

## 뜨거운 판 위에 떨어뜨린 액체 방울에서 나는 잡음 분석

현광호\* · 현남규

\*한국과학영재학교, 제주대학교 자연과학대학 물리학과

### 요 약

뜨거운 판 위에 액체 방울을 떨어뜨린 후 거기에서 나는 잡음을 분석하였다. 뜨거운 스테인레스 판의 온도가 이 실험에서 조사 한  $160^{\circ}\text{C}$  이상  $400^{\circ}\text{C}$  이하의 온도 영역에서는,  $3000\text{Hz}$ 와  $5000\text{Hz}$  대의 두 주파수 영역을 중심으로 하여 여러 음파들이 잡음을 구성하는 것을 알 수 있었다. 특히 저주파수의 음의 상대 진폭이 고주파수의 경우보다도 크게 나옴을 알 수 있었다. 또한 온도가 올라감에 따라 전체적인 음역대가 상승함을 알 수 있었다. 여러 종류의 판에 대하여 실험해 본 결과 떨어뜨리는 높이가 높을수록, 물방울이 탁할수록 평균주파수가 높아졌으며, 뜨거운 판의 표면상태가 매끄럽지 못할수록 평균주파수가 높아지는 정도는 눈에 띄게 낮아졌다.

### 1. 서론

뜨거운 판 위에 물 한 방울을 떨어뜨리고 실제 현미경으로 이것을 관찰해 보면, 온도가 낮을 때에는 물방울 속에 기포가 생기지 않으나 온도가 올라감에 따라 작은 기포가 많이 생기면서 터지기를 반복하다가 모두 증발된다. 온도가 더 높은 판 위에 물방울을 떨어뜨리면, 기포의 크기도 커지고 빠른 시간 내에 기포가 터지면서 금새 증발되어 버린다. 그리고 더욱 더 온도가 높은 판 위에 물방울을 떨어뜨리면, 떨어지는 순간에 바로 폭발하듯이 증발되어 현미경의 시야에서 그것들이 사라져 버린다. 물방울에 있는 기포들이 모두 증발하고 나면 그 잡음이 없어진다. 따라서 이때 나는 잡음의 근원은 기포가 터지면서 방출한 충격파(shock wave)와 카오스적인 거품

의 진동에 기인한다고 볼 수 있다. 거품에 관한 운동방정식을 구성하여 이론적으로 시뮬레이션 하고 난 다음에 실험 결과와 그것을 비교 하는 것이 바람직 하기는 하나, 기포의 모양이나 크기 및 개수가 일정하지 않을뿐더러 그것이 끊임없이 진동하기 때문에 이론을 구성하는 것 자체가 매우 어려운 문제이다. 그러나 어느 정도의 일정한 압력이 보장되는 물속에서 생겨난 구형의 거품이 어떤 행동 양상을 보이는데 대해서는 bubble dynamics 등에서 상세하게 기술되어 있다. 하지만 이러한 이론으로는 뜨거운 판 위에 떨어진 액체 방울들이 내는 잡음을 이론적으로 정량화 시키는 것은 매우 어렵다. 하지만 액체속의 기포에서나 뜨거운 판 위에서의 소리의 발생 원리를 간략하게 소개하는 것은 이 문제에 대한 실험 결과를 분석하는 데에 어느 정도 도움이 될 것이다.

실험 설계를 위해서 먼저 정량화 시킬 수 있는 뜨거운 판의 재질이나 액체 종류, 떨어뜨릴 액체 방울의 양 및 판의 온도 등을 매개 변수로 잡는다. 그런 후 적절한 실험장치를 설계 한 다음에 뜨거운 판 위에 떨어진 액체 방울에서 나는 잡음의 신호를 녹음하고, 스펙트럼분석기를 통하여 그 소리의 스펙트럼을 분석하여 이 잡음의 음색이 어떤 물리적인 변수들에 의해서 크게 좌우되는가를 찾아내는 방법을 중점적으로 서술하려고 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 기포에서의 소리의 발생

#### 기포 형성

액체 속에 인위적으로 기포를 만들어 넣을 수도 있고, 자동적으로 기포가 만들어 질 수도 있다. 자동적으로 생긴 기포 안에 있는 기체는 수증기가 주를 이룬다. 우리가 물을 끓일 때 기포가 형성되는 것을 늘 봐서 알듯이 기포가 만들어지는 과정을 공동화(Cavitation: 더 자세히 말하자면 핵형성nucleation)라고 한다. 공동화는 공간의 압력  $p(x)$ 이 수증기압  $P_v$  아래로 떨어질 때, 액체 내에서 일어날 수 있다. 수증기압은 온도에 의존하기 때문에 공동화를 만들기 위해서는 액체 온도를 높여 주는 것도 하나의 방법이다: 20°C 물의 수증기압은 0.023 bar이지만 100°C 물에서는 1 bar이다. 따라서 물이 끓게 된다.

