

출품번호
1144

제61회 전국과학전람회

자전거 림을 활용한 한국 종의 맥놀이 연구

출품분야	학생	출품부문	물리
------	----	------	----

2015. 7. 9

구 분	성 명
출품자	
지도교사	

목 차

1. 서론	4
가. 연구 동기	4
나. 연구 목적	4
다. 연구 내용	5
2. 이론적 배경	6
가. 맥놀이	6
나. 한국 종의 맥놀이	8
다. 맥놀이 지도	9
3. 연구 내용	12
가. 탐구과제 1. 한국 종과 외국 종의 차이 분석	12
나. 탐구과제 2. 한국 종의 표준 모형	15
다. 탐구과제 3. 자전거 림의 맥놀이지도	17
라. 탐구과제 4. 자전거 림의 맥놀이 지도의 비교	22
마. 탐구과제 5. 자전거 림의 맥놀이 주기의 조정	25
바. 탐구과제 6. 성덕대왕 신종의 진동 주파수와 맥놀이 주기의 재현	28
사. 탐구과제 7. 전자 한국 종의 설계	30
4. 연구 결과	32
5. 연구 결론	34
6. 고찰 및 제언	35
7. 참고문헌	35

그 립 목 차

그림 1. 주파수 차이가 1 Hz인 주파수쌍에 대한 두 파동의 합성	8
그림 2. 종소리의 발생 및 인식 과정	8
그림 3. 성덕대왕 신종의 64Hz 맥놀이의 원리	9
그림 4. 성덕대왕 신종의 맥놀이 지도	10
그림 5. 성덕대왕 신종의 첫 번째 주파수의 맥놀이 지도로부터 구한 배점과 당점의 위치	11
그림 6. 한국 종의 구조와 각 부위의 명칭	13
그림 7. 한국 종과 외국종의 형태 비교	14
그림 8. 한국 종 몸체(x)와 입지름(z)의 관계에 대한 도수분포 및 일차 근사식	16
그림 9. 20인치 자전거 림과 한국 종의 비교	16
그림 10. 자전거 림	17
그림 11. 자전거 림의 진동 측정	19
그림 12. 자전거 림의 직경과 진동 주파수의 관계	21
그림 13. 20인치 자전거 림의 첫 번째 주파수 쌍에 대한 맥놀이 지도 (배점: 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 당점: 3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31)	23
그림 14. 맥놀이 지도로부터 진동모양과 배점 및 당점을 구하는 방법	24
그림 15. 배점에 부착한 질량의 예	26
그림 16. 성덕대왕 신종의 맥놀이 주기를 갖는 자전거 림의 맥놀이 지도	27
그림 17. 성덕대왕 신종의 1차 진동 주파수를 갖는 자전거 림의 검증	27
그림 18. 전자 한국 종의 회로도 및 림의 장착 방법	31
그림 19. 자전거 림의 맥놀이 지도 비교	33

표 목 차

표 1. 한국 종과 외국종의 구조적 특징의 비교	14
표 2. 표준 모형 조사를 위해 조사된 한국 종	15
표 3. 표 3. 16인치, 18인치, 20인치 및 22인치 자전거 림의 진동 특성과 성덕대왕 신종의 비교	20
표 4. 질량을 이용한 20인치 자전거 림의 맥놀이 주기 조정	26
표 5. 성덕대왕 신종의 1차 진동 주파수를 갖는 자전거 림(직경 660mm)의 검증	29

1. 서론

우리나라의 종은 독창적인 기술성과 고도의 예술성이 융합하여 우아하면서 아름다운 면모와 은은하고 긴 여운을 가진 청아한 종소리를 가지고 있다. 따라서 세계에서 가장 우수한 종으로 평가되고 있다. 이와 같은 우수성으로 한국 종(Korean Bell)이라는 학명도 얻게 되었다.

한국 종의 아름다운 소리의 주요한 특징이 있다면 큰 울림, 맥놀이 그리고 맑은 소리라고 할 수 있다. 이 중에서 큰 울림은 주로 명동에 의해서 만들어진다.^{(1),(2)} 또한 맥놀이는 종 몸체의 비대칭으로 인한 불균형이 만들어 내는 신비한 조화이다.⁽³⁾

가. 연구 동기

맥놀이는 소리가 커졌다 작아졌다하는 현상으로서 음의 단조로움을 없애며 보다 먼 곳으로 소리를 전달하는 역할을 한다. 맥놀이의 원리가 원형 구조물의 구조적인 특징에서 발생하는 것이라면 “한국 종의 맥놀이 소리를 주변에서 쉽게 구할 수 있는 원형 구조물 예를 들면 자전거의 림을 이용해서도 재생해 낼 수 있다”는 탐구 주제가 발상되었다.

한국 종의 소리를 듣기 위해서는 연말 보신각종의 타종을 기다리거나 음원을 통해서 듣는 수밖에 없다. 작년에 한국 종 음관의 역할에 대한 연구를 할 때, 모형 한국 종을 구매해 보았는데 크기가 너무도 작았고 결과적으로 높은 주파수의 소리가 울려나오는 바람에 깜짝 놀란 적도 있었다. 따라서 “만약 평상시에도 아름다운 한국의 종소리를 재현할 수 있는 장치가 있다면 종을 텐데”라는 아쉬움을 가지게 되었다.

나. 연구 목적

최근에는 전자 악기가 많이 개발되고 사용되고 있다. 예를 들면 전자 바이올린, 전자 비올라, 전자 첼로, 전자 더블베이스 등을 포함하는 전자 현악기, 전자 타악기 등 또한 국악기로는 전자 해금 및 전자 가야금 등도 볼 수 있다. 만약 맥놀이를 만들어내는 방법을 밝혀낸다면 전자 한국 종을 설계할 수 있는 기초 연구가 될 수 있다.

이 연구는 주변에서 쉽게 구할 수 있는 재료, 예를 들면 폐자전거의 림을 이용해서 한국 종 소리의 맥놀이를 재현해 낼 수 있는 기술을 개발하고 전자 한국 종의

설계 방법을 제안하고자 한다.

다. 연구 내용

본 연구는 폐자전거의 림을 이용해서 한국 종 소리의 맥놀이의 원리를 분석하고 재현해 낼 수 있는 기술을 개발하고, 한국 전자종의 설계 방법을 제안하고자 다음과 같이 연구를 수행한다.

가. 한국 종과 외국종의 차이를 알아본다.

- 한국 종과 외국종의 구조 및 형상의 차이와 소리의 차이를 조사한다.

나. 한국 종의 형상을 조사하여 한국 종 표준 모형을 알아본다.

- 국보 및 보물을 포함 총 76점의 문헌을 조사하거나 또는 직접 보관 장소, 예를 들면, 박물관과 절을 방문해서 조사한다.
- 한국 종의 형상 데이터를 통계 처리하여 한국 종의 표준 모형을 조사한다.

다. 폐자전거의 림을 활용하여 원형 구조물의 진동 특성을 분석한다.

- 한국 종 표준모형에 포함되는 자전거 림의 직경을 선정한다.
- 자전거 림의 맥놀이 지도를 제작한다.
- 자전거 림의 직경을 변화시키면서 진동 특성을 분석하고 물리학적 규칙을 찾아본다.

라. 맥놀이 주기를 조정하는 방법을 알아본다.

- 성덕대왕신종의 맥놀이 주기, 2.8초를 자전거 림을 이용해서 구할 수 있는 방법을 찾아본다.

마. 전자 한국 종의 설계안을 제안한다.

- 한국 종의 소리를 재현하기 위한 가장 좋은 조건을 찾아본다. 이를 위해서 가진점 즉 당좌의 위치와 신호 수집점 즉 pickup 점의 위치를 결정하는 방법을 맥놀이 지도를 이용해서 연구해 본다.
- 자전거 림, 진동 가속도계를 이용한 pickup 장치로 구성되는 전자 한국 종을 제안한다.

2. 이론적 배경

가. 맥놀이

서로 약간 다른 주파수 f_1 과 f_2 를 주파수 쌍이라고 할 때, 맥놀이는 주파수 쌍의 독립된 파동의 간섭 현상이다. 진폭이 같은 두 개의 파동 y_1 과 y_2 이 식 1과 식 2처럼 주어졌을 때,

$$y_1 = A \cos(2\pi f_1 t) \quad (\text{식 1})$$

$$y_2 = A \cos(2\pi f_2 t) \quad (\text{식 2})$$

여기서 A 는 파동의 진폭이며 f_1 및 f_2 는 각각 주파수를 의미한다. 중첩의 원리를 이용하여 합성된 파동을 구하면

$$y_3 = y_1 + y_2 \quad (\text{식 3})$$

$$= A \cos(2\pi f_1 t) + A \cos(2\pi f_2 t) \quad (\text{식 4})$$

여기서 식 4에 아래의 삼각함수 관계식 5를 적용하면

$$\cos a + \cos b = 2 \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \quad (\text{식 5})$$

합성된 파동 y_3 는 다음과 같다.

$$y_3 = 2A \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right) \cos\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t\right) \quad (\text{식 6})$$

여기서

$$\hat{\omega} = 2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} \quad \text{및} \quad \omega = 2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (\text{식 7)}$$

로 나타내면 식 6의 파동 y_3 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_3 = [2A \cos(\hat{\omega}t)] \cos(\omega t) \quad (\text{식 8})$$

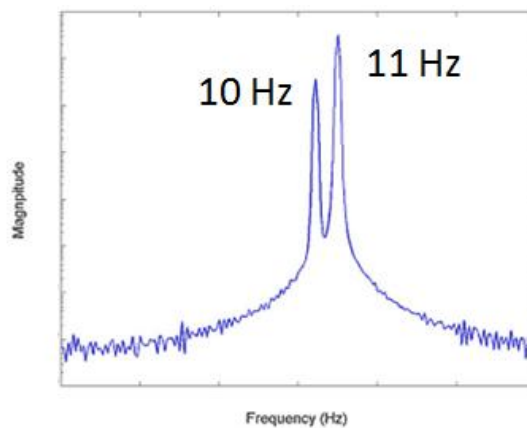
여기서 두 파동의 진동수가 거의 같다는 가정에 따라서 식7에서 $\omega \ll \hat{\omega}$ 이 된다. 이 경우 식 8의 파동 y_3 는 각진동수가 ω 이고 진폭은 괄호 안 즉 $[2A \cos(\hat{\omega}t)]$ 으로서 각진동수 $\hat{\omega}$ 에 따라서 크기가 변하는 코사인 함수라고 할 수 있다. $[2A \cos(\hat{\omega}t)]$ 의 각진동수는 $\hat{\omega}$ 이므로 식 7을 고려하면 맥놀이 일어나는 주파수 f_{beat} 는 두 주파수의 차이가 된다.

$$f_{beat} = f_1 - f_2 \quad (\text{식 9})$$

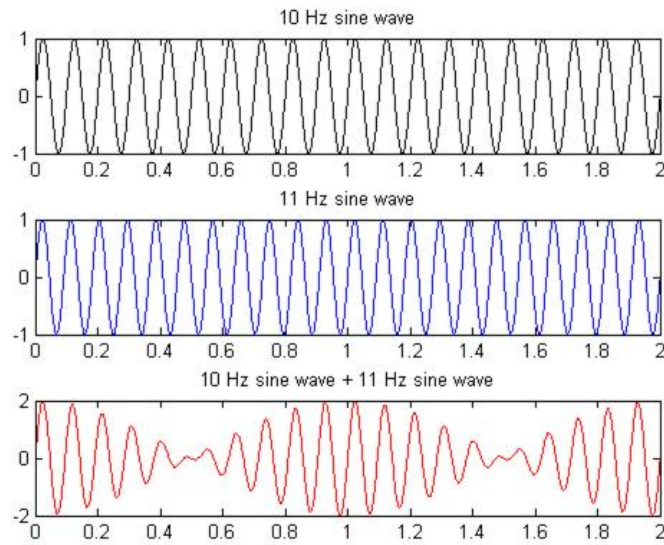
이때 맥놀이 주기는 맥놀이 주파수의 역수로 다음과 같다.

$$T_{beat} = \frac{1}{f_{beat}} \quad (\text{식 10})$$

주파수 차이가 1 Hz인 10Hz와 11Hz로 구성되는 주파수 쌍의 두 파동의 간섭을 예를 들어 알아보자. 두 개의 파동이 간섭되어 새로 생긴 파동은 그림 1의 가에서 보는 것과 같은 주파수 특성을 보이며 그림 1의 나에서 보는 것처럼 진폭이 변하는 새로운 주기를 갖는 파동으로 바뀌게 된다. 여기서 진폭이 변하는 주파수 f_{beat} 는 1 Hz가 되며 이를 맥놀이 주파수라고 하고 맥놀이 주기는 1초가 된다.



