

# 평면 충돌제트의 불안정 특성(1) - 슬릿음 -

## Characteristics of Plane Impinging Jets(1) - Slit-tone -

권영필<sup>†</sup>

Young-Pil Kwon

(2003년 8월 5일 접수 ; 2003년 12월 18일 심사완료)

**Key Words** : Jet(제트), Impinging Jet (충돌제트), Plane Jet(평면 제트), Impinging-tone(충돌순음), Instability(불안정), Symmetric(대칭의), Antisymmetric(반대칭의), Frequency(주파수)

### ABSTRACT

In this study, slit-tones by plane impinging jet are investigated experimentally over the whole subsonic flow range, especially at low speeds, in order to obtain the instability behaviour of impinging plane jet. Slit-tones are generated at low speeds associated with laminar shear layer instability as well as at high speeds associated with turbulent instability. Most of low-speed slit-tones are induced by symmetric mode instability unless the slit is not so wide, in which case antisymmetric modes are induced like edge-tones. It is found that the frequencies at low speeds are controlled by the unstable condition of the vortex at the nozzle exit and its pairings by which the frequencies are decreased by half. In the case of symmetric modes related with low-speed slit-tones, frequencies lower than those associated with one-step pairings are not found.

### 1. 서론

불안정한 제트가 썩기나 벽면 또는 원통 등에 충돌하여 음파를 발생하고 이것이 다시 제트를 교란하는 되먹임기구에 의하여 발생하는 강한 충돌순음(impinging-tone)은 다양한 유동형태에서 관찰된다.<sup>(1)</sup> 충돌순음은 충돌면의 형상에 따라서 썩기음(edge-tone), 판음(plate-tone), 홀톤(hole-tone), 슬릿음(slit-tone) 등으로 분류되며 충돌제트는 노즐의 형상에 따라서 크게 평면제트와 원형제트로 나누어질 수 있다. 충돌순음에 관한 주된 연구는 평면제트에 의한 썩기음<sup>(2~5)</sup>과 원형제트에 의한 판음<sup>(6~8)</sup>이나 홀톤<sup>(9)</sup>에 집중되었으며 되먹임순환을 비롯한 충돌순음의 발생기구나 기본적인 특성은 거의 파악되었다고

할 수 있다.

최근, 썩기음<sup>(5)</sup>이나 판음<sup>(10)</sup>에서 충돌제트의 불안정 거동에 관하여 보고된 바 있다. 썩기음은 모든 속도에 대하여 반대칭모드만 발생하며 충돌순음의 발생에 대한 유효음원의 위치와 관련된 위상조건(phase criterion)이 밝혀졌다. 평면제트가 수직 평판에 충돌하여 발생하는 판음은 고속제트에서만 발생하고 제트의 불안정 형태는 반대칭모드(antisymmetric mode)와 함께 대칭모드(symmetric mode)를 보이는 것이 관찰되었다.

그러나 충돌면의 형상에 따른 제트의 불안정 거동에 관한 체계적인 연구는 미흡한 상태라고 할 수 있다. 평면제트에 의한 썩기음의 경우는 반대칭형(antisymmetric) 불안정 거동만 관찰되며 판음의 경우는 저속에서는 충돌순음이 잘 발생하지 않기 때문에 평면 충돌제트의 거동을 체계적으로 연구하기가 어렵다.

그런데 원형 충돌제트의 경우 홀톤이 저속이나 고

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, 숭실대학교 기계공학과  
E-mail : ypkwon@ssu.ac.kr  
Tel : (02) 820-0655, Fax : (02) 823-5924

속에서 모두 잘 나타나듯이<sup>(11)</sup> 평면제트의 경우 슬릿음도 유사한 특성을 나타내는 것을 발견했다. 즉, 평면제트가 슬릿에 충돌하여 발생하는 슬릿음은 제트의 출구에서 유동이 층류인 저속과 난류인 고속에서 모두 충돌순음이 발생하며 제트의 불안정 모드도 반대칭과 대칭이 모두 나타나기 때문에 평면 충돌제트의 불안정 거동에 관한 제반 특성을 파악할 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 평면 충돌제트에 의한 슬릿음에 있어서 저속 및 고속의 충돌 평면제트의 불안정 거동을 파악하기 위한 것이다. 슬릿폭을 변화시키면서 충돌거리와 유속에 따른 충돌순음의 주파수를 측정하고 위상차로부터 제트의 불안정 모드를 구하고 각 모드별 주파수 특성을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

