

평면제트의 불안정 특성 및 Edge-tone

°민명기*, 한희갑*, 권영필**, 장 옥***, 이근희****

Instability Characteristics of Plane Jet and Edge-tone

°M. G. Min*, H. G. Han*, Y. P. Kwon**, W. Jang***, K. H. Lee****

I. 서 론

평면충돌제트의 연구는 대부분 제트가 썰기에 부딪치는 경우인 edge-tone을 대상으로 하였음에도 불구하고 가시화가 가능한 저속 또는 초음속영역에서 주로 연구⁽¹⁻⁴⁾되었다. 최근 kwon⁽⁵⁾에 의하여 평면제트가 벽에 충돌하는 plate-tone의 경우가 보고되었으나 저속에서 순음(tone)이 발생되지 않았기 때문에 고속제트영역에서만 연구되었다.

이와같이 평면제트의 충돌음은 edge-tone이나 plate-tone 모두 제한된 유속범위에서만 연구되었기 때문에 전유속범위에서 체계적으로 그 불안정 특성이나 음향특성에 관하여 연구할 필요가 있게 되었다.

따라서 본 연구는 아음속의 저속 및 고속제트에 의한 edge-tone의 발생기구, 불안정 영역, 불안정 모드, 대류속도 등을 구하기 위한 것이다.

II. 선행연구

2.1 발생조건

충돌음(impinging tone)은 불안정 제트가 고체면에 충돌하여 발생한 음파가 다시 제트를 교란하는 되먹임 현상에 의하여 발생하는 특정주파수의 순음을 말하며 이러한 피드백모델의 연구가 유체역학이나 음향학 전공자의 가장 큰 관심의 대상이 되어왔다.

Powell^(1,2)이 처음으로 edge-tone을 제트와 소리 사이의 되먹임현상으로 이해하고 다음과 같은 되먹임모델을 제시 하였다.

$$\int \left(\frac{dh}{U_c} + \frac{dh}{c} \right) = \frac{n+p}{f} \quad (1)$$

식(1)은 되먹임 순환을 만족시키기 위한 위상조건(phase criterion)으로, h는 노즐과 썰기 선단 사이의 거리이며 U_c 는 제트를 따라서 전파되는 교란의 위상속도인 대류속도, c는 음파의 위상속도인 음속, f는 주파수, n은 정수로서 톱니형의 불연속적인 주파수 특성인 단(stage)을 나타내는 값이다. p는 소수로서 노즐출구나 제트와 썰기가 충돌할 때 있을 수 있는 위상지연을 나타내기 위한 인자이다.

위상조건과 아울러 진폭조건(gain criterion)도 만족해야 하는데 노즐 출구에 가해진 교란이 제트의 불안정 현상에 의하여 하류방향으로 진행하면서 강도가 증폭되고 이 증폭비와 충돌면에서 발생된 방사음이 노즐출구까지 전파되는 과정에서의 감쇠비가 같아야 충돌음이 지속될 수 있게 된다.

Powell은 Brown⁽³⁾의 실험 데이터를 근거로 하여 edge-tone에 대하여 $p=+1/4$ 를 주장하였으며 이를 증명하려는 많은 연구가 있었으나 최근 Kwon^(4,8)은 $-1/2 < p < 0$ 의 평균치 $p=-1/4$ 임을 밝히고 이를 실험 데이터로 입증하였다. 과거에 p를 1/4로 본 이유는 대류속도 U_c 가 제트의 하류방향으로 갈수록 감소하는 현상을 고려하지 않았기 때문임을 밝혔다. 그러나 검증에 사용된 실험 자료는 저속제트의 경우이며 고속제트에 관하여는 증거가 되지 않았다.

* 숭실대학교 기계공학과 대학원
** 숭실대학교 기계공학과
*** 하나로 통신
**** 경기대학교 금형설계과

2.2 제트의 불안정 특성

제트의 불안정 주파수나 불안정 모드에 관하여도 많은 연구가 이루어 졌으며 Ho와 Hwang⁽⁶⁾은 가시화를 통하여 노즐 입구에서 발생한 보텍스가 하류로 가면서 합쳐(merge)지면서 증폭되고 파장은 2배로 늘어지고 주파수는 1/2로 감소하며 이것이 또 다시 합쳐지면 1/4, 1/8로 주파수가 감소하게 되는 것을 보여 주었으며, Cohen과 Wygnanski⁽⁷⁾는 가진제트 실험을 통하여 초기 보텍스 생성의 가장 불안정한 주파수는 모멘텀 두께 θ 를 기준으로 $Re=0.017\theta$ 임을 밝혔다.

