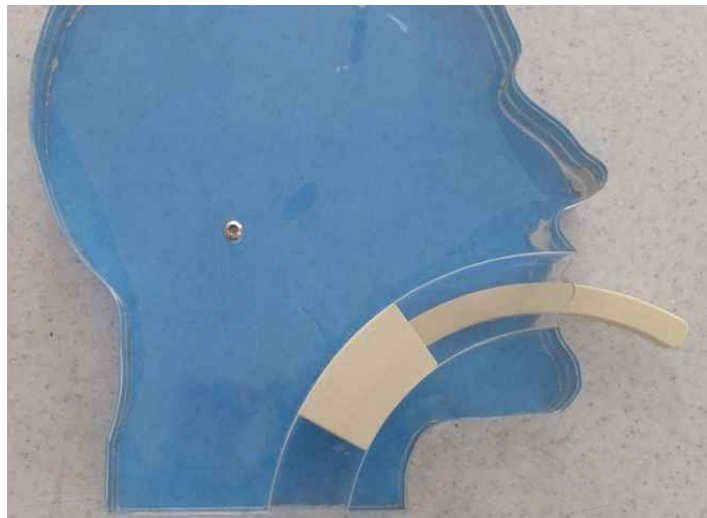


출품번호
1152

제63회 전국과학전람회

톱니파와 이퀄라이저 및 공명관을
이용한 우리말 모음 발성

출품부문	학생부	출품분야	물리
------	-----	------	----



2017. 7. 3.

구 분	성 명
출품학생	김○○, 이○○, 김○○
지도교사	정도일

목 차

1. 서론	1
가. 탐구 동기	1
나. 탐구 목적	1
2. 이론적 배경	2
가. 선행 연구 분석	2
나. 음성 음향학 이론	4
다. 공명 이론	6
라. 성도의 면적 함수	8
마. 우리말 음운론 및 모음 삼각도	9
3. 실험 장치 및 측정 방법	11
가. 실험 장치 개요도	11
나. 실험 장치 상세 스펙	11
다. 목소리 분석 및 공명관 주파수 특성 측정 방법	12
4. 탐구 내용 및 결과	16
가. 탐구 1. 모음 인식 원리 및 모음 합성	16
1) 음높이와 발음 변화에 따른 포먼트 변화	16
2) 톱니파와 이퀄라이저를 이용한 모음 합성	21
나. 탐구 2. 모음 발성 장치 제작	23
1) 가변형 직육면체 공명상자를 이용한 발성 장치 제작	23
2) 실제 성도와 면적 함수가 같은 공명관 발성 장치 제작	26
3) ‘가변형 관 모형’ 발성 장치 제작	28
다. 탐구 3. 모음 발성 원리 탐구	30
1) 혀의 위치에 따른 발음 변화	30
2) 입술의 열린 면적 변화에 따른 발음 변화	35
라. 탐구 4. ‘얼굴형 발성 원리 교육 모형’ 제작 및 활용	37
5. 결론 및 활용 방안	39
6. 참고문헌	41

<표 차례>

표 1 음성 합성 관련 학생 연구	2
표 2 음성 합성 관련 국내 연구 논문	2
표 3 음성 합성 관련 해외 연구	3
표 4 우리말 모음 분류	10
표 5 음높이에 따른 파형과 포먼트	18
표 6 모음 발음에 따른 파형과 포먼트	19
표 7 모음 삼각도와 포먼트 그래프의 관계	20
표 8 스티로폼 원통의 위치에 따른 가변형 관 모형의 포먼트와 들리는 발음	34
표 9 입구 면적 변화에 3D 프린터 ‘아’ 공명관의 포먼트와 들리는 발음	36

<그림 차례>

그림 1 Kratzenstein의 공명 장치	3
그림 2 acoustic-mechanical speech machine	3
그림 3 Kempelen 발성 장치 개념도	3
그림 4 Voder&Vocoder 발표회	3
그림 5 electronic vowel sound synthesizer science kit (1960)	3
그림 6 Wavenet 홈페이지	4
그림 7 파동의 중첩	4
그림 8 푸리에 변환	5
그림 9 음원-여과기 이론	6
그림 10 한 쪽이 닫힌 폐관에서의 정상파	7
그림 11 헬름홀츠 공명	7
그림 12 Room mode 공명의 형태	8
그림 14 ‘아’ 발음 성도 면적 함수(왼쪽)와 ‘이’ 발음 성도 면적 함수(오른쪽) (출처 Fant)	9
그림 15 ‘아’ 발음 성도 MRI 사진(왼쪽)과 ‘이’ 발음 성도 MRR 사진(오른쪽)	9
그림 16 우리말 모음 삼각도	10
그림 17 실험 장치 개요도	11
그림 18 스피커 사양 및 응답 특성	11
그림 19 마이크 응답 특성 및 지향성	12
그림 22 CoolEditPro ‘아’ 목소리 주파수 분석 화면	12
그림 23 CoolEditPro FFT size 조절하여 포먼트가 잘 보이는 화면	13

그림 24 Praat 이용 기본진동수와 포먼트 측정 화면.(Spectrogram)	13
그림 25 공명관의 주파수 응답 특성 측정 장면 사진	14
그림 26 마이크 응답 특성	15
그림 27 스피커 응답 특성	15
그림 28 스피커 주변 받침대 및 마개	16
그림 29 탐구자 1이 ‘도’ 음높이로 ‘아’ 발음한 소리의 분석 화면	17
그림 30 탐구자1 도 아	18
그림 31 탐구자2 도 아	18
그림 32 탐구자3 도 아	18
그림 33 탐구자1 미 아	18
그림 34 탐구자2 미 아	18
그림 35 탐구자3 미 아	18
그림 36 탐구자1 솔 아	18
그림 37 탐구자2 솔 아	18
그림 38 탐구자1 솔 아	18
그림 39 탐구자1 아	19
그림 40 탐구자2 아	19
그림 41 탐구자3 아	19
그림 42 탐구자1 에	19
그림 43 탐구자2 에	19
그림 44 탐구자3 에	19
그림 45 탐구자1 이	19
그림 46 탐구자2 이	19
그림 47 탐구자3 이	19
그림 48 탐구자1 오	19
그림 49 탐구자2 오	19
그림 50 탐구자3 오	19
그림 51 탐구자1 우	19
그림 52 탐구자2 우	19
그림 53 탐구자3 우	19
그림 54 우리가 측정한 모음의 포먼트로 만든 모음 포먼트 그래프	20
그림 55 CoolEditPro로 만든 100Hz 톱니파의 파형과 주파수 스펙트럼	21
그림 56 Graphic equalizer 에서 800Hz와 1200Hz를 증폭시킨 화면	22

그림 57	톱니파와 이퀄라이저로 만든 ‘아’ (800Hz와 1200Hz 증폭)	22
그림 58	톱니파와 이퀄라이저로 만든 ‘이’ (300Hz와 2500Hz 증폭)	23
그림 59	다양한 크기의 공명 상자	24
그림 60	가변형 직육면체 공명상자로 모음을 만드는 장면 사진	25
그림 61	가변형 직육면체 공명상자 ‘아’의 주파수 응답 특성	26
그림 62	‘아’ 발음을 할 때 성도의 면적 함수와 MRI 사진	27
그림 63	‘이’ 발음을 할 때 성도의 면적 함수와 MRI 사진	27
그림 64	‘우’ 발음을 할 때 성도의 면적 함수와 MRI 사진	27
그림 65	‘아’ 발음 성도 모델링	27
그림 66	‘이’ 발음 성도 모델링	27
그림 67	‘우’ 발음 성도 모델링	27
그림 68	3D 프린터로 출력된 ‘아’ 발음 성도 모형 반쪽	28
그림 69	완성된 성도 모형, 왼쪽부터 ‘아’, ‘이’, ‘우’ 발음을 낸다.	28
그림 77	‘아’ 발음 성도 모형 공명관의 응답 특성	28
그림 78	‘이’ 발음 성도 모형 공명관의 응답 특성	28
그림 79	‘우’ 발음 성도 모형 공명관의 응답 특성	28
그림 80	발음별 성도 형태. 왼쪽부터 ‘아’, ‘이’, ‘우’이다. (아래가 성대, 위가 입술)	29
그림 81	가변형 관 모형 제작	30
그림 82	아크릴 관의 기주 공명 실험	30
그림 83	아크릴 관의 응답 특성(초록:46mm, 분홍:30mm, 보라:20mm, 노랑:15mm)	31
그림 84	스티로폼 원통의 위치 변화(왼쪽부터 0cm, 2cm, 4cm,..., 12cm)	32
그림 85	스티로폼 원통의 위치에 따른 응답 특성(초록:0cm, 분홍:2cm, 보라:4cm, 노랑:6cm)	32
그림 86	스티로폼 원통의 위치에 따른 응답 특성(초록:6cm, 분홍:8cm, 보라:10cm, 노랑:12cm)	33
그림 87	스티로폼 원통의 위치에 따른 포먼트 변화	34
그림 88	입구 면적 변화에 따른 ‘아’ 발음 성대 모형의 응답 특성(초록:개방, 분홍:1/2, 보라:1/4, 노랑:1/8)	35
그림 89	입구 면적 변화에 따른 3D 프린터 ‘아’ 공명관의 포먼트 그래프	36
그림 90	입구가 좁아짐에 따라 정상파의 파장이 길어지는 원리(파란색은 음압의 진폭을 나타냄)	37
그림 91	얼굴형 발성 원리 교육 모형	37
그림 92	얼굴형 발성 원리 교육 모형을 이용한 모음 발성	38

1. 서론

가. 탐구 동기

4차 산업 혁명 시대를 맞이해 다양한 인공 지능이 우리에게 다가오고 있다. 그 중에서 음성 인식은 우리에게 매우 친숙한 분야이다. 애플의 시리나 삼성의 빅스비 같은 개인 비서는 사람의 말을 알아듣고 그에 맞는 응답을 한다. 인공 지능은 어떻게 사람의 발음을 인식하는 것인지 궁금해 졌다. 구체적으로 과학시간에 음파의 3 요소에 대해 배우면서 ‘아’ 발음과 ‘오’ 발음은 파형이 다르다고 배웠는데 파형의 어떤 요소를 인공지능이 측정하여 발음을 인식하는지 궁금해 졌다.

문헌 조사 결과 주파수 분석을 통한 포먼트를 이용해 모음 발음을 구별할 수 있으며, 성대에서 만들어진 음파가 목구멍을 통해 흘러나오면서 혀나 입천장 등의 구강 구조물의 변화에 따라 다양한 공명음으로 변함으로써 포먼트를 만든다는 것을 알게 되었다.

우리는 음성 음향학적 측면에서 우리말 모음의 특징을 직접 측정을 통해 알아내고 이를 토대로 우리말 발음을 낼 수 있는 실물 장치를 만들어보고 싶다는 생각이 들었고, 이 장치를 이용해 사람의 발성 원리에 대해 심도 있게 탐구해 보고 싶었다.

나. 탐구 목적

- 1) 사람이나 컴퓨터가 **모음을 인식하는 원리**를 직접 측정과 실험을 통해 알아본다.
- 2) 모음 인식 원리에 따라 **툽니파와 이퀄라이저를 이용해** 특정 주파수를 증폭시켜 **우리말 모음을 만들어 낸다.**
- 3) 직육면체, 원통 등 다양한 형태에 따른 공명을 이용하여 모음과 비슷한 소리를 구현할 수 있는 **실물 발성 장치를 제작한다.**
- 4) 제작한 발성 장치를 이용하여 **모음 발성 원리**에 대해 심도 있게 알아본다.

2. 이론적 배경

가. 선행 연구 분석

1) 음성 합성 관련 학생 연구

표 1 음성 합성 관련 학생 연구

순번	연구자	연구주제	연구내용 분석
1	충북 과학 고등학교 (2012 과학전람회)	공명관 실험장치 제작을 통한 한글 모음 발음	모음 분석을 통해 혀의 높낮이에 따라 포먼트가 어떤 경향성을 가지고 바뀌는 지를 설명 하고자 하였다. 직경이 다른 두 관을 만들어 모음과 비슷한 소리를 내는 실물 도구 제작의 가능성을 확인 하였다. 그러나 기본진동수와 포먼트의 관계를 잘 이해하지 못한 것으로 보이며, 공기를 진동시켜주는 음원으로 Sine 파를 사용함으로 인해 실제 모음 소리 재생에는 실패했을 것으로 보인다.
2	관악고 (2014 서울학생탐구 발표대회)	Goldwave를 이용한 한글의 음소 추출 및 음성 합성	우리말 발음을 녹음하고 음소에 해당하는 부분을 잘라낸 후 필요한 음소를 이어 붙여서 다양한 한글 발음을 합성하였다. 자음과 모음을 모두 포함하는 단어를 합성하였으나 녹음한 음소를 이어 붙이는 초기 단계의 음성 합성 방법으로 우리의 연구와는 방향이 다르다.

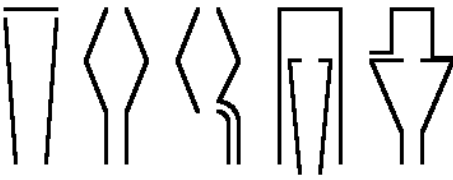
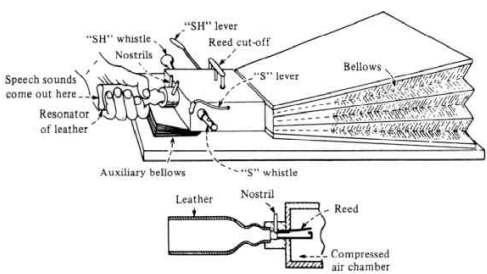
2) 음성 합성과 관련된 국내 연구 논문.

표 2 음성 합성 관련 국내 연구 논문

순번	연구자	연구주제	연구내용 분석
1	홍수기 (학위논문 (박사) 성균관대학교 일반대학원: 물리학과 2006)	모음 생성과 모음의 공명주파수 변화에 관한 음향학적 연구	화자 인식에 관한 기초 연구로서 모음 발성 메커니즘에 관한 연구이다. 좁힘 부분이 있는 관의 공명 주파수에 대해 실험과 이론적 접근을 하였다. (우리의 가변형 관 모형 실험과 유사한 부분이 있다. 그러나 우리는 탐구가 거의 진행된 후에 이 논문을 발견하였다.)

3) 음성 합성(Speech synthesis) 관련 해외 연구 역사

표 3 음성 합성 관련 해외 연구

순번	연구자	연구주제	연구내용 분석
1	Christian Gottlieb Kratzenstein (1779 Russia)	/a/ /e/ /i/ /o/ /u/  성도의 모양과 비슷한 공명 장치로 5가지 모음을 만들어 내는데 성공하였다. 그림 1 Kratzenstein의 공명 장치	
2	Wolfgang von Kempelen (1791 Hungary)	 그림 2 acoustic-mechanical speech machine	 그림 3 Kempelen 발성 장치 개념도 벨로우즈와 리드로 진동을 만들고 가축 공명관을 손으로 쥐어 원하는 모음을 재생하였다. 이 후 많은 학자들에 의해 개선되어 후속 모델이 나왔다.
3	Bell labs (1940)	The 'Voder' & 'Vocoder' Homer Dudley, USA, 1940  Homer Dudley's Voder 1940 그림 4 Voder&Vocoder 발표회	 그림 5 electronic vowel sound synthesizer science kit (1960) 3개의 LC 공진 회로로 3개의 포먼트를 재현함으로써 주파수 기반 음성 합성 실험을 할 수 있는 키트.

순번	연구자	연구주제	연구내용 분석
4	Apple Microsoft Google 등 (현재)	활발하게 음성 인식 및 음성 합성 연구 진행. 구글의 Wavenet은 한숨소리나 긴장감에 의해 떨리는 목소리도 표현할 정도로 거의 자연어에 가까운 음성 합성 결과를 보여줌.  그림 6 Wavenet 홈페이지	1930년대 이후 음성 발생 원리가 연구되고 전자 회로 기술이 발달하면서 기계적인 장치로 음성을 합성하는 연구는 쇠퇴함. 전자 회로를 통해 음성신호를 만들고 필요한 부분을 편집하여 원하는 음성을 만들어내는 방향으로 발전. 최근에는 HMM, Deep learning 등 방식을 이용해 음성 인식이 획기적으로 높아졌으며 자연스러운 음성 발생이 가능해 짐.

나. 음성 음향학 이론

1) 소리의 3 요소: 크기, 높낮이, 음색

2) 음파의 3 요소: 진폭, 진동수(기본 진동수), 파형(배음)

3) 파동의 중첩

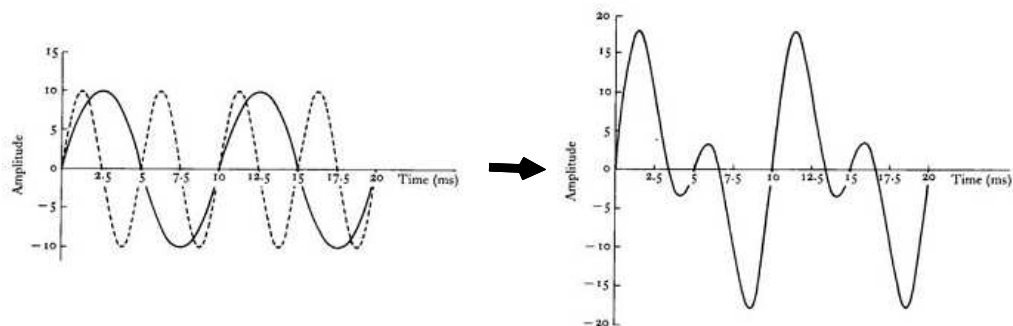


그림 7 파동의 중첩

그림 7을 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.