(가) 주파수 영역



(나) 시간 영역

그림 1. 주파수 차이가 1 Hz인 주파수쌍에 대한 두 파동의 합성

나. 한국 종의 맥놀이

당목으로 당좌를 가진하면 종의 몸체가 진동한다. 종의 몸체 진동은 몸체와 붙어 있는 공기를 진동시켜서 압력의 변화를 만든다. 이 압력변화가 사람의 귀에 전달에 되면 청신경을 통해서 뇌에 전달되어 소리를 느끼게 된다.

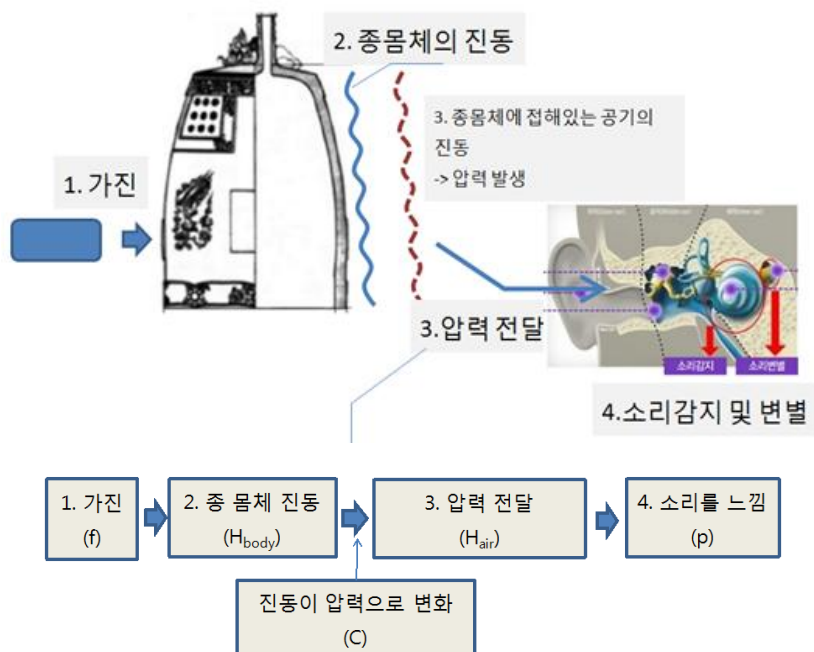


그림 2. 종소리의 발생 및 인식 과정

그런데 인접한 두 개의 주파수를 갖는 소리가 발생하게 되면 두 소리는 서로 간섭함으로써 맥놀이 현상을 발생시킨다. 그림 3에서 보는 것처럼 당목으로 당좌를 가진다면 종체는 진동하게 된다. 그림 3의 우측 아래에서 보는 것처럼 종체는 횡방향과 대각방향으로 진동한다. 두 개의 진동의 주파수 차이는 식 9에서와 같이 맥놀이 주파수가 되며 두 진동이 합성되어 결과적으로 사람들이 듣는 소리가 되며 맥놀이를 갖게 된다. 맥놀이 주기는 식 10과 같이 맥놀이 주파수의 역수이다.

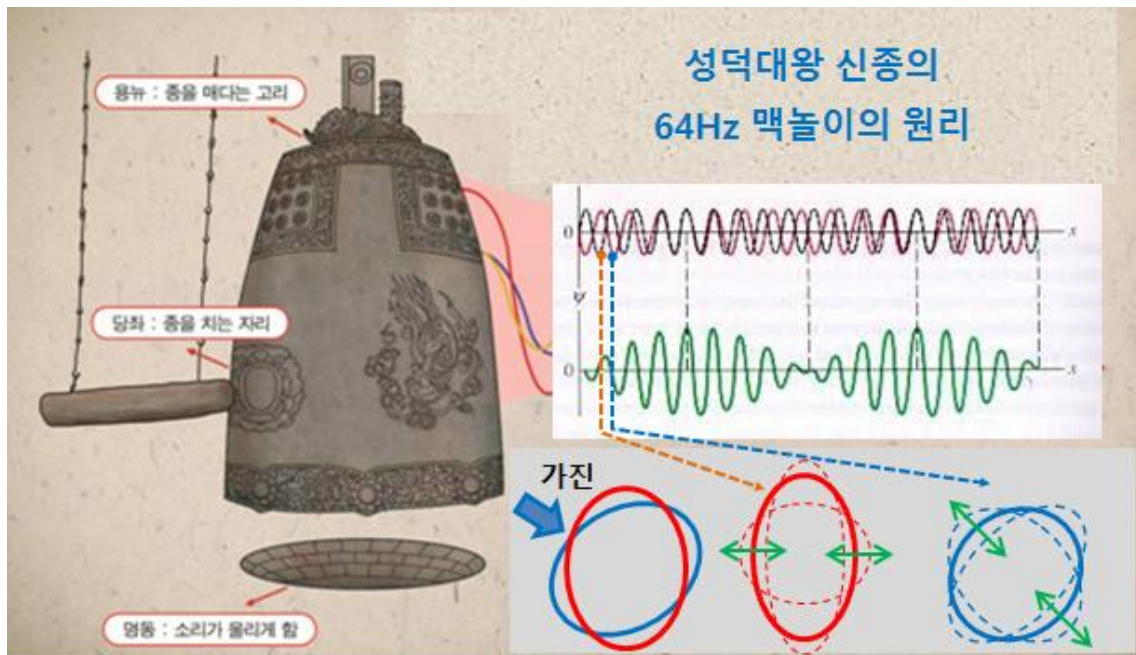


그림 3. 성덕대왕 신종의 64Hz 맥놀이의 원리

성덕대왕 신종의 맥놀이 현상은 64Hz와 168Hz에서 모두에서 일어난다. 첫 번째 주파수, 64Hz 주파수의 음파를 좀 더 상세하게 분석해보면 64.07Hz, 64.42Hz의 두 개의 음파가 하나의 주파수 쌍을 이룬다. 이 주파수 쌍의 주파수 차이는 0.37Hz이다. 식 1에서 맥놀이 주기는 주파수 차이의 역수이므로 때문에 2.7초가 된다. 두 번째 주파수, 168Hz를 더 자세히 들여다보면 168.52Hz, 168.63Hz의 두 가닥의 음파가 하나의 주파수 쌍을 이룬 것으로 나타나는데, 주파수 차이가 0.11Hz가 되며 때문에 맥놀이 주기는 9초가 된다.⁽³⁾

다. 맥놀이 지도

맥놀이 지도⁽³⁾는 종의 원주상 맥놀이 변화를 파악하는 방법으로써 원주상 각 지점에서 시간에 따른 맥놀이 파형을 방사형으로 배열시킨 그림으로서 성덕대왕 신종

에 대한 맥놀이 지도가 그림 4에 주어져 있다. 실험으로부터 맥놀이 지도를 얻기 위해서는 가진점을 충격망치를 이용해서 가진하고 원주상 각 지점의 맥놀이 파형을 계측한다.

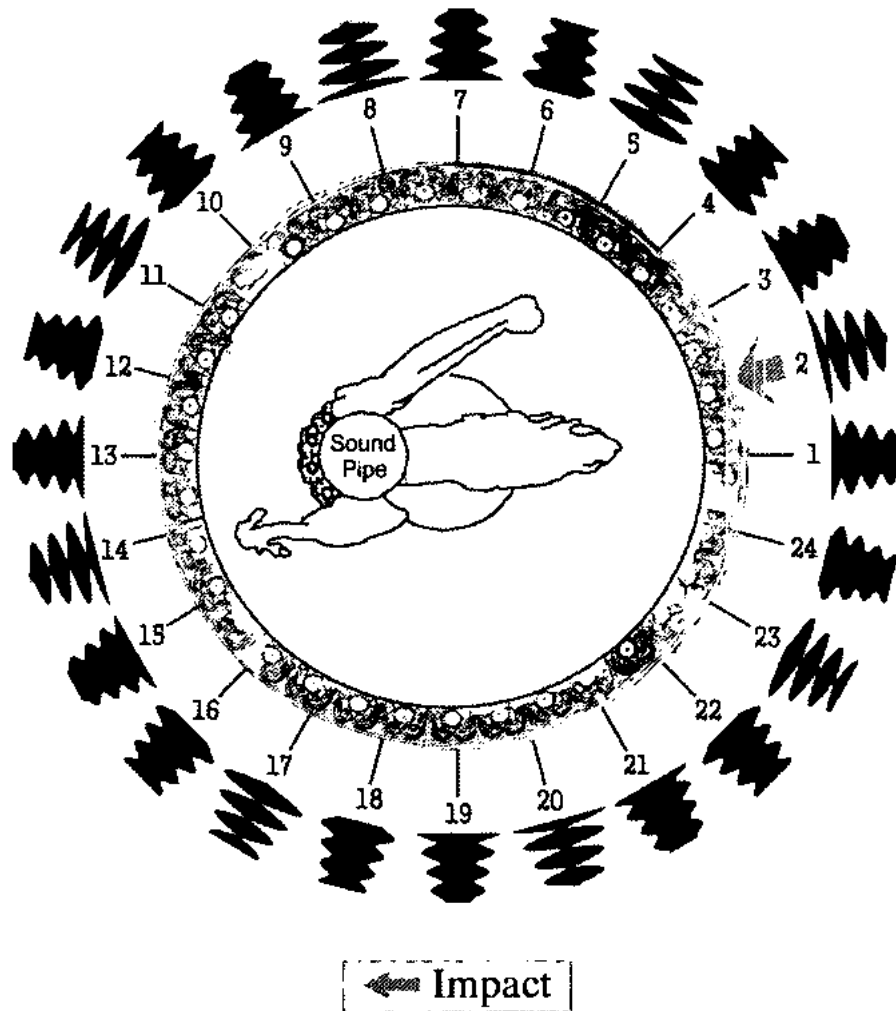


그림 4. 성덕대왕 신종의 64Hz주파수 쌍의 맥놀이 지도

라. 배점과 당점

이 연구에서는 참고문헌이 제공한 성덕대왕 신종의 맥놀이 신호를 분석해 보았다. 그 결과, 그림 5에서 보는 것과 같이 동일한 형태의 신호가 반복해서 발생하는 것을 볼 수 있다. 2번에서 발생되는 신호는 선명한 맥놀이를 보이는 반면 3번 또는 4번에서 보이는 신호는 맥놀이가 선명하지 않다.

