

## 저속의 원형분류가 구멍에 충돌할 때 발생한 구멍음의 주파수특성에 관한 실험적 연구

이 동 훈\*

### An Experimental Study on the Frequency Characteristics of Hole Tones Generated by a Circular Jet of Low Speed Impinging on a Plate with a Round Hole

Dong-Hoon Lee\*

#### Abstract

The objective of this study is to investigate experimentally the frequency characteristics of the hole tones generated by a circular jet of low speed impinging on a plate with a round hole. The experimental results about the sound spectrum and the time wave of the hole tone are presented and discussed in relation with the hole type, the jet velocity and the distance of the nozzle-to-plate with a round hole.

From the sound spectrum and time wave measurements, it is found that the hole tone is generated not only by an interaction of convected vortices with a round hole but also by a series of vortex shedding from jets passing through a hole. The hole tones generated by a feedback mechanism consist of many frequency stages and also have a hysteresis phenomenon like an edge tone. But the hole tones generated by a series of vortex shedding have nothing with the stage characteristics. The frequencies of hole tones are influenced by the jet velocity, the distance of the nozzle-to-plate with a round hole and the hole type.

Keywords : 공력소음(aerodynamic noise), 와류이탈(vortex shedding), 썩기음(edgetone), 구멍음( hole tone), 충돌음(impinging tone), 원형분류(circular jet)

#### I. 서 론

최근에 자동차를 비롯한 각종 열유체기기의 공력소음

(aerodynamic noise) 문제가 크게 대두되면서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 공력소음은 난류유동 자체에 의해서 발생하는 소리와 유동과 고체면의 상호작용

\* 서울산업대학교 기계공학과

용을 통하여 발생하는 소리로 나눌 수 있다. 난류소음이 광대역(broadband) 주파수특성을 갖는데 반하여 와류이탈(vortex shedding)이나 충돌에 의한 소음은 특정주파수 대역에서 강한 단음성 충돌음(impinging tone)을 유발한다.

단음성 충돌음은 분류(jet)와 상호작용되는 고체면의 형상에 따라 썩기음(edge tone), 공동음(cavity tone), 평판음(plate tone) 및 구멍음(hole tone) 등으로 분류할 수 있다<sup>(1)</sup>. 특히, 이들 충돌음 모두는 Powell<sup>(2,3)</sup>이 제안한 썩기음에 대한 되먹임모델(feedback model)을 이용하여 그 발생기구를 설명할 수 있다. 또한, 충돌음의 주파수특성에 관해서도 지금까지의 연구결과<sup>(4-6)</sup>로부터 그 특성의 상당부분이 규명되었다고 할 수 있다.

그러나, 연구의 대부분이 썩기, 평판 및 공동에 분류가 작용하여 발생하는 충돌음에 대하여 집중되어 왔고, 분류가 동심축상에 놓인 구멍에 충돌할 때 발생하는 구멍음에 대한 연구결과는 그리 많지 않다. 단지, 구멍음에 관해서는 Chanaud와 Powell<sup>(7)</sup>, Umeda et al.<sup>(8)</sup> 및 Umeda와 Ishii<sup>(9)</sup> 등의 연구문헌만이 보고되었을 뿐이다. Chanaud와 Powell은 노즐지름 5mm, 레이놀즈수 2500이하인 저속의 유속범위에서 수행한 실험으로부터 구멍음의 주파수특성은 썩기음의 경우와 매우 유사하다는 결과를 얻은 바 있다. 한편, Chanaud와 Powell이후 구멍음에 관한 주목할만한 연구로는 Umeda et al. 및 Umeda와 Ishii 등의 실험결과를 들 수 있다. Umeda et al. 등은 음속전후의 유속범위에서 가시화를 통한 구멍음의 발생기구를 규명한 바 있다. 또한 이들은 구멍음의 주파수특성이 저속조건에서 수행한 Chanaud와 Powell의 실험결과<sup>(7)</sup>보다는 오히려 고속의 원형분류(circular jet)가 원형실린더에 충돌할 때의 주파수특성<sup>(10)</sup>과 더 한층 유사함을 확인하였다. 즉, 이들의 연구결과로부터 구멍음은 유속범위에 따라 그 주파수특성이 다르게 되는 것에 주목할 필요가 있다. 또한 최근에 Umeda와 Ishii 등은 음속이상의 유속조건에서 수행한 일련의 실험으로부터 구멍에서 방사되는 음파(sound wave)는 두가지의 서로 다른 발생기구에 의해서 방사되는 가시화결과를 제시하였다. 이들은 연구결과에서 구멍 뚫린 판의 상류측으로 전파하는 음파는 기존의 문헌에 발표된 되먹임기구<sup>(8)</sup>를 따르는 반면에, 구멍의 하류측으로 전파하는 음파는 구멍통과시에 와의 팽창(vortical

expansion) 및 두개의 연속된 와의 충돌(collision)에 의한 것으로 결론짓고 있다. 이것은 썩기음 또는 평판음에서 볼 수 없는 구멍음만의 특성이라 할 수 있다.

