

보신각 신종의 음향분석에 관한 연구

두 세 진 성 광 모  
 서울대학교 공과대학 전자공학과

Acoustical Analysis of New-made BOSHINGAK-BELL

S. J. Doo , K. M. Sung

Dept. of Electronics Eng., Seoul National University

I. 서 론

보물 제2호 인 보신각 종이 균열로 인해 더 이상 라종 불가 능한 상태가 되었으므로 [4] 이를 대신할 새 보신각종을 제작하 지 않으면 안 되게 되었다. 이리하여 보신각 신종의 제작이 착수되었으며 1년여의 연구와 모형종 실험을 토대로 중량 약 20 ton, 최대 높이 378 cm의 보신각 신종이 구조되어 이제는 그 웅장한 음을 발하게 되었다.

본 연구에서는 제작된 보신각 신종의 음향 특성을 분석하고 평가함으로써 앞으로 대형 한국종의 제작에 일종의 방향과 기준 을 마련하고자 한다.

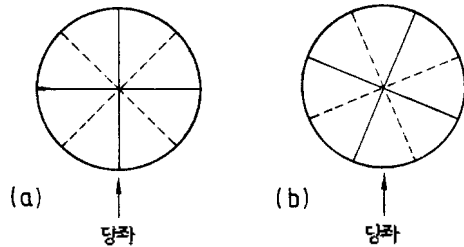
II. 종의 진동과 음향 발생

종 표면의 일부를 타격하여 진동시키면 이 때 종은 많은 서 로 다른 진동 mode로 진동하여 고유의 음색으로 음을 발하게 된다. 이 진동 mode는 보통 종의 상하 방향으로 형성되는 nodal line과 구순부와 평행하게 형성되는 nodal circle의 수로 표시한다. [1] [3] 예를 들면 (4, 1) mode는 종 표면에 종의 상하 방향 nodal line이 4개, 구순부와 평행한 nodal circle이 1개 존재함을 뜻한다. nodal line과 nodal circle은 각 mode로 종이 진동할 때 진동변위가 zero가 되는 점들을 이은 선을 말한다.

각각의 진동 mode는 서로 다른 고유의 주파수로 진동하는데 이 중 가장 낮은 주파수로 진동하는 mode는 (4, 0)mode이고 이것이 음의 fundamental을 이루게 되며, 그 다음으로 높은 주파수를 갖는 것은 (6, 0)mode로서 이것이 1st overtone 을 형성하게 된다. 뿐만 아니라 그 위의 higher overtone

들도 제각각의 진동 mode로 진동하는데 이 여러 주파수의 음 들이 중첩됨으로 종의 초기음색이 결정된다.

일정한 진동 mode에 있어서 그 antinode 부분에 nodal line을 갖는 같은 mode의 진동 mode가 존재할 수 있다. 즉 (그림 1)의 실선으로 표시한 것과 같이 (4, 0) mode의 nodal line이 형성되었을 경우 그 antinode에 또 다른 nodal line들이 점선으로 표시한 바와 같이 형성되어 또 하나 의 (4, 0) mode가 존재하게 된다. 종이 축에 대해 완벽한 대칭성을 가지지 못할 경우 이 두 (4, 0) mode는 약간 다른 주파수로 진동하게 되어 이 주파수 차만큼의 맥놀이를 갖게 된 다. [1] 하지만 타종 위치에 따라 맥놀이의 뚜렷한 정도가 달 라지는데 (그림 1)의 (a)와 같이 nodal line을 타격하면 하 나의 (4, 0) mode만 가진(excite)이 되어 맥놀이는 들리지 않게 되고 (b)와 같은 위치를 타격할 때 두 (4, 0)mode가 같은 크기로 가진 되어 뚜렷한 맥놀이를 듣게 된다.



