

출품번호

과학전시관에서 기재함

제65회 서울과학전람회 예선대회 탐구보고서

음계의 과학적 원리 탐구

2023. 9. 11.

구분	학생부
출품부문	물리

【 차례 】

1. 탐구 동기 및 목적	1
가. 탐구 동기	1
나. 탐구 목적	1
2. 선행연구 고찰	1
3. 작품의 내용	2
가. 12음계 음들의 규칙 찾기 (실험 1)	2
나. 음계의 음들이 가지는 원리 탐구	4
다. 다양한 음계 만들기 (실험 2)	5
라. 10음계 음악을 연주하는 피아노 프로그램 만들기	5
마. 10음계 음악을 피아노 프로그램으로 연주하기 (실험 3)	7
바. 음계 내의 화음이 가지는 원리 탐구 (실험 4)	9
사. 10음계에서의 화음 찾기 (실험 5)	9
6. 결론	10
7. 전망 및 활용성	11
8. 참고문헌	11

【 그림 차례 】

그림 1: 12음계 음들의 진동수 측정 과정	3
그림 2: 12음계 음들의 진동수 비교 그래프	3
그림 3: 12음계 도(C) 음들의 진동수 비교 그래프	4
그림 4: 10음계 음들의 음원파일을 만드는 과정과 만들어진 음원파일들	6
그림 5: 10음계 음악을 연주할 수 있는 스크래치 프로그램	6
그림 6: 10음계 음악 연주를 위한 간단한 악보들	7
그림 7: 10음계 음악을 스크래치 피아노 프로그램을 연주하는 모습	8
그림 8: 10음계 음악을 스크래치 피아노 프로그램을 연주 동영상 QR Code	8

【 표 차례 】

표 1: 12음계 음들의 진동수 측정 결과	3
표 2: 12음계 도(C) 음들의 진동수 측정 결과	4
표 3: N음계 음들의 진동수 비율 R의 계산 결과	5
표 4: N음계 음들의 진동수 계산 결과	5
표 5: 12음계 음들의 가온도(C4)에 대한 진동수 비율과 화음	9
표 6: 10음계 음들의 가온도(C4)에 대한 진동수 비율과 화음	10

1. 탐구 동기 및 목적

1. 작품연구의 동기 및 목적

가. 탐구 동기

피아노를 공부하다 피아노의 건반은 흰 건반과 검은 건반의 반복된 패턴으로 이루어져 있다는 것을 알게 되었다. 반복되는 패턴 속에 흰 건반은 7개와 검은 건반 5개, 모두 12개의 건반으로 이루어져 있는데 왜 꼭 12개로 이루어져 있는지 궁금증이 생겼다. 그리고 12개가 아닌 다른 개수의 건반을 가지는 피아노는 없는지 궁금했다. 이런 궁금증을 풀기 위해서 탐구를 시작했다.

나. 탐구 목적

- 1) 12음계 음들의 규칙 찾기
- 2) 음계들이 가지는 패턴 탐구
- 3) 다른 음계로 피아노 건반을 만들어 연주해 보기

2. 선행연구 고찰

음계에 관한 학술 자료 검색 결과, 2015년 서울시 과학전람회 고등부 예선 대회 출품작 ‘새로운 음계를 만드는 방법 탐구와 새 음계의 영향 탐구’의 요약서 1장만이 검색되었고, 전국과학전람회 통합 검색에서는 유사한 주제의 탐구보고서를 찾지 못했다. 서울시 과학전람회 예선 출품작 ‘새로운 음계를 만드는 방법 탐구와 새 음계의 영향 탐구’는 탐구보고서가 서울특별시교육청 과학관 사이트에서 검색되지 않아 자세한 탐구 내용을 알 수 없었으며 요약서 내용으로 볼 때 9음계를 만들어 탐구한 보고서라고 추정된다. 본 탐구는 음계를 총 5가지 (8음계부터 12음계까지 만들어 봄)의 음계를 만들었고, 스크래치 프로그램을 사용해서 직접 연주가 가능한 피아노 프로그램을 만들어 보았기 때문에 서로 다른 독창적인 탐구라고 볼 수 있다.

