

〈논 문〉

췘기소리의 되먹임 사이클의 위상조건

권 영 필

(1995년 9월 5일 접수)

Phase Criterion of the Feedback Cycle of Edgetones

Young-Pil Kwon

Key Words : Edgetone(췘기소리), Feedback dycle(되먹임 사이클), Phase Criterion(위상 조건), Cavitytone(공동음), Wedge(췘기)

Abstract

The phase criterion of the feedback cycle of low-speed edgetones has been obtained using the jet-edge interaction model which is based on the substitution of an array of dipoles for the reaction of the wedge to the impinging jet. The edgetone is produced by the feedback loop between the downstream-convected sinuous disturbance and upstream-propagating waves generated by the impingement of the disturbance on the wedge. By estimation of the phase difference between the downstream and the upstream disturbances, the relationship between the edge distance and the wavelength is obtained according to the phase-locking condition at the nozzle lip. With a little variation depending on the characteristics of jet-edge interaction, the criterion can be approximated as follows: $h/\Lambda + h/\lambda = n - 1/4$, where h is the stand-off distance between the nozzle lip and the edge tip, Λ is the wavelength of downstream-convected wave, λ is the wavelength of the upstream-propagating acoustic wave and n is the stage number for the ladder-like characteristics of frequency. The present criterion has been confirmed by estimating wavelengths from available experimental data and investigating their appropriateness. The above criterion has been found to be effective up to 90° of wedge angle corresponding to the cavitytones.

1. 서 론

유동음은 광대역음과 순음(pure tone)으로 분류할 수 있으며 난류음은 광대역 주파수특성을 갖지만 조직적인 와동(vortex)에 의하여 발생하는 췘기소리(edgetone)나 공동음(cavitytone)은 특정주파수의 강한 순음성 소리이다. 췘기소리와 같은 순

음성 유동음은 불안정한 전단층(shear layer)에서 교란에 의하여 발생한 와동이 하류의 고체면에 충돌하여 음장(acoustic field) 또는 반사유동을 일으키고 이것이 다시 되먹임(feedback) 작용을 하여 새로운 교란의 원인이 되어 하나의 순환을 이루므로 불연속적인 주파수특성을 갖게 된다. 이러한 되먹임 작용에 의한 조직적 와동에 기인한 순음성 유동음은 다양한 유동장에서 발생할 수 있으며 강한 소음 문제를 야기시킬뿐만 아니라 맥동유동을 일으키기 때문에 유체역학이나 음향학분야에서 많은

*회원, 숭실대학교 기계공학과

관심을 끌어난 현상이다.⁽¹⁾

꽤기소리는 노즐에서 분출된 유체가 꽤기에 충돌할 때 발생하는 순음성 유동음을 말하며 대표적인 경우는 2차원 평면분류에 의한 것으로서 Fig. 1에 도시한 바와 같다. 노즐에서 나온 분류의 불안정한 전단층이 교란될 때 와동이 발생되어 조직적인 와열을 이루게 되고 분류의 축은 파동(wave)운동을 일으키며 하류로 전파하게 된다. 이러한 분류가 꽤기와 충돌하여 생성된 방사음(radiated sound) — 꽤기거리가 가까울 때는 비압축성의 반사유동 — 이 다시 노즐출구에 교란을 가하여 새로운 와동을 일으키는 되먹임 작용을 하게 된다. 꽤기소리는 유동음의 중요한 기초연구과제로서 많은 연구자들⁽²⁻⁶⁾의 실험 및 이론적인 연구대상이 되어왔다.

꽤기소리를 처음으로 노즐과 꽤기 사이의 되먹임 현상으로 해석한 것은 Powell⁽³⁾로서 그는 되먹임 조건으로서 위상과 진폭에 관한 가설을 세우고 위상조건에 관해서는 다음 모델을 제안하였다.

$$h/\Lambda + h/\lambda = n + p \quad (1)$$

식에서 h 는 노즐출구와 꽤기 선단 사이의 거리, Λ 는 분류를 따라 하류측으로 전파되는 교란의 평균파장, λ 는 꽤기에서 방사되어 상류로 전파되는 음파의 파장, p , n 는 정수, p 는 소수를 나타낸다. 식 (1)에서 좌변은 노즐과 꽤기 사이에서 되먹임 사이클의 교란이 전파하는 과정의 파장수 또는 위상차를 2π 로 나눈 값을 뜻하는 것으로서 이것을 우변에서 정수 p , n 으로만 표시하지 않고 소수 p 를 포함한 것은 노즐과 꽤기에서 있을 수 있는 위상지연을 표현하기 위함이었다. 정수 n 은 꽤기소리의 주파수가 불연속적인 계단 특성을 나타내는 단수(stage number)를 뜻하는 정수이다. 위의 식에서 상류측과 하류측의 파장비 Λ/λ 는 하류측으로의 교란 전파속도의 마하수와 같으므로 분류의 속