이상의 연구결과에서와 같이 구멍음에 대한 연구의 대부분이 초음속조건에서 음의 발생기구를 규명하는데 주요점을 두어 왔기 때문에 저속조건에서 구멍음의 발생기구 및 주파수특성을 체계적으로 밝힌 연구결과는 지금까지 발표된 바 없다.

따라서, 본 연구는 저속의 원형분류가 동심축상의 구멍에 충돌될 때 발생하는 단음성 구멍음의 주파수특성에 관한 실험적 연구로서 분류속도, 구멍의 크기 및 노즐과 구멍뚫린 판과의 거리변화에 따른 음압 스펙트럼(spectrum)과 시간파형(time wave)을 측정하여 구멍음의 주파수특성을 파악하고자 한다.

## 2. 실험

실험장치는 Fig. 1과 같이 원형노즐(circular nozzle), 구멍뚫린 판 그리고 베드(bed)와 이송대(traverse)로 구성된다. 원형노즐은 상류단의 지름 76mm, 출구단 지름 10mm인 축소비 57.76의 축소노즐(convergent nozzle)로서 축소각은 9.3(이며 내부는 정밀하게 가공되었다. 실험에 사용한 시험편은 한번의 길이가 200mm인 장방형 강판으로서 Fig. 1의 그림 (a)와 같이 두께 6mm인 판에 지름 10mm 그리고 두께 4mm인 판에 지름 10mm와 지름 20mm의 구멍을 뚫은 경우와 그림 (b)와 같이 두께가 6mm인 판에 지름 10mm의 구멍을 뚫은 후 구멍전면을 기준하여 30°의 각도를 갖도록 판의 후면쪽의 지름을 크게 한 경우이다. 본 연구에서는 전자를 표준형 구멍(normal-type hole) 그리고 후

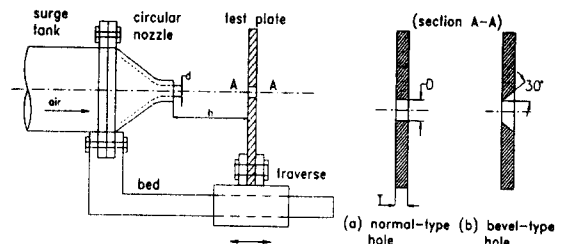


Fig. 1 Configuration of the hole-tone system and geometry of the plate with a round hole

자를 원추형 구멍(bevel-type hole)이라 부른다. 시험편의 고정은 분류방향으로만 이송이 가능하도록 제작한 베드를 원형노즐의 플랜지에 부착한 다음 시험편을 분류축과 정확히 수직이 되도록 베드위의 이송대에 고정하였다. 또한 시험편의 구멍과 노즐의 구멍을 동심축선상에 정확히 위치시키기 위해서는 노즐과 시험편의 구멍지름을 각각 관통하는 허용공차 (0.05인 원형기준봉을 별도로 제작하여 이용하였다. 원형기준봉을 이용한 노즐과 시험편 구멍의 정렬방법은 먼저 기준봉의 한쪽을 노즐에 고정된 상태에서 봉의 반대측으로 시험편을 삽입한 다음 이송대의 잠금장치로 시험편을 고정시킨 후 이송대가 베드상에서 원활히 이동하는지를 확인하였다.

음압의 측정은 무향실(anechoic room)내에서 1/2인치 콘덴서형 마이크로폰(B&K 4155)을 이용하고 신호는 소음계(B&K 2230)을 거쳐 주파수분석기(ONO SOKKI CF-350)에 입력된다. 입력된 신호는 신호의 주파수범위에 따라 해상도를 12.5Hz, 25Hz 또는 50Hz로 하여 최고 20kHz 까지 4회 평균을 취하여 분석하였다. 노즐의 출구속도의 측정은 서지탱크의 유입구에 유량계를 설치하여 노즐의 출구속도를 구하였다. 참고로 실험장치의 전체적인 개략도는 이미 발표된 참고문헌<sup>(11)</sup>의 내용과 같다.

