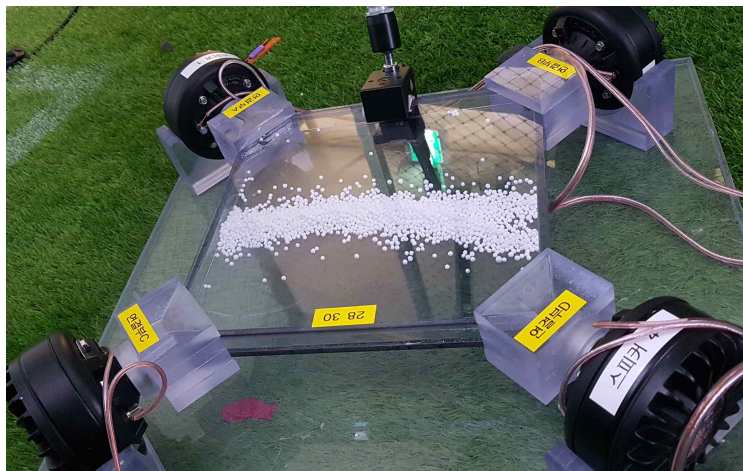


출품번호

1102

제65회 전국과학전람회

2차원 공명 상자 안에서의 정상파 음향 방사력에 의한 미세 입자의 자기 결합 현상 탐구



2019. 9. 11.

출품학생	
지도교사	
구분	학생부
출품부문	물리

목 차

1. 서 론	1
가. 탐구 동기	1
나. 탐구 목적	2
2. 이론적 배경 및 선행 연구 조사	3
가. 정상파와 기주 공명	3
나. 쿤트관 실험	3
다. 직육면체 공명 상자(Room mode) 공명 이론	4
라. 기존의 2차원 정상파 가시화 실험	5
마. 음성 음향학 이론	6
3. 탐구 내용 및 결과	9
가. 2차원 정상파 가시화 탐구	9
1) 2차원 정상파 가시화 장치 개요	9
2) 문제점 개선을 통한 탐구 과정	10
나. 2차원 공명 상자 내에서의 미세 입자 자기 결합 현상 탐구	13
1) 3차 작품에서 관찰된 정상파에 따른 스티로폼 구의 모임 현상	13
2) 3차 작품 관찰 결과에 대한 이론적 해석	14
3) 3차 작품 관찰 결과에 대한 시뮬레이션 결과	14
4) 5차 작품에서 관찰된 결과와 해석	15
다. 우리말 모음 ‘아’ 인식 공명 상자에 대한 탐구	17
1) 각 탐구자의 ‘아’ 발음 분석	17
2) 각 탐구자의 ‘아’ 발음 포먼트에 공명할 수 있는 공명 상자 제작	18
3) 각 탐구자의 ‘아’ 발음 인식 공명 상자 실험 결과(미확인)	19
4. 결론 및 활용 방안	20
가. 결론	20
1) 2차원 정상파 가시화	20
2) 2차원 정상파 가시화 장치에 나타난 미세 입자 자기 결합 현상 관찰 및 해석	20
3) ‘아’ 발음에 반응하는 2차원 공명 상자에 대한 탐구	20
나. 활용 방안	20
1) 미세 플라스틱, 미세 먼지 수집 장치에 활용	20
2) 음성 및 화자 인식 및 가시화	20
5. 참고 문헌	21

<표 차례>

표 1 1차~3차 작품 제작 및 개선 과정	10
표 2 4차 작품 제작 과정 및 결과	11
표 3 5차 작품 제작 과정 및 특징	12
표 4 3차 작품 관찰 결과	13
표 5 5차 작품 스피커의 극성 연결	15
표 6 5차 작품 관찰 결과	15
표 7 개선된 5차 작품 관찰 결과	16
표 8 탐구자 3명의 '아' 발음 분석 결과	18
표 9 각 탐구자의 '아' 발음 포먼트에 공명할 수 있는 공명 상자 제작	18

<그림 차례>

그림 1 선배들이 직육면체 공명 상자의 주파수 응답을 측정하는 모습	1
그림 2 쿤트관 실험 장치	1
그림 3 정상파와 기주 공명에 대한 위키 백과의 설명 그림	3
그림 4 쿤트의 실험	4
그림 5 직육면체 공명 상자의 공명 모드	4
그림 6 2차원 루벤스 관	5
그림 7 클라드니 도형	5
그림 8 파동의 중첩	6
그림 9 푸리에 변환	7
그림 10 주파수 응답에 나타난 포먼트	7
그림 11 음원-여과기 이론	8
그림 12 2차원 정상파 가시화 장치 3차 작품(가로 28cm 세로 19cm, 스피커 2개)	9
그림 13 1차 작품	10
그림 14 2차 작품	10
그림 15 3차 작품(가로 28cm 세로 19cm, 스피커 2개)	10
그림 16 4차 작품(스피커 4개 연결)	11

그림 17 4차 작품에 850Hz 투입	11
그림 18 4차 작품에 1600Hz 투입	11
그림 19 5차 최종 작품(아크릴로 모든 부품 제작 및 스피커 4개 연결)	12
그림 20 3차 작품 500Hz	13
그림 21 3차 작품 600Hz	13
그림 22 3차 작품 700Hz	13
그림 23 3차 작품 800Hz	13
그림 24 3차 작품 900Hz	13
그림 25 3차 작품 1000Hz	13
그림 26 3차 작품 1700Hz	13
그림 27 3차 작품 2700Hz	13
그림 28 가로 30cm 세로 20cm 상자 안에서 나타나는 정상파(Room mode resonation) 시뮬레이션 결과	14
그림 29 좌우 위상 반대	15
그림 30 위 아래 위상 반대	15
그림 31 대각 위상 같음	15
그림 32 5차 작품 570Hz 좌우 위상 반대	15
그림 33 5차 작품 1020Hz 위아래 위상 반대	15
그림 34 5차 작품 1050Hz 대각 위상 같음	16
그림 35 5차 작품 1170Hz 좌우 위상 반대	16
그림 36 5차 작품 1770Hz 좌우 위상 반대	16
그림 37 5차 작품 2340Hz 좌우 위상 반대	16
그림 38 5차 작품 3600Hz 좌우 위상 반대	16
그림 39 쿨 에디트 프로로 '아 발음을 분석하는 장면	17
그림 40 28cm*34cm 공명상자	18
그림 41 28cm*30cm 공명상자	18
그림 42 26cm*30cm 공명상자	18
그림 43 세로 기본 진동, 가로 2배 진동이 일어날 때 압력이 극대인 순간의 압력 분포	19
그림 44 세로 기본 진동, 가로 2배 진동이 일어날 때 스티로폼 구의 모임 형태 예상	19

1. 서론

가. 탐구 동기

선배들의 과학전람회 연구 ‘툽니파와 공명관을 이용한 한글 모음 발생장치 제작 및 이를 이용한 한글 모음 발생 원리 탐구(2017)’에서 직육면체 공명 상자에 가로, 세로, 높이 길이에 따른 공명이 일어남을 알았다.

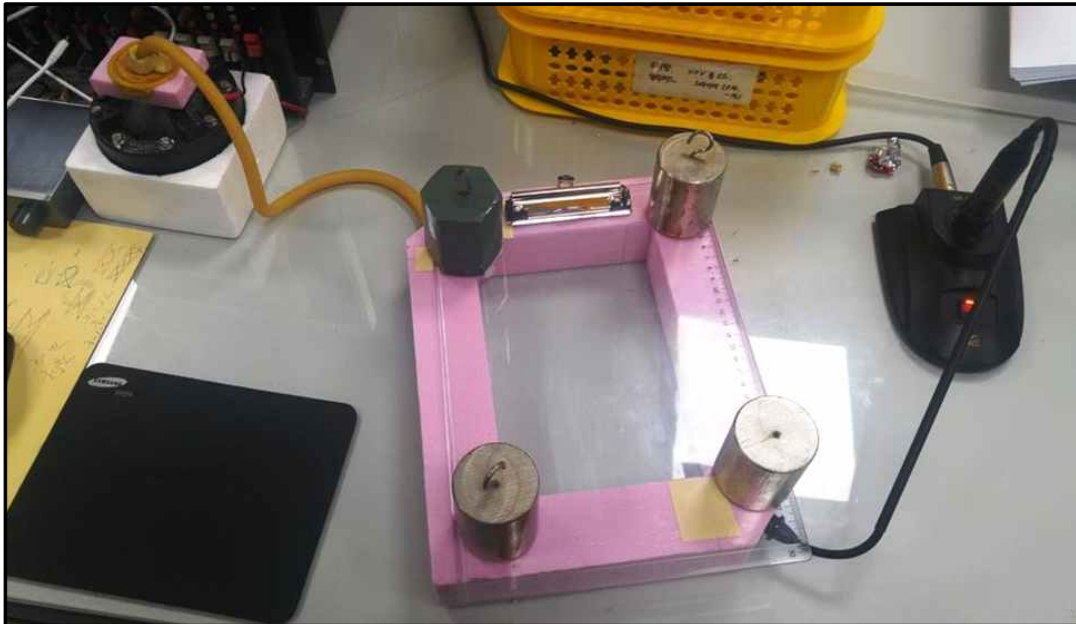


그림 1 선배들이 직육면체 공명 상자의 주파수 응답을 측정하는 모습

또, 파동에 관한 수업 시간에 정상파를 실제로 관찰할 수 있는 실험 중 쿤트관이라는 것이 있어서 정상파가 만들어지는 모양에 따라 톱밥이 모이는 것을 눈으로 볼 수 있다는 것도 알았다.



그림 2 쿤트관 실험 장치

이에 우리는 직육면체 공명 상자에도 쿤트관처럼 톱밥이나 비슷한 것을 넣으면 상자 안에서 만들어지는 정상파를 직접 눈으로 볼 수 있지 않을까 생각하였다.