도가 음속에 비하여 매우 낮은 경우에는 h/λ 는 무시할 수 있다. Powell은 Brown의 실험 데이터에 기초하여 $p=1/4$ 를 위상조건으로 제시하였다. $p=1/4$ 은 오늘날까지도 유효한 모델로 받아들여지고 있으나 이론적으로 입증되지 못하였다. 그 까닭은 꽤기소리 해석의 관건은 맥동 분류와 꽤기의 충돌 작용의 해석에 있으나 충돌에 관련된 유동현상이 매우 복잡하여 측정이나 이론해석이 어렵기 때문이라고 할 수 있다. Kaykayoglu와 Rockwell⁽⁴⁾은 꽤기 주변의 유동 가시화와 꽤기면의 압력측정을 통하여 압력이 최대가 되는 유효음원의 위치가 꽤기의 선단에서 다소 하류측에 있으며 그 위치가 유동 조건에 따라 다른 것을 발견하고 음원이 꽤기의 선단에 있는 것을 전제한 Powell의 모델의 문제점을 지적하였다. Powell은 꽤기의 선단에 유효음원이 있는 것으로 가정하고 식 (1)에서 소수 p 는 꽤기로 입사하는 유동의 교란과 반사하는 음파 사이의 위상지연을 고려하기 위한 것으로 가정하였던 것이다. Holger, et. al.⁽⁵⁾은 분류를 충분히 발달된 선와동(line vortex)의 배열로 구성된 이상적인 비압축성 유동으로 보고 상류로 전파하여 온 교란 속도와 하류로 전파하는 교란 속도의 위상이 일치하는 조건에 의하여 $p=-1/4$ 및 n 에 따라 다르게 나타나는 p 값들을 구하였다. 여기서 그들은 Brown의 실험결과와 비슷한 값만 취하고 $p=-1/4$ 은 무시하였다. 그런데 $p=-1/4$ 는 본 연구 결과와 일치하는 값이다. 최근 Crighton⁽⁶⁾은 Wiener-Hopf법을 이용한 점근해로부터 $p=-3/8$ 을 유도하였다. 그의 위상조건은 Powell의 $p=1/4$ 와는 정량적으로 큰 차이가 있으나 이를 단지 꽤기나 노즐의 형상에 따라서 나타나는 차이로 간주하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 꽤기소리에 관한 위상조건 모델은 Brown의 실험 데이터에 의하여 평가되어 왔으며 이론적으로 정립되지 못하였음을 알 수 있다. 그런데 Brown이 가시화에 의하여 직접 교란의 파장을 측정했던 것은 분류의 속도가 매우 낮은 경우의 꽤기의 선단에 가까운 곳이라는 점을 유의하여야 한다. 분류의 속도가 낮은 경우에는 꽤기거리가 멀 때 꽤기소리가 나타나게 되며 거리가 멀어지면 분류의 속도가 하류로 갈수록 낮아지므로 그만큼 교란의 전파속도 또는 대류(convection)속도도 낮아지게 된다. 즉 교란의 파장은 대류속도의 저하와 함께 감소하므로 평균 파장은 하류에서 측정할 파장보다 더 크게 되므로 식 (1)에 적용할 수

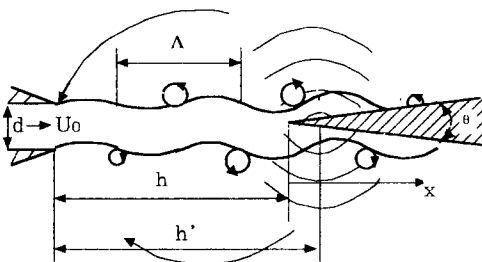


Fig. 1 Schematic diagram of the edgetone

가 없다. 따라서 그의 실험 데이터를 바탕으로 한 Powell의 모델 $p=1/4$ 도 재검토되어야 한다.

본 연구는 췌기소리가 되먹임 순환을 이루기 위한 위상조건을 Kwon과 Powell이 개발한 분류와 췌기의 작용에 관한 쌍극자열(dipole array) 모델⁽⁷⁾을 사용하여 구하였다. 췌기에 의하여 상류로 전달되는 교란의 속도를 계산하고 분류를 따라 하류로 내려가는 교란 속도와 위상이 일치하는 조건으로부터 위상조건 p 를 구하였다. Brown⁽²⁾과 Powell과 Unfried⁽⁸⁾의 실험결과를 통하여 본 모델의 타당성을 입증하고 췌기각의 영향 및 공동음에 관해서도 검토하였다.