충돌음의 실험은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 원형노즐의 지름을  $d$ 라 할 때 구멍뚫린 판과 노즐과의 거리  $h$ 를 변화시키며 수행하였다. 먼저 유속을 일정하게 유지시킨 상태에서 판을 분류방향으로 이동하는 경우와 판을 분류의 반대방향으로 이동하는 경우에 대하여 실험하였다. 이때 판과 노즐과의 거리  $h$ 는 다이얼게이지를 이용하여 계측하고 판을 1mm씩 이동시킬 때마다의 음압과 주파수를 측정하였다. 음압레벨의 측정위치는 바닥면으로부터 높이 1080mm인 분류축의 수평면상에서 분류의 방향과 수직인 판의 중심 점선면으로부터 반지름 400mm 그리고 분류축에서 상류측으로  $120^\circ$  가 되는 곳에서 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 강한 단음성 구멍음이 발생하는 조건에서 측정된 음압 스펙트럼과 시간파형을 각각 도시한 것이다. 이 경우 분류속도  $U_j=21.23\text{m/s}$ 이고, 표준형 구멍은  $h=12\text{mm}$ 에 고정하였다. 먼저, 그림(a)는 음압 스펙트

럼의 결과로서 기본음의 주파수인 2250Hz와 더불어 4500Hz, 6725Hz 및 8975Hz 등의 배음성분들이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 기본음의 음압레벨이 광대역 음에 비하여 최고 40dB이상 크게 되는 것을 알 수 있다. 특히, 단음성 구멍음의 크기만을 비교하여 보면 기본음의 음압레벨이 2배음 및 3배음에 비하여 그 크기가 클 뿐만 아니라 기본음을 기준으로 각각의 배음들의 크기가 일정 비율로 감소하고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림(b)는

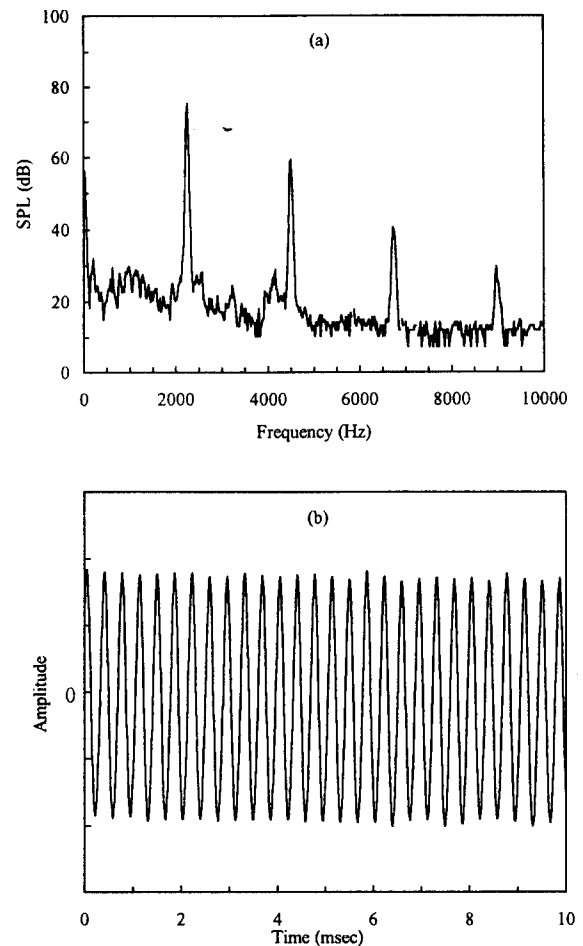


Fig. 2 Typical spectrum(a) and wave form (b) of when the hole tones of high level generate from the hole-tone system

그림(a)와 같은 조건에서 측정된 단음성 구멍음의 시간과형을 도시한 것이다. 결과에서 파형의 진폭과 주기가 일정하게 되는 정현파(standing wave)형태를 볼 수 있다. 이러한 시간과형은 구멍음 역시 쇄기음의 되먹임기구로 해석할 수 있음을 시사해주는 결과라 할 수 있다. 즉, 구멍음은 노즐에서 분출되는 분류의 불연속적인 와동이 구멍에 충돌할 때 발생하여 방사되고, 이 음이 상류로 전파하여 분류를 교란하므로써 대류되는 와동을 증폭시키고 증폭된 와동이 다시 구멍에 충돌하는 일련의 되먹임 순환에 의하여 발생하는 것으로 설명할 수 있다.

Fig. 3은 강한 단음성 구멍음이 점차 소멸되는 단계에서 측정된 음압 스펙트럼과 시간과형의 결과를 각각 도시한 것이다. 이때 표준형 구멍의 위치  $h=20\text{mm}$ 이고, 분류속도  $U_j=21.23\text{m/s}$ 이다. 도시된 그림(a)의 결과에서는 강한 구멍음이 발생하는 Fig. 2의 경우와는 달리 다수의 불규칙한 음압 스펙트럼들이 복합되어 스펙트럼의 폭이 넓게 되는 것을 알 수 있다. 또한, 그림(b)의 시간과형의 결과에서도 파형의 진폭과 주기가 불규칙적으로 변화하는 다수의 조화파(harmonic wave)가 복합되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 마치 맥놀이현상(beatting phenomenon)의 파형과도 같은데 실험시에 심한 음의 울림현상을 느낄 수 있었다.