3. 연구 절차 및 방법

가. 소리의 높낮이를 결정하는 조건 탐구

나. 음계의 규칙성 탐구

다. 화음이 이루어 지는 음계를 찾아 보고 직접 만들어 보기

4. 작품의 내용

가. 12음계 음들의 규칙 찾기 (실험 1)

피아노를 공부하다 피아노는 흰 건반과 검은 건반의 반복된 패턴으로 이루어져 있다는 것을 알게 되었다. 반복되는 패턴 속에 흰 건반은 7개와 검은 건반 5개, 모두 12개의 건반으로 이루어져 있는데 왜 꼭 12개로 이루어져 있는지 궁금증이 생겼다. 그리고 12개가 아닌 다른 개수의 건반을 가지는 피아노는 없는지 궁금했다. 관련된 자료를 공부하다 보니 12개의 건반에 해당하는 12개의 음이 음계를 이룬다는 사실을 알게 되었다. 궁금증을 풀기 위해서 탐구한 내용을 정리하면 아래와 같다.

음악은 소리를 내는 악기로 연주한다. 악기가 연주하는 음들은 그 높이에 따라 이름을 붙여 부르는데 도(C)-레(D)-미(E)-파(F)-솔(G)-라(A)-시(B)-도(C)가 그것이다. 이것을 **음계**라고 하고 음과 음 사이의 높이 차이를 **음정**이라고 한다. 우리가 음악 연주에 가장 많이 사용하는 음계는 **12음계**인데 앞의 7개의 음과 피아노의 검은 음반에 해당하는 도#(C#), 레#(D#), 파#(F#), 솔#(G#), 라#(A#)의 5개의 음을 더하면 모두 12개이기 때문이다. 피아노 건반에는 여러 개의 도(C)가 있는데 뒤에 숫자를 붙여서 구분한다. 예를 들어 C4는 피아노 건반의 가운데에 있는 가온도(가온다)를 나타내고 C5는 그 다음에 있는 높은도를 나타낸다. C4와 C5처럼 이웃하는 같은 이름의 음들 사이의 음정을 **옥타브**라고 부른다.

소리는 공기의 떨림(진동)에 의해서 생기는 파동이다. 이 떨림의 정도를 **진동수**라고 하고 단위로는 1초에 몇 번 떨리는지를 나타내는 **헤르츠(Hz)**를 사용한다. 예를 들어 440Hz는 1초에 440번 진동한다는 의미이다. 진동수가 높을수록 떨림의 속도가 빠르다는 뜻이고 높은 소리를 의미한다. 음악에서 음은 강약, 높낮이, 길이, 음색 등의 성질을 가지는데 음의 높낮이는 진동수로 측정될 수 있다. 현악기와 같이 음의 높낮이가 주변 환경이나 악기의 상태에 따라 자주 변하는 악기들은 연주하기 전에 높낮이를 맞추는 과정이 필요한데 이를 **조율(튜닝)**이라고 한다.

12음계의 음들이 가지는 높낮이의 규칙성을 찾기 위해서 우선 음들의 진동수를 측정해보기로 하였다. 가정용 디지털 피아노(모델명: Yamaha CLP-645R)와 안드로이드 무료 조율 앱 gStrings를 사용하여 실험을 진행하였다.

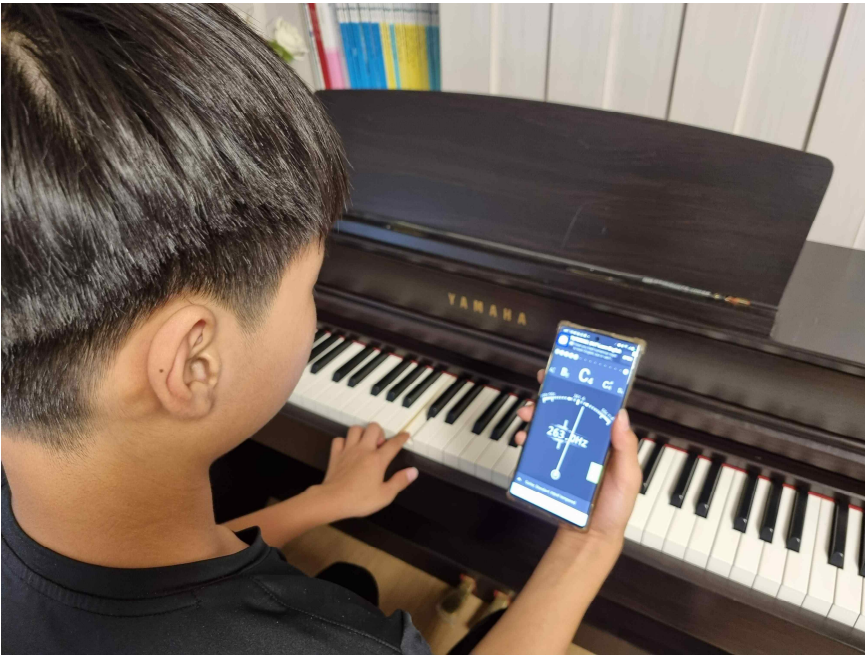


그림 1: 12음계 음들의 진동수 측정 과정

실험 1(12음계 음들의 진동수 측정)의 실험 절차는 다음과 같다(그림 1).