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

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 8의 (a)파가 (b), (c), (d)의 조화파의 합이라면 푸리에 변환을 통해 (e)와 같은 주파수 영역에 나타낼 수 있다. 이를 스펙트럼이라고도 한다.

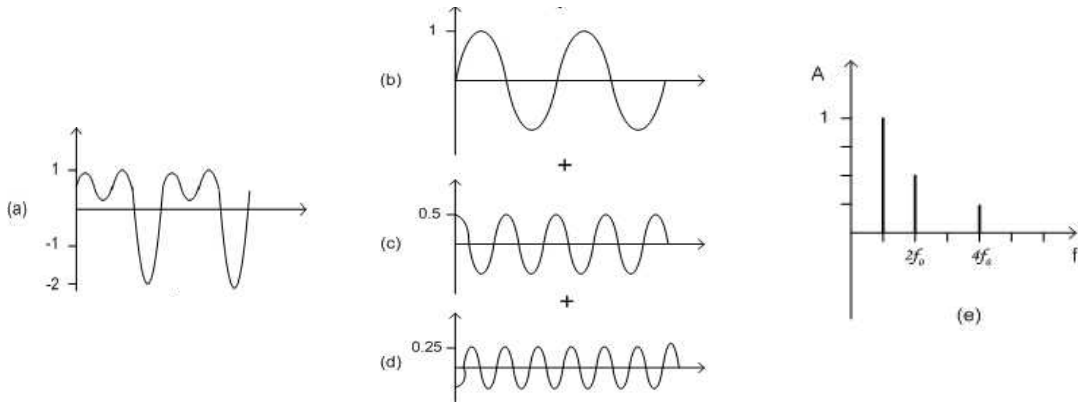


그림 8 푸리에 변환

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.

5) 음원-여과기(Source-Filter) 이론

성대에서 만들어진 진동(Source)이 성도(목구멍, 구강, 비강, 혀, 입술 등으로 만들어진 통로)를 거치면서 주파수에 따라 공명함(Filter)으로서 음성이 만들어진다는 이론.

가) 성대의 진동(툽니파)

성대는 폐로부터 나오는 공기의 흐름을 막았다 열었다 반복함으로써 음파를 만들어낸다. 성대가 만드는 음파는 그림 9의 왼쪽 위 그림처럼 툽니파에 가까운 파이다.

툽니파는 푸리에 변환을 하면 풍부하면서도 고른 배음을 가지고 있는 파이다. 따라서 성도의 공진에 의해 특정 진동수 영역이 증폭되거나 감소되어 발음이 만들어 지기에 가장 유리하다.

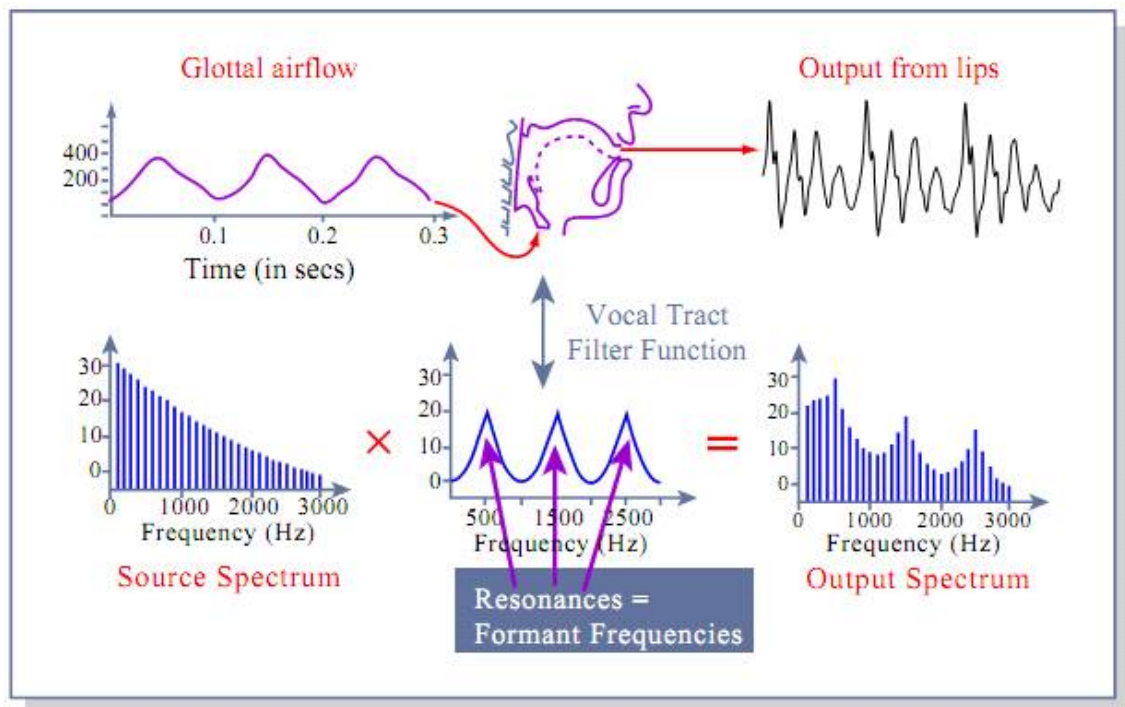


Image by MIT OpenCourseWare.

그림 9 음원-여파기 이론

나) 성도의 공진

성도의 공진의 원리는 기본적으로 기주 공명 이론으로 시작 한다. 성도를 단면적이 일정한 공기 기둥으로 보는 것이다. 특히 성대 쪽은 닫힌 관, 입술 쪽은 열린 관으로 취급하여 한쪽이 닫힌 관으로 설명한다. 여기에 헬름홀츠 공명, Perturbation 이론 등으로 다양한 공진의 변화를 설명할 수 있다.

다) 포먼트(Formant)

음성 신호를 푸리에 변환하여 스펙트럼으로 나타내었을 때 성도의 공진에 의해 증폭된 진동수를 포먼트라고 한다. 진동수가 낮은 것부터 제1포먼트(F1), 제2포먼트(F2),... 등으로 부르며 F1과 F2 만으로도 단순한 모음의 구별은 가능하다.

어떤 분야에서는 기본 진동수(Fundamental frequency)를 F0로 표현하기도 한다.

다. 공명 이론

음성학이나 음향학의 대표적인 공명 이론에는 기주 공명 이론과 헬름홀츠 공명 이론, Room mode 공명 등이 있다.

각각의 공명 이론에 대해 자세히 알아보자.

1) 기주 공명 이론

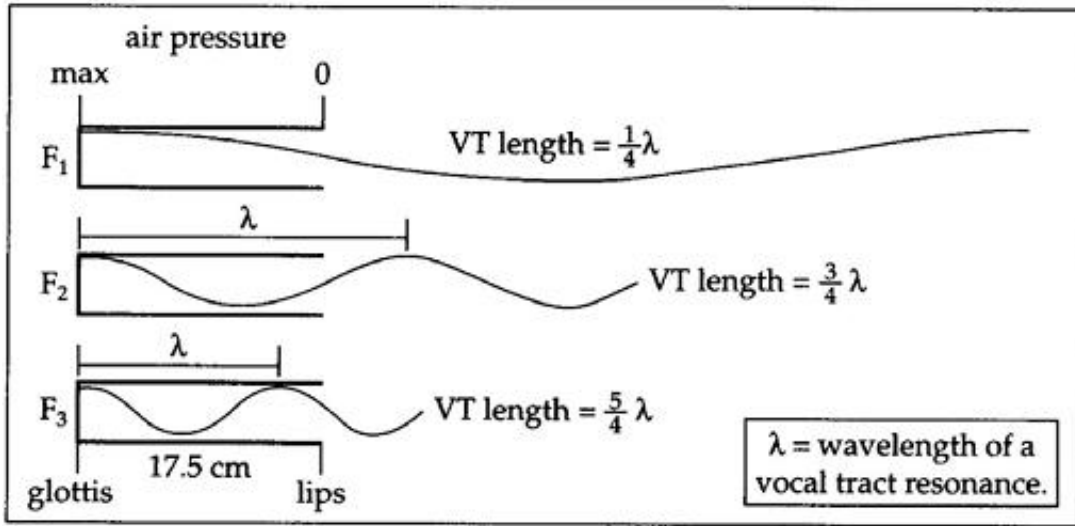


그림 10 한 쪽이 닫힌 폐관에서의 정상파
성도를 직경이 일정한 관으로 볼 때 성대부분은 닫힌 경계로, 입술 부분은 열린 경계로 취급하여 한쪽이 닫힌 폐관이 된다. 성도의 길이를 L 이라 하면 한 쪽이 닫힌 폐관의 식을 적용하여 F_1 은 $\lambda = 4L$ 일 때, F_2 는 $\lambda = \frac{4}{3}L$ 일 때, F_3 는 $\lambda = \frac{4}{5}L$ 일 때 나타난다.

$$\text{즉, } F_n = \frac{v}{4L}(2n-1) \text{가 된다. (단, } n=1,2,3,\dots, v \text{는 음속)}$$

성도의 평균 길이 17cm와 음속 340m/s로 계산하면 $F_1 = 500\text{Hz}$, $F_2 = 1500\text{Hz}$, $F_3 = 2500\text{Hz}$ 가 된다.

2) 헬름홀츠 공명 이론

성도를 좁은 입구를 가진 동공으로 볼 때 헬름홀츠 공명이론을 적용할 수 있다. 헬름홀츠 공명 진동수는 다음과 같다.

$$f = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{Vl}}$$

여기서 A 는 입구 단면적, l 은 목의 길이 V 는 동공의 부피이다. 목의 공기는 질량 역할 동공 안의 공기는 스프링 역할을 하여 진동한다. 목이 없이 구멍만 있는 경우 관구 효과를 적용하여 $l = 0.85d$ 가 된다. 여기서 d 는 입구의 지름이다.

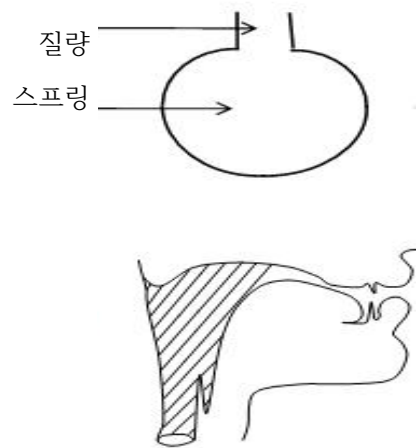


그림 11 헬름홀츠 공명

3) 직육면체 공명상자(Room mode) 공명 이론

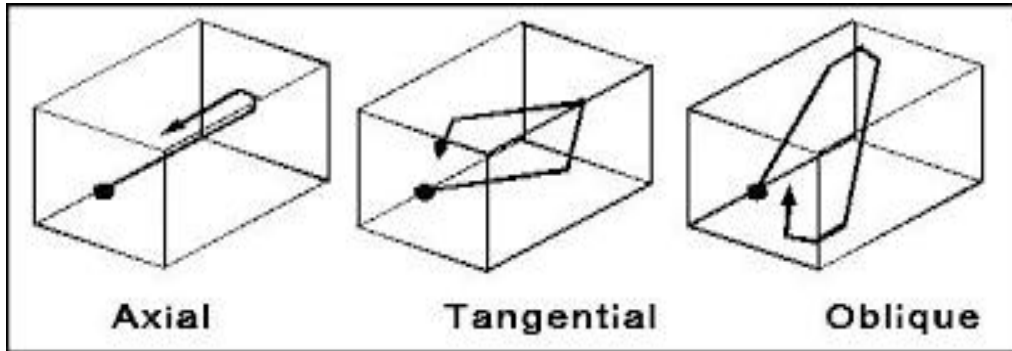


그림 12 Room mode 공명의 형태

직육면체 공명 상자에는 그림 12와 같은 모드의 공명이 존재한다. 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.

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

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

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

라. 성도의 면적 함수

성도란 성대에서부터 입술까지의 길이로 소리의 길이를 의미한다. 성대의 진동에 의해 만들어진 성대음과 배음들이 성도를 통해 공명되어 소리를 크게 만든다. 성도가 없이 소리가 나는 것은 기타에서 기타 통이 없이 기타 줄만 튕기는 것과 같다.

한국 남성의 성도 길이는 17cm, 여성의 성도 길이는 16cm, 서양남성은 17.5cm, 여성은 16.5cm 정도로 알려져 있는데 성도 길이가 길어질수록 소리 공명주파수가 낮아지고 깊이 있고 울림 있는 소리가 만들어지며, 성도 길이가 짧아지면 공명 주파수는 높아지고 깊이가 없는 소리가 만들어진다.

성도의 길이는 대략 17cm로 일정한 반면 성도의 단면적은 위치에 따라 다르다. 또한 목구멍, 혀, 구강, 이, 입술 등에 의해 어떤 발음을 하느냐에 따라 성도의 위치에 따른 단면적이 달라진다. MRI 등의 방법으로 측정한 성도의 위치에 따른 단면적은 다음 그림과 같다. 이를 성도 면적 함수라고 한다.

모음 발성 원리를 설명하는 데 성도 면적 함수가 중요한 역할을 한다. 이 성도 면적 함수에 따라 성도의 공명 진동수(포먼트)가 달라지게 되고, 포먼트에 따라서 어떤 모음인지 인식 되는 것이다.

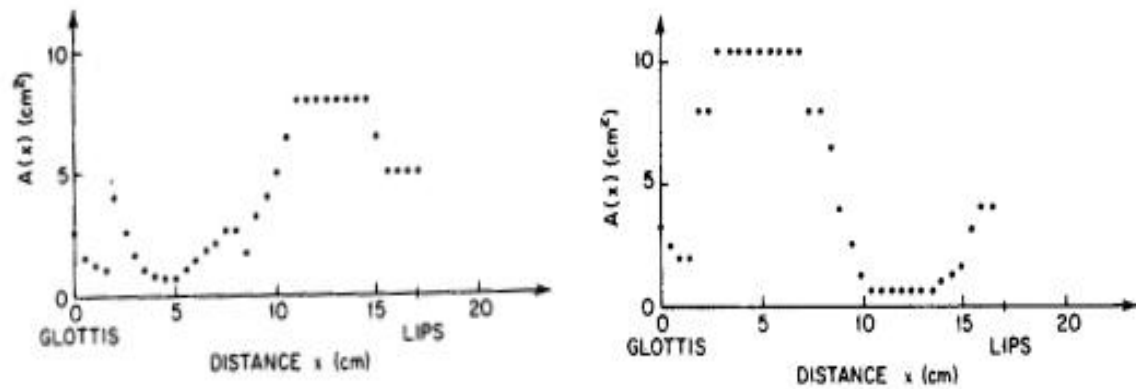


그림 14 ‘아’ 발음 성도 면적 함수(왼쪽)와 ‘이’ 발음 성도 면적 함수(오른쪽) (출처 Fant)

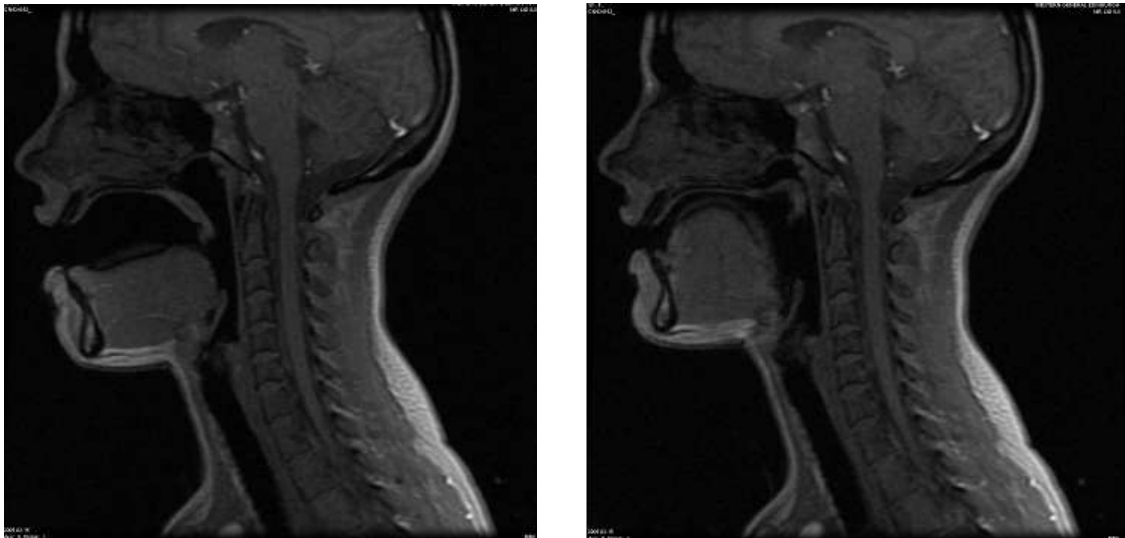


그림 15 ‘아’ 발음 성도 MRI 사진(왼쪽)과 ‘이’ 발음 성도 MRR 사진(오른쪽)

마. 우리말 음운론 및 모음 삼각도

1) 모음의 정의

자음(子音)과 대립되는 말로서 ‘홀소리’라고도 한다. 허파에서 올라온 공기가 구강통로(口腔通路)에서 마찰과 폐쇄에 장애 받지 않고 성대의 진동과 함께 나는 음. 음소로서의 모음과 구별하여 ‘모성(母聲, vocoid)’이라고도 한다. 모음은 단모음과 이중모음으로 구분된다.