이 연구에서는 배점과 당점을 정의해서 원형 구조의 진동을 설명하고자 한다. 배점은 원형 구조내 진동이 가장 큰 위치이며(∧) 당점은 두 주파수 쌍을 균형있게 가진할 수 있는 위치(∩)이다.

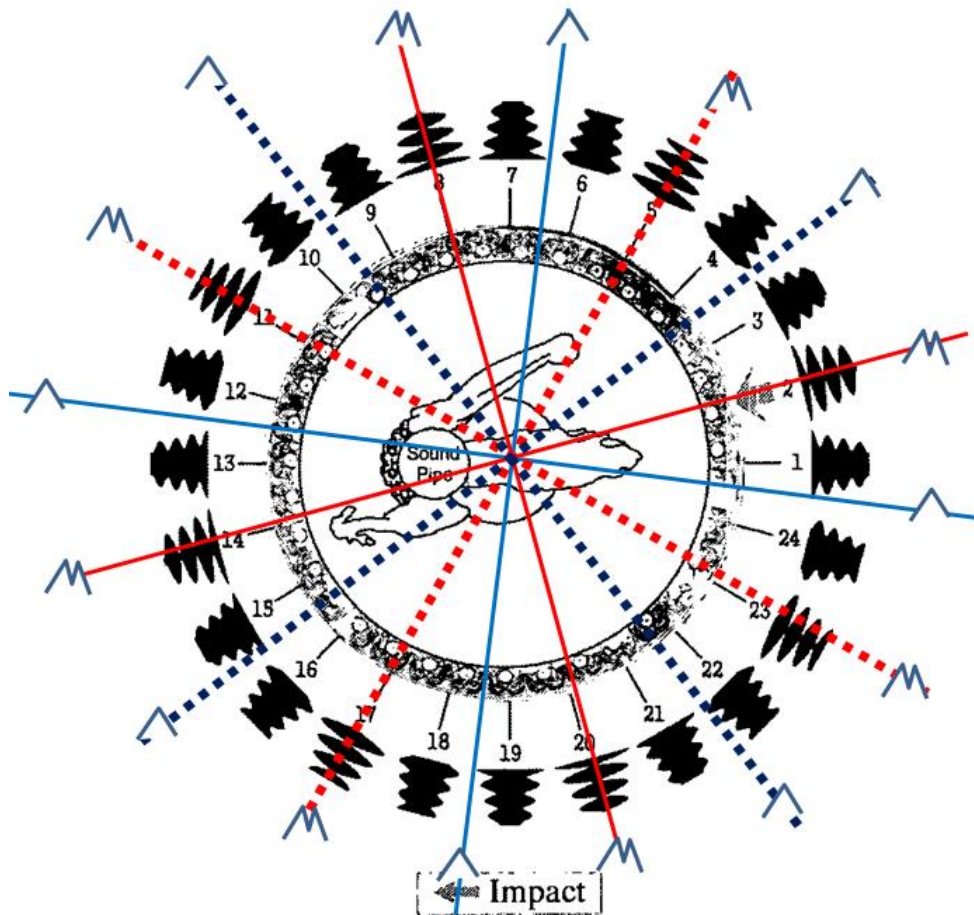


그림 5. 성덕대왕 신종의 첫 번째 주파수의 맥놀이 지도로부터 구한 배점과 당점의 위치

3. 연구 내용

가. 탐구과제 1. 한국 종과 외국 종의 차이 분석

1) 종의 구조

종은 원래 악기의 일종으로 여러 불교 국가에서는 예로부터 크고 작은 종들을 많이 제작해 왔다. 한국의 경우 청동을 주재료로 사용한 동종이 대다수를 차지하고 있다. 동종의 크기는 실내용의 30cm 미만의 작은 종도 많지만 성덕대왕 신종과 같이 높이 3.75m에 이르는 큰 종도 있다.

한국의 범종은 학명으로까지 “한국 종(Korean Bell)”이라고 불릴 만큼 독자적인 양식을 지니고 있다. 한국 종의 특징은 무엇보다도 우아하고 안정된 외형을 지니고 있다는 점이며 그 소리도 매우 은은하고 맑다.⁽⁴⁾ 한국 범종의 구조와 각부의 명칭을 참고문헌^{(4),(5)}의 내용을 바탕으로 정리하면 다음과 같다.

가. 용뉴

용의 모습을 형상화한 고리로, 범종의 가장 윗부분인데, 이곳에 쇠줄을 연결하여 종을 매단다.

나. 음관

용뉴와 더불어 종의 가장 윗부분에 위치한 소리통으로서 용통 또는 음통이라고 한다. 이것은 다른 나라의 종에서 찾기 힘든 한국 종만의 특징이다. 이것은 종의 소리를 맑게 하는 역할과 여음이 끊이지 않고 이어지게 하려는 장치로 보인다. 그 형태는 대나무 모양인데 신라시대의 만파식적 설화를 그 근원으로 얘기하기도 한다.

다. 천판

종정, 종의 상단에 위치해서 용뉴와 음관이 붙어 있는 부분으로, 신라시대와 고려시대의 종에서는 주위로 연꽃 무늬가 둘러쳐져 있는데, 역시 조선시대에 와서는 그 자취를 찾을 수 없다.

라. 상대, 하대

종의 천판 아래로 몸통을 따라 두른 무늬띠를 얘기한다. 종의 제일 하단부에 둘러진 하대와 함께 새겨진 문양은 시대별로 차이가 있다.

마. 유곽, 유두

종의 상단부 상대 바로 밑에 사방으로 자리 잡고 있는 네 군데의 테두리를 말한다.

유곽의 내부에는 9개씩 자리 잡고 있는 돌기모양의 유두가 있으며, 이 유곽과 유두 역시 한국 종의 특징 중 하나이다.

바. 비천상

종의 몸체에 양각된 문양으로 시대의 변화에 따라 그 모습에 변화가 보인다. 신라의 종에서는 비천상이, 고려의 종에서는 앉아 있는 불상과 보살상이, 조선의 종에서는 서 있는 보살상으로 변해온다.

사. 당좌

종의 모체에 있는 종을 치는 부위인 당좌는 신라시대에는 양쪽 2곳에 고려시대에는 사방의 4곳에 배치되어 있다.

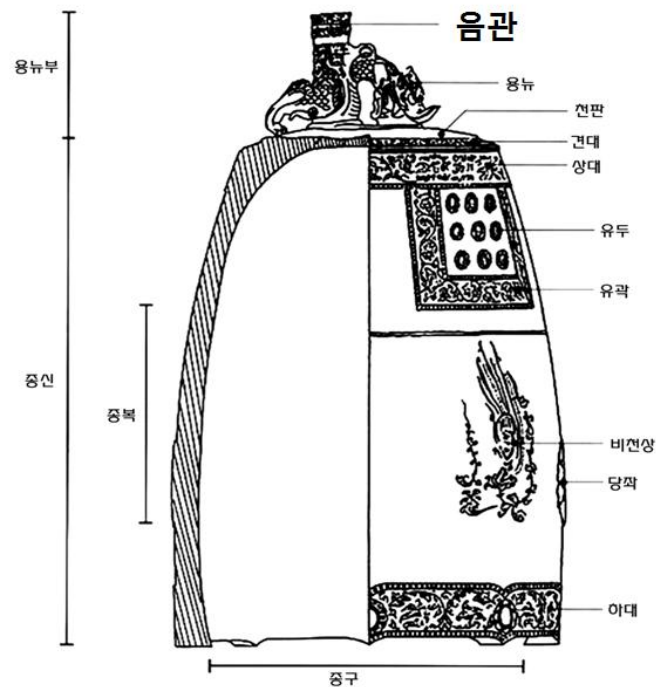


그림 6. 한국 종의 구조와 각 부위의 명칭

2) 한국 종과 외국 종의 차이

우리나라의 범종은 중국 종이나 일본 종과는 다른 독특한 요소들로 주목받고 있다. 진천 종박물관의 기록⁽⁵⁾에 따르면 우리나라에서 범종은 삼국시대 불교의 전래 이후 제작, 사용되었다고 여겨지나 현재 남아 있는 것은 통일신라 8세기 이후에 만

들어진 범종뿐이다. 그러나 『삼국유사(三國遺事)』의 기록에 따르면 6세기 후반 경부터는 이미 범종이 사용되었으리라 추정된다. 이후 통일신라시대를 거쳐서 고려시대까지 한국 종은 발전과 변형의 시대를 거친다. 그러나 조선시대에 와서는 사대주의에 밀려서 중국종의 양식과 결합되어 음관이 없어지면서 한 마리의 용뉴는 쌍룡으로 바뀌는 등, 한국 종의 특징들이 사라지기 시작한다.⁽⁵⁾

종을 분류해보면 동양종과 서양종으로 구분된다. 서양종은 나팔꽃을 거꾸로 한 형상을 하고 있는 교회종을 말하며 동양종은 불교의 사찰에서 사용하는 범종을 말한다. 동양종은 동양의 불교 문화권에 따라서 특징적인 범종을 갖게 되어 한국 종, 중국종, 일본종 및 동남아종으로 분류된다. 이 중에서 한국, 중국 및 일본의 대표적인 종들을 비교해 보면 그림 7과 같으며 이 종들이 갖는 구조적인 특징들을 정리하면 표 1과 같다. 표 1에서 보는 바와 같이 한국 종에서 관찰되는 맥놀이, 한국 종과 외국종을 구분할 수 있는 중요한 기준이 된다.



가. 한국 종 나. 일본종 다. 중국종

그림 7. 한국 종과 외국종의 형태 비교⁽⁶⁾

표 1. 한국 종과 외국종의 구조적 특징의 비교⁽⁶⁾

	한국종	일본종	중국종
음관	○	X	X
울림통	○	X	있는 것도 있으나 사각형 모양
맥놀이	○	X	X
하대	안으로 오므라짐	컵 모양으로 내려옴	틀립형으로 벌어짐
유두	3단 3열	4단 7열	
문양양식	비천상, 상·하대, 유곽등 예술성 뛰어남	문양이 단순 (선 등으로 구성)	문양이 단순
용뉴	한 마리의 용	쌍 두의 용	

나. 탐구과제 2: 한국 종의 표준 모형

한국 종중에서 가장 작은 종은 고려시대에 제작된 '무인'명청동소종 ('戊寅'銘靑銅小鐘)으로서 종 몸체의 크기는 25cm이고 반면 가장 큰 종은 통일신라시대에 제작된 성덕대왕 신종으로서 몸체의 크기가 3m이다. 이 두 한국 종들의 형태를 비교해보면 크기는 다르지만 각각의 비율은 그림 3에서 보는 것처럼 서로 유사한 것을 볼 수 있다. 따라서 한국 종의 구조적 특징인 음관을 갖는 종들을 대상으로 데이터를 수집하고 구조를 분석해서 한국 종의 고유한 구조적 비율을 분석해 보고자 한다.

