

원형 충돌제트의 불안정 모드

⁰권영필*, 임정빈**

Unstable Modes of Impinging Circular Jets

⁰Kwon, Y. P.* and Im, J. B.**

ABSTRACT

Based on the experiment for the frequency characteristics and the feedback theory of the impinging-tones, the unstable characteristics of the symmetric mode is analyzed among the various unstable modes of circular impinging jets. There are two different symmetric modes; one is the low-frequency mode S1 due to the vortex at the outside of the jet and the high-frequency mode S2 due to the inside vortex. Each mode has its own characteristics of convection speed decreasing with frequency.

1. 서론

제트가 벽이나 벽면 또는 원통 등에 충돌할 때 발생하는 충돌음(impinging-tone)은 다양한 유동형태에서 관찰되는 현상이다^(1,2). 이러한 충돌음은 제트와 충돌면의 형상에 따라서 edge-tone, cavity-tone, hole-tone, plate-tone, ring-tone 등으로 불리우고 있다.⁽²⁾ 일반적인 유체소음은 난류유동에 의한 것으로서 광대역(broadband)주파수 특성을 갖고 있으나 제트의 충돌음(impinging tone)은 순음성 소음(tone)이기 때문에 충돌음이 있을 경우 이것이 유체소음의 주 원인이 된다.

이러한 제트의 충돌음은 불안정한 제트가 맥동을 하면서 고체면에 충돌하여 음파를 발생하고 음파가 다시 노즐 출구에서 제트를 교란하여 하나의 피드백(feedback)순환을 이룰 때 발생된다⁽³⁾. 충돌음은 제트의 불안정현상에 기인하기 때문에 그 해석에는 제트의 불안정(instability)현상에 관한 이해가 필요하다. 제트의 불안정특성은 소음에 관련해서 뿐만 아니라 유체역학적으로 매우 중요한 연구 과제라고 할 수 있다.⁽⁴⁻⁷⁾ 그러나 지금까지의 충돌음의 연구는 대부분 주파수 특성을 설명하기 위한 피드백기구에 관한 것이었다. 피드백 기구는 Powell에 의하여 정성적 모델이 세워진 이래 많은

연구⁽⁸⁻¹⁰⁾가 있었으며 이제 거의 확립되었다고 할 수 있다⁽¹¹⁾. 그러나, 피드백모델이 확립되어도 제트의 불안정특성에 관한 정보가 없으면 충돌음의 주파수특성이나 방사음의 음장특성을 구할 수가 없다.

원형 제트에 관한 연구는 충돌면에 제트와 동축상의 구멍이 있는 hole-tone^(12,13)과 초음속 제트를 주된 관심사로 한 고속제트가 벽이나⁽¹⁴⁾ 원통에⁽¹⁵⁾ 충돌할 때의 충돌음과 충돌면이 없이 shock cell에 의한 screech음⁽¹⁷⁾에 관한 연구가 대표적이라 할 수 있다. 저속제트의 hole-tone은 모두 축대칭인 것으로 밝혀졌으며⁽¹²⁾ 초음속제트의 경우는 symmetric, helical, sinuous 모드가 나타나는 것을 확인하였으나⁽¹⁷⁾ 각 모드별 특성에 관해서는 자세히 연구된 바가 없다. 아음속의 고속제트에 관한 대표적인 연구로는 Ho와 Nosseir의 Mach수 0.9일 때의 연구가 있다⁽¹⁸⁾. 이 논문이 충돌음의 전형적인 연구로서 널리 인용되고 있기는 하나 피드백모델을 입증하려고 한 것이다.

지금까지 교란의 대류속도 U_c 는 경험적으로 제트의 평균속도 U_0 의 0.6배에 가까운 값으로 여겨져 왔다. Ho와 Nosseir⁽¹⁸⁾도 이와 같이 상수로 취급함으로써 피드백 조건을 맞추기 위하여 음파의 위상속도를 음속보다 더 큰 것으로 해석하는 불합리함을 보여주었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 충돌제트의 불안정

* 숭실대학교 기계공학과

** 숭실대학교 기계공학과 대학원

모드에 관한 연구는 초음속 제트에 집중되었으며 불안정 모드들은 발견되었으나 그들이 발생하는 조건이나 대류속도 등의 특성에 관해서는 연구된 바 없다. 특히 아음 속의 고속 제트에 관해서는 불안정 모드에 관한 체계적인 연구를 찾아볼 수 없다.

