

평면 충돌제트의 불안정특성(2) - 원통음 - Characteristics of Plane Impinging Jets(2) - Cylinder-tone -

권 영 필[†] · 김 욱^{**} · 이 주 원^{***}

Young-Pil Kwon, Wook Kim and Joo-Won Lee

(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), Cylinder(원통)

ABSTRACT

The objective of this study is to obtain the instability characteristics of the plane jet impinging on a circular cylinder associated with the cylinder-tone. It is found that the characteristics depends upon the ratio of the cylinder diameter to the nozzle width, D/h , and the jet velocity. When the ratio is moderate the cylinder-tone is similar to the edge-tone. With increase of the ratio, its characteristics becomes similar to that of the plate-tone in which only the high-speed tone associated with turbulent jet is generated. When $D/h < 1$, the frequency range, especially the lower limit of frequency, is significantly influenced by the cylinder diameter. At around $D/h = 1/2$, while low speed tones are induced with the antisymmetric mode of instability and affected by the vortex shedding from the cylinder, high-speed tones are generated, at first, with the symmetric mode of instability, and then, with antisymmetric mode, as the jet velocity increases.

1. 서 론

평면제트에 의한 충돌순음과 관련하여 다양한 형상의 충돌면을 생각할 수 있지만 수평 방향으로는 썸머가 있고 수직방향으로는 슬릿(판을 포함)이 있으며 이 두 경우와 구별되는 경우로 원통을 생각할 수 있다. 평면 충돌제트의 거동에 관하여 전편⁽¹⁾에서 연구한 슬릿음에서는 저속 충돌순음과 고속 충돌순음이 나타나고 저속에서는 대칭 모드의 불안정 현상이 발생하고 고속에서는 대칭(symmetric) 모드와 반대칭(antisymmetric) 모드가 동시에 나타나기 때문에 모

드에 따른 평면제트의 불안정 거동의 폭넓은 파악이 가능하였다.

평면제트와 원통에 의한 충돌순음인 원통음(cylinder-tone)에 관하여 일정한 유속과 일정한 노즐에 대한 연구⁽²⁾가 있으나 유속 및 원통 지름의 변화가 충돌순음의 주파수 및 불안정 특성에 미치는 영향에 관한 체계적인 연구는 보고 된 바 없다.

본 연구는 다양한 제트의 폭과 원통의 지름에 대하여 유속의 변화에 따른 불안정 모드의 변화 및 주파수 특성을 파악하기 위한 것이다. 원통의 지름과 제트 폭의 비에 따른 충돌순음의 주파수 특성 및 평면 충돌제트의 불안정 거동에 관한 제반 특성을 구하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

원통음의 발생을 위한 시스템은 Fig. 1과 같이 앞서의 연구⁽¹⁾에서 슬릿 slit 대신 원통을 장착한 것이

[†] 책임저자 : 정희원, 숭실대학교 기계공학과

E-mail : ypkwon@ssu.ac.kr

Tel : (02) 820-0655, Fax : (02) 823-5924

* 국립품질기술원

** 숭실대학교 대학원

다. 노즐의 폭 h 는 1, 2, 3.5 및 4 mm로 변화시켰고, 각 폭에 대한 너비는 50, 28, 20 및 18 mm이었다. 원통의 지름 D 는 1.0, 1.6, 2.0, 2.4, 3.0, 3.2 mm로 변화시켰으며 기타 치수나 장치의 구성 및 실험 방법은 전편⁽¹⁾과 동일하다.

2. 실험결과 및 고찰

3.1 원통음의 스펙트럼

먼저 $h = 3.6$ mm 인 노즐에서 유속이 $U_j = 317$ m/s 인 고속일 때 발생한 충돌순음의 스펙트럼은 Fig. 2와 같다. 광대역 성분보다 20 dB 이상 높은 11400 Hz와 13800 Hz의 강한 순음이 나타나고 있으며 전자는 반대칭모드, 후자는 대칭모드의 불안정 제트의 거동에 의한 것으로서 다른 두 모드가 동시에 나타나는 것을 알 수 있다.