현재 국내에 존재하는 범종은 국보 및 보물 23건 30점을 포함하여 총 69건 76점이 지정되어 있다. 문화재청은 역사적, 학문적, 예술적으로 보존가치가 높은 범종에 대해 불의의 재난에 의한 원형 훼손 사태에 대비하고자, 범종의 체계적인 연구 활동을 지원하고자 필요한 데이터를 규정하고 데이터베이스를 구축하고 있다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 문화재청에 수록된 데이터를 참조하고 누락된 데이터에 대해서는 직접 한국 종이 있는 사찰 또는 박물관을 방문해서 종에 대한 자료를 수집하였다. 총 15구의 한국 종에 대해서 종 몸체, 음관과 입지름의 길이들을 조사하였다. 대부분의 종들이 몸체 길이와 입지름의 길이는 잘 정리되어 있었으나 음관의 길이는 자료로 정리되어 있지 않았다. 그래서 가장 오래된 오대산 상원사 동종 등을 포함해서 11구의 한국 종들은 직접 사찰을 방문해서 형상을 계측하였다. 반면 성덕대왕 신종, 용주사 범종, 천흥사 동종 및 '무인' 명청동소종외 총 4구의 종들은 자료조사를 통해서 치수를 알 수 있었다. 조사된 종들의 치수는 표 2에 정리하였다.

표 2. 표준 모형 연구를 위해 조사된 한국 종

Unit: cm

번호	종 이름	총길이	몸체	종 입구	음관
1	성덕대왕신종(聖德大王神鍾)	362.9	300.8	219.9	62.1
2	상원사동종(上院寺銅鍾)	168.0	136.5	89.0	31.5
3	용주사범종(龍珠寺梵鍾)	144.7	115.2	88.1	29.5
4	성거산천흥사동종(聖居山天興寺銅鍾)	168.7	128.3	95.0	40.4
5	탑산사동종(塔山寺銅鍾)	78.0	60.9	42.0	17.1
6	내소사고려동종(來蘇寺高麗銅鍾)	104.8	85.2	67.2	19.7
7	여주출토'청녕4년명'동종(□州出土'淸寧四年銘'銅鍾)	84.0	65.6	55.0	18.4
8	청주운천동출토동종(淸州雲泉洞出土銅鍾)	78.0	63.4	47.0	14.6
9	오어사동종(吾魚寺銅鍾)	92.0	71.9	49.0	20.1
10	'무인'명청동소종('戊寅'銘靑銅小鐘)	25.0	19.7	15.0	5.3
11	삼선암고려동종(三仙庵高麗銅鍾)	64.0	46.0	37.0	18.0
12	합천해인사소장동제소종(陜川海印寺所藏銅製小鍾)	30.0	22.5	21.0	7.5
13	곡성 태안사 동종	96.5	79.9	66.0	16.6
14	안동 광흥사 동종	60.0	45.0	39.4	15.0
15	전북 부안 개암사 동종	89.0	75.1	55.6	13.9

또한, 몸체 길이(x)와 입지름(z)의 관계를 알아보기 위해서 1차식 관계를 구해보면 다음과 같으며 R^2 는 0.9911이다.

$$z = 0.7117x + 3.3056 \quad (\text{단위: cm}) \quad (\text{식 1})$$

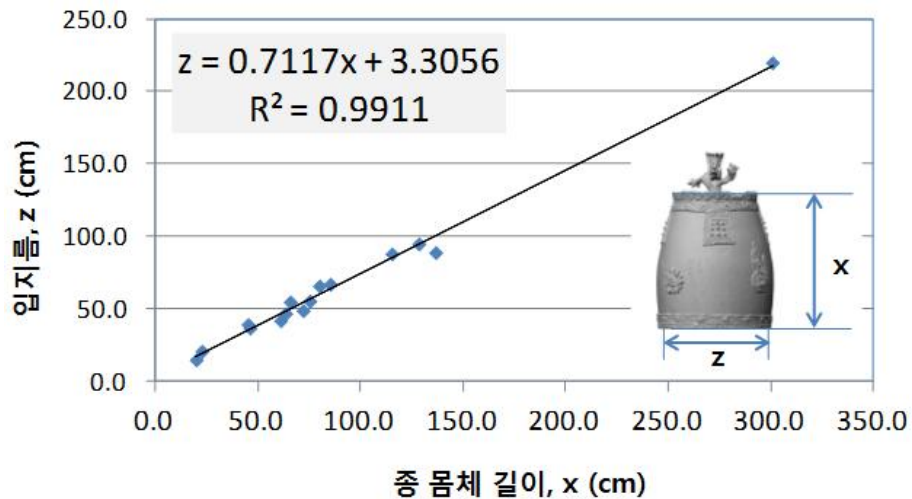


그림 8. 한국 종 몸체(x)와 입지름(z)의 관계에 대한 도수분포 및 일차 근사식

한국 종의 입지름은 그림 8에서 보는 바와 같이 약 200 mm부터 약 2200 mm까지 다양하다. 이 연구에서는 그림 9에 정리한 것처럼 도수가 가장 많은 입지름 500 mm~800 mm의 한국 종을 표현할 수 있는 20인치(508 mm)의 자전거 림을 이용해서 한국 종의 맥놀이 주기를 재현하는 방법을 알아보려고 한다. 이어서 그 연구 결과를 바탕으로 성덕대왕 신종(입지름: 2190 mm, 종 몸체: 3008 mm)의 맥놀이를 재현할 수 있는 방법을 폐 자전거 림을 활용해서 찾고자 한다.

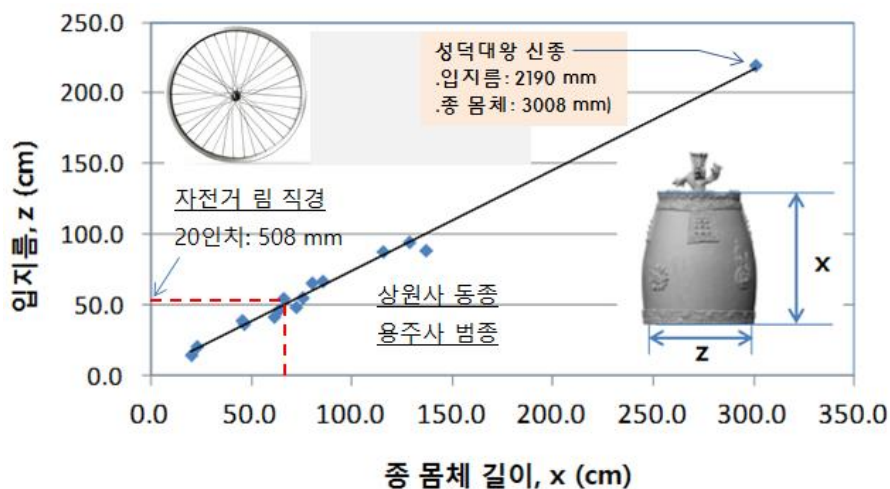


그림 9. 20인치 자전거 림과 한국 종의 비교

다. 탐구과제 3. 자전거 림의 맥놀이 주파수

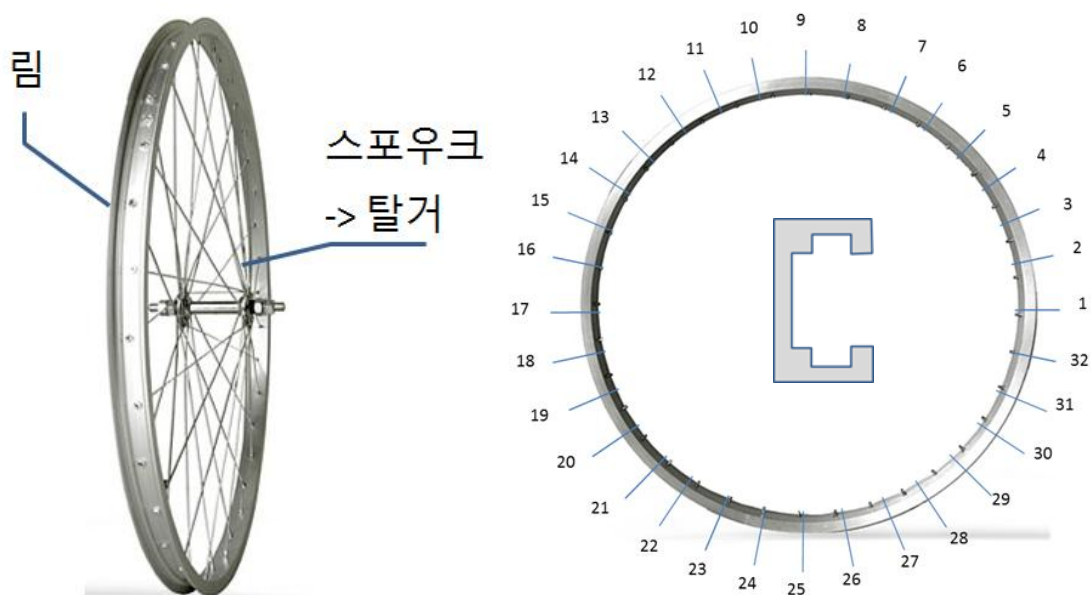
폐 자전거로부터 수거한 직경이 16인치(406 mm), 18인치(457 mm), 20인치(508mm) 및 22인치(558mm)의 자전거 림을 이용해서 자전거 림의 크기와 주파수간의 관계를 알아보고 성덕대왕 신종의 맥놀이를 재현을 위한 조건중 하나인 림의 크기를 검토하고자 한다.

1) 연구 재료

가) 자전거 림: 연구에 사용된 자전거 림은 알루미늄 재질로 직경이 508 mm (20인치)로 사용중이던 폐자전거로부터 탈거하여 사용하였으며 형상은 그림 8과 같고 무게는 374.5 g이다. 또한, 림의 크기 효과를 파악하기 위해서 폐자전거로부터 수거한 16인치(406 mm), 18인치(457 mm) 및 22인치(558mm)의 자전거 림도 조사하였다.

나) 진동 가속도계: 현재 판매되는 가속도계중 가장 작은 단축 방향 측정용 가속도계이고 주파수 응답은 50 Hz ~ 10 kHz이다.

다) 진동 분석 프로그램: 자전거 림의 진동을 분석하기 위해서 National Instrument 사의 프로그램⁽⁸⁾을 사용하였다.



