

# 에밀레종의 신비를 푼

# ‘맥놀이 지도’

글\_ 권영일 과학저널리스트 zeus@scinews.co.kr

“신 종이 만들어지니, 그 모습은 산 처럼 우뚝하고 그 소리는 용의 울조림 같아, 위로는 지상의 끝까지 다하고 밑으로는 땅속까지 스며들어, 보는 자는 신기함을 느낄 것ियो, 소리를 듣는 자는 복을 받으리라.”

이는 국립경주박물관에 있는 국보 제 29호 성덕대왕신종(일명 에밀레종)에 새겨져 있는 글이다. 우리 나라 최고의 범종인 선덕대왕신종 소리의 비밀을 기계공학자들이 한 꺼풀 벗겨냈다.

김석현 강원대 교수와 이장무 서울대 교수, 이지욱 미국 퍼시픽대 교수팀 등은 지난 3년 동안 에밀레종의 신비한 ‘맥놀이’ 소리와 그 소리를 만드는 범종 몸체의 다양한 떨림 모양을 분석해 만든 맥놀이 지도를 국제학술지 ‘음향진동학 저널(JSV)’ 2005년 3월호에 발표했다. 김석현 교수는 이에 앞서 지난 2003년 한국소음진동공학회 논문집 제13권 제8호 pp. 626~636에 ‘중형 구조물의 맥놀이 지도 작성법과 선덕대왕신종의 맥놀이 지도’

란 논문을 발표한바 있다.

### 맥놀이는 범종 구조의 미세한 차이로 발생

일반적으로 진동수가 다른 두 파동이 진행하면서 합쳐진 파동의 세기는 반복적으로 커졌다 작아졌다 하는 변화가 생긴다. 음파의 경우 소리의 세기가 주기적으로 변하게 되는 현상을 맥놀이라 한다. 예를 들어 맥놀이는 유리잔이나 종 같이 속이 빈 둥근 몸체를 두드릴 때 나타난다. 소리가 맥박처럼 약해졌다가 세지기를 거듭하며 우는 소리 현상인 것이다. 맥놀이 소리와 그 소리를 만드는 범종 몸체의 다양한 떨림 모양을 분석해 만든 것이 맥놀이 지도다. 성덕대왕신종을 타종했을 때 종소리의 여운이 1분 이상 이어지는 것도 맥놀이 현상 때문이다.

이번 연구 결과는 에밀레종을 보관중인 국립경주박물관이 2001~2003년 연 타종식에서 얻은 음향·진동 데이터를 대상으로 음파 신호 분석과 컴퓨터 모의실험 등을 거쳐 얻어졌다. 분석 결과, 에밀레종을 타종하고 한참 뒤까지 ‘어영~어영~’ 하는 독특한 소리의 여운이 이어지는 것은 에밀레종 소리가 수많은 날소리 성분들로 이뤄졌으며, 이런 날소리의 어우러



국내 최초로 복원에 성공한 국보급 과학문화재인 신라시대 종(선림원종).

이 종은 1950년 한국전쟁 때 월정사가 불타면서 파손된 통일신라 선림원종(높이 120cm, 무게 1톤)을 청동(靑銅) 밀랍(蜜蠟) 주조기술로 원형을 되살린 것이다.

짐과 소멸이 시간에 따라 달라지기 때문인 것으로 드러났다.