3.2 불안정모드

제트의 양 쪽에서 음장의 위상차를 측정하여 제트의 불안정모드를 구하였으며, $h = 3.7$ mm인 노즐과 $D/h = 0.54$ 인 실린더에 대하여, $U_j = 304$ m/s 인 고속 제트의 경우의 주파수와 위상차를 도시하면 Fig. 3과 같다. 그림에서 충돌 거리가 가까운 경우는 모두 대칭모드가 나타나며, 충돌거리가 멀어지면 대칭모드(S로 표시)와 반대칭모드(A로 표시)가 동시에 나타난다. 대칭모드의 경우 충돌거리에 따른 주파수 변화의 기울기가 반대칭모드의 경우에 비하여 완만한 것을 알 수 있고 이러한 특성은 판음⁽³⁾이나 슬릿음⁽¹⁾의 경우와 일치하는 것을 알 수 있다.

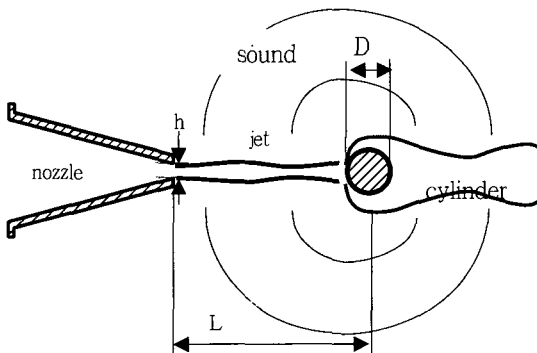


Fig. 1 Cylinder-tone system induced by a two-dimensional plane jet

3.3 주파수 특성

원통음의 주파수 특성은 원통 지름과 노즐 폭의 비, D/h 에 따라 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

$h = 1$ mm 인 노즐에 대하여 원통의 지름이 노즐의 폭보다 큰 $D/h = 1.6$ 및 $D/h = 3.2$ 인 경우에 충돌거리에 따른 무차원 주파수인 스트로할(Strouhal)수, $St_h = fh/U_j$ 를 도시하면 Fig. 4 와 같

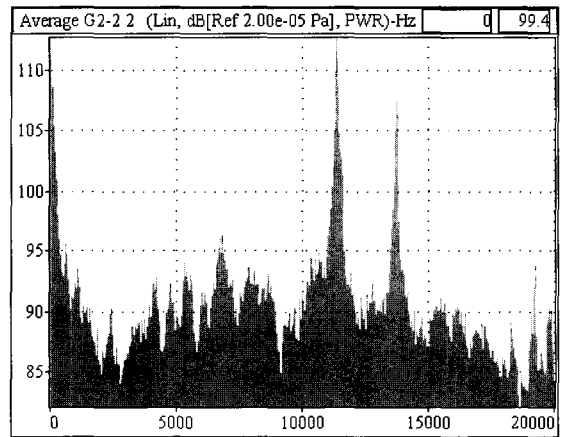


Fig. 2 Cylinder-tone spectrum at $U_j = 317$ m/s for nozzle of $h = 3.6$ mm, cylinder of $D/h = 0.56$ and impinging-distance of $L/h = 5$

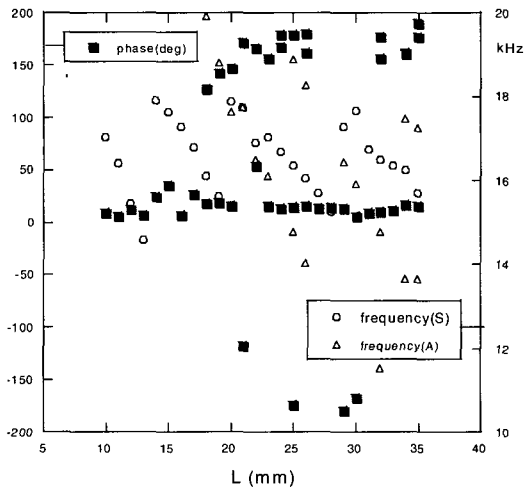
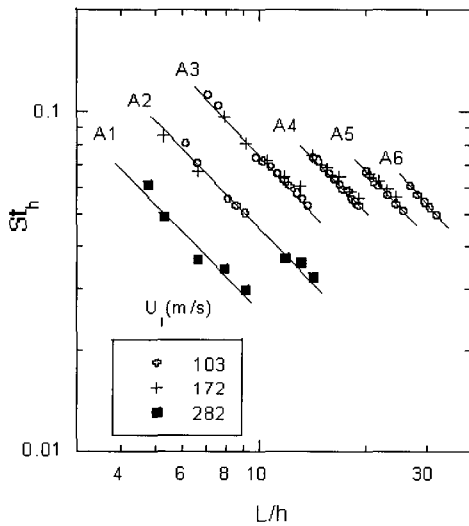
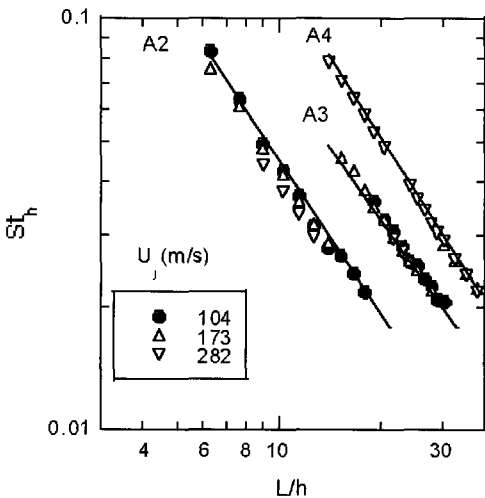


