

# 입사음파의 구동주파수와 음압진폭의 변화에 따른 음향 흐름현상 관측

도중민, 김병남, 윤석왕  
성균관대학교 물리학과 음향학연구실

## Observation of acoustic streaming phenomenon with driving frequency and sound pressure amplitude in water

Joong Min Do, Byoung Nam Kim, Suk Wang Yoon  
Acoustics Research Laboratory, Department of Physics, SungKyunkwan University  
E-mail : jmdo@nature.skku.ac.kr

### 요 약

음향 흐름 ( Acoustic Streaming ) 현상은 음파가 유체내에서 전파하는 경우에 음파의 흡수로 인한 음장방향으로의 유체 흐름을 말한다. 이러한 유체내에서의 음향 흐름현상은 입사음파의 구동주파수나 음압진폭등에 영향을 받으며, 현재 음향 흐름현상은 DNA 분열이나 박테리아 분해등 생체학적 효과에 초음파의 비 열적효과로 널리 사용중이다. 본 연구에서는 수중에서 전기분해법을 이용하여 형성된 기포중에 음파를 수직 입사하여 밀려나가는 기포의 거리를 측정함으로써 입사음파의 구동주파수와 음압진폭 변화에 따른 음향 흐름현상을 관측하였다. 기포의 거리 측정 결과에 의하면 입사음파의 음압진폭 증가에 따라 기포의 밀림현상이 현저하게 증가하였으며, 구동주파수 변화에 따른 기포의 밀림현상은 차이를 보이고 있지 않았다. 본 측정결과로부터 음향 흐름현상은 입사음파의 구동주파수에 의한 영향을 확인할 수 없었으나, 음압진폭에 상당한 영향을 받는다는 것을 확인하였다.

### 1. 서 론

음파는 매질을 통하여 전파하는데, 이때 음파는 매질 내에서 투과, 반사, 감쇠, 산란등을 하여 이동한다. 음

파가 유체내에서 전파하는 경우에 음파의 흡수로 인하여 음장방향으로의 유체 흐름이 생기는데 이러한 현상이 바로 음향 흐름현상이며[1][2], 대기의 흐름에서 대기가 진동의 최대 진폭점에서 상승하고, 마디점에서 하강함을 1831년 Faraday가 발견한 이후[3], 음향 흐름은 많은 사람들에 의해 발견되고 실험되어 왔으며, 현재 음향 흐름현상은 유체안에서의 DNA 분열이나[4], 박테리아 분해[5], 그리고 생체상태나 비 생체상태에서 인간의 적혈구와 혈소판 분리[6]등 초음파를 이용한 비 열적효과에 사용되고 있다.

음파의 보다 특징적인 성질은 운동학적 관정보다는 동역학적 관점에서 더욱 잘 드러난다. 즉, 매질내의 한 점에 도달한 음파는 한 점에서 다른 점으로의 에너지 전달 현상으로 이해할 수 있다. 따라서 음파는 물질전달 없이 에너지전달이 이루어진다. 음파가 유체내를 전파하는 동안 에너지는 감소하는데, 여기서 에너지의 변화는 음향 흐름현상의 결과로 생기는 힘과 일치한다. 이때 이 힘을 단위부피로 나눈 결과는 유체내에서의 음파 전파에 의한 음압의 변화율과 같음을 알 수 있다.[7][8] 그리고 이러한 음향 흐름현상은 근거리 음장에서의 음향세가의 변화, 고주파 안에서의 에너지 변화, 음파의 여러 가지 감쇠요인등의 변수에 의해 영향을 많이 받는다.

본 실험은 실험실 조건하에서 함수 발생기에서 만들어진 신호를 출력 증폭기로 증폭하여, 음파 변환기를 통해서 발생하는 음파를 이용하여, 전기분해장치로 만들

어준 기포가 음파에 의해 밀려나는 현상을 관측하여, 입사음파의 매개변수인 구동주파수와 음압진폭의 변화가 음향 흐름현상에 어떠한 변화를 주는지 확인한다.