쿤트관이 1차원 정상파를 볼 수 있는데 비해 직육면체 공명 상자 안에서는 높이 방향을 제외 하고서도 가로, 세로 방향의 2차원 정상파가 만들어지기 때문에 다양한 정상파의 형태를 볼 수 있을 것으로 기대하며 탐구를 시작하였다.

나. 탐구 목적

- 1) 직육면체 공명 상자에 스티로폼 구를 넣어 2차원 정상파를 직접 눈으로 볼 수 있는 '2차원 정상파 가시화 장치'를 만든다.
- 2) 직접 제작한 2차원 정상파 가시화 장치를 이용하여 다양한 패턴의 정상파를 만들어 정상파에 의해 자기 결합하는 스티로폼 구의 형태를 관찰하고 이론과 시뮬레이션 결과를 이용해 이러한 자기 결합 현상이 나타난 이유를 설명한다.
- 3) 2차원 정상파 가시화 장치에 의한 자기 결합 현상의 응용 방법을 고안하고 그 가능성을 확인해 본다.
 - 가) 미세 입자 포집 장치로서의 가능성
 - 나) 음성 인식 또는 화자 인식 장치로서의 가능성

2. 이론적 배경 및 선행 연구 조사

가. 정상파와 기주 공명

Order	Name 1	Name 2	Name 3	Wave representation	Molecular representation
$n = 1$	1st partial	fundamental tone	1st harmonic		
$n = 2$	2nd partial	1st overtone	2nd harmonic		
$n = 3$	3rd partial	2nd overtone	3rd harmonic		
$n = 4$	4th partial	3rd overtone	4th harmonic		

그림 3 정상파와 기주 공명에 대한 위키 백과의 설명 그림

양쪽이 닫힌 관에서는 그림 3과 같은 정상파가 만들어진다. 길이가 L 인 닫힌 관에서 만들어지는 정상파의 진동수는 관의 길이에 따라 다음 공식에 의해 결정된다.

$$f_x = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2L_x} n \quad (\text{단, } n = 1, 2, 3, \dots, v \text{ 는 음속}) \quad (\text{식 1})$$

나. 쿤트관 실험

쿤트관(Kundt管)은 1866년 아우구스트 쿤트가 발명한 음향학 실험 장비이다. 한쪽이 막혀 있는 투명한 관 안에 가루를 넣고, 열려 있는 쪽에서 순음을 넣는다. 관의 길이를 잘 조정하면 관 내부의 공간이 공명하면서 정상파가 생기는데, 이 때 관 속의 가루가 반복되는 패턴을 가지게 된다. 정상파의 마디와 마디 사이의 길이는 파장의 절반이므로, 이 방법으로 소리의 파장을 잴 수 있다. 현대에는 투명한 관에 가루를 넣는 대신, 관에 마이크로폰을 놓고 음압을 측정하기도 한다.

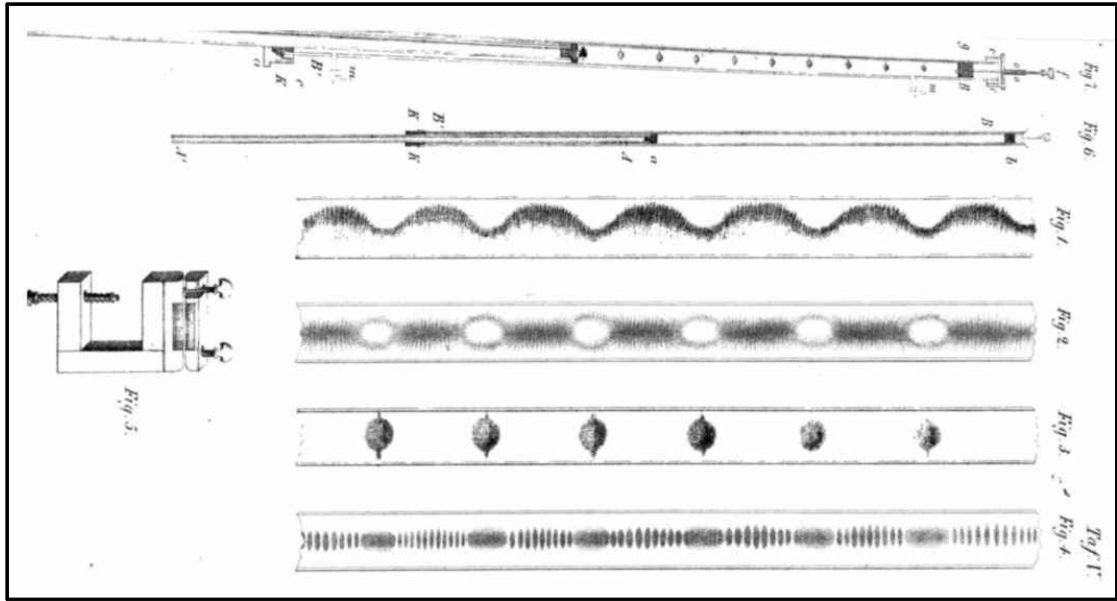


그림 4 쿤트의 실험

다. 직육면체 공명 상자(Room mode) 공명 이론

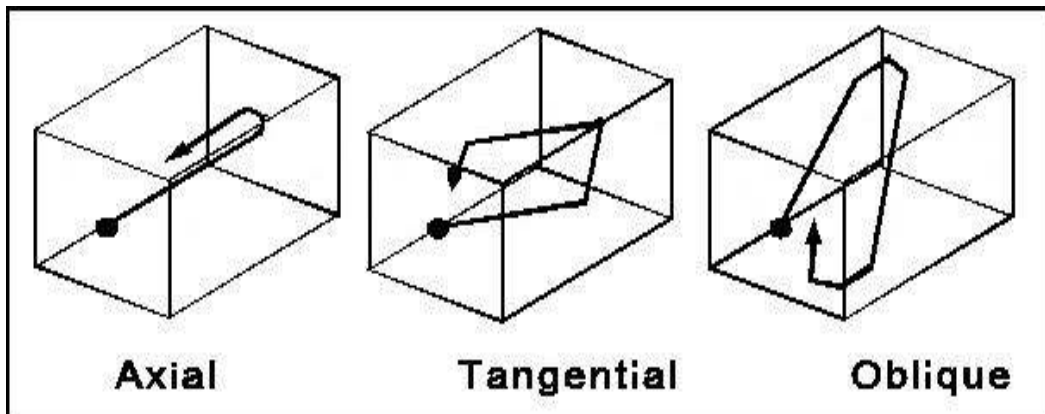


그림 5 직육면체 공명 상자의 공명 모드

직육면체 공명 상자에는 그림 5와 같은 3가지 모드의 공명이 존재한다. 축 방향, 대각선 방향, 맞모금 방향의 공명이 존재하는데, 축 방향으로 양쪽이 닫힌 관과 같은 방법으로 생각하여 직육면체의 가로, 세로, 높이의 길이의 2배가 되는 축 방향 모드 정상파가 만들어진다.

가로, 세로, 높이의 길이를 각각 L_x , L_y , L_z 라 할 때 축 방향 모드에 의한 공명 진동수는 다음과 같다.

$$f_x = \frac{v}{2L_x}n, \quad f_y = \frac{v}{2L_y}n, \quad f_z = \frac{v}{2L_z}n \quad (\text{단, } n=1,2,3,\dots, v \text{는 음속}) \quad (\text{식 2})$$

축 방향 모드에 비해 대각선 방향과 맞모금 방향 모드는 공명 진폭이 3dB 이상 작으며 공명 진동수는 다음과 같다.

$$f = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (\text{단, } l, m, n = 1,2,3,\dots, v \text{는 음속}) \quad (\text{식 3})$$

라. 기존의 2차원 정상파 가시화 실험

1) 2차원 루벤스 관

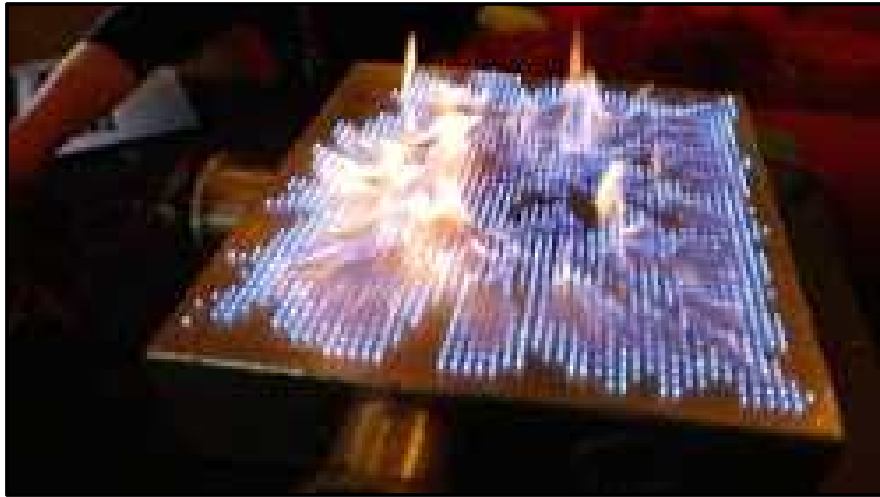


그림 6 2차원 루벤스 관

우리가 만든 2차원 공명 상자와 비슷하게 가로, 세로의 닫힌 관 공명을 이용해서 가스 불꽃의 세기로 정상파를 보여 주는 장치이다. 불꽃으로 보여주기 때문에 장치가 크고 위험한 부분이 있으며 정상파를 명확하게 관찰하기 보다는 소리에 따라 불꽃의 모양이 달라지는 정도를 관찰하기에 적합하다.