Fig. 4는 분류속도  $U_j=12.74\text{m/s}$  상태에서 구멍뚫린 판을 노즐로부터 분류방향으로 이동할 때와 분류방향과 반대인 노즐측으로 이동할 때의 단음성 구멍음을 측정된 경우이며, 기본음주파수  $f$ , 노즐지름  $d$  및 분류속도  $U_j$ 를 매개변수로 하여 무차원화한 스트라울수(Strouhal number)  $St$ 를 노즐과 구멍뚫린 판과의 거리비인  $h/d$ 에 따라 도시하였다. 또한 제시된 결과에서 계단특성을 나타내는 단(stage)을 구분하는 문자는 Powell의 되먹임 조건(2,3) 식으로부터 결정하였다. 특히, 각각의 단과 비교하여 연속적인 단의 관계를 갖지 않고 동떨어진 단을 취할 때에는 기본음의 주파수와 더불어 2배음의 주파수도 함께 도시하였다. 먼저, 그림(a)는 판두께  $T=6\text{mm}$ , 구멍지름  $D=10\text{mm}$ 인 표준형 구멍일 때로서  $h/d$ 가 증가함에 따라 스트라울수가 감소하다가 갑자기 상승한 후 다시 감소하는 세개의 단을 볼 수 있다. 이 중에서 단II와 단III은 기본음의 주파수로 구성된 단이며, 단IV는 판을 상류측으로 이동할 때의  $h/d=2$ 에서의 값을 제외하고는 2배음의 주파수로 구성된 단이다. 본 결과에서 보듯이 원

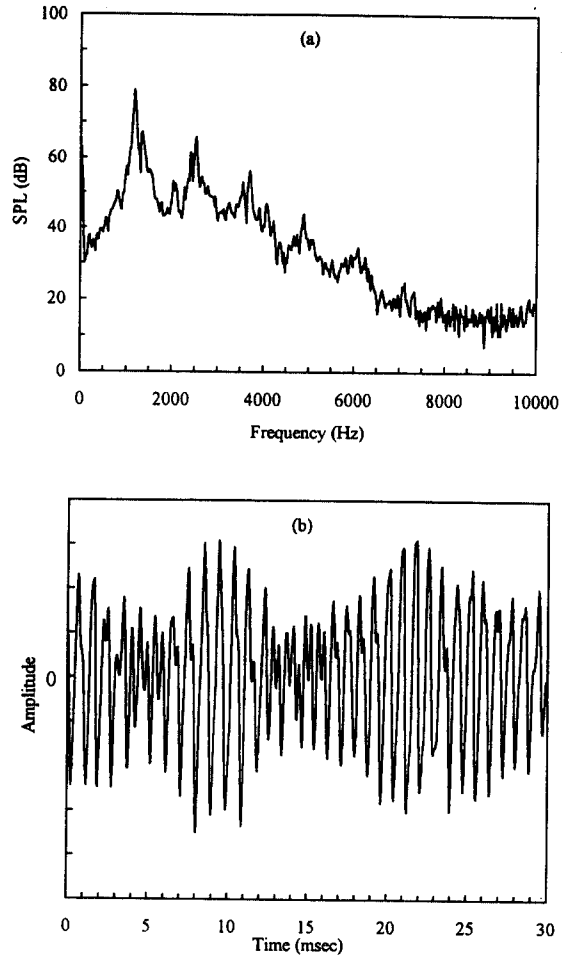


Fig. 3 Spectrum (a) and wave form (b) of when the hole tones disappear from the hole-tone system

형분류가 구멍에 충돌할때에도 쇄기음의 경우와 같이 다수의 단이 존재하고 구멍의 이동방향에 따른 이력현상(hysteresis phenomenon)이 나타나는 것을 알 수 있다. 그림(b)는 지름  $D=10\text{mm}$ 인 원추형 구멍에 대한 결과로서 그림(a)의 결과와 비교하여 보면 단이 천이되는  $h/d$ 의 위치가 다소 다르게 되는 것을 제외하고는 스트라울수의 범위나 기울기는 그림(a)의 결과와 거의 같음을 알 수 있다. 특히, 이 경우에도 단IV는 2배음의 주파수