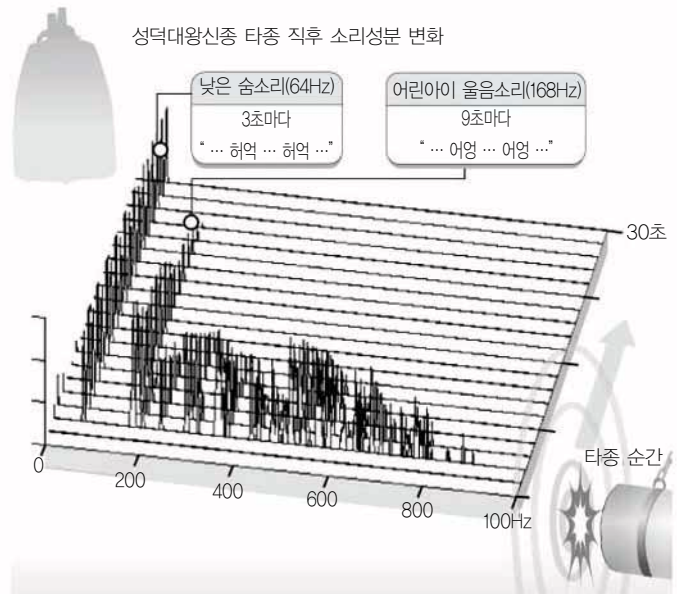
그러면 맥놀이 왜 생기는 것일까. 10년 전 맥놀이의 원리를 규명해 미국기계공학회 학술지에 발표했던 이장무 교수는 “범종의 미세한 비대칭이 맥놀이의 원인”이라고 말했다. 겉보기에 범종은 엄격한 대칭이지만, 범종 표면의 문양·조각이 비대칭을 이루고 몸체 곳곳의 물질 밀도나 두께도 모두 미세하게 다르며 심지어 쇳물을 부어 범종을 주조하는 순간에 우연히 섞이는 공기량도 약간씩 달라 비대칭은 범종의 피할 수 없는 운명이자 특징이다.

이 교수는 “미세한 비대칭성이 범종 몸체에 여러 떨림을 만들고, 그것들이 음파를 내면서 어우러져 우리 귀에 은은한 종소리로 들리는 것”이라고 말했다.

소리전문가인 배명진 숭실대 정보통신전자공학부 교수도 2004년 2월 에밀레종의 맥놀이 현상을 새롭게 규명한 연구결과를 발표한다. 배 교수는 “종의 아래 부위에서 발생하는 둥근 소리의 탄력이 맥놀이현상의 근원”이라고 주장했다.

그 동안 성덕대왕신종의 무늬, 두께, 무게의 비대칭 구조로 한 부위의 종소리와 교란을 일으켜서 맥놀이가 발생한다는 것이 통설이었다. 그러나 배 교수는 “유리잔이나 크리스탈잔처럼 주둥이가 오목하고 무늬가 없이 대칭을 이루는 용기에서도 맥놀이현상이 발생하기 때문에 비대칭에 의한 맥놀이 발생 이론은 잘못됐다”고 반박하고 “성덕대왕신종 아랫부분의 오르라든 부위에서 발생하는 원모양의 종소리가 바로 맥놀이를 일으킨다”고 설명했다.

배교수는 “종을 치면 둥근 종소리가 발



〈그림 1〉 에밀레종의 소리구조

생해 수축과 확산을 반복하게 된다”면서 “이 수축과 확산이 종소리의 탄력주기이며 이것이 이어지면서 맥놀이 주기가 되는 것을 확인했다”고 밝혔다.

#### 타종 9초 후 64Hz, 168Hz 음파 ‘신비의 소리’

성덕대왕신종은 〈그림 1〉과 같은 구조의 소리를 낸다. 다른 종소리는 20여개 정도의 날소리를 가지고 있어서 에밀레종의 소리보다 빠르게 소멸되는 반면, 에밀레종 소리를 이루는 날소리 음파는 1000Hz 이내에서만 무려 50여 가지에 이르는 것으로 나타났다. 다시 말해 에밀레종은 50여개의 날소리로 이루어져 있어서 타종했을 때 부딪히면서 나는 소리가 모두 사라진 후 숨소리 같은 64Hz와 어린이 울음소리 같은 168Hz의 음파가 바로 에밀레종 고유의 신비한 소리라는 것이다.