2) 모음의 분류

한글 모음은 아래의 표에서 볼 수 있듯이 혀의 위치에 따라 전설, 후설 모음으로 나눌 수 있고, 입술의 모양에 따라 원순, 평순모음으로 나누어진다. 또한 혀의 높이에 따라 고모음, 중모음, 저모음으로 나눌 수 있다.

표 4 우리말 모음 분류

혀와 최고점의 위치 입술 모양 혀의 높이	앞(전설모음)		뒤(후설모음)	
	둥글지 않은 입술모양(평순)	둥근 입술모양(원순)	둥글지 않은 입술모양(평순)	둥근 입술모양(원순)
높음(고모음)	ㅣ	ㅜ	ㅡ	ㅗ
중간(중모음)	ㅔ	ㅟ	ㅓ	ㅛ
낮음(저모음)	ㅞ		ㅕ	

3) 모음 삼각도

다음 그림은 우리말 모음 삼각도이다. 입의 개방 정도, 혀의 앞뒤 위치, 혀의 높이로 모음이 결정되는 모습을 잘 나타내 준다.

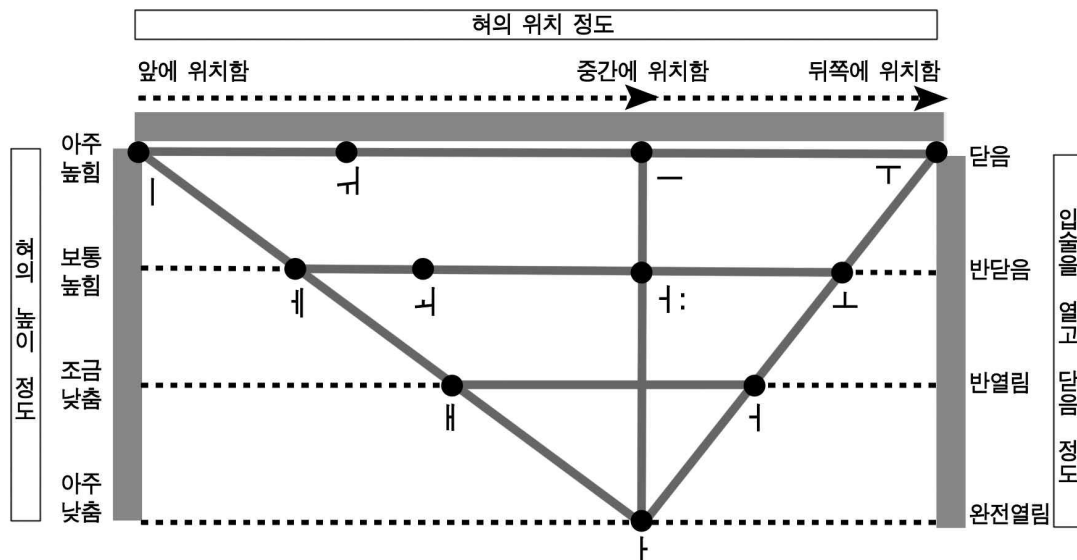


그림 16 우리말 모음 삼각도

3. 실험 장치 및 측정 방법

가. 실험 장치 개요도

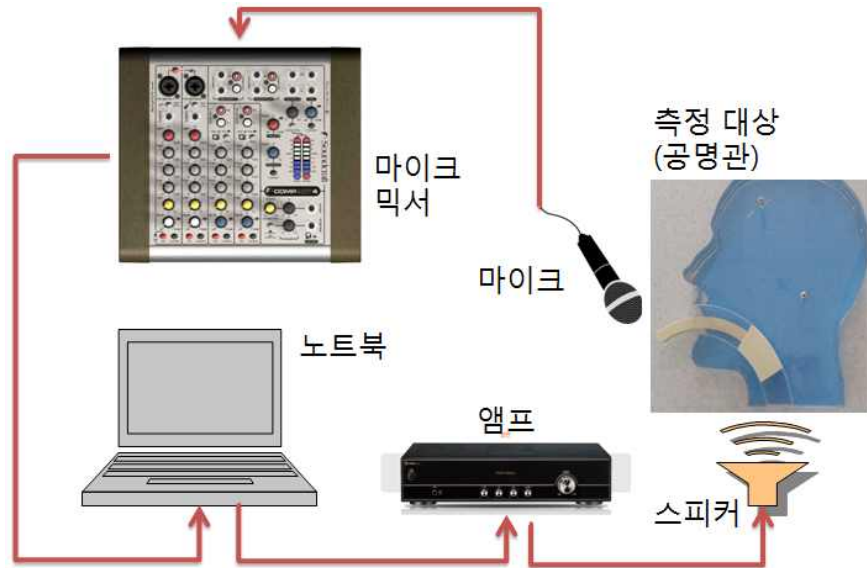


그림 17 실험 장치 개요도

나. 실험 장치 상세 스펙

- 1) Window7 노트북 내장 사운드카드 입출력 사용
- 2) 앰프: Bitway A2 디지털 앰프(Class D) 100W
- 3) 스피커: 삼미전자 NFS-100 혼스피커 드라이버 유닛

Power Rating	100 Watts
Frequency Range	150~5,000 Hz
Impedance	8 Ohms

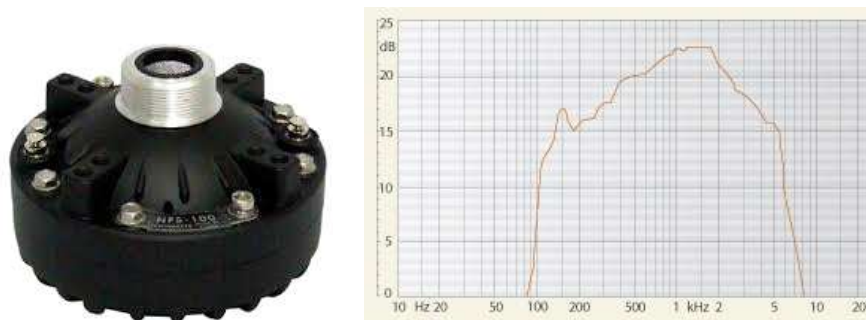


그림 18 스피커 사양 및 응답 특성

재생 가능한 주파수 영역이 좁고 응답 특성이 평탄하지 못해 1500Hz에서 피크가 있다. 그러나 좁은 관으로 낮은 진동수의 음파를 넣어 주어야 하는 우리 실험의 목적에는 가장 잘 맞는 제품으로 판단하여 사용을 결정하였다.

4) 마이크: GnS GP-2000 구스넥 컨덴서 마이크

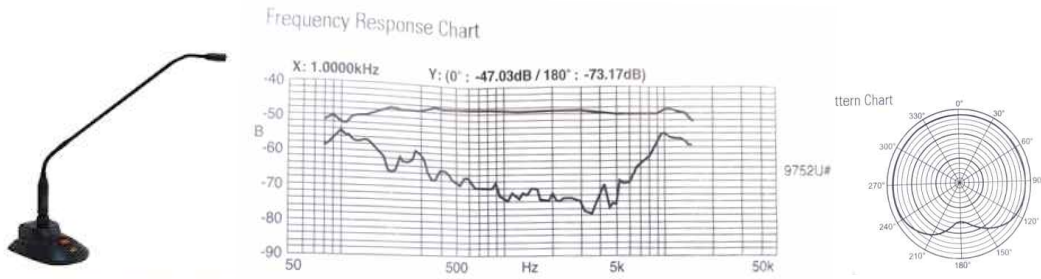


그림 19 마이크 응답 특성 및 지향성

학교 방송실에서 사용하는 마이크 중 가격과 변형이 쉽고 응답 특성도 평탄한 마이크를 선택하였다.

5) 마이크 믹서: InterM LM-9414 (학교 방송용)

다. 목소리 분석 및 주파수 응답 측정 방법

1) 사용 프로그램: Cool Edit Pro 2.1 및 Praat

2) 목소리 분석

가) ‘아’ 목소리를 녹음하여 주파수 분석(FFT)을 한 모습이다.

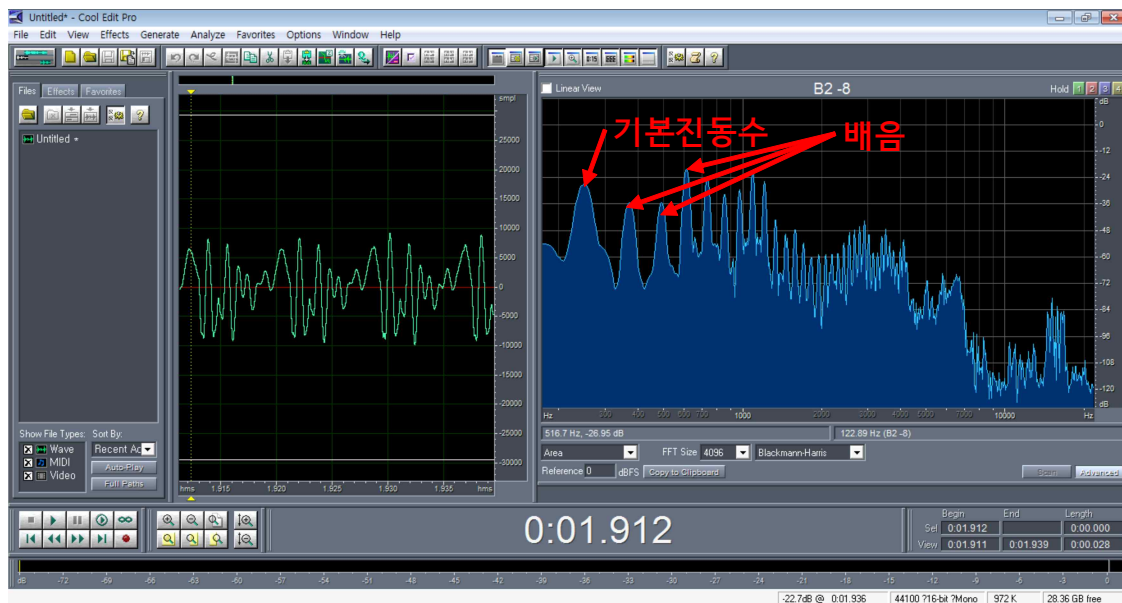


그림 22 CoolEditPro ‘아’ 목소리 주파수 분석 화면

나) 왼쪽은 시간에 따른 파형이 나타나며 오른쪽은 주파수 분석 결과이다. 왼쪽 그림의 x축은 시간(sec)이고 오른쪽 그림의 x축은 진동수(Hz)이다. 기본진동수와 배음이 잘 나타나고 있으며 배음들의 진폭이 다른 것을 볼 수 있다.

다) FFT Size를 조절하여 주파수 응답 곡선에서 배음이 드러나지 않도록 한 후 포먼트를 측정하였다.(빨간 동그라미의 주파수가 포먼트)

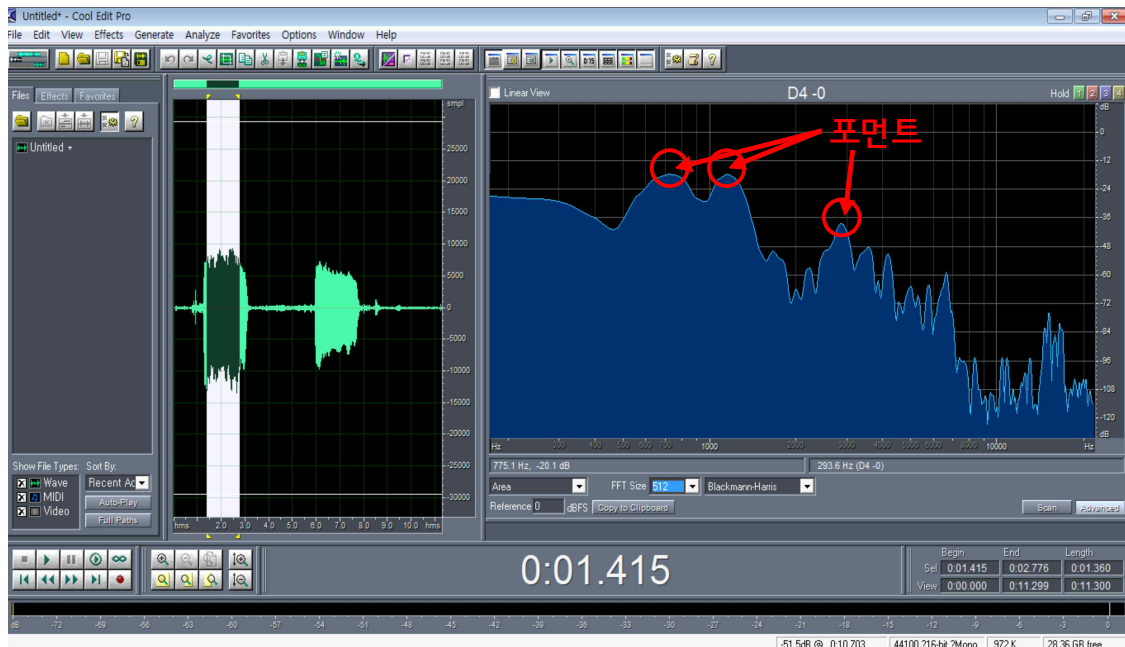
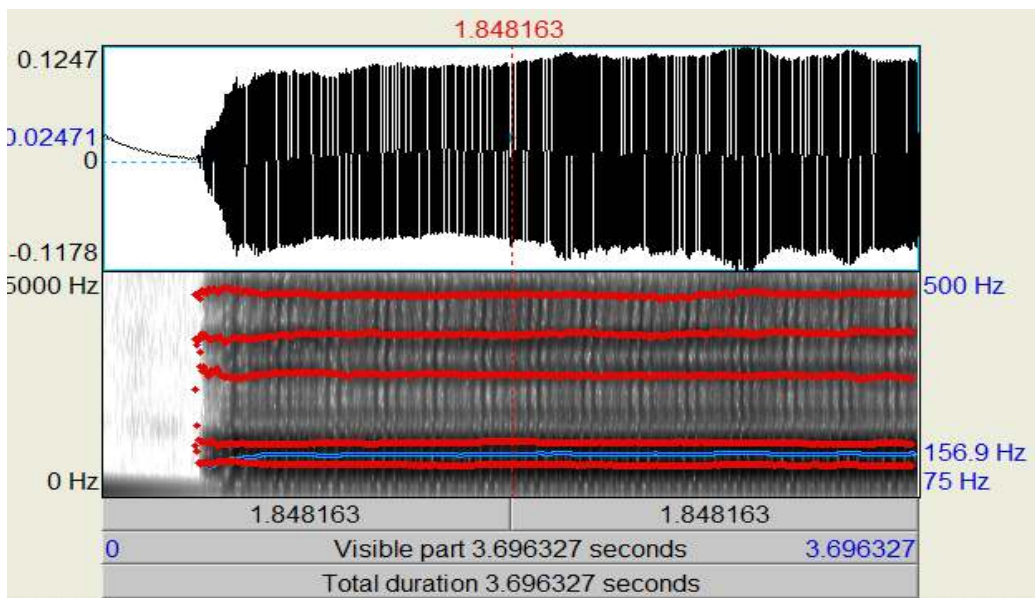


그림 23 CoolEditPro FFT size 조절하여 포먼트가 잘 보이는 화면

라) 음성이나 공명된 소리의 정보 중 포먼트를 주로 얻어야 하는 경우에는 Praat를 이용하여 자동으로 포먼트를 측정하였다.



F1_Hz	F2_Hz	F3_Hz	F4_Hz
687.753630	1212.401450	2698.132300	3575.186364

그림 24 Praat 이용 기본진동수와 포먼트 측정 화면.(Spectrogram)

3) 공명관의 주파수 응답 특성 측정(Impulse response)

가) 스피커와 마이크 배치

다음 그림 25처럼 스피커 위에 공명관을 올리고 음원을 재생한 후 마이크로 측정하였다. 왼쪽 아래 노트북 화면에는 스피커에서 재생할 파동의 파형과 주파수가 보이고 위쪽 모니터에는 녹음되는 소리의 파형과 주파수가 보이도록 하였다.

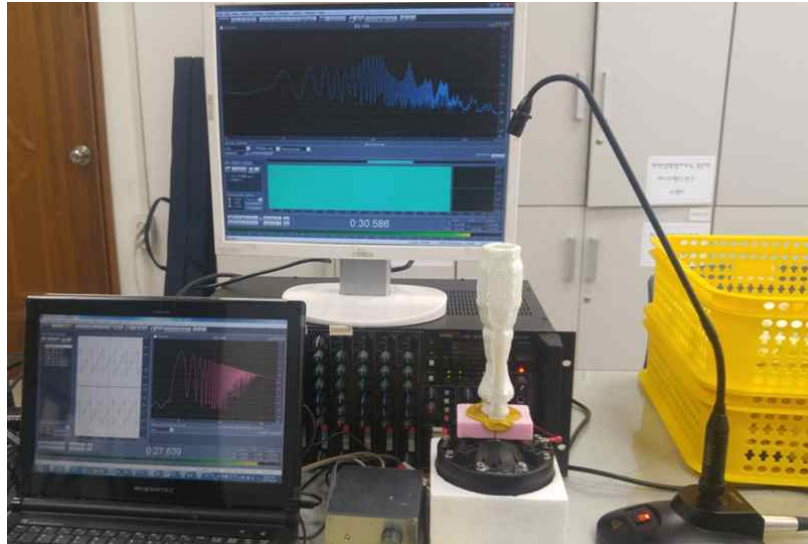


그림 25 공명관의 주파수 응답 특성 측정 장면 사진

스피커의 소리가 공명관으로 잘 들어갈 수 있도록 스티로폼(핑크색)으로 받침대를 만들고 고무찰흙을 붙여서 밀폐될 수 있도록 하였다.