2) 클라드니 판

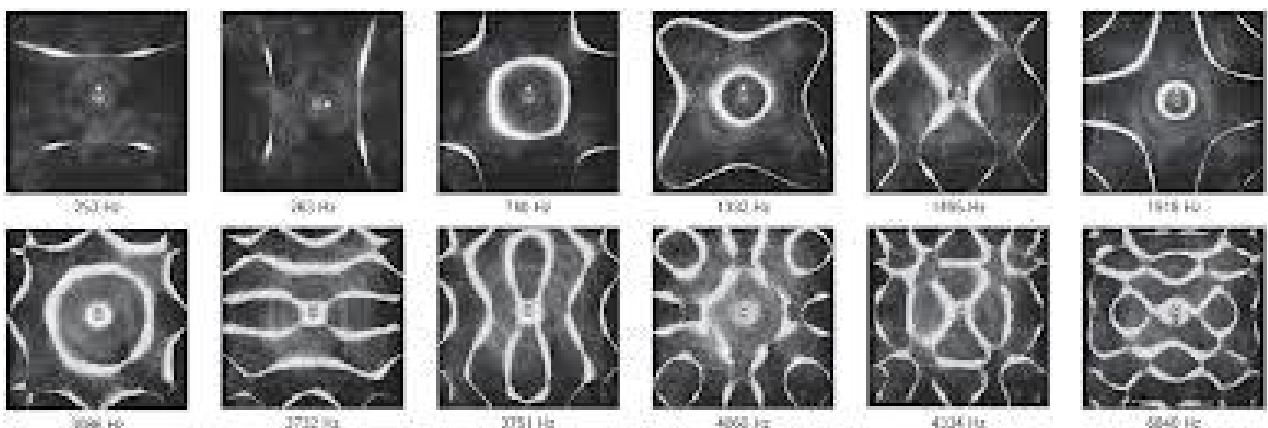


그림 7 클라드니 도형

스피커에 진동판을 부착하고 모래를 뿌리면 진동수에 따라 다른 모양으로 모래가 모이는 모습이다. 2차원 정상파를 보여주는 장치이기는 하지만 공기의 진동이 아닌 진동판의 진동을 보여주기 때문에 수업시간에 배우는 간단한 정상파의 모양을 관찰하기 어렵다는 단점이 있다.

마. 음성 음향학 이론

1) 소리의 3 요소: 크기, 높낮이, 음색

2) 음파의 3 요소: 진폭, 진동수(기본 진동수), 파형(배음)

소리의 3 요소와 음파의 3 요소를 비교해 보면 진폭이 큰 소리는 큰 소리이고 진동수가 큰 소리는 높은 소리이다.

그런데 파형과 음색은 정량적인 설명 없이 모양이 다르다고 표현하는 경우가 많은데 푸리에 분석을 이용하면 파형이 다른 것도 정량적으로 설명 가능하다. 기본 진동수가 같은 소리라도 배음(하모닉스)들이 어떤 비율을 가지고 중첩되었는가에 따라 파형이 달라지는 것이다.

3) 파동의 중첩

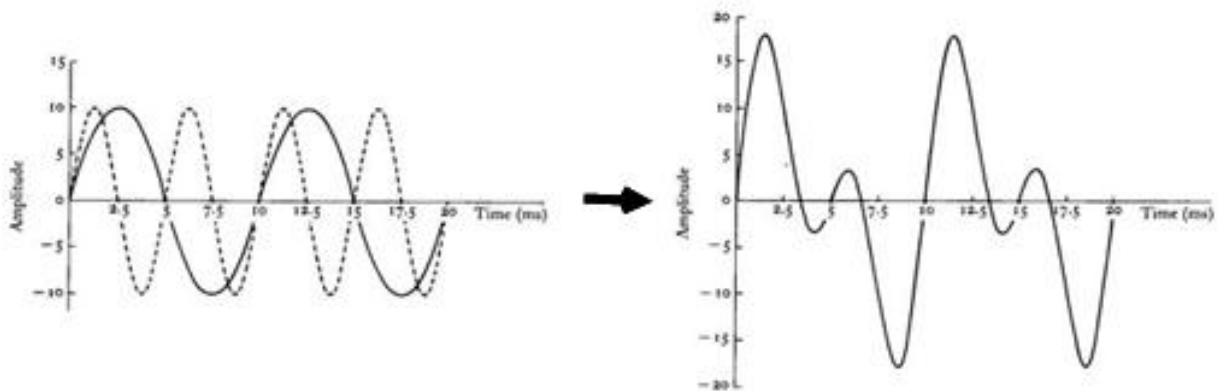


그림 8 파동의 중첩

그림 8을 보면 왼쪽 그림의 주기가 10ms인 사인파(실선)와 주기가 5ms인 사인파(점선)가 중첩 되어 오른쪽 그림과 같은 복잡한 파형이 나타난다.

4) 푸리에(Fourier) 변환

푸리에에는 어떠한 주기함수도 단순 조화함수의 합으로 나타낼 수 있다는 사실을 알아내었다. 이를 푸리에 정리라 한다. 즉 푸리에 함수를 사용하면 어떤 소리든지 모두 충분한 수의 사인함수와 코사인함수의 합으로 나타낼 수 있다.

푸리에 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos(mkt) + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin(mkt) \quad (\text{식 4})$$

여기서 각 계수들 A_m , B_m 은 직교관계식으로부터 구할 수 있는데, 이 값은 각 배음(Harmonics)들의 진폭이 된다.

컴퓨터 프로그램을 이용해 시간 영역에서 주파수 영역으로 빠르게 변환하는 것을 FFT(Fast Fourier Transform)라고 하며 흔히 주파수 분석이라고도 한다.

아래 그림 9의 (a)파가 (b), (c), (d)의 조화파의 합이라면 푸리에 변환을 통해 (e)와 같은 주파수 영역에 나타낼 수 있다. 이를 스펙트럼이라고도 한다.

여기서 그림 8의 (a), (b), (c), (d)는 파동을 시간 영역에 나타낸 것이고 (e)는 주파수 영역에 나타낸 것이다. 시간 영역에서 파형이라고 부르는 복잡한 파의 모양이 주파수 영역에서는 더 단순하게 나타나는 경우가 많다.

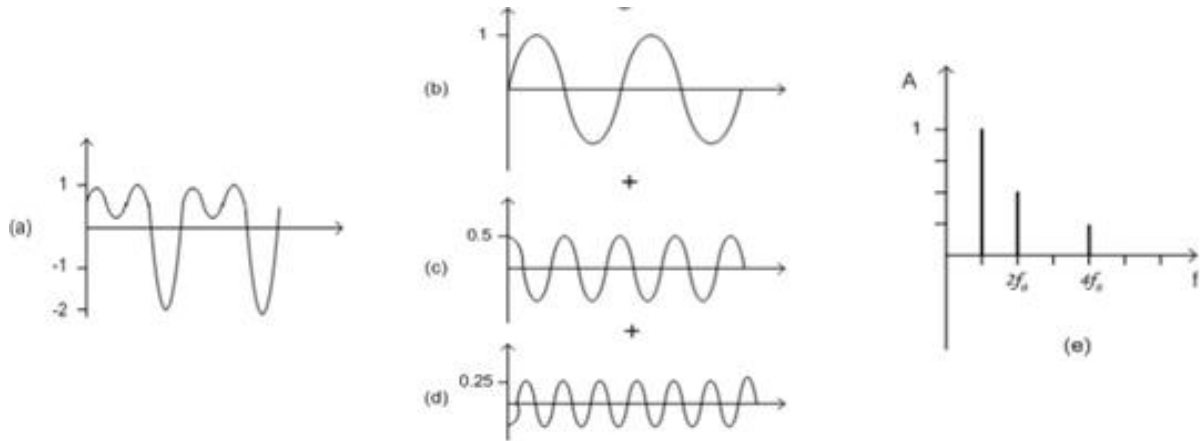


그림 9 푸리에 변환

5) 포먼트(Formant)

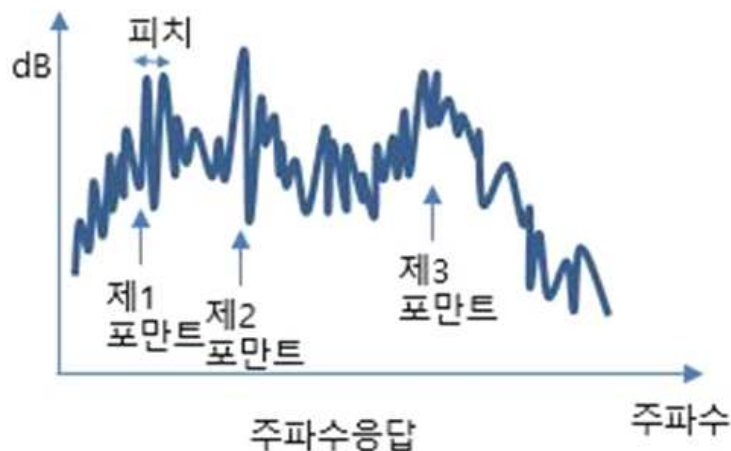


그림 10 주파수 응답에 나타난 포먼트

음성 신호를 푸리에 변환하여 스펙트럼으로 나타내었을 때 성도의 공진에 의해 증폭된 진동수를 포먼트라고 한다. 진동수가 낮은 것부터 제1포먼트(F_1), 제2포먼트(F_2),... 등으로 부르며 F_1 과 F_2 만으로도 단순한 모음의 구별은 가능하다.

기본 진동수(Fundamental frequency)는 피치로 불리기도 하며 어떤 분야에서는 기본 진동수를 F_0 로 표현하기도 한다.