20여년 종소리를 연구한 김 교수는 “영국 세인트폴 성당의 종 ‘그레이트 폴’

(17t, 1881년 주조)을 분석했더니 음파 수는 20개에 못 미치는 정도”라고 말했다. 김 교수팀은 에밀레종이 신비한 소리를 내는 것은 종의 표면이 이렇게 50여 가지 상당의 소리를 낼 수 있도록 그 두께나 종의 문양에 아주 세세한 차이를 가지고 있기 때문이라는 것을 밝혔다. 김 교수는 “소리는 떨림 없이 생기지 않기 때문에 50여 가지 주파수 성분이 있다는 것은 타종 직후의 범종 몸체에 50여 가지의 떨림이 일어난다는 뜻”이라고 말한다.

날소리들은 서로 흡수하거나 합병하지 않는다. 오로지 각 떨림은 제 몫의 운동에너지를 마찰에너지로 다 소모한 뒤에 사라질 뿐이다. 빠르게 떨리는 고주파는 그만큼 빨리 사라진다. 타종 뒤 몇 초 안에 거의 대부분 날소리들이 소멸한다. 그리고 나서 센 소리에 가려져 있던 에밀레종만의 신비한 소리가 마침내 나타난다.

김 교수는 “9초 이후 에밀레종 소리의

세계는 숨소리 같은 64Hz와 어린아이 곡소리 같은 168Hz의 음파만이 지배한다"고 말한다. 실제 에밀레종의 대표음은 168Hz이다. 사람의 낭랑한 목소리의 음파가 바로 이 영역이라고 하니, 에밀레의 대표음은 애초부터 사람 귀에 썩 어울리는 음파를 가진 것이다. 168Hz의 음파는 타종하고 9초 뒤 '어~영' 하고 울고는 사라지듯하다가, 다시 한번 9초 뒤에 약하게 울음을 토해낸다.

김석현 교수는 "이 때문에 문학작품에

서 에밀레종 소리는 죽었다가 다시 살아나 '곡을 하는 듯한 어린아이의 울음소리'로 표현된다"면서 "168Hz를 더 자세히 들여다보면 168.52Hz, 168.63Hz의 두 가닥 음파가 한 쌍을 이룬 것으로 나타난다. 이런 차이 때문에 맥놀이 주기는 9초가 된다"고 말했다.

타종 후 최후까지 남은 에밀레종 소리는 64Hz의 음파로 분석됐다. 3초마다 한 번씩 등장하는 맥놀이를 하는데 매우 낮은 음이어서 '허억, 허억' 하며 마치 숨을

몰아쉬는 듯한 소리로 들린다.

**신라 '선림원종' 맥놀이 원리로 복원 성공**

이같은 맥놀이 지도의 원리를 이용해 통일신라시대 애장왕 5년(804년)에 제조된 국보급 과학문화재인 선림원동종(禪林院銅鐘)이 복원됐다.

국립중앙과학관은 최근 과학기술사연구실과 범종 중요무형문화재 기능보유자 원광식 씨가 3년간 연구한 끝에 1950년 한국전쟁 때 파손된 선림원동종을 '청동

**맥놀이 현상이란**

맥놀이 현상은 동시에 전해 오는 두 음이 규칙적으로 강해졌다 약해졌다 하는 현상을 말한다. 두 파동체뿐만 아니라 한 파동체에서도 진동수가 부분적으로 다를 때에는 맥놀이 현상이 일어나는 경우가 있다.

예를 들어 범종(梵鐘)의 은은한 여운 같은 것이다. 이것은 재질이나 두께의 불균일, 모양의 비대칭성 등이 원인이 되어 종의 각 부분에서 다른 진동수의 소리가 나오기 때문에 생기는 맥놀이의 일종이다.