공동화를 만드는 또 다른 방법은 공간의 물 흐름 속도  $U(x)$ 를 증가시키는 것이다. 쉬운 실험으로서는 파이프의 한 부분의 단면을 감소시키는 것인데, 그러면 연속의 법칙에 의하여 단위시간에 파이프 단면을 통과하는 유체

의 질량이 보존되어야 하므로 그곳의 속도를 빠르게 만들 수 있다. 퍼텐셜이 일정한 흐름에 대해서는 다음의 베르누이 방정식에서 압력  $p(x)$  구할 수 있다.

$$p(x) + \frac{1}{2}\rho U^2(x) = constant \quad (1)$$

기압이 1 bar이고 상온일 때에는 약 14m/s의 물의 속력만으로도 기포를 응집시키기에 충분한다. 베르누이는 점성효과, 액체에 포함된 기체, 불순물, 비균질성이나 벽의 효과 등을 고려하여 방정식을 세우지는 않았다. 그런데 아주 순수한 물에서는 정상적인 물에서보다 공동화가 훨씬 많이 발생한다. 마이크로미터 크기보다 작은 기포에 남아있는 불순물이나 표면 위의 갈라진 틈 같은 것은 기포 형성 과정에서 큰 역할을 하는 것 같다. 하지만 아직도 우리는 공동화에 대하여 완전히 이해하지 못하고 있다[1].

#### 진동하는 기포와 소리의 발생

기체는 압축 가능하기 때문에 기포는 정적인 주위 상황에서의 반경  $R_0$  근방에서 주기적으로 진동한다.

단일한 압력의 펄스를 기포에 가해 주게 되면, 기포 공명 주파수  $f_0$ 가 가장 오래 살아남는다: 그러나 모든 다른 주파수는 일찌감치 없어지게 된다. 공명 주파수를 계산하기 위해서는 기체 기포에 있는 압력에서 생겨나는 회복력(restoring force)이 있어야 한다.  $R_0 \gg 1\mu m$ 인 충분히 큰 기포에는, 이 힘은 주위 압력  $P_0$ 와 실제 반경  $R(t)$ 에 의존한다. 공명 주파수는 다음 식과 같이 주어진다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho R_0^2}} \quad (2)$$

여기서 상수  $\gamma$  는 기체의 정압과 정적 열용량의 비율이다. 표준상태에서 물에 있는 기체 기포에 대해서 방정식 (2) 는  $f_0 R_0 \cong 3 kHz$  로 된다.

이러한 기포의 고유주파수는 비올 때 물 밑에서 나는 소리에서 알 수 있다. 빗방울이 호수와 부딪치는 지점에서 생기지 않는다. 오히려 그것들의 충격시에 작은 기포가 생기는데, 격렬한 기포형성 과정으로 인해서 기포는 압력을 받게 되고, 이어서 고유 주파수로 진동하게 된다.

그리고  $c$  가 물속에서의 소리 속도라고 할 때,  $t' = t + r/c$  인 지연된 시간에 기포에서 거리  $r$  만큼 떨어진 곳에서 다음 식에 따르는 압력에 상응하는 소리가 나는 것을 들을 수 있다.

$$P_s(r, t') = \frac{\rho R}{r} (2\dot{R}^2 + R\ddot{R}) \quad (3)$$

이 과정에서 생기는 기포는 약  $0.2mm$  반경을 가지며 공명 주파수는 우리가 들을 수 있을 정도인 약  $f = 15 kHz$  근방이 된다[1].

## 2.2 뜨거운 판 위에서 생긴 기포에서의 소리의 발생

대기에 직접 노출된 물은 대개가 정상적인 끓는 온도인  $T_s$  에서 끓게 된다. 예컨대 공기압이 1 기압 일때,  $T_s$  는 약  $100^\circ C$  이다. 후라이팬 바닥에 있는 물은 대기에 직접 노출되지 않기 때문에, 바닥의 물을 끓는 점 이상이나 끓는 점보다 몇도 이상으로 가열하더라도 액체 상태로 남아있을 수 있다. 이렇게 끓이는 과정 중에 바닥에 있는 뜨거운 물은 올라오고 차가운 물은 내려가는 대류에 의해서 계속 물이 섞여진다.