1. 피아노의 한 건반을 쳐서 소리를 낸다.
2. 스마트폰의 조율(튜닝) 앱을 사용하여 진동수를 측정하고 기록한다.
3. 1~2의 과정을 20회 반복한다.
4. C4 ~ C5, C3, C6대해서 1~3의 과정을 각각 반복한다.

표 1: 12음계 음들의 진동수 측정 결과

(단위: Hz)

음	C4	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B	C5
진동수	261.7	277.6	293.5	311.7	330.7	350.0	370.9	392.9	416.4	440.5	467.1	494.0	524.5

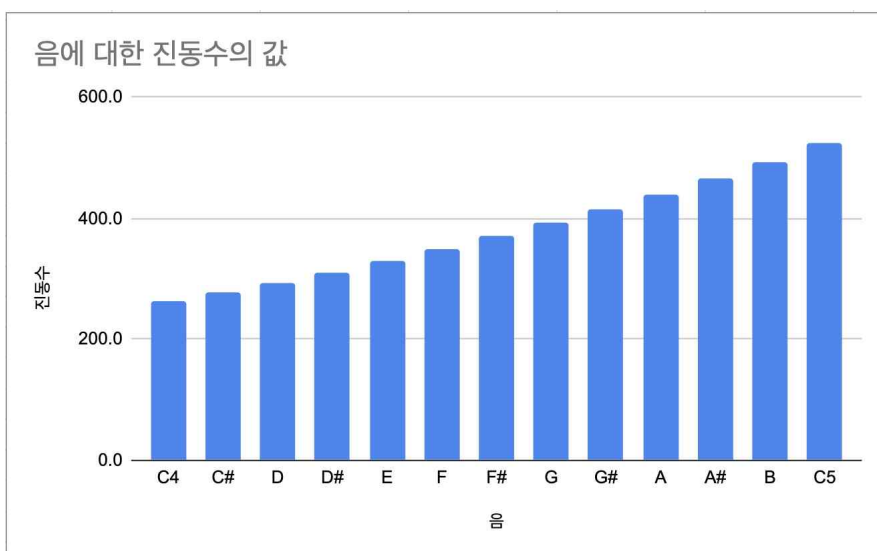


그림 2: 12음계 음들의 진동수 비교 그래프

표 1은 실험 1에서 측정된 진동수의 평균값들을 정리한 것이고, 그림 2는 이를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 보면 12음계에서 이웃한 음들의 진동수는 일정한 비율을 가지는 것을 발견할 수 있었다. 이웃한 음들의 진동수가 일정한 비율을 가지도록 조율하는 것을 **평균율**이라고 한다.

표 2: 12음계 도(C) 음들의 진동수 측정 결과

(단위: Hz)