단 소리가 똑똑히 들릴 경우의 맥놀이 주파수는 6~7Hz 이하일 때이며, 그 이상이면 소리가 흐려 분간하기 어렵다. 또 두 주파수가 같으면 맥놀이는 사라진다. 이 현상은 이미 알고 있는 주파수에 의해 다른 미지의 주파수를 알아내는 데 이용된다. 전기적인 파동일 경우에는 주파수의 변환에도 이용된다. 슈퍼헤테로 다인 방식 등의 수신원리는 이를 응용한 것이다.

음악가들은 맥놀이 현상을 악기를 조율하는데 이용한다. 어느 악기가 기본 진동수와 함께 소리를 내며 맥놀이가 사라질 때까지 조율시키면 악기는 진동수와 동조된다. 음악의 도시 비엔나에서는 많은 프로 및 아마추어 음악가들을 위하여 A음(라음, 440Hz)이 전화로 서비스된다.

기타의 음은 줄을 튕겨서 생기는 진동으로 조율할 수 있다. 즉 두 줄을 튕겨서 같은 진동수로 맞추면 같은 음을 내는 것이다. 이 때 같은 음이 아니면 '웅~웅~웅' 하는 규칙적인 음이 들린다. 이렇게 진동수가 약간 다른 음이 합쳐지면 합성음의 소리가 작아졌다 커졌다 하는데 이와 같은 소리의 주기적인 진동을 맥놀이라고 한다.

예를 들어 260Hz와 270Hz를 진동시키면 중간음인 265Hz의 음이 10Hz의 간격으로 1초에 10번 커졌다 작아졌다 한다. 다시 줄을 풀어주어 270Hz를 264Hz로 해주면 260Hz와 진동하여



복원된 선림원종소리를 서울대 이장무(李長茂) 교수팀이 음향 측정한 결과 타종 직후 약 0.75초부터 기본 진동수의 음파가 맥놀이 현상을 일으킴을 밝혀냈다(에밀레종 3초 맥놀이).

중간음인 262Hz의 소리가 4Hz의 간격으로 1초에 4번 진동하게 된다.

이와 같은 방법으로 조율하여 260Hz로 두 줄을 맞추어 주면 진동수의 차이는 없으므로 맥놀이는 일어나지 않고 한 개의 음만이 들리게 된다. 이 때가 두 줄이 완전하게 같은 진동수로 조율된 것이다. 피아노 등 모든 현악기의 조율도 같은 방법으로 하게 된다.

밀랍 주조기술'로 복원하는데 성공했다고 밝혔다.

선림원동종은 길이 122cm, 무게 1t에 달하며 현재 한국에 남아있는 통일신라시대의 5개 종 가운데 하나다. 1948년 강원도 명주군 선림원사지(禪林院寺址)에서 출토돼 1949년 강원도 평창군 월정사로 이관됐는데 한국전쟁 때 월정사가 소실됐을 때 파손됐으며, 현재는 일부가 국립춘천박물관에 보관돼 있다.

과학기술사연구실 정동찬 실장은 “청

동합금에서 불순물과 공기를 최대한 제거하는 방법과 거푸집 제작에 사용되는 적절한 천연소재를 발견하는데 성공했다”며 “이번 복원기술을 이용해 길이 330cm, 무게 18.9t에 달하는 동양 최대의 청동종인 통일신라시대 성덕대왕신종을 재현시킬 계획”이라고 말했다.

그는 또 “천연 밀랍으로 종의 틀과 문양 등을 섬세히 새기고 이암 흙으로 덮어 거푸집을 만든 다음, 밀랍을 녹여내고 남은 빈자리에 쇳물을 붓는 방식으로 복원했

다”며 “이런 전통기법이 신비한 맥놀이를 만드는 것 같다”고 덧붙였다.

