

고속 평면제트와 썰기에 의한 충돌 순음의 주파수특성

°권영필*, 장 욱**, 이근희***, 김 욱****

Frequency Characteristics of Impinging Tones by High-Speed Plane Jets and Wedges

Young Pil Kwon, Wook Jang, Geun Hee Lee and Wook Kim

ABSTRACT

The impinging tones by high-speed plane jets are investigated for the characteristics of edgetone generation based on experimental observations. Experiment has been performed for edgetones with a slit nozzle and a wedge system. The jet in the experiment is varied from low to high subsonic speed to obtain the effect of the speed on the frequency characteristics of impinging tones. The experimental data obtained previously for edgetones and platetones by various nozzles are compared with the present edgetone data for the condition of tone generation, the frequency ranges and the effective source point. It is found that the jet speed has no fundamental influence on the impinging tone characteristics. Regardless of the jet speed, the effective source point is about a quarter wavelength downstream from the edge tip. With increase in jet speed, the influence of the nozzle configuration is decreased and the operating frequencies show good coincidences by normalized parameters based on the slit thickness.

1. 서론

불안정한 유동이 맥동을 하면서 고체면에 충돌하여 음파를 발생하고 음파가 유동을 교란하여 하나의 되먹임(feedback) 순환을 이루어 유동 공진(resonance)현상을 나타낼 때 일정한 주파수의 충돌순음(impinging tone)이 발생하게 된다.

제트가 썰기나 벽면 또는 원통 등에 충돌할 때 발생하는 강한 충돌순음은 다양한 유동형태에서 관찰된다. 특히, Fig.1과 같이

평면제트가 썰기에 충돌하여 발생하는 썰기음(edgetone)은 충돌순음의 대표적인 경우라 할 수 있으며 유동적으로나 음향적으로 많은 연구자들의 관심을 끌여온 현상이다.⁽¹⁾

Powell⁽²⁾은 썰기음을 처음으로 제트와 소리 사이의 되먹임 현상으로 이해하고 하나의 순환에 정수 개의 사이클이 존재해야 한다는 전제하에 다음과 같은 되먹임순환의 위상조건을 제시하였다.

* 회원, 숭실대학교 기계공학과
** 하나로 통신
*** 경기 공업대학
**** 산업자원부 기술표준원

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

식에서 h 는 노즐과 췌기 선단 사이의 거리이며 U_c 는 제트를 따라서 전파되는 교란의 위상속도인 대류속도, c 는 음파의 위상속도인 음속, f 는 주파수, n 은 정수로서 튜니형의 불연속적인 주파수 특성인 단(stage)을 나타내는 값이다. p 는 소수로서 제트가 췌기와 충돌할 때 있을 수 있는 위상 지연을 나타내기 위한 위상인자이다. Powell은 Brown⁽³⁾의 실험을 바탕으로 $p=1/4$ 을 제안하였으며 Holger등⁽⁴⁾과 Crighton⁽⁵⁾은 이론적으로 연구하였으나 $p=1/4$ 을 뒷받침하지는 못하였다. 최근 저자^(6,7)는 제트와 췌기의 충돌에 관한 쌍극자(dipole) 배열 모델을 세우고 이론적으로 $p=-1/4$ 을 도출하였으며 Brown⁽³⁾ 및 Powell 과 Unfried⁽⁸⁾의 저속제트에 관한 실험 데이터로 이를 입증하였다. $p=-1/4$ 인 이유는 제트와 췌기의 충돌에서 충돌순음의 발생위치가 췌기의 선단에서 불안정제트의 1/4파장 가량 떨어진 하류에 위치하기 때문이란 것을 이론적으로 규명하였다. 따라서 췌기가 아닌 수직 벽면에 제트가 작용하는 충돌순음의 경우는 음원의 위치가 벽면이므로 $p=0$ 이 되어야 하는 것을 입증하였다.⁽⁹⁾