음	C3	C4	C5	C6
진동수	130.6	261.7	524.5	1,047.9

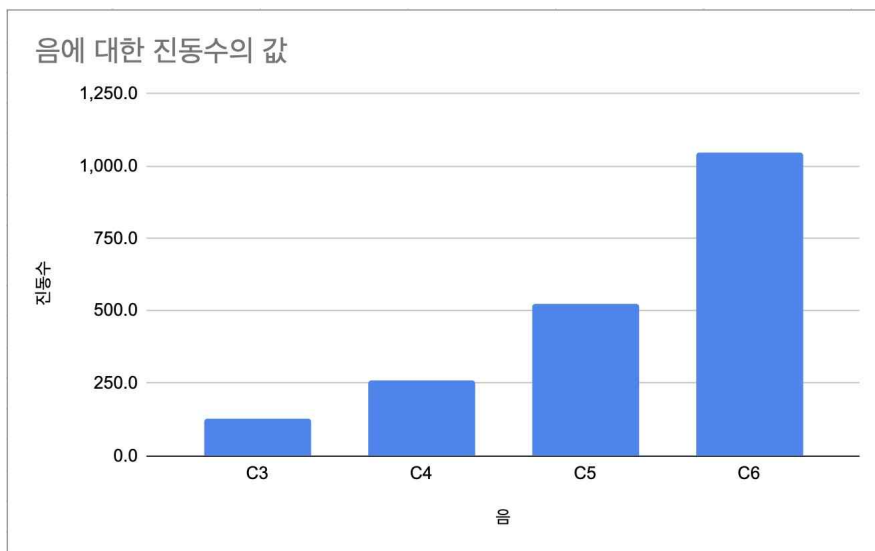


그림 3: 12음계 도(C) 음들의 진동수 비교 그래프

표 2는 실험 1에서 측정된 도(C) 음들의 진동수의 평균값들을 정리한 것이고, 그림 3은 이를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 보면 12음계에서 이웃한 도(C) 음들의 진동수는 2배씩 증가하는 것을 발견할 수 있었다.

실험 1(12음계 음들의 진동수 측정)의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 12음계의 이웃한 음들의 진동수는 일정한 비율을 가진다.
- 12음계의 도(C) 음들의 진동수는 2배씩 증가한다.

나. 음계의 음들이 가지는 원리 탐구

실험 1에서 발견한 규칙을 이용하여 12음계 음들의 진동수 사이의 관계를 좀 더 수학적으로 탐구해보기로 하였다. 이웃한 음들 사이의 일정한 진동수의 비를 R이라고 하면 다음의 수학적식을 얻을 수 있다.

- $C4 \times R \times \dots \times R$ (R을 12번 곱함) = $C4 \times R^{12} = C5$
- $C4 \times 2 = C5$

이를 정리하면, $R \times \dots \times R$ (R을 12번 곱함) = 2임을 알 수 있다. 계산기를 사용하여 계산하면

R=1.0595임을 알 수 있다.

이번 탐구를 통해서 발견한 12음계 음들이 가지는 수학적 규칙을 정리하면 아래와 같다.

- 12음계의 이웃한 음들의 진동수비는 1.0595로 일정하다.
- 12음계의 이웃한 옥타브 음들의 진동수는 2배씩 증가한다.

다. 다양한 음계 만들기 (실험 2)

앞에서 발견한 평균율 음계가 가지는 수학적 규칙을 사용하여 한 옥타브 안의 음의 수가 12개가 아닌 (즉, 12음계가 아닌) 음계를 만들 수 있음을 알 수 있다. 이 규칙을 이용하여 한 옥타브 안의 음의 수가 다양한 음계의 음들의 진동수를 계산하는 실험을 진행하였다.

실험 2(N음계 음들의 진동수 계산)의 실험 절차는 다음과 같다.

1. 진동수 비율 R을 계산한다. ($R \times \dots \times R$ (R을 N번 곱함)=2의 식을 이용해서 계산기로 값을 계산한다.
2. 가온도(C4)의 국제 표준 진동수인 261.63Hz를 기준으로 R배씩 곱하거나 나누어서 이웃한 음들의 진동수를 차례로 계산한다.
3. 서로 다른 N 값들에 대해서 1~2의 과정을 반복한다.

표 3: N음계 음들의 진동수 비율 R의 계산 결과

(단위: Hz)

N	8	9	10	11	12
R	1.0905	1.0801	1.0718	1.0650	1.0595

표 4: N음계 음들의 진동수 계산 결과

(단위: Hz)

진동수	1음(C4)	2음	3음	4음	5음	6음	7음	8음	9음	10음	11음	12음	13음
N=8	261.63	285.31	311.13	339.29	370.00	403.49	440.01	479.83	523.26				
N=9	261.63	282.58	305.20	329.63	356.02	384.53	415.31	448.56	484.47	523.26			
N=10	261.63	280.41	300.53	322.10	345.22	370.00	396.56	425.02	455.52	488.22	523.26		
N=11	261.63	278.65	278.65	316.07	336.63	358.52	381.84	406.68	433.13	461.30	491.30	523.26	
N=12	261.63	277.19	293.67	311.13	329.63	349.23	370.00	392.00	415.31	440.01	466.17	493.89	523.26

표 3과 표 4는 실험 2를 통해서 계산된 여러 가지 N 값들에 대한 진동수 비율 R의 계산값과 음들의 진동수 계산값들을 각각 표로 정리한 것이다.