충돌제트의 경우는 충돌에 의하여 발생하는 음파가 교란원이 되는 불안정 현상이라 할 수 있으며, plate-tone의 경우도 충돌거리가 가까운 경우에 대칭, 먼 경우에는 비대칭임이 밝혀졌다. 그러나 edge-tone의 경우 체계적인 불안정 특성에 관한 연구가 없다.

2.3 대류속도

불안정 제트는 대개 보텍스의 흐름으로 설명되며 보텍스의 유속인 대류속도는 주요 연구 대상이 되어왔다. 충돌제트의 대류속도에 관한 정보는 식(1)의 위상조건 즉, 주파수의 결정에 필요한 물리량이지만 이에 관한 모델이 아직 정립되어 있지 못하다.

최근 Kwon⁽⁶⁾은 식(1)에서 교란의 대류속도 U_c 를 h 와는 독립된 양으로 보고 제트의 속도 U_j 에 대한 대류속도의 비 U_c/U_j 를 다음식으로 나타내었다.

$$\frac{U_c}{U_j} = \frac{1}{\left(\frac{n-p}{St \cdot h/d} - \frac{U_j}{c} \right)} \quad (2)$$

식에서 $St = fd/U_j$ 로서 무차원 주파수인 스트로할수를 뜻한다. 위의 식에서 edge-tone의 경우 $p=-1/4$, plate-tone의 경우 $p=0$ 을 대입하고 실험데이터로부터 저속제트의 경우 $U_c/U_j \approx 0.6$ 이며 고속제트의 경우는 St 수의 함수로서 대칭모드와 비대칭모드, 단수에 따라서 차이를 보여주었으나 단수의 영향, edge-tone의 전속도범위에 관한 모델이 개발되지 못하였다.

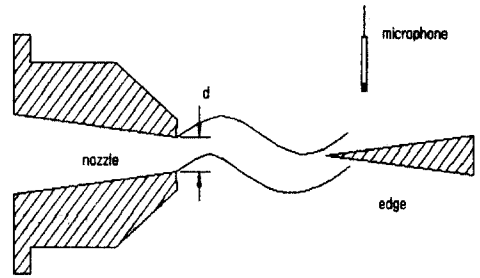


Fig. 1 configuration of nozzle and edge

III. 실험

실험장치는 압축기, 서지탱크(surge tank), 소음기, 평면노즐, 썰기, 그리고 노즐과의 거리를 조절하기 위한 3차원 이송장치로 구성하였다.

본 연구에서 사용한 평면노즐은 Fig. 1과 같은 형상으로 폭 $d=1\text{mm}$, 너비 $b=60\text{mm}$, 길이 140mm , 축소각은 10° 이고 내부는 정밀하게 가공하였다. 실험에 사용한 썰기는 두께 12.5mm , 길이가 100mm , 썰기각은 8.5° 이다. 썰기는 노즐과 동일 축 상에 위치하도록 3차원 이송장치 위에 설치하여 노즐과의 충돌거리를 조절할 수 있도록 하였다. 노즐과 썰기와의 거리는 2mm 씩 변화시켰다.

실험은 일정한 충돌 거리에 대하여 압력을 강하시키면서 측정하였고 노즐과 썰기와의 충돌거리 h 는 충돌음이 발생하기 시작한 거리부터 2mm 간격으로 변화시켜 측정하였다. 공기를 분출시켰을 때 발생하는 음을 썰기의 선단에서 90° , 썰기의 중심에서 500mm 의 거리에서 콘덴서 마이크로폰(B&K, type 4135)으로 측정하여 주파수 분석기(FFT)로 분석하였다. 본 실험은 압력비 2.3이하인 $U_j < 312\text{m/s}$ 의 아음속 범위에서 행하였다. 여기서 U_j 는 상류압력과 대기압으로부터 계산한 이상적인 노즐에 대한 이론 분출 속도이다.