Fig. 3 Frequency and phase of the impinging-tones induced by a nozzle of $h = 3.7$ mm and a cylinder of $D/h = 0.54$ at $U_j = 304$ m/s

다. 그림에서 An 및 Sn은 각각, 반대칭모드와 대칭 모드의 단 수(stage number) n 을 표시한다. 이 경우에는 모두 반대칭 모드의 불안정 제트에 의하여 충돌순음이 발생한다. Fig. 4(a)의 $D/h = 1.6$ 인 경우는 저속에서 충돌순음이 잘 발생하나 원통의 지름이 2 배로 큰 Fig. 4(b)의 $D/h = 3.2$ 인 경우 충돌면은 수직벽과 유사하게 거동한다고 볼 수 있다.



(a) $D/h = 1.6$



(b) $D/h = 3.2$

Fig. 4 Variation of frequency with impinging distance for a nozzle of $h = 1$ mm and cylinders with different diameters

지름이 크면 원통을 판으로 생각할 수 있으나 판음은 대칭 모드도 나타나는 데 반하여 원통음은 실험 범위에서는 반대칭 모드만 관찰되었다. Fig. 4(b)에서 원통의 지름이 큰 경우에는 판음과 같이 저속에서는 충돌순음이 잘 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 원통의 지름이 작으면 썩기음⁽⁴⁾과 비슷하게 되고, 지름이 크면 판음⁽³⁾과 비슷하게 된다고 할 수 있다.

Fig. 5는 노즐폭이 $h = 2$ mm, 원통 지름이 노즐의 폭보다 작은 $D = 1$ mm로서 $D/h = 1/2$ 인 경우의 저속제트에 관한 실험 결과다. 충돌제트는 모두 반대칭모드에 해당하는 불안정 특성을 나타내었다. 그림에서 1st, 2nd 등은 진폭이 가장 큰 주음부터 진폭이 큰 순서를 나타낸다.

Fig. 5(a)의 $U_j = 20$ m/s에서는 썩기음과 비슷하게 여러 단의 충돌순음이 발생하나 썩기음⁽⁴⁾에 비하여 스트로할수가 높은 것을 알 수 있다. 또한, 각 단별 스트로할수의 최소 값은 거의 일정하며 대략 $St_h \approx 0.15$ 임을 알 수 있다. 즉, 모든 순음이 노즐과 원통사이에서 제트와 음파의 되먹임 작용으로 발생하지만 그 주파수 범위는 원통 지름의 영향을 받는다고 할 수 있다.

Fig. 5(b)의 $U_j = 60$ m/s인 경우를 보면 Fig. 5(a)와 같이 단의 특성이 분명하게 나타나지 않고 $St_h \approx 0.15$ 와 그 배음들로 일정한 주파수의 순음이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 원통에서 보텍스 떨어짐(vortex shedding)과 관련된 것으로 추정된다. 되먹임 작용에 의한 충돌순음의 주파수가 충돌거리에 따라서 계단형의 단을 이루는데 반하여 보텍스 떨어짐에 의한 주파수는 충돌 거리의 영향을 받지 않기 때문이다. 충돌거리가 $L/h > 10$ 로 멀어지면 되먹임작용이 약해짐으로써 충돌순음은 전혀 나타나지 않고 오직 보텍스 떨어짐 현상만 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 5(c)의 $U_j = 115$ m/s인 경우를 보면 유속이 빨라지면 보다 가까운 거리까지만 충돌순음의 특성을 보이다가 충돌거리가 멀어지면 앞의 경우와 같이 $St_h \approx 0.15$ 근처의 일정한 주파수의 보텍스 떨어짐만 나타난다. 속도가 더욱 증가하면 충돌순음은 나타나지 않게 된다.