최근 저자는 평면제트가 수직 벽에 충돌하는 판음(platetone)에 관한 실험을 통하여 노즐폭 d 와 동점성계수 ν 로 무차원화한 레이놀즈수 ($Re = U_j d/\nu$)가 5000 이상의 고속에서 충돌순음이 발생하기 시작하고 제트의 불안정 모드는 레이놀즈수가 15000이하에서는 비대칭모드만 여기되나 그 이상에서는 대칭모드와 비대칭모드가 여기되는 것을 관찰하였다.⁽¹⁰⁾

Krothapalli등⁽¹¹⁾은 고속제트에 의한 췌기음의 충돌거리에 따른 주파수를 몇몇 대표속도에 대하여 $n=1$ 과 2인 단을 중심으로 제시하였다. 특히, 췌기음이 발생하는 최소 충돌거리가 저속에서는 유속이 증가에 따라서 감소하다가 고속에서는 반대로 증가하는 특성을 나타내는 것을 제시하고 그가 실험한 영역인 마하(Mach)수 0.2 이상(레이놀즈수로 약 1.5×10^4 이상)의 범위를 고속으로 간주하였다.

이상의 평면제트의 충돌순음과 관련된 연구동향에서 보듯이 췌기음의 연구는 제트의 속도가 낮은 저속 췌기음(low-speed edgetone)에 국한되어 있으며 고속제트에 의한 췌기음의 특성에 관한 체계

적인 연구가 보고되지 않았다. 저속과 고속에 관한 일반적인 특성의 차이도 확립되지 못하였다. 따라서 본 연구의 목적은 실험 및 선행 연구 결과의 비교 고찰을 통하여 고속 평면 제트에 의한 췌기음의 주파수 특성을 파악하기 위한 것이다. 먼저 저속에서 고속으로 제트의 속도 변화에 따라 발생하는 주파수, 충돌거리등의 특성 변화를 구하여 저속과 고속의 차이를 파악하고 다음에는 유효음원의 위치를 구하여 고속의 경우에 관한 위상조건을 확립한다. 또한, 노즐의 형상 변화가 췌기음의 특성에 미치는 영향을 살펴보고 특성을 일반화할 수 있는 무차원 변수를 구하고자 한다.

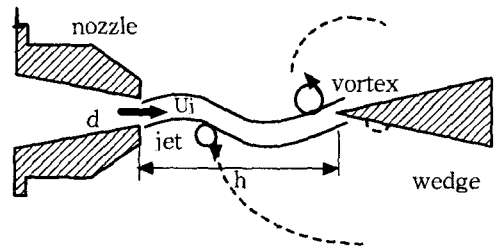
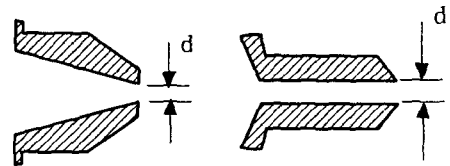


Fig.1 Edgetone system

2. 실험장치 및 방법



(a) nozzle (b) channel

Fig.2 Cross-sectional view of the two-dimensional nozzles

실험장치는 압축기, 서지탱크, 유동 안정화 장치, 평면노즐, 췌기, 그리고 노즐과의 거리를 조절하기 위한 3차원 이송장치로 구성하였다. 압축기로 압축된 공기는 서지탱크와 유동 안정화를 위한 하니콤을 통과한 후 노즐에서 분출된다.

본 연구에서 사용한 평면노즐은 Fig.2의 (a)와 같은 단면 형상을 갖는 노즐로서 폭 $d=1\text{mm}$, 너비 60mm, 길이 140mm, 축소각은 10° 이고 내부는 정밀하게 가공하였다. 실험에 사용한 췌기는 너비 150mm, 최대두께 14mm, 길이 100mm,

썰기각은 8.5° 이다. 그림에서 (b)는 Powell과 Unfried⁽⁸⁾, Krothapalli등⁽¹¹⁾이 사용한 차널형 노즐로서 전자의 경우, $d=1\text{mm}$, 너비 20mm , 길이 110mm 이고 후자의 경우는 $d=3\text{mm}$, 길이 50mm 였다. Powell과 Unfried⁽⁸⁾이 사용한 썰기는 썰기각 60° 에 길이는 110mm 였다. Krothapalli등⁽¹¹⁾이 사용한 썰기는 썰기각 20° 였다.

