

성덕대왕신종의 예술성과 과학적 신비

이 장 무

(서울대학교 공과대학 교수)

1. 머리말^[1~4]

동양종의 기원은 명확하지는 않으나 중국 청동기 시대로 추측된다. 중국의 청동기 종은 상(商)나라 또는 은(殷)나라에 해당되는 초기문화유적 중의 한 곳인 중국 하남성(河南省)의 청동제 종에서 비롯되었다고 볼 수 있다. 종은 중국의 은나라와 주나라 시대에는 제기·악기 등으로 사용되었다고 한다. 그리고 그 후 종은 시간 보도, 많은 사람을 모으거나 집회를 위한 타종, 종교의식, 긴급사태(예를 들면 전쟁·재난·행사) 등에 사용되었다. 우리나라에서는 1,600년전 불교가 들어오면서, 범종이 사찰에서 집합을 알리는 시보 종으로 사용되었고, 불교의식에 사용되는 사물(종, 법고, 운판, 목어) 가운데 하나가 되었다. 동양종을 대표하는 범종에는 중국종, 한국종, 일본종이 있으나 그중에서 한국종은 아름다운 외형, 문양과 더불어 종소리가 은은해서 가장 우수하다는 것이 세계적으로 알려져 있다. 참고로 중국종을 살펴보면 유리컵을 거꾸고 한 모양에 역U자형의 고리를 갖는 형태로서 종의 하단부가 서양종처럼 나팔 모양으로 벌어지고 하단이 파행선을 이루는 형태로 되어 있고 표면에는 모양이 거의 없이 단순한 구획선의 조합으로 이루어져 있다. 일본종은 원통과 반구를 합쳐놓은 듯한 일정한 형상에 역시 단순한 선의 조합으로 표면이 조각되어 있다.

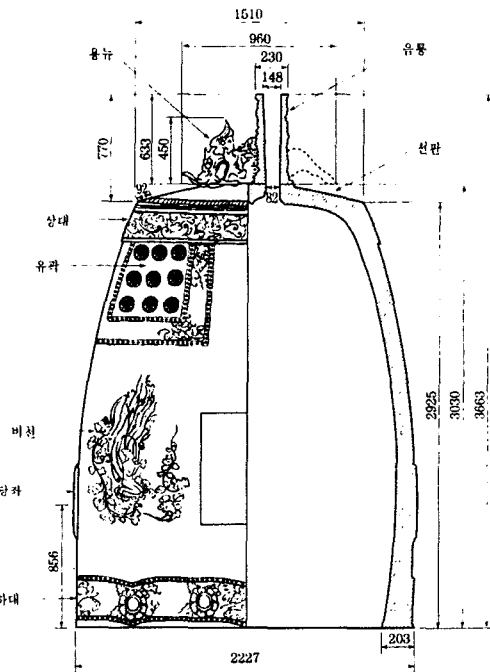
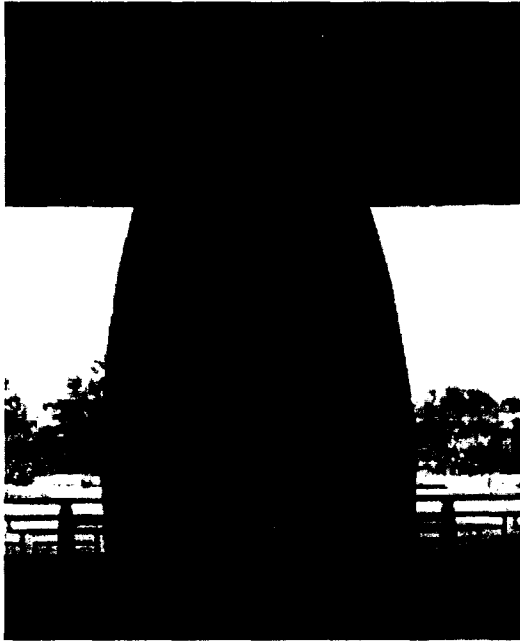
성덕대왕신종이 원래 설치되었던 봉덕사의 위치는 경주 북천의 남안 남천리로 알려져 있다. 홍사준 선생에 따르면 통일신라시대의 효성왕은 성덕왕의 명복을 기원하는 사찰을 건립하였고(A.D. 738), 경덕왕도 선왕의 명복을 받들려는 효성에서 동(청동) 12만 근을 모아 범종사업을 하다가 이루지 못한 채 세상을 떠났으며, 그 다음 혜공왕이 부업을 이어 혜공왕 7년(A.D.771)에 완성을 보았다. 국내 최고령의 종인 상원사종이 A.D.725년에 제작되었으므로 이 신종은 국내 두번째의 최고령 종이다. 봉덕사종은 조선조에 들어와서 불행히도 홍수와 화재 등으로 여러 곳을 전전하다가 1973년에는 현 경주국립박물관에 옮겨 안주하면서 오늘에 이르렀다.

2. 성덕대왕 신종의 구성요소

경주국립박물관에 있는 국보 제 29호인 성덕대왕신종은 무게가 18.9톤, 종의 하부 구경이 222.7cm, 전체 높이가 366cm인 세계에서 가장 아름다운 대종(大鐘)이다. 이종은 종 몸체의 곡선미가 뛰어나며 조각과 문양이 아름답다.

성덕대왕신종은 그림 1과 같이 종을 종각에 거는 부위로 용의 머리와 허리로 조형된 용뉴와 신라종에만 있는 피리 모양의 음통이 종의 상부 덮개인 천판 위에 부착되어 있다. 또

한 종의 상부위 주위에 돌린 띠인 상대가 아름다운 문양으로 장식되어 있다. 상대에 인접하여 4개소에 요철형 장식부인 유곽과 유두가 있다. 종을 타격하는 부위에는 통상 원형의 연꽃문양이 종 표면에 대칭으로 조각되어 있는데 이 부분을 당좌(撞座)라고 부른다. 당좌 옆의 종 표면에는 비천상(飛天像)이 장식, 조각되어 있다. 종의 하단부에 돌린 띠 모양의 하대에 역시 아름답고 섬세한 문양이 조각되어 있다. 이와 같은 구성요소들은 상원사종 등의 다른 신라종과 동일한 형식을 가지고 있다. 그러나 종 하단의 하대 모양이 중국종에서 볼 수 있는 팔능(八陵: 8개의 능모야의 곡선부분)의 형식을 엿보이고 있어서 이 종 특유의 대륙적인 기풍도 보여주고 있다.