2. 이 론

해석의 편이상 Fig. 1에 도시한 바와 같이 노즐을 평행한 평판으로 가정하고 췌기는 얇은 평판으로서 분류의 중심면에 위치한 것으로 한다. 노즐출구에서 분류가 교란되어 증폭되면서 하류 쪽으로 전파하는 분류의 파동을 파장이 일정한 2차원의 정현파 흐름으로 가정하면 Kwon과 Powell⁽⁷⁾이 개발한 쌍극자열 모델에 의하여 분류와 췌기의 상호작용을 구할 수 있다.

먼저, 선단에서 거리 x 인 위치에서 분류축의 횡방향 속도 성분의 복소진폭 V_0 을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_0(x) = V_0 \exp[-(\alpha - 2\pi i)x/\Lambda] \quad (2)$$

식에서 V_0 는 진폭, Λ 는 파장, i 는 허수 $(-1)^{1/2}$ 을 뜻하며 시간에 의한 위상인자(phasor) $e^{i\omega t}$ 는 생략하였다. 위의 식에서 α 는 감쇠계수로서 점성의 영향을 고려하기 위한 것이다. 즉, 췌기에 의한 경계층의 작용에 의하여 와동의 크기는 감쇠하게 되는데 이것을 진폭의 지수적인 감쇠로 단순화한 것이다.

다음에는 췌기를 길이가 Λ 인 얇고 단단한 판으로 보고 N 등분으로 분할한다. i 번째 요소에 의하여 단위폭당 유체에 작용하는 힘의 진폭을 F_i 라 하면 쌍극자열에 의하여 유도되는 횡방향 유동의 복소진폭은 다음과 같다.

$$v_i(x) = \frac{F_i}{4\rho c|x-x_i|} H_1(k|x-x_i|) \quad (3)$$

식에서 ρ 와 c 는 유체의 밀도와 음속을 나타내며 k 는 파수(wave number)로서 주파수를 f 라 할 때

$k=2\pi f/c$ 를 뜻한다. 또한 H_1 은 1차의 Hankel 함수를 뜻한다.

췌기의 반력에 의하여 분류의 축상에 유도되는 유속 v_s 는 각 요소에 의한 유동을 합한 값이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_s(x) = \sum_{i=1}^N v_i(x) \quad (4)$$

입사하는 속도 v_0 와 췌기에 의하여 유도되는 속도 v_s 를 합한 속도장은 췌기 면에서 경계조건을 만족하여야 하므로 경계조건을 각 요소에 대하여 적용하면 요소의 반력 F_i 이 얻어진다. 반력 F_i 를 식(3)에 대입하고 식(4)를 사용하면 췌기의 상류측으로 분류의 축상에 유도되는 횡방향 속도를 구할 수 있다.

먼저 요소의 반력으로부터 면압력 P_s 를 구한 결과를 도시하면 Fig. 2와 같다. 면압력은 입사유동의 횡방향의 최대운동량인 $\rho U_c V_0$ 에 의하여 무차원화하였으며 식에서 U_c 는 교란의 전파속도인 대류 속도를 나타낸다. 그림에서 췌기의 선단에서는 압력이 0이고 선단에서 다소 하류 쪽에 압력이 최대인 점이 나타나는 것을 볼 수 있는데 이것은 Kaykayoglu와 Rockwell⁽⁴⁾의 실험 결과와 일치하는 것이다. 압력이 최대인 지점이 실질적인 음원의 위치에 가깝다고 할 수 있으며 음원의 위치가 선단에서 다소 하류에 위치하는 것은 많은 선행 연구자들에 의하여 관찰되어 온 현상이다. 본 결과에서 주목할 만한 것은 감쇠계수의 상당한 변화에도 불구하고 면압력이 가장 큰 음원의 위치는 1/4 파장에서 크게 벗어나지 않는다는 것이다. 또한, 그 크기도 단위 면적당 횡방향 운동량, 즉 분류의 최대 충돌력이라는 것을 알 수 있다. 이로부터 췌기소리는 교란된 분류가 췌기 면에 충돌할 때 췌기의 반

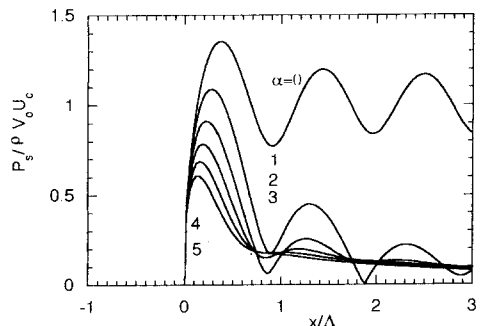


Fig. 2 Pressure distribution on the edge surface

력에 의하여 발생하며 유효음원의 위치는 선단에서 교란의 1/4파장 거리에 있다고 할 수 있다.