6) 음원 여과기 이론

사람의 음성은 성대에서 만들어지는 튕니파 형태의 소리를 음원(Source)으로 하고 목구멍, 구강, 비강 등의 공간에 의한 공명 현상으로 특정 진동수가 커지거나 작아지는 것을 여과기(Filter)로 생각하는 음원-여과기 이론으로 설명 가능하다.

그림 11은 음원 여과기 이론에 의해 음성이 만들어지는 원리를 시간 영역과 주파수 영역에서

비교 설명한 그림이다.

그림 11의 윗부분은 시간 영역에서 성대에서 만들어진 톱니파가 성도를 거쳐 특정 발음의 파형이 만들어지는 것을 보여주고 있고, 아랫부분은 윗부분의 과정에 해당하는 내용을 진동수 영역에서 정량적으로 설명하고 있는 그림이다.

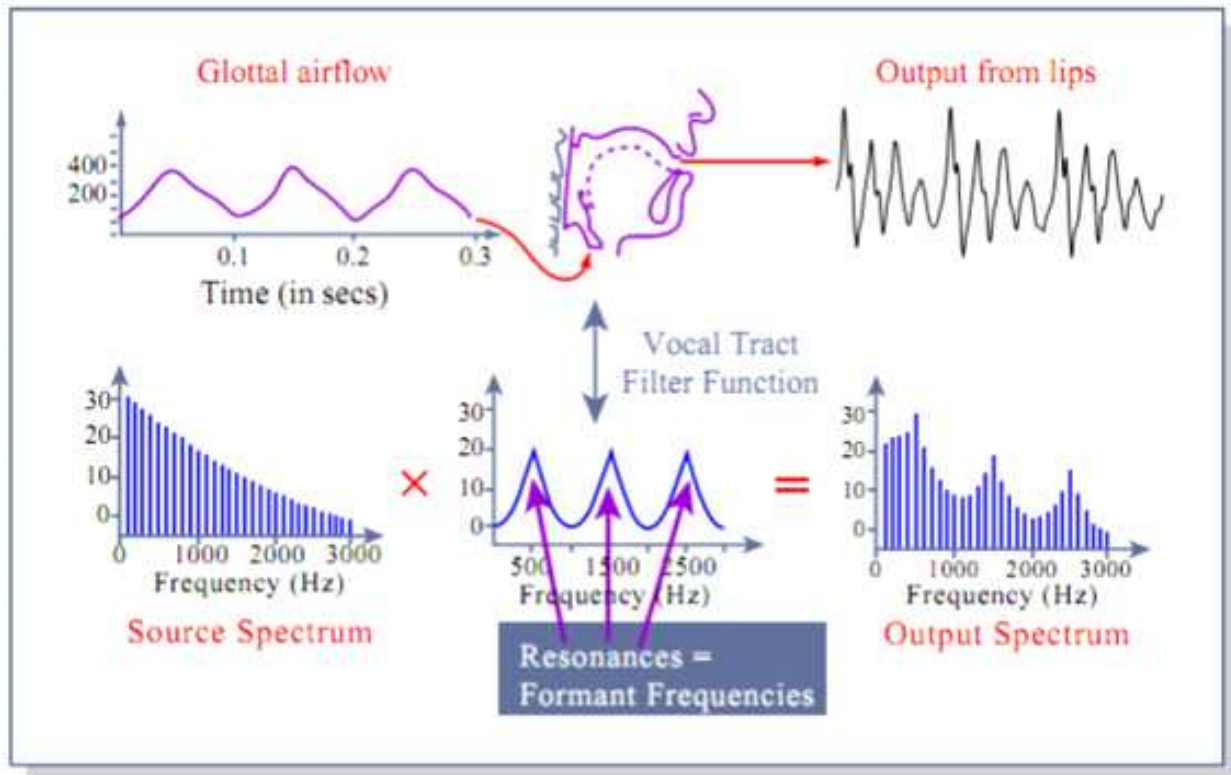


Image by MIT OpenCourseWare.

그림 11 음원-여과기 이론

3. 탐구 내용 및 결과

가. 2차원 정상파 가시화 탐구

1) 2차원 정상파 가시화 장치 개요



그림 12 2차원 정상파 가시화 장치 3차 작품(가로 28cm 세로 19cm, 스피커 2개)

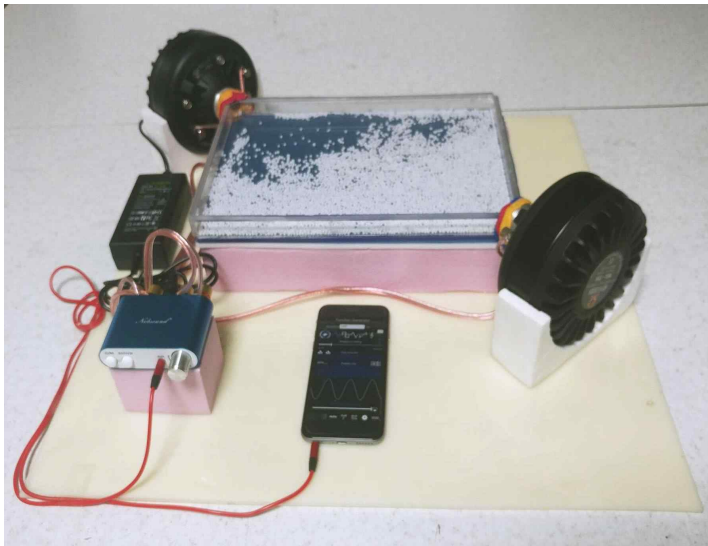
투명 아크릴을 이용해 직육면체 공명 상자를 제작하였고, 지름 1~2mm의 스티로폼 구(흰색 알갱이)를 공명 상자 안에 넣고, 공명 상자의 모서리에 스피커를 설치하였다. 스마트폰의 함수 발생기(Function generator) 앱을 이용하여 원하는 진동수, 파형, 위상의 소리를 발생시키고 앰프로 증폭하여 스피커에 전달하면 공명 상자 안에서는 정상파의 발생 유무에 따라 스티로폼 구가 움직여 특정 모양으로 모인다.

스티로폼 구와 아크릴 상자에 정전기가 발생하여 달라붙기 때문에 사전에 정전기 제거 스프레이(푸라 가드)를 뿌려 건조시킨 후 사용하였다.

스피커는 야외용 혼 스피커에 사용되는 드라이버 유닛으로 75W 출력의 제품을 사용하였는데 이 스피커를 사용한 이유는 이 스피커가 고출력이면서도 진동판의 크기가 작아서 상자 안으로 소리를 투입하기 적당해 보였기 때문이다.

2) 문제점 개선을 통한 탐구 과정

표 1 1차~3차 작품 제작 및 개선 과정

작품 사진	특징 및 개선점
 그림 13 1차 작품	▷ 처음 제작한 작품으로서 직육면체 상자 안에서 공명에 의해 스티로폼 구가 움직이는지 확인하기 위한 목적으로 간단히 만들어 봄. ▷ 정상파에 따라 정확한 모양으로 스티로폼구가 정렬하지 않았으나 소리에 따라 약간의 움직임을 보임. ▷ 정전기에 대한 문제를 인식함.
 그림 14 2차 작품	▷ 1차 작품의 문제를 보완하여 조금 더 견고하게 만들고 정전기 방지 스프레이를 뿌려 건조시켜 사용. ▷ 완벽하지는 않지만 정상파에 따라 스티로폼 구가 모이는 모습 관찰.
 그림 15 3차 작품(가로 28cm 세로 19cm, 스피커 2개)	▷ 스티로폼이 아닌 아크릴을 이용하여 공명 상자를 제작하고 스피커의 개수를 2개로 늘림. ▷ 가로 세로 방향의 정상파에 따라 정렬하는 스티로폼 구의 형태를 명확히 관찰할 수 있었음. ▷ (상세한 관찰 결과는 다음 단락에서 별도로 설명) ▷ 그러나 스피커가 설치된 모서리와 설치되지 않은 모서리 쪽의 스티로폼 구 형상이 대칭이 되지 않아 스피커의 영향이 커 보였음. 그래서 스피커를 네 모서리 모두 설치할 필요성을 느낌.

4차
작품

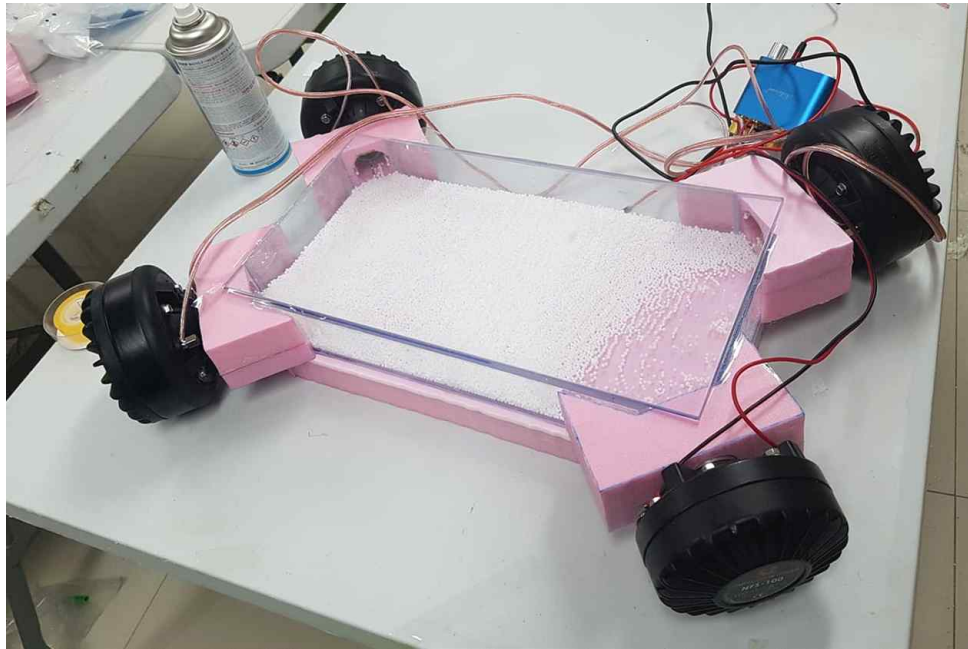


그림 16 4차 작품(스피커 4개 연결)