(a) 성덕대왕 신종의 외형

(b) 성덕대왕신종의 구조

그림 1. 성덕대왕 신종의 외형과 구조

성덕대왕신종의 조각과 문양은 신라종만이 갖는 독창적인 디자인이며 주종 제작 또한 탁월해서 문양의 요철의 높고 낮음이 크지 않으면서도 문양과 조각을 충분히 예술적으로 표현하였고 문양과 조각이 종 음향의 왜곡에 미치는 영향을 최소화한 것으로 생각된다. 각각의 구성요소에 대하여 간단히 소개하면 다음과 같다.

(1) 용뉴 및 음통^[1,4]

종을 종각에 달기 위한 현가(縣架)용 시설물을 종뉴라고 부른다. 일반적으로 동양종의 종뉴가 서양종의 종뉴보다 화려하여 B.C.433년 전후로부터 용 모양 또는 새 모양의 본격적인 용뉴나 조뉴의 형태가 사용된 것으로 추정된다. 그러나 범종의 종류는 주로 용뉴로 이루어져 있다. 일반적으로 중국종과 일본종은 다 같이 쌍용두를 갖고 있는 용뉴로 이루어져 있으

나 우리나라 종은 유독 단용두를 갖는다.

이 종의 용뉴는 우측다리가 위쪽으로 버티고, 좌측다리는 전방 좌측에 버티고 있으며, 전체적으로 용과 비천상의 자세는 물론 그 조각들의 힘차고 기백있는 모습들은 서로 조화를 이루고 있으며 섬세하고 미려한 조각은 세기의 걸작품이라고 할 수 있다.

음통은 음관이라고도 부르며, 용뉴의 허리와 다리부분의 중간 부위와 일체가 되어 천판상에 설치되어 있는 큰 피리 모양의 원통이다. 속이 비어 있어서 종의 내부의 소리가 이 음통을 통해서 밖으로 전달될 수 있도록 된 신라종에만 있는 매우 독특한 조형물이다. 음통의 기능에 대한 여러가지 학설 중 대표적인 것을 소개하면 다음과 같다.

첫번째는 신라종의 음통은 만파식적에서 유래한다는 학설이다. 1982년 황수영 박사^[5]는 「신라범종과 만파식적 설화」에서 삼국유사의 만파식적(萬波息笛)을 인용하여, 신라종의 종천장에 있는 음통은 신라의 제 1의 국보이고, 신기(神器)인 만파식적을 불교를 국교로 하고 있던 통일신라시대의 범종의 종 천장에 도입하였다는 만파식적설을 제창하였다.

두번째는 이 음통이 음관의 역할을 한다고 추정하는 것이다. 성덕대왕 신종의 경우에 종을 타격한 직후에 발생되는 고주파 음들을 이 음관이 빨리 감소시켜서 소리의 잡음이 적은 듯 느끼게 한다는 염영하 박사^[6]의 음향 필터설도 있다. 1992년 이병호 박사^[7]는 음통의 최적길이 연구에서 성덕대왕신종의 음통이 실제 직경 15cm, 길이 77cm이나, 만약 음통의 길이가 96cm가 되면 음관이 공명 전달조건을 만족해서 종소리의 기본음이 음통을 통과해서 소리를 낸다고 주장하였다.

셋째로는, 음통이 용두와 더불어 범종을 종각에 지지하는 지주(支柱) 역할에 쓰인 것으로 추정하였다. 실제 성덕대왕신종의 천판상에서, 용뉴는 종 천정에 극히 일부분만 접촉되어 있어서 음통의 보조없이 용뉴의 하부 쪽에서 종의 중량을 지탱하기가 어렵다. 그러므로 종의 무게를 지지하는 것은 단룡의 머리 부분이므로 음관(음통)이 종의 정적 하중과 타종에 따른 동적 충격하중을 받아내는 역할을 하기 위해서 추가로 용두 옆에 설치된 것으로 추정된다^[11].

유홍준 교수^[8]의 전언에 의하면 원래 종걸이에 끼워서 일종의 핀으로 사용한 원통쇠를 근년에 제작한 새로운 원통쇠로 대체하려 했으나 최근의 기술로는 새 원통쇠가 동하중(動荷重)을 견디기에 충분한 강도가 나오지 않아서 실패하였다고 한다. 이것은 또한 신라인의 철 제조기술과 단조기술이 얼마나 뛰어났는가를 단적으로 보여주는 것이다.

(2)천판, 상대 및 하대

천판은 종체의 상부를 구성하는 천정부분이다. 종신(鐘身) 옆면 최상부에 280mm 폭의 띠 모양으로 조각된 상대(上帶)에는 불교에서 이상화한 꽃문양인 보상화문(寶相華紋)이 양각 주조되어 있다. 하대(下帶)는 우리 한국 종에서 매우 희귀하고 보기 어려운 완만한 팔능형(八陵形)으로 되어 있고 폭은 약 302mm이며 아름다운 곡선미를 갖고 있다.

하대 내부의 8개 능부 중앙에는 직경 223mm의 연화문(蓮花紋)이 각각 1개씩 배치되어 있고 그 사이를 아름다운 보상화문으로 장식하였다. 많은 외국학자들이 아름다운 문양의 예술적 수준을 극찬하고 있다. 이와 같은 배경에는 신라의 불교미술 수준이 당시 최고로

발전되어 있었고, 또한 주형용(鑄型用) 모형인 지문판(地紋板) 제작기술과 청동 공예기술이 전성기였다는 역사적인 증거와도 상통하는 것이다.