다음으로 썰기의 상류측에서 식 (2)로 나타낸 입사 유동의 위상과 식 (4)로 나타낸 썰기에 의한 반사 유동의 복소진폭으로부터 위상을 구하여 한 예를 나타내면 Fig. 3과 같다. 분류를 따라 하류로 내려가는 교란의 위상은 식 (2)에서 주어진 대로 거리에 따라 직선적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 상류 쪽으로 반사하는 유동은 썰기 주위를 제외하면 거리에 따른 위상의 변화가 거의 없다. 이것은 상류측으로의 교란인 음파의 전파속도는 음속이기 때문에 분류의 속도가 음속에 비하여 충분히 낮으면 상류로 전파하는 교란의 위상변화는 하류 쪽 변화에 비하여 무시할 수 있음을 나타낸다. 그러나 썰기 주위에서 약간의 위상변화가 나타나는 것은 쌍극자들의 간섭효과의 거리에 따른 변화 때문이며 거리가 다소 멀어지면 거의 일정한 위상을 나타낸다.

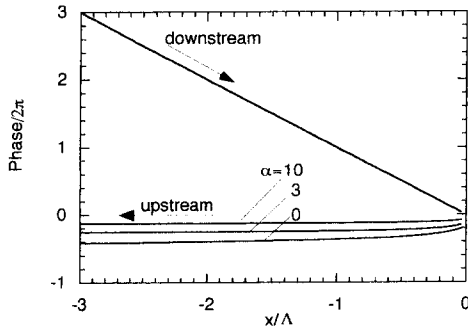


Fig. 3 Phase variations of the downstream and the upstream disturbances

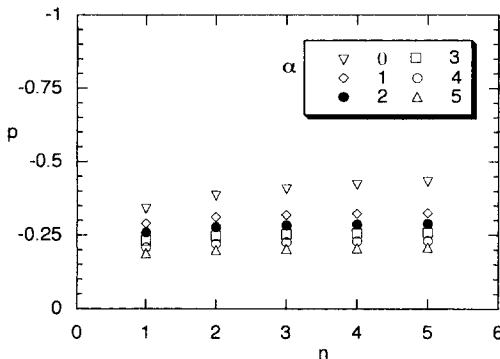


Fig. 4 Phase criterion estimated for various attenuation constants

하류측으로 전파하는 교란과 상류측으로 전파하는 교란이 되먹임 순환을 이루기 위해서는 위상이 일치하는 지점에 노즐의 출구가 위치하여야 한다. Fig. 3에서 위상차가 $2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots$ 되는 거리로부터 식 (1)에 의하여 정수 n 에 따른 p 를 구하여 도시하면 Fig. 4와 같다. 그림에서 음원의 위치와 마찬가지로 p 값은 감쇠계수에 따라 변화가 있음을 알 수 있으나 Brown이나 Kaykayoglu의 실험에서 와동이 썰기 하류로 파장의 두 배 거리 이상 유지되지 않는 것을 본다면 감쇠계수는 $\alpha=2$ 에 가까운 것으로 추정되므로 약 $p=-1/4$ 이라고 할 수 있다. 즉,

$$p = -1/4 \tag{5}$$

이 결과는 Brown의 실험 결과에 근거한 Powell의 모델 $p=1/4$ 에 비하면 위상이 정 반대로 되는 큰 차이를 나타내는 것이다. $p=-1/4$ 은 서론에서 언급한 바와 같이 Holger, et. al.⁽⁵⁾의 연구에 의해서도 구한 바가 있다. 그런데 그들은 $p=1/4$ 에 가까운 값들도 구하였으며 $p=-1/4$ 은 Brown⁽²⁾의 실험과 맞지 않는다는 이유로 무시하였다. 그들이 $p=-1/4$ 이외의 값들을 얻은 것은 상류로 전파하는 교란에 썰기의 작용에 의한 것뿐만 아니라 와동으로부터 직접 노즐 출구에 유도되는 속도를 포함하였기 때문이다. 와열을 이루는 와동들로부터 직접 노즐 출구에 미치는 교란은 상쇄되어 없어지며 오직 썰기의 작용에 의한 것만이 상쇄될 수 없는 교란을 가하게 되는 것이다. 따라서 와동에 의하여 직접 노즐에 유도되는 속도를 포함하면 오류를 초래하기 쉬우며 그들이 얻은 $p=-1/4$ 이외의 값들도 이러한 오류에 의한 것이라고 할 수 있다.