(가) 자전거에서 탈거한 후의 형상 (나) 스포우크 제거후 계측점 및 단면 모양

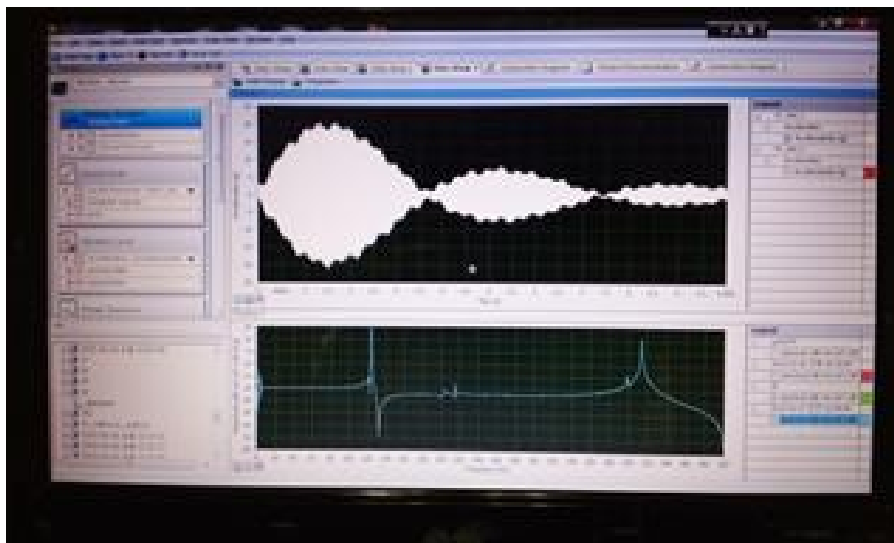
그림 10. 자전거 림 (직경: 508 mm, 20인치)

2) 실험 방법

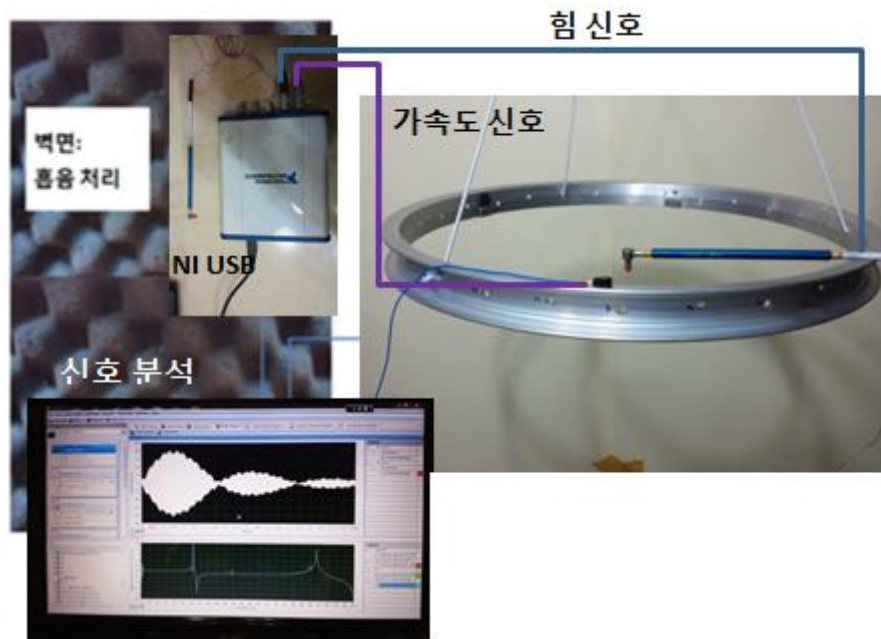
- 가) 진동을 측정할 림, 가속도계, 신호수집 USB 및 컴퓨터를 그림 11과 같이 설치하였다.
- 나) 림은 그림 10. 나에서와 같이 11.25 도 간격으로 원주상에 계측점을 표기한 후, 그림 11에서와 같이 고무줄을 이용해서 연결하였다.
- 다) 임팩트 햄머로 N1 ~ N9 등 몇 개의 점들을 가진하고 가속도를 계측하여 진동 신호를 계측하여 맥놀이의 형태를 관찰하였다.
- 라) 첫 번째 및 두 번째 주파수 쌍의 주파수가 어떻게 위치하고 있는지 확인하였다.
- 마) 계측된 데이터는 National Instrument 사의 프로그램을 이용해서 분석하였다.



(가) 가속도계와 충격 망치



(나) NI 소프트웨어를 이용한 계측 신호 처리



(다) 시험장치 구성



(라) 면외 방향 진동 측정 장면

그림 11. 자전거 림의 진동 측정

3) 연구 결과

가) 20인치 자전거 림의 맥놀이 주파수

20인치 자전거 림의 면외 진동과 면내 진동의 주파수 쌍에 대한 결과를 보면 면외 진동이 면내 진동보다 주파수 값이 낮은 것을 볼 수 있다. 1번부터 9번까지의 각각의 위치에서 측정된 주파수 응답함수를 보면 면외 진동의 경우, 첫 번째 주파수는 125 Hz 근처에 위치한다. 확대해서 분석해 보면 주파수 쌍중 fo1은 124.8 Hz이고 fo2는 127.3 Hz이다. 맥놀이 주파수는 주파수 차이, 2.5 Hz이며 맥놀이 주기는 0.4 초가 된다. 또한, 면내 진동의 경우, 주파수 차이는 6.9초였으며 맥놀이 주기는 0.14 초였다.

표 3. 16인치, 18인치, 20인치 및 22인치 자전거 림의 진동 특성과 성덕대왕 신종의 비교

직경		면외 진동 주파수쌍 fo (Hz)		면내 진동 주파수쌍 fi (Hz)		1차주파수 평균 (Hz)		주파수 차이1) (Hz)		맥놀이 주기2) (초)	
인치	mm	fo1	fo2	fi1	fi2	fo	fi	dfo	dfi	To	Ti
16	406.4	214.2	221.5	332.2	374.8	217.9	374.8	7.3	42.6	0.14	0.02
18	457.2	165.3	172.5	263.0	275.0	168.9	275.0	7.2	12.0	0.14	0.08
20	508.0	124.8	127.3	208.5	215.4	126.1	215.4	2.5	6.9	0.40	0.14
22	558.8	96.6	99.8	170.0	180.0	98.2	180.0	3.2	10.0	0.31	0.10

성덕대왕 신종 입지름 2190mm	64.07	64.42	64.4	0.35	2.86
--------------------------	-------	-------	------	------	------

1) 식 2 참조, $dfo = fo1 - fo2$, $dfi = fi1 - fi2$

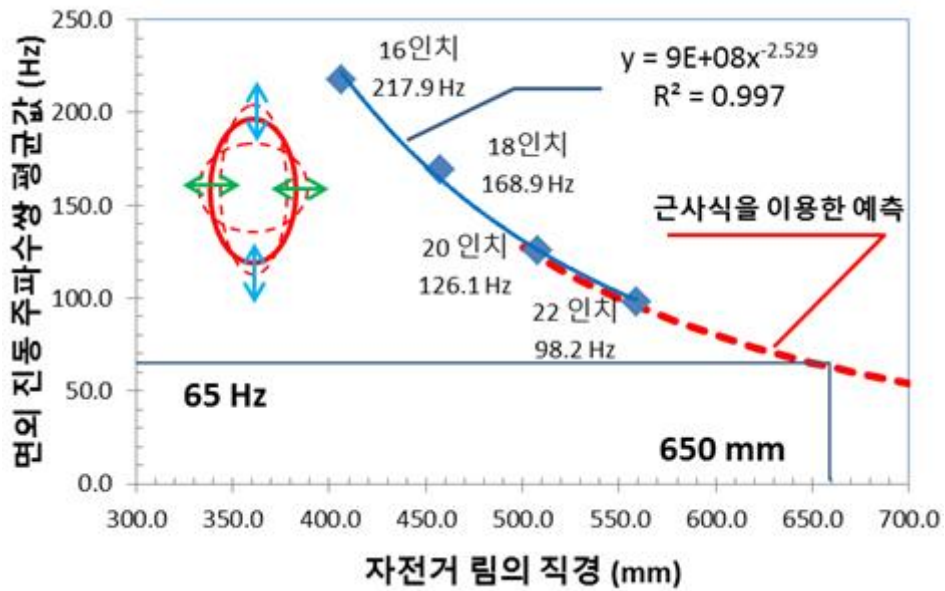
2) 식 3 참조, $Tbo = 1 / dfo$, $Tbi = 1 / dfi$

나) 자전거 림의 크기와 주파수간의 관계

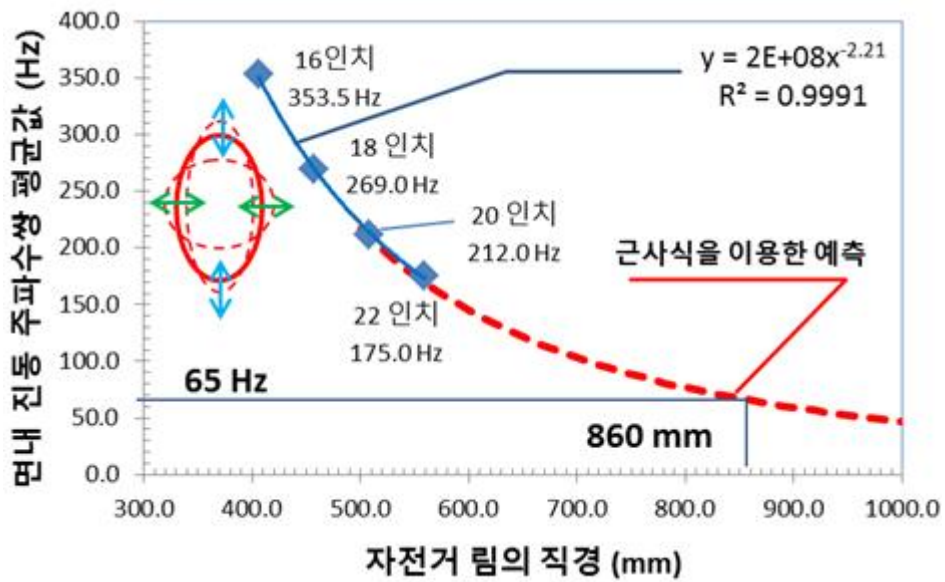
그림 10에서 보는 것처럼 측정된 값들을 이용해서 첫 번째 주파수쌍의 면외진동 평균 주파수 fo와 면외진동 평균 주파수 fi의 근사식을 MSC/EXCEL이 제공하는 거듭제곱 함수를 이용해서 구하였다. 그 결과를 보면 면외 진동을 이용하면 약 650mm의 직경을 갖는 자전거 림이 성덕대왕 신종의 1차 맥놀이 주파수인 65Hz를 재현할 수 있다고 예측된다.

이 연구에서는 20인치(508 mm)의 자전거 림을 이용해서 한국 종의 맥놀이 주기

를 재현하는 방법을 개발하고 직경이 약 650 mm인 폐자전거의 림을 구해서 성덕 대왕 신종의 주파수 및 맥놀이 주기를 재현하고자 한다.



(가) 첫 번째 면외 진동 주파수쌍의 평균 주파수



(나) 첫 번째 면내 진동 주파수쌍의 평균 주파수

그림 12. 자전거 림의 직경과 진동 주파수의 관계

라. 탐구과제 4. 자전거 림의 맥놀이 지도

탐구과제 4에서는 20 인치 자전거 림의 첫 번째 면외진동 주파수 쌍에 대한 맥놀이 지도를 제작한다.

1) 연구 재료

자전거 림, 진동 가속도계 및 진동 분석 프로그램: 탐구과제 3의 조건을 그대로 이용하였다.

2) 실험 방법

계측방법은 탐구 3과 동일하며 계측된 데이터 중에서 진동전달함수와 시간 데이터를 함께 정리하였다.

3) 연구 결과

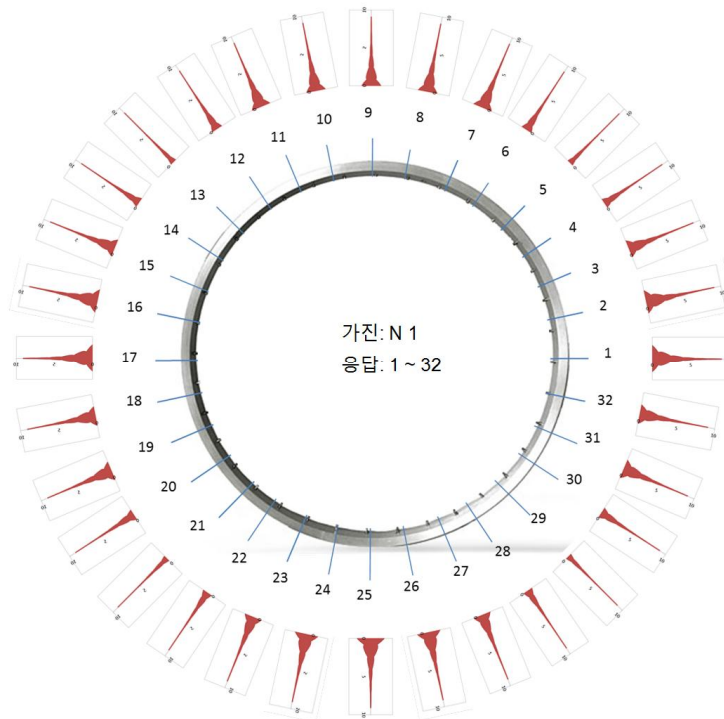
가) 맥놀이 지도

자전거 림은 주파수 분석에서 알 수 있듯이 첫 번째 주파수 쌍의 주파수 차와 두 번째 주파수 쌍의 주파수 차는 각각 2.5 Hz와 7.7 Hz였다. 1 번 점을 가진하고 11.25도 간격으로 원주상에 분포된 점들의 진동 데이터를 계측한 후, 첫 번째 주파수 쌍과 두 번째 주파수 쌍에 대한 맥놀이 지도를 만들면 그림 13과 같다. 주파수 차는 각각 2.5 Hz와 7.7 Hz에 대응되는 맥놀이 주기는 각각 0.4초와 0.14초인 것을 확인하였다.