평면노즐에 의한 썰기소리의 음압과 주파수의 측정은 무향실(anechoic room)에서 바닥면으로부터 높이 1.2m , 충돌면과의 거리 0.5m , 노즐 축과 수직인 지점에서 측정하였다. 이때 사용한 마이크로폰은 1/4인치 콘덴서형 마이크로폰(TYPE 4135, B&K)이며, 입력신호를 주파수분석기(Symphonic, 01dB)로 20회 평균을 취하여 20kHz 범위에서 분석하였다. 주파수분석기(FFT)의 해상도(resolution)은 50Hz 이다.

충돌순음의 주파수는 노즐출구에서의 분출속도와 노즐과 충돌면 사이의 거리에 관계되므로 분출압력과 충돌거리를 바꾸어가며 주파수를 측정하였다. 실험은 일정한 충돌거리에 대하여 압력을 강하시키면서 130kPa 로부터 5kPa 간격으로 측정하였고 노즐과 썰기와의 충돌거리 h 는 충돌순음이 발생하기 시작한 지점부터 거리를 변화시켜 수행하였다. 공기를 분출시켰을 때 발생하는 음을 썰기의 선단에서 90° , 썰기의 중심에서 500mm 의 거리에서 마이크로폰으로 측정하여 주파수 분석기로 분석하였다.

썰기소리의 위상특성은 제트의 축에 수직인 일직선상에서 두개의 마이크로폰으로 썰기중심에서 마이크로폰까지의 거리를 100mm 로 하여 두 마이크로폰 사이의 음압의 상호상관(cross correlation)으로 위상차를 구하였으며 이로부터 방사음장의 대칭성 여부를 평가하였다.

제트의 속도는 노즐 출구의 상류 쪽으로 350mm 의 위치에 액주계(manometer)를 설치하여 상류압력(P_j)과 대기압(P_o)과의 압력비($R = P_j/P_o$)를 측정하여 제트속도는 이상적인 단열노즐에 관한 다음 식으로 계산하였다.

$$U_j = c_0 \left[\frac{2}{\gamma-1} \left(1 - R^{-\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

식에서 c_0 는 음속이며 공기의 비열비는 $\gamma=1.4$ 이다.

본 실험은 압력비 $R=2.3$ 이하의 아음속 제트의 속도범위, $0 < U_j < 312\text{m/s}$ 이며 레이놀즈수는 $0 < Re < 2.06 \times 10^4$ 의 범위에 대하여 수행한 것이다.