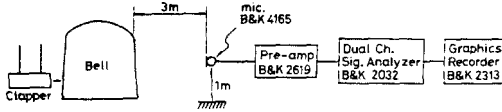
(그림 1) nodal line과 타종 위치

(a) 맥놀이가 없다. (b) 뚜렷한 맥놀이

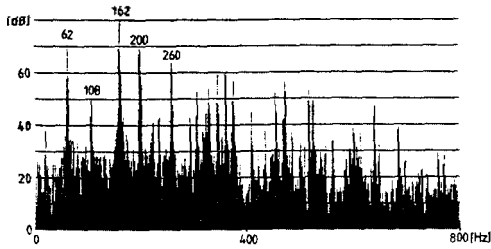
### III. 보신각 신종의 음향 분석

#### (1) Eigen-frequency와 초기 음색

보신각 신종의 음향 특성 중 우선 발생 주파수 성분의 분포와 그로 밀리암은 음색에 대해 알아보기 위하여 (그림 2)와 같은 측정장치를 하였다.



(그림 2) 보신각종 음향 분석을 위한 측정장치



(그림 3) 보신각신종의 초기 주파수 스펙트럼

Eigen-freq. [Hz]	ratio to (4.0)	Approx. to ET
62 (4,0)	1	B <sub>1</sub> +7.4cent
( 108	1.74	A <sub>2</sub> -31.7 )
162	2.61	E <sub>3</sub> -29.8
200	3.22	G <sub>3</sub> +35.0
259.5	4.18	C <sub>4</sub> -14.1
295	4.76	D <sub>4</sub> +7.8
308	4.97	D <sub>4</sub> #-17.4
331	5.34	E <sub>4</sub> +7.2
346	5.58	F <sub>4</sub> -16.0
361.5	5.58	F <sub>4</sub> #-40.2
376	6.06	F <sub>4</sub> +27.9
.	.	.
.	.	.

ET=Equal Temperament

(표 1) 보신각신종의 Eigen-frequency

(그림 3)은 당좌 타종 직후 1초간의 음향 signal로부터 얻어진 주파수 스펙트럼으로서 800 Hz 이하의 보신각신종 Eigen-frequency를 보여준다. 타종 직후에는 많은 진동 mode들이 가진되어 이와 같은 Eigen-frequency를 형성하며 모두 제각각의 주파수로 음을 발하게 되므로 이로 인해 종의 초기 음색은 결정된다.

(그림 3)에서 알 수 있듯이 보신각신종의 가장 낮은 주파수는 약 62 Hz이며 (4, 0)mode의 진동에 의한 것이다. 그 다음 1st overtone를 형성하는 것은 162 Hz로서 (6, 0) mode 진동에 기인하며, 그 위의 높은 주파수들도 각각 고유의 진동 mode에 따라 발생하는 것이다.

각 overtone들의 fundamental [(4, 0)mode]에 대한 주파수비와 overtone들을 평균률의 음으로 근사시켜 놓은 것을 (표 1)에 기록하였다.[2]

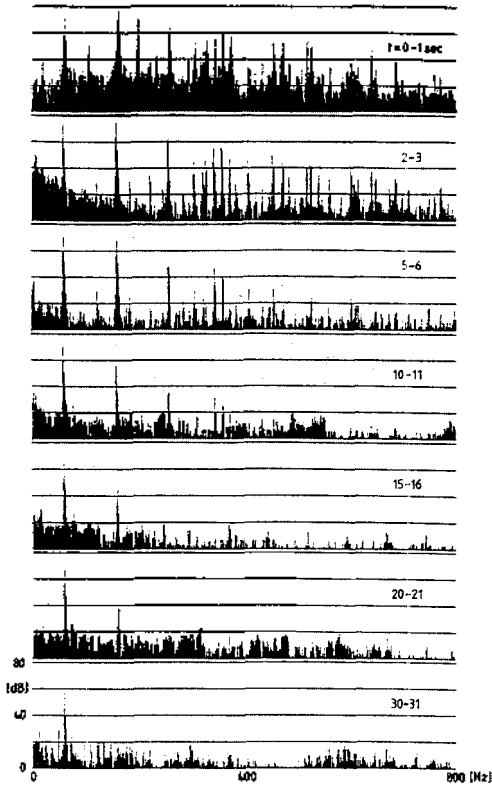
위에서 보인 바와 같이 타종 직후에는 Eigen-frequency의 거의 모두가 가진이 되어 대단히 많은 주파수의 성분이 중첩된 것이 종의 초기 음색을 결정하지만 이 모두가 decay rate가 달라 타종 후 상당동안까지 중요하게 고려해야 하는 것은 decay rate가 작은, 즉 비교적 오래 지속되는 주파수 성분이다. 실제로 (4, 0) mode가 decay rate가 가장 작고 그 다음이 (6, 0) mode이며, 보신각신종에 있어서 아들간의 음정은 옥타브위 장3도와 완전 4도의 중간으로 정확히 말하면 1st overtone은 fundamental에 대해 옥타브 위의 완전 4도-38cent의 음을 형성하고 있다.