IV. 실험결과 및 고찰

3.1 충돌음의 주파수 특성

발생한 음을 광대역 성분의 음압레벨보다 20dB 이상인 가장 음압레벨이 높은 순음을 주음(1st tone)으로 하고 두 번째로 음압레벨이 높은 음을

차음(2nd tone)으로 하여 노즐의 폭과 제트의 평균 속도로 무차원화한 스트로할수 $St=fd/U_j$ 로 주파수 특성을 구하였다.

Fig. 2(a)는 $U_j=15\text{m/s}$ 인 경우로서 충돌음의 주파수는 충돌거리비가 증가할수록 감소하는 특징을 보이고 있으며 기존의 선행 연구결과와 동일하게 저속쇄기소리의 전형적인 특징인 '툽날형'의 모양을 나타낸다. 여기에서 충돌음의 단수 n 은 같은 주파수에 대한 충돌 거리의 비로부터 구할 수 있다. 즉 거리비가 1:2, 1:3 일 때 단수 n 은 1, 2, 3이 된다. Fig. 2(b)는 $U_j=312\text{m/s}$ 인 경우 스트로할수와 레이놀즈수(Re)와의 관계를 단수별로 도시한 것이다. 그림에서 edge-tone이 발생하는 충돌거리는 $h/d>5$ 임을 알 수 있다. 실험결과 평면제트의 potential core의 길이가 약 $5d$ 이므로 edge-tone이 발생하는 충돌거리는 완전 발달된 유동영역에 썩기가 위치할 경우임을 알 수 있다.

Fig. 3(a)는 충돌거리 $h=10\text{mm}$ (b)는 $h=20\text{mm}$ 일 때의 경우로 속도가 증가함에 따라 스트로할수는 감소하고 있다. 레이놀즈수가 약 1000이하에서 스트로할수가 최대로 된 후 레이놀즈수가 증가하면 스트로할수는 감소하는 경향을 보인다. 그러나 $Re=10^4$ 근처에서 스트로할수는 증가한 후 감소하는 경향을 보인다. 이것은 노즐 출구에서의 경계층이 층류에서 난류로 바뀌는 것에 의한 것으로 보인다. 특히, 본 연구에서 Re 수가 400이하인 경우의 실험은 하지 않았다. Powell과 Unfried의 실험 자료에 의하면 스트로할수가 레이놀즈수에 따라서 증가하는 경향을 보였다. 본 실험의 경우도 Fig. 3(a)에서 보듯이 저속에서는 스트로할수가 레이놀즈수에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있다.

3.2 불안정 모드

평면제트의 모드형태는 대칭(symmetric)모드와 비대칭(asymmetric)모드로 구분되는데 이러한 모드형태에 따라 충돌음의 음압 및 주파수특성이 다르게 나타난다. 제트의 불안정 모드 형태를 구하기 위해 충돌음의 제트축상에 대한 위상차를 측정함으로써 모드 형태를 구하였다.

Fig. 4는 두 개의 마이크로폰으로 충돌음의 위상차를 측정된 결과인데 점선은 충돌음의 진폭을 나

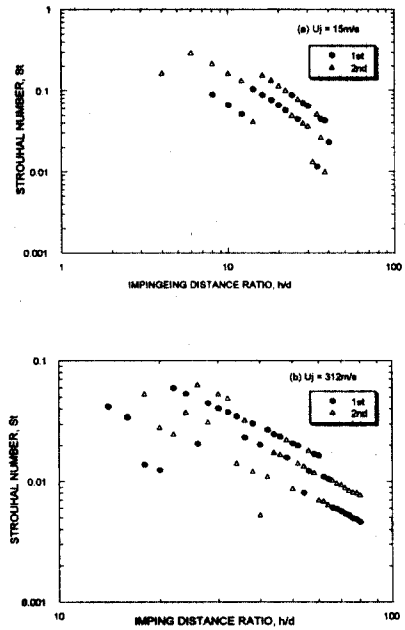


Fig. 2 Strouhal number as a function of the impinging distance at $U_j=15\text{m/s}$, 312m/s