식 (5)를 식 (1)에 대입하면 위상조건은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$h/\Lambda + h/\lambda = n - 1/4 \tag{6}$$

그런데 썰기의 선단으로부터 면압력이 가장 높은 유효음원까지의 거리는 $\Lambda/4$ 이므로 노즐출구에서 유효음원까지의 거리 h' 는 근사적으로 다음과 같다.

$$h' = h + \Lambda/4 \tag{7}$$

따라서, 유효음원까지의 거리 h' 를 이용하여 식 (6)을 나타내면, 분류를 따라 하류로 전파하는 교란의 대류속도의 마하수가 매우 낮은 저속 썰기소리의 경우에는 Λ/λ 를 무시할 수 있으므로, 다음과

같다.

$$h'/A + h'/\lambda = n \quad (8)$$

이로부터 음원과 노즐 사이의 거리는 파장의 정수 배가 되어야 하는 것을 알 수 있다. Powell이 가정하였던 식 (1)의 위상지연 p 는 오직 음원의 위치가 췌기의 선단으로부터 하류측에 위치하기 때문일 뿐이며 다른 위상지연 요인은 없다고 할 수 있다.

3. 실험 결과와 비교

위에서 구한 췌기소리의 되먹임 순환을 위한 위상조건 $p = -1/4$ 를 입증하기 위하여 Brown,⁽²⁾ Powell과 Unfried⁽⁶⁾의 실험 결과들과 비교하고 고찰하였다. Brown은 처음으로 분류의 평균유속 U_0 및 췌기거리 h 가 주파수에 미치는 영향을 체계적으로 실험하여 실험식을 구하였을 뿐만 아니라 연기에 의한 가시화 실험으로 교란의 파장 λ 와 췌기거리 h 의 관계로부터 p 가 0과 0.5 사이의 값인 것을 보고하였다. 이러한 파장과 거리 사이의 관계는 그 후 평균값이라고 할 수 있는 $p = 1/4$ 로 정해졌으며 앞에서 언급한 바와 같이 오늘날까지 췌기소리의 중요한 특성으로 여겨져왔다. 그러나, Brown의 가시화 실험은 유속이 매우 낮은 경우에만 가능했기 때문에 일반적인 경우로 적용하는 데는 분체점이 있다. 유속이 낮으면 췌기소리가 발생하는 췌기의 거리는 멀어지게 되므로 분류의 속도가 노즐 출구에서보다 췌기 근처에서는 훨씬 낮아지게 되며 그곳에서 측정된 교란의 파장도 평균치보다 짧게 된다. 따라서 이렇게 구한 파장은 노즐과 췌기 사이에서 파장의 평균 길이를 사용한 모델에 적용할 수가 없다. 식 (6)에서 n 과 p 및 h 가 주어지면 교란의 파장을 추정할 수 있으며 이렇게 구한 파장이 합리적인가를 검토함으로써 p 의 적합성을 판단할 수 있다.

노즐 출구에서 발생한 교란의 대류속도나 파장은 분류의 분출속도 U_0 와 주파수 f 에 의하여 결정된다. 마침 Brown은 같은 주파수와 분출 속도에서 췌기소리가 발생하는 췌기 거리 h 를 구하였다. 식 (1)에 의하여 파장을 계산할 수 있으며 p 가 합리적인 값이라면 U_0 와 f 가 같은 경우에는 n 에 관계없이 λ 이 거의 같아야 할 것이다. 본 연구에서 구한 모델 $p = -1/4$ 과 기존 모델인 $p = 1/4$ 에 대하여

파장을 계산하여 Fig. 5에 도시하였다. 먼저 $p = 1/4$ 인 경우를 보면 단수의 증가에 따라서, 즉 췌기의 거리가 멀어질수록 파장이 오히려 길어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 $p = 1/4$ 이 물리적으로 불합리하다는 것을 뜻한다. 다음에 $p = -1/4$ 인 경우를 보면 유속이 매우 낮은 경우에는 단수의 증가 즉, 거리 h 의 증가에 따라서 평균 파장이 감소하나 유속이 5 m/s 이상 높아지면 4단까지 파장이 거의 일정한 것을 알 수 있다. 단수에 따라서 파장이 감소하는 것은 분류의 속도가 낮은 경우 점성의 영향으로 거리에 따라서 유속이 현저하게 감소하는 것으로 이해할 수 있다. 이로써 본 연구에서 구한 $p = -1/4$ 는 실험결과와 잘 부합하는 것으로 볼 수 있다. Brown이 파장을 측정할 경우는 모두 유속이 5 m/s 이하인 경우였으므로 하류측에서 측정할 파장은 평균치보다 더 짧은 값이므로 p 값은 커질 수 밖에 없음을 알 수 있다.