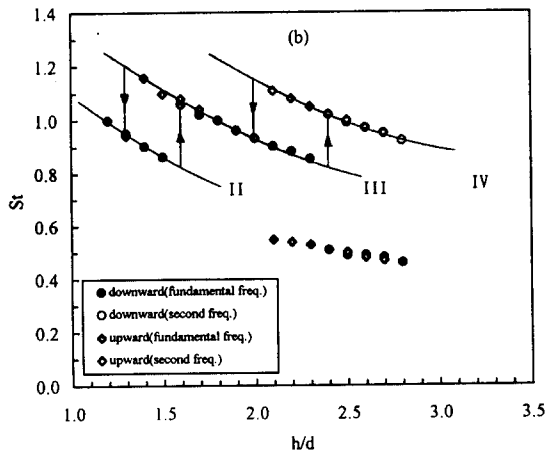
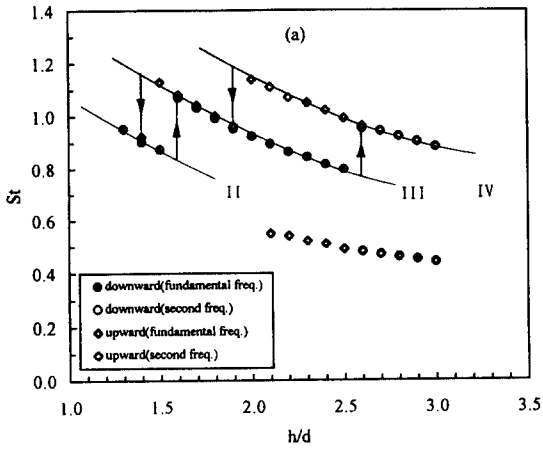


Fig. 4 Stage characteristics of hole tones generated by a circular jet impinging on the normal-type hole (a) and the bevel-type hole (b) at  $U_j=12.74\text{m/s}$

로 구성된 것임을 알 수 있다. 이와 같이 단 IV를 이루는 주파수가 기본음의 주파수가 아닌 2배음의 주파수만으로 되고 아울러 이에 대응되는 기본음의 주파수가 단의 특성과 무관한 0.4-0.6범위의 스트라홀수를 취하는 점은 지금까지의 연구에서 보지 못한 매우 특이한 결과이다. 이것은 구멍에서 방사하는 음파는 하나가 아닌 또 다른 발생기구에 의하여 방사되는 음파가 있음을 의미한다. 먼저

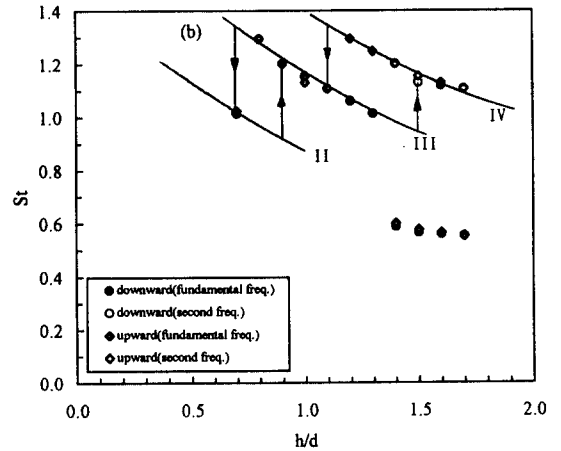
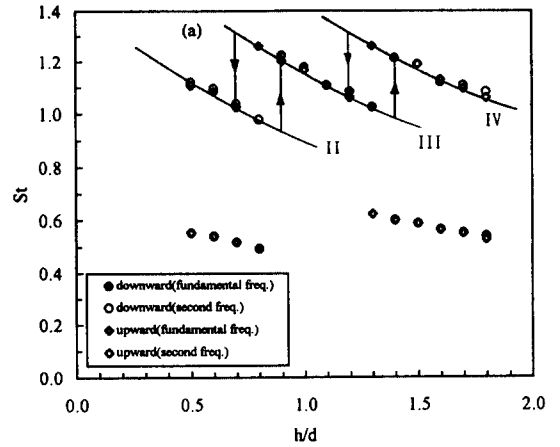


Fig. 5 Stage characteristics of hole tones generated by a circular jet impinging on the normal-type hole (a) and the bevel-type hole (b) at  $U_j=21.234\text{m/s}$

단 IV를 취하는 2배음의 주파수는 단 III과의 연속적인 단의 특성을 고려해볼 때와의 충돌로 구멍에서 발생한 음파와 대류되는 원형와(ring vortex)사이의 되먹임(feedback)에 의한 것으로 볼 수 있다. 그렇지만, 단 IV에 대응하는  $h/d$ 범위에서 0.4-0.6의 스트라홀수값을 갖는 구멍은 되먹임이 아닌 와류이탈에 의한 것으로 간주할 수 있다. 이와 같은 추론의 타당성은 Blake(1)가 인