계속 후라이팬 온도를 증가시키면, 그림 1에서 기포들이 생성되는 것처럼 물분자들은 마른 굽힌 틈새에서 작은 수증기 기포로 모아지면서, 밑에 층에 있는 물은 증발되기 시작한다. 핑, 핑, 부글부글 소리가 나면 물이 끓는 단계임을 확인할 수 있다. 수증기 기포가 팽창해서 위쪽으로 약간 더 차가운 물속으로 들어갈 때마다 기포는 갑자기 터진다. 왜냐하면 기포 안에 있는 수증기가 응축하기 때문이다. 기포가 터질 때 음파를 보내게 되는데 핑하는 소리가 바로 그것이다. 일단 물 전체 온도가 증가하게 되면, 기포는 갈라진 틈을 떠나서 물 겉 표면 일부까지 올라가서야 비로소 터지게 된다. 이러한 끓이는 단계는 그림 2에서 "고립된 수증기 기포"로 분류된다.

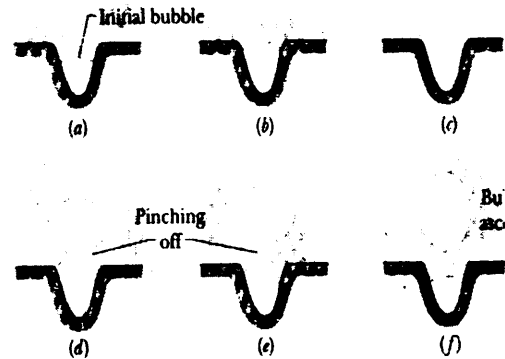


그림 1 바닥의 굽힌 틈에서 거품이 생겨나는 모습

계속해서 후라이팬의 온도를 높이면, 기포가 터지는 소리는 더 크고 소란스럽게 들리다가 그 다음에 사라진다. 액체 전체가 충분히 뜨거워져서 수증기 기포가 물 겉 표면에 도달하면 기포가 터지는 소음이 잠잠해지기 시작한다. 물의 겉 표면에서 기포는 가벼운 튀기는 소리를 내면서 터지게 된다. 그래서 결국 물 전체가 끓게 된다.

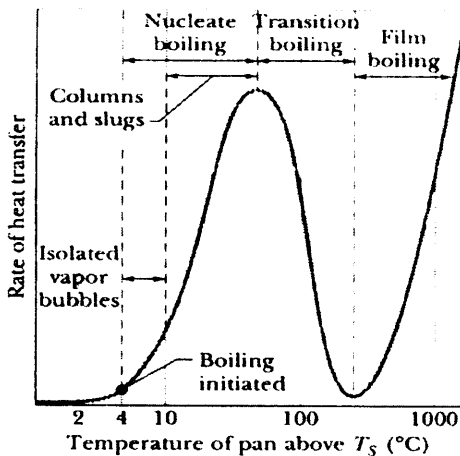


그림 2. 물에 대한 끓는(boiling) 곡선

만약 실험 도구가 부엌에 있는 레인지라면 더 이상 할 얘기가 없다. 하지만 실험실 버너를 사용했을 때는 상황이 다르다. 왜냐하면 이 버너의 온도를 계속 높일 수 있기 때문이다. 버너 온도를 계속 높이게 되면, 증기 기포가 아주 많아지게 되고 후라이팬 바닥의 틈새에서 기포가 계속 만들어져 나오게 된다. 그래서 증기 기포들이 합쳐져서 증기 기둥 모양으로 보이게 되며 무질서하면서도 격렬하게 위쪽으로 쏟아져 올라가게 된다. 가끔은 주위에서 멀리 떨어져 있었던 기포들도 가세를 한다.

이렇게 증기 기포와 기포들이 모여 기둥모양을 형성하는 것을 '핵 끓음'이라고 한다. 왜냐하면 기포가 만들어지고 기둥모양이 형성되는 것은 주로 '핵형성' 역할을 하는 팬바닥 틈새에서 이루어지기 때문이다. 냄비온도를 높일 때면 항상, 물에 열로서 전달되는 에너지비율은 증가하게 된다. 계속해서 팬 온도를 높여서 기둥단계를 벗어나게 한다면, 새로운 비등 단계로 접어들게 되고 이를 '전이기'라고 한다. 그리고 팬 온도를 매번 증가시키면 에너지가 물에 전달되는 비율이 감소하게 된다. 에너지 전달율이 감소되는 것은 모순이 아니다. 전이기에 팬 바닥에는 많은 수증기가 층으로 깔려 있

기 때문이다. 수증기는 대략 어느 값에서, 그 10배까지의 범위에서, 액체인 물보다 열전달을 더 잘 하지 못하기 때문에, 물에 에너지 전달이 감소되는 것이다. 팬이 뜨거우면 뜨거울수록, 물이 팬바닥과 접촉을 직접할 수 없게 될 때와 동시에 팬으로부터 물로 에너지 전달이 더 안좋게 된다.