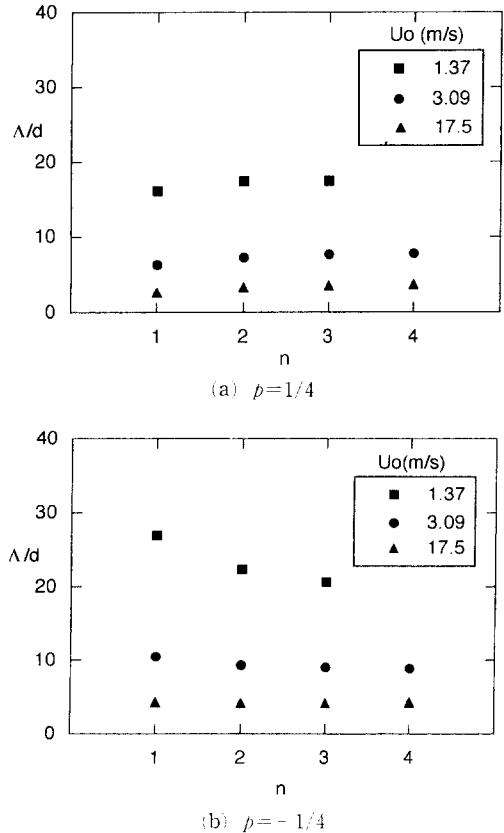


Fig. 5 Effect of p on the wave length estimated for Brown's data⁽²⁾

다음은 Powell과 Unfried⁽⁸⁾의 실험 결과에 본 모델과 기존 모델을 적용하여 동일 분류속도에서 주파수에 따른 파장을 구하여 비교하였다. 실험조건은 Fig. 1과 같은 형상의 $d=1\text{ mm}$ 인 노즐에 쇄기각 30° 의 쇄기를 사용한 경우이다. 앞에서 언급한 바와 같이 분류속도와 주파수가 같으면 파장은 단수 증가에 관계 없이 거의 일정해야 한다고 할 수 있다. Fig. 6에서 $p=-1/4$ 인 경우는 동일 주파수에서 파장이 단에 관계 없이 일정한 것을 알 수 있다. 그러나 $p=1/4$ 인 경우는 Fig. 5의 (a)에서와 같이 단의 증가에 따라서 파장이 증가하므로 불합리한 것을 알 수 있다. 이로써 $p=-1/4$ 은 쇄기소리의 되먹임 조건으로서 실험 결과와 잘 부합한다고 할 수 있다.

이상에서 기존 모델인 $p=1/4$ 이 불합리한 것을 확인하고 $p=-1/4$ 이 실험 결과와 잘 부합하는 것을 보였으나 그 정확한 값은 쇄기의 형상이나 유동 특성, 즉 본 모델에서는 α 에 따라 변할 수 있는

것이기 때문에 $-1/4$ 의 주변값을 통하여 그 신뢰성을 검토할 필요가 있다. Fig. 7은 Fig. 6과 같은 실험 데이터에 대하여 $-1/4$ 주위의 p 값에 따른 파장의 변화를 계산하여 도시한 것이다. 위에서 논한 바와 같이 파장은 분류의 속도가 일정한 경우 주파수에 따른 변화가 지배적일 뿐 단수의 영향은 거의 없어야 한다. 그림에서 $p=-1/4$ 인 경우는 단의 영향이 거의 나타나지 않으나 그 주변 값인 $p=-1/8$ 이나 $p=-3/8$ 의 경우는 단의 영향이 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서, $p=-1/4$ 은 신뢰할 수 있는 위상 조건이며 $1/8$ 의 오차 이내의 정확성을 갖는다고 할 수 있다. 따라서, Crighton⁽⁶⁾이 이론적으로 구한 $p=-3/8$ 은 기존 모델보다는 실제값에 가깝다고 할 수 있으나 $p=-1/4$ 에 비하면 상당한 오차가 있는 것을 알 수 있다.

본 연구의 기반이 되는 쌍극자열 모델은 쇄기각이 충분히 작은 것을 전제 조건으로 하기 때문에 쇄기각 θ 의 영향을 검토할 필요가 있다. Powell과

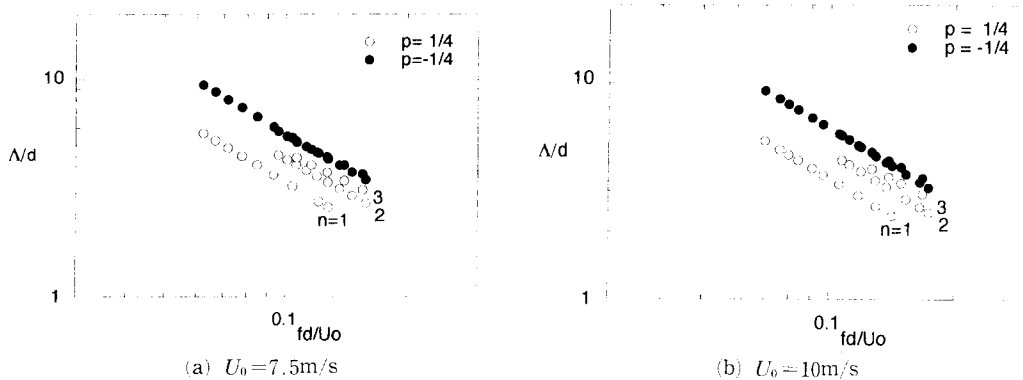


Fig. 6 Effect of p on the wave length estimated for the data of Powell and Unfried⁽⁸⁾

