을 제트의 속도에 따라 도시한 것이다. Fig. 6과 비교하면 충돌음의 주파수 및 유속에 따른 변화 형태가 고속 영역에서는 nozzle #1에 의한 결과와 매우 유사하지만  $Re<70,000$ 의 저속 영역에서는 충돌음의 발생구간이 줄었음을 보여준다. 이러한 이유는 노즐의 직선부가 길어짐으로써 제트의 초기 경계층 두께가 증가하여 노즐 출구에서 축방향 속도성분이 유선형으로 발달하게 되고 충류에서 난류로의 천이가 보다 저속에서 일어나기 때문인 것으로 추정된다.

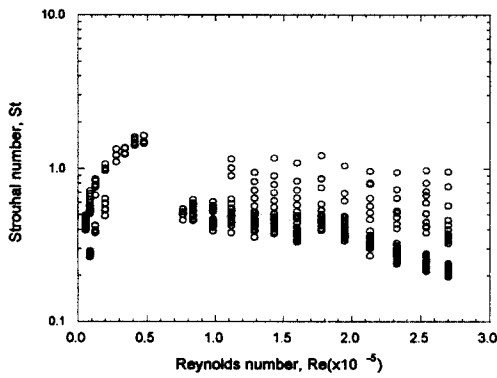


(a)  $St$  vs.  $Re$

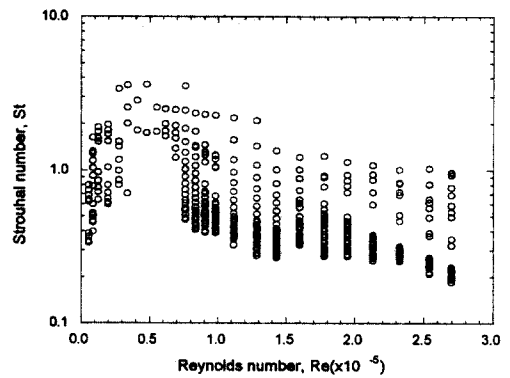


(b)  $h/d$  vs.  $Re$

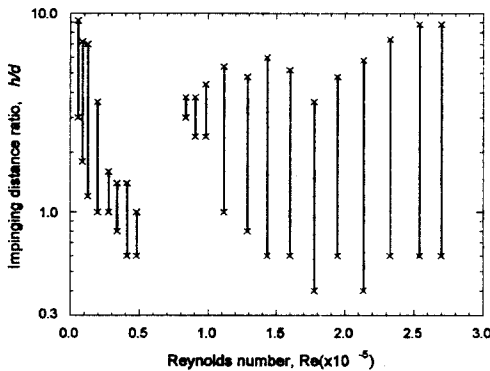
Fig. 6 Variation of Strouhal number and impinging distance with Reynolds number for the hole-tone of nozzle #1 with  $L=47\text{ mm}$



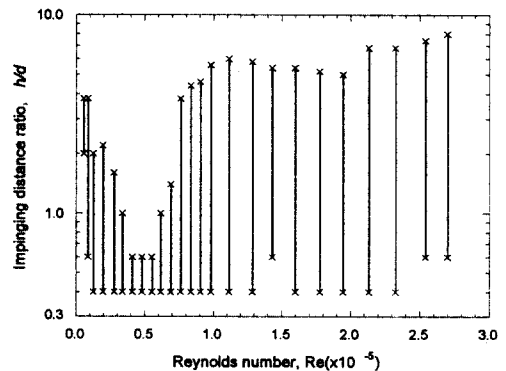
(a) St vs. Re



(a) St vs. Re



(b)  $h/d$  vs. Re



(b)  $h/d$  vs. Re

Fig. 7 Variation of Strouhal number and impinging distance with Reynolds number for the hole-tone of nozzle #2 with  $L=87\text{ mm}$

Fig. 8 Variation of Strouhal number and impinging distance with Reynolds number for the hole-tone of nozzle #3 with  $L=0\text{ mm}$

Fig. 8은 노즐 출구의 직선부 길이를  $0\text{ mm}$  (nozzle #3)로 한 경우로서 직선부가 있는 Fig. 6과 Fig. 7에 비해 충돌음의 주파수 및 충돌음이 발생하는 속도 구간이 넓어졌고 특히  $Re=70,000$ 을 전후한 천이영역에서도 다수의 충돌음이 발생하였다. 노즐의 직선부가 없는 경우는 노즐 출구에서 제트의 축방향 속도성분이 거의 균일(uniform)하게 되는데 이러한 형태의 제트는 가장 불안정하여 교란되기 쉬우므로 넓은 영역에서 충돌음이 발생하는 것으로 사료된다.