충돌제트는 Fig. 1 과 같으며 실험장치는 평면노즐, 충돌면, 그리고 노즐과 충돌면 사이의 거리를 조절하기 위한 3차원 이송장치로 구성되어 간이 무향실에 설치하였다. 압축기로 압축된 공기는 서지탱크와 유동 안정화를 위한 하나콧을 통과한 후 노즐에서 분출된다.

평면노즐은 축소각 10° 인 축소 노즐로서 30 mm 너비에, 길이 395 mm이다. 노즐 폭  $h$  는 1 mm, 또는 2 mm 로 변화시켰으나 별도의 언급이 없으면  $h = 2$  mm에 대한 것이다. 충돌면은 두께 4 mm의 280 mm × 340 mm인 직사각형 판에 슬릿은 길이

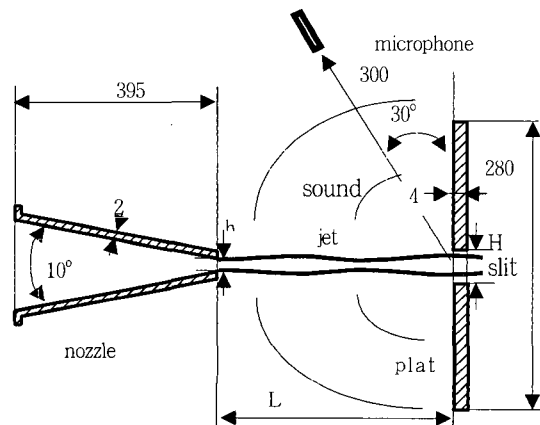


Fig. 1 Slit-tone system

20 mm에 폭  $H$ 를 0, 1, 2, 3 및 4 mm 로 변화시켰다. 슬릿이 노즐과 동일 축 상에 위치하도록 충돌면을 3차원 이송장치 위에 설치하였다.

일정한 노즐 상류압력에 대하여 노즐과 충돌면 사이의 거리  $L$  을 변화시키거나 거리를 일정하게 하고 유속을 변화시킬 때 발생하는 음을 지름 6.4 mm의 콘덴서 마이크로폰을 이용하여 측정하고 2채널 FFT에서 최대 20 kHz까지 주파수 분석을 하였다. 마이크로폰은 충돌면에서 30° 각도로 300 mm 거리에 제트의 상하에 대칭으로 2 개를 설치하여 방사음의 음압 및 상하 면에서의 위상 차를 구할 수 있도록 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 저속 충돌순음과 고속 충돌순음

유속에 따라서 발생하는 충돌순음의 주파수 중에서 진폭이 가장 큰 주음의 주파수  $f$ 를 도시하면 Fig. 2 와 같다. 그림에서 유속  $U_j$  는 이상적인 노즐 출구에서의 분출속도를 뜻하며 다음 식으로 구한 것이다.

$$U_j = c \left[ \frac{2}{\gamma - 1} \left( 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right) \right]^{1/2} \quad (1)$$

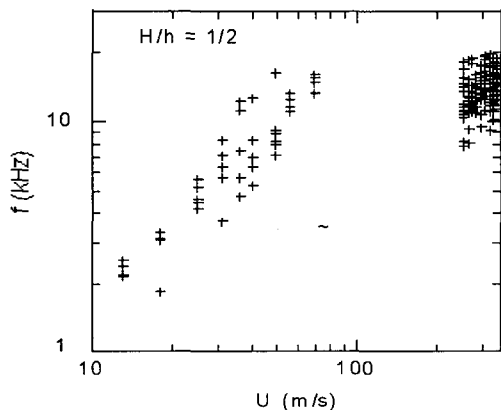
식에서  $c$ 는 대기 중에서 음속,  $p$  는 노즐 상류의 정압,  $p_0$ 는 대기압,  $\gamma$ 는 비열비를 뜻한다.