(3) 유곽

유곽은 용뉴를 기준으로 하여 종 천판 중심에서 볼때 좌우 45°와 135° 방향에 위치한 상대의 바로 아래 4 개소에 배치되어 있는데 상원사종과 그 형식이 동일하다. 각 유곽대의 내외측 경계에는 연주문대(蓮珠紋帶)가 배치되어 있다. 유곽대는 상대 및 하대와 동일한 보상화문으로 장식하고 있다. 유곽 내부에는 종. 횡으로 3 열 배치된 9 개의 유(乳)가 있고 유두는 평유(平乳)이며, 그 중방(中房)에 각각 6 개의 연꽃 씨를 갖고 있다. 국내 신라종 중에서 성덕대왕 신종은 평유인데 반해서 상원사종과 공주 신라종은 용기형의 유두를 갖고 있다.

(4) 비천상

성덕대왕 신종의 비천상은 신라의 미를 대표하는 상징으로 널리 알려져 있다. 그것은 신라예술이 갖고 있는 창조적인 청동문화의 대표적인 걸작품이기 때문이다. 이 종에는 향로를 받들고 내려오는 천인을 묘사한 섬세하고 미려하게 조각된 비천상이 있어 전체적으로 조화와 균형을 이루고 있다. 비천상은 구름 위의 연화좌상에 무릎을 세우고, 불교에서 이상화한 꽃인 보상화를 구름과 같이 피어오르게 하고, 하늘 위에서 바람에 옷자락을 휘날리며 공양하는 아름다운 보살로 된 공양비천상을 나타내고 있다.

(5) 당좌

당좌는 종을 타격하는 부위로서, 종을 설계할 때에 미리 정해서 8 개의 옆으로 된 보상화문을 2 중으로 겹친 아름다운 연꽃문양으로 구조된 것이다.

이 당좌는 신라종의 고유한 용두방향을 기준으로 해서 종의 전후방에 각각 1 개씩 2 개소에 배치되어 있다. 당좌 중앙부에는 씨방(子房)이 8 개가 배치되어 있다. 신라의 두 대표적인 상원사종과 성덕대왕 신종의 경우 당좌의 높이 방향의 위치는 필자의 공학계산에 의하면 스위트 스팟(sweet spot, 야구 배트의 홈런 치는 점에 해당)과 일치하는 것으로 밝혀져서 신라인들의 뛰어난 기술에 놀라움을 금할 수 없었다. 현대의 역학(力學)이론에 따르면 스위트 스팟과 일치해 있는 당좌를 타격할 때에는 종걸이 현가 부분에 최소의 힘이 작용하므로 경쾌하게 타종이 되어 종 현가부의 수명이 길어지며 종걸이 부위의 마찰력도 최소가 되어 종소리의 여음이 길어진다.

야구 배트나 테니스 라켓으로 공을 때릴 때에 어떤 측정의 점(sweet spot)에 맞으면 매우 경쾌하게 타격이 되고 손목에 최소의 힘이 작용되므로 부드럽게 맞는 데, 이 점을 스위트 스팟이라고 부른다. 이 점이 바로 최신 역학 이론에서 이야기하는 타격중심점이다. 놀랍게도 높이 167cm 인 상원사종의 타격 중심을 계산해 보니 당좌의 위치와 불과 1.2cm 밖에 차이가 나지 않는 것이다. 계산상의 오차를 감안하면 바로 일치한다고 볼 수 있는 것이다. 최근에 필자가 성덕대왕 신종의 타격 중심을 계산해 본 결과 이 점은 종걸이 중심에서부터 260.5cm 의 위치에 있었고 실제 당좌는 238cm 의 위치에 있어서 약 9%의 오차 내에 있음을 알았다. 과거 신라인이 오늘날과 같이 컴퓨터나 최신 전자계측기의 도움

없이 어떻게 최적의 당좌의 위치(높이)를 결정했는지는 수수께끼로 남아 있다. 당좌의 원주 방향상의 위치는 종의 맥놀이 특성과 관련이 있는데 뒷부분에서 다루기로 한다.

3. 종의 주조 기술^[1,9]과 조형미

이 부분은 고 염영하 교수의 연구^[11]와 나형용 교수의 연구^[9]를 참조, 발췌 요약해서 기술하기로 한다. 성덕대왕신종과 같은 큰 종의 제작은 신라 경덕왕과 혜공황의 왕명에 따라 진행된 역사적인 거사였다. 종의 명문에의하면 제조 기술을 담당하였던 책임자는 주종대박사 박종일(朴從鑑) 대나마, 차박사 박빈나(朴賓奈) 나마, 박한미(朴韓味) 나마, 박부부(朴負負)대사 등이었다. 이들이 왕명을 받들어 서로 합심해서 종설계, 문양설계, 주형제작, 동합금 성분배합 및 용해주조를 분담하였을 것으로 생각된다. 그러나 고대 중국에서 사용된 주조법이 전달되어 국내에서 다시 주종기술을 발전시키고 활용하였을 것으로 추정된다. 성덕대왕신종의 주형 구성을 현존하고 있는 종체로 추정하여 보면, 이 종의 종신에서 유곽 바로 하부와 비천상과의 사이에 주조시에 형성된 이음매 같은 선이 높이 177cm 부근에 보인다. 이 주조선은 하부주형과 상부주형의 경계선이다.

나형용 교수^[9]에 의하면 신종은 상·하 2 단 분할 형으로 조립되었고 종신부의 각종 문양과 종뉴(용뉴)부는 모두 알심으로 제작하여 조립하였으며 알심은 밀랍형 조형법으로 제조하였다. 주조물의 우수성에 비추어 볼 때 성덕대왕 신종은 통기성이 우수하고 도형(途型)이 잘 된 건조사형으로 주조된 것으로 추정한다. 이는 최근 조사보고서^[10]의 주물사 파편의 현미경 사진과 종 표면에 나타난 주물사 팽창결함에 의하여 추정할 수 있다. 그런데 신라시대에 주조한 범종의 화학 조성을 살펴보면 모두 동 80~85%, 주석 12~15% 정도 함유된 주석청동으로 주조되었다^[9,10]. 이견무 중앙박물관 관장의 설명에 의하면 다음과 같다. 성덕대왕 신종(동 82%, 주석 13%), 상원사종 (동 84%, 주석 13%), 선림원종(동 80%, 주석 12%), 실상사종(동 76%, 주석 18%) 등의 성분 분석치의 평균을 내어보면 동 81.3%에 주석 13.8%의 조성비를 가지게 된다. 이는 우리나라청동기 시대 무기류의 하나인 한국식 동검 분석치 동 79.2%, 주석 13.4%와 아주 유사하다. 이렇게 성덕대왕신종 등이 한국식 동검과 동:주석 조성비가 유사한 것은 단단하면서도 사용(타격)할 때에 잘 깨져서는 안 된다는 칼과 종의 특성을 고려해서 합금 비율을 올바르게 계산하였기 때문이라고 여겨진다. 동검과 같은 청동무기를 제작했던 전통이 신종제작에도 그대로 전해져서 좋은 종이 만들어진 것으로 생각된다.

