

도플러 효과에 의한 성덕대왕 신종의 맥놀이 현상에 관한 연구

함명규, 박 원, 장금영, 배명진
숭실대학교 정보통신공학과

On a Study Vibration of the Divine Bell of King Söngdök by Doppler Effect

Myungkyu Ham, Won Park, Keumyoung Jang, Myungjin Bae
Dept. of Telecommunication, Soongsil University
E-mail : mkham@assp.soongsil.ac.kr

요약문

에밀레종은 771년도에 성덕대왕의 공적을 기리기 위해 34년간 주조하여 만든 세계적인 문화유산이다. 외형도 미려하지만 종소리는 천, 지, 인을 뒤흔드는 신비감을 갖추고 있다. 에밀레 종소리는 끊어질 듯 이어지는 소리, 애끓는 소리, 심금을 울리는 소리 등의 특징을 갖는데 끊어질 듯 이어지는 소리는 맥놀이 현상으로 나타난다. 지금까지 맥놀이 현상의 규명에 대한 많은 연구가 있었지만, 그 원인을 실험을 통해 분명히 밝히기는 이번이 처음이다. 여기에는 우리 선조들이 750년경에 이미 진자(흔들이)의 등시성 원리를 알고 있었으며, 도플러 효과도 알고 있었기 때문에 에밀레 종소리에 응용이 가능하였다. 결론적으로 우리는 1228년전에 완성한 우리민족의 지혜와 숨결이 스며있는 에밀레 종소리의 맥놀이 현상을 규명하고 재현함으로써 문화민족의 자부심으로 새로운 세대를 개척해 나아갈 수 있는 원동력을 얻고자 한다.

1. 연구개발 배경

한국 종은 오르라진 주둥이와 두툼한 입술을 가지고 있어서 타종을 하면 안에서 회돌아 치는 현상이 발생한다. 이것은 공기를 밖으로 새나오지 않고 머물게 하여 여운을 보다 길게 유지하는 신비한 구조를 가지고 있기 때문이다. 이러한 한국 종들 중에서도 대표적인 것으로 성덕대왕신종(일명 에밀레종)이 있다.

에밀레 종소리는 복합적인 소리성분들로 이루어져 우리의 심금을 울리는 애끓는 소리가 끊어질 듯 이어지면서 맥놀이 현상을 계속 유지하게 된다. 약 3초마다 반복되는 맥놀이 주기는 인간이 가장 편안한 상

태에서의 호흡하는 간격과도 일치하는 종소리의 신비감이 스며져 있다. 따라서 에밀레 종소리는 첫 타종 시에 나타나는 강렬한 소리에 정신을 집중하고, 이어지는 3초 주기의 반복된 맥놀이로 호흡을 가다듬게 되는 우리 민족의 숨결을 느낄 수 있는 고유의 문화유산이다.

소리 뿐만 아니라 에밀레종의 외형이 미려하고 신비스러운 자태를 포함하고 있기 때문에 이 종을 그대로 재현하고자 하는 노력이 오랫동안 시도되어져 왔다. 특히 2000년을 마감하고 새로운 천년을 준비하는 시점에서 범종의 제작은 많은 사람들의 염원이요 희망을 여는 기원이기도 하다. 그러나 종의 외형은 어느 정도 모방할 수 있지만, 에밀레 종소리는 재현할 수 없었다. 특히 에밀레 종소리에서 들리는 끊어질 듯 이어지는 맥놀이 현상은 그 발생원인이 정확히 규명 되지 못하고 있었다.

2. 에밀레 종소리에 대한 기존 연구결과

2-1. 에밀레종소리의 특성

에밀레종은 성덕대왕의 공적을 기리기 위해 34년 동안 제작한 것으로 771년에 완성한 세계적인 문화유산 중에 하나이다. 외형도 미려하고 웅장하지만 그 종소리도 웅장하면서 섬세하다. 에밀레 종소리는 범종이 갖출 수 있는 3가지의 특성을 모두 갖추고 있다. 종소리는 끊어질 듯 이어지는 맥놀이 현상이 나타나고, 아이가 엄마를 찾는 듯한 애끓는 소리가 들리며, 우리민족의 얼이 스며있는 심금을 울리는 소리가 어우러져 들린다.

2-2. 에밀레 종소리에 대한 연구사례

지금까지 에밀레종의 제조비법이나 종소리의 신비를 밝히려고 많은 노력이 오랫동안 시도되어져 왔으나, 아직까지는 그 실체를 명확히 밝히지 못하고 있을 뿐만 아니라, 학자나 전문가들 중에서는 그 종소리를 재현하기 위해 그 모양과 성분을 분석하는 연구를 계속하고 있다. 일부는 종의 구조를 분석하여 맥놀이 현상을 컴퓨터를 통해 재현하기도 하고, 채집되는 종소리의 특성을 파악하기도 하였다.