용한 Johansen 그리고 Beavers와 Wilson의 연구결과에서 확인할 수 있다. 이들은 분류가 관의 출구에 장착된 날카로운 오리피스(knife edge orifice) 또는 원통내에 있는 오리피스를 통과할 때 분류로부터 이탈되는 와(vortex)에 의하여 발생하는 음의 스트라홀수는 0.5-0.7 정도임을 제시한 바 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 경우로서 단지 분류속도가 다소 높은  $U_j=21.23\text{m/s}$ 일 때의 결과이다. 그림(a)는 표준형 구멍 그리고 그림(b)는 원추형 구멍에 대한 결과이다. 도시된 두 결과에서도 단 IV에 대응되는  $h/d$ 범위에서 두개의 음파가 동시에 발생하는 것으로 간주할 수 있다. 특히, 표준형 구멍이 노즐의 가까이에 위치한 경우에도 단 IV의 것과 같은 특성을 볼 수 있다. 이와 같이 와류이탈로 인하여 음파가 발생할 수 있는 조건은  $h/d$ 뿐만 아니라 분류속도와구멍크기와도 관련있음을 Fig. 4와 Fig. 5의 결과로부터 확인할 수 있다. 한편, 도시된 결과를 Fig. 4의 결과와 상호비교하여 보면 구멍의 이동방향에 따른 이력현상, 단 IV가 주로 2배음의 주파수로 구성된다는 점 그리고 그림(b)의  $h/d=0.7$ 에서 발생한 구멍음의 결과를 하나의 단으로 간주하게 되면 세개의 단이 존재한다는 점은 Fig. 4의 결과와 같다고 할 수 있다. 그러나 각 단의 시작위치가 노즐측으로 한층더 이동하여 나타나고 단의 전체가 다소 증가한 스트라홀수값을 갖는 것은 Fig. 4의 결과와 다른 점으로 이것은 유속증가에 기인된 것으로 볼 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4와 Fig. 5에서 토의한 내용을 뒷받침하기 위한 실험결과로서 원추형 구멍을  $h=14\text{mm}$ 에 위치시키고, 분류속도  $U_j=21.23\text{m/s}$ 상태에서 측정된 음압 스펙트럼과 시간파형을 나타내고 있다. 먼저, 그림(a)의 음압 스펙트럼을 Fig. 2의 그림(a)의 결과와 비교하여 보면 같은 주파수대역내에서 배음요소 하나가 더 존재하게 되어 전체적으로 두배 만큼 많아진 주파수성분을 볼 수 있다. 또한 도시된 결과에서 기본음의 주파수 1250Hz의 홀수배 음인 3850Hz와 6400Hz는 Fig. 5의 토의결과로 미루어 볼 때 되먹임음과는 무관한 것임을 알 수 있다. 되먹임과 관련된 구멍음의 주파수는 2배음의 주파수인 2550Hz를 기준으로 정수배가 되는 5100Hz와 7650Hz인 것을 알 수 있다. 이와 같은 토의내용은 그림(b)의 시간파형으로부터 분명하게 확인할 수 있다. 즉, 도시된 결과에서 하나의 정현파 이외에 크기가 작은 또

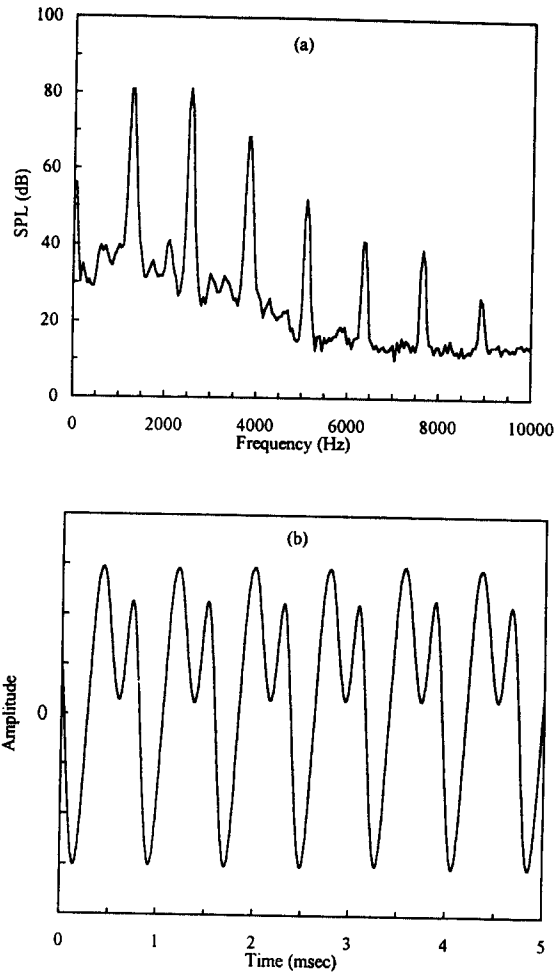


Fig. 6 Combination of two harmonically related to hole tones at  $U_j=21.23\text{m/s}$  and  $h=14\text{mm}$

다른 정현파가 복합되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 이들 정현파들은 전체적으로 일정한 진폭과 주기를 유지하고 있음을 알 수 있다. 이상과 같이 저속분류조건에서도 Umeda와 Ishii 등(9)의 연구결과와 같이 두개의 서로 다른 발생기구에 의하여 구멍음이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 그림(b)의 조건에서 측정된 주파수값을 이용하여 두개의 음파간의 위상차(phase delay)