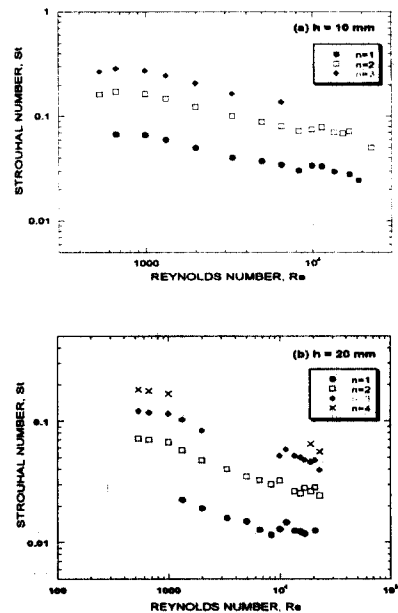


Fig. 3 Strouhal number as a function of the Reynolds number at $h=10\text{mm}$, $h=20\text{mm}$

타내고 실선은 충돌음의 위상차를 나타낸다. 충돌음의 위상차가 거의 180° 이므로 이 경우는 비대칭(asymmetric)모드이다. 평면제트의 불안정모드에 대한 선행연구결과를 살펴보면 평면제트가 평판에 충돌할 경우 대칭모드와 비대칭모드가 나타나고, 대칭모드와 비대칭모드의 주파수특성과 대류속도의 특성이 구분된다.⁽⁶⁾ 하지만 아음속의 edge-tone은 비대칭모드만이 나타나고 대칭모드는 나타나지 않았다. 따라서 제트의 불안정 모드형태는 충돌면의 형상에 따라 다르게 나타난다. 특히, 충돌순음뿐 아니라 전 주파수성분이 모두 위상차가 180° 이므로 의미있는 음파는 모두 비대칭모드의 제트 거동의 결과로 방사된 것으로 이해할 수 있다.

3.3 대류속도와 위상조건

대류속도가 일정하다면 즉, 하류로 전달되는 교란의 전파속도가 위치에 따라 다르지 않다면 식(1)을 이용하여 위상인자 p 와 함께 $U_{c,n}$ 를 구할 수 있다.^{(4),(5)} 그러나 대류속도는 제트에 따라 가속 또는 감속되기 때문에 일정한 값이 아니다. 충돌거리-주파수 데이터로부터 같은 주파수에 대한 $n=1, 2, 3, \dots$ 에 해당하는 충돌거리 h_1, h_2, h_3, \dots 를 구하면 불안정 특성의 2, 3, 4...번째의 파장 $\Lambda_2, \Lambda_3, \Lambda_4, \dots$ 를 다음식으로 구할 수 있다.

$$\Lambda_n = h_{n+1} - h_n \quad (3)$$

각 위치에 대응하는 대류속도 $U_{c,n}$ 은 다음식으로 구할 수 있다.

$$U_{c,n} = f \Lambda_n \quad (4)$$

Fig. 5는 대표적인 속도에서 실험으로 구한 주파수별 충돌거리를 도시하였다.

Fig. 6은 식(3)에서 구한 파장에다 그림에서 Λ_1 은 $p=-1/4$ 일 때 $\Lambda_1 \approx 4h_1/3$ 의 관계로부터 구한 것이다. 그림에서 보듯이 모든 경우에 Λ_1 이 특별하게 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. $p=-1/4$ 이 정확하다면 노즐출구에서 교란이 매우 빠른 속도로 대류되는 것을 의미한다. 실제 $\Lambda_1 \approx \Lambda_2$ 로서 대류속도가 일정하다면 $p \approx 0$ 이 되어야 함을 의미한다.