계속 후라이팬의 온도를 증가시키면, 팬 바닥 표면 전체가 증기 층을 이루게 되어서, 복사와 전도로 증기 위의 물로 에너지를 전달하게 된다. 이러한 상태를 그림 2에서와 같이 "필름 끓음(film boiling)"이라 한다[2].

### 2.3 기포 붕괴와 충격파 발생

기포가 붕괴하는 주위의 유체가 40 ~ 60 kbar 정도의 강한 압력으로 압착되기 때문에 충격파가 발생된다는 보고가 있다. 이때 기포 근방에서의 충격파의 속력은 4000m/s정도가 되는데, 이것은 보통 물속에서의 소리의 속력이 1430m/s인것에 비하면 매우 빠른 속력인 것이다[3].

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1 매개변수

액체를 뜨거운 판 위에 떨어뜨렸을 때에 나는 소리(잡음)들과 직접 관계되는 매개변수들(parameters)로서 생각되나 실험에 의하여 그 관련성이 검증되어야 할 사항들로서 다음과 같은 것들을 고려했다.

- 1) 뜨거운 판(Hot surface)의 재질
  - 강철, 스테인레스, 알루미늄, 황동, 돌
- 2) 뜨거운 판의 온도
- 3) 떨어뜨리는 액체의 종류

- 증류수, 합성세제

4) 액체 방울을 떨어뜨리는 높이

### 3.2. 실험 장치

1) 220 V 용 니크롬선(열선)을 사용하여, 220V용 전기로를 제작한다.

2) 이 전기로를 변압기를 써서 110 V 용 슬라이더스에 연결한다.

3) 전기로 위에 15×15cm의 얇은 알루미늄판을 덮는다. 이 판의 중심에 구멍을 뚫고 K-Type(알루미늄 크롬)열전쌍을 설치하고 데이터 획득기(Hydra Series II)에 연결한다.

4) Pasco 장비를 설치하고 Maya44 MKII 사운드카드가 장착된 컴퓨터에 ECM-8000 측정용 마이크를 연결한다.

5) 소리의 특성을 규정하는 음색을 찾아내고 잡음의 형성에 주된 기여를 하는 주파수를 분석하기 위하여 데이터 스튜디오 및 Sound Forge 프로그램을 컴퓨터에 설치한다.

6) 일정한 높이에서 물방울을 떨어뜨리기 위해 스탠드를 갖다 놓는다.

7) 일정한 물방울의 양을 떨어뜨리기 위해서 주사기나 마이크로 파이펫을 준비한다.

8) 뜨거운 판위에 떨어진 물방울의 거동을 측정하기 위해서 캠코더, 현미경, CCD 카메라를 준비하고 분석 소프트웨어(premiere)도 다운로드 받는다.

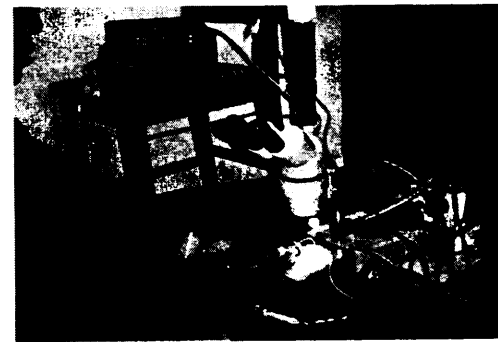
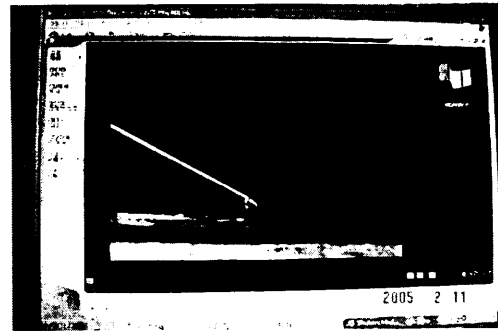
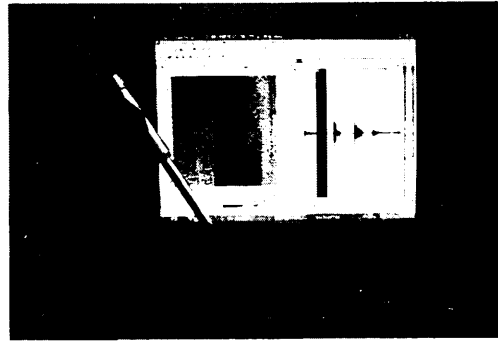
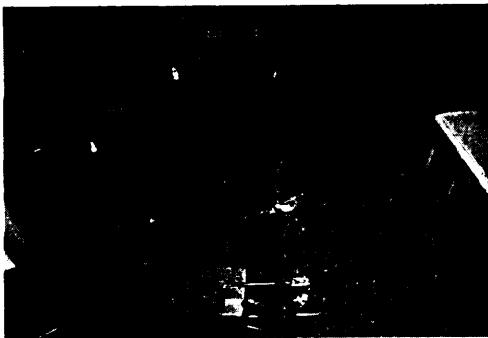