나) 주파수 응답 측정 방법

스피커로 백색 잡음(White noise)을 재생하여 15초 동안 녹음된 소리를 주파수 분석(FFT)하는 방법으로 응답 특성을 측정하였다. 녹음 시간이 짧을 경우 잡음이 포함되어 응답 곡선이 부드럽지 않게 표현되었으며, 10초 이상의 녹음 시간에서는 육안으로 보아 비슷한 응답 곡선이 얻어졌다. 그래서 녹음 시간은 15초로 설정하였다.

Sweep 사인파를 이용한 응답 특성 측정 방법을 제공하는 사이트에서 측정한 응답 특성과 화이트 노이즈를 이용한 측정 결과가 거의 비슷하게 얻어져서 화이트 노이즈를 이용한 측정 방법을 사용하기로 결정하였다.(참고. Sweep 사인파를 이용한 응답 특성 측정 방법 제공 사이트 www.roomresponse.com)

다) 스피커와 마이크의 실제 응답 특성

(1) 마이크 응답 특성

아무 소리도 내지 않은 채 녹음해서 얻어 낸 마이크 응답 특성은 다음과 같다.

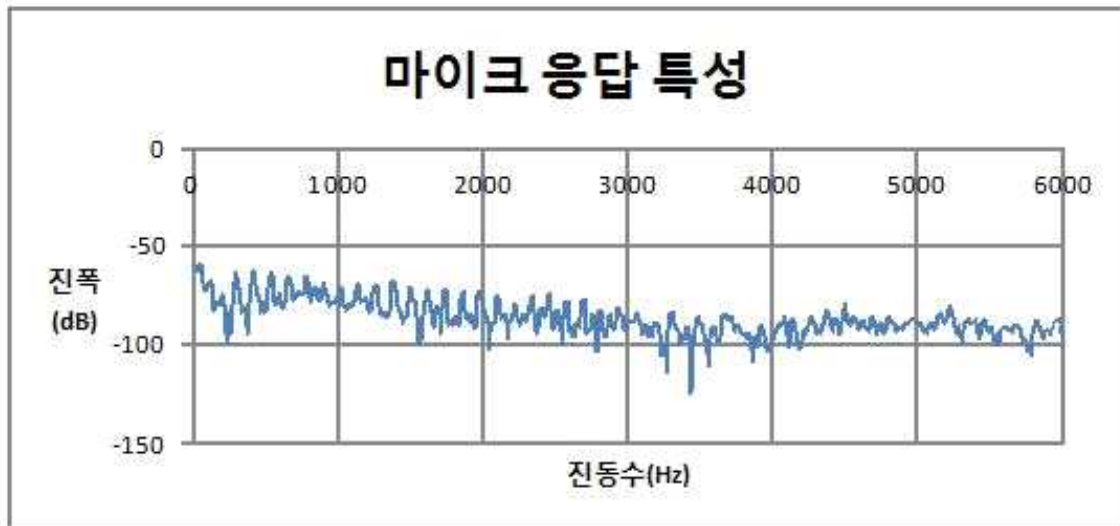


그림 26 마이크 응답 특성

대체로 큰 피크 없이 평탄한 응답 특성을 보여 주고 있다. 마이크를 끈 상태로 측정한 결과와도 큰 차이가 없어 마이크의 기본 잡음은 크지 않은 것으로 판단하였다. 마이크에 직접 바람을 불어 노이즈를 측정한 결과에서도 특별한 피크는 나타나지 않아 마이크의 응답 특성은 평탄한 것으로 확인하였다.

(2) 스피커 응답 특성

아무 공명관도 연결하지 않고 스피커에서 화이트 노이즈를 재생하여 응답 특성을 측정한 결과는 다음과 같다.

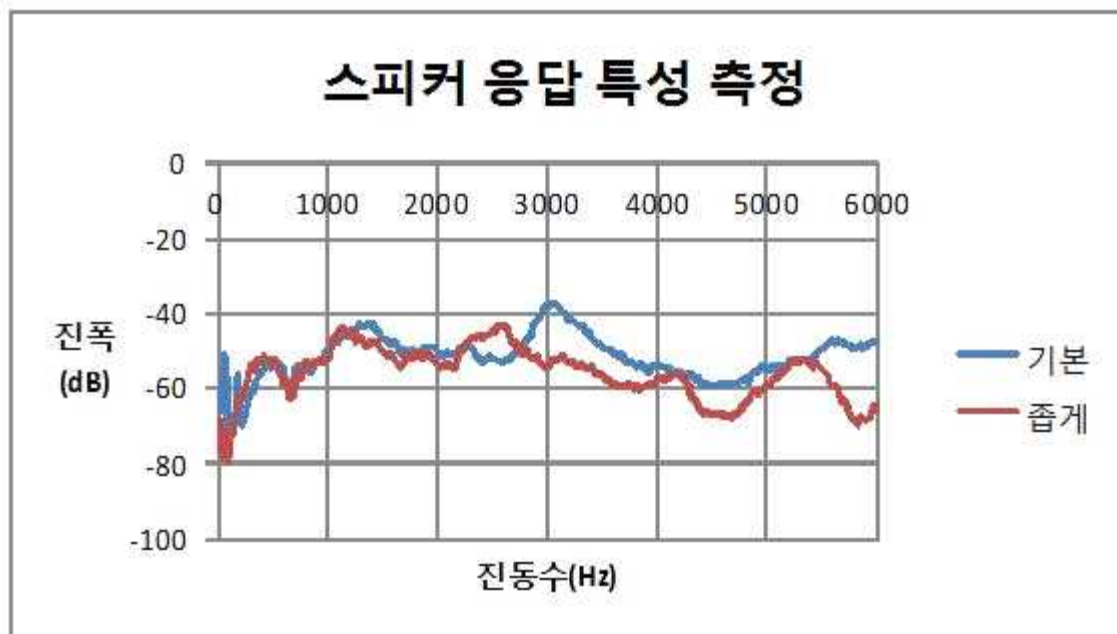


그림 27 스피커 응답 특성

그림 27의 파란 선('기본'으로 표시)을 보면 제품 사양에 표시된 것과 마찬가지로

1500Hz와 3000Hz 부근에서 피크가 보인다.

마이크 자체의 응답 특성에서 피크가 나타나면 녹음된 소리를 분석할 때 피크가 음원 때문인지 마이크 때문인지 구별하기가 어렵다. 그래서 이퀄라이저를 사용해 피크를 없애는 등 다양한 시도를 해 보았으나, 시도에 따른 또다른 왜곡이 생겨 실험 자료에 신뢰가 가지 않았다.

그런데 탐구 3의 기주 공명 실험 중 스피커의 위치가 이론과 달리 정상파의 배(음압)가 되지 않는 것을 발견하였다. 관의 크기에 비해 스피커가 커서 공기의 변위가 0이 되지 않고 움직였기 때문으로 판단하였다. 그래서 오른쪽 그림처럼 스피커의 출력 부분을 고무찰흙으로 막아 약 2mm의 구멍만 남겨 음원으로 사용하기로 결정하였다.

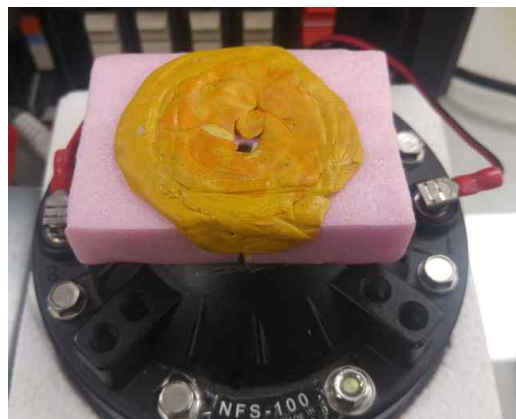


그림 28 스피커 주변 받침대 및 마개

이렇게 만든 음원의 응답 곡선은 그림 27의 ‘좁게’로 표현된 빨간색 곡선이다. 고무찰흙으로 막기 전보다 줄어들기는 했지만 1100Hz와 2500Hz 부근의 피크가 있다는 점을 이 후의 모든 측정에서 고려해야 할 것이다

4. 탐구 내용 및 결과

가. 탐구 1. 모음 인식 원리 및 모음 합성

1) 음높이와 발음 변화에 따른 포먼트 변화

가) 가설 설정

우리는 사람의 나이, 성별에 관계없이 모음을 인식한다. 심지어 음높이가 다른 소리도 같은 모음으로 인식한다. 따라서 같은 모음에서는 발음하는 사람이나 음높이에 관계없이 같은 포먼트가 측정될 것이고, 다른 모음에서는 다른 포먼트가 측정될 것이다.

나) 음높이에 따른 포먼트 변화 측정

탐구자 3명이 음높이를 달리해 ‘아’ 발음을 내고 포먼트를 측정해 보았다.

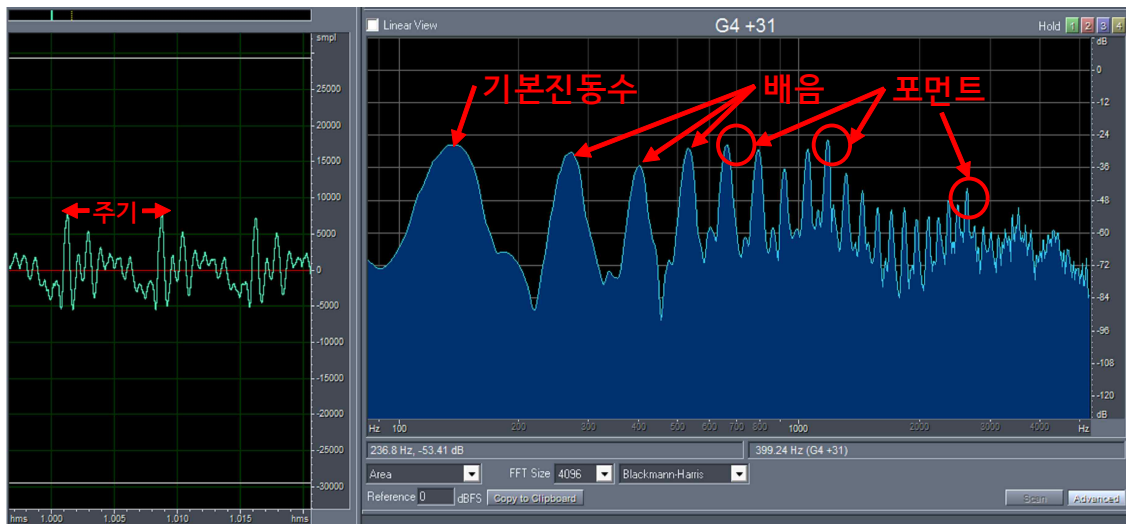


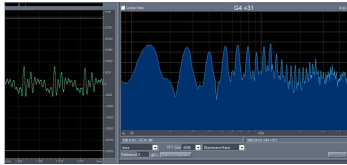
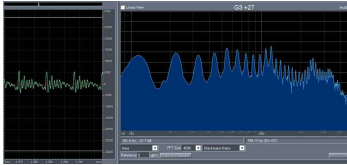
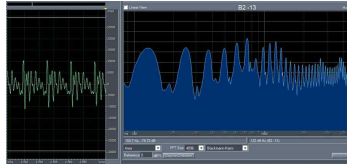
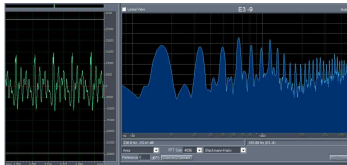
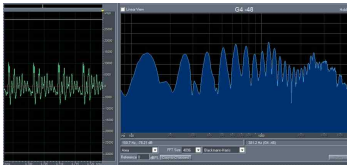
그림 29 탐구자 1이 ‘도’ 음높이로 ‘아’ 발음한 소리의 분석 화면

그림 29는 탐구자1이 ‘도’ 음높이로 ‘아’ 발음한 것을 분석한 것이다. 왼쪽 화면은 시간에 따른 파형을 나타낸다. x축은 시간축이며 한 칸에 5ms이다. 대략 8ms의 주기와 파형을 확인할 수 있다. 오른쪽 화면은 주파수 분석 화면이다. x축은 진동수이며 로그 스케일로 표시되어 있다. 대략 130Hz의 기본진동수와 130Hz의 정수배 되는 배음들을 볼 수 있으며 700Hz와 1200Hz, 2600Hz 근방의 배음의 진폭이 커서 포먼트가 있음을 볼 수 있다.

탐구자 3명이 각각 ‘도’, ‘미’, ‘솔’ 이라고 생각하는 음높이로 ‘아’ 발음을 한 측정 결과를 표 5에 나타내었다. 음이 높아짐에 따라 왼쪽 파형 그림에서 주기가 짧아지고 오른쪽 주파수 분석 화면에서 기본진동수와 배음 간의 간격이 넓어지는 것을 볼

수 있다. 반면에 배음의 봉우리들이 이루는 형태는 변하지 않아 포먼트는 변화가 없음을 볼 수 있다. 정확한 기본 진동수(F0)와 포먼트(F1, F2)는 Praat를 이용해 측정하였다.

표 5 음높이에 따른 과형과 포먼트

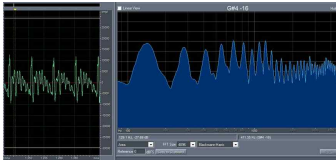
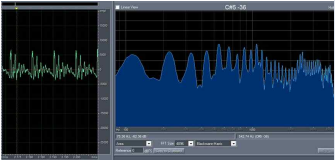
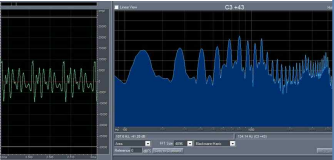
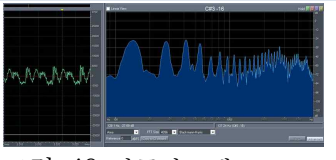
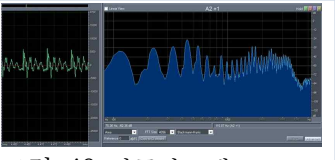
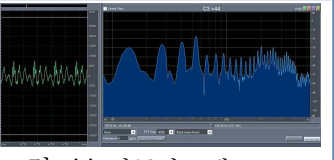
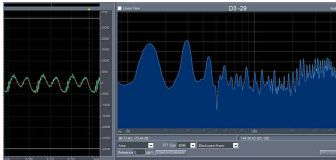
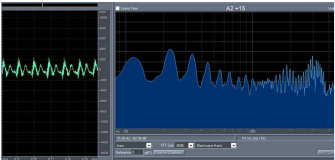
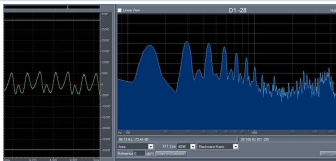
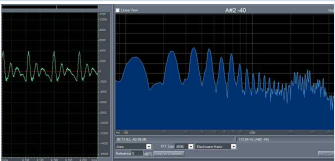
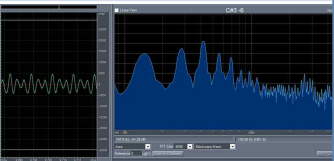
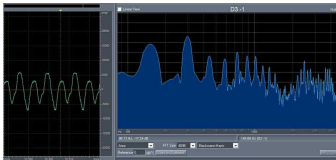
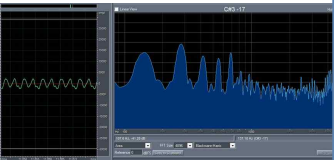
	탐구자 1		탐구자 2		탐구자 3	
도						
	그림 30 탐구자1 도 아		그림 31 탐구자2 도 아		그림 32 탐구자3 도 아	
	F0	132	F0	107	F0	124
	F1	697	F1	694	F1	731
	F2	1190	F2	1158	F2	1235
미						
	그림 33 탐구자1 미 아		그림 34 탐구자2 미 아		그림 35 탐구자3 미 아	
	F0	164	F0	130	F0	156
	F1	711	F1	818	F1	757
	F2	1208	F2	1184	F2	1262
솔						
	그림 36 탐구자1 솔 아		그림 37 탐구자2 솔 아		그림 38 탐구자3 솔 아	
	F0	194	F0	162	F0	186
	F1	772	F1	887	F1	768
	F2	1244	F2	1257	F2	1260

‘아’ 발음으로 도미솔 음을 내었을 때 음 높이를 뜻하는 F0는 약 1.3배와 1.5배 커졌지만 발음을 결정하는 F1과 F2는 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다. 즉, 음높이가 다르고 사람마다 목소리가 달라도 포먼트로 발음을 인식하게 된다는 사실을 확인할 수 있다.

다) ‘아’, ‘에’, ‘이’, ‘오’, ‘우’ 발음별 포먼트 추정

탐구자 3명이 각각 ‘아’, ‘에’, ‘이’, ‘오’, ‘우’ 발음 한 것을 주파수 분석하여 포먼트를 측정하였다.