1986년 염영하교수(서울대)는 에밀레 종소리에서 나타나는 맥놀이 현상은 종의 미세한 비대칭성 때문이라고 말하였고[1], 1987년 남천우선생은 유물의 재발견이라는 저서에서 맥놀이 현상은 에밀레종 내부에 덧씌운 덧쇠가 맥놀이의 원인이라고 발표하였다[2]. 1996년 T.D. Rossing은 “동서양 종의 음향특성”이라는 논문에서 에밀레종의 타종부위인 당좌가 들출 되어서 맥놀이가 나타난다고 발표하였고[3], 1997년도에 김양한교수(과학원)는 미세한 비대칭성에 기인한다고 하였으며[4], 같은 해에 진용욱교수(경희대)는 에밀레종의 당좌, 바천, 아랫띠들이 동이 비대칭성에 의해 맥놀이 현상이 나타난다고 경주박물관에 보고(1999년 2월)한 바가 있다[3].

그렇지만, 우리민족의 고유한 숨결이 스며있는 에밀레 종소리의 맥놀이 현상에 대한 원인 분석은 아직 명확히 해석되지 않았다.

3. 에밀레 종소리의 재현 연구

먼저 경주박물관에서 판매하고 있는 종소리의 성분분석을 수행하였다. 또한 유홍준의 문화답사기의 자료, KBS의 자료, 과학원의 자료, 김벌래씨의 자료, 사이버성전의 자료 등을 통해 이전의 에밀레 종소리와 지금의 종소리를 비교 분석하였다. 경주박물관에서 93년도에 녹음한 종소리를 성분분석기로 살펴보았을 때, 소리의 바탕은 분명한 에밀레 종소리였으나, 끊어질 듯 이어지는 맥놀이 현상이 두드러지게 나타나지 않고, 마치 정을 치듯이 “딩..”하면서 10여 초 정도 여음이 나오고 있었다. 그런 소리는 왜소한 종소리로서 웬만한 종에서도 쉽게 들을 수 있다. 외형은 깨어질까 봐 93년부터 타종하지 않고 관리를 잘 하고 있는데, 그 소리는 에밀레 종소리라고 믿어지지 않을 정도로 병들어 있었다. 이전의 종소리는 정말 우리의 심금을 울리는 우렁차고 신비스러운 소리였으나 최근의 종소리는 그렇지 못하였다.

성덕대왕신종의 11분의 1로 축소한 에밀레 모형종을 제작하여, 타종실험과 성분분석 실험을 계속 하였다. 이를 통해 1228년 전에 제조한 에밀레 종소리

의 맥놀이 현상을 완전히 규명하고, 재현하는데 성공하였다. 그림 3-1의 파형은 경주박물관에서 판매중인 에밀레 종소리의 파형이며, 시간에 따라 종소리의 여음이 어떻게 나타나는 가를 나타내었다. 그림에서 보면 시간이 진행함에 따라 종소리의 진폭이 단순하게 감소되고 있음을 알 수 있다.

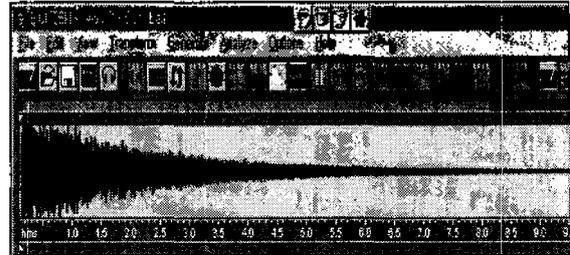


그림 3-1. 경주박물관에서 판매중인 에밀레 종소리의 파형.

4. 에밀레 종소리에서 맥놀이 현상의 규명

종을 타종하면 종의 복잡한 떨림에 의해 고유한 종소리가 난다. 이때 종을 그림 4-1과 같이 매달아 좌우로 흔들게 되면 청취하는 위치에서 맥놀이를 경험하게 된다. 이것은 종소리를 움직일 때 고정위치에서 들을 수 있는 도플러효과(1842년)로 설명할 수도 있고, 맥놀이 주기는 종을 좌우로 흔들는 주기(반복되는 시간)와 동일하다. 에밀레 종소리와 같은 맥놀이 주기를 만들려면 종을 흔들는 주기를 3초정도로 하면 된다.

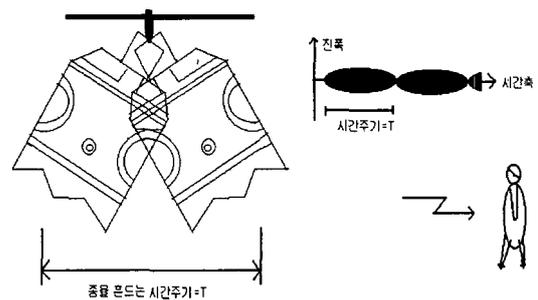


그림 4-1. 종을 흔들어 맥놀이 현상을 재현하는 방법.