최근 권영필⁽¹⁹⁾은 평면제트의 충돌음에 관한 연구결과 저속에서는 대칭 모드밖에 나타나지 않으나 고속제트의 경우는 비대칭 모드도 나타나는 것을 발견하였다. 또한, 모드별 대류속도는 서로 다른 경향을 나타내며 주파수의 강한 함수관계인 것을 발견하였다.

본 연구는 아음속의 고속 원형제트의 충돌음의 주파수특성 실험을 통하여 불안정 모드의 대류속도를 구하고 모드들을 분리하였으며 그 특성을 구하였다.

2. 충돌음의 주파수특성과 대류속도

최근 본 연구자는 충돌음의 주파수특성에 관하여 다음과 같은 피드백 사이클의 위상조건(phase criterion)을 확립하였다⁽¹⁰⁾.

$$\frac{h}{U_c} + \frac{h}{c} = \frac{n+p}{f} \quad (1)$$

식에서 h는 노즐과 충돌 물체 사이의 거리며 U_c 는 제트를 따라서 전파되는 교란의 위상속도인 대류속도(convection velocity), c는 음파의 위상속도인 음속, f는 주파수, n는 정수로서 튜니형의 불연속적인 주파수 특성인 단(stage)을 나타내는 값이다. p는 유효음원의 위치와 관련된 소수이며 수직벽에 충돌하는 경우는 벽면이 음원이 되므로 p=0이며 실험으로 이를 입증하였다.

충돌제트의 주파수 특성, 즉 제트의 속도와 충돌면의 거리h에 따른 주파수 f 및 단수 n를 실험으로 구할 수 있으면 식(1)로부터 교란의 대류속도 U_c 와 제트의 평균속도 U_0 의 비를 다음식으로 구할 수 있다.

$$\frac{U_c}{U_0} = \frac{1}{\left(\frac{n}{fh} - \frac{1}{c}\right) U_0} \quad (2)$$

따라서 충돌음의 주파수특성으로부터 제트의 불안정모드의 대류속도를 구할 수 있다. 또한, 불안정

모드인 symmetric, helical, sinuous는 충돌음의 음장의 측정, 즉 위상측정으로부터 판정이 가능하기 때문에 충돌음의 실험을 통하여 제트의 불안정특성 전체를 파악하는 것이 가능하다.

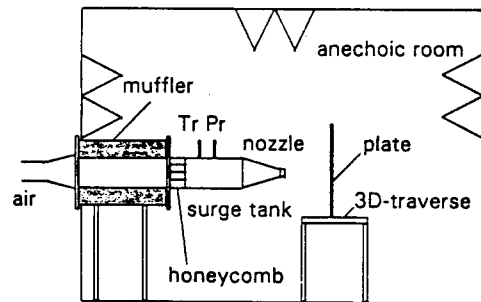
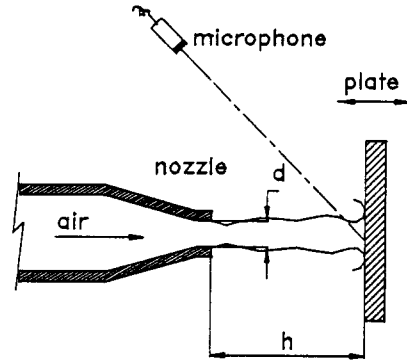


Fig. 1 Experimental configuration for the impinging tone of circular jets.

3. 실험 및 결과

3.1 주파수특성 실험

충돌제트음의 주파수특성은 일정한 제트속도 U_0 에 대하여 충돌면의 거리 h를 변화시키거나 거리를 일정하게 하고 유속을 변화시키면서 주파수 f를 측정하고 이의 계단 특성으로부터 단수 n를 추정하여 구할 수 있다.

실험 방법은 Fig. 1과 같이 지름 10mm인 원형 노즐로부터 수직 거리 h인 곳에 가로 290mm, 세로 290mm, 두께 4mm인 강철 평판을 장착하고 압축 공기를 분출하여 발생하는 소리를 마이크로폰

으로 측정하고 FFT로 주파수를 분석하여 가장 압력이 높은 주파수를 구한다.

Fig. 2는 분출압력과 대기압의 비인 압력비R이 각각 1.4, 1.6, 1.9인 경우의 거리 h에 따른 주파수를 나타낸 것이다. 그림에서 무차원 주파수는 다음 식으로 무차원화한 Strouhal수를 나타낸다.

$$S = \frac{fd}{U_0} \quad (3)$$

식에서 평균유속 U_0 는 이상적인 단열팽창 노즐의 경우에 대한 속도에 유량계수 0.95를 곱한 속도이다.