4차
작품
관찰
결과



그림 17 4차 작품에 850Hz 투입



그림 18 4차 작품에 1600Hz 투입

4차
작품
특징 및
문제점

- ▷ 스피커를 4개로 늘려서 공명 상자의 네 모서리에 모두 설치함.
- ▷ 공명 상자에 스피커를 연결하는 블록을 스티로폼으로 제작하여 연결함.
- ▷ 공명상자의 높이는 제작상의 편의를 위해 5cm로 늘림.
- ▷ 제작 결과 3차 작품보다 정상파의 형태가 잘 관찰되지 않음.
- ▷ 연결 부위의 견고함이나 상자의 높이가 문제일지 고민하며 여러 차례 개선을 시도하였으나 개선되지 않음.
- ▷ 스피커 4개를 앰프 1개에 연결하여 앰프가 자주 파손됨.
- ▷ 스피커 4개에 모두 같은 위상의 소리를 입력하였으며 따라서 홀수배 정상파가 만들어지지 않음을 깨달음.

5차
작품
(현재
최종
작품)

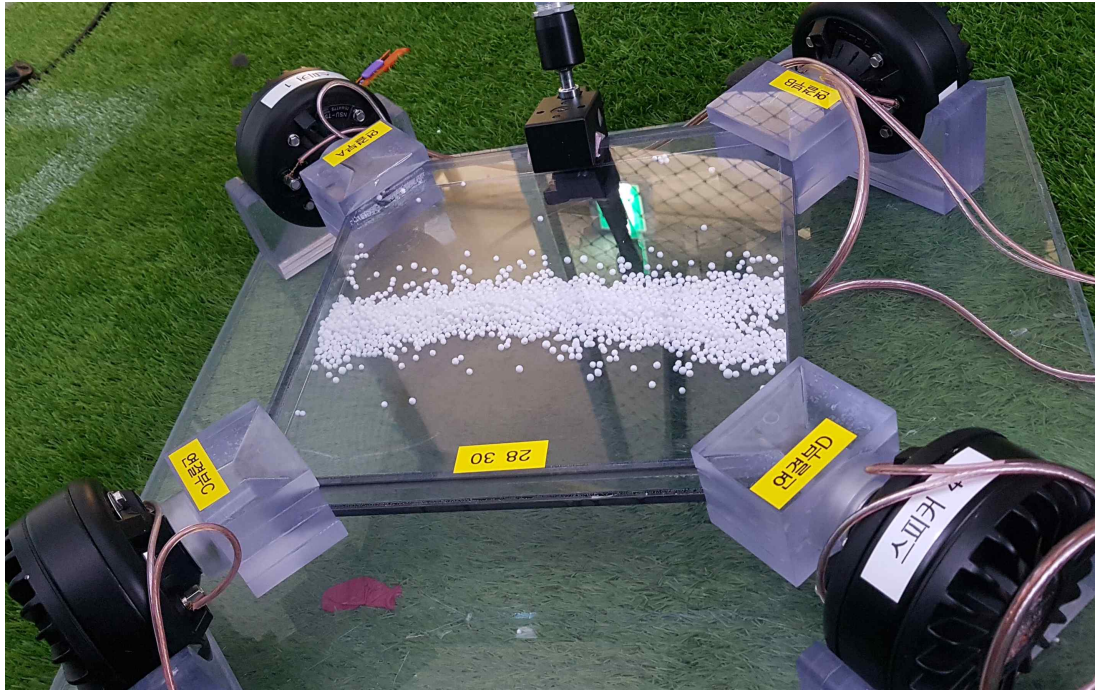


그림 19 5차 최종 작품(아크릴로 모든 부품 제작 및 스피커 4개 연결)

5차
작품
특징 및
문제점

- ▷ 아크릴 가공 업체에 의뢰하여 공명상자, 스피커 연결부, 스피커 받침대, 전체 받침대 등을 정밀 제작하였음.
- ▷ 공명 상자는 15cm*30cm, 20cm*30cm, 26cm*30cm, 28cm*30cm, 28cm*34cm 크기로 5개 제작.
- ▷ 공명 상자는 무정전 폴리카보네이트 재질로 제작.
- ▷ 4차 작품의 문제점을 해결하기 위해 각 스피커의 극성(+, -)을 반대로 연결할 수 있도록 전선을 연결하여 상황에 따라 극성을 바꾸어가면서 실험함.
- ▷ 앰프를 고출력 앰프로 교체하고 스마트폰의 함수 발생기 대신 진짜 함수 발생기를 사용함.
- ▷ 공명 상자의 높이를 3차 작품과 같이 15mm로 낮춤.
- ▷ 공명 상자 모서리 부분에서 연결부 쪽으로 스티로폼 구가 넘어가서 나오지 않는 문제가 발생하여 상자 모서리 부분에 방충망을 붙임.
- ▷ 스피커와 상자를 연결하는 연결부에 공간이 크게 남아서 공명 상자의 공명에 영향을 주는 것으로 판단되어 연결부를 다시 제작해야 할 필요를 느낌.
- ▷ 현재 연결부를 제거하고 3차 작품과 같이 고무찰흙으로 스피커를 바로 연결하여 실험 진행 중.
- ▷ 아크릴 가공이 정밀하고 견고하게 이루어지자 공명상자 전체가 하나로 연결되어 상자 자체의 공진이 발생함. 우리 실험은 상자 안의 공기의 공명을 관찰하고자 하는 것인데 상자 자체가 공진하여 클라드니 판과 같은 형태가 나타나는 것으로 생각됨.
- ▷ 5차 작품 정상과 형태는 3차 작품 결과와 함께 뒷 단락에서 별도로 상세 설명함.

나. 2차원 공명 상자 내에서의 미세 입자 자기 결합 현상 탐구

1) 3차 작품에서 관찰된 정상파에 따른 스티로폼 구의 모임 현상

표 4 3차 작품 관찰 결과



그림 20 3차 작품 500Hz

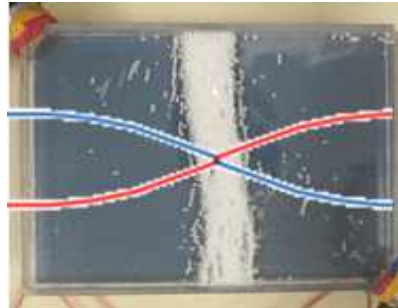


그림 21 3차 작품 600Hz



그림 22 3차 작품 700Hz

- ▷ 약 600Hz 부분에서는 가로 방향으로 정상파가 형성 되어 압력 기준으로 정상파의 마디에 해당하는 중앙 부분에 스티로폼 구가 세로로 정렬하는 것을 관찰함.



그림 23 3차 작품 800Hz



그림 24 3차 작품 900Hz



그림 25 3차 작품 1000Hz

- ▷ 약 900Hz 부분에서는 세로 방향으로 정상파가 형성 되어 압력 기준으로 정상파의 마디에 해당하는 중앙 부분에 스티로폼 구가 가로로 정렬하는 것을 관찰함.

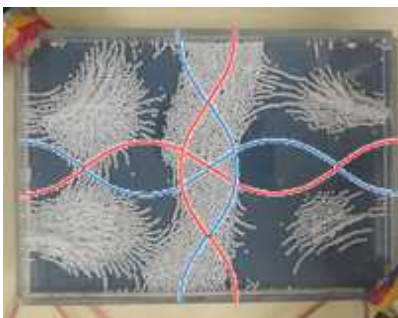


그림 26 3차 작품 1700Hz

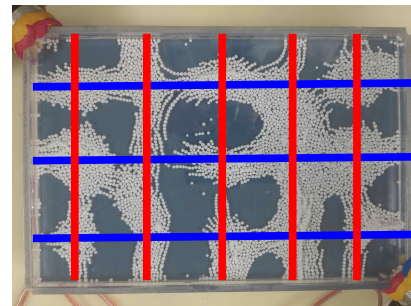


그림 27 3차 작품 2700Hz

- ▷ 약 1700Hz 부분에서는 가로 방향으로 3배 진동, 세로 방향으로 2배 진동의 정상파가 형성되어 각 정상파의 압력의 마디 부분에 스티로폼 구가 식스팩 모양으로 모이는 것을 관찰함.
- ▷ 약 2700Hz 부분에서는 가로 방향으로 5배 진동, 세로 방향으로 3배 진동의 정상파가 형성되어 각 정상파의 압력의 마디 부분에 스티로폼 구가 모이는 것을 관찰함.

2) 3차 작품 관찰 결과에 대한 이론적 해석

가로, 세로 축 방향 공명은 교과서에 나오는 양쪽이 모두 닫힌 관에서의 정상파와 같은 원리로 생겨난다. 즉 직육면체 공명 상자의 가로, 세로, 높이의 길이를 각각 L_x , L_y , L_z 라 할 때,

$$f_x = \frac{v}{2L_x}n, \quad f_y = \frac{v}{2L_y}n, \quad f_z = \frac{v}{2L_z}n \quad (\text{단, } n=1,2,3,\dots, v \text{는 음속})$$

인 진동수의 소리에서 정상파가 만들어지고 공명 현상이 관찰 된다. 이 중에서 z 축 방향, 즉 높이 방향 L_z 는 15mm로서 $n=1$ 일 때 f_z 가 약 12,000Hz로서 우리가 실험하는 300Hz ~ 4000Hz를 크게 벗어나기 때문에 z 축 방향의 공명은 고려하지 않을 수 있다.