성덕대왕신종의 주조와 관련해서 우리에게 널리 알려진 에밀레종에 대한 전설은 신종이 완성되기까지의 허다한 우여곡절이 있었음을 말하여 주고 있다. 전설의 진위는 알 수 없으나 이 신종의 주조가 얼마나 어려웠던 가를 짐작하게 하는 이야기다.

앞에서 설명한 당좌, 비천상, 유곽, 상대, 하대는 매우 아름답고 섬세한 문양으로 조각되어 있다. 이 같은 문양과 조각은 신라종만이 갖는 독창적인 설계이며 주조 제작 또한 탁월해서 문양의 요철의 고저가 크지 않으면서도 문양과 조각을 충분히 예술적으로

표현하며 문양과 조각이 음향의 왜곡에 미치는 영향을 최소화한 것으로 생각된다. 또한 종몸체의 외형곡선, 당좌의 위치 등의 치수는 용두, 음통, 문양과 더불어 종의 예술적 조형미의 극치를 보여주면서 동시에 동역학적, 진동음향학적 특성과 조화를 이루고 있다.

성덕대왕 신종의 조형미를 살펴보기 위해서 종의 하단부의 외경과 하단부에서 천판까지의 높이의 비, 즉 세로: 가로 비를 구하면 $3,030/2,227=1.36$ 인데 이 값은 상원사종의 비 $1,335/903=1.47$ 보다는 작은 값이나 두 값 모두 건축 등의 조형물에서 예술적인 치수비로 사용되는 $\sqrt{2}=1.414$ 에 접근한 값이다. 또한 천판에서 종 최하부까지의 거리인 종신고와 천판에서 당좌까지의 거리인 당좌위치의 비를 구하면 1.39로 역시 예술적 조형비율인 $\sqrt{2}$ 에 가까운 값을 얻게 된다. 이 위치는 앞서 설명한 바와 같이 이 종의 스위트 스폿에 근접하여 조형미와 과학기술을 조화시킨 신라인의 재능에 탄복하지 않을 수 없다. 그러나 신라에서 고려를 거쳐서 조선으로 시대가 바뀔 때 종의 형태가 변화되면서 조선종의 종신고 대 외형의 비는 1.2:1 이하가 되어 종이 납작한 모양으로 퇴보하였고, 당좌도 중국의 영향을 받아서 종의 하대 또는 하대 부근에 위치하게 되어 종의 모양과 타격감도 나빠지고 종의 수명도 짧아지는 등 신라종의 예술적, 과학적 탁월성을 상실하였다.

4. 성덕대왕신종의 진동-음향 설계의 우수성

성덕대왕신종의 높은 예술적 가치는 종체(鐘體)의 형상과 조각과 문양의 독창적이고 빼어난 조형미에도 있지만 특유의 아름다운 종소리에 있다. 아름다운 종소리는 잡음이나 왜곡이 없이 맑은 소리, 고유진동수들의 크기와 배열이 적절한 소리, 소리가 완전히 사라졌다가 다시 되살아나는 것이 일정한 주기로 반복되는 맥놀이가 뚜렷한 종소리, 초기의 타격음이 사라지고 기본음이 이어지는 여음(餘音)이 긴 종소리가 특징이다.

성덕대왕신종의 구조는 앞의 그림 1에서 볼 수 있듯이, 기본적인 종체(鐘體)는 축대칭 쉘구조에 가깝고 하대 부분을 두껍게 하여 고유진동수를 높이고, 타격에 대한 강도를 증가시키도록 설계되어 있다. 거대 종의 경우에 최저 고유진동수가 60Hz 이하가 되면 장중한 느낌은 주지만 청감이 급격히 떨어지게 되므로 하대 부분의 두께를 조절해서 이 값을 올리게 된다. 종소리를 지배하는 종진동의 고유진동수들은 종체의 반경, 높이 및 두께분포 그리고 높이방향의 곡률(曲率) 등에 크게 지배된다^[11,12,18]. 이러한 설계 인자들이 진동수에 미치는 효과는 경험이나, 단순 쉘구조 이론에 따라 대략적으로는 예측할 수 있으나, 보다 정확한 계산을 위해서는 유한요소해석과 같은 수치 해석적 방법을 설계단계에서 사용할 수 있다^[30]. 그러나 성덕대왕신종을 포함한 대부분의 한국종은 표면에 용두, 음통 등의 조각물과 유두, 유곽, 비천 보살상, 당좌 등과 같은 복잡한 모양의 비대칭요소를 가지고 있다. 뿐만 아니라, 불가피하게, 종 주조시 설계치수와 다른 미세한 편심 및 두께 오차가 발생하고, 재질도 불균일하게 분포되므로 비대칭성이 존재하게 된다. 이러한 비대칭성은 종의 진동특성을 매우 복잡하게 만들어 발생하는 소리에 깊이와 심오함을 더해지게 된다. 즉, 고유진동모드