## II. 실험 방법

### 1. 실험 장치

실험에 사용된 수조는 크기가  $90 \times 30 \times 45$  cm이며, 수조 벽면으로부터 산란된 음파의 영향을 최소화하기 위하여 수조의 벽면에 무반향 흡음물질을 부착하였다. 수중에서 입사음파의 구동주파수와 음압진폭의 변화에 따른 음향 흐름현상을 관측하기 위하여 전기분해법을 이용한 기포 발생장치를 수조의 가운데에 설치하였다. 기포 발생장치에 인가된 전압과 전류는 각각 10 V와 2 A이며 발생된 기포는 수소기체이다. 수중에서 형성된 기포층이 입사음파의 음압 이외에 어떠한 역학적인 영향도 받지 않도록 하기 위해 기포 발생장치 위에 크기가  $30 \times 40$  cm이고, 각 면이 평평하게 고정된 얇은 비닐막(Thin Vinyl Film)을 설치하였다. 얇은 막으로부터 5 cm의 수직거리에 음파 변환기들을 구동주파수의 영역에 따라 차례로 교환할 수 있도록 설치하였다.

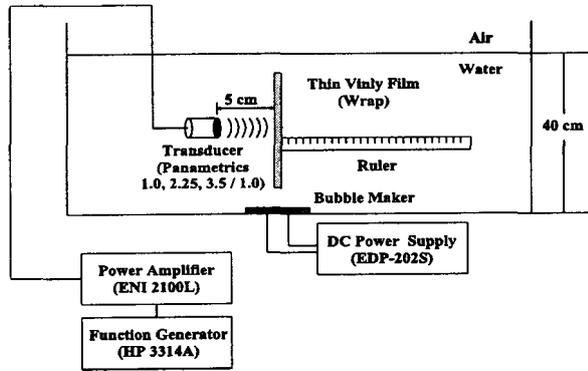


그림 1. 실험장치도.

음파 변환기는 각각 직경이 2.54 cm 이고, 구동 공진주파수가 1.0, 2.25, 3.5 MHz인 음파 변환기로서, 실험에서 사용한 구동주파수는 각 음파 변환기의 실제 공진주파수를 기준으로 하여 100 kHz간격으로 5개의 주변 주파수를 선택하였다.

각각의 음파 변환기는 함수 발생기(HP3314A)와 출력 증폭기(ENI 2100L)로 연결되었다. 함수 발생기로부터 공급된 파형은 1.0 MHz의 음파 변환기에 대하여 0.19 V에서 0.33 V의 진폭을 가지는 연속파 형태의 정현파이

며, 2.35 MHz의 음파 변환기에 대하여는 0.18 V에서 0.41 V의 진폭을 가지는 연속파 형태의 정현파를, 3.5 MHz의 음파 변환기에 대하여는 0.19 V에서 0.47 V의 진폭을 가지는 연속파 형태의 정현파였으며, 증폭율은 50 dB이었다.

### 2. 얇은 막의 존재에 대한 고려

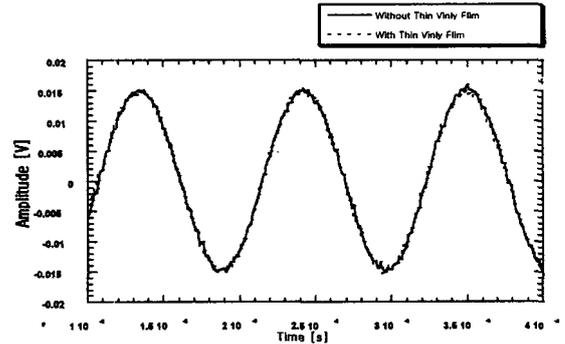


그림 2. 얇은 막이 있을 때와 없을 때의 1 MHz 음파 파형.

그림 2는 수중에서 얇은 막이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 대해서 1 MHz 주파수로 구동한 음파의 주축에서 측정된 파형을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 음파의 진폭은 얇은 막이 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우에 따라 거의 차이를 보이지 않고 있다. 이것은 음파가 얇은 막을 투과할 때 거의 음파의 손실이 없다는 사실을 의미하므로 본 연구에서는 수중에서 음파가 전파할 때, 얇은 막의 존재에 대한 고려를 무시하였다.