표 6 모음 발음에 따른 파형과 포먼트

	탐구자 1	탐구자 2	탐구자 3
‘아’			
	그림 39 탐구자1 아	그림 40 탐구자2 아	그림 41 탐구자3 아
	F1 740 F2 1218	F1 649 F2 978	F1 777 F2 1204
‘에’			
	그림 42 탐구자1 에	그림 43 탐구자2 에	그림 44 탐구자3 에
	F1 469 F2 2020	F1 486 F2 1732	F1 538 F2 2008
‘이’			
	그림 45 탐구자1 이	그림 46 탐구자2 이	그림 47 탐구자3 이
	F1 289 F2 2378	F1 279 F2 1927	F1 288 F2 2506
‘오’			
	그림 48 탐구자1 오	그림 49 탐구자2 오	그림 50 탐구자3 오
	F1 418 F2 1126	F1 478 F2 834	F1 431 F2 692
‘우’			
	그림 51 탐구자1 우	그림 52 탐구자2 우	그림 53 탐구자3 우
	F1 314 F2 786	F1 429 F2 954	F1 386 F2 998

라) 모음 포먼트 그래프

가로축을 제2포먼트 세로축을 제1포먼트로 하여 우리가 측정한 모음을 표시한 그래프는 다음과 같다.

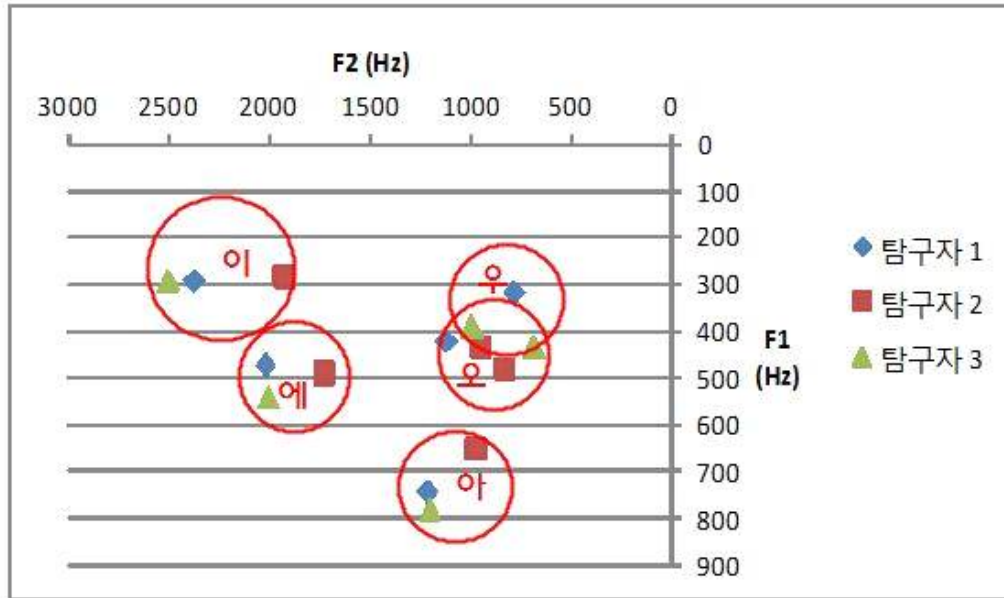


그림 54 우리가 측정한 모음의 포먼트로 만든 모음 포먼트 그래프

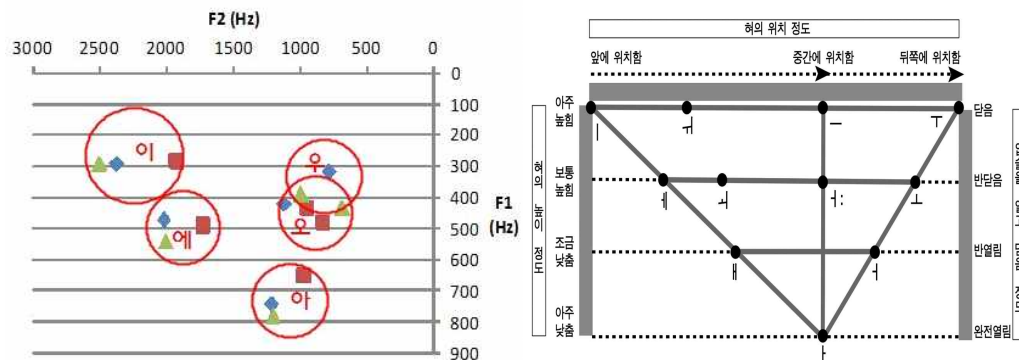


그림 54 우리가 만든 모음 포먼트 그래프 그림 16 우리말 모음 삼각도

이는 그림 16 모음 삼각도와 일치하는 모습이다. 모음 삼각도와 위의 모음 포먼트 그래프를 비교해서 다음과 같은 결과를 얻었다.

표 7 모음 삼각도와 포먼트 그래프의 관계

발음 변화	모음 삼각도의 설명	F1-F2 그래프에서의 변화
아 -> 우	입술의 열린 면적이 작아짐	F1은 낮아지고 F2는 조금 낮아짐
아 -> 이	혀의 위치가 올라감	F1은 낮아지고 F2는 높아짐
이 -> 우	혀의 위치가 뒤로 감	F1은 조금 높아지고 F2는 낮아짐

우리는 이러한 관계를 탐구 3에서 직접 실험을 통해 알아보려고 하였다.

2) 톱니파와 이퀄라이저를 이용한 모음 합성

우리는 이전 탐구를 통해 제1포먼트와 제2포먼트로 모음을 인식할 수 있다는 사실을 알았다. 그렇다면 역으로 제1포먼트와 제2포먼트를 갖는 소리를 만들어낼 수 있다면 모음처럼 들리지 않을까 생각하고 탐구를 진행하였다.

가) 가설 설정

적절한 음원(Source)의 특정 주파수 영역을 증폭시켜(Filter) 포먼트를 만들면 사람의 모음 발음과 비슷한 소리를 합성할 수 있을 것이다.

나) 실험 설계

사람의 발음 기관은 성대에서 발생한 진동이 성도를 통과하면서 공명을 일으키면서 각 모음의 특징이 되는 포먼트가 생성되는 것이다. 따라서 성대의 진동 역할을 하는 소리를 먼저 만들고 성도에서의 공명 역할을 할 수 있도록 이퀄라이저로 조절해 주면 실제 모음과 비슷한 소리가 날 것이다. 다음 과정을 통해 실험을 하였다.

- (1) 성대의 진동 역할을 할 수 있는 음원 생성(톱니파)
- (2) 우리말 모음의 포먼트 부분을 증폭시키도록 이퀄라이저 조정

다) 실험 방법

- (1) Cool Edit Pro를 이용해 톱니파를 만든다.

Generate -> tones 에서 파형, 진동수를 선택하여 톱니파를 만들었다.

음원으로서 톱니파를 선택한 이유는 첫째로 성대의 진동이 톱니파와 비슷한 형태라는 선행 조사 결과에 따른 것이고, 둘째는 톱니파는 배음이 풍부하면서 배음의 진폭이 고르게 떨어져서 특정 주파수를 증폭시켰을 때 포먼트로 나타나기 쉽기 때문이다. 극단적으로 안 좋은 음원은 사인파이다. 순수한 사인파는 배음이 전혀 없기 때문에 성도나 공명관을 거쳐도 증폭이 크게 일어나지 않는다.

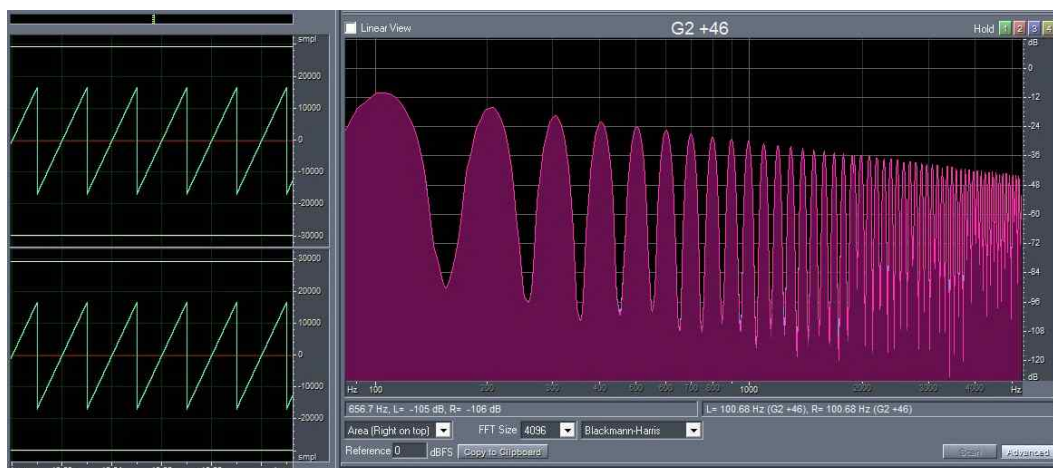


그림 55 CoolEditPro로 만든 100Hz 톱니파의 파형과 주파수 스펙트럼

(2) Cool Edit Pro의 이퀄라이저를 이용해 포먼트에 해당하는 진동수를 증폭시킨다.

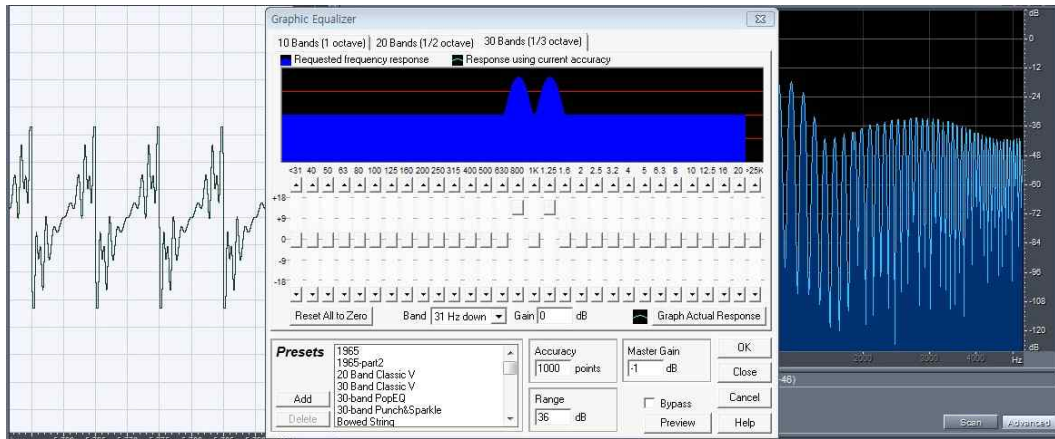


그림 56 Effect → Filters → Graphic equalizer 에서 800Hz와 1200Hz를 증폭시킨 화면

라) 실험 결과

톱니파를 만들고 이퀄라이저로 각 모음의 제1포먼트와 제2포먼트 진동수를 증폭시킨 결과, 원하는 모음과 비슷한 소리를 합성할 수 있었다. 그러나 제1포먼트와 제2포먼트만 증폭시킨 소리는 명확한 모음으로 들리지는 않았다. 포먼트의 진동수 뿐만 아니라 포먼트를 얼마나 증폭시킬 것인지(Gain)와 포먼트의 폭(Bandwidth)을 얼마로 할지에 따라 소리는 다르게 들렸다.

만들어진 소리의 주파수 스펙트럼을 보고 우리가 직접 녹음했던 발음의 스펙트럼과 비슷하게 되도록 여러 번의 시행착오를 거쳐서 좀 더 명확한 발음을 만들 수 있었다.

(1) 톱니파와 이퀄라이저로 만든 ‘아’ (800Hz와 1200Hz 증폭)

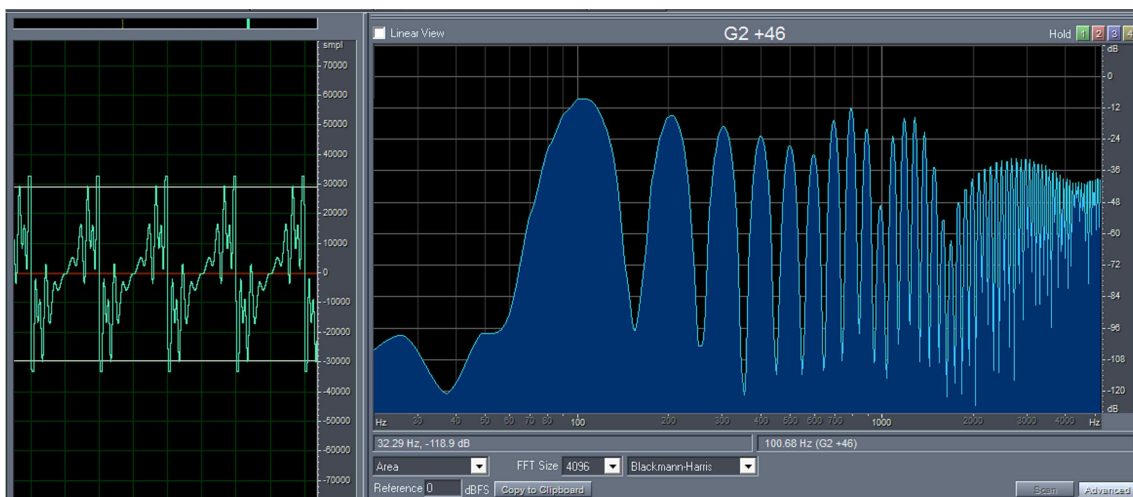


그림 57 톱니파와 이퀄라이저로 만든 ‘아’ (800Hz와 1200Hz 증폭)

그림 39, 40, 41과 비교해 보면 주파수 스펙트럼의 형태가 비슷하다.

(2) 톱니파와 이퀄라이저로 만든 ‘이’ (300Hz와 2500Hz 증폭)

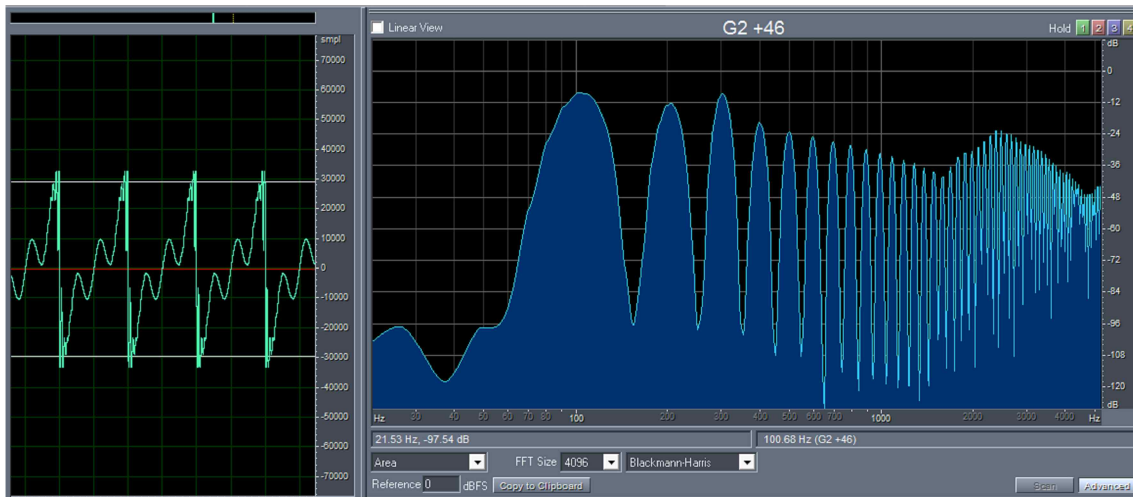


그림 58 톱니파와 이퀄라이저로 만든 ‘이’ (300Hz와 2500Hz 증폭)

그림 45, 46, 47과 비교해 보면 주파수 스펙트럼의 형태가 비슷하다.

이 실험을 통해 톱니파의 특정 주파수를 증폭시키면 모음과 비슷한 소리를 얻을 수 있을 것이라는 가설을 확인하였다. 따라서 이퀄라이저 대신 특정 주파수를 증폭시킬 수 있는 공명 장치를 만들어 톱니파를 증폭시키면 모음과 비슷한 소리를 내는 발성 장치를 만들 수 있을 것이라 생각하고 이 후의 탐구를 진행하였다.

나. 탐구 2. 모음 발성 장치 제작

1) 가변형 직육면체 공명상자를 이용한 모음 발성 장치 제작

탐구 1에서 톱니파와 이퀄라이저를 이용해 모음과 비슷한 소리를 얻어낸 결과를 바탕으로 이번에는 이퀄라이저 대신 직육면체 공명상자를 이용해 특정 주파수를 증폭시켜 모음과 비슷한 소리를 얻어내고자 시도하였다. 오랜 시간 동안 원하는 결과를 얻어내지 못하고 다양한 시도를 반복한 끝에 성공하였다.

가) 가설 설정

- (1) 톱니파를 직육면체 공명상자를 통해 공명 시키면 직육면체의 가로, 세로, 높이에 따라 다른 공명 진동수를 갖게 될 것이다.
- (2) 직육면체 공명상자의 가로, 세로, 높이를 적절히 조절하여 특정 모음의 포먼트에 해당하는 진동수가 증폭되도록 하면 모음과 비슷한 소리를 들을 수 있을 것이다.