가운데 원주상에서 절점을 갖는 원주모드를 2개의 모드쌍으로 분리시키고, 그 모드쌍은 2개의 매우 근접한 고유진동수를 갖고, 동일 절선수를 가지면서도 원주상의 위상이 서로 다른 진동모드를 보이게 된다. 이러한 모드쌍이 동시에 가진다면 두 모드의 간섭에 의하여 진동의 크기가 일정한 주기로 커졌다 작아졌다 하는 맥놀이 현상이 발생하고, 종소리에서도 이러한 맥놀이가 들리게 된다^[11-14]. 서양의 연주용 종에서는 맥놀이를 피하기 위하여 비대칭성을 제거하는 노력이 시도된다^[15,16]. 그러나 한국종의 경우 1회 타종시 장시간의 음향을 듣게 되므로, 숨을 쉬는 듯한 맥놀이가 종소리에 생명력을 불어넣고, 소리의 심오함을 더하여 준다. 따라서, 타격시 종의 특성에 맞는 적절한 맥놀이 주기를 가지며, 선명한 맥놀이가 나타나도록 설계하고 교정하는 것이 매우 중요하며, 이에 관한 연구가 필자 등에 의해서 오랫동안 수행되어 왔다^[22,23]. 종의 진동 및 음향특성은 타격지점인 당좌의 위치와 당목의 크기, 형상, 무게등 타격조건에도 영향을 받는다. 일반적으로 당좌의 위치가 높이 방향에서 종체의 타격중심(center of percussion)과 일치하고, 원주상에서는 기본음을 내는 진동모드쌍의 절선의 중앙에 있는 경우가 가장 좋은 진동 및 음향특성을 갖는다. 타격중심의 위치는 설계의 경우와 주조후의 경우가 미세한 차이가 날 수 있으나, 설계데이터로부터 유한요소해석을 통해서 계산이 가능하다. 그러나 원주상에서의 당좌 위치는 예상하기 어려운 비대칭성으로 인하여, 설계단계부터 정밀하게 예측하는 것은 어려우며, 주조후 실험기법을 통하여 교정이 가능하다. 본 논고에서는 성덕대왕신종의 진동-음향설계의 우수성에 대하여 고찰하고자 한다.

(1) 이상적인 맥놀이 진동-음향 특성

성덕대왕 신종을 위시한 신라종의 진동-음향 특성을 이론적으로 설명하기 위하여 그림 2과 같이 종을 단순 모델로 이상화하여 해석할 수 있다.

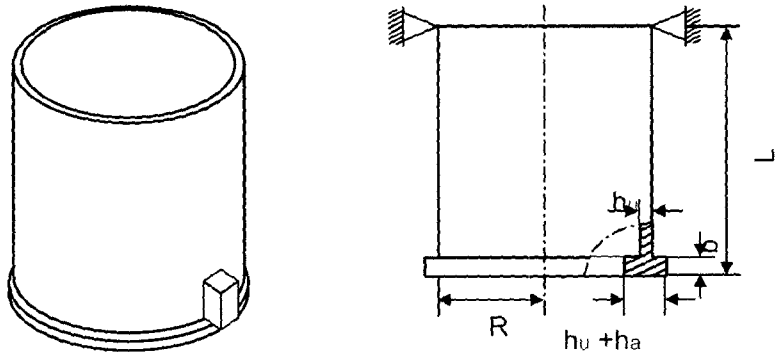


그림 2. 성덕대왕신종의 단순 모델

신라종에서는 두꺼운 하대에 의해 종의 진동-음향의 저차 진동수들이 크게 영향을 받으며, 또한 앞서 설명한 여러 비축대칭요소들에 의하여, 동양종 특히 신라종 특유의 맥놀이가 발

생한다. 이러한 특성을 이론적으로 고찰하기 위하여, 기본 몸체를 상단(上端)이 단순 지지된 원통셀로, 하대를 보강링으로, 그리고 여러 비대칭 요소를 하나의 집중질량으로 단순화시킨다. 원통셀은 원주상에서 절선 배치와 축상에서의 절선 배치에 따라 다음과 같이 진동모드가 표시된다.

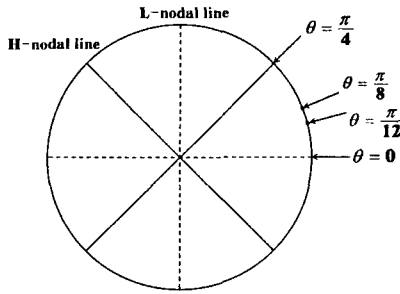
$$U_{mn1}(x, \theta) = \Phi_m(x) \cos n\theta \quad (1)$$

$$U_{mn2}(x, \theta) = \Phi_m(x) \cos n\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (n = 1, 2, 3..) \quad (2)$$

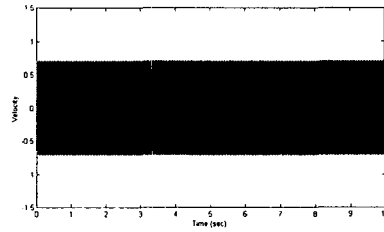
여기서 $\Phi_m(x)$ 와 $\cos n\theta$ 는 각각 원통(圓筒)셀의 축(軸) 및 원주(圓周)상의 진동모드를 표시한다. 진동모드나 고유진동수 매우 제한된 경우에 한해서는 이론적으로 결정가능하고, 복잡한 구조에서는 유한요소 해석과 같은 수치적 방법을 사용하여 구할 수 있다. 또한, 종의 소리를 결정하는 셀 진동모드는 셀의 반경방향 모드이고, 길이 및 접선방향 모드는 소리에 거의 기여하지 못한다. 따라서, 해석에서도 반경방향모드만을 고려하는 것으로 충분하다. 모드 중첩 원리와 라플라스 변환을 이용하면 충격에 의한 속도응답을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\dot{w}(x, \theta, t) = \sum_m \sum_n [F \Phi_m(x^*) \Phi_m(x) / N_m] \times [\cos n\theta^* \cos n\theta \cos(\Omega_{mn,1}t) + \sin n\theta^* \sin n\theta \cos(\Omega_{mn,2}t)] \quad (3)$$