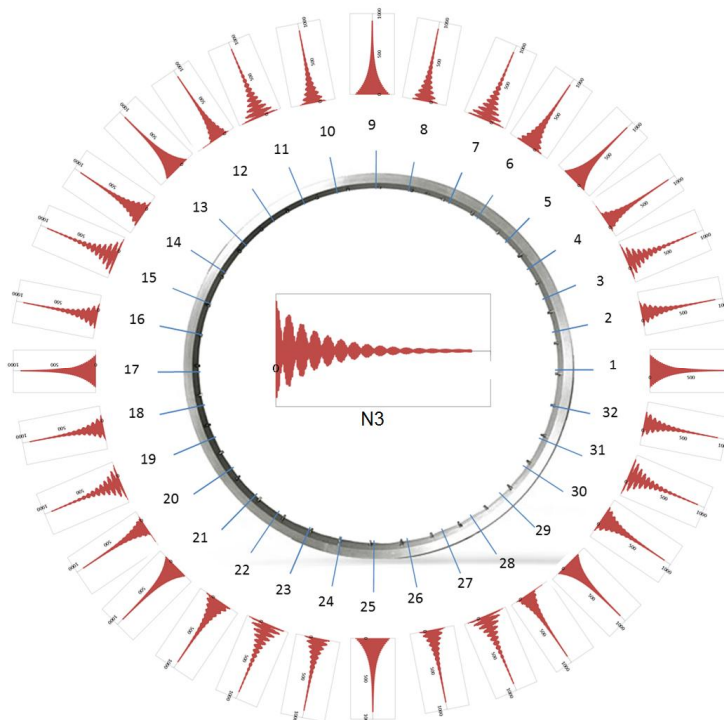
나) 가격 위치에 따른 맥놀이 지도의 차이

그림 13에서 보는 것과 같이 N1을 가격해서 구한 맥놀이 지도와 N3을 가격해서 구한 맥놀이 지도는 많은 차이를 보였다. N1을 가진하면 맥놀이가 보이지 않았다. 그러나 N3을 가격하면 맥놀이가 선명하게 보였다. 이것은 림이 원형 구조이며 원형구조가 갖는 진동의 특징 때문인데 N1은 원형 구조의 진동이 가장 크게 발생되는 위치이며 주파수 쌍(f_{11} , f_{12})에 대한 진동중 첫 번째 또는 두 번째 주파수에 대응되는 진동이 상대적으로 크게 나타나기 때문이다. 따라서 하나의 진동 신호만을 표현하므로 맥놀이가 선명하게 보이지 않는다. 반면 N3은 주파수 쌍(f_{11} , f_{12})에 대한 진동, 즉 첫 번째와 두 번째 주파수에 대응되는 진동을 균등하게 발생시킬 수 있는 위치이다.

이론적 배경에서 배점은 원형 구조내 진동이 가장 큰 위치이며 당점은 두 주파수 쌍을 균형있게 가진할 수 있는 위치로 정의하였다. 자전거 림의 맥놀이 지도를 검토해 보면 첫 번째 주파수 쌍에 대한 배점은 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29로서 45도 간격으로 원주상에 분포하고 있다. 또한, 당점은 3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31로서 배점과 약 11.25도 간격을 두고 원주상에 분포하고 있다. 배점과 당점의 위치를 정리하면 그림 14. 가와 같고 배점과 당점의 위치로부터 진동 모양을 찾으면 그림 14.나와 같다.

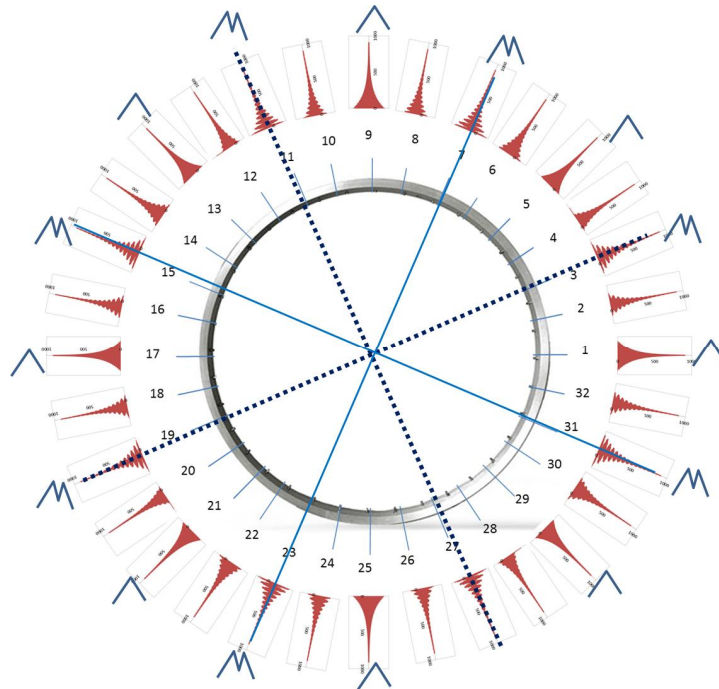


가. N 1 가진

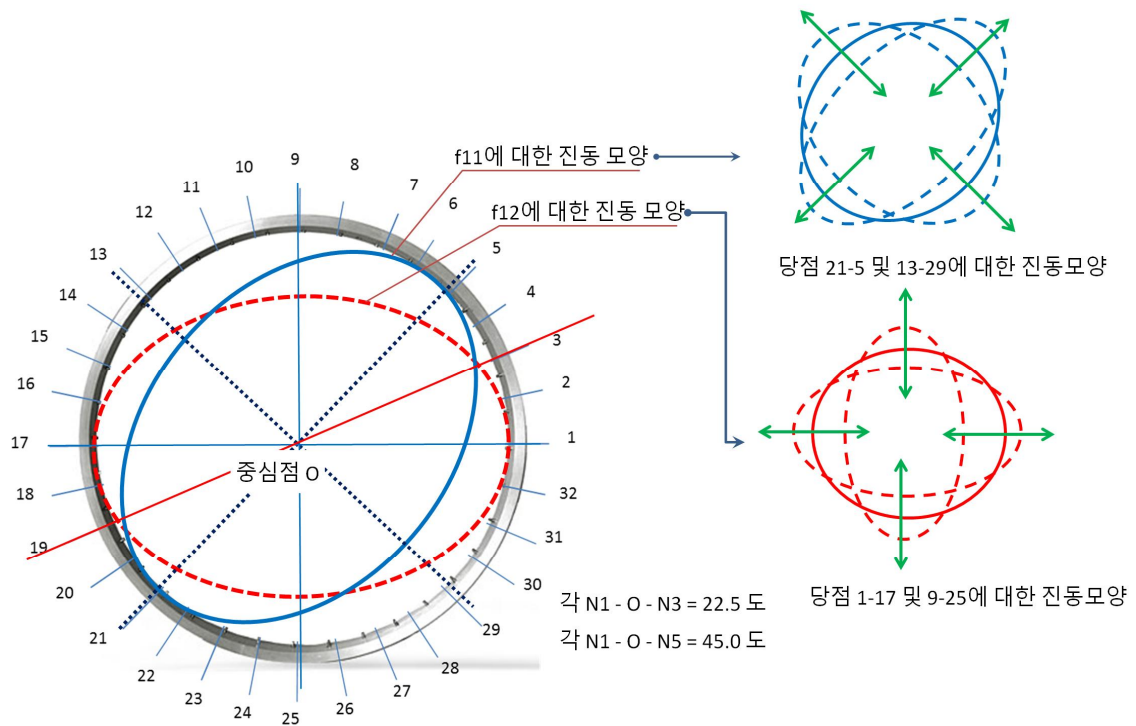


나. N 3 가진

그림 13. 20인치 자전거 림의 첫 번째 면외진동 주파수 쌍에 대한 맥놀이 지도
(배점: 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 당점: 3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31)



가. 배점(Λ)과 당점(M)의 위치



나. 첫 번째 주파수 쌍(f11, f12)의 진동 모양

그림 14. 맥놀이 지도로부터 진동모양과 배점 및 당점을 구하는 방법

마. 탐구과제 5. 자전거 림의 맥놀이 주기의 조정

1) 연구 재료

- 가) 직경이 508mm인 20인치 자전거 림을 사용하였으며 진동 가속도계 및 진동 분석 프로그램은 탐구과제 3의 조건을 그대로 이용하였다.
- 나) 부가질량: 0.5g, 1g, 2g, 3g, 4g, 5g의 납 질량과 2g의 원형 자석 질량을 사용하였다.

2) 실험 방법

수행된 총 36회의 실험중 중요한 결과를 보여주는 3회의 시험만 정리하면 다음과 같다.

- 가) Case 1: 질량 8.0g을 각각 배점 N29와 N13에 부착.
- 나) Case 2: 질량 8.4g을 각각 배점 N29와 N13에 부착.
- 다) Case 3: 질량 8.3g을 각각 배점 N29와 N13에 부착.

3) 연구 결과

가) 맥놀이 주기

맥놀이 주기 조정 과정 및 결과는 표 4와 같다. Case 3을 보면 맥놀이 주기가 2.83 로써 성덕대왕 신종의 주기에 거의 근접한 것을 알 수 있다.



가. 1g의 자체 제작한 납 질량과 5g의 납 질량 부착 레



나. 2g의 자석 질량과 5g의 납 질량 부착 레

그림 15. 배점에 질량을 부착한 예

표 4. 질량을 이용한 20인치 자전거 림의 맥놀이 주기 조정

조건	질량 부가	1차 주파수 쌍 (Hz)		주파수 차 (Hz)	맥놀이 주기 (초)
		f11	f12		
부가 질량 없을 때	0g	124.8	127.3	2.5	0.4
Case 1	8g	124.82	125.74	0.92	1.09
Case 2	8.4g	124.82	125.21	0.40	2.52
Case 3	8.3g	124.82	125.17	0.35	2.83
성덕대왕 신종	2227	64.07	64.42	0.35	2.85

나) 맥놀이 지도를 이용한 당점의 위치 확인

전자 한국 중을 제작하기 위해서는 당점의 위치를 정확히 결정해야 한다. 맥놀이 주기를 조정하면서 질량을 부착하였으므로 당점의 위치가 변했을 것이다. 맥놀이 주기를 조정한 후, 새롭게 맥놀이 지도를 작성해서 당점의 위치를 확인한 후, 당점의 위치를 옮겨서 맥놀이 지도를 작성하면 그림 16과 같다.