먼저 Fig. 2(a)의 슬릿폭이 좁은  $H/h = 1/2$ 인 경우를 보면 유속이  $U_j = 100$  m/s이하의 저속에서는 유속에 따라서 주파수가 증가하는 특성을 보이는 저속 충돌순음이 발생하고,  $U_j = 200$  m/s 이상의 고속에서는 다른 주파수 특성을 갖는 고속 충돌순음이 발생하는 것을 볼 수 있다. 저속과 고속의 사이에는 충돌순음이 발생하지 않는 유속이 존재하는 것을 알 수 있다.

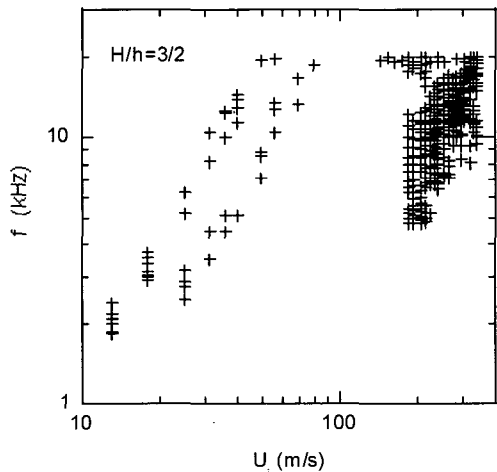
Fig. 2(b)의 슬릿폭이 보다 큰  $H/h = 3/2$ 인 경우를 보면, 보다 높은 속도까지 저속 충돌순음이 발생하며, 보다 낮은 속도에서부터 고속 충돌순음이 발생하는 것을 알 수 있다. 20 kHz 이상의 영역까지 분석을 한다면 저속과 고속 충돌순음의 발생 범위는 거의 연속되어 나타날 것이다. 이와 같이 충돌순음의 발생영역이 저속과 고속으로 분리되어 나타나는 특성은 원형제트에 의한 홀톤<sup>(11)</sup>의 경우와 동일하다. 즉

저속 충돌순음은 층류 경계층의 교란에 의한 것이며 고속 충돌순음은 난류경계층에 의한 것이다. 슬릿에 의하여 슬릿이 없는 판보다 더 강한 충돌순음이 발생함으로써 충돌순음의 발생 영역이 확대되며, 슬릿폭이 노즐의 폭보다 다소 큰 경우에 슬릿음이 가장 활발하게 된다.

슬릿에 의하여 고속에서 충돌순음이 발생하는 유속의 범위가 넓어지며 슬릿이 없는 판음과는 달리 슬릿이 있는 경우는 저속에서도 충돌순음이 발생하게 된다. 또한, Fig. 2에서 저속 충돌순음은 주파수가 높은 그룹과 그 절반에 가까운 낮은 그룹으로 분리되는 특성을 보이는데 이 점은 3.3에서 고찰한다.



(a)  $H = 1$  mm

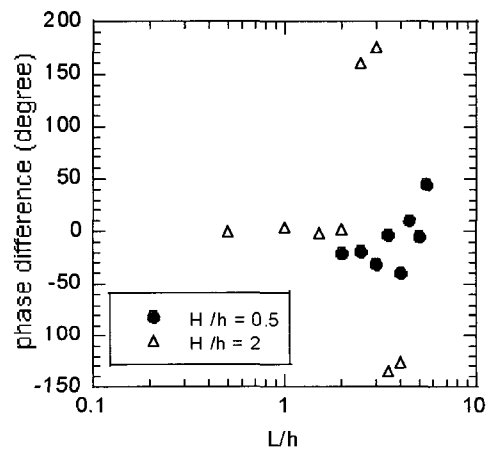


(b)  $H = 3$  mm

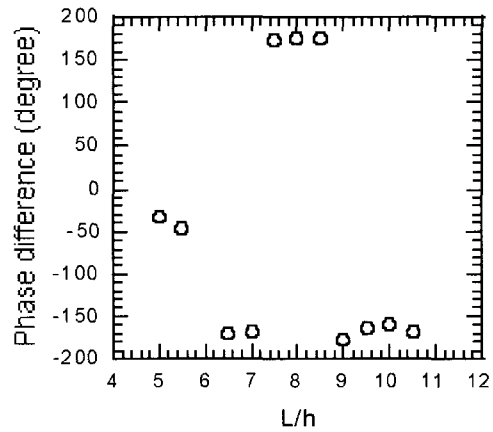
Fig. 2 Variation of the frequency of the main tones with the jet velocity