나) 시행착오를 통한 노하우 습득

공명하면 떠오르는 첫 번째 장치가 소리굽쇠 공명상자였다. 그래서 소리굽쇠 공명상자의 공명 특성을 찾아내고자 문헌을 조사하고 다양한 측정을 해 보았다.



그림 59 다양한 크기의 공명 상자

그림 59와 같이 다양한 크기의 공명 상자를 준비하고 스피커의 위치와 마이크의 위치, 상자의 한쪽 면이 열린 정도를 바꾸어가며 많은 측정을 하였지만 상당한 기간 동안 상자의 모양, 크기에 따른 공명 진동수의 관계를 얻어내지 못하였다. 하지만 진행 과정에서 다음과 같은 몇 가지 노하우를 얻을 수 있었다.

- (1) 음파가 정상파를 만들어 공명할 때 배와 마디가 생기는데 대부분의 교과서에 표시된 배와 마디 그림은 공기 분자의 변위를 표현한 것이다.
- (2) 교과서 그림에서 정상파의 배가 되는 위치에 마이크를 놓았을 때 공명이 전혀 측정되지 않았다. 오히려 공명 진동수로 예상되는 진동수 영역의 소리가 감소되는 결과도 있었다.
- (3) 이유는 **마이크가 감지하는 것은 공기의 변위가 아니라 압력 변화**이기 때문이었다.
- (4) 문헌 조사 결과 대부분의 해외 자료에서는 음파를 표현할 때 공기의 변위가 아니라 음압(Sound pressure)의 변화로 표현하고 있었고, 변위와 음압의 관계는 90° 의 위상차를 갖는다. 따라서 정상파에서 변위 기준으로 배가 되었던 위치는 음압을 기준으로 마디가 되고 변위 기준으로 마디는 음압 기준으로 배가 된다.
- (5) 따라서 음압 기준으로 정상파의 배가 되는 위치(변위 기준으로는 마디가 되는 위치)에 마이크를 놓아야 공명된 소리를 잘 측정할 수 있다. 예를 들어 마이크를 상자 벽(변위기준 마디, 음압기준 배)에 가까이 갔을 때 소리가 잘 측정되고 마이크가 상자 중앙에 있을 때는 공명이 잘 측정되지 않았다.
- (6) 또 우리가 흔히 볼 수 있는 **한 면이 열린 직육면체 공명상자에서는 열린 방향 축 모드**의 공명 소리가 크게 방출되고 나머지 두 방향의 축 모드 공명 소리는 상자 내부에서만 측정할 수 있을 정도로 작았다.

다) 직육면체 공명상자를 통한 공명

얻어진 노하우를 적용하여 그림과 같이 스티로폼으로 사각형 틀을 만들고 아랫면은 책상의 유리면으로, 윗면은 아크릴 책받침으로 직육면체를 만들고 100Hz 톱니파를 재생하였다.

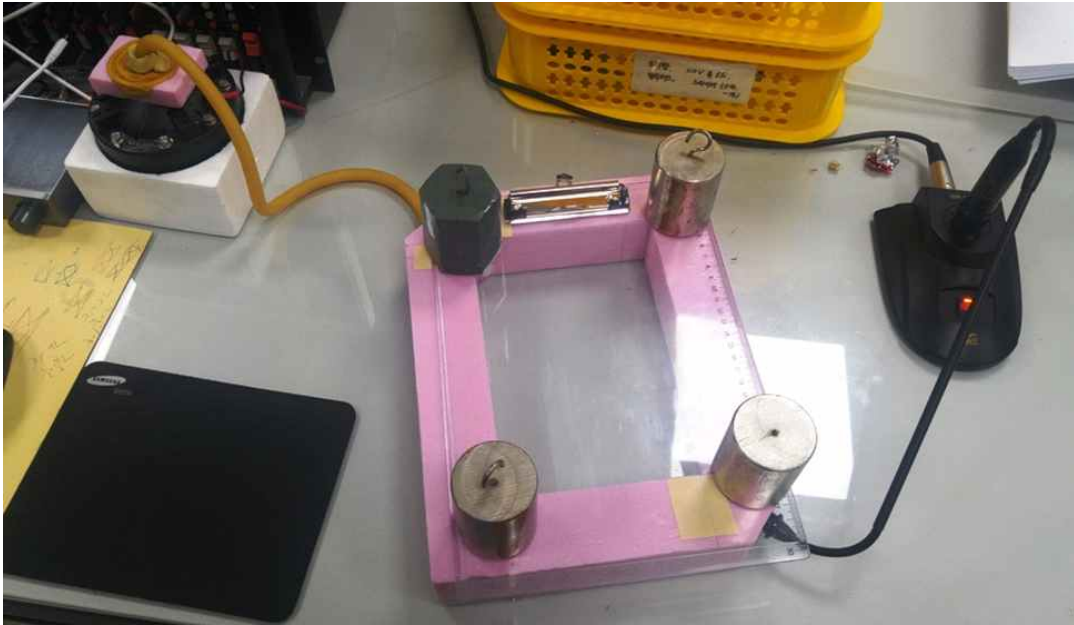


그림 60 가변형 직육면체 공명상자로 모음을 만드는 장면 사진

- (1) ‘아’ 소리가 나는 직육면체를 만들기 위해서는 800Hz와 1200Hz에서 포먼트가 나와야하기 때문에 이에 맞도록 가로의 길이를 145mm, 세로의 길이를 215mm로 만들었다. 높이는 5cm로 하여 공명 진동수가 5000Hz 근방에서 나타나 발음에 영향이 없도록 하였다.
- (2) 스피커와 마이크는 정상과 음압의 배가 되는 위치에 배치하기 위하여 양 끝 모서리에 설치하였다.
- (3) 마이크의 높이를 바닥으로부터 2.5cm에 설치하여 높이 방향 공명의 음압 마디에 위치하여 높이 방향 공명 진동음이 수음되지 않도록 하였다.
- (4) 직육면체 안의 공기가 밀폐 되어 정상파가 잘 형성되도록 무게 추를 올려놓았다.

라) 직육면체 ‘아’ 공명상자의 응답 특성 측정 결과

밀폐된 직육면체 공명상자는 상자 안에서만 공명이 잘 이루어지고 어느 부분을 열면 열기 전과 다른 공명이 만들어지기 때문에 공명된 ‘아’ 소리를 직접 들을 수는 없었다. 그렇지만 마이크로 녹음 된 소리는 ‘아’ 소리로 들리는 것을 확인할 수 있었고, 화이트 노이즈를 재생해 응답 특성을 측정한 결과 800Hz와 1200Hz 근처에서 포먼트가 나타나 ‘아’ 발음과 비슷한 응답 특성을 얻을 수 있었다.(그림 61과 그림 23 비교)



그림 61 가변형 직육면체 공명상자 ‘아’의 주파수 응답 특성

2) 실제 성도와 면적 함수가 같은 공명관 발생 장치 제작

직육면체 공명상자로 모음을 만들어 낼 수 있었지만 상자의 크기나 닫혀있다는 점 등에서 직육면체 공명상자는 사람이 발생하는 것을 정확히 표현해 주는 모형은 아니라고 판단하였다. 이에 사람의 성도는 어떤 원리로 포먼트 주파수를 공명 시키는 것일까에 대한 궁금증이 들어서 우선 사람의 성도를 흉내 낸 모형을 만들어 실험을 해 보고자 하였다.

문헌 조사를 해 보니 사람의 성도 길이는 평균 17cm 정도이고 위치에 따른 단면적이 MRI 등의 방법으로 측정되어 있었다.

가) 가설 설정

사람이 특정 발음을 할 때 만들어지는 성도와 같은 면적 함수를 갖는 공명관을 만들어 튕니파를 재생하면 그 발음이 재생될 것이다.

나) 성도 면적 함수를 이용한 성도 모양 공명관 제작

(1) 발음별 성도의 면적 함수

문헌 조사 결과 MRI 사진촬영이나 음향 공명 등의 기법으로 사람이 발음할 때 성도의 단면적을 측정해 놓은 자료를 구할 수 있었다. 우리는 그 중에서 음성 음향학의 대가인 Fant G.의 자료를 이용하였다.

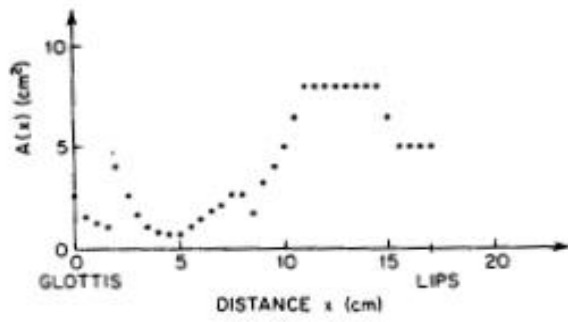


그림 62 ‘아’ 발음을 할 때 성도의 면적 함수와 MRI 사진

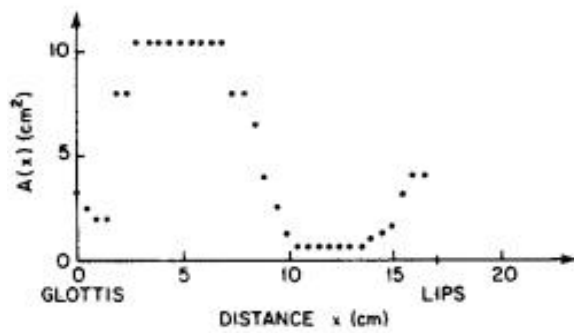


그림 63 ‘이’ 발음을 할 때 성도의 면적 함수와 MRI 사진

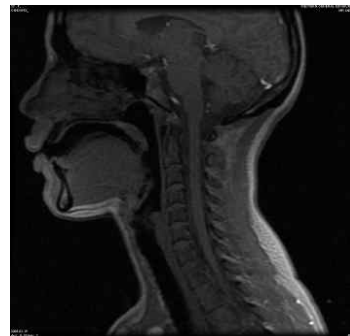
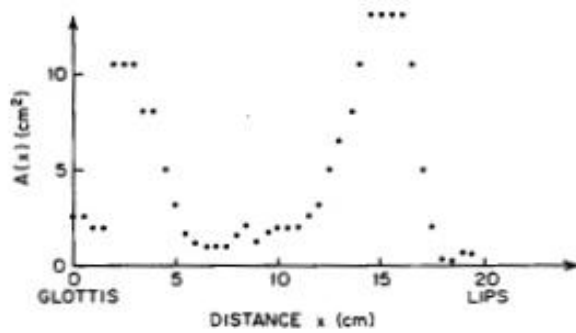


그림 64 ‘우’ 발음을 할 때 성도의 면적 함수와 MRI 사진

(2) 모델링

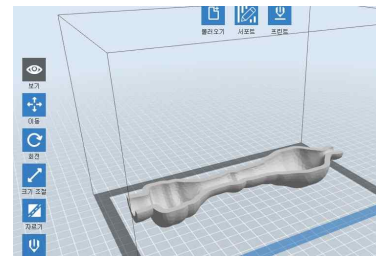
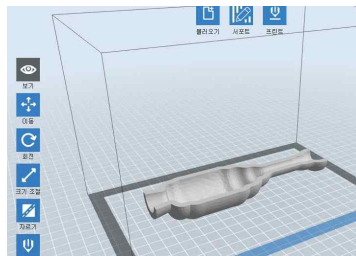
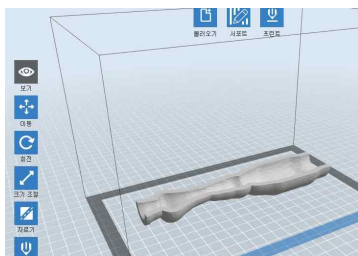


그림 65 ‘아’ 발음 성도 모델링

그림 66 ‘이’ 발음 성도 모델링

그림 67 ‘우’ 발음 성도 모델링

면적 함수의 면적을 반지름으로 환산한 후, 오토캐드로 단면을 그려 3차원 모델을 만들고, 3D 프린터로 출력하기 위해 반쪽으로 자른 모델을 모델링 했다.

(3) 3D 프린터로 출력

Flashforge사의 Creator-Pro 로 출력하였다. 재료는 ABS이다.



그림 68 3D 프린터로 출력된 ‘아’ 발음 성도 모형 반쪽

(4) 파라핀 코팅 및 접합

두 개의 반쪽 공명관을 접합 하는 데는 파라핀 코팅을 사용하였다.

3D 프린터로 만들어진 모형은 속이 비어 있고 표면이 거칠어서 소리를 반사시키기 보다 투과되거나 난반사되어 정상파가 잘 만들어지지 않을 것 같았다. 그래서 공명관 전체를 파라핀을 녹인 액체에 담갔다가 꺼내는 방식으로 코팅하고 파라핀 액체가 굳기 전에 두 반쪽을 접합하여 굳히는 방식으로 성도 모양을 갖는 공명관을 제작하였다.



그림 69 완성된 성도 모형, 왼쪽부터 ‘아’, ‘이’, ‘우’ 발음을 낸다.

다) 성도 모양 공명관의 응답 특성 측정 결과



그림 77 ‘아’ 발음 성도 모형 공명관의 응답 특성 그림 78 ‘이’ 발음 성도 모형 공명관의 응답 특성 그림 79 ‘우’ 발음 성도 모형 공명관의 응답 특성

성도 모양 공명관의 응답 특성은 발음별 포먼트를 잘 나타내는 것으로 나타났다. 성도 모양 공명관에 100Hz 톱니파를 재생해 보았을 때 놀라울 정도로 명확한 ‘아’, ‘이’, ‘우’ 발음을 들을 수 있었다.

라) 발음에 따른 성도 모양의 특징 발견

성도 모형을 만들어 실험하면서 발견한 특징은 ‘아’ 발음의 성대 면적 함수는 성대 쪽 단면적이 작고 입술 쪽 단면적이 큰 형태이고, ‘이’ 발음은 반대로 성대 쪽 단면적이 크고 입술 쪽 단면적이 작은 형태였으며, ‘우’ 발음은 성대와 입술 양쪽 단면적이 크고 중앙부 단면적이 작은 형태였다. 이러한 특징이 발음의 차이를 만들어내는 것으로 생각할 수 있었지만, 명확하게 어떤 이론으로 공명 진동수가 결정 되는지는 알 수 없었다. 그래서 성도의 모양을 단순화한 모형으로 탐구를 진행해 보고자 하였다.

3) ‘가변형 관 모형’ 발성 장치 제작

이전 탐구에서 발음별 성도의 면적 함수에 따른 성도 모형을 제작해 보았다. 이번에는 성도의 면적 변화가 어떻게 공명을 바꾸는지 좀 더 명확하게 탐구하기 위해 성도의 면적 함수를 단순화한 모형을 만들고자 하였다.

성도의 면적을 넓고 좁은 두 단계만 설정하고 넓은 부분과 좁은 부분의 위치와 길이를 변화시킬수 있는 ‘가변형 관 모형’을 제작 하였다.

가) 가설 설정

단면적이 넓고 좁은 두 관이 연결된 형태의 공명관은 두 관의 길이에 따른 공명 진동수를 갖게 될 것이므로 포먼트가 2개 이상 만들어져 모음과 비슷한 소리를 낼 수 있을 것이다.

나) 발음별 성도 형태 단순화

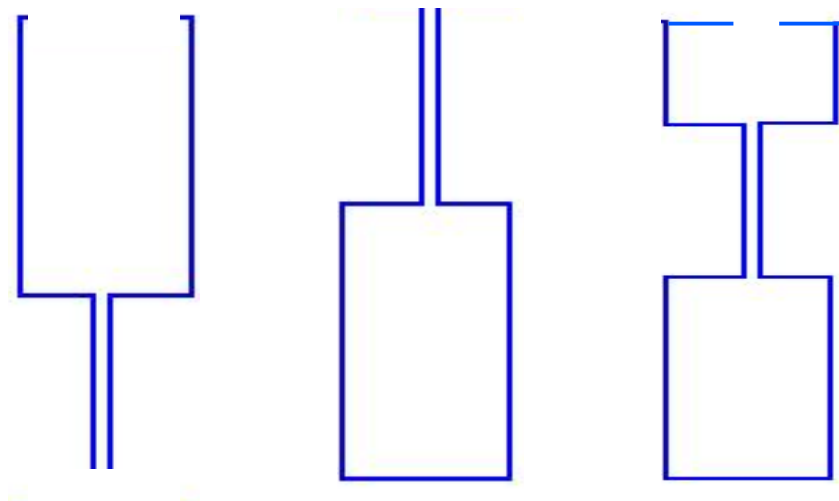


그림 80 발음별 성도 형태의 개념도. 왼쪽부터 ‘아’, ‘이’, ‘우’이다. (아래가 성대, 위가 입술)

다) ‘가변형 관 모형’ 제작

아크릴 관과 스티로폼으로 ‘가변형 관 모형’을 제작하였다.



그림 81 가변형 관 모형 제작

아크릴 관은 외경 50mm 두께 2mm로서 내경 46mm인 관을 사용하였고 스티로폼은 폼 커터를 이용해 안쪽 내경을 7mm, 12mm, 20mm로 제작하여 아크릴 관에 끼워 넣었다. 스티로폼 원통의 길이는 5cm, 7cm, 9cm로 제작하여 실험에 사용하였다.

이렇게 제작한 모형을 ‘가변형 관 모형’으로 부르겠다. 이 모형에서 스티로폼 원통이 움직이면 혀가 앞뒤로 움직이는 것과 같은 의미가 될 것으로 기대하였고 실제로 만들어진 가변형 관 모형에 100Hz 톱니파를 재생하고 스티로폼 원통의 위치를 변화시키자 외계인이 말하는 것 같은 발음 변화를 들을 수 있었다.