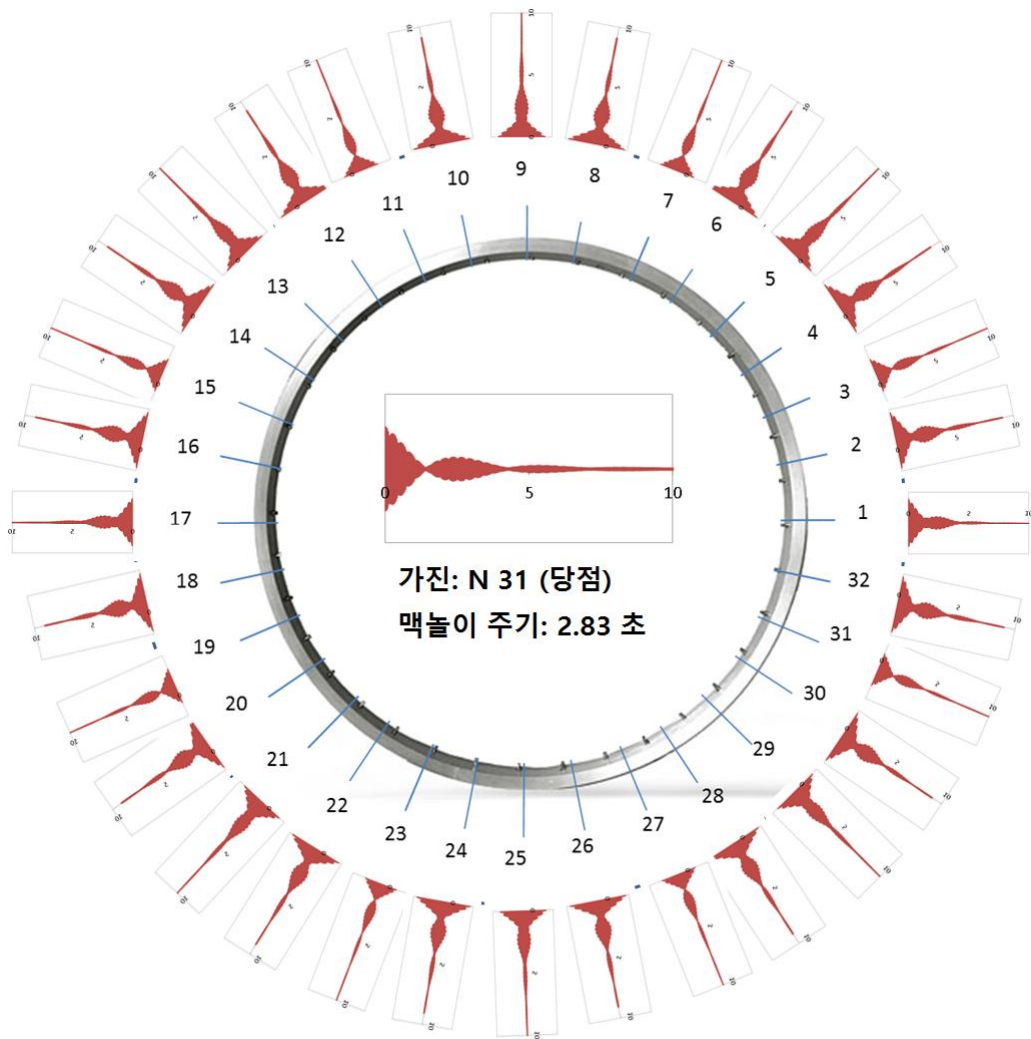


그림 16. 성덕대왕 신종의 맥놀이 주기(2.86초, 표 3 참조)를 갖는 자전거 림의 맥놀이 지도

바. 탐구과제 6. 성덕대왕 신종의 진동 주파수와 맥놀이 주기의 재현

1) 연구 재료

성덕대왕 신종의 첫 번째 진동 주파수와 맥놀이 주기를 재현할 수 있는 자전거 림은 직경이 650 mm이라고 탐구과제 3에서 예측하였으며 그림 12에 설명하였다. 자전거 림이 커서 구하기 어려웠으나 여러분의 협조를 통해서 직경이 660mm인 자전거 림을 구할 수 있었다.

2) 실험 방법

직경이 660 mm인 자전거 림에 대해서 탐구과제 3의 조건을 이용하여 분석하였다.

3) 연구 결과

첫 번째 진동 주파수 쌍의 주파수는 표 4와 그림 17에 설명하였다. 직경이 660 mm인 림을 구해서 검증해 보면 1차 진동 주파수가 68Hz로써 예측된 65Hz보다 3Hz가 높으나 오차율 4.6%로써 잘 예측되고 검증되었다고 평가할 수 있다.

또한, 탐구과제 5에서 개발한 맥놀이 주기 조정 방법을 적용해서 주파수를 조정하였으며 최종적으로 2.5Hz ~ 3.0의 맥놀이 주기를 갖도록 조정하였다. 실제 실험을 통해서 종소리의 느낌을 평가하였으며 성덕대왕 신종의 인터넷 음원과도 비교하였다. 종소리의 느낌은 다음 장에서 설명할 전자한국종의 설치 방법을 적용해서 소리를 만들어 내고 평가하였다.

표 5. 성덕대왕 신종의 1차 진동 주파수를 갖는 자전거 림(직경 660mm)의 검증

		직경 (mm)	1차 진동 주파수쌍 의 주파수 fo (Hz)		주파수 평균 (Hz)	주파수 차이1) (Hz)	맥놀이 주기2) (초)	비고
			fo1	fo2	fo	dfo	Tbo	
자 전 거 림	예측	650.0			65.3			예측방법: 탐구과제3 참조
	검증	660.0	67.5	69.5	68.5	2.0	0.50	
	조정		67.2	67.56	67.38	0.36	2.78	주파수조정방법: 탐구과제5 참조
성덕대왕 신종		2227.0	64.07	64.42	64.4	0.35	2.86	

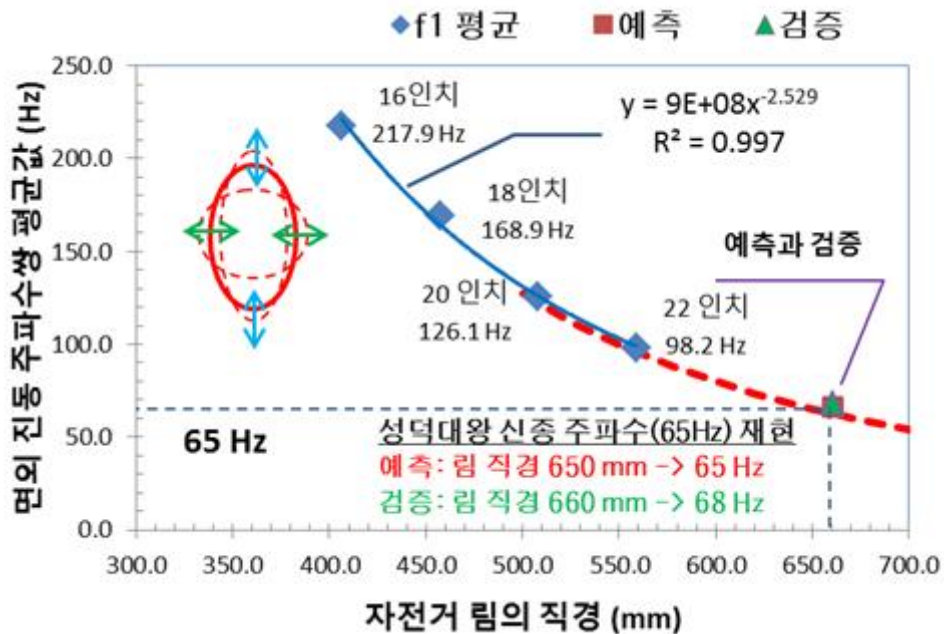


그림 17. 성덕대왕 신종의 1차 진동 주파수를 갖는 자전거 림(직경 660mm)의 검증

사. 탐구과제 7. 전자 한국 종의 설계

이 연구는 전자 한국 종을 제작하기 위한 기술을 개발하기 위해서 연구되었다. 이를 위해서는 선명한 맥놀이를 만들어내는 가진점 및 진동 신호를 수집하는 위치 그리고 수집점을 선정하는 것이 매우 중요하다.

개발된 방법은 어려운 진동학에 대한 지식이 없어도 선명한 맥놀이를 쉽게 만들 수 있는 방법으로써 일반인들도 전자 한국 종을 제작하고 은은한 맥놀이의 소리를 즐길 수 있도록 하기 위함이다. 또한, 한국 종을 제작하는 전문 제작자들로 제작 과정에서 종 소리를 조정하기 위해서 참조할 수 있는 방법이다.

- 단계 1. 원주방향으로 0도에서 90도까지 가진점과 응답점을 동일하게 해서 진동 신호를 계측한다.
- 단계 2. 진동 신호중 맥놀이가 선명하게 발생하는 점을 찾으면 그 점은 당점이므로 가진점으로 선정한다. 0도에서 90도 사이에 당점은 첫 번째 주파수 쌍에 대해서 최대 3개 또는 최소 2개 존재하며 45도의 간격을 가지므로 당점을 최소 두 개만 찾으면 다른 모든 당점들도 계측하지 않고 구할 수 있다.
- 단계 3. 맥놀이 주기를 계산해서 2.5 초 미만이면 탐구 과제 4에서 진행한 순서대로 배점에 질량을 부착하면서 맥놀이 주기의 변화를 관찰한다. 맥놀이 주기가 2.5초 이상이 되면 맥놀이 주기 조정 작업을 마치고 맥놀이 지도를 작성한다.
- 단계 4. 맥놀이 지도를 분석해서 배점과 당점을 찾는다.
.첫번째 주파수 쌍에 대한 당점은 첫번째 주파수 쌍의 맥놀이를 가장 잘 가진하는 점으로서 재질 및 형상이 균일하다는 가정하에서 주파수 쌍에 대한 배점의 사이에 위치하며 22.5도로 분할하는 원주상의 점이다.
- 단계 5. 주파수 쌍에 대응하는 배점들을 찾은 후, 가진점과 계측점을 정한다.
맥놀이 지도를 참고해서 맥놀이의 선명도가 높은 배점을 가진하고 대응하는 배점에서 신호를 pick up한다.

전자 한국 종의 구조는 그림 17에 주어져 있다. 제안된 아이디어에서 림은 종체에 장착된 세 개의 기둥에 유연한 고무줄로 매달려 있는 구조이다. 향후 종체를 아크릴 또는 크리스탈로 제작하고 종을 가진할 때마다 광섬유에 전류를 흘려주어 보다 멋진 상품을 제작할 계획이다.



가. 회로도



나. 림의 장착 방법

그림 18. 전자 한국 종의 회로도 및 림의 장착 방법

4. 연구 결과

선조들께서 종을 제작하면서 어떤 고민을 하셨을까? 당연히 힘이 있으면서 여운이 오래가고 그러면서도 맑고 고운 소리를 얻으려고 노력하셨을 것이다. 힘 있는 소리는 명동을 이용해서 구하셨고 맑고 고운 소리는 음관을 통해 얻으셨다. 마지막은 오랜 여운과 멀리 퍼지는 소리 즉, 맥놀이였을 것이다. 맥놀이를 재현하는 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

가. 한국 종과 외국종의 차이를 알아보았다.