### 3.2 충돌제트의 불안정 모드

Fig. 3은 주음에 대하여 제트의 양쪽에서 방사음장의 위상차를 측정된 일례를 도시한 것이다. 평면 충돌제트의 불안정 모드에는 대칭(symmetric)과 반대칭(antisymmetric)밖에 없으므로 제트면 양 쪽에서 음압의 위상차는  $0^\circ$  아니면  $180^\circ$ 가 된다. 실제 측정에서는 마이크로폰의 크기, 위치 오차 및 잡음의 영향으로 인하여  $0^\circ$ 와  $180^\circ$ 를 다소 벗어날 수 있으므로 위상차가  $0^\circ$ 에 가까운지  $180^\circ$ 에 가까운지 확인이 되는 경우에는 모드를 결정할 수 있게 된다. 저속제트의 경우인 Fig. 3에서 폭이  $H/h = 1/2$ 로서 좁은 경우는 모두  $0^\circ$ 에 가까운 위상차로서 대칭모드를 보



(a)  $U_j = 25$  m/s



(b)  $U_j = 205$  m/s

Fig. 3 Variation of phase difference for the main tones at both sides of the jet

이며 슬릿폭이 넓은  $H/h = 2$ 인 경우는 충돌거리가 가까울 때는 대칭모드이나 멀어지면 반대칭 모드를 나타내는 것을 알 수 있다. 고속제트의 경우인 Fig. 3 (b)에서는 대칭모드와 반대칭 모드가 모두 나타나며 슬릿폭이 큰 저속제트에서와 같이, 충돌거리가 가까우면 대칭모드가 나타나고 멀면 반대칭모드가 나타나며 여러 개의 순음이 발생할 때는 대칭모드와 반대칭모드가 동시에 나타나기도 한다. 고속에서 이러한 모드 특성은 슬릿이 없는 판음의 경우<sup>(10)</sup>와 같은 것을 알 수 있다.

### 3.3 저속 충돌제트의 보텍스 접합

Fig. 4는  $h = 2$  mm,  $H = 3$  mm인 경우의  $L/h < 6$ 에서 발생하는 저속 슬릿음과, 같은 노즐을 사용한 췌기음의 주파수 특성을 함께 도시한 것이다. 유속은 레이놀즈(Reynolds)수 ( $Re_h \equiv U_j h / \nu$ , 식에서  $\nu$ 는 공기의 동점성계수)로 무차원화 하고 주파수는 스트로할(Strouhal)수 ( $St_h \equiv fh / U_j$ )로 무차원화 한 것이다. 그림에서 I, II 및 III으로 표시한 직선은 동일한 기울기를 갖고 주파수의 비가 각각, 1 : 1/2 : 1/4가 되는 것이다. 그림에서 I 그룹보다 더 높은 주파수는 없으며 이 주파수가 노즐 출구에서 층

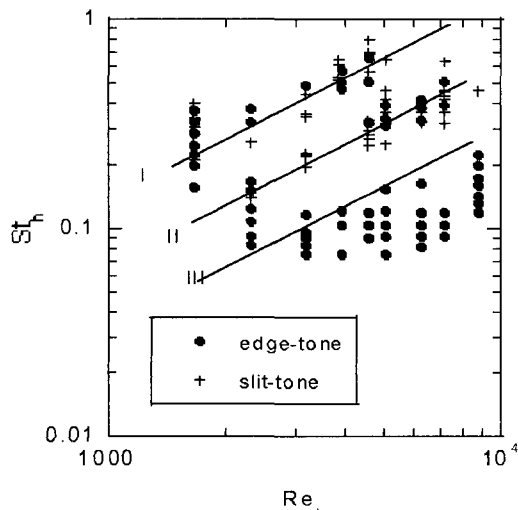


Fig. 4 Variation of the normalized frequency with the normalized impinging distance at low-speed for slit-tones with  $H = 3$  mm, compared with that for edge-tones with the same nozzle