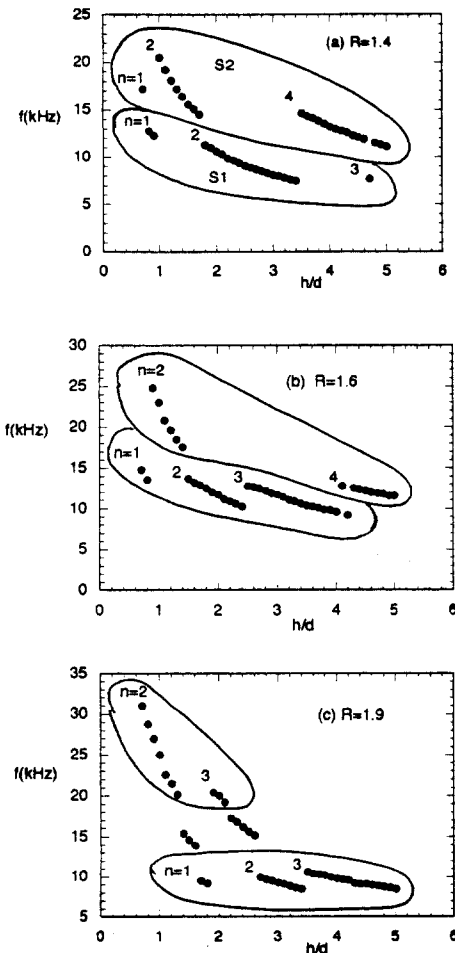


Fig. 2 Frequency data

그림에서 계단형의 주파수 특성을 볼 수 있으며 Strouhal수 0.6 이하의 주파수가 낮은 그룹과 그 이상의 높은 그룹으로 크게 나누어지는 것을 알 수 있다. 다만 유속이 매우 높은 경우인 $M_0=0.87$ 인 경우에는 중간 주파수대의 또 다른 그룹이 나타나는 것을 알 수 있다.

3.2 모드 형상

각 주파수 그룹의 모드 형상은 현재 연구 중에 있으며 여기서는 먼저 주파수가 낮은 그룹인 모드 S1과 높은 그룹인 모드 S2를 다루기로 하겠다. 각 그룹이 어떠한 모드를 나타내는지는 $R=1.77$ 에서 측정된 Umeda등에 의한 기존 연구들^(13,15)을 참고하면 확인이 가능하다. 즉, holetone의 경우에 주파수가 낮은 그룹만 나타나며 Schlieren촬영에 의하여 대칭 모드인 것이 확인되었다.⁽¹³⁾ 원형제트가 가는 수직원통에 충돌하는 경에는 두 그룹이 나타나며 두 그룹 모두 대칭 모드로 나타나 있다. 저속제트의 holetone⁽¹²⁾도 대칭 모드이므로 아음속의 경우 거의 모든 원형제트에 의한 충돌음이 대칭 모드인 것처럼 보인다. 그러나 초음속 제트의 경우 비대칭인 나선형(helical) 및 정현파형(sinuous) 모드가 나타나는 것을 볼 때 아음속의 고속제트에서 나타나는 중간주파수대의 그룹은 비대칭인 것으로 추측된다.

3.3 대류속도

Fig. 2의 주파수특성으로부터 단수 n 을 결정할 수 있으며 식(2)에 의하면 대류속도비 U_c/U_0 를 구할 수 있다. 결과를 Strouhal수의 함수로 도시하면 Fig. 3과 같다. 그림에서 대류속도는 주파수에 따라서 감소하는 함수로 나타나는 것과 모드 S1과 S2의 대류속도가 뚜렷이 구별되는 것을 쉽게 알 수 있다. 또한, 대류속도는 유속에 따라서도 영향을 받는 것을 알 수 있다.

같은 대칭 모드이면서 S1 모드와 S2 모드가 특성을 달리하는 것은 불안정 형태가 다르기 때문으로 추측된다. Umeda등^(13,15)의 연구에서 보텍스(vortex)에 관한 Schlieren사진에서 Fig. 4와 같이 지름이 큰 것과 지름이 작으면서 속도가 다소 빠른 것이 함께 나타나는 것이 확인되었다. 따라서, 저주파 모드는 지름이 큰 제트의 외측을 따라 대류되는 보텍스에 의한 것이며 고주파 모드는 지름이 작은 내측 보텍스에 의한 것임을 알 수 있다.