음속 v 를 340m/s라 가정하면 가로 30cm, 세로 20cm인 공명 상자에서 $n=1$ 일 때 $f_x = \frac{340}{0.3 \times 2} \simeq 570\text{Hz}$, $f_y = \frac{340}{0.2 \times 2} \simeq 850\text{Hz}$ 로서 우리 실험결과와 대체로 일치한다.

가로, 세로 방향의 정상파가 동시에 만들어지는 상황을 얻기 위해 가로, 세로의 길이 비를 2:3 으로 설계하였는데 우리 실험에서도 실제로 가로 방향 $n=3$, 세로 방향 $n=2$ 에 해당하는 공명이 1700Hz에서 관찰 되었고, 가로방향 $n=5$, 세로 방향 $n=3$ 에 해당하는 공명이 2700Hz에서 관찰 되었다.

3) 3차 작품 관찰 결과에 대한 시뮬레이션 결과

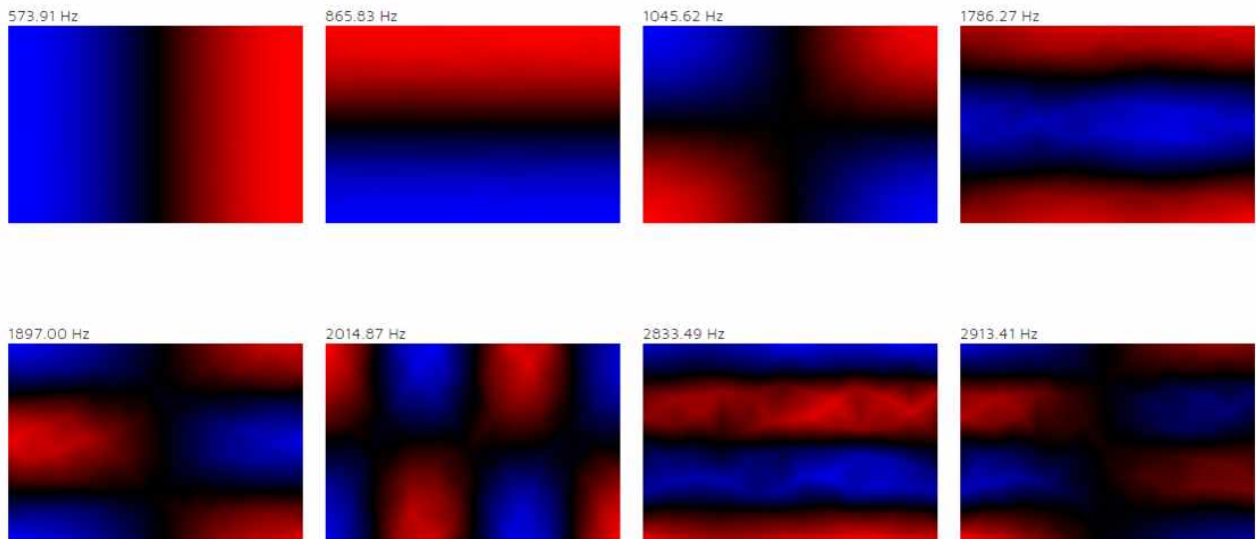


그림 28 가로 30cm 세로 20cm 상자 안에서 나타나는 정상파(Room mode resonance) 시뮬레이션 결과

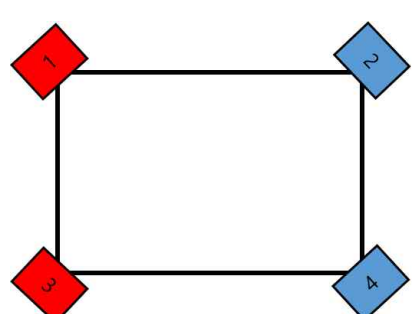
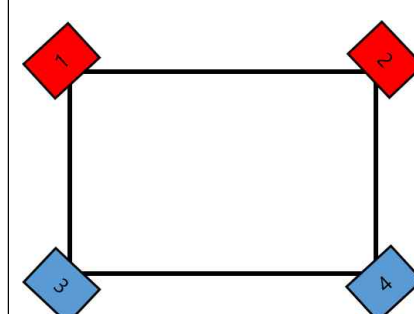
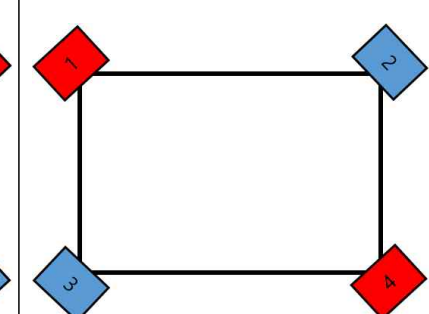
roomresps.com 사이트에서 시뮬레이션 한 결과는 그림 28과 같다. 기본 진동에 대해서는 우리 실험 결과와 일치하지만 2배 진동 부터는 우리가 단순히 예상하는 진동이 아니라 가로 세로의 진동이 서로에게 영향을 미치는 수면파와 비슷한 모드가 있음을 알 수 있다.

예를 들어 1050Hz는 축 방향 모드만 생각했을 때 가로, 세로 어떤 방향으로든 정상파가 만들어지지 않지만 가로 2배, 세로 2배에 진동이 겹친 듯한 공명이 만들어짐을 시뮬레이션을 통해 알 수 있다. 하지만, 3차 작품을 통해서 이런 시뮬레이션 결과에 나온 모든 룸 모드의 결과를 다 관찰할 수는 없었다.

4) 5차 작품에서 관찰된 결과

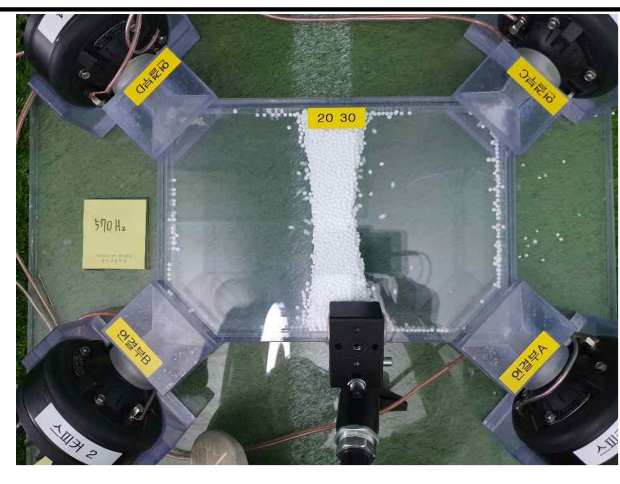
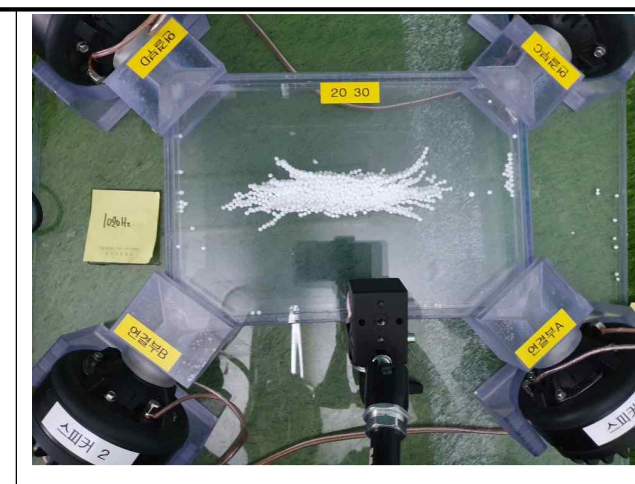
가) 5차 작품에서 스피커의 극성 연결 방법

표 5 5차 작품 스피커의 극성 연결

 그림 29 좌우 위상 반대	 그림 30 위 아래 위상 반대	 그림 31 대각 위상 같음
▷ 5차 작품에서 스피커의 개수를 4개로 늘리자 오히려 3차 작품보다 정상과 관찰이 잘 되지 않는 것 같았다. 원인을 생각해 본 결과 스피커의 위상을 고려하지 않았다고 생각하여 위 그림과 같은 3가지 극성(위상) 조합으로 실험을 진행하였다. ▷ 그림 29와 같이 스피커 1, 3을 한데 묶어 앰프의 채널 1에 연결하고 스피커 2, 4를 묶어 앰프의 채널 2에 채널 1과 극성을 반대로 연결한 상황을 ‘좌우 위상 반대’로 표현하고자 한다. ▷ 마찬가지로 그림 30과 31처럼 스피커 극성이 연결된 경우 각각 ‘위 아래 위상 반대’, ‘대각 위상 같음’으로 표현 한다.		

나) 5차 작품 20cm*30cm 공명 상자에서 관찰된 결과

표 6 5차 작품 관찰 결과

 그림 32 5차 작품 570Hz 좌우 위상 반대	 그림 33 5차 작품 1020Hz 위아래 위상 반대
▷ 570Hz 부분에서는 가로 방향으로 정상과 기본진동, 1020Hz에서는 세로 방향 정상과 기본진동을 관찰할 수 있었다. 공명 상자의 크기는 3차 작품과 같은 상자였는데, 가로 방향은 3차 작품과 같은 진동수에서 공명이 나타났지만 세로 방향은 3차 작품이 900Hz 근처에서 공명이 나타났던 것에 비해 더 큰 진동수에서 공명이 일어났다.	