류 경계층이 가장 불안정하게 되는 주파수라고 할 수 있다.<sup>(11)</sup> 주파수 그룹 II는 노즐 출구에서 교란된 보텍스가 하류로 대류되면서 두 개씩 접합(pairing)을 이루어 한 덩어리가 됨으로써 주파수가 약 1/2로 되는 충돌순음을 발생하게 된다. 즉 I 그룹의 주파수는 노즐 출구의 초기 불안정 모드가 그대로 증폭된 것이고 II 그룹의 주파수는 1차 접합을 이루어 나타난 것이라고 할 수 있다.

그림에서 I, II 그룹이 나타나는 특성은 슬릿음과 췌기음이 동일하나 췌기음의 경우는 보다 주파수가 낮은 그룹의 음들이 많이 발생한다는 점이 다르다. 즉, 대칭모드에 의한 저속 슬릿음은 1차 보텍스 접합에 의한 주파수까지 나타나나 반대칭모드에 의한 췌기음은 1차 접합에 의한 주파수와 더불어 2차 이상의 더욱 낮은 주파수의 음들이 발생하는 것으로 추정할 수 있다. 슬릿음이 1차의 보텍스접합에 의한 주파수까지 관찰되는 것은 원형제트에 의한 홀톤의 경우<sup>(11)</sup>와 같다.

### 3.4 고속 충돌순음의 주파수 특성

Fig. 5는 고속에서 모든 슬릿에 대하여 충돌거리에 따른 발생 주파수를 도시한 것이다. Fig. 2(a)에서 유속이 다소 낮은  $U_j = 183$  m/s에서 충돌거리가 가까운 경우에 발생하는 S3는 대칭모드에 의한  $n = 3$ 인 경우를 나타낸 것이며, A2는 보다 먼 충돌거리에서 반대칭모드에 의하여 발생하는  $n = 2$ 인 경우를 표시한다. 여기서  $n$ 은 동일 주파수에서 충돌거리의 정수 비로부터 구한 단(stage) 수를 뜻한다.<sup>(5)</sup>

Fig. 5의 (a)에서 슬릿폭이 좁은  $H/h = 1/2$ 인 경우는 충돌순음이 나타나지 않고 슬릿폭이 큰 경우는 보다 먼 거리까지 반대칭의 충돌순음이 나타나는 것을 알 수 있다. 그림에서 대칭모드는 반대칭모드에 비하여 주파수 변화의 기울기가 완만한 것을 알 수 있으며 이러한 특성은 판음의 경우<sup>(10)</sup>와 같음을 알 수 있다.

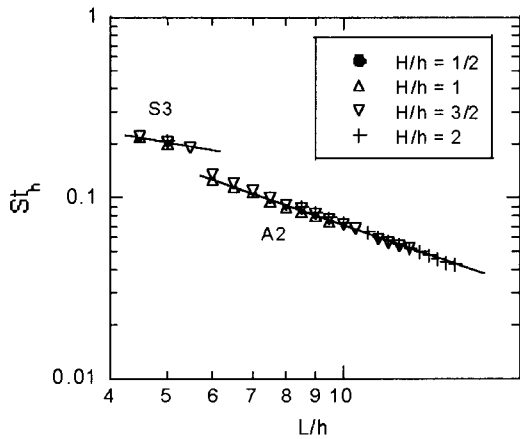
Fig. 5의 (b)는 속도가 보다 빠른  $U_j = 320$  m/s인 경우에 대한 것으로서 대칭모드와 반대칭모드가 여러 단에 걸쳐 나타나며 충돌거리가 가까운 곳에서 대칭모드, 먼 곳에서 반대칭모드가 나타나나 중간 영역에서는 두 모드가 동시에 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림에서 슬릿폭이 좁은  $H/h = 1/2$ 인 경우는

$n = 2, 3$  인 대칭모드만 발생하며 슬릿폭이 더 넓은 경우는 대칭과 반대칭 모드가 함께 나타나는 것을 알 수 있다.