따라서 외측 보텍스에 의한 S1모드가 내측 보텍스에 의한 S2모드 보다 대류속도가 낮을 수 밖에 없다. 이러한 모드의 특성을 뒷받침하는 또 하나의 현상은 제트의 지름보다 훨씬 큰 지름의 구멍에 의한 hole-tone에서는 높은 주파수의 그룹인 S2모드가 전혀 나타나지 않았다는 사실이다⁽¹³⁾. 이러한 특성은 지름이 작은 내측 보텍스가 구멍과 아무런 충돌을 일으키지 않고 통과하기 때문이라 할 수 있다.

Fig. 5는 불안정 모드의 파장 Λ 와 속도의 관계를 나타낸 것이다. 파장은 대류속도와 주파수로부터 다음식으로 구할 수 있다.

$$\Lambda = \frac{U_c}{f} \quad (4)$$

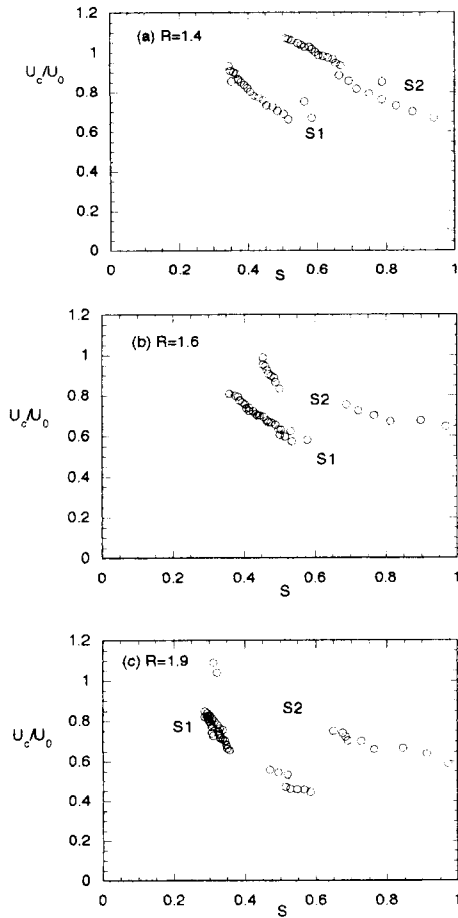


Fig. 3 Convection velocity of the unstable modes

Fig. 5에서 파장이 길수록 대류속도가 증가하는 것을 알 수 있으며 모드 S1, S2의 파장은 비슷하지만 대류속도는 내부 보텍스에 의한 고주파 모드인 S2가 훨씬 빠른 것을 알 수 있다.

Fig. 6는 Chanaud와 Powell(12)이 연구한 저속 hole-tone의 주파수 특성으로부터 구한 대류속도를 도시한 것이다. 이 경우에는 S1모드만 나타나는 것으로 보이며 $S=0.8$ 에 가까운 보다 높은 주파수까지 이 모드가 발생하는 것을 알 수 있다.

Ho와 Nosseir⁽¹⁷⁾가 다룬 모드는 S1모드인 저주파수 그룹인 것을 알 수 있다. 그는 U_c/U_0 에 관한 실험으로부터 그 평균치인 0.62를 사용하여 식(1)의 피드백 모델에서 각 단계 대응하는 값 n 이 정수로

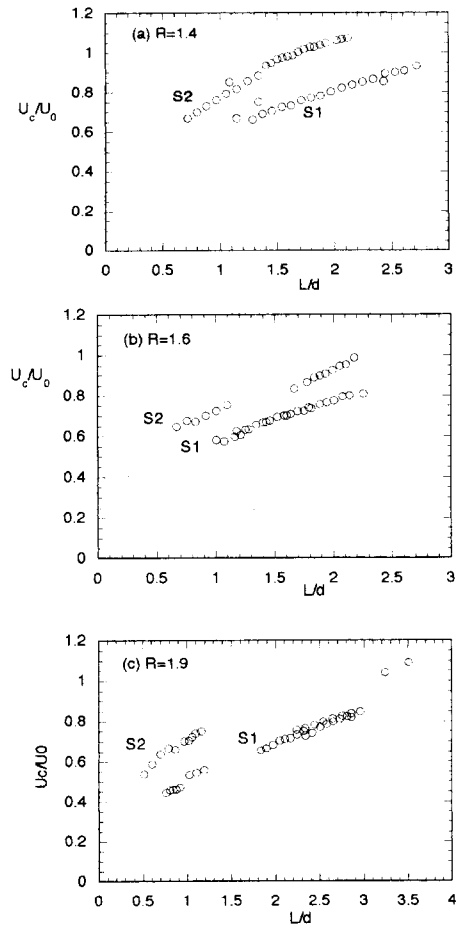


Fig. 4 Configuration of the vortices of the outer mode S1 and the inner mode S2

되는가를 확인하려고 하였다. 주파수에 따라서 다르게 되는 U_c 를 상수로 고정하였으므로 정수값이 나올 수 없다. 따라서 그는 음파의 위상속도를 보정하여서 정수값을 맞추었으나 음속이 변할 수는 없기 때문에 불합리한 것이라고 할 수 있다. 대류속도를 주파수의 함수로 식(1)에 대입하면 일정한 음속 c 에 대하여 n 은 반드시 정수가 된다.