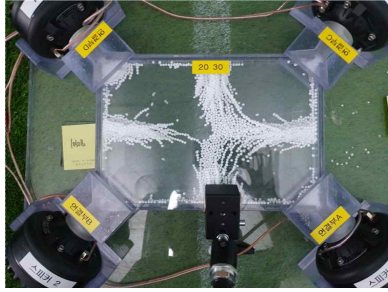


그림 34 5차 작품 1050Hz 대각 위상 같음



그림 35 5차 작품 1170Hz 좌우 위상 반대

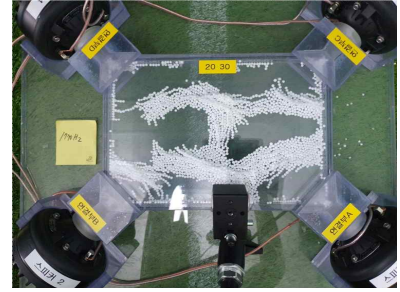


그림 36 5차 작품 1770Hz 좌우 위상 반대

- ▷ 1050Hz 부분에서는 시뮬레이션 결과에는 있지만 3차 작품에서는 볼 수 없었던 공명이 관찰 되었고, 1770Hz에서도 시뮬레이션 결과와 비슷한 모양이 관찰 되었다.
- ▷ 1170Hz에서는 가로 방향 2배진동을 예상했으나 기울어진 모양이 관찰되었다. 사진 아래 쪽에 보이는 검은 부분은 카메라 거치대인데 카메라 거치대를 공명상자에 물려서 공명 상자의 진동에 영향을 미친 것으로 판단된다.

다) 개선된 5차 작품 20cm*30cm 공명 상자에서 관찰된 결과

표 7 개선된 5차 작품 관찰 결과

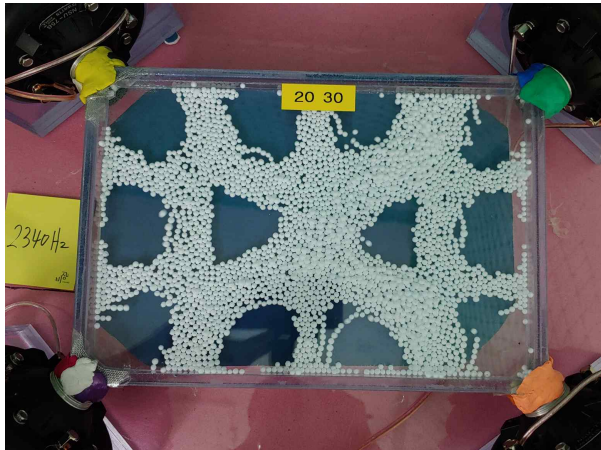


그림 37 5차 작품 2340Hz 좌우 위상 반대

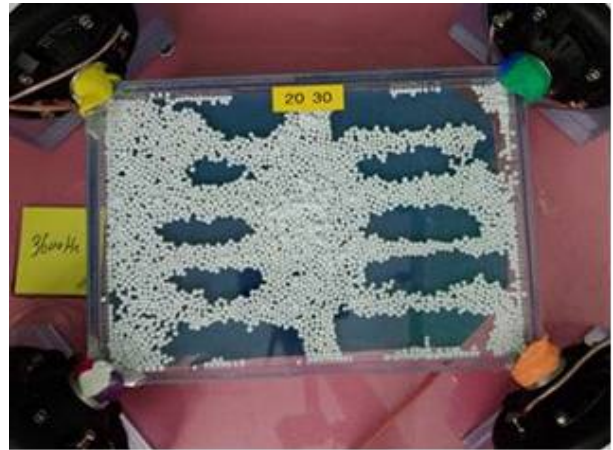


그림 38 5차 작품 3600Hz 좌우 위상 반대

- ▷ 스피커와 공명 상자의 연결부위 빈 공간과, 촬영을 위해 부착한 카메라 거치대가 결과에 영향을 미쳤다고 판단하여 스피커 연결구 없이 고무찰흙으로 직접 공명 상자에 부착하고 카메라 거치대 없이 촬영한 결과 2340Hz와 3600Hz에서 유의미한 형태가 관찰 되었다.
- ▷ 그러나 2340Hz에서 관찰된 형태는 1800Hz에서 예상했던 가로 방향 3배 진동과 세로 방향 2배 진동의 결합인데 1800Hz가 아닌 2340Hz에서 관찰되었다.
- ▷ 또한 3600Hz에서 관찰된 형태는 세로방향 4배 진동은 예상 된 결과이나 가로방향 6배 진동이 관찰되지 않았다.

다. 우리말 모음 ‘아’ 인식 공명 상자에 대한 탐구

1) 각 탐구자의 ‘아’ 발음 분석

음향 편집 및 분석 프로그램인 ‘쿨 에디트 프로’를 이용하여 탐구자들의 모음 발성 ‘아’를 분석하였다.

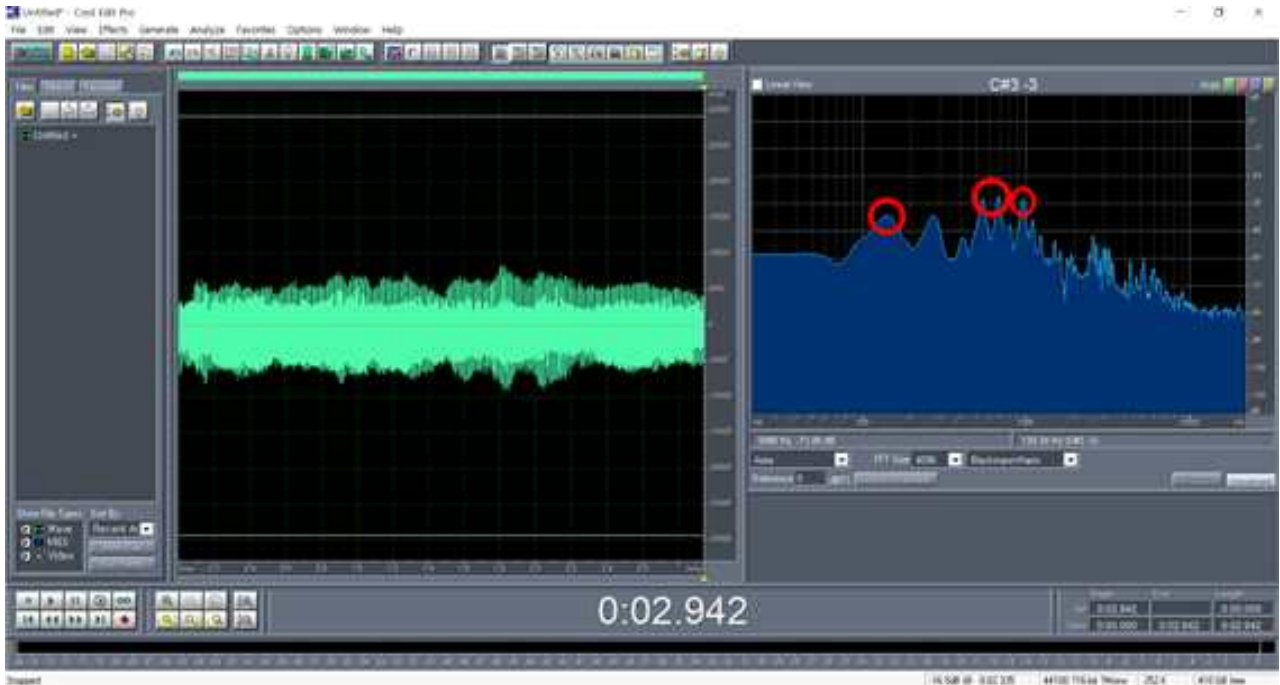


그림 39 쿨 에디트 프로로 ‘아’ 발음을 분석하는 장면

그림 39는 쿨 에디트 프로를 이용해 ‘아’ 발음을 분석하는 장면이다. 그림의 왼쪽 부분은 시간에 따른 진폭을 보여주며, 오른쪽 부분은 푸리에 분석을 통해 주파수 영역에 나타난 것이다.

오른쪽 부분의 빨간 동그라미 중 가장 왼쪽 동그라미는 기본 진동수로서 약 130Hz의 기본 진동수(음 높이 또는 피치로 불리기도 한다.)를 보여주고 있으며 기본 진동수의 정수배 되는 배음(하모닉스)들이 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 배음들 중 큰 진폭을 갖는 배음의 진동수 값을 포먼트라고 하는데 오른쪽 두 개의 빨간 동그라미로 나타내었다.

음원-여과기 이론에 따르면 사람의 성대에서 기본 진동수를 갖는 튕니파 형태의 소리를 만들어 내면 목구멍, 구강과 같은 성도를 지나면서 헬름홀츠 공명이나 기주 공명에 의해 특정 진동수의 배음들이 증폭 또는 감쇄 되고 여기서 증폭된 배음을 포먼트라 하는데 보통 사람은 2개의 포먼트 만으로도 대략적인 모음 발음을 인식한다고 한다.

우리는 각 탐구자마다 일정한 음의 ‘아’ 발음을 10회씩 발음해 기본 진동수와 상자의 길이를 결정할 두 포먼트를 분석하였다.

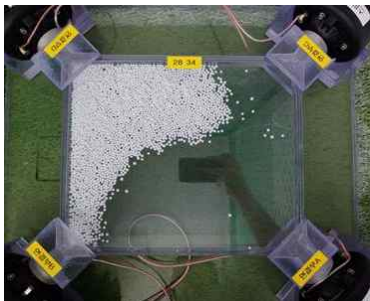
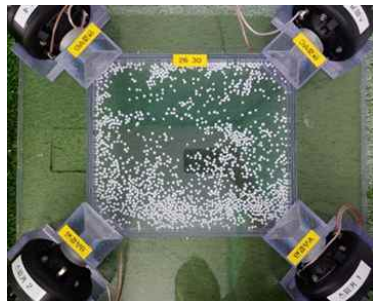
대표 값은 평균이 아니라 가장 자주 측정된 값으로 선정하였다.