나. 탐구 3. 모음 발생 원리 탐구

제작한 발성 장치들을 이용해 모음 발생 원리를 실험을 통해 알아보고자 하였다. 가변형 관 모형을 이용해 혀의 위치에 따른 발음 변화를 탐구해 보았고, 3D 프린터로 만든 ‘아’ 발음 성대 모형을 이용해 입술의 열린 면적에 따른 발음 변화를 탐구하였다.

1) 혀의 위치에 따른 발음 변화

가) 기주 공명 실험

본격적인 가변형 관 모형에 대한 실험 전에, 스티로폼 기둥을 채워 넣지 않은 아크릴 관의 응답 특성을 측정해 보았다. 아크릴 관의 길이와 직경을 바꾸어가면서 이론과 일치하는지 여부를 확인하고자 하였다.



그림 82 아크릴 관의 기주 공명 실험

아크릴 관의 길이는 17cm로 유지하고 관의 안쪽 직경이 각각 46mm, 30mm, 20mm, 15mm로 바꾸어가며 아크릴 관의 응답 특성을 측정해 보았다.

아래 그림 83의 초록색, 분홍색, 보라색, 노란색 순으로 직경이 작아지는 관의 응답 특성이다. 이론에서 살펴본 것처럼 한 쪽이 막힌 폐관에서 진동수는 $F_n = \frac{v}{4L}(2n-1)$ 가 되고, 성도의 평균 길이 17cm와 음속 340m/s로 계산하면 $F_1 = 500\text{Hz}$, $F_2 = 1500\text{Hz}$, $F_3 = 2500\text{Hz}$ 가 된다.

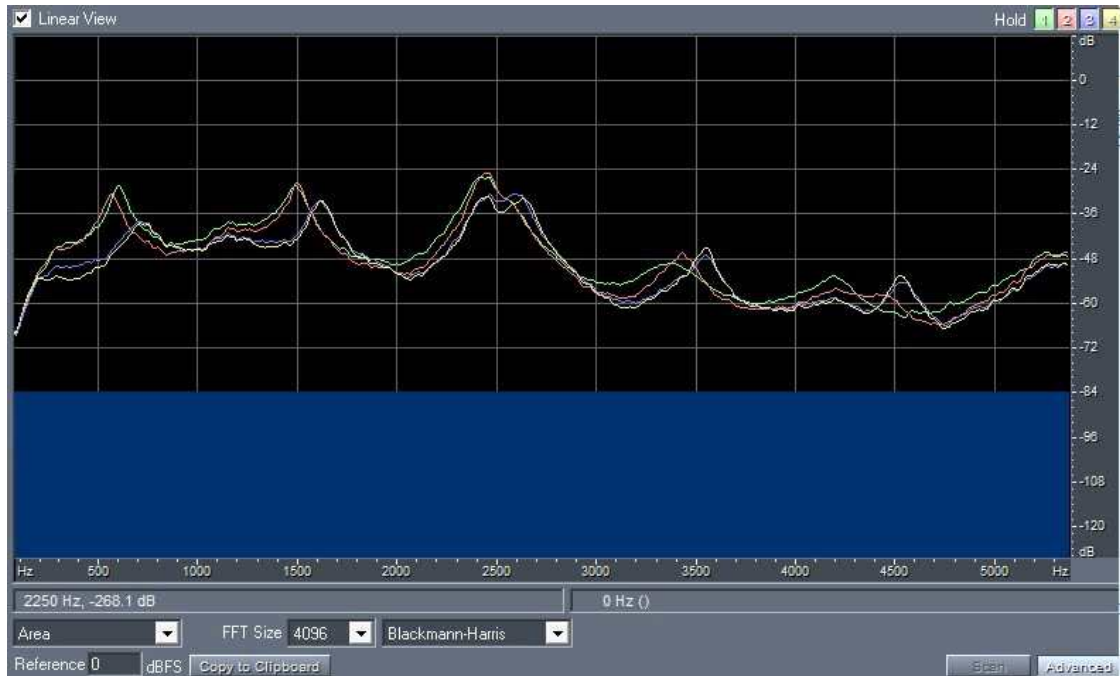


그림 83 아크릴 관의 응답 특성(초록:46mm, 분홍:30mm, 보라:20mm, 노랑:15mm)

우리가 측정한 응답 특성은 대체로 이론과 일치하지만 2000Hz이하의 공명 진동수는 이론보다 높아져 있고, 2000Hz이상의 공명 진동수는 이론보다 낮아져 있는 경향을 발견할 수 있다.

이러한 오차의 원인은 관구 효과와 스피커의 영향이라고 판단하였다.

- (1) 관구 효과로 인해 $0.3D$ 만큼 길이가 길어진 효과가 나므로 전체 적인 공명 진동수가 낮아진다. 그런데 관구 효과는 회절을 잘 하는 낮은 진동수의 음파에서 상대적으로 적게 나타날 것이기 때문에 낮은 공명 진동수는 이론에 비해 그다지 낮아지지 않는다.
- (2) 두 번째 요인인 스피커는 스피커가 공기를 떨리게 만들어주기 때문에 완벽히 막힌 관이 되는 것이 아니라 스피커의 약간 앞에서 음압의 배를 만드는 것으로 판단하였다. 그렇게 되면 정상파의 파장이 짧아져서 공명 진동수가 높아지는데 이 효과가 관의 직경이 작을 때 더 크게 나타난 것으로 생각된다.

나) 스티로폼 원통의 위치에 따른 가변형 관 모형의 응답 특성

길이 17cm, 관의 안쪽 직경이 46mm인 관에 길이 5cm에 지름 11mm인 구멍이 있는 스티로폼 원통을 넣어 위치를 바꾸어가며 응답 특성을 측정하였다.

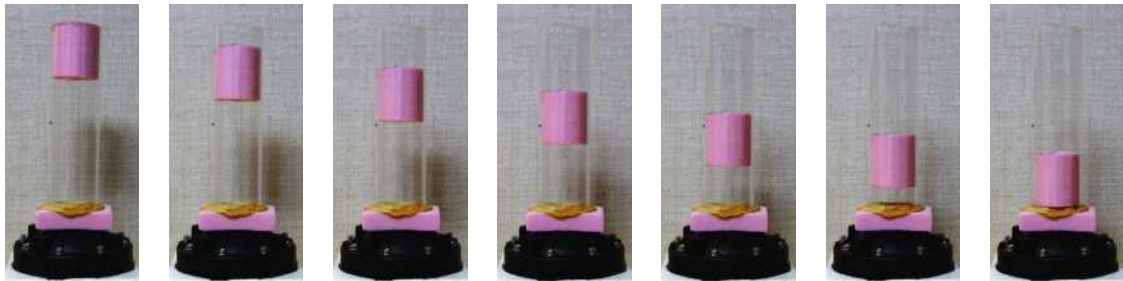


그림 84 가변형 관 모형에서 스티로폼 원통의 위치 변화(왼쪽부터 0cm, 2cm, 4cm,..., 12cm)

스티로폼 원통의 윗면이 아크릴 관의 윗면과 일치하는 상태에서 스티로폼 원통을 2cm씩 내려가면서 응답 특성을 측정한 결과는 다음과 같다.



그림 85 스티로폼 원통의 위치에 따른 가변형 관 모형의 응답 특성(초록:0cm, 분홍:2cm, 보라:4cm, 노랑:6cm)

그림 85의 초록, 분홍, 보라, 노랑 선은 스티로폼 원통이 아크릴 관 윗면으로부터 각각 0cm, 2cm, 4cm, 6cm 내려갔을 때의 응답이다.

구체적으로 분석해 보면 스티로폼 원통이 내려감에 따라

- (1) 300Hz 근처의 포먼트의 위치가 조금씩 오른쪽으로 옮겨 가면서 진폭이 커지는 경향을 보인다. 이는 원통과 원통 아래 공간으로 만들어진 헬름홀츠 공명으로 생각된다.

- (2) 1200Hz 피크가 점점 커지는 경향을 보인다. 이는 원통 위쪽 공간의 기주 공명으로 생각된다.
- (3) 또한 1500Hz에 있었던 뾰족한 포먼트가 오른쪽으로 이동하는 모습이 보인다. 이는 원통 아래쪽 공간의 기주 공명으로 생각된다.
- (4) 2500Hz 부근의 피크는 스피커 고유의 응답 특성 때문에 생긴 오차로 판단하였다.

다음 그림 86의 초록, 분홍, 보라, 노랑 선은 스티로폼 원통이 아크릴 관 윗면으로 부터 각각 6cm, 8cm, 10cm, 12cm 떨어졌을 때의 응답이다.



그림 86 스티로폼 원통의 위치에 따른 가변형 관 모형의 응답 특성(초록:6cm, 분홍:8cm, 보라:10cm, 노랑:12cm)

마찬가지로 분석해 보면 스티로폼 원통이 내려감에 따라

- (1) 300Hz 근처의 포먼트의 위치가 조금씩 오른쪽으로 옮겨가면서 진폭이 커지는 경향을 보이다가 스티로폼 원통이 바닥에 붙었을 때(12cm일 때)는 포먼트가 없어졌다.
- (2) 1200Hz 포먼트가 점점 커지면서 왼쪽으로 이동하는 경향을 보인다.
- (3) 또한 스티로폼 원통이 바닥에 붙었을 때 2000Hz 근처에 새로운 포먼트가 보이는데 이는 650Hz 포먼트 즉 원통 위쪽 기주 공명의 3배진동으로 보인다.

이 측정 자료로부터 얻은 포먼트와 스티로폼 원통의 위치에 따라 들리는 발음을

정리해 표 8에 나타내었다.

표 8 스티로폼 원통의 위치에 따른 가변형 관 모형의 포먼트와 들리는 발음

스티로폼 원통의 위치	F1	F2	들리는 발음
0 cm	364 Hz	1435 Hz	으
2 cm	373 Hz	1785 Hz	외
4 cm	389 Hz	2178 Hz	이와 에 중간
6 cm	413 Hz	1238 Hz	어와 으 중간
8 cm	430 Hz	998 Hz	오
10 cm	575 Hz	823 Hz	어
12 cm	653 Hz	1990 Hz	애

측정된 포먼트를 그래프로 나타내면 다음과 같다.

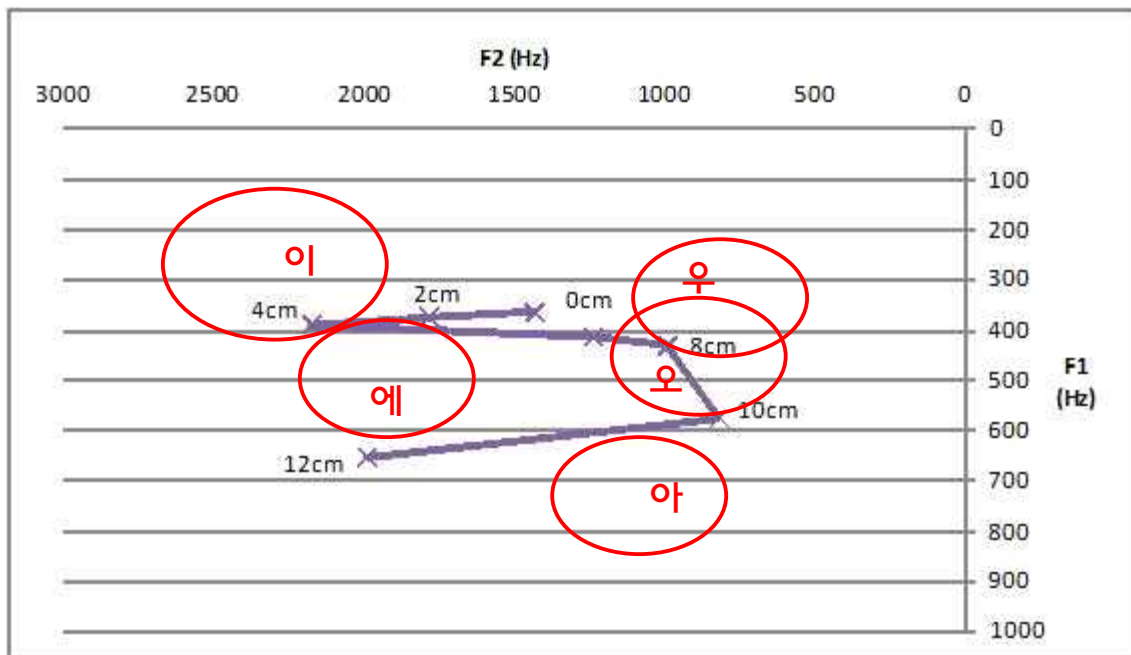


그림 87 스티로폼 원통의 위치에 따른 포먼트 변화

그림 87의 빨간 동그라미와 모음 표시는 우리가 탐구1에서 직접 측정했던 우리 모음의 위치이다.(그림 54 참고) 스티로폼 원통의 위치가 내려옴에 따라 포먼트가 변했고 들리는 소리는 ‘으외이어오어애’ 처럼 들렸는데 오른쪽 모음 삼각도와 연계해서 생각해 보면 포먼트 그래프에서의 위치와 모음 삼각도에서의 위치가 잘 일치하는 모습을 다시 한 번 확인할 수 있다.

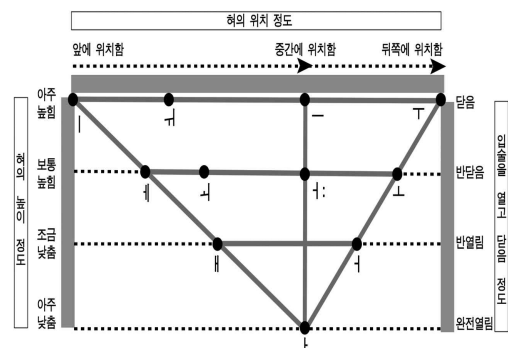


그림 16 우리말 모음 삼각도

그런데 스티로폼 원통의 위치에 따라 포먼트 그래프 상에서 움직이는 궤적이 4cm

에서 6cm로 내려갈 때와 10cm에서 12cm로 내려갈 때 급격한 변화를 보인다. 이것은 스티로폼 원통의 위치 변화에 따라 공명 진동수는 그다지 변하지 않지만 포먼트는 무조건 낮은 진동수부터 F1, F2로 취급하기 때문에 나타나는 현상이다.

구체적으로 그림 85의 0cm, 2cm, 4cm, 6cm 응답 곡선을 보면 제2포먼트에 해당하는 피크가 1400Hz에서 시작해서 점점 오른쪽으로 이동하는데 6cm일 때 갑자기 등장한 1200Hz 포먼트 때문에 2포먼트 자리를 뺏기고 제3포먼트가 되는 것이다.

따라서 공명관의 어떤 형태가 발음을 만들어내는지 원리를 파악하기 위해서는 좀 더 세밀한 실험이 필요하다.

2) 입술의 열린 면적 변화에 따른 발음 변화

우리가 만든 가변형 관 모형으로는 ‘우’ 발음을 낼 수 없었다. 3D 프린터로 만든 ‘우’ 모형을 보면 입술 부분이 매우 좁아야 하는데 가변형 관 모형은 매우 크게 열린 상태였기 때문일 것이다. 우리말 음운론과 모음 삼각도에서도 입술의 열린 정도에 따라 발음이 변한다고 설명하고 있고, 우리가 ‘아’ 발음을 하고 있는 상태에서 손으로 입을 4분의 3쯤 막기만 해도 ‘오’ 발음으로 변하는 것을 알 수 있다.

이에 탐구2에서 만들었던 3D프린터 ‘아’ 발음 성대 모형의 입구를 막아가면서 열린 면적 변화에 따라 나타나는 발음의 변화에 대해 탐구해 보았다.

가) 가설 설정

‘아’ 모형 공명관의 입구 면적이 좁아질수록 제1포먼트와 제2포먼트가 내려가서 발음이 ‘우’에 가깝게 변할 것이다.

나) 탐구 방법

탐구 4에서 만들었던 ‘아’ 모형의 입구를 플라스틱 자로 막아가면서 열린 부분이 원래 열린 면적의 1/2, 1/4, 1/8 일 때의 응답 특성을 측정한다.