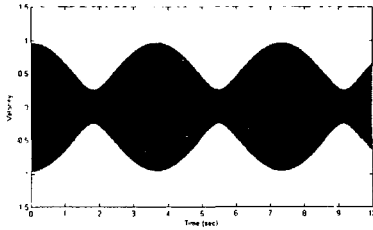
여기에서, $N_m = \pi a \int_0^L \rho h(x) \Phi_m^2(x) dx$, $\rho, h(x)$ 는 질량밀도와 셀두께, (x^*, θ^*) 는 타격 위치, F는 충격력 크기, $\Omega_{mn,1}, \Omega_{mn,2}$ 는 원주상에서 같은 절점수를 갖는 저차 및 고차의 모드 쌍(이하 L, H모드라 함)의 진동수를 의미한다. 이 모드쌍은 매우 근접한 고유진동수를 가지므로, 식(3)으로 표시되는 응답은 맥놀이를 보이게 된다. 그림 3.(a)는 원통 셀의 하부에서 본 n=2인 모드쌍(원주상에서 절점이 4개 나타나므로, (4,0)모드라 함)을 그린 결과이다. 가)에 표시된 위치를 타격하고 위치 3에서 구한 속도응답을 그림 (b)-(d)에 표시하였다. L, H모드의 절선상을 타격하는 경우, 어느 한 모드만 가진되므로, 모든 측정점에서 맥놀이는 관찰되지 않으며, 그 결과는 그림 3.(b)와 같다. L, H모드 절선의 어느 하나에 가까운 위치를 타격하면 그림 3.(c)와 같이 맥놀이는 선명하지 못하다. 한편, L, H모드 절점의 중앙을 타격할 때, 두 모드는 동일하게 가진 되므로, 그림 3.(d)와 같이 명확한 맥놀이를 보인다. 이러한 결과는 식 (3)에서 시간 t에 관한 두개의 함수가 더해짐으로써 발생한다. 성덕대왕 신종의 경우 현재의 당좌는 L모드의 절선에 약간 가깝기는 하나, L, H모드의 중앙에 거의 일치하고 있어 이상적인 선명한 맥놀이가 발생하고 있다.



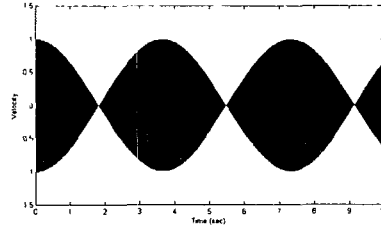
(a) 종의 타격지점



(b) $\theta = 0$ 타격



(c) $\theta = \pi/12$ 타격



(d) $\theta = \pi/8$ 타격

그림 3. 타격 위치에 따른 맥놀이 응답

(2) 이상적인 타격 음질

이상적인 종소리는 완벽한 맥놀이 기본 음을 가져야 하지만 동시에 그림 4와 같이 종의 기본 모드음과 고차모드 음의 스펙트럼 크기가 조화를 이루어야 하며 이들의 진동수의 비들도 조화를 이루어야 한다.

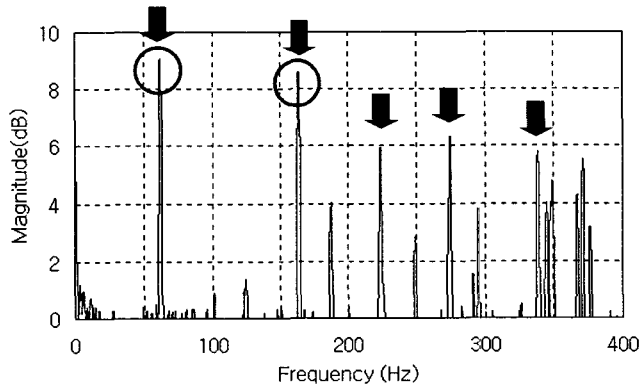


그림 4. 종소리의 스펙트럼 특성

성덕대왕 신종과 같이 20ton 내외의 크기의 대부분의 대종들은 1차 진동모드 음의 진동수가 60Hz내외로써 상당히 저주파의 진동수이므로 저음이고 비교적 고음으로 종소리의 청아한 느낌을 주는 2차 이상의 진동모드 음은 그 스펙트럼의 크기들이 작고 빨리 감소함으로써 전체적으로 무거운 저음의 종소리를 발생시킨다. 그러나 성덕대왕 신종의 경우에는 2

차 진동모드((3,0)모드)음의 스펙트럼의 크기가 기본음인 1차 진동모드 ((2,0)모드)음 보다 커서 초기 타격음을 포함해서 전체적으로 보다 고음의 성분을 갖게 되어 청아한 종소리를 발생시키고 있다. 본인과 지도학생이었던 정지덕 박사와의 공동연구에 의하면 하대의 두께와 종의 평균 두께의 비가 2:1 이상이 되어야 하고 종 하단으로부터 당좌까지의 거리(위치)가 전체 종 높이의 0.25배 이상이 되면 청아한 종소리를 갖게 된다는 것을 이상화된 수학적 모델에 대한 이론적 진동해석을 통하여 규명하였다. 즉 그림 5에 보인 바와 같이 하대 두께가 평균 두께보다 100%이상 증가하고 타격점인 당좌의 높이가 전체 높이의 0.25배보다 클 경우에 (3,0) 모드의 스펙트럼 크기가 (2,0)모드의 크기보다 커지게 되어 그림 6과 같이 최근에 주조된 타 대중에 비해 청아한 소리를 얻게 된다.

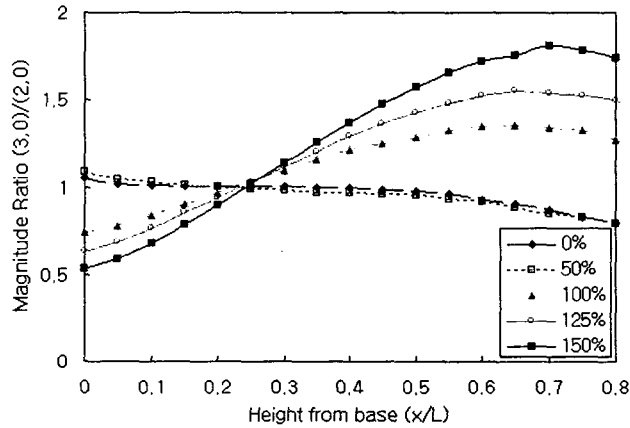


그림 5. 하대 두께의 증가에 따른 (2,0)와 (3,0) 모드 크기의 비

한편 이병호 박사의 종 음향 화음도 평가 방법에 의하면 성덕대왕 신종의 점수는 100점 만점에 86.6점으로 현존의 종소리 중 최고의 화음도를 보이고 있다.