표 8 탐구자 3명의 ‘아’ 발음 분석 결과

반복 회수	탐구자1			탐구자2			탐구자3		
	기본 진동수 (HZ)	1 포먼트 (HZ)	2 포먼트 (HZ)	기본 진동수 (HZ)	1 포먼트 (HZ)	2 포먼트 (HZ)	기본 진동수 (HZ)	1 포먼트 (HZ)	2 포먼트 (HZ)
1	140	600	1000	100	650	1100	130	700	1100
2	120	650	1050	100	600	1000	130	650	950
3	130	600	900	100	650	1000	130	650	1000
4	120	600	1000	100	650	1100	130	700	1000
5	120	650	950	100	600	1000	130	650	1100
6	130	700	1000	100	600	1000	130	650	1100
7	130	600	900	110	550	1200	130	700	1200
8	130	650	1000	100	700	1000	130	700	1150
9	130	600	1000	100	650	1050	130	700	1100
10	130	600	1100	100	600	1000	130	700	1000
대표	120	600	1000	100	600	1100	130	650	1100

2) 각 탐구자의 ‘아’ 발음 포먼트에 공명할 수 있는 공명 상자 제작

표 9 각 탐구자의 ‘아’ 발음 포먼트에 공명할 수 있는 공명 상자 제작

포먼트 측정 값	탐구자1			탐구자2			탐구자3		
	기본 진동수 (HZ)	1 포먼트 (HZ)	2 포먼트 (HZ)	기본 진동수 (HZ)	1 포먼트 (HZ)	2 포먼트 (HZ)	기본 진동수 (HZ)	1 포먼트 (HZ)	2 포먼트 (HZ)
	120	600	1000	100	600	1100	130	650	1100
세로	28cm			28cm			26cm		
가로	34cm			30cm			30cm		
제작 된 상자 모습									
	그림 40 28cm*34cm 공명상자			그림 41 28cm*30cm 공명상자			그림 42 26cm*30cm 공명상자		

공명 상자에서 가장 잘 일어나는 축 방향 기본 공명이 각 탐구자의 ‘아’ 발음 포먼트에 의해 일어나도록 $f = \frac{v}{2L}n$ 식을 이용하여 공명 상자의 크기를 계산하여 제작하고자 하였다.

그런데 5차 작품의 스피커 극성을 고려하면 가로와 세로방향 동시에 기본 진동이 일어나도록 하는 것은 불가능했다. 가로 방향 기본 진동이 일어나려면 스피커의 극성이 ‘좌우 위상 반대’ 이어야 하고, 세로 방향 기본 진동이 일어나려면 스피커의 극성이 ‘위아래 위상 반대’ 이어야 하는데 이 두 조건을 동시에 만족시킬 수는 없기 때문이다.

그래서 세로 방향은 제1 포먼트의 기본 공명이 일어나도록 반 파장의 길이를 세로 길이로 설정하였고, 가로 방향은 제2 포먼트의 2배진동이 일어나도록 파장의 길이를 가로 길이로 설정하였으며 ‘위아래 위상 반대’로 스피커를 연결하는 것을 기본 전제로 하였다.

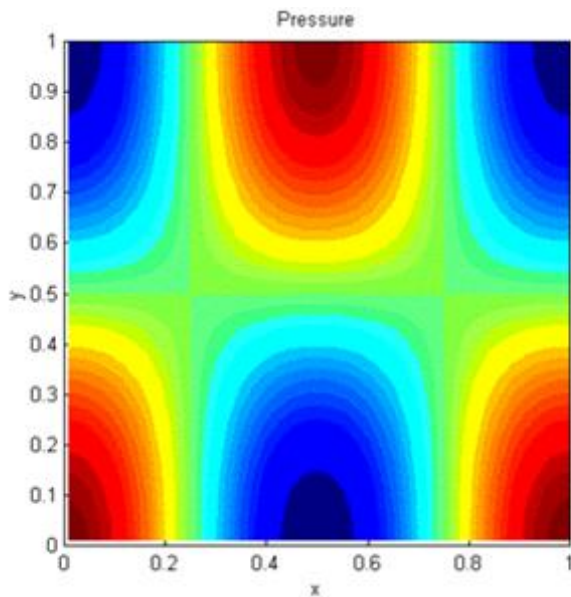


그림 43 세로 기본 진동, 가로 2배 진동이 일어날 때 압력이 극대인 순간의 압력 분포

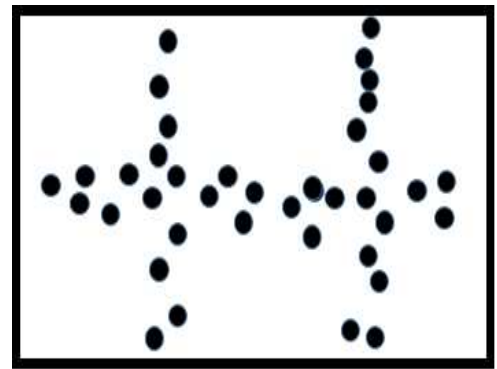


그림 44 세로 기본 진동, 가로 2배 진동이 일어날 때 스티로폼 구의 모임 형태 예상

즉, 그림 43과 같은 공명이 만들어져서 초록색 부분에 그림 44처럼 스티로폼 구가 모일 것으로 기대하였다.

3) 각 탐구자의 ‘아’ 발음 인식 공명 상자 실험 결과(미확인)

5차 작품의 기본 탐구(상자별로 진동수에 따른 정상과 형태 관찰)를 진행하던 도중 스피커가 파손되어 더 이상 실험을 진행할 수 없어졌다.

그래서 제작한 ‘아’ 발음 공명 상자에 실제 ‘아’ 발음을 넣어 주었을 때 스티로폼 구가 특정 모양으로 정렬하는지 확인을 하지 못한 상황이다.

추가 주문한 스피커가 도착하는 대로 탐구를 이어서 진행하고자 한다.

4. 결론 및 활용 방안

가. 결론

1) 2차원 정상파 가시화

아주 오래되고 대표적인 정상파 가시화 실험인 쿤트관을 1차원에서 2차원으로 확장하여 가로와 세로 방향으로 각각 만들어지는 정상파의 모습을 직접 눈으로 관찰할 수 있는 ‘직육면체 공명 상자를 이용한 2차원 정상파 가시화 장치’를 고안하고 문제점을 개선하는 탐구를 하였다.

2) 2차원 정상파 가시화 장치에 나타난 미세 입자 자기 결합 현상 관찰 및 해석

5차에 걸쳐 제작 및 개선한 ‘2차원 정상파 가시화 장치’에 다양한 진동수의 음파를 넣어 다양한 형태의 정상파를 관찰하였다.

간단한 기주 공명 이론식과 컴퓨터 시뮬레이션을 활용하여 각각의 정상파의 형태가 나타난 이유를 해석하였다.

일부 정상파의 형태는 해석이 불가능했으나 향후 이론을 더 공부하고 실험을 반복하여 원인을 찾아내고자 한다.

3) ‘아’ 발음에 반응하는 2차원 공명 상자에 대한 탐구

사람의 모음 발음에는 두 개의 포먼트(공명 진동수)가 있다는 점에 착안하여 탐구자 각각의 ‘아’ 발음 포먼트에 공명할 수 있는 크기의 공명 상자를 제작하였다.

실험 장비의 고장으로 아직 결과를 확인하지 못했지만 실험 장비가 수리 되는 대로 추가 실험을 진행하여 확인하고자 한다.

나. 활용 방안

1) 미세 플라스틱, 미세 먼지 수집 장치에 활용

음향 정상파를 이용해 스티로폼 구가 다양한 형태로 모이는 것을 관찰한 우리의 탐구는 요즘 크게 문제가 되고 있는 미세 플라스틱이나 미세 먼지를 수집할 수 있는 방법이 될 수 있다.

가정집의 방을 비롯해 대부분의 실내 공간은 직육면체에 가까우므로 직육면체의 각 꼭짓점에 스피커를 설치하고 방 크기에 맞는 음파를 재생하면 방의 특정 위치에 미세 먼지가 모일 수 있을 것이다.

또, 반도체 공장 클린룸과 같이 먼지를 제어해야 하는 곳에 필터를 이용한 기존의 방법 외에 보조적인 방법으로 사용될 수 있을 것이다.

2) 음성 및 화자 인식 및 가시화

비록 아직 확인하지는 못했지만 특정 크기로 제작된 공명 상자는 특정 화자의 특정 발음에만 공명을 일으켜 스티로폼 구가 모일 수 있을 것이다. 이 기술은 듣지 못하는 청각 장애인에게 특정한 소리만이라도 눈으로 인식할 수 있도록 도와주는 장치 개발에 한 가지 아이디어가 될 수 있을 것이다.

5. 참고 문헌

1. 톱니파와 공명관을 이용한 우리말 모음 발성 장치 개발 및 이를 이용한 한글 모음의 우수성 탐구, 김민섭 이민재 김도현, 제63회 과학전람회. 2017.
2. 위키 백과: 쿤트관
3. Roomresponse.com
4. Wikipedia: Acoustic resonance.
5. 정상파에 의한 입자 포획 현상과 파동 물리 교수-학습에의 적용, 황해량, 부경대학교 석사학위논문, 2012.
6. 정재파를 이용한 수채 내 입자 분리 기술, 한국건설기술연구원 2013년도 주요사업 최종보고서.
7. Acoustic levitation of particles, Andreas M. Munk, Department of Physics Technical University of Denmark, 2016.
8. Acoustic levitation, Saša Hrka, University of Ljubljana, 2015.