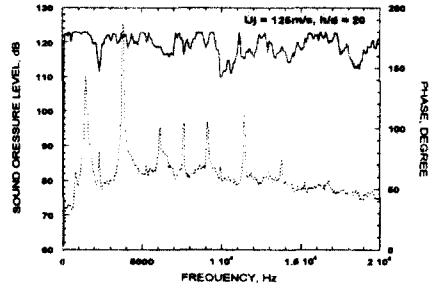


Fig. 4 Phase difference of edge-tones

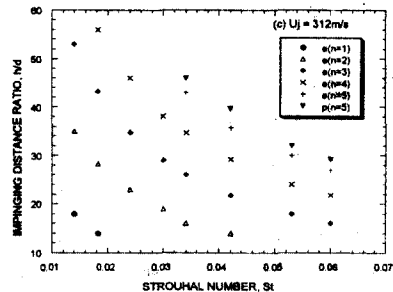
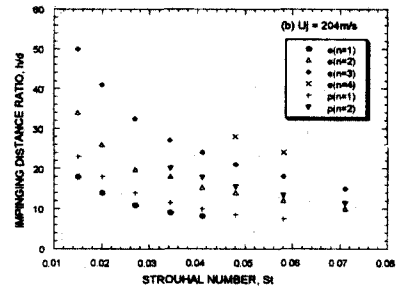
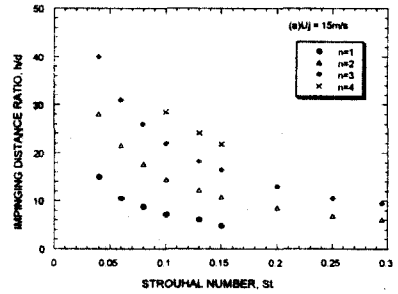


Fig. 5 Impinging distance ratio as function of strouhal number with stage variation from edge and plate at $U_j=15\text{m/s}$, 204m/s , 312m/s

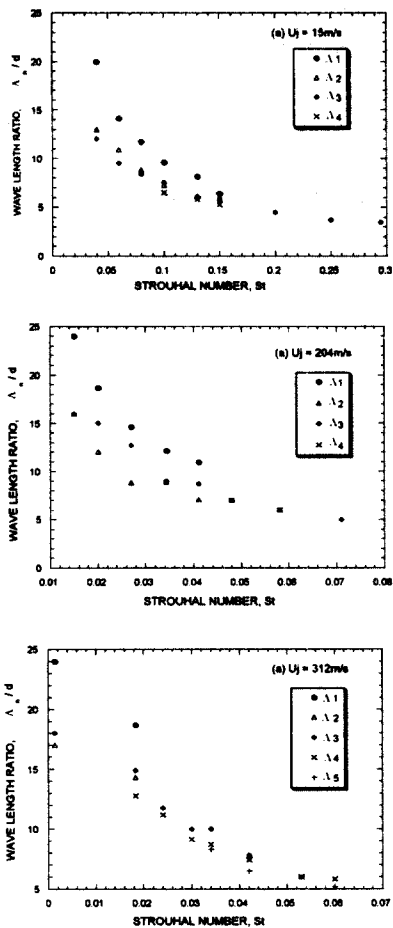


Fig. 6 Wave length ratio as function of strouhal number at $U_j=15\text{m/s}$, 204m/s , 312m/s

즉 본 실험에 이용된 노즐과 썰기의 경우 노즐 출구에서 대류속도가 매우 빠르거나 $p=0$ 에 가까운 것을 의미한다.

$\lambda_2, \lambda_3, \dots$ 는 $U_j=204\text{m/s}$ 일 경우 작아졌다가 증가하는 변화를 보이나 전반적으로 단수증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 즉, 하류로 가면서 조금씩 파장이 짧아지는(감속되는) 경향을 보인다. 그러나 그 정도가 평균제트속도 감속에 비하면 그다지 크지 않다고 할 수 있다. 즉, 평균 제트속도의 감속에 비하여 교관(보텍스)의 대류속도는 거의 일정한 속도를 유지한다고 할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 데이터로부터 St 수와 U_c/U_j 의 관계를 도시한 것이다. St 수가 큰 고속제트범위에서 대류속도비는 총돌제트의 경우⁽⁴⁾와 거의 일치하

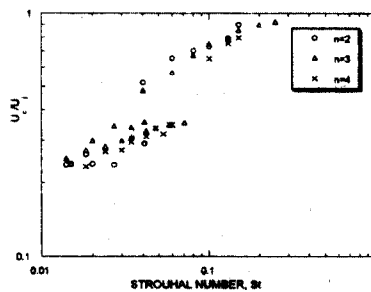


Fig. 7 convection velocity ratio as a function strouhal number at $U_j=15\text{m/s}$, 204m/s , 312m/s