다) 탐구 결과

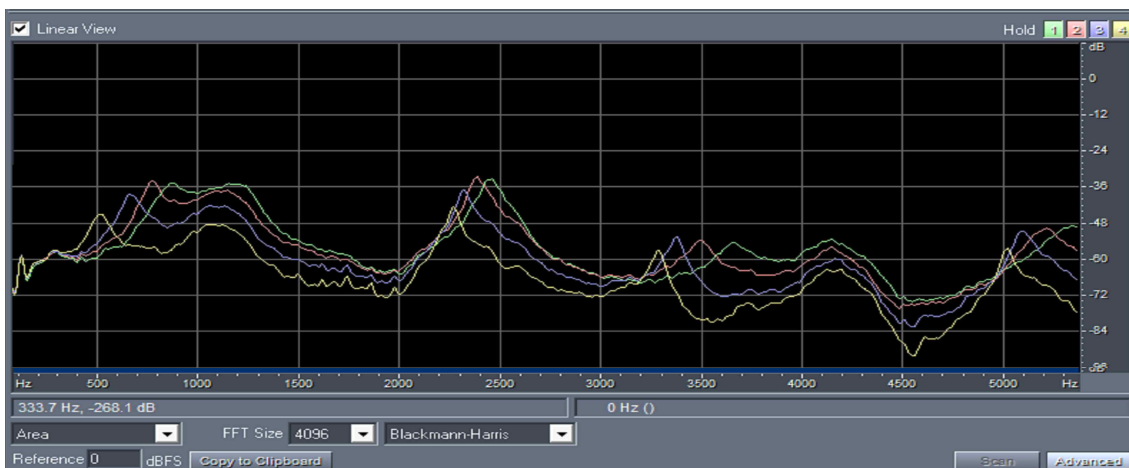


그림 88 입구 면적 변화에 따른 ‘아’ 발음 성대 모형의 응답 특성(초록:개방, 분홍:1/2, 보라:1/4, 노랑:1/8)

위 그림 88의 초록, 분홍, 보라, 노랑 라인은 각각 입구 면적이 다 열렸을 때, $\frac{1}{2}$ 열렸을 때, $\frac{1}{4}$ 열렸을 때, $\frac{1}{8}$ 열렸을 때 응답 특성을 나타낸다. 입구 면적에 따른 변화가 매우 일관성 있게 나타난다. 입구 면적이 좁아질수록 제1포먼트와 제4포먼트가 왼쪽으로 많이 이동하고, 제2포먼트와 제3포먼트는 조금 이동하는 경향을 볼 수 있다. 특이한 점은 4200Hz의 제5포먼트는 변화가 없다는 점이다.

이 응답 특성으로부터 측정한 제1, 제2 포먼트와 들리는 발음은 다음과 같다.

표 9 입구 면적 변화에 3D 프린터 '아' 공명관의 포먼트와 들리는 발음

3D 프린터 '아' 모형 입구 면적	F1	F2	들리는 발음
다 열렸을 때	878	1177	아
$\frac{1}{2}$ 열렸을 때	775	1108	어
$\frac{1}{4}$ 열렸을 때	663	1087	오
$\frac{1}{8}$ 열렸을 때	505	1076	우

이를 포먼트 그래프로 나타내면 다음과 같다.

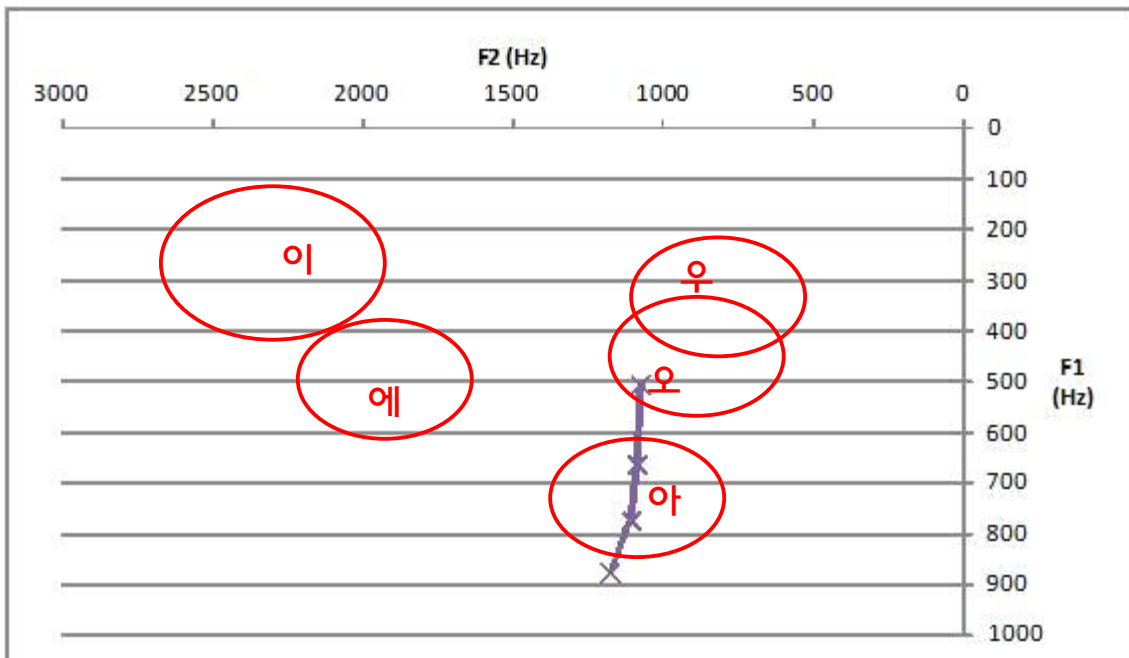


그림 89 입구 면적 변화에 따른 3D 프린터 '아' 공명관의 포먼트 그래프

예상과 같이 입구 면적이 좁아짐에 따라 제1포먼트와 제2포먼트가 낮아지면서 들리는 발음이 아, 어, 오, 우 순으로 변화였다. 그런데 포먼트 그래프 상에서는 오와 우의 구별이 명확치 않고 F2의 변화가 매우 작은 것으로 나타났다.

라) 원인 분석

입구 면적이 좁아짐에 따라 포먼트가 내려가는 현상에 대한 원인을 생각해 본 과정은 다음과 같다.

- (1) 열린 입구는 정상파에서 음압을 기준으로 할 때 마디가 된다. 공기의 유동이 자유롭고 압력이 대기압과 같아서 변하지 않는 점인 것이다. 비유를 하자면 현에서의 정상파에서 고정단 반사를 하는 고정점과 같다고 볼 수도 있다.(그림 90의 왼쪽)
- (2) 그런데 입구를 조금 막으면 공기의 움직임이 제한을 받게 되고 입구 안쪽의 압력이 변하게 된다. 즉, 완전한 고정단 반사가 아니게 되고, 현으로 비유하자면 고정점이 약간 흔들리는 상황이다.
- (3) 그러면 그림 90의 오른쪽처럼 정상파의 파장이 길어지게 된다.

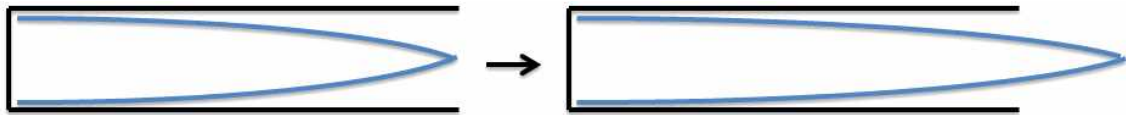


그림 90 입구가 좁아짐에 따라 정상파의 파장이 길어지는 원리(파란색은 음압의 진폭을 나타냄)

라) 정상파의 파장이 길어지면 공명 진동수는 낮아진다.

라. 탐구 4. ‘얼굴형 발생 원리 교육 모형’ 제작 및 활용

가변형 관 모형을 이용해 사람의 얼굴 모양을 갖는 ‘얼굴형 발생 원리 교육 모형’을 제작 하였다.

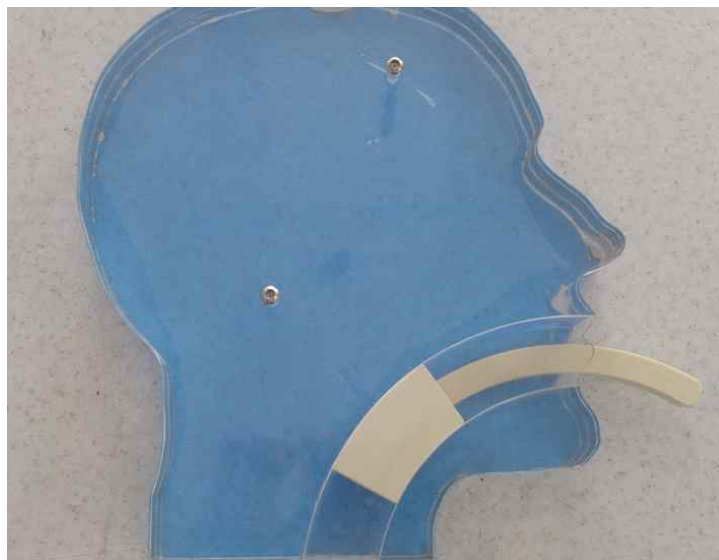


그림 91 얼굴형 발생 원리 교육 모형

그림 91과 92에 보이는 베이지색 부분이 가변형 관 모형의 스티로폼 원통에 해당하는 부분으로서 가운데는 구멍이 뚫려 있고, 손잡이를 이용해 위치를 쉽게 변화시킴으로써 다양한 발음을 낼 수 있도록 하였다.

베이지색 부분은 성도의 좁은 부분을 나타내는데 대부분의 발음에서 성도의 면적을 좁히는 역할을 혀가 하고 있기 때문에, 이 모형에서 베이지색 부분이 앞뒤로 움직이는 것은 혀가 앞뒤로 움직이는 것을 나타내는 것이라고 할 수도 있다.

그림 92처럼 목 아래 부분으로 톱니파를 재생해 주면 입에서 다양한 모음 소리가 난다. 톱니파의 진동수를 높여주면 여자 목소리도 낼 수 있다.



그림 92 얼굴형 발성 원리 교육 모형을 이용한 모음 발성

기능상으로는 가변형 관 모형과 다르지 않지만 보는 사람에게 훨씬 더 직관적으로 모음 발성의 원리를 깨닫게 해 줄 수 있는 모형이라 생각하여 제작하게 되었고 친구들과 선생님, 동생들에게 보여주자 매우 흥미 있어 하고 즐거워하였다.

#. 자음 ‘ㅂ’ 발성

자음이 만들어지는 원리는 모음보다 더 복잡 하다. 그 중에서 입술을 닫았다가 열면서 소리 내는 ‘ㅂ’ 발음은 손으로 공명관을 막았다가 빠르게 여는 것으로 만들어 낼 수 있었다. 우리가 하품을 하면서 손으로 입을 두드리면 ‘아바바바’ 소리가 나는 것과 같은 방식이다.

탐구3을 통해 ‘아’ 공명관의 입구를 4분의 3정도 막으면 ‘오’ 발음이 된다는 것을 알았기 때문에 두 내용을 조합하면 ‘바보’ 소리를 발성할 수 있다.

- 1) ‘아’ 공명관에 톱니파를 재생 시킨다.
- 2) 손바닥으로 공명관 입구를 빠르게 막았다 떼면 ‘바’ 소리가 난다.
- 3) 검지, 중지, 약지를 모아 붙인 상태로 공명관 입구를 막았다가 검지 부분만 빠르게 열어주면 ‘보’ 소리를 낼 수 있다.
- 4) 1)과 2)를 반복하면 ‘바보바보바보’ 소리를 들을 수 있다.^^

5. 결론 및 활용 방안

가. 탐구 1 결론

- 1) 탐구자가 직접 우리말 모음을 발음하고 녹음하여 분석하였다. 여러 사람이 음 높이를 다르게 발음해도 같은 발음에서는 같은 포먼트가 나온다는 것을 확인하였다.
- 2) 여러 모음을 직접 발음하여 포먼트 그래프를 그린 결과 우리말 모음 삼각도와 일치하는 그래프를 얻을 수 있었다. 이로부터 다음과 같은 관계를 알아내었다.

표 7 모음 삼각도와 포먼트 그래프의 관계

발음 변화	모음 삼각도의 설명	F1-F2 그래프에서의 변화
아 -> 우	입술의 열린 면적이 작아짐	F1은 낮아지고 F2는 조금 낮아짐
아 -> 이	혀의 위치가 올라감	F1은 낮아지고 F2는 높아짐
이 -> 우	혀의 위치가 뒤로 감	F1은 조금 높아지고 F2는 낮아짐

- 3) 톱니파와 이퀄라이저를 이용해 모음을 합성하였다.
- 4) 이로서 모음이 인식 되는 원리와 포먼트 2개로 모음을 만들 수 있음을 확인하였다.

나. 탐구 2 결론

- 1) 톱니파와 직육면체 공명 상자를 이용해 모음 발생 장치를 제작하였다. 이퀄라이저 대신 우리에게 친숙한 공명 상자를 이용해 포먼트를 만듦으로써 모음을 발생시키는 장치를 만드는 시도였다. 많은 시행착오 끝에 6면이 모두 닫힌 형태의 직육면체 상자모음을 만들어낼 수 있었으나 마이크를 이용해 상자 내부에만 모음을 들을 수 있었다. 직육면체 상자 내부에 Room mode 공명이 생기는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었고, 실물 공명통으로 이퀄라이저를 대신할 수 있음을 확인하였다.
- 2) ‘아’, ‘이’, ‘우’ 세 모음에 대해 실제 성도의 면적함수와 같은 면적함수를 갖는 공명관을 3D 프린터로 제작 하였고, 톱니파를 재생하자 매우 명확한 발음이 들렸다.
- 3) 3D 프린터로 제작한 공명관의 모양에서 힌트를 얻어 ‘가변형 관 모형’을 제작하였다. 아크릴 관으로 성도를 표현하고 구멍 뚫린 스티로폼 원통으로 성도의 좁은 부분 즉 혀의 위치를 표현하는 모형이다.

다. 탐구 3 결론

- 1) 가변형 관 모형으로 혀의 앞뒤 위치에 따른 발음 변화 경향과 원인을 탐구하

였다. 스티로폼 원통의 위치에 따른 포먼트 변화를 측정하여 모음 삼각도의 혀의 위치에 따른 발음 변화와 비교하였다. 스티로폼 원통이 입술에서 상대쪽으로 이동함에 따라 소리가 ‘으웨이어오어애’로 변하는 현상을 분석하였다.

- 2) 입술이 열린 면적에 따라 발음이 달라지는 것에 대해 실험을 통해 탐구 하였다. 3D 프린터로 만든 ‘아’ 모형의 열린 부분을 막아가면서 소리를 듣고, 포먼트를 측정해 본 결과 입술의 열린 면적이 좁아질수록 제1포먼트가 낮아지며 이로 인해 발음은 ‘아어오우’로 변해 감을 알아냈다.

라. 탐구 4 결론

모든 사람이 보기만 해도 직관적으로 발성의 원리를 짐작할 수 있는 머리 모양 발성 장치를 제작하였다. 제작한 장치를 이용해 주변 친구들, 선생님, 어린 동생에게 시연한 결과 모두 매우 즐거워하며 관심을 보였다.

마. 활용 방안

- 1) 우리는 탐구를 통해 모음 발성이 어떤 방식으로 이루어지고 어떻게 사람에 인식 되는지 알 수 있었다.
- 2) 우리가 제작한 얼굴형 발성 원리 교육 모형을 이용하면 음성이나 발성에 관심이 없던 사람에게는 큰 호기심과 즐거움을 불러일으킬 수 있을 것이다.
- 3) 특히 7살 된 어린 동생에게 보여 주었을 때 동생은 매우 즐거워하면서 ‘어떻게 소리가 나는거야?’ ‘이음이 들어간 소리만 나네?’ ‘바보바보 하는 것 너무 재미있어’ 등의 질문을 하며 스스로 손잡이를 잡아 움직여 보았다. 동생이 발성 원리를 깨닫지는 못했겠지만 자음과 모음을 구별하는 계기가 되었을 수도 있고, 자신이 발음하는 동안 혀의 움직임에 대해 생각해 보는 첫 번째 계기가 되었을 수도 있다.
- 4) 비슷하게 생각하면 전문적인 발성 교육에 활용될 수도 있을 것이다. 100m 달리기 선수가 0.01초를 줄이기 위해 최첨단 과학기술을 이용해 자신의 운동을 분석하는 것처럼 가수나 성악가 아나운서 등이 우리의 발성 모형을 이용해 교육을 하거나 깨달음을 얻을 수도 있을 것이다.
- 5) 우리의 탐구는 인문학인 음성학, 음운론과 자연 과학인 물리학, 음향학과의 경계에 있는 음성 음향학 탐구이다. 따라서 그동안 인문학적으로 연구되었던 음성학, 언어학, 음성 치료, 언어 치료 등의 분야에 새로운 접근 방법을 제시할 수도 있을 것이다.
- 6) 가장 가시적인 탐구의 활용 방법은 가을에 있을 우리 학교 과학 축전에서 우리가 제작한 ‘얼굴 모양 발성 장치’를 이용해 부스 운영을 하면 우리는 최고의 인기 부스가 될 것 같다.

6. 참고문헌

1. Digital processing of speech signals. Rabiner&Schafer. 1978.
2. Acoustic theory of speech production. Sarah hawkins.
3. Parametric model of VT area functions: vowels and consonants. Fant, G. 1997
4. A brief history of articulatory-acoustic vowel representation. Coriandre Vilain, Frederic Berthommier, Louis-Jean Boile.
5. Acoustic Pulse Reflectometry for Measurement of the Vocal Tract with Application in Voice Synthesis. Calum David Gray. 2005
6. 프라트(Praat)를 이용한 음성분석의 이론과 실제. 양병곤. 만수출판사. 2010.
7. 공명관 실험장치 제작을 통한 한글 모음 발음에 대한 탐구. 황희문 최원홍. 제58회 과학전람회. 2012.
8. Roomresponse.com
9. History and Development of Speech Synthesis.
http://research.spa.aalto.fi/publications/theses/lemmetty_mst/chap2.html
10. Make your own vowel resonators.
<http://www.phon.ucl.ac.uk/home/mark/vowels/>
11. 파동의 분해와 성분
<http://physica.gsnu.ac.kr/physedu/wavelight/fourier/fourier.html>
12. Wikipedia Acoustic resonance.
https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_resonance
13. Wikipedia Speech synthesis.
https://en.wikipedia.org/wiki/Speech_synthesis