그림 3. Noise 실험장치 및 분석장면



### 3.3. 실험 방법

1) 슬라이더스를 천천히 돌리면 스테인레스 판의 온도가 올라가기 시작하여 특정온도 근방에서 더 이상 온도가 올라가지 않는다.

2) 판이 특정 온도에서 일정한 온도가 지속되면 마이크로 파이펫을 사용하여 9 $\mu$ l의 증류수를 20센티미터 높이에서 떨어뜨린다.

3) 이때에 성능이 좋은 측정용 마이크를 사

용하여 판위에 떨어진 증류수 방울에서 나는 소리를 측정한다.

4) 판이 마른 다음 시간이 조금 지나서 다시 판이 일정한 온도가 되면 같은 실험을 되풀이 한다.

5) 판의 온도가 400℃가 될 때까지 점차적으로 전압을 올리면서 실험을 계속한다.

6) 데이터 스튜디오 및 Sound Forge라는 소프트웨어로부터 녹음된 잡음의 스펙트럼을 분석한다.

7) 1초에 2만개(Data Studio) 및 4만개의 Sample을 저장한 data를 분석하여 0~20,000 Hz사이의 잡음의 주파수별 진폭을 소리의 스펙트럼을 통하여 분석한다.

8) 모든 데이터에 대한 7)번과 같은 분석결과를 처리하여 측정값에 대한 표를 만든다.

9) 온도가 증가함에 따라서 물방울이 증발하는 과정을 현미경으로 보고, 나타난 영상을 CCD카메라와 캠코더로 찍어서 컴퓨터에 입력하여 Premiere로 분석한다.

#### 4. 측정값

##### 4.1 파스코 장비 사용

표 1에 나와 있는 측정값들을 Data Studio 프로그램으로 FFT 분석한 결과를 그림 4에 제시하였다. 이 그림을 분석하여 해보면, 뜨거운 스테인레스 판의 온도가 120℃에서 160℃까지는 측정된 잡음의 주파수는 단일 피크를 특징으로 한다. 160~170℃에서 부터는 잡음은 두 개의 주파수 영역에서 주된 기여를 하게 된다. 그런데 약 250℃가 될 때까지는 두 주파수 중에서 저주파나 고주파 중에 그 어느 특정 주파수의 진폭이 크게 나타나는 경향을 보이지는 않았다. 그러나 250℃에서 430℃에 이르는 과정에서는 저주파 영역에서의 소음 주파수 진폭

이 고주파보다 상대적으로 크게 나왔다.

표 1. 온도에 따른 소음의 주된 진동수와 상대 진폭

온도(℃)	진동수 1		진동수 2	
	진동수(Hz)	상대진폭	진동수(Hz)	상대진폭
433	3481	1.0	5774	0.8
429	3548	1.0	5903	0.9
426	3387	1.0	5613	0.6
423	3532	0.9	5984	0.6
418	3355	1.0	5468	0.5
415	3274	1.0	5371	0.7
408	3403	1.0	5387	0.8
380	3581	0.9	5806	0.5
369	3355	1.0	5435	0.5
360	3274	1.0	5758	0.7
347	3387	1.0	5645	0.8
341	3613	1.0	5645	0.9
333	3581	0.7	5323	1.0
328	3613	1.0	5468	0.9
322	3468	1.0	5403	0.8
313	3355	0.9	5661	1.0
308	3403	1.0	5565	0.8
304	3613	1.0	5919	0.9
289	3258	1.0	5419	0.8
284	3403	1.0	5639	0.9
280	3371	1.0	5952	0.8
262	3226	1.0	5903	1.0
258	3306	0.8	5581	1.0
241	3629	0.7	5435	1.0
231	3613	0.9	5290	1.0
209	3548	0.5	5210	0.3
201	3548	1.0	4839	0.7
619	3548	1.0	4581	0.6
185	3613	0.3	4742	0.7
190	3500	1.0	4774	1.0
175	3813	0.6	4516	1.0
164	4032	0.7	4032	0.7
157	4000	0.9		
152	4210	0.9		
147	4355	0.6		
141	4032	0.6		
130	4242	0.3		
127	3919	0.2		
124	4016	0.2		
122	4048	0.1		