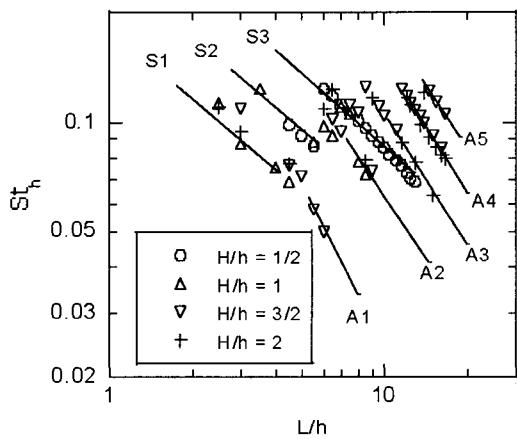
### 3.5 저속 충돌순음의 주파수 특성

Fig. 6의 (a)는  $h = 2$  mm인 노즐과  $H = 1$  mm인 슬릿에 의하여 유속  $U_j = 13$  m/s에서 발생한 충돌순음의 주파수와, 같은 슬릿에 대하여  $h = 1$  mm인 노즐을 사용한 경우에 대한 실험 결과를 함께 도시하였다. 또한  $h = 2$  mm인 노즐에 의한 썩

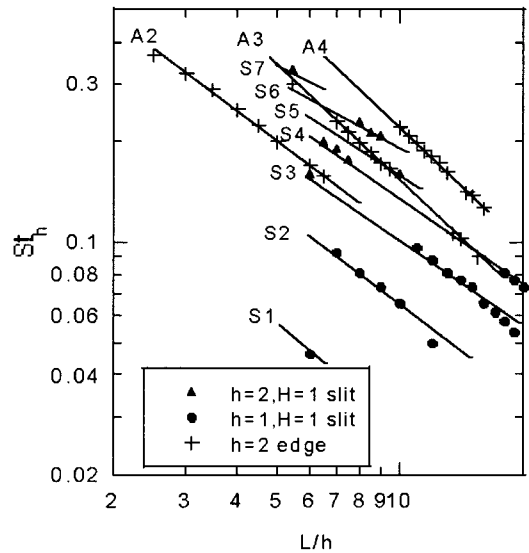
기음의 주파수도 함께 도시하였다. 슬릿음은 모두 대칭모드에 의한 것이며 썩기음은 반대칭모드에 의한 것이다. 그림에서 슬릿음과 썩기음의 충돌거리에 따른 주파수 변화의 기울기가 앞에서 살펴본 고속 충돌순음의 경우와 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 슬릿음의 경우 노즐의 폭이 작은 경우 스트로할수가 거의 절반까지 낮아지는 것을 볼 수 있으며 이



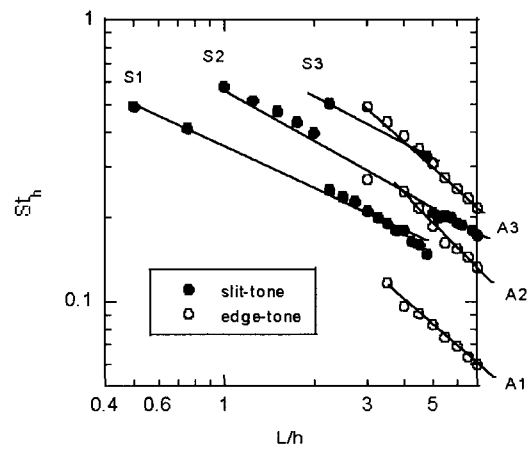
(a)  $U_j = 186$  m/s



(b)  $U_j = 320$  m/s



(a)  $U_j = 13$  m/s



(b)  $U_j = 25$  m/s

**Fig. 5** Variation of the normalized frequency with the normalized impinging distance for high-speed slit-tones with various slit-width

**Fig. 6** Variation of the normalized frequency with the normalized impinging distance of low-speed slit-tones in comparison with edge-tones

것은 주파수를 결정하는 특성길이가 노즐폭이 되지 않는 것을 뜻하는 것이다. 노즐 출구에서 경계층의 불안정 주파수는 경계층의 두께에 관계되며 경계층의 두께는 노즐의 형상과 길이에 따라 영향을 받기 때문이라고 할 수 있다.<sup>(11)</sup>