#### (2) 주파수 성분의 시간적 변화

타종 직후 발생된 많은 진동 mode는 decay rate가 서로 달라, 시간이 지남에 따라 각 주파수 성분의 크기가 달라지게 되고 이로 말미암아 종의 음색도 변하게 된다. 타종 후 약 30초간의 시간에 따른 주파수 성분의 크기 변화를 측정하여 (그림 4)에 나타내었다. 높은 주파수 성분들은 비교적 짧은 시간에 급격히 감소하나 decay rate가 주파수에 비례하지는 않는다. 타종 후 20초 경에는 실질적으로 (4, 0)mode와 (6, 0)mode의 진동만 남게 되고 약 30초 후에는 overtone 들은 감쇠해 없어져 fundamental인 (4, 0)mode로만 진동하게 됨을 알 수 있다.

#### (3) nodal line, 맥놀이의 측정

한국종에서는 특히 적당한 맥놀이가 요구된다. 또한 맥놀이 들 이루는 두 주파수 성분의 크기가 같아 뚜렷한 맥놀이를 나



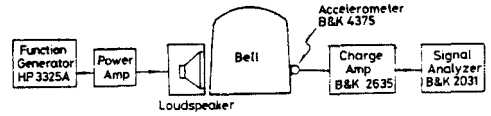
(그림 4) 주파수 성분의 시간적 변화

타내는 것이 바람직하다. 따라서 당좌위치의 적합 여부를 알기 위해서는 nodal line의 위치를 찾지 않으면 안 된다.

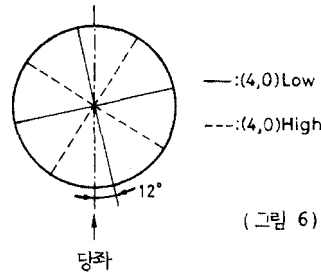
(그림 5)에 nodal line을 찾기 위한 장치를 보였다. 각 mode마다 고유의 주파수로 진동하므로 Loudspeaker를 이용하여 해당하는 mode의 고유주파수의 음을 발생시키고 공기를 통하여 종을 공진시키어 하나의 mode로 진동시킨 뒤 nodal line을 찾았다. 이렇게 하여 얻은 보신각 신종의 (4, 0) nodal line은 (그림 6)에 보인 바와 같다. 주조 직후의 nodal line의 위치는 (4,0)mode 중의 하나가 당좌를 지나고 있어서 바람직하지 못한 상태에 있었으나, 종 내부의 적절한 위치의 두께를 조절함으로써 (그림 6)의 상태를 얻게 되었다. 한편 (4,0)mode의 맥놀이 주파수는 (그림 7)로부터  $(62.179-61.922) \text{ Hz} = 0.257 \text{ Hz}$ 임을 알 수 있다.

(4) (4,0), (6,0)mode의 감쇠특성

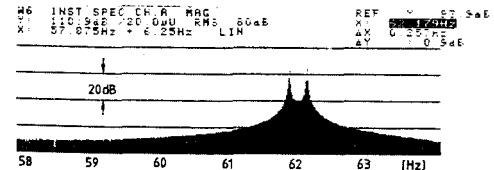
앞서 언급한 바와 같이 많은 Eigen-frequency들은 decay rate가 다르다. 이 중 (4,0)mode의 fundamental과 (6,0)mode의 1st overtone이 가장 decay rate가 작은 성분으로, narrow band filtering을 통해 이들의 감쇠특성을