에밀레 모형종을 가지고 실제로 맥놀이 현상을 바로 재현하였을 때(컴퓨터처리가 아님)의 파형을 그림 4-2에 나타내었다. 그림 4-2에서는 약 1초간격의 맥놀이현상이 두드러지게 나타나고 있음을 알 수 있다.

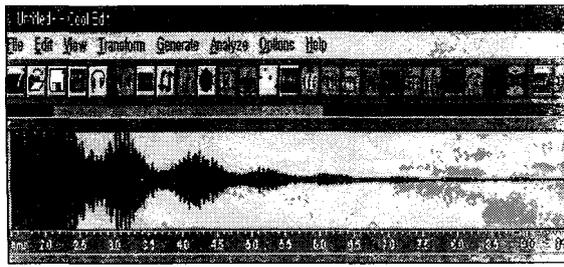


그림 4-2. 맥놀이를 재현한 결과 파형.

그렇다면 에밀레 종소리에서 맥놀이 주기를 거의 3초 정도로 일정하게 유지할 수 있었던 비결은 무엇일까? 그것은 750년경(1300여년전)에 이미 우리의 선조가 진자(振子, 흔들이)운동의 원리를 알고 있었다는 점이다. 그것은 서양에서조차 1500년 말경에야 갈릴레이에 의해 발견된 흔들이의 등시성(等時性)현상으로서, 실에 매달린 추의 흔들이 주기는 추의 무게나 움직이는 진폭에 관계있지않고, 그 길이에만 관계한다는 사실이다.

에밀레종도 진자운동에서처럼 그림 4-3과 같이 한 쪽 끝(용두부분)을 매달아 놓은 구조이고, 종은 타종 부위(당좌)를 중심으로 쇠가 두꺼워서 무게중심이 모여있으므로 당좌위치에 추가 달려 있는 모양으로 단순화할 수 있다. 그리고 실제의 에밀레종에서 살펴보면 종을 매단 부분에서 당좌까지의 길이는 약 2.4미터가 되는데, 이 길이를 사용하여 진자운동의 주기를 구해보면 $3.07\text{초}(=2 \cdot (\text{길이})^{1/2})$ 가 된다. 이 진자운동의 주기는 우리가 청취할 수 있는 에밀레 종소리의 맥놀이주기와 일치한다.

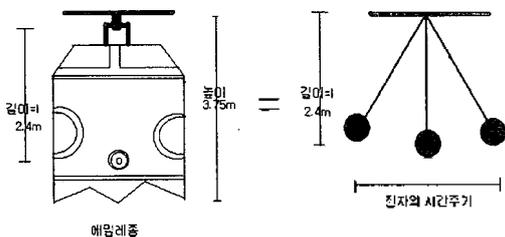


그림 4-3. 에밀레종의 움직임을 진자운동으로 모델링.

5. 에밀레 종소리의 실험

1) 에밀레 종을 11분의 1로 축소한 에밀레 모형종(높이 32센티, 직경 20센티미터)을 갖추고 있으며, 이종을 타종하면서 맥놀이 현상을 나타나게 또는 나타나지 않게 하는 실험을 하였다. 그리고 음향성분 분석

장비(K-system, 5500)를 사용하여 종소리의 맥놀이 현상과 성분분석을 눈으로 확인할 수 있었다.

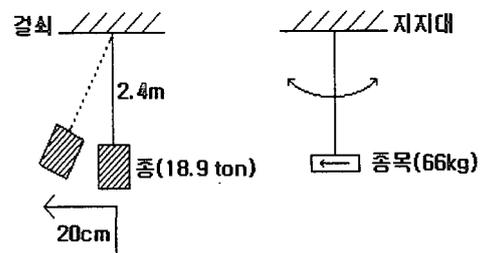
2) 종의 높이(32센티와 15센티미터)에 따라 흔들이 진자현상이 맥놀이에 어떻게 영향을 주는지를 실험을 통해 확인할 수 있었다.

6. 에밀레 종소리의 맥놀이현상을 재현하기 위한 새로운 타종법

기존에 확보된 에밀레 종소리와 경주박물관의 에밀레 종소리의 비교청취를 통해 문제점을 규명하고, 우리 민족의 승결이 스며있는 에밀레 종소리를 보존하기 위해 타종할 때 특히 고려해야할 몇가지점들을 모형 에밀레종의 타종실험을 통해 확인할 수 있다.

에밀레 종소리에서 끊어질 듯 이어지는 맥놀이 현상이 분명히 나타나려면 종이 잘 흔들려야만 한다. 타종 시에 종이 잘 흔들리게 하려면 다음의 몇 가지 관점에서 제고하여야 한다.