이상에서 보듯이 원통의 지름이 노즐의 폭에 비하

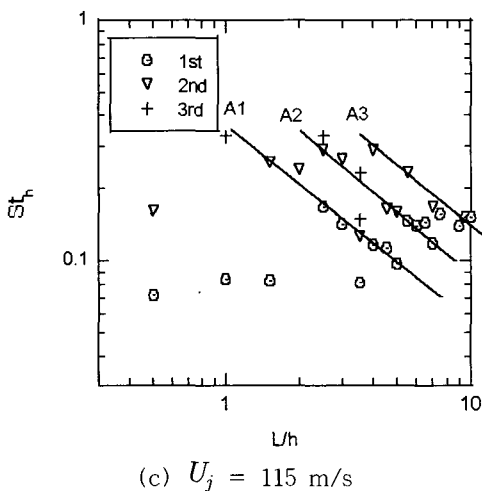
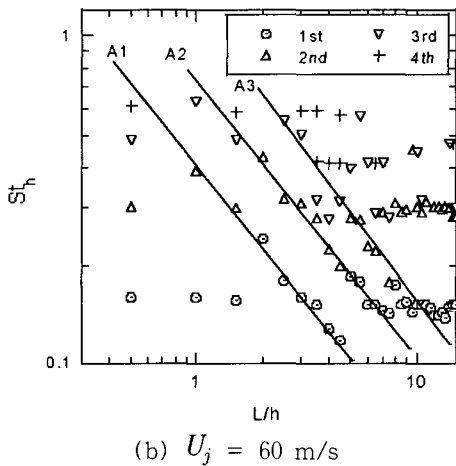
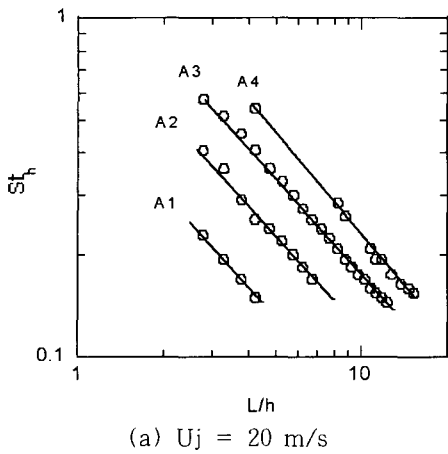


Fig. 5 Variation of frequency with impinging distance for a nozzle of $h = 2 \text{ mm}$ and a cylinder of $D/h = 1/2$

여 작은 경우에는 주파수의 최소 값이 원통으로부터의 보텍스 떨어짐의 주파수와 거의 같으며 모두 $St_h \approx 0.15$ 에 가깝다는 것을 알 수 있다. 균일 유속 U_j 에 수직으로 놓인 지름 D 인 원통의 경우 보텍스 떨어짐(vortex shedding) 주파수는, 원통의 지름을 특성 길이로 한 스트로할수, $St_D = fh/U_j$ 로 나타낼 때, $St_D \approx 0.2$ 에 가까운 것이 알려져 있다.⁽⁵⁾ $D/h = 1/2$ 인 경우, $St_h \approx 0.15$ 는 $St_D \approx 0.08$ 에 해당하며 $St_D \approx 0.2$ 와의 차이는 실제 원통 주위의 유속 분포의 차이에 의한 것으로 볼 수 있다. 즉, 제트의 가운데에 원통이 존재하는 경우 제트의 폭이 충분히 크지 않는 한 원통 주위의 유동이 균일하다고 할 수 없고 그 평균유속이 제트의 속도보다 상당히 낮을 것을 예상할 수 있다. 따라서 실제 원통 주위의 유속을 기준으로 하면 스트로할수는 크게 증가할 것이며 균일유동의 경우와의 차이는 감소하게 될 것이다.

Fig. 6은 $h = 3.5 \text{ mm}$, $D = 2 \text{ mm}$ 로서 $D/h = 0.57$ 인 경우, 고속제트에서 발생한 충돌순음의 충돌거리에 따른 발생 주파수의 주음만 도시한 것이다. Fig. 6(a)에서 유속이 $U_j = 275 \text{ m/s}$ 일 때 고속 충돌순음이 나타나기 시작하며 모두 대칭모드의 불안정 현상을 보였다. 유속이 $U_j = 281 \text{ m/s}$ 일 경우에도 여전히 대칭모드만 나타나고 주파수는 보다 낮은 값을 나타낸다. Fig. 7(b)는 $U_j = 317 \text{ m/s}$ 인 경우로서 대칭과 반대칭모드가 함께 발생하는 것을 보이고 있다. 유속이 더욱 증가하면 오직 반대칭모드만 나타나게 된다. 고속 충돌제트의 불안정모드에 대한 이러한 특성은 원통의 지름이 무한히 큰 경우라고 할 수 있는 판음과는 상반된다. 즉, 판음의 경우는 처음에 모두 반대칭모드만 나타나다가 유속이 더욱 증가하면 반대칭모드와 아울러 대칭모드가 나타나는 특성을 보였다.⁽³⁾