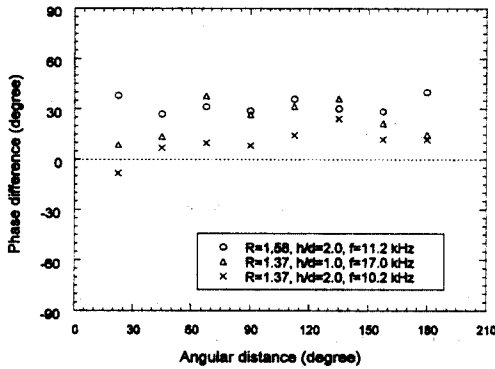
본 연구에서는 충돌음의 발생범위가 가장 넓은, 즉 직선부가 없는 노즐의 출구단에 철망을 부착한 경우와 직선부의 길이가  $47\text{ mm}$ 인 기존 노즐 내부의 직선부 시작 위치에 철망을 부착한 경우에 대

해서도 실험을 수행하였다. 그 결과 전자의 경우는 전 유속 범위에서 충돌음이 발생하지 않았고 후자의 경우는 유속이 매우 높은 일부 영역을 제외한 대부분의 유속 범위에서 충돌음이 발생하지 않았는데, 이러한 이유는 철망에 의해 제트의 난류강도가 증가하여 노즐 출구에서 음파에 의한 교란이 되지 않기 때문으로 추정된다. 즉 노즐 출구에 설치된 철망에 의해 제트 구조가 교란됨으로서 제트의 난류강도가 인위적으로 증폭되고 이 경우 음파에 의한 교란력이 난류강도보다 약해서 교란이 되지 않으므로 충돌음이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

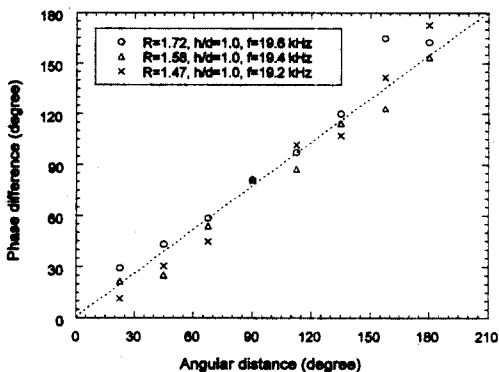
### 3. 제트의 불안정 모드

본 연구에서는 방사되는 충돌음의 제트축에 대한 원주방향 위상차를 측정함으로써 제트의 불안정 모드 형태를 구하고자 하였다. 이를 위해 두 개의 1/4인치 마이크로폰을 노즐 축상의 반경 72 mm인 원주상에 위치하여 두 마이크로폰 사이의 상호스펙트럼(cross spectrum) 위상을 측정하였다.

Fig. 9는 방사되는 hole-tone의 위상차를 측정된 결과로서 Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)는 각각 대칭모드와 나선형모드를 나타내고 있다. 평판 충돌음에 대한 이전 연구결과<sup>(5)</sup>와 비교해보면 hole-tone을 유발하는 고속 원형충돌제트의 경우에도 대칭형태 뿐만 아니라 나선형의 불안정 모드가 존재하지만 plate-tone에 비해 다소 낮은 압력비에서 나선형 모드를 발견할 수 있다.



(a) Symmetrical mode



(b) Helical mode

Fig. 9 Phase distribution of hole-tones around the jets

### 4. 결론

아음속의 원형제트가 평판 및 구멍이 뚫려있는 평판에 충돌할 때 발생하는 순음성 충돌음에 대한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) Plate-tone은 레이놀즈수  $Re > 120,000$ 의 고속에서만 발생하는 반면 hole-tone은  $Re > 5,500$ 의 광범위한 속도 범위에서 발생하며  $Re = 70,000$ 을 경계로 저속의 층류 영역과 고속의 난류 영역에 따른 천이 특성이 나타난다.
- (2) Hole-tone은  $D/d = 0.3 \sim 3.0$ 일 때  $h/d < 10$ 인 충돌거리에서 발생하며 구멍이 커질수록 충돌음이 발생하기 시작하는 충돌거리가 멀어지고 높은 유속에서 낮은 주파수의 충돌음이 발생한다.
- (3) 노즐 출구단의 직선부 길이가 길수록 제트의 불안정성이 약화되어 hole-tone이 발생하지 않는 천이영역이 넓어진다.
- (4) Hole-tone을 유발하는 고속 원형충돌제트의 경우에도 대칭형태 뿐만 아니라 나선형의 불안정 모드가 존재한다.

### 참고문헌

- (1) 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.
- (2) Umeda, Y., Maeda, H. and Ishii, R., 1988, "Hole tone generated from almost choked to highly choked jets", *AIAA*. 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) Chanaud, P. C. and Powell, A., 1965, "Some experiments concerning the hole and ring tone", *J. Acoust. Soc. Am.* 37, pp. 901-911.
- (5) 권영필, 임정빈, 1998, "고속 충돌제트의 불안정 특성(2) -원형제트-", 대한기계학회논문집(B) 제 22권 제4호, pp. 459-467.
- (6) 임정빈, 권영필, 1999, "Hole-Tone의 발생과 원형제트의 불안정 특성", 한국소음진동공학회지 제9권 제5호, pp. 1005-1011.