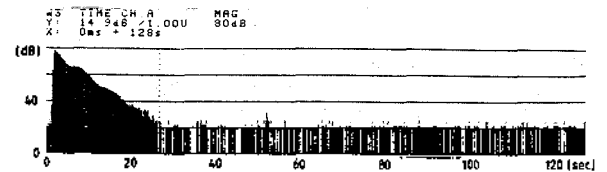
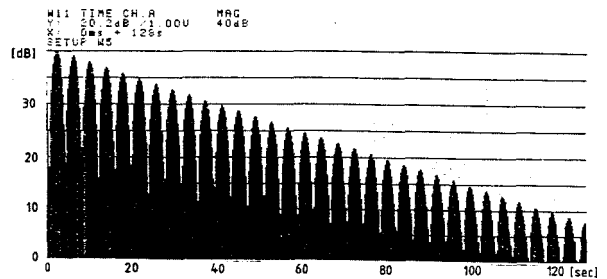
(그림 5) nodal line 추적 장치



(그림 6) 보신각신종의 (4,0) nodal line



(그림 7) (4,0) mode의 주파수



(그림 8) (4,0)와 (6,0)mode의 감쇠특성

조사하였다. (그림 8)에 표시된 바와 같이 60dB 감쇠하는데 걸리는 시간이 (4,0)mode는 약 4분, (6,0)mode는 약 25초임을 볼 수 있다.

(4,0)mode가 (6,0)mode 보다도 60dB 감쇠시간이 약 9.6배나 길어 종의 많은 진동 mode 중에서 가장 우세하며 따라서 가장 중요하게 다루어져야함을 알 수 있다. 종의 여운이 길다

고 하는 것은 바로 이 (4,0)mode가 오래 지속되는 것을 의미한다. (4,0)mode의 이러한 긴 여운으로 인하여 맥놀이(beat)에 있어서도 (4,0)mode의 맥놀이가 가장 중요한 역할을 한다.

#### IV. 결 론

보신각신종은 기본음 62Hz의 극내 최저음을 발하는 종으로서 [5], 60dB 감쇠에 약 4분의 긴 여운을 가지고 있다. (4,0) mode와 (6,0)mode 간에는 완벽한 화음을 이루고 있진 않으나 그 주파수 비가 3인 서양종에 비해 독특한 음향을 가지고 있다. 또한 (4,0)mode가 (6,0)mode에 비해서도 9.6배의 긴 여운을 가져 이 또한 서양의 종과는 매우 다른 특징으로 볼 수 있다. 보신각신종의 수정 후 당좌 위치는 뚜렷한 맥놀이를 들릴 수 있는 위치이다.

종의 음향 특성을 평가함에 있어서는 주관적인 요소가 많이 작용하게 된다. 보편 타당성이 있는 평가를 위해서는 통계적인 선호도에 대한 연구가 있어야 하겠으며, 특히 본 연구의 결과 앞으로 한국종 제작의 방향을 제시하기 위하여는 다음과 같은 연구가 더 수행되어야 할 것으로 생각된다.

- (1) 주파수에 따라서 가장 적절한 맥놀이 수와 그 뚜렷한 정도를 찾는다.
- (2) 가장 적합한 (6,0)와 (4,0)의 주파수 비율 결정한다.
- (3) 종의 여운에 관계되는 재질 및 구조의 연구 등.

#### 참 고 문 헌

- [1] Rossing, T.D., H.J.Sathoff, "Modes of Vibration and Sound Radiation from Tuned Handbells", JASA 68, pp.1600-1607
- [2] Slaymaker, F.B., W.F.Meeker, "Measurements of the Tonal Characteristics of Carillon Bells", JASA 26, pp.515-522
- [3] Rossing, T.D., "Tuned Handbells, Church Bells and Carillon Bells", Overtones 29:1), pp.27-30
- [4] 염 영하, "한국 범종에 관한 연구(제5보 보신각종)", 범종 No.4, pp.27-34
- [5] 염 영하, "한국 범종에 관한 연구(제7보 봉덕사종)", 범종 No.6, pp.1-34