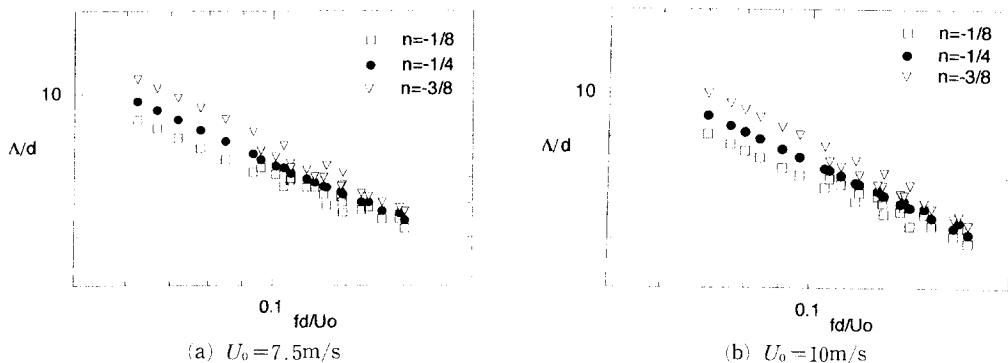


Fig. 7 Effect of p near $-1/4$ on the wavelength estimated for the data of Powell and Unfried⁽⁸⁾

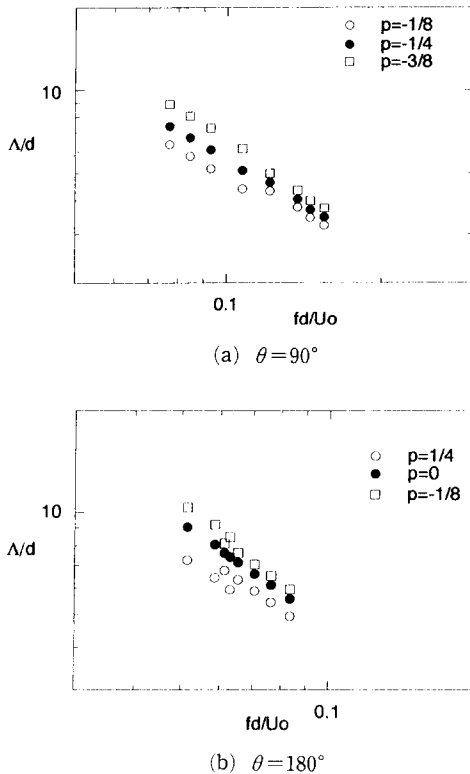


Fig. 8 Effect of wedge angle on the feedback criterion for the experimental results Powell and Unfried

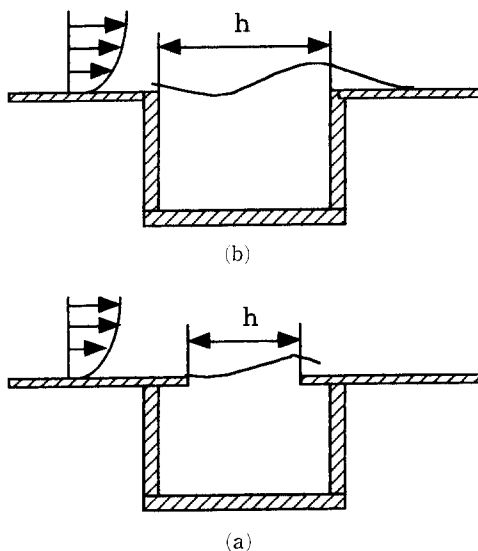


Fig. 9 Schematic diagram of cavity tones

Unfried는 $d=0.99$ mm인 노즐을 이용하여 일정한 평균유속 10 m/s에 대하여 썰기 각에 따른 썰기 거리와 주파수 관계를 실험하여 놓았다. 이로부터 식 (6)에 의하여 파장을 계산하여 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8(a)에서 썰기각이 90° 인 경우에도 $p=-1/4$ 이 유효한 것을 알 수 있다.