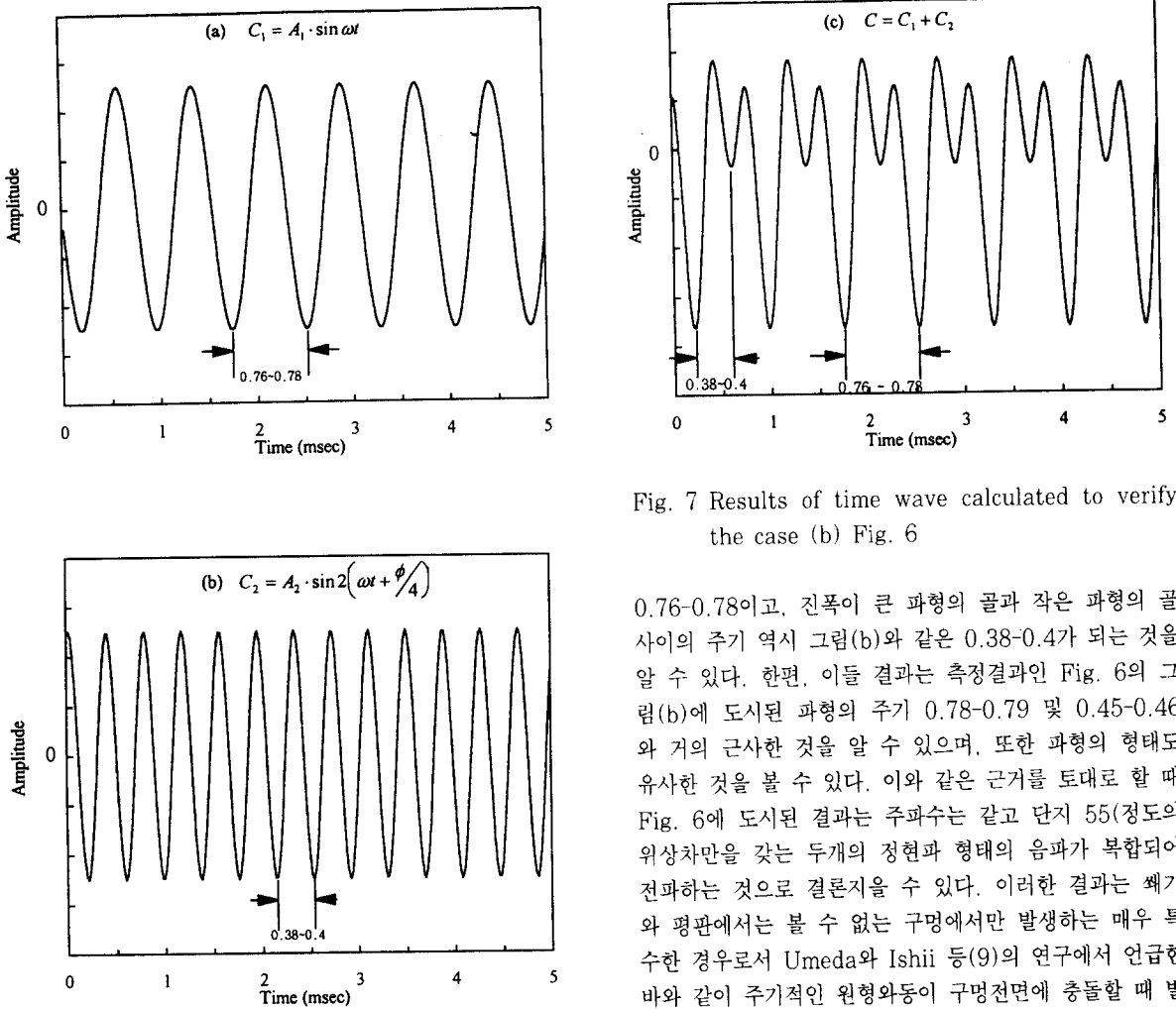


Fig. 7 Results of time wave calculated to verify the case (b) Fig. 6

를 계산한 결과이다. 먼저, 그림(a)는 Fig. 6의 그림(b)에 제시된  $h=14\text{mm}$ 일 때의 2배음의 주파수  $2550\text{Hz}$ 와 진폭 및 값 1을 도시된 식에 대입하여 계산한 결과이다. 이 경우의 주기는 그림에서 제시된 바와 같이  $0.76\text{--}0.78$  정도를 갖는다. 또한 그림(b)는 도시된 식에서 단지 위상만이 다른 를 대입하여 계산한 결과이다. 이 때의 주기는 그림(a)의 것보다 두배의 파수(wave number)를 갖도록 하였으므로 그림(a)의 주기인  $0.76\text{--}0.78$ 에 대하여 절반인  $0.38\text{--}0.4$ 가 되는 것을 알 수 있다. Fig. 7의 그림(c)는 그림(a)와 그림(b)의 파형을 합한 결과이다. 이 결과에서 진폭이 큰 파형의 주기는 그림(a)와 같은