3. 실험결과

3.1 제트의 불안정 모드

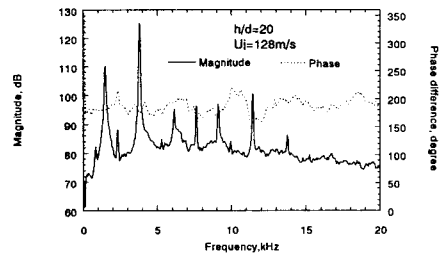


Fig.3 Magnitude and phase spectrum of the sound

먼저 충돌음의 스펙트럼과 제트의 양 쪽에서 음파의 위상차의 일례를 도시하면 Fig.3과 같다. 그림에서 여러 개의 강한 순음이 발생하며 어떤 것은 다른 저주파 순음의 정수배의 주파수를 갖는 고조파인 것을 알 수 있다. 또한 발생 음장은 제트의 양쪽 사이에 180° 에 가까운 위상차를 나타낸다. 이는 양측 음장이 비대칭인 것을 나타내므로 제트의 불안정 모드도 비대칭이라고 할 수 있다. 유속에 관계없이 모든 순음은 비대칭적인 제트의 거동에 따른 것이다. 즉, 썰기음은 저속이나 고속 모두 비대칭적인 제트의 거동에 의하여 발생한다고 할 수 있다. 또한, 순음 뿐만 아니라 모든 주파수 성분이 180° 에 가까운 위상차를 나타내는 것을 볼 수 있다. 즉, 피드백 기구를 갖는 강한 순음성 충돌음 뿐 아니라 모든 주파수의 음들을 비대칭적인 교란에 의한 음이 지배한다는 것이다.

3.2 충돌순음의 발생범위

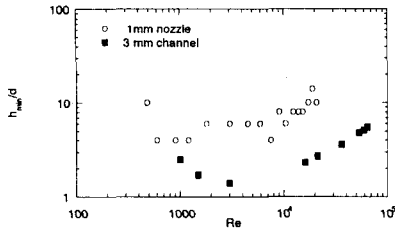


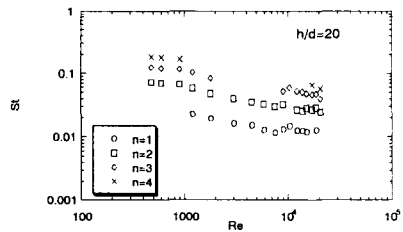
Fig. 4 The minimum edge distance for the edgetone generation

충돌순음이 측정되는 제트의 속도 U_j 와 최소 충돌거리 h_{min} 의 관계를 레이놀즈수 Re 와 h_{min}/d 로 도시하면 Fig.4와 같다. 그림에서 1mm 노즐은 본 연구의 결과이고 3mm 채널로 표시한 값은 Krothapalli등⁽¹¹⁾이 제시한 자료에 의한 것이다. 본 연구에서 사용한 노즐의 경우 충돌음이 발생하는 최소 거리비는 $h_{min}/d=4$ 근처이며 유속이 낮아지거나 높아지면 조금씩 멀어지는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 최대 거리의 비는 $h/d=30$ 이상이나 대체로 유속이 증가하면 증가하는 경향을 보였다. 그러나 3mm 채널의 경우는 충돌음이 발생하는 최소 거리비가 현저히 낮은 것을 알 수 있다. 하지만 두 경우 모두 최소충돌거리가 유속에 따라서 감소하다가 증가하는 공통적인 특성을 보이고 있다. Krothapalli등은 이 최소거리가 유속에 따라서 증가하는 $Re=15000$ 이상의 값을 고속 썩기음으로 취급하였다. 본 연구에서도 그 정도의 레이놀즈수에서 최소 충돌거리가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 노즐에 따라서 크기의 편차가 너무 크고 특성이 점진적으로 변하기 때문에 최소 충돌거리에 의하여 명확하게 저속과 고속 썩기음을 나누기는 어려운 것을 알 수 있다.

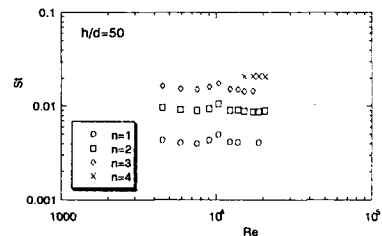
3.3 충돌음의 주파수

Fig.5는 일정한 거리에서 제트의 속도에 따른 주파수를 도시한 것이다. 그림에서 Stouhal수는 주파수 f 를 무차원화한 값으로서 $St=f/U_j$ 를 나타낸다. 이 그림에서 유속에 따른 썩기음의 특성을 살펴볼 수 있다. (a)에서 $h/d=20$ 인 경우 유속