썰기각이 90° 인 경우는 Fig. 9(a)에 도시한 바와 같은 직각공동을 갖는 공동음의 경우에 해당한다고 할 수 있다. 이 경우 $p=-1/4$ 임이 알려져 있으므로⁽⁹⁾ 공동음도 썰기 소리와 같이 상류단과 하류측의 유효음원 사이의 되먹임 순환을 기본적인 발생기구로 하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 하류단에 관형 썰기를 갖는 Fig. 9(b)의 경우에 이론 및 실험으로 Elder⁽¹⁰⁾에 의하여 밝혀진 $p=-1/4$ 은 본 연구의 결과와 완전히 일치하는 결과로 여겨진다. Elder, et. al.⁽¹¹⁾에 의하여 공동음은 상류단과 하류단 사이의 되먹임 작용에 의한 전단음(shear tone)의 주파수와 공동의 고유주파수가 일치할 때 발생하는 소리인 것이 밝혀졌다. 따라서, 공동음에서 공동의 역할은 음원에서 발생하여 상류단으로 전파하는 소리를 증폭하는 역할을 할 뿐이며 되먹임 순환의 기본구조는 단순한 썰기소리와 같다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 썰기 각이 180° , 즉 분류가 평균에 수직으로 충돌하는 경우를 나타낸다. 이 경우는 예상한 바와 같이 $p=0$ 일 때 단의 변화에 관계 없이 교란의 파장이 주파수에 따라서만 변화를 보이고 있으므로 위상조건은 $p=0$ 임을 알 수 있다. 이 경우의 음원의 위치는 수직 벽면일 수 밖에 없으므로 $h=h'$ 로 되고 식 (7)에 따라 $p=0$ 이 된다. Ho와 Nosseir⁽¹²⁾는 평면분류가 아닌 원형 분류의 경우에 $p=0$ 임을 보였으며 원형분류의 경우도 평면 분류와 유사한 되먹임 순환을 이루는 것으로 볼 수 있다. 평면벽의 결과는 파장의 변화에 의하여 p 값의 타당성을 판정한 본 연구의 방법이 적절한 것임을 보이는 증거로도 볼 수 있다.

4. 결론

이상과 같이 썰기소리의 되먹임 순환의 위상조건을 이론적으로 구하고 실험결과에 적용하여 본 결과 다음 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 위상조건은 $p=-1/4$ 이며 이것은 분류와 썰기가 작용하는 유효음원의 위치가 썰기의 선단에서

하류측으로 유동의 교란의 1/4 파장에 가깝기 때문이다.

(2) 노즐 출구로부터 쇄기의 유효음원까지의 되먹임 순환의 위상차는 2π 의 정수배이다.

(3) 본 연구는 쇄기각이 작은 경우로 가정한 쌍극자열 모델을 바탕으로 하였으나 공동음에 해당하는 쇄기각이 90° 인 경우까지 $p = -1/4$ 이 유효하다.

(4) 쇄기각이 180° , 즉 평판으로의 충돌 분류의 경우의 위상조건은 $p=0$ 이다.

(5) 이론 모델 평가의 기준이 되어온 Brown의 가시화에 의한 실험 데이터는 유속이 감소하는 상황에서 구해진 것이므로 일정한 유속을 전제한 모델에는 적용할 수 없다.

후 기

본 연구는 95 핵심연구과제로 한국과학재단의 지원에 의한 연구의 일부임을 밝히며 재단에 감사료를 표한다.

참고문헌

- (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) Kaykayoglu, R. and Rockwell, D., 1986, "Unstable Jet-Edge Interaction. Part 1. Instantaneous Pressure Fields at a Single Frequency," *J. Fluid Mech.*, Vol. 169, pp. 125~149.
- (5) Holger, D. K., Wilson, T. A. and Beavers, G. S., 1977, "Fluid Mechanics of the Edgetone," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 62, No. 5, pp. 1116~1128.
- (6) Crighton, D. G., 1992, "The Jet-Edge Feedback Cycle; Linear Theory for the Operating Stages," *J. Fluid Mech.*, Vol. 234, pp. 361~391.
- (7) Kwon, Y. P. and Powell, A., 1994, "Jet-Edge Interaction and Sound Radiation in Edgetones," *Tr., Korea Society of Mechanical Engineers*, Vol. 18, No. 3, pp. 584~590.
- (8) Powell, A. and Unfried, H., 1964, "An Experimental Study of Low Speed Edgetones," University of California, Los Angeles, Report No. 64-49.
- (9) East, L. F., 1966, "Aerodynamically Induced Resonance in Rectangular Cavities," *J. Sound Vib.*, Vol. 3, No. 3, pp. 277~287.
- (10) Elder, S. A., 1978, "Self-Excited Depth-Mode Mounted Cavity in Turbulent Flow," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 72, pp. 877~890.
- (11) Elder, S. A., Farabee, T. M. and DeMetz, F. C., 1982 "Mechanisms Of Flow-Excited Cavity Tones at Low Mach Number," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 72, No. 2, pp. 532~549.
- (12) Ho, C. M. and Nosseir, N. S., 1981, "Dynamics of an Impinging Jet. Part 1. The Feedback Phenomenon," *J. Fluid Mech.* Vol. 105, pp. 119~142.