Fig. 6의 (b)는 속도가 보다 빠른  $U_j = 25$  m/s에서  $H = 1$  mm인 슬릿에 의하여 발생한 슬릿음을 역시 같은 노즐에 의한 썩기음과 함께 도시하였다. 슬릿폭이 증가함으로써 썩기음도 발생하지 않는 보다 가까운 거리에서  $n = 1$ 에서 3까지의 슬릿음이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 주파수가 높은  $St_h = 0.4$ 에 가까운 I 그룹과 그 1차 보텍스 접합에 의하여 주파수가 절반으로 낮아진  $St_h = 0.2$ 에 가까운 II 그룹이 뚜렷이 분리되는 것을 알 수 있고 보텍스 접합에 의한 II그룹은 보다 먼 충돌거리에서 발생하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

이상과 같이 슬릿에 충돌하는 평면제트의 불안정 거동을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

평면 제트가 슬릿에 충돌 할 때, 난류 경계층의 교란에 의한 고속 충돌순음과 층류 경계층의 교란에 의한 저속 충돌순음이 발생한다.

저속 충돌순음은 슬릿폭이 노즐에 비하여 현저히 크지 않는 한, 모두 대칭모드의 불안정 제트에 의하여 발생하고, 고속 충돌순음은 충돌거리가 가까운 경우는 대칭모드, 먼 경우는 반대칭모드가 주로 발생하고, 슬릿폭이 작을수록 대칭모드가 잘 나타난다.

저속 슬릿음에서도 홀톤의 경우와 같이 제트의 불안정 주파수와 한 차례의 보텍스의 접합에 의한 주파수에서 충돌순음이 발생한다.

저속 평면제트의 경우에도 고속의 경우와 같이 충돌 거리에 따른 주파수 변화의 기울기로부터 대칭모드와 반대칭모드의 구별이 가능하다.

#### 후 기

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어 졌음.

#### 참 고 문 헌

- (1) Rockwell, D., 1983, "Oscillations of Impinging Shear Layers," AIAA Jr., Vol. 21, No. 5, pp. 645~661.
- (2) Brown, G. B., 1935, "The Vortex Motion causing Edge Tones," Proc. Phys. Soc. Lond. Vol. 47, pp. 493~507.
- (3) Powell, A., 1953, "On Edge Tones and Associated Phenomena," Acustica Vol. 3, pp. 233~244.
- (4) Kwon, Y. P., 1996, "Phase-locking Condition in the Feedback Loop of Low-speed Edgetones," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 100, No. 5, pp. 3028~3032.
- (5) Kwon, Y. P., 1998, "Feedback Mechanism of Low-speed Edgetones," Jr. Acoust. Soc. Am. Vol. 104, No. 4, pp. 2084~2089.
- (6) Ho, C. M. and Nossier, N. S., 1981, "Dynamics of an Impinging Jet, Part 1: The Feedback Phenomenon," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 105, pp. 119~142.
- (7) Powell, A., 1988, "The Sound-producing Oscillations of Round Underexpanded Jets Impinging on Normal Plates," Jr. Acoust. Soc. Am. Vol. 83, No. 2, pp. 515~533.
- (8) Kwon, Y. P. and Im, J. B., 1998, "Instability of High-speed Impinging Jets (1)-Circular Jets-", Tr., Korea Society of Mechanical Engineers(B) Vol. 22, No. 4, pp. 459~467.
- (9) Im, J. B. and Kwon, Y. P. 1999, "Instability Characteristics of Circular Jets Producing Hole-tones", Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 9, No. 5, pp. 1005~1011.
- (10) Kwon, Y. P., 1998, "Instability of High-Speed Impinging Jets (1)-Plane Jets-", Tr., Korea Society of Mechanical Engineers(B), Vol. 22, No. 4, pp. 452~458.
- (11) Kwon, Y. P. and Im, J. B., 2003, "Effect of Nozzle Configuration and Impinging Surface on the Impinging Tone Generation by Circular Jets", Tr., Korea Society of Mechanical Engineers(B), Vol. 227, No. 6, pp. 693~700.