이 증가하면 무차원 주파수는 감소하는 경향을 보이며 레이놀즈수가 1000에서 10000으로 변화는 과정에서 충돌음의 단이 저단으로 내려가고 레이놀즈수가 10000에 가까울 때 스트로할 수가 증가하는 양상을 보였다가 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 그림(b)는 충돌거리가 다소 먼 곳에서 실험한 결과인데 여기서 보면 레이놀즈수에 따른 스트로할 수의 변화는 거의 없는 것을 알 수 있다. 즉, 충돌거리가 멀면 발생주파수는 거의 유속에 비례한다고 할 수 있다. 이 경우에도 역시 $Re=10000$ 근처에서 스트로할수가 약간 증가했다가 감소하는 변화를 볼 수 있다. 이러한 변화가 노즐출구에서 제트의 경계층이 층류에서 난류로 변하는 것과 관계된 것인지 확인하지는 못하였으나 저속제트와 고속제트의 구분을 짓는다면 이 점 즉, $Re=10000$ 이 되어야 할 것이다. $Re=10000$ 을 기준으로 저속과 고속을 나누면 Fig.4에서 최소충돌거리에 의한 구분과도 부합하는 것을 알 수 있다. 그러나 이 점을 중심으로 충돌음의 발생에 불연속적인 특성 변화가 나타나는 것은 아니다.



(a) $h/d=20$



(b) $h/d=50$

Fig.5 Normalized frequency vs. velocity of edgetones

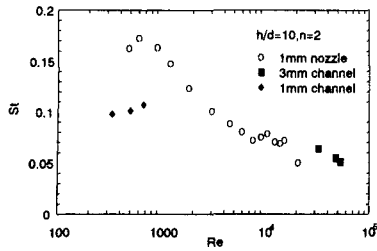


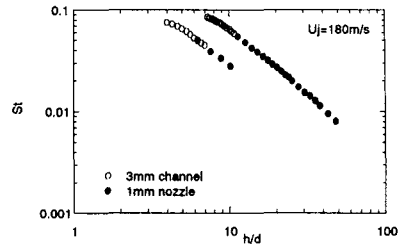
Fig.6 Normalized frequency vs. velocity of edgetones for various nozzles

Fig. 6 는 동일한 단, $n=2$ 에서 일정한 충돌거리 $h/d=10$ 일 때 무차원 속도와 주파수를 비교도시한 것이다. 그림에서 노즐이 다르면 무차원주파수가 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 채널 노즐을 이용한 Powell과 Unfried⁽⁸⁾의 저속 제트에 관한 실험 결과와 본 실험 결과가 상당한 차이를 나타낸다. 레이놀즈수에 따라 스트로할수가 증가하는 양상은 유사한 듯 하지만 크기는 무시할 수 없는 차이를 보인다. 레이놀즈수가 높은 경우에 관한 Krothapalli 등⁽¹¹⁾의 실험 결과는 본 실험 결과와 레이놀즈수에 따른 스트로할수의 감소 경향은 거의 같으나 크기의 일치는 확실하지 않다. 이것을 확인하기 위하여 $U_j=180\text{m/s}$ 인 경우에 관한 실험 데이터를 비교 도시하면 Fig.7과 같다.

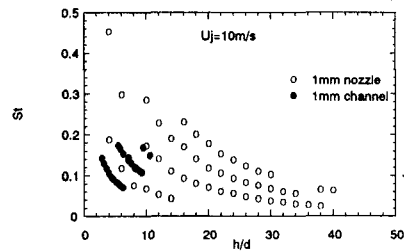
Fig.7(a)에서 노즐의 형상과 치수가 다른 본 연구와 Krothapalli 등⁽¹¹⁾의 실험결과가 노즐폭을 이용한 무차원 양으로 비교하면 완전히 일치하는 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서, 충돌제트의 특성을 좌우하는 특성길이는 노즐의 폭이라는 것을 확인할 수 있다.