### 3. 기포의 크기 측정

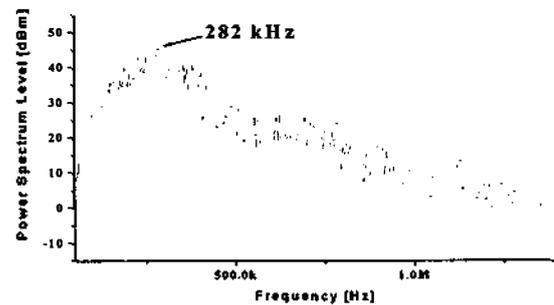


그림 3. 기포의 공진 주파수에 따른 음파의 흡수 스펙트럼.

본 연구에서는 기포의 크기분포를 측정하기 위해 기포 발생기에 10 V의 전압과 2 A의 전류를 공급하여 기포들이 연속적으로 발생된 상황에서 선형적인 방법을 이

용하여 수중에서 기포들의 크기를 측정하였다. 그림 3은 기포들의 공진주파수에 따른 음파의 흡수 정도를 나타낸 것으로 주파수 1 MHz부터 1.4 MHz까지 흡수 발생기의 진동수 쓸기(frequency sweep)기능을 이용하여 수중에서 기포집단의 존재 여부에 따라 입사되고 있는 주파수별 음파의 투과손실을 나타내고 있다. 이로부터 공진주파수 282 kHz 부근에서 반경이 11.7 μm주변인 기포들이 기포 발생장치로부터 발생되고 있음을 알 수 있다.[9]

#### 4. 음파 변환기의 수신강도 측정

수중에서 음파 변환기로부터 발생된 음파의 진폭을 측정하기 위해 1.0, 2.25, 3.5 MHz 각각의 음파 변환기에 대하여 자체 교환 교정법(self-reciprocity calibration method)[10]을 이용하여 수신강도를 측정한 후, 이를 이용하여 구동 음파 변환기의 입사음압과 입력음압을 결정하였다. 자체 교환 교정법은 강도가 측정된 표준 변환기를 사용하지 않는 편리성 때문에 많이 이용되는 방법 중의 하나이다.

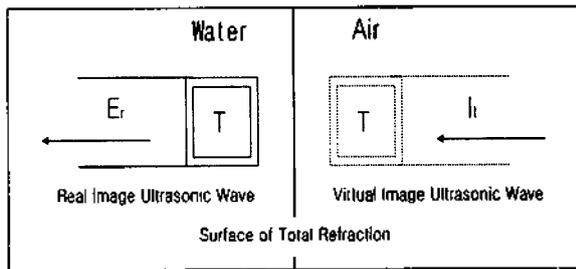


그림 4. 음파 변환기의 수신 강도 측정 원리.

1.0 MHz 음파변환기		2.25 MHz 음파변환기		3.5 MHz 음파변환기	
주파수	수신강도	주파수	수신강도	주파수	수신강도
0.8 MHz	-193.9	1.7 MHz	-191.6	2.8 MHz	-193.7
0.9 MHz	-194.3	1.8 MHz	-189.5	2.9 MHz	-193.3
1.0 MHz	-194.1	1.9 MHz	-189.2	3.0 MHz	-192.8
1.1 MHz	-195.9	2.0 MHz	-187.9	3.1 MHz	-193.4
1.2 MHz	-196.7	2.1 MHz	-188.7	3.2 MHz	-193.6

※ 수신강도의 단위 : dB re 1V/μPa

표 1. 1.0, 2.25, 3.5 MHz 음파 변환기의 주파수별 수신강도.

본 연구에서 측정된 1.0, 2.25, 3.5 MHz 음파 변환기의 주파수별 수신강도는 표 1과 같이 각각 나타났다.