Fig. 6에서 원통의 지름이 작은 경우의 고속 충돌순음의 주파수 범위를 보면 대칭모드는 유속 U_j 가 217 m/s 에서 315 m/s 로 증가함에 따라서 스트로할수 St_h 의 평균이 약 0.25에서 0.15, 원통지름을 특성 길이로 한 St_D 로는 0.15에서 약 0.08까지 감소하는 것을 알 수 있다. 그런데 Fig. 6의 (b)에서 충돌거리 $L/h < 20$ 인 범위에서 반대칭모드 주음의 최소 스

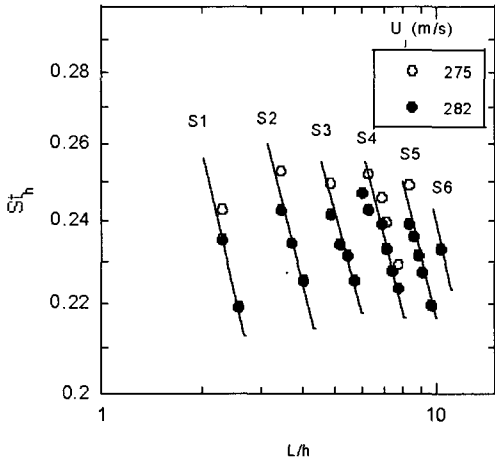
트로할수는 저속 충돌순음의 경우에 대한 $St_D \approx 0.08$ 와 크게 다르지 않다는 것을 알 수 있다.

3.4 원통 지름의 영향

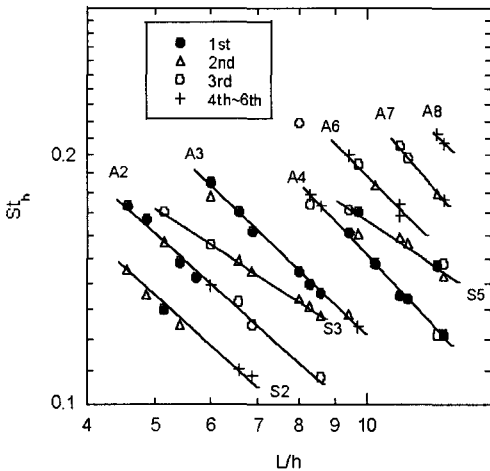
Fig. 7은 $U_j = 20$ m/s 인 저속에서 $h = 2$ mm 인 노즐에 의하여 발생하는 충돌순음을 원통의 지름 D 를 특성길이로 하여 도시한 것이다. 원통의 지름이 다르더라도 충돌순음의 최소 주파수의 무차원 값이

거의 같은 값으로서 $St_D \approx 0.08$ 임을 알 수 있다. 이러한 결과는 $h = 15$ mm 노즐서 $D/h = 0.67$ 인 경우에 관한 실험 결과⁽²⁾와도 거의 일치하는 것이다.

Fig. 8은 $U_j = 282$ m/s 인 고속에서 반대칭모드(A)를 발생하는 $h = 1$ mm 노즐 및 대칭모드(S)를 발생하는 $h = 3.5$ mm 인 노즐에 의한 충돌순음



(a) $U_j = 275$ m/s and 282 m/s



(b) $U_j = 317$ m/s

Fig. 6 Variation of frequency with impinging distance for a nozzle of $h = 3.5$ mm and a cylinder of $D/h = 0.57$

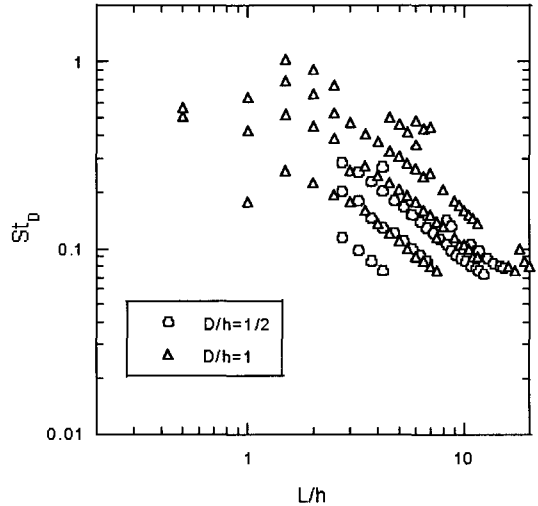


Fig. 7 Effect of cylinder diameter on the frequency range for a nozzle of $h = 2$ mm at $U_j = 20$ m/s