에밀레종의 무게는 18.9톤으로 밝혀졌다. 이렇게 무거운 종이 걸쇠에 걸려있으면 아래로 향하는 힘이 크므로 걸쇠가 받는 하중을 충분히 고려해야만 한다. 그렇지만, 타종 시에는 다르다. 즉, 타종 봉의 무게가 종의 무게를 초과해야만 흔들릴 수 있게 하는 것이 아니라, 타종 봉의 운동속도와 타종 봉에 가해주는 힘의 세기가 어느 정도 이상이면 종은 흔들리게 되어있다. 예를 들어 걸쇠에 매달려있는 18.9톤의 종을 20cm정도 움직이게 하려면 운동에너지는 31.6(J)이 필요하다. 따라서 무게 66kg인 종목으로 타종 시에는 초속 2미터이상의 속력으로 당좌를 타종하면 된다(이때 종목에서 운동에너지의 반은 종을 진동시키는데 적용된다고 가정하였음).



$$\left(\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = 31.6 \text{ Joule}\right) < \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

그림 6-1. 타종 시에 종목을 움직이는 속력: 초속 2미터 이상

에밀레종의 맥놀이 현상은 첫 타종에서 보다 이어진 타종에서 더 뚜렷하게 느낄 수 있다. 이것은 타종

시에 종의 흔들림을 잘 관찰하면서 타종해야만 가능하다. 1966년도에 녹음된 에밀레 종소리를 들어보면 8번 타종 중에서 4번만이 맥놀이현상을 뚜렷이 느낄 수 있었다. 반 정도가 맥놀이 현상이 안 나타난 것은 종이 흔들리고 있을 때, 그 다음 타종에서 종의 흔들림을 멈추는 방향으로 타격 했기 때문이다. 따라서 이어진 타종은 종의 흔들리는 주기에 맞추어서 타종해야만 종의 흔들리는 진폭이 커져서 맥놀이 현상이 더 뚜렷해 질 수 있다.

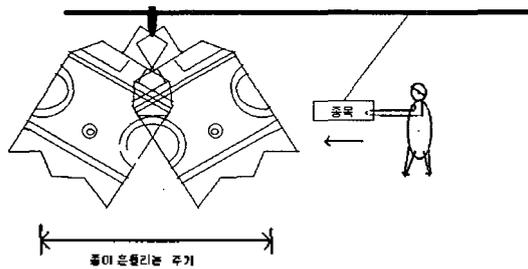


그림 6-2. 에밀레종의 맥놀이를 유지하는 방법: 종이 종목 가까이 왔다가 되돌아가는 순간에 타종해야만 종의 흔들림이 커지게 된다.

첫 타종에서부터 뚜렷한 맥놀이 현상을 느끼게 하려면 타종하기 전에 손으로 종을 밀어서 종을 어느 정도로 흔들리게 한 다음에 종의 흔들리는 주기에 맞추어 타종하는 것이 필요하다.

7. 결론

에밀레종소리는 끊어질 듯 이어지는 소리, 애끊는 소리, 심금을 울리는 소리 등의 특징을 갖는데, 끊어질 듯 이어지는 소리는 맥놀이 현상으로 나타난다. 지금까지 맥놀이 현상의 규명에 대한 많은 연구가 있었지만, 그 원인을 실험을 통해 분명히 밝히기는 이번이 처음이다. 에밀레종의 맥놀이 현상은 서양에서조차 400여년전에 발견된 진자의 등시성현상과 160여년전에 발견된 도플러현상을 함께 응용하고 있다. 이것은 우리민족이 1300여년전에 이미 이러한 자연현상을 응용하고있었다는 문화민족으로서의 자존심을 재삼 확인할 수 있었다. 이러한 규명에 따라서 세계적인 문화유산인 성덕대왕신종의 끊어질 듯 이어지는 맥놀이 현상을 재현하기 위한 타종시의 주의할 사항과 타종법을 새로이 제안하였다. 이제는 새로운 세대를 개척해 나아갈 수 있는 원동력을 얻을 수 있는 에밀레 종소리를 잘 보관하여 민족의 문화유산으로 후손에게 물려주어야 할 것이다.

6. 참고 문헌

- [1] Y.-H. Yum, J. M. Lee, and S. H. Kim, "A study on the vibration and sound of bells with slight asymmetry" Proceedings 4th International Modal Analysis Conference, L. A., U. S. A, pp.75-80, 1986.
- [2] 남천우, "유물의 재발견", 한국서울, 경음사, p.273, 1987.
- [3] 국립경주박물관, "성덕대왕신종 종합논문집", 1999.
- [4] 김양한, "음향진동측정을 통한 성덕대왕신종의 소리특성 탐구", 보고서 자료, 1997.