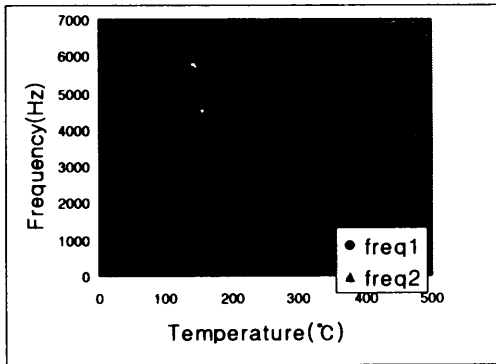


그림 4. 소음을 구성하는 주된 주파수 성분의 온도 의존성

이러한 현상은 그림 2번 중의 “필름 끓음 (film boiling)” 현상과 관련되는 것으로 생각된다. 즉, 물방울이 떨어지면서 뜨거운 철판과 부딪치는 순간에 나는 소리가 그 하나이고, 뜨거운 판에서 뿜겨져 나온 물방울들이 주위의 뜨거운 구리판에 부딪치면서 나는 2차 소리들이

또 다른 하나의 주파수 영역들을 차지한다고 생각된다.

#### 4.2 측정용 마이크 사용

ECM-8000 측정용 마이크를 사용하여 1m 높이에서 9 $\mu$ l의 일정한 양의 증류수를 알루미늄 판(15×15×0.2cm)위에 각각의 온도에 대하여 3번씩 투하하였을 때 나오는 주요 잡음들의 평균 주파수를 표2에 제시하였다. 또한 0.2m 높이에서 같은 양의 증류수로 스테인레스판(30×30×0.2cm)과 같은 규격의 강철판에 투하했을 경우도 표2에 제시했다.

표3에서는 황동판(15×15×0.2cm)과 알루미늄 판위에 각각 20cm 높이에서 증류수와 합성세제를 각각의 온도에서 세 번씩 투하한 경우에 나오는 잡음의 주요주파수들의 평균 주파수들과 표준편차를 나타낸다.

표 2. 1m,와 0.2m 위에서 증류수 방울을 30cm\*30cm\*0.22cm(가로\*세로\*높이) 규격의 강철판과 스테인레스판 위에 떨어뜨린 직후, 측정용마이크로 측정 및 분석한 음파의 온도에 따른 평균 진동수 및 표준편차.

온도(°C)	알루미늄판 (1m투하)		스테인레스판 (0.2m투하)		강철판 (0.2m투하)	
	평균진동수(Hz)	표준편차	평균진동수(Hz)	표준편차	평균진동수(Hz)	표준편차
100	9111.83	1538.35			9810.83	327.64
120	9092.83	480.73	9398	1042.695	9650.33	605.64
140	10587.00	707.45	10309.5	270.6802	10070.00	439.20
160	13955.17	818.04	9985	1019.811	10536.67	953.44
180	15340.33	1060.84	12116.83	1837.685	10000.00	0.00
200	14702.50	1537.42	12154.67	1059.974	11113.33	1928.35
220	15963.67	1521.24	12356.5	624.8672	11201.83	2081.63
240	16099.33	379.49	12520.5	265.6694	11454.00	2518.40
260	16783.67	800.90	13416	265	11504.50	2605.87
280	19167.83	173.37	14134.83	429.7041	10621.50	1076.47
300	19267.67	473.80	15068.33	1298.301	11473.50	488.07
320	18978.50	619.30	16569.5	2015.746	11385.83	96.195
340	19735.50	196.58	17288.33	1190.788	12331.17	457.88
360	19672.33	121.58			13176.33	859.88

표 3. 0.2m 위에서 증류수 및 합성세제 방울을 15cm\*15cm\*0.2cm(가로\*세로\*높이)의 알루미늄 판 및 황동판 위에 떨어뜨린 직후, 측정용 마이크로 측정 및 분석한 음파의 온도에 따른 평균 진동수 및 표준편차.