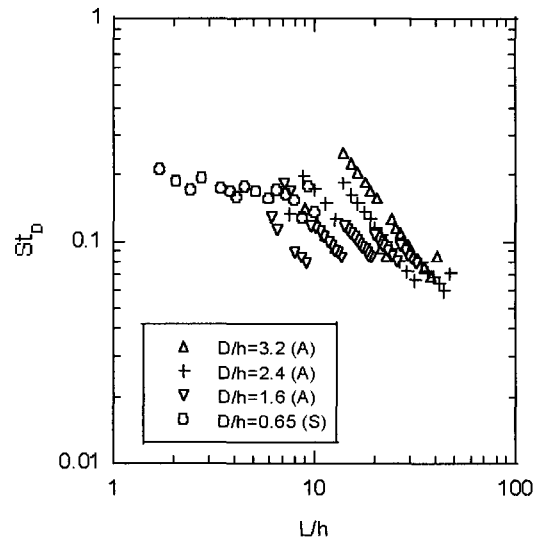


Fig. 8 Effect of cylinder diameter on the frequency range at $U_j = 282$ m/s

에 관하여 원통의 지름 D 를 특성길이로 주파수 변화를 표시한 것이다. 노즐 폭을 특성 길이로 한 경우에는 무차원 주파수가 $0.02 < St_h < 0.35$ 까지 상당히 넓은 범위에 걸쳐 분포하나 원통 지름을 특성 길이로 할 때는 $0.06 < St_D < 0.25$ 사이로 범위가 크게 축소되어 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 충돌음의 발생범위가 원통 지름에 크게 영향을 받는다. $D/h = 0.65$ 일 때 발생하는 대칭모드의 경우에는 거의 $St_D \simeq 0.2$ 에 가까운 값에 모여 있는 것을 알 수 있고 저속에서의 반대칭모드와 같은 최소값 특성을 발견할 수 없다.

4. 결론

이상과 같이 평면제트가 원통에 충돌하여 발생하는 원통음에 관련된 충돌제트의 불안정 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

원통음을 발생하는 평면 충돌제트의 불안정 특성은 노즐의 폭과 원통의 상대적인 치수에 따라서 다른 특성을 나타낸다.

원통의 지름이 노즐의 폭보다 큰 경우에는 전유속에 걸쳐 반대칭모드의 충돌순음이 발생하며 지름이 크면 판음과 같이 고속에서만 충돌순음이 발생한다.

원통의 지름이 노즐의 폭보다 작은 경우에는 저속에서는 반대칭 모드에 의한 충돌순음이 발생하고 고속에서는 처음에 대칭모드에 의한 충돌순음이 발생하나 유속이 증가함에 따라서 반대칭모드가 나타난다.

또한 원통의 지름이 노즐의 폭보다 작은 저속 충돌제트의 경우 충돌순음은 원통에서 보텍스 떨어짐의 영향을 받게 된다. 충돌순음의 최소 주파수도 보텍스

떨어짐 주파수와 거의 일치하고 유속이 빠를수록 충돌순음이 약해진다.

후 기

본 연구는 2003년도 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어 졌음.

참 고 문 헌

- (1) Kwon, Y. P., 2004, "Characteristics of Plane Impinging Jets(1)-Slit-tone-", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 50~55.
- (2) Mochizuki, O., Kiya, M. and Tazumi, M., 1986, "Sound Generation by a Two Dimensional Jet Impinging on a Circular Cylinder," Tr., Japan Society of Mechanical Engineers(B) Vol. 53, No. 487, pp. 911~916.
- (3) 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.
- (4) Kwon, Y. P., Lee, H. H., Chang W. and Kim, W., 2001, "A Study on the Characteristics of Edgetones by High Speed Plane Jets," Tr., Korea Society of Mechanical Engineers(A), Vol. 25, 12, pp. 2100~2108.
- (5) Blevins, R. D., 1990, Flow-induced Vibration, 2nd ed., Vannostrand Reinhold, New York.