따라서, 대칭 모드의 충돌음의 경우 Fig. 2의 모드별 대류속도를 사용하면 식(1)에 의하여 주파수의 예측이 가능하게 된다.

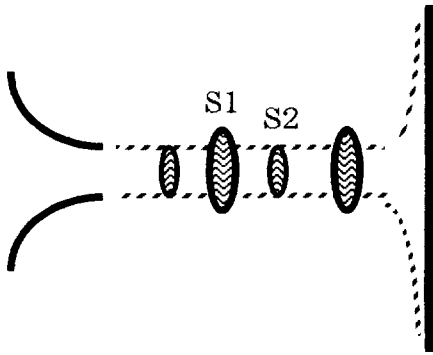


Fig. 5 Wavelength of the unstable modes

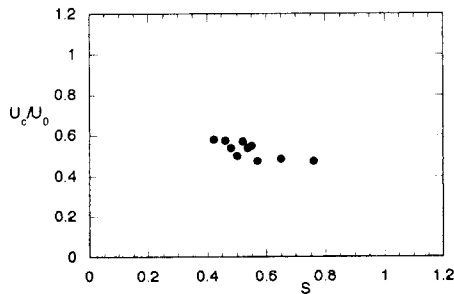


Fig. 6 Convection speed for the unstable symmetric jet of the low-speed holetone⁽¹²⁾.

4. 결론

원형 제트의 충돌음의 주파수 특성으로부터 불안정 모드의 대류속도를 구하는 방법을 개발하였다. 대류속도는 주파수에 따른 감소함수로 나타난

다. 대칭모드는 외측 보텍스에 의한 저주파 모드 S1과 내측 보텍스에 의한 고주파 모드 S2로 나누어지며 두 모드는 같은 대류속도에 대하여 2배에 가까운 주파수 차이를 나타낸다.

참고문헌

1. Rockwell, D., 1983, "Oscillations of impinging shear layers," AIAA Jr., 21(5), pp. 645-661.
2. Rockwell, D. and Naudascher E., 1979, "Self-sustained oscillations of impinging free shear layers", Ann. Rev. Fluid Mech. 11, pp. 67-94
3. Powell, A., 1953, "On edge tones and associated phenomena," Acustica 3, pp. 233-244.
4. Michalke, A. and Hermann, G., 1982, "On the inviscid instability of a circular jet with external flow," J. Fluid Mech. 114, pp. 343-359.
5. Tam, C. K. W. and Hu, F. Q., 1989, "On the three families of instability waves of high-speed jets," J. Fluid Mech. 201, pp. 447-483.
6. Tam, C. K. W. and Thies, A. T., 1993, "Instability of rectangular jets," J. Fluid Mech. 248, pp. 425-448.
7. Kyle, D. M. and Sreenivasan, K. R., 1993, "The instability and breakdown of a round variable-density jet," J. Fluid Mech. 249, pp. 619-664.
8. Holger, D. J., Wilson T. A. and Beavers G. S., 1977, "Fluid mechanics of the Edgetone," J. Acoust. Soc. Am. 62(5), pp. 1116-1128.
9. Crighton, D. G., 1992, "The jet-edge feedback cycle; linear theory for the operating stages," J. Fluid Mech. 234, pp. 361-391.
10. 권영필, 1995, "췌기소리의 되먹임 사이클의 위상조건," 대한기계학회논문집(B) 제 20권 제3호, pp. 1106-1173.
11. Kwon, Y. P., 1996, "Phase-locking condition in the feedback loop of low-speed edgetones," J. Acoust. Soc. Am. 100(5), pp. 3028-3032.
12. Chanaud, P. C. and Powell, A., 1965, "Some experiments concerning the hole and ring tone," J. Acoust. Soc. Am. 37, pp. 901-911.
13. 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.
14. Powell, A., 1988, "The sound-producing oscillations of round underexpanded jets impinging on normal plates", J. Acoust. Soc. Am. 83(2), pp. 515-533
15. 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.
16. 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
17. 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
18. 권영필, 1997, "고속 충돌제트의 불안정 특성 (1)-평면 제트-, " 대한기계학회 춘계학술대회 발표 예정