이번 실험을 통해서 음계 내의 음들이 가지는 진동수의 수학적 규칙을 이용하여 N음계(즉, 한 옥타브 내의 음의 개수가 N개인 음계)의 음들의 진동수를 계산할 수 있음을 확인하였다. 예를 들어 N = 10인 10음계의 경우 진동수 비율 R = 1.0718을 계산하고 이를 이용하여 10개의 음들의 진동수를 계산할 수 있었다.

라. 10음계로 음악을 연주하는 피아노 프로그램 만들기

앞의 실험 2에서 계산한 10음계 음들을 연주할 수 있는 피아노 프로그램을 만들어 보기로 했다. 방학 때 새싹 코딩 수업에서 배운 스크래치 언어를 사용하여 프로그램을 작성하기로

했다. 스크래치에서 소리를 내기 위해서는 우선 원하는 진동수의 소리를 내는 음원 파일이 필요하다. 인터넷 검색을 통해서 Online Tone Generator라는 사이트를 찾을 수 있었는데, 이 사이트를 이용하면 무료로 원하는 진동수의 음원 파일을 만들 수 있다. 앞의 실험 2에서 계산한 10음계 음 11개의 진동수를 각각 입력하여 .WAV형식의 음원 파일들을 다운로드 받을 수 있었다.

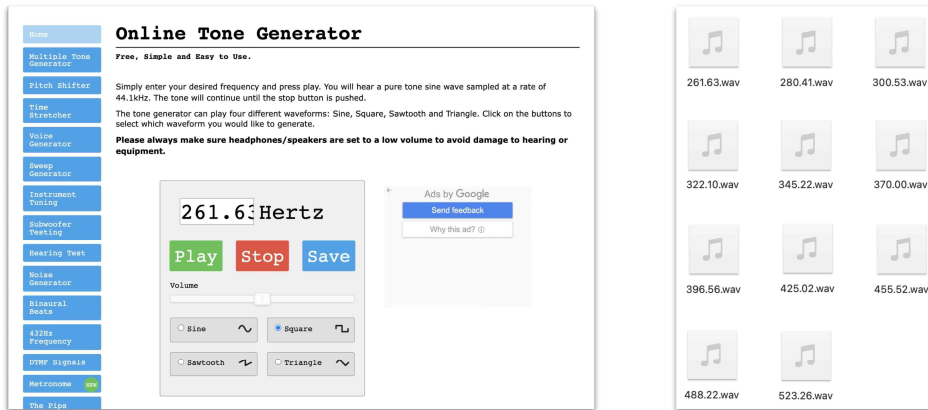


그림 4: 10음계 음들의 음원파일을 만드는 과정과 만들어진 음원파일들

그림 4는 Online Tone Generator 사이트를 이용해서 10음계 음원파일들을 만드는 과정과 다운로드 받은 음원파일들을 보여준다.