Fig.7(b)는 저속인 $U_j=10\text{m/s}$ 에서 충돌거리와 주파수를 비교도시한 것이다. 그림에서 Powell과 Unfried⁽⁸⁾의 채널을 이용한 경우와 본 연구의 축소형 노즐을 이용한 경우는 특성이 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 고속과 저속에서 이러한 차이를 나타내는 이유는 제트의 불안정 특성이 노즐 출구의 유속분포에 의하여 결정되며 저속의 경우는 노즐의 형상에 크게 영향을 받지만 고속의 경우는 출구의 유속 분포가 거의 유사하기 때문에 나타나는 현상일 것으로 추정된다. 따라서 충돌제트에 의한 순음발생의 특성은 고속의 경우는 노즐의 형상에 영향을 거의 받지않고 제트폭을 특성길이로 하

는 무차원 매개변수들에 의하여 결정된다고 할 수 있다.



(a) $U_j=180\text{ m/s}$



(b) $U_j=10\text{ m/s}$

Fig.7 Comparison of normalized frequency and edge distance between different nozzles

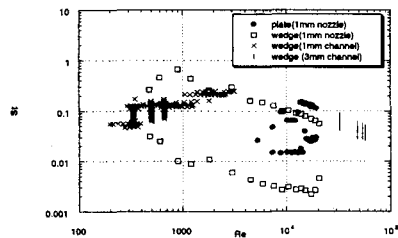


Fig. 8 Normalized frequency vs. velocity for impinging tone generations by plane jet

Fig. 8은 평면제트에 의한 각종 충돌순음의 유속에 따른 발생 주파수를 비교 도시한 것이다. □는 본 연구에서 실험한 쇄기음의 각 레이놀즈 수에 따른 스트로할 수의 상하한 값을 도시한 것이며 ●는 저자가 발표한 수직평판에 대한 충돌음⁽¹⁰⁾의 경우이고 ×는 1mm 채널형 노즐에 의한 Powell과

Unfried⁽⁸⁾의 저속 썩기음의 실험결과이고 Krothapalli등⁽¹¹⁾의 3mm 채널형 노즐에 의한 썩기음의 실험 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 충돌음의 주파수는 노즐의 형상과 충돌면에 따라서 다소간 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 사용한 노즐과 썩기에 의한 충돌순음의 발생 범위가 가장 넓고 수직 평판에 충돌하는 경우는 상당히 고속제트의 좁은 범위에서 순음이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 폭이 3mm로 넓은 채널 노즐의 경우는 보다 높은 레이놀즈수에서 높은 값의 스트로할수의 음이 발생하는 것을 알 수 있다. 최소 스트로할수의 전체적인 경향은 레이놀즈수가 증가할수록 감소하는 특성을 보인다. 그림에서 스트로할수의 상한값은 계측기의 분석한계의 제약에 따른 경우가 많기 때문에 특별한 의미를 부여하기는 어렵다.

3.4 썩기음의 위상조건

식(1)과 같은 위상조건에서 위상 인자 p 는 충돌음 발생의 유효음원의 위치와 관련이 있음은 이미 언급한 바와 같다. 충돌면이 수직벽인 경우는 음원이 선단에 있으므로 같은 유속과 주파수에서 수직벽과 썩기의 충돌거리가 다르게 된다면 그것은 유효음원의 위치의 차이에 따른 것으로 볼 수 있다. Fig.9는 $U_j = 230\text{m/s}$ 에서 수직벽⁽¹⁰⁾과 본 연구의 썩기의 경우를 비교하여 충돌거리와 주파수 관계를 도시한 것이다. 같은 단, 같은 주파수에 대하여 수직벽이 썩기의 경우에 비하여 충돌 거리가 더 먼 것을 알 수 있으며 그 차이는 단과 단의 사이를 한 파장으로 볼 때 파장의 1/4 전후라는 것을 알 수 있다. 즉, 고속제트의 경우에도 썩기음의 발생 위치는 선단에서 약 1/4 파장 하류에 위치하는 것을 알 수 있다. 따라서, 고속제트의 경우도 위상 인자는 $p=-1/4$ 임을 확인할 수 있다. 수직벽의 경우, 저속에서 순음이 발생하지 않으므로 저속에서 비교가 불가능하나 저속의 경우는 이미 실험 데이터와 이론을 통하여 $p=-1/4$ 임을 확립하였다.^(6,7,9) 따라서, 썩기음의 유효음원의 위치는 유속에 관계없이 선단에서 1/4파장 정도 하류에 있으며 위상 인자는 $p=-1/4$ 라는 결론을 내릴 수 있다.