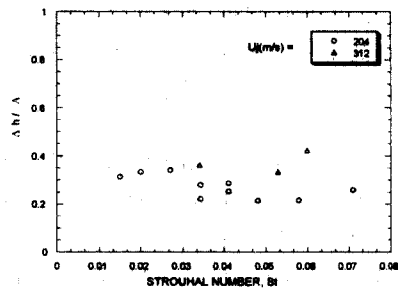


Fig. 8 Phase delay of edge-tone at $U_j=204\text{m/s}$, 312m/s

는 것을 알 수 있다. 그러나, 저속제트의 경우 Powell⁽²⁾의 실험결과는 거의 일정한 대류속도를 나타내었으나 본 실험에서는 스트로할수의 함수로서 고속제트와 유사한 특성을 보인다. 이러한 특성의 차이는 노즐의 형상과 관련이 있을 것이다.

3.4 edge-tone의 음원의 위치

Fig. 5의 (b),(c)에 plate-tone과 edge-tone을 동시에 도시하였다. 같은 주파수에서 총돌거리가 다른 것은 유효음원의 위치가 다르기 때문으로 볼 수 있으며 plate의 경우 edge의 경우보다 거리가 더 먼 것은 edge-tone의 경우 음원의 위치가 선단의 하류에 있음을 뒷받침하는 것이다. 그 값을 구하고 그 위치에서 파장을 취하여 나타내면 Fig. 8과 같다. 그림에서 $\Delta h/\lambda$ 는 1/2이하의 값으로서 평균 1/4에 가까운 것을 알 수 있다. 이로부터 edge-tone의 음원의 위치는 저속제트와 마찬가지로 고속제트의 경우도 1/4파장정도 선단에서 하류에 위치하는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

평면제트에 의한 edge-tone의 특성을 실험하고 plate-tone과 비교 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) edge-tone은 아음속 전 유속에서 발생하며 유속변화에 따라 연속적인 주파수 특성을 보이고 레이놀즈수 약 10000을 경계로 특성이 바뀌며, 이는 층류교란에서 난류교란으로의 천이 현상과 관계된 것으로 본다.
- 2) 아음속 평면제트의 스트로할수는 레이놀즈수와 충돌거리가 증가함에 따라 감소하나, 레이놀즈수 1000이하와 10000 근처에서 극 대치를 갖는다.
- 3) edge-tone을 일으키는 불안정모드는 모두 비대칭형이다.
- 4) edge-tone의 유효음원의 위치는 썩기의 선단에서 1/4파장 가까운 하류에 위치하며 이러한 특성은 전속도 범위에서 동일하다.
- 5) 대류속도는 노즐출구에서 감속된 후 평균제트의 유속 감소에 관계없이 거의 일정함을 보인다.
- 6) 노즐출구를 지난 영역에서 보텍스의 대류속도는 단수의 영향이 없이 스트로할수만의 함수로 나타난다.

참고문헌

- (1) Powell. A., 1953, "On edge tones and associated phenomena," *Acoustica* 3, pp.67-94.
- (2) A. Powell. and H. Unfried., 1964, "An experimental study of low speed edge-tones" University of California, Los Angeles, Report No. 64-49
- (3) G. B. Brown., 1935, "The vortex motion causing edge tones," *Proc. Phys. Soc. London* 47, 493-507
- (4) Kwon, Y. P., 1996, "Phase-locking condition in the feedback loop of low-speed edgetones", *J. Acoust. Soc. Am.* 100(5), pp. 3028-3032.
- (5) 권영필, 1998, "고속 충돌제트의 불안정특성(1)-평면제트-", *대한기계학회논문집(B) 제22권 제4호*, pp. 452-458.
- (6) C. M. Ho and L. S. Huang, 1982 "Subharmonics and vortexmerging in mixing

layers", *J. Fluid mech.*, vol. 119, pp. 443-473

(7) J. Cohen and I. Wygnanski, 1987, "The evolution of instabilities in the axisymmetric jet Part 1 The linear growth of disturbances near the nozzle", *J. Fluid Mech.*, Vol. 176, pp. 191-219

(8) Kwon, Y. P., 1998, "Feedback mechanism of low-speed edgetones", *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 104, No. 4, pp. 2084-2089