$0.76\text{--}0.78$ 이고, 진폭이 큰 파형의 골과 작은 파형의 골 사이의 주기 역시 그림(b)와 같은  $0.38\text{--}0.4$ 가 되는 것을 알 수 있다. 한편, 이들 결과는 측정결과인 Fig. 6의 그림(b)에 도시된 파형의 주기  $0.78\text{--}0.79$  및  $0.45\text{--}0.46$ 와 거의 근사한 것을 알 수 있으며, 또한 파형의 형태도 유사한 것을 볼 수 있다. 이와 같은 근거를 토대로 할 때 Fig. 6에 도시된 결과는 주파수는 같고 단지 55(정도의 위상차만을 갖는 두개의 정현파 형태의 음파가 복합되어 전파하는 것으로 결론지을 수 있다. 이러한 결과는 썩기와 평판에서는 볼 수 없는 구멍에서만 발생하는 매우 특수한 경우로서 Umeda와 Ishii 등(9)의 연구에서 언급한 바와 같이 주기적인 원형와동이 구멍전면에 충돌할 때 발생하는 음파와 와류가 구멍을 통과하면서 이탈될 때 발생하는 음파가 복합된 것으로 볼 수 있다. 따라서, 이들 두 음파는 주기적으로 대류되는 와의 특성때문에 기본음의 주파수는 다르지만 배음의 주파수는 항상 같게 되고 단지, 다소의 시간지연으로 인한 위상차만을 갖는 것으로 볼 수 있다.

#### 4. 결론

원형분류가 동심축상에 있는 구멍에 충돌할 때 발생하는 단음성 구멍음에 관한 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강한 단음성 구멍음은 되먹임과 와류이탈에 의하여 발생하는 것을 확인하였다. 특히, 이들 두 발생기구에 의하여 발생된 구멍음은 대류되는 주기적인 와동특성 때문에 배음의 주파수는 같으며, 단지 시간지연으로 인하여 다소의 위상차만을 갖는다.
2. 되먹임에 의한 구멍음은 췌기음의 경우와 같이 단의 특성과 이력현상을 갖지만, 와류이탈에 의한 구멍음은 단의 특성과 관련이 없다.
3. 되먹임에 의한 구멍음은 스트라홀수 0.8-1.3 범위에서 발생되나, 와류이탈에 의한 구멍음은 스트라홀수 0.4-0.6 범위에서 발생된다.

## 후 기

이 논문은 1996학년도 서울산업대학교 공모과제 학술연구비에 의하여 연구되었음

## 참고문헌

1. Blake, W.K., Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration, Vol. 1, General Concepts and Elementary Sources, Academic Press, Inc., 1986.
2. Powell, A., "On Edge Tones and Associated Phenomena", Acustica, Vol.3, pp.233-243, 1953.
3. Powell, A., "On the Edge Tone", J.Acoust.Soc.Am., Vol.33, pp.395-409, 1961.
4. Holger, D.K. and Wilson, T.A. and Beavers, G.S., "Fluid Mechanics of the Edgetone", J.Acoust.Soc.Am., Vol.62, No.5, pp.1116-1128, 1977.
5. Elder, S.A., T.M.Farabee, and F.C.Demetz, "Mechanisms of Flow-Excited Cavity Tones at Low Mach Number", J.Acoust.Soc.Am., Vol.72, No.2, pp.532-549, 1982.
6. Ho, C.M. and Nosseir, N.S., "Dynamics of an Impinging Jet. Part 1. The Feedback Phenomenon", J.Fluid Mech., Vol.105, pp.119-142, 1981.
7. Chanaud, R.C. and Powell, A., "Some Experiments concerning the Hole and Ring Tone", J.Acoust.Soc.Am., Vol.37, No.5, pp.902-911, 1965.
8. Umeda, Y., Maeda, H. and Ishii, R., "Hole Tone Generated from Almost Chocked to Highly Chocked Jets", AIAA Journal, Vol.26, No.9, pp.1036-1043, 1988.
9. Umeda, Y. and Ishii, R., "Hole Tone Generation from Highly Chocked Jets", J.Acoust.Soc.Am., Vol.94, No.2, Pt.1, pp.1058-1066, 1993.
10. Umeda, Y. Maeda, H. and Ishii, R., "Discrete Tones Generated by the Impingement of a High-Speed Jet on a Circular Cylinder", Phys.Fluids, Vol.30, No.8, pp.2380-2388, 1987.
11. 이 동훈, 권 영필, 한 희갑, "평판에 충돌하는 원형 분류의 공력소음에 관한 실험적 연구", 한국소음진동 공학회, 제7권, 제1호, pp.71-79, 1997.