이장무 서울대 교수팀이 복원된 선림원동종의 소리를 측정한 결과 타종 이후에도 맥놀이 현상이 0.75초마다 나타나는 것으로 확인됐다. ㉮



글쓴이는 한국외국어대 불어과를 졸업하고 연세대 언론홍보대학원에서 석사학위를 받았다. 내외경제신문(현 헤럴드경제신문)에서 논설위원, 편집위원 등을 역임했으며, 현재 한국과학기술자협회 사무총장으로 재임중이다.

## 에밀레종(성덕대왕신종, 봉덕사종)

“무릇 심오한 진리는 눈에 보이는 형상 이외의 것도 포함하니, 눈으로 보면서도 알지 못하며, 진리의 소리가 천지간에 진동하여도 그 메아리의 근본을 알지 못한다. 그런고로 (부처님께서는) 때와 사 람에 따라 적절히 비유하여 진리를 알게 하듯이 신종을 달아 진리의 둥근 소리를 듣게 하셨다.”

지금 국립경주박물관 오른편 종각에 매달려 있는 에밀레종은 원래 봉덕사에 있었다. 그래서 지금까지도 봉덕사종이라고 부르는 이도 더러 있다. 또한 성덕대왕의 명복을 빌기 위해 만들었다 해서 ‘성덕대왕신종’이라고 부르기도 한다.

봉덕사는 신라 제33대 성덕왕이 태종 무열왕을 추모하기 위해 세운 절로, 경주 북천(北川) 근처에 있었다. 그 뒤 봉덕사가 북천에 묻히게 되자, 조선 세조 6년, 서기 1460년에 영묘사(靈妙寺)로 옮겨 걸었다. 그 영묘사도 홍수로 인해 모두 무너져가고 에밀레종만 덩그러니 남았다. 그래서 지금의 경주 봉황대(鳳凰臺)

옆에 종각을 짓고 에밀레종을 보관해 왔다. 그러다가 1913년에 경주고적보존회(慶

州古蹟保存會)가 결성되었고, 1915년부터 옛 객사(客舍) 건물을 이용, 신라 유물들을 수집하여 전시했다. 에밀레종은 1915년에 지금의 국립경주박물관 자리로 옮겼다. 에밀레종에는 이 종을 만들게 된 까닭이 새겨져 있다. 이 종은 신라 제35대 경덕왕이 그의 아버지였던 33대 성덕왕의 명복을 빌기 위해 만들려고 했다. 경덕왕이 뜻을 이루지 못하고 죽자, 그의 아들 해공왕이 아버지의 뜻을 이어받아 재위 7년, 서기 771년에 구리 12만 근(72t)을 들여 완성했다. 에밀레종은 2대에 걸쳐 만든 셈이다. 이는 그만큼 이 종



에밀레종

을 만들기가 힘들었다는 것을 말해준다. 에밀레종은 높이가 3.75m, 입지름이 2.27m, 두께가 11~25cm, 무게가 18.9톤 규모다. 에밀레종의 모양은 종의 입에 해당하는 부분에 당초문(덩굴풀 무늬)으로 된 띠가 둘러쳐져 있다. 또 덩굴풀 무늬 사이에도 8개의 큼직한 연화무늬를 일정한 간격으로 둘러쌌고, 종 위에는 용이 음관(音管, 소리관)을 칭칭 감고 있다.

무엇보다도 눈에 탁 띄는 것은 비천상이다. 비천상은 말 그대로 하늘을 나는 형상이란 뜻이다. 이 비천상은 양각된 글씨를 사이에 두고 각각 2구씩, 모두 4구가 연화좌(蓮花座, 연꽃 자리) 위에 무릎 꿇고 공양하는 모습을 취하고 있다. 그래서 이 모습을 공양상(供養像)이라고도 한다. 이 비천상 주위에는 불교에서 이상화한 꽃인 보상화(寶相華)가 마치 구름처럼 뭉개뭉개 피어오르고 있다. 마치 그 아이가 종을 칠 때마다 “에미 탓이라, 에미 탓이라”하면서 하늘로 승천하는 것처럼 말이다.