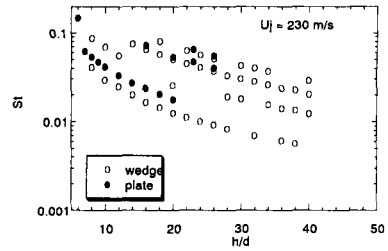


Fig. 9 Comparison of the edge distance between wedge and vertical plate for impinging tones

4. 결론

이상과 같이 고속 평면제트에 의한 충돌순음의 주파수특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 유속에 따른 충돌순음의 특성은 저속과 고속을 엄격히 나눌만한 불연속적인 변화를 나타내지 않으나 $Re=10000$ 근처에서 유속에 따른 최소충돌거리나 주파수 특성에 현저한 변화가 있다.
- 2) 썩기음 발생의 유효음원의 위치는 유속에 관계없이 썩기의 선단에서 불안정유동의 1/4파장 정도 하류에 위치하며 위상조건에서 위상인자는 $p=-1/4$ 이다.
- 3) 썩기에 의한 충돌순음은 비대칭적인 제트의 거동에 의한 것이며 유속 변화에 따른 충돌음이 시작되는 최소 충돌거리나 최소 주파수 등은 유사한 경향을 보이지만 크기에 있어서는 노즐의 형상에 따라 상당한 차이를 나타낸다.
- 4) 충돌거리에 따른 주파수특성은 썩기의 형상에 크게 영향을 받으나 고속으로 갈수록 노즐폭을 특성길이로 표시하면 동일한 특성을 보인다. 즉, 고속으로 될수록 노즐 출구의 유속 분포가 유사하게 되며 동일한 유동조건에서 노즐폭이 특성길이로 거동한다.

5. 참고문헌

- (1) Rockwell, D., 1983, "Oscillations of impinging shear layers," AIAA Jr., 21(5), pp. 645-661.
- (2) Powell, A., 1953, "On edge tones and associated phenomena," Acustica 3, pp.233-244.

- (3) Brown, G., B., 1935, "The vortex motion causing edge tones," Proc. Phys. Soc. Lond. 47, pp.493 -507.
- (4) 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.
- (5) Crighton, D., G., 1992, "The jet-edge feedback cycle: linear theory for the operating stages," J. Fluid Mech. 234, pp. 361-391.
- (6) 권영필, 1995, "쌔기소리의 피드백 사이클의 위상조건," 대한기계학회논문집(B) 제 20권 제3호, pp. 1106 ~ 1113.
- (7) Young-Pil Kwon, 1998, "Feedback mechanism of low-speed edgetones", J. Acoust. Soc. Am. 104(4), pp. 2084-2089
- (8) Powell, A., and Unfried, H., 1964, An experimental study of low speed edgetones. University of California, los Angeles, Report No. 64-49.
- (9) Kwon, Y., P., 1996, "Phase-locking condition in the feedback loop of low-speed edgetones," J. Acoust. Soc. Am. 100(5), pp. 3028-3032.
- (10) 권 영필, 1998, "고속충돌제트의 불안정특성(1)-평면제트-", 대한기계학회논문집B권, 22(4), 452-458
- (11) Krothapalli, A., Karamcheti, K., Hsia, Y. and Baganoff, D., 1982, "Edge Tones in High-Speed Flows and Their Application to Multiple-Jet Mixing," AIAA Jr. 21, November