### III. 결과 및 분석

흡수 발생기에 구동주파수가 2.0 MHz, 진폭전압이 200 mV인 신호를 출력 증폭기를 통해 2.25 MHz 음파 변환기에서 통하여 구동시킨 음파를 앞서 수신강도를 구한 음

파 변환기에 입력하였을 때, 음파 변환기로부터 5 cm의 거리에 위치한 기포층에서 입사음압을 결정하기 위해서 자체 교환 교정법을 이용하여 수신강도가 결정된 음파 발생기를 기포층의 위치에 설치하여 입사음압을 결정하였다. 측정된 입사음압은  $2.93 \times 10^3$  Pa이었으며, 이것을 기준으로하여 나머지 구동주파수들에 대한 음파들의 입사음압을 동일하게 하여주기 위해서 표 1에서 나타난 수신강도를 이용하여 입사음파 변환기에 구동주파수별 입력진폭전압을 보정하였다.

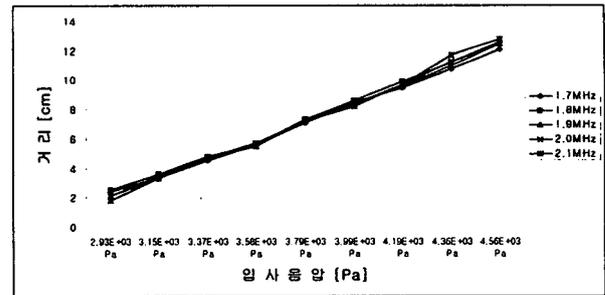


그림 5. 2.25 MHz 음파 변환기에서 입사음압변화에 따른 결과.

그림 5는 2.25 MHz 음파 변환기에서 고정된 구동주파수에서 입사음압의 변화에 따른 음파에 의해 밀려난 기포의 밀림현상의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 고정된 구동주파수에서 입사음압이 증가할수록 1.23의 기울기로 거의 선형에 가깝게 기포의 밀려난 거리가 증가함을 알 수 있다. 입사음압이  $2.93 \times 10^3$  Pa일 때 구동주파수 2.1 MHz에서 1.8 cm가 측정되었고, 입사음압이  $4.56 \times 10^3$  Pa일 때 구동주파수 2.1 MHz에서 12.8 cm가 관측되어 거리의 차이는 11.0 cm를 나타내고 있다.

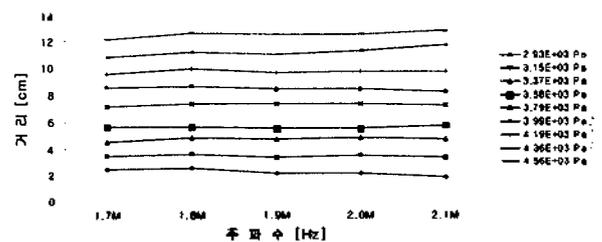


그림 6. 2.25 MHz 음파 변환기에서 구동주파수변화에 따른 결과.

그림 6은 그림 5와는 반대로 입사음압은 고정되고 구동주파수의 변화에 따른 음파변화에 의해 밀려난 기포의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 6의 결과는 그림 5의 결과와는 다르게 고정된 입사음압에서 구동주파수를 변화시켜도 음파에 의해 밀려나는 기포의 거리변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

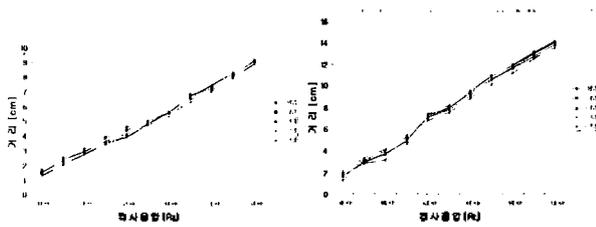


그림 7. 1.0 MHz와 3.5 MHz 음파 변환기에서 입사음압변화에 따른 결과.

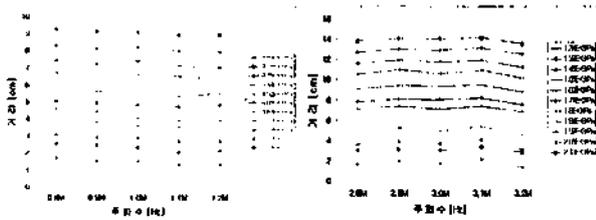


그림 8. 1.0 MHz와 3.5 MHz 음파 변환기에서 구동주파수변화에 따른 결과.