온도(℃)	황동판 (20cm투하)		알루미늄판 (20cm투하)		알루미늄판 (20cm투하, 합성세제)	
	평균진동수(Hz)	표준편차	평균진동수(Hz)	표준편차	평균진동수(Hz)	표준편차
100	9283.00	1113.67	10000.00	0.00	5972.75	1375.67
120	10246.50	220.88	10194.25	274.71	8236.33	1386.28
140	10166.67	288.67	10729.25	642.40	10567.83	1918.13
160	11127.83	1205.61	11165.25	186.32	12999.83	824.97
180	11570.83	1393.66	11410.50	321.02	13857.50	284.05
200	11217.83	1813.88	13415.75	1070.20	14702.50	560.16
220	12381.67	1527.91	14343.00	1525.22	15282.67	946.25
240	13100.67	643.44	14910.75	1097.07	15459.33	1045.11
260	13151.17	1045.14	15705.25	455.02	16645.17	987.06
280	14311.33	343.48	16182.25	630.38	16581.83	846.39
300	14311.50	1065.10	16519.00	481.53	17086.50	472.81
320	15207.00	305.89	17370.25	776.04	16582.00	268.33
340	13693.50	1478.58	17786.50	187.38	17401.83	851.38
360	11877.50	1223.76	18562.25	534.92	18486.83	173.37
380	11740.33	1007.21	19054.25	481.89		

표 4. 0cm 와 0.2m 위에서 증류수 방울을 9cm\*9cm\*1.5cm(가로\*세로\*높이) 규격의 돌판과 5cm\*5cm\*0.2cm의 알루미늄판 및 황동판 위에 떨어뜨린 직후, 측정용마이크로 측정 및 분석한 음파의 온도에 따른 평균 진동수 및 표준편차.

온도(℃)	알루미늄판(접촉투하)		돌판	
	평균진동수(Hz)	표준편차	평균진동수(Hz)	표준편차
100	10053.83	93.24	9839.66	355.25
120	10363.50	95.36	10066.50	115.18
140	10477.00	251.86	10511.33	582.54
160	12899.00	321.66	10385.17	533.41
180	13365.50	351.55	10767.00	590.98
200	14551.17	972.72	10360.00	346.62
220	0	0	10376.00	758.01
240	0	0	10729.33	772.57
260	0	0	10628.50	984.72
280	0	0	10590.33	451.46
300	0	0		
320	0	0		
340	0	0		
360	0	0		
380	0	0		

표 4는 알루미늄판(5×5×0.2cm)위에 바짝 붙여 는 잡음을 구성하는 주요 주파수들의 평균값을  
서 물방울을 투하하였을 때와 단단하고 거칠며 보여준다.  
평평한 돌 위에 0.9μl의물을 투하 했을 때 나오