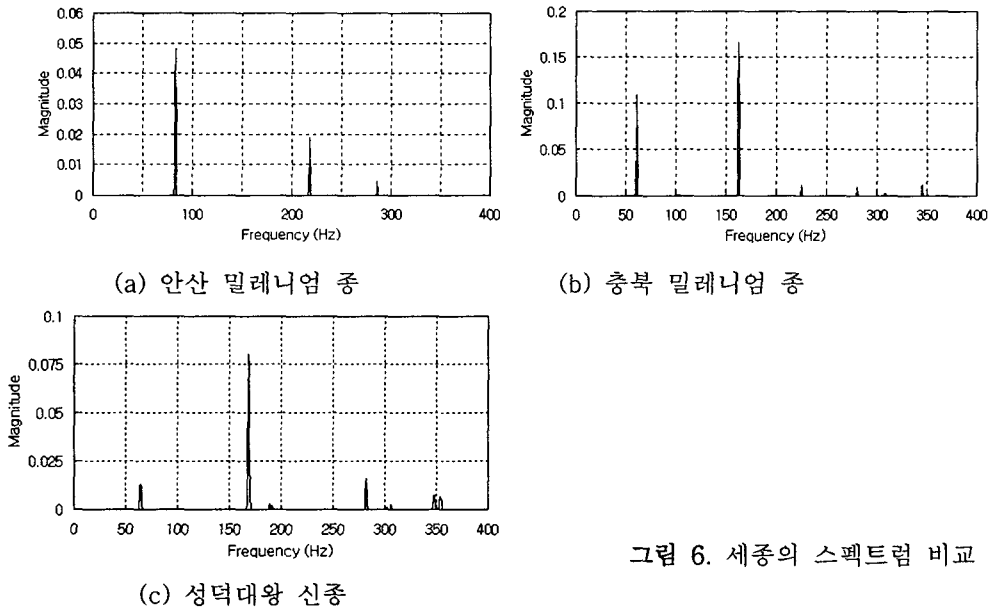


그림 6. 세종의 스펙트럼 비교

(3)신라종 고유의 음통과 이론적 높이

앞에서 설명한 바와 같이 음통은 용두와 함께 종하중을 지지하는 종걸이 역할을 하면서 만파식적, 즉 모든 파도를 잠재우는 피리의 소리, 세상에 평화를 가져오는 소리를 내는 피리를 상징적으로 나라의 보배인 성덕대왕 신종의 천판위에 상징적으로 설치한 것으로 판단된다. 그럼으로 한국과학기술원 명예교수인 이병호 박사가 유도한 방식에 따라 아래와 같이 기초 음향학 이론을 이용하면 종이 울릴때에 가장 크기가 큰 음인 171Hz의 (3,0) 모드음이 피리를 공명시킬 수 있는 조건, 즉 피리의 이상적인 길이를 구할 수 있다. 음통의 입력과 출력 임피던스를 Z_i 와 Z_o , 파형벡터를 K , 음통의 반경과 길이를 각각 a 와 l , 그리고 허수를 j 라고 할 때에 $Z_i \approx jZ_o \left(\frac{0.6Ka + \tan Kl}{1 - 0.6Ka \tan Kl} \right)$ 이 된다. 음통이 공명에 의해 종 소리를 통

과시키는 조건(피리 소리가 나게 하는 조건)은 Z_i 가 0이 되는 것이므로 반경 $a=0.075$,

$$Ka = \frac{2\pi f}{c} a = \frac{2\pi(171)}{344} (0.075) = 0.234$$

를 대입하면 다음과 같이 음통의 이상적인 높이

$l=96\text{cm}$ 를 구할 수 있다. 이는 실제의 음관의 높이 77cm와 일치하지는 않으나 어느 정도 근접한 값이라고 볼 수 있다.

(4)신라종 고유의 명동

성덕대왕 신종을 위시한 신라종에는 외국종에서는 볼 수 없는 특이한 것이 있다. 이것은 명동이라고 부르며, 그림 7과 같이 종 밑의 바닥에 적당한 크기의 구멍이를 파서 하나의 빈 음향공간을 만들고 종과 구멍이로 이루어진 내부공간(cavity)의 음향의 고유진동이 종의 고유진동과 연성되어 공명이 일어나도록하여 소리가 크게 나고 오래가도록 한 것이다. 이러한 기술은 자동차 내부 소음과 냉장고 압축기 소음을 해석하는데에 사용되는 최신 기술과 동일해서, 신라인이 어떻게 독창적이고 과학적이었을까 경탄이 저절로 나올 뿐이다.

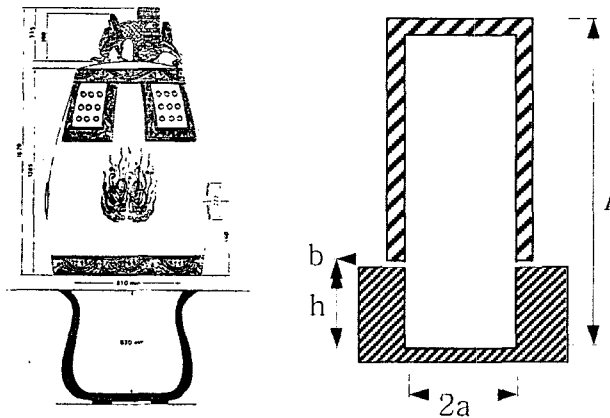


그림 7. 종 명동과 이상화된 모델

표 1. 성덕대왕신종의 이상화된 명동깊이

α_{mn}	f	171 Hz	
		$\alpha_{10} = 0.5861$	$\alpha_{20} = 0.9722$
1	x	x	1.54
2	x	x	6.36
3	x	0.47	-

5. 결 언

성덕대왕신종은 우리의 조상인 신라인들이 위대한 창조적 정신과 뛰어난 과학기술, 그리고 예술적 감각을 조화시켜 탄생시킨 세계적인 발명품이자 예술작품이며 우리의 자랑스러운 문화유산이다. 고 염영하 박사는 『에밀레종의 유래와 전설』이라는 글에서 신종을 다음과 같이 예찬하였다.

“1927년 5월 21일, 독일의 세계적인 고고학자 켈 벨 박사가 경주에서 이 신종을 보고 ‘이 종은 세계에서 제일이다. 독일에 이런 종이 있다면 이것 하나만으로도 능히 박물관이 될 수 있다.’고 말한 것만 보더라도 이 종이 얼마나 훌륭한 종인지를 짐작할 수 있다.”