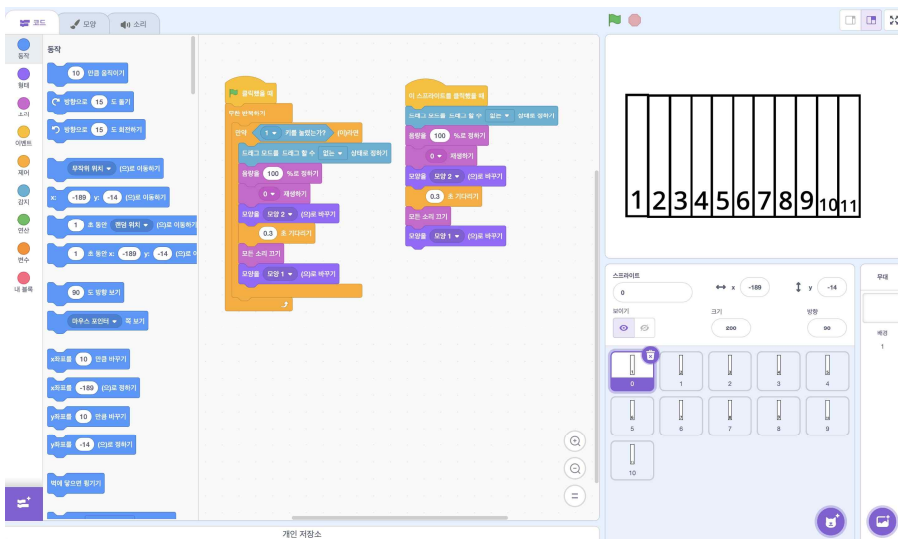


그림 5: 10음계 음악을 연주할 수 있는 스크래치 프로그램

만들어진 음원파일들을 이용해서 10음계 음악을 연주할 수 있는 피아노 프로그램을 스크래치로 만들었다. 그림 5는 작성된 스크래치 프로그램을 보여준다. 연주를 위해서 11개의 피아노 건반이 필요하다. 이를 위해서 1개의 음원파일 당 1개의 스프라이트를 만들고 그 스프라이트를 클릭하면 음원파일의 소리를 0.3초동안 연주하도록 하였다. 연주를 더 쉽게 하기 위해서 마우스와 함께 컴퓨터의 키보드로도 연주할 수 있도록 하였다. 키보드 '1'을 음1로,

키보드 ‘2’ 를 음2로, ..., 키보드 ‘0’ 을 음10으로, 키보드 ‘P’ 를 음11로 연결하였다.

마. 10음계 음악을 피아노 프로그램으로 연주하기 (실험 3)

앞에서 작성한 10음계 피아노 스크래치 프로그램을 이용해서 음악을 연주할 수 있는지 실험해 보기로 하였다. 우선 악보를 만들기 위해서 연주할 곡을 선정하였다. 쉬운 멜로디를 가지고 누구나 알 수 있는 귀에 익은 멜로디를 가지는 ‘산토끼’, ‘학교종’, 그리고 ‘무궁화 꽃이 피었습니다’ 세 곡을 선정하였다. 연주를 위해서 간단한 악보를 만들었다. 잘 알고 있는 멜로디이기 때문에 음의 이름을 나열하는 식으로 간단하게 작성하였다.

산토끼 (10음계)	무궁화 꽃이 피었습니다 (10음계)
7 5 5 7 5 2	5 9 9 7 9 5 7
3 5 3 1 5 7	5 9 9 9 7 9 9 5 5 7
학교종 (10음계)	
7 7 9 9 7 7 5	
7 7 5 5 3	
7 7 9 9 7 7 5	
7 5 3 5 1	

그림 6: 10음계 음악 연주를 위한 간단한 악보들

그림 6은 연주할 세 곡에 대해서 간단하게 작성한 10음계 악보를 보여준다. 세 곡은 원래 12음계로 작곡된 곡이므로 10음계에서는 같은 음이 없는 경우가 많다. 이 경우는 가장 비슷한 음을 대신 사용하는 식으로 악보를 작성하였다.

작성된 악보를 이용해서 선정된 세 곡을 직접 연주해 보았다.



그림 7: 10음계 음악을 스크래치 피아노 프로그램을 연주하는 모습

그림 7은 컴퓨터 키보드를 이용해서 연주하는 모습을 보여준다. 쉬운 멜로디이고 잘 알고 있는 멜로디라서 그런지 연주가 어렵지는 않았다. 처음에는 12음계의 원래의 음들과 조금씩 달라서 어색했지만 여러번 연주하니 귀에 조금씩 익숙해지고 어색한 느낌도 어느 정도 줄어들었다.



그림 8: 10음계 음악을 스크래치 피아노 프로그램으로 연주하는 동영상 QR Code

그림 8의 QR Code를 통해서 10음계 음악을 스크래치 피아노 프로그램으로 연주하는 모습을 담은 동영상을 확인할 수 있다.

실험 3(10음계 음악을 피아노 프로그램으로 연주하기)의 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 12음계로 작곡된 음악을 10음계 악보로 바꿀 수 있었다.
- 10음계 피아노 프로그램을 이용하여 10음계 음악을 직접 연주할 수 있었다.
- 원래 12음계로 작곡된 곡이어서 그런지 처음에는 멜로디가 조금 어색하게 들렸지만 여러번 연주하니 어색한 느낌이 어느 정도 줄어들었다.

바. 음계 내의 화음이 가지는 원리 탐구 (실험 4)

음악과 관련된 인터넷 문서들을 통해서 음계 내의 화음이 가지는 원리를 탐구하였다. 탐구한 내용을 요약하면 아래와 같다.