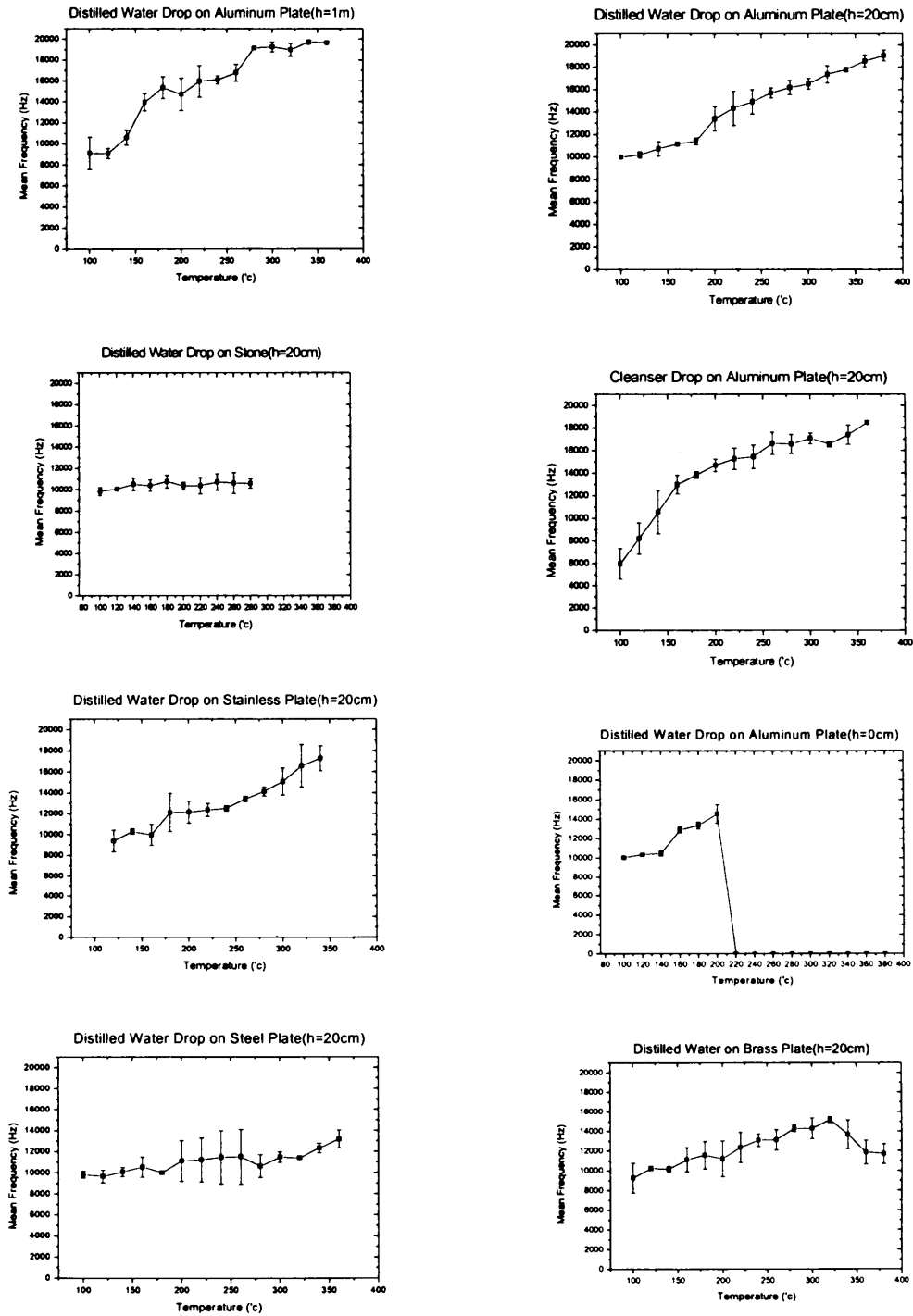


그림 5. 다양한 재질에서의 온도에 따른 평균 잡음 주파수의 대비.

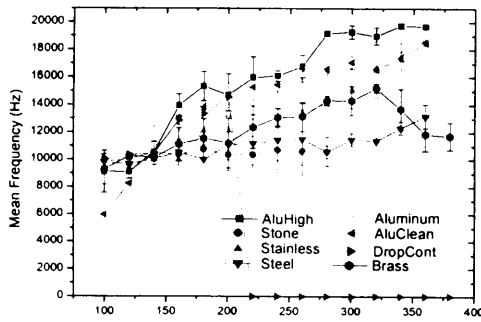


그림 6. 다양한 재질에서의 온도에 따른 평균 잡음의 주파수.

그림 5는 표 2, 3, 4에 제시한 각각의 경우를 그림으로 나타낸 것이며, 그림 6은 그림5를 그림1장에 모아 놓은 것이다. 높은 곳에서 떨어뜨릴 때가 평균 주파수가 제일 높으며, 같은 크기의 강철 판 보다는 스테인레스 판에서가, 청동 판 보다는 알루미늄 판위에서가 고주파가 기여를 많이 했다. 증류수보다는 합성세제를 떨어뜨렸을 때가 고주파가 나왔다. 그리고 필름 끓음 현상이 나타난 이후에는 뜨거운 판과 접촉한 물방울 상태에서는 고주파가 전혀 나오지 않았다.

### 5. 결론

뜨거운 스테인레스 판의 온도가 이 실험에서 조사 한 160°C 이상 400°C 이하의 온도 영역에서는, 3000Hz와 5000Hz 대의 두 주파수 영역을

중심으로 하여 여러 음파들이 잡음을 구성하는 것을 알 수 있었다. 특히 저주파수의 음의 상대 진폭이 고주파수의 경우보다도 크게 나음을 알 수 있었다.

또한 온도가 올라감에 따라 전체적인 음역대가 상승함을 알 수 있었다. 이는 재질에 따라서 그 올라가는 정도에 있어서 차이를 보였다.

물방울을 떨어뜨리는 높이와, 물방울의 탁한 정도도 잡음의 음역 상승정도를 결정하는 요인이 되었다. 떨어뜨리는 높이가 높을수록, 물방울이 탁할수록 평균주파수가 높아졌다. 또한 재질의 표면상태에도 영향을 받았는데, 표면상태가 매끄럽지 못할수록 평균주파수가 높아지는 정도는 눈에 띄게 낮아졌다.

### 참고 문헌

- [1] <http://www.physicstoday.org/pt/vol-56/iss-2/p36.html>
- [2] [http://www.wiley.com/legacy/college/phys/halliday320005/pdf/leidenfrost\\_essay.pdf#search='leidenfrost'](http://www.wiley.com/legacy/college/phys/halliday320005/pdf/leidenfrost_essay.pdf#search='leidenfrost')
- [3] Brenner, M.P., Hilgenfeldt, S., and Lohse, D. "Single-bubble sonoluminescence", *Review Of Modern Physics*, Vol.74 2002), 25-84.