이 위대한 성덕대왕신종을 진정으로 자랑스러워하고 우리의 세계적인 문화유산이 영구적으로 잘 보존될 수 있도록 하는 것은 물론 이 신종의 예술적·기술적 신비를 더욱 밝히고 발전시켜 나가는 것이 우리의 의무일 것이다.

<후기>

이 글은 고 염영하 교수님의 연구자료에서 발췌, 작성하여 저자가 1998년에 「한국사 시민강좌」 제 23집에 발표한 “성덕대왕신종”에 필자의 종의 진동-음향 연구 관련 자료를 보충하여 작성한 것이다. 고 염영하 교수님과 성덕대왕신종 연구 관계자 여러분에게 깊은 감사를 표한다.

6. 참고문헌

- [1] 염영하, 「한국범종에 관한연구(제7보 봉덕사종)」, 『범종』 6, 한국범종연구회, 1983, pp.1~34.
- [2] 염영하, 『한국종 연구』, 한국정신문화연구원, 1984.
- [3] 염영하, 『한국의 종』, 서울대학교 출판부, 1991.
- [4] 정명호, 「요명구의 종뉴에 관한 고찰」, 고 염영하 교수 추모학술대회, 1996.
- [5] 황수영, 「신라범종과 만파식적 설화」, 『범종』 5, 한국범종연구회, 1982, pp.1~6.
- [6] 염영하, 박재경, 윤종호, 「한국범종의 음관에 관한 기초 연구」, 『범종』 5, 한국범종연구회, 1982, pp.7~20.
- [7] 이병호, 「한국범종의 음향학적 연구」, 1983, pp.74~84.
- [8] 유흥준, 『나의 문화유산 답사기』.
- [9] 나형용, 「성덕대왕신종의 구조법에 대한 고찰」, 『성덕대왕신종 종합학술보고서』, 국립경주박물관, 1998
- [10] 『성덕대왕신종 종합학술보고서』, 국립경주박물관, 1998.
- [11] 염영하, 「한국종의 연구」, 한국 정신 문화 연구원, 연구보고 84-14, 1984.
- [12] 이장무, 염영하, 「중형구조의 진동특성에 관한 연구」, 『한국 범종 학회지』 3권(1980), pp. 31-38.
- [13] 이장무, 김석현, 「중형구조에 관한 연구」, 『한국 범종 학회지』 4권(1981), pp. 55-67.
- [14] J.M.Lee, Y.H.Yum and S.H.Kim, “A Study on the vibration and sound of bells with slight asymmetry”, 4th IMAC Proceedings (1981), pp.75-80.

- [15] R.Perrin and T.Charnly, "Studies with an eccentric bells", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 58(4)(1984), pp.517-525.
- [16] T.D.Rossing, "Vibration of bells", *Applied Acoustics*, Vol. 20(1987), pp.41-70.
- [17] 염영하, 이장무, 이영배, 나형용, 강춘식, 성평모, 강찬균, 『보신각 새종 설계제작에 관한 연구』, 서울대학교 공학연구소 연구보고서, 1985.
- [18] 전성하, 이장무, 염영하, 김석현, 「한국종의 진동 및 음향에 관한 연구」, 『대한기계학회지』 13권 3호(1989), pp397-403.
- [19] 염영하 외, 『대전 Expo'93 대종 설계에 관한 연구』, 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소 연구보고서, 1993.
- [20] 염영하, 이장무, 김석현, 「한국종의 맥놀이 교정에 관한 연구」, 『한국범종연구회지』, 16권(1994), pp81-88.
- [21] W.Soedel, "Vibration of Shells and Plates", Marcel Dekker, 1993.
- [22] J.S.Hong and J.M.Lee, "Vibration of circular rings with local deviation", ASME Transaction of the American Society for Mechanical Engineering, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.61(1984), pp. 3317-3322.
- [23] S.H.Kim, W.Soedel and J.M.Lee, "Analysisi of the beating response of bell type structures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 173(4)(1994),pp.517-536.
- [24] Y.H.Yum, J.M.Lee, K.M.Sung and S.H.Kim, "A study on the vibrational and acoustics characteristics of Korean bells", *WESTPRAC94 Proceedings* (1994), pp. 123-128.
- [25] S.H.Kim, J.M.Lee and S.J.Lee "A Study on the sound and vibration property of Korean bell", *Proceedings of the VIII International Congress on Experimental Mechanics*, 1996.
- [26] 김양환, 「음향진동측정을 통한 성덕대왕신종의 소리특성 탐구」, 보고서 자료, 1997.
- [27] 홍진선, 『미소 비대칭이 부가된 축대칭 쉘의 진동 및 음향에 관한 연구』, 서울대학교 박사학위논문, 1989.
- [28] 강상욱, 이장무, 김석현 「진동음향연성계의 모드특성에 대한 이론적 고찰」, 『한국자동차공학회』 95춘계학술회의 논문집, 한국자동차공학회.
- [29] 이장무, 「예술적, 공학적 탁월성 지닌 한국 범종」, 한국인(1998년 1월호)』 pp.90-93.
- [30] Y.H. Yum and J.M. Lee. "A study on the Vibration fo Korean Bells", *JSME(Japan Society of Mechanical Engineers) Vibrations Conference'85*, Tokyo(1985), pp.79-86.
- [31] Ji Deok Jeong, Jang Moo Lee, Hyoung Gil Choi, "A Study on the Vibration Characteristics of Cylindrical Shells with Local Thickness Deviations" *Tenth International Congress on Sound and Vibration*, Stockholm, Sweden(2003).
- [32] Jang Moo Lee, "Structure-Borne Sound of Various Systems: Key Note Address at Opening Ceremony", *The 32 International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Jeju International Convention Center, Seogwipo, Korea, August 25-28, (2003).
- [33] Jang Moo Lee, "The Devine Bell of King Songdok", *Korea Journal of UNESCO*. Vol. 39, No. 4, (1999).
- [34] J.M. Lee, S.H. Kim, S.J. Lee, J.D. Jeong and H.G. Choi, "A Study on the Vibration Characteristics of a Large Size Korean Bell", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 257, No. 4, (2003).