그림 7은 1.0 MHz와 3.5 MHz 음파 변환기에서 구동주파수가 고정되고, 입사음압변화에 따른 결과이고, 그림 8은 1.0 MHz와 3.5 MHz 음파 변환기에서 수신음압이 고정되고, 구동주파수변화에 따른 결과를 나타내고 있다. 결과에서 보듯이 입사음압의 변화에 의해 2.25 MHz 음파 변환기와 같이 1.0 MHz와 3.5 MHz 음파 변환기에서도 각각 0.73, 1.24의 기울기로 기포 밀림현상이 증가하였고, 구동주파수의 변화에 의해서는 거의 차이를 보이지 않았다. 이 실험 결과, 음파 변환기에서 구동시킨 음파에 의해 밀려나는 기포의 밀림현상은 입사음파의 진폭 증가에 따라 현저하게 증가하였고, 구동주파수 변화에 따라서는 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있었다. 매질을 통하여 음파가 전달될때 음파는 에너지전달 현상으로 볼 수 있으며 에너지는 단위면적당 전달되는 음향파위의 시간평균인 음향세기와 부합된다. 따라서 수신음파의 진폭이 커지면 음향세기가 커지기 때문에 에너지가 증가하게 되므로 고정된 구동주파수에서 입사음압의 증가에 따라 기포의 밀림현상이 현저하게 증가한 것으로 해석할 수 있다. 그러나 본 실험에서는 고정된 입사음압에서 구동주파수가 증가함에 따라 기포 밀림현상은 확인할 수 없었다.

#### IV. 결 론

음파가 유체내에서 전파하는 경우에 음파의 흡수로 인한 음장방향으로의 유체 흐름현상인 음향 흐름현상은 유체내에서 입사음파의 구동주파수나 음압진폭등에 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는다. 본 실험에서는 입사음파의 구동주파수와 음압진폭의 변화를 주며, 이에

따른 결과를 미세한 기포가 음파에 의해 밀리는 현상을 관측하여 비교하였다. 실험결과는 고정된 구동주파수에서 입사음압이 증가함에 따라 기포 밀림현상은 선형적으로 증가한 것으로 관측되었다. 하지만 고정된 입사음압에서 구동주파수가 증가함에 따라 기포 밀림현상은 확인할 수 없었다. 본 측정결과로부터 음향 흐름현상은 입사음파의 음압진폭에 대하여는 상당한 영향을 받았고, 구동주파수에 대해서는 관측할 수 없었으며, 이것은 좀더 연구가 수행 되어져야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 2000년도 한국학술진흥재단 기초과학 연구지원사업(DP0178)지원으로 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] T. G. Leighton, *The Acoustic Bubble*, (Academic Press, 1994) 56 - 58.
- [2] Mark F. Hamilton and David T. Blackstock, *Nonlinear Acoustics*, (Academic Press, 1998) 207 - 231.
- [3] M. Faraday, *Phil. Tran. Rev. Soc. (London)* 121, 229 (1831).
- [4] Williams AR, "DNA degradation by acoustic microstreaming." *J. Acoust. Soc. Am.* 55, S17A (1974).
- [5] Williams AR and Slade JS. "Ultrasonic dispersal of aggregates of *Sarcina lutea*" *Ultrasonics*, 9, 85-87 (1971).
- [6] Williams AR, Hugh DE and Nyborg WL. "Hemolysis near a transversely oscillating wire." *Science*. 169, 871-873 (1974).
- [7] R. T. Beyer, *Nonlinear Acoustics*, (Acoust. Soc. Am., 1994) 239 - 268.
- [8] Nyborg W. *Acoustic Streaming. Physical Acoustics, Volume 11* (Mason WP, ed.). Academic Press, New York, 1975.
- [9] M. S. onquet-Higgins, B. R. Kerman, and K.Lund, "The release of air bubbles from an underwater nozzle" *J. Fluid Mech.* 230, 365-390, (1991).
- [10] R. J. Bobber, *Underwater Electroacoustic Measurements* (Peninsula Pub, LA, 1970), 24-33.