화음은 다른 2개 이상의 음이 동시에 울렸을 때의 만들어지는 소리를 말한다. 화음은 크게 협화음과 불협화음이 있다. 협화음은 사람이 들었을 때 안정적인 느낌이 드는 화음이고 불협화음은 불안정한 느낌이 드는 화음이다. 협화음은 두 음의 진동수가 간단한 정수비에 가까울 때 나타난다. 예를 들어 12음계에서 도(C)와 솔(G)의 표준 진동수는 각각 261.63hz와 392.00hz인데 두 값을 나누어 보면 $392.00 / 261.63 = 1.4982$ 로 정수비인 $3/2 = 1.5$ 와 아주 가까운 값인 것을 확인할 수 있다.

12음계 음들의 표준 진동수를 이용하여 진동수의 비율만을 가지고 협화음인지 불협화음인지 조사해보는 실험을 진행해 보기로 하였다(실험 4).

표 5: 12음계 음들의 가온도(C4)에 대한 진동수 비율과 화음

(단위: Hz)

음	C4	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B	C5
진동수	261.7	277.6	293.5	311.7	330.7	350.0	370.9	392.9	416.4	440.5	467.1	494.0	524.5
비율	1	1.0595	1.1225	1.1892	1.2599	1.3348	1.4142	1.4983	1.5874	1.6818	1.7818	1.8877	2
정수비	1/1				5/4	4/3		3/2					2/1
소수값	1.0000				1.2500	1.3333		1.5000					2.0000
화음	협	불협	불협	불협	협	협	불협	협	불협	불협	불협	불협	협

표 5는 실험 4를 통해서 조사한 12음계 음들의 진동수의 비율, 가까운 간단한 정수비, 화음의 종류를 표로 정리한 것이다. 가온도(C4)에 대해서 도(C4), 미(E), 파(F), 솔(G), 도(C5)는 협화음을 만드는 것을 알 수 있었다. 이때 가까운 간단한 정수비는 각각 1/1, 5/4, 4/3, 3/2, 2/1로 조사되었다.

이번 탐구(실험 4)를 통해서 알게된 내용을 요약하면 아래와 같다.

- 화음에는 협화음과 불협화음이 있다.
- 두 음의 진동수의 비율이 간단한 정수비에 가까울 때 협화음이 만들어지고 그 반대의 경우에 불협화음이 만들어진다.
- 12음계에서 가온도(C4)와 협화음을 이루는 음들은 모두 도(C4), 미(E), 파(F), 솔(G), 도(C5)인 것으로 조사되었다.

사. 10음계에서의 화음 찾기 (실험 5)

앞에서 계산한 10음계 음들 사이의 화음을 진동수 비율을 통해서 찾는 실험을 진행해 보기로 하였다. 실험 4에서와 같은 방법으로 음들의 진동수의 비율, 가까운 간단한 정수비, 화음의 종류를 찾아보았다.

표 6: 10음계 음들의 가온도(C4)에 대한 진동수 비율과 화음

(단위: Hz)

음	1음(C4)	2음	3음	4음	5음	6음	7음	8음	9음	10음	11음(C5)
진동수	261.63	280.41	300.53	322.10	345.22	370.00	396.56	425.02	455.52	488.22	523.26
비율	1	1.0718	1.1487	1.2311	1.3195	1.4142	1.5157	1.6245	1.7411	1.8661	2
정수비	1/1				4/3	7/5	3/2	8/5	7/4		2/1
소수값	1.0000				1.3333	1.4000	1.5000	1.6000	1.7500		2.0000
화음	협	불협	불협	불협	협	협	협	협	협	불협	협

표 6은 실험 5를 통해서 조사한 10음계 음들의 진동수의 비율, 가까운 간단한 정수비, 화음의 종류를 표로 정리한 것이다. 가온도(C4)에 대해서 1음(C4), 5음, 6음, 7음, 8음, 9음, 11음(C5)은 협화음을 만드는 것을 알 수 있었다. 이때 가까운 간단한 정수비는 각각 1/1, 4/3, 7/5, 3/2, 8/5, 7/4, 2/1로 조사되었다. 이때 정수비와 실제 진동수 비율과의 차이가 12음계의 경우보다는 크게 나타나는 것으로 조사되었다.

이번 탐구(실험 5)를 통해서 알게 된 내용을 요약하면 아래와 같다.

- 12음계에서 가온도(C4)와 협화음을 이루는 음들은 모두 1음(C4), 5음, 6음, 7음, 8음, 9음, 11음(C5)인 것으로 조사되었다.
- 이때 정수비와 실제 진동수의 비율과의 차이가 12음계의 경우보다는 크게 나타나는 것으로 조사되었다.