- 한국의 범종은 학명으로까지 “한국 종(Korean Bell)”이라고 불릴 만큼 독자적인 양식을 지니고 있다. 한국 종의 특징은 무엇보다도 우아하고 안정된 외형을 지니고 있다는 점이며 그 소리도 매우 은은하고 맑다. 한국 종과 외국 종을 비교해본 결과, 한국 종에서 관찰되는 맥놀이는 한국 종과 외국종을 구분할 수 있는 중요한 기준이 된다

나. 한국 종의 형상을 조사하여 한국 종 표준 모형을 알아보았다.

- 문화재청에 수록된 데이터를 참조하고 누락된 데이터에 대해서는 직접 한국 종이 있는 사찰 또는 박물관을 방문해서 종에 대한 자료를 수집하였다. 총 15구의 한국 종에 대해서 종 몸체, 음관과 입지름의 길이들을 조사하였다. 대부분의 종들이 몸체 길이와 입지름의 길이는 잘 정리되어 있었으나 일부는 자료로 정리되어 있지 않았다. 그래서 가장 오래된 오대산 상원사 동종 등을 포함해서 11구의 한국 종들은 직접 사찰을 방문해서 형상을 계측하였다.

다. 폐자전거의 림을 활용하여 원형 구조물의 진동 특성을 분석하였다.

- 한국 종 표준모형에 포함되는 자전거 림의 직경을 선정한다.

한국 종의 입지름은 그림 7에서 보는 바와 같이 약 20cm부터 220 cm까지 다양하다. 그 중 입지름 50mm가 도수가 가장 많았다. 이 연구에서는 20인치(508 mm)의 자전거 림을 이용해서 한국 종의 맥놀이 주기를 재현하는 방법을 알아보았다. 동시에 16인치, 18인치 및 22인치의 자전거림을 폐자전거로부터 수거해서 성덕대왕 신종의 1차 진동 주파수를 만들어 낼 수 있는 자전거림의 조건을 찾는 데 사용하였다.

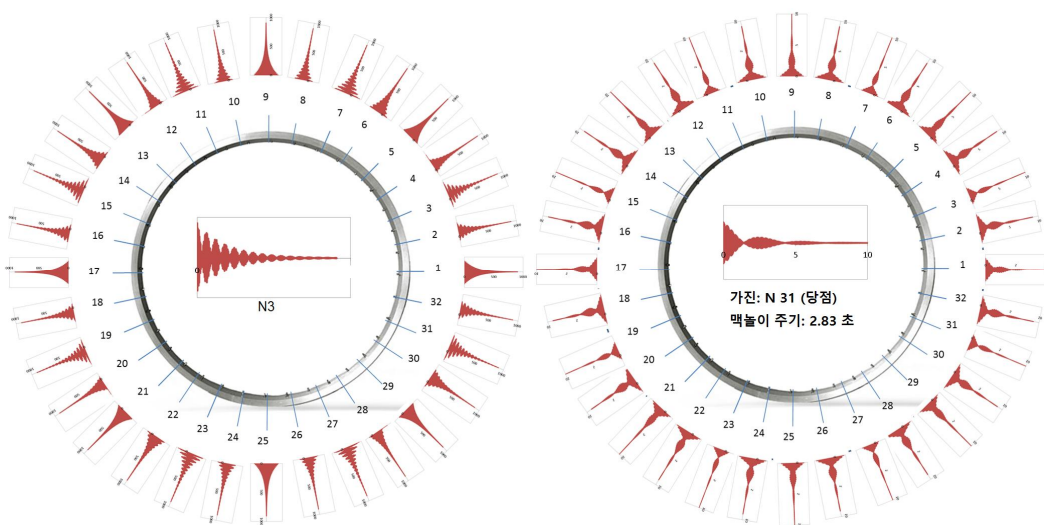
- 자전거 림의 맥놀이 지도를 제작하였고 분석해 보았다. 성덕대왕 신종 그리고 본 연구의 대상인 자전거 림과 같은 원형 구조의 진동 특징을 검토해 보면 주파수 쌍을 갖는다는 것이다. 각각의 주파수 쌍을 구성하는 두 개의 주파수의 차이에 의해서 맥놀이가 발생된다. 맥놀이 지도를 이용해서 구한 진

동 모양을 보면 첫 번째 진동 모양은 45도 회전된 형태로 진동하는 것을 알 수 있었고 두 번째 진동 모양은 30도 회전해서 진동하는 것을 알 수 있었다. 또한, 맥놀이 지도를 분석해 보면 동일한 형태의 신호가 반복해서 발생하는 것을 볼 수 있다. 배점은 원형 구조내 진동이 가장 큰 위치이며, 당점은 두 주파수 쌍을 균형있게 가진할 수 있는 위치이다. 첫 번째 주파수 쌍에 대해서 배점과 당점은 각각 45도의 간격을 두고 원주 상에 분포한다. 그리고 배점과 당점은 22.5도의 각도 차를 두고 위치한다.

- 자전거 림의 직경을 변화시키면서 진동 특성을 분석하고 변하지 않는 물리적 규칙을 찾아보았다. 결론적으로 자전거 림의 크기가 변해도 1차 및 2차 주파수는 일정한 비율을 갖았다. 림의 크기에 따른 1차 주파수와 2차 주파수의 값을 비교해 보면 림의 직경이 커지면 주파수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 주파수의 비율 (2차 주파수 평균 / 1차 주파수 평균)은 직경의 차이와 관계없이 약 4대 1의 비율로 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다.

라. 맥놀이 주기를 조정하는 방법을 개발하였다.

- 진동학에 대한 전문적인 지식이 없어도 맥놀이 주기를 조정할 수 있는 쉬운 방법을 개발하였다. 맥놀이 지도를 이용해서 배점과 당점을 찾고 배점에 질량을 부착해서 맥놀이 주기를 조정한다. 끝으로 당점을 찾아서 그 부분을 가진다. 이와 같이하면 길고 선명한 맥놀이를 감상할 수 있다. 아래의 그림 15의 나는 성덕대왕 신종과 유사한 맥놀이 주기를 갖는 자전거 림의 맥놀이 지도이다.



가. 초기 맥놀이 지도

나. 조정후 맥놀이 지도

그림 19. 자전거 림의 맥놀이 지도 비교

마. 성덕대왕 신종의 1차 진동 주파수와 맥놀이를 갖는 자전거 림의 조건을 예측 및 검증하였다..

- 직경이 660 mm인 림을 구해서 탐구과제 3에서 예측한 조건 즉 "성덕대왕 신종의 1차 진동 주파수, 65Hz를 재현할 수 있는 자전거 림의 직경은 650 mm"을 검증해 보면 1차 진동 주파수가 68Hz로써 예측된 65Hz보다 3Hz가 높으나 오차를 4.6%로써 잘 예측되고 검증되었다고 평가할 수 있다. 또한, 탐구과제 5에서 개발한 맥놀이 주기 조정 방법을 적용해서 주파수를 조정하였으며 최종적으로 2.5Hz ~ 3.0의 맥놀이 주기를 갖도록 조정할 수 있었다.

학교 친구들과 함께 종소리의 느낌을 평가하였으며 성덕대왕 신종의 인터넷 음원과도 비교하였다. 그 결과 개발된 자전거 림을 활용한 맥놀이 소리가 성덕대왕 신종의 소리와 상당히 비슷한 느낌을 주고 있다는 것을 알 수 있었다.

바. 전자 한국 종을 발명하였다.

- 한국 종의 소리를 재현하기 위한 가장 좋은 조건을 연구하였다. 이를 위해서 맥놀이 지도를 이용해서 가진점 즉 당좌의 위치와 신호 수집점 즉 pickup 점의 위치를 결정하는 방법을 연구해 정리하였다.
- 자전거 림, 진동 가속도계를 이용한 pickup 장치로 구성되는 전자 한국 종을 최초로 개발하였다. 특히 림이 종 몸체에 수직으로 장착되는 방식을 사용하고 pickup 장치 및 전기선들을 종 몸체에 설치함으로써 상품으로 개발될 수 있도록 하였다. 최근까지의 특허등록을 검토해 보면 아직 전자 종에 대한 특허 등록이 없다. 특허 출원을 준비할 예정이다.

5. 연구 결론

이 연구는 전자 한국 종을 제작하기 위한 기본 기술을 개발하였다. 이 기술을 개발하는 데 있어서 어려운 점은 “선명한 맥놀이를 만들어내는 당점 및 신호를 수집하는 위치를 어떻게 선정할 수 있을까”에 대한 답이었다. 특히 고민했던 부분은 전문적인 진동학에 대한 지식이 없는 일반인들도 사용할 수 있는 쉬운 방법의 개발이었다. 이를 위해서 이 연구는 배점과 당점을 정의하고 각각의 점을 맥놀이 지도로부터 찾아내는 방법을 알아내었다. 이 발견을 바탕으로 전자 한국 종을 제작하는 방법도 정리하였다.

맥놀이 지도를 이용해서 일차 주파수 쌍의 주파수를 조정하는 과정 중에 수없이

많은 시도를 하였다. 그 과정 중에 깨닫게 된 사실중의 하나는 맥놀이 주기가 매우 민감하게 변한다는 사실이다. 단 1g 만 부착을 했는데도 맥놀이 주기가 5초 이상 변하는 걸 경험하였다. 림의 무게가 360g이므로 1g은 종 무게의 0.3%이다. 0.3%의 무게를 가지고 맥놀이를 살리기도 자칫 죽이기도 한다. 성덕대왕 신종을 제작하신 선조들은 어떻게 이러한 과학적 기술을 아신 것일까? 선조들이 성덕대왕 신종의 맥놀이 주기를 조정할 때 흘리신 땀방울에 깊이 머리를 숙인다.

6. 고찰 및 제언

가. 최초로 전자 한국 종의 설계 방법을 개발하였다. 제안된 장치를 이용해서 실제 소리를 분석해서 성덕대왕 신종의 음색과 비교할 필요가 있다.

나. 향후 계획으로써 림을 이용해서 아리랑을 연주할 수 있는 악기를 개발하고자 한다. 타악기의 경우, 비브라토를 만들어 내지 못하는 문제가 있다. 그런데 한국 종의 맥놀이 원리를 적용하면 타악기의 경우에도 비브라토를 구현할 수 있을 것이다. 따라서 자전거 림을 여러 개 설치하고 음정을 맞출 수 있다면 비브라토를 사용하면서 우리나라의 민요를 연주할 수 있는 새로운 악기가 만들어 질 수 있다.

7. 참고 문헌

1. 김석현, 정원태, 강연준, 성덕대왕신종의 명동과 간극의 공명조건, 한국음향학회지 제30권 제4호 pp. 223~230 (2011).
2. 김양한 외 2인, 성덕 대왕 신종 내부 음장 및 울림통이 신종의 소리에 미치는 영향과 새로운 울림통 크기의 제안, 한국음향학회지 제16권 제5호 pp. 60~67 (1997).
3. 김석현, 이중혁, 등가 종 모델을 이용한 맥놀이 주기 조절법, 한국음향학회지 제31권 제8호 pp. 561~568 (2012).
4. 문명대, 한국 불교미술의 형식, 한국언론자료간행회, 1997년, p180.
5. Jin Cheon Bell Museum, <http://jincheon.go.kr>
6. 한국 종, 일본종, 중국종의 비교, 범종이란?", <http://mi2744.egloos.com/viewer/10676302>
7. 2009 중요동산문화재(범종) 기록화 사업 결과 보고서, 범종 형, 색, 감, 문

화재청 유형문화재과, 2009.

8. National Instruments Corporation, NI Lab VIEW Signal Express.