5. 결론

우리가 음악을 연주하기 위해서 사용하는 악기들은 대부분 한 옥타브에 12개의 음이 들어있는 12음계를 사용하는데 12음계 음들 사이의 규칙성을 알아보기 위한 실험(실험 1)을 통해서 1) 이웃한 음들은 진동수의 비가 일정하며, 2) 옥타브를 이루는 음들 사이의 진동수의 비율이 2가 된다는 사실을 알게 되었다. 이를 수학적으로 탐구하여 이웃한 음들 사이의 진동수의 비율이 1.0595라는 사실을 알게 되었다. 이러한 사실을 바탕으로 옥타브를 이루는 음들의 개수가 12개가 아닌 다양한 수 $N = 8, 9, 10, 11$ 인 음계에 대해서 음들의 진동수를 정확하게 계산할 수 있었다(실험 2). 예를 들어 $N = 10$ 인 10음계의 경우 진동수의 비율 $R = 1.0718$ 을 계산할 수 있었고 이를 이용해서 10개의 음들의 진동수를 차례대로 계산할 수 있었다. 계산된 진동수를 사용하여 10음계 음악을 연주할 수 있는 피아노 프로그램을 스크래치로 작성할 수 있었다. 이를 이용하여 쉽고 익숙한 12음계 음악들을 10음계 음악으로 변환하여 연주해 볼 수 있었다(실험 3). 이를 통해서 수학적인 계산을 통해서 12음계가 아닌 다른 음계를 만들 수 있고 이 음계를 이용하여 실제로 음악을 연주할 수 있음을 확인할 수 있었다.

12음계 음들 사이의 진동수의 비율을 관찰함으로써 두 음이 만들어내는 화음이 협화음인지 불협화음인지 판별해낼 수 있다는 사실을 알게 되었다. 즉, 진동수의 비율이 간단한 정수비에 가까우면 협화음을 이루고 그렇지 않으면 불협화음을 이룬다. 이를 통해서 12음계 음들이 만들어내는 협화음을 모두 찾아내고 이때의 간단한 정수비를 찾을 수 있었다(실험 4). 이 원리를 앞에서 계산해낸 10음계 음들에 적용해서 10음계 내의 협화음을 모두 찾아낼 수 있었다(실험 5).

6. 전망 및 활용성

흔히 우리 주변에서 볼 수 있는 악기들은 12 음계로 이루어져 있어 다른 음계로 이루어진 악기의 소리에 대해 호기심이 생기게 되는데, 본 탐구에서 밝혀낸 내용을 활용하면 쉽게 12음계 외 다른 음계를 만들어 볼 수 있다. 또한 실제로 연주해 볼 수 있도록 실제 건반 형태의 프로그램을 만들어 보았기 때문에 친구들과 함께 다양한 음계를 만들어 볼 수도 있고 쉽게 연주도 가능하다.

음계에 담긴 규칙을 설명하고 이를 쉬운 코딩으로 실제 연주해 볼 수 있도록 코딩 프로그램으로 만들어 교육 자료를 제작해보면 학생들이 소리와 진동수와의 관계를 재미있게 배워 볼 수 있을 것 같다.

참고문헌

- 보고서 쓰기 참고서: 상상 아카데미 출판사 <과학 탐구보고서 소논문 쓰기>
- 진동수: <https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%A7%84%EB%8F%99%EC%88%98>
- 음계: <https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%9D%8C%EA%B3%84>
- 평균율: <https://ko.wikipedia.org/wiki/%ED%8F%89%EA%B7%A0%EC%9C%A8>
- 음고 (12음계의 표준 진동수): <https://namu.wiki/w/%EC%9D%8C%EA%B3%A0>
- Online Tone Generator: <https://onlinetonegenerator.com/>
- 스크래치 프로그래밍 언어: <https://scratch.mit.edu/>
- 화음: <https://ko.wikipedia.org/wiki/%ED%99%94%EC%9D%8C>
- 음정 (협화음과 불협화음): <https://namu.wiki/w/%EC%9D%8C%EC%A0%95>

실험 결과 데이터 아카이브

- 음계 연구 실험 데이터
<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1QB2ehDpFxEjTROzZWlspEPW7CfnumO041KesxZLNyg/edit#gid=0>
- 10음계를 연주 할 수 있는 스크래치 프로그램
<https://scratch.mit.edu/projects/891401253>

도움받은 사람

- 보고서 검토: 서울 삼일초등학교 지도교사