

## 성덕 대왕 신종 내부 음장 및 울림통이 신종의 소리에 미치는 영향과 새로운 울림통 크기의 제안

### The effect of internal sound field and resonator on radiating sound of King Song-Dok bell: proposing effective size of resonator

김 양 한\*, 박 순 홍\*, 김 시 문\*  
(Yang-Hann Kim\*, Soon-Hong Park\*, Sea-Moon Kim\*)

#### 요 약

서기 771년(신라, 해공왕 7년)에 주조된 성덕 대왕 신종은 지면으로부터 약 50cm떨어지게 설치되어 있으며 지면에 울림 통을 가지고 있다. 이 울림통은 일종의 공명기의 역할을 하여 종 내부와 함께 성덕 대왕 신종의 고유한 소리 특성에 영향을 줄 것이라 예측되어 왔다[1, 2, 3]. 본 논문에서는 이를 규명하기 위한 내부 음장의 3차원 측정 실험을 소개하고 있으며 울림통이 종소리에 끼치는 영향을 단순하나 물리적 현상을 대표하는 모델을 이용하여 설명하고 있다. 이러한 해석 방법을 기초로 하여 새로운 울림통의 크기를 제안하고 있다.

#### ABSTRACT

The famous King Song-dok Bell which was cast in A.D.771, during Silla dynasty has significant size of concave cavity which acts as Helmholtz resonator on the ground. To see the effect of this cavity and the bell's internal acoustic cavity on radiating sound of bell, three dimensional measurement of internal sound field was performed. In this paper, the detail measurement procedure and results are carefully addressed. The effect of the cavity on the radiating sound of bell is investigated using simple and physically representative model. A new size of cavity is proposed.

#### I. 머리말

우리나라 범종, 특히 신라 및 고려시대 범종의 가장 큰 특징 중 하나는 일종의 공명기(resonator)의 역할을 하리라 예측되는[1, 2, 3] 울림통(동공)을 지면에 파고 바로 그 위에 종을 매어단, 종과 울림통의 배열일 것이다(여러가지 형태의 동공 및 관련 자료의 분석은 우리나라 범종 관련 분야의 역작인 참고 문헌[1]을 참고 하기 바람). 서기 771년(신라, 해공왕 7년)에 주조된 성덕 대왕 신종(속칭, 에밀레종)도 예외는 아니어서 다른 동서양의 종과는 달리 지면으로부터 약 50cm떨어진 위치에 종의 하대(下帶)가 위치하고 있다(현재 경주국립박물관의 경우임). 참고 문헌[2]에서는 성덕 대왕 신종이 다른 범종과 유사한 음향 진동 특성, 즉 저주파 맥놀이 현상으로 대표할 수 있는 소리 특성을 갖고 있으나, 특히 그 여음이 다른 범종에 비하여 긴 점과 그 원인을 상세히 밝히고 있다. 또한 맥놀이 현상은 종 자체가 갖고 있는 비대칭성이 주된 원인이며

1개의 맥놀이 주파수만이 있는 것이 아니라 종의 공진 주파수 모두가 주파수 쌍을 이루고 있고 이들이 각각 다른 맥놀이 주파수를 갖고 있음을 실험 데이터를 근거로 기술하고 있다. 이 오랜 여음에 관해서는 신종의 울림통을 포함한 내부 음장의 특성이 이 주파수 성분의 소리를 효과적으로 저장, 방출하여 주는 역할을 하므로써 가능할 것임을 설명하고 있다.

본 논문에서는 이러한 관점의 근간이 되는, 보다 상세한 내부 음장 관련 실험 결과를 소개하고, 울림통의 종소리에 끼치는 역할을 단순하지만 물리적 현상을 대표하는 모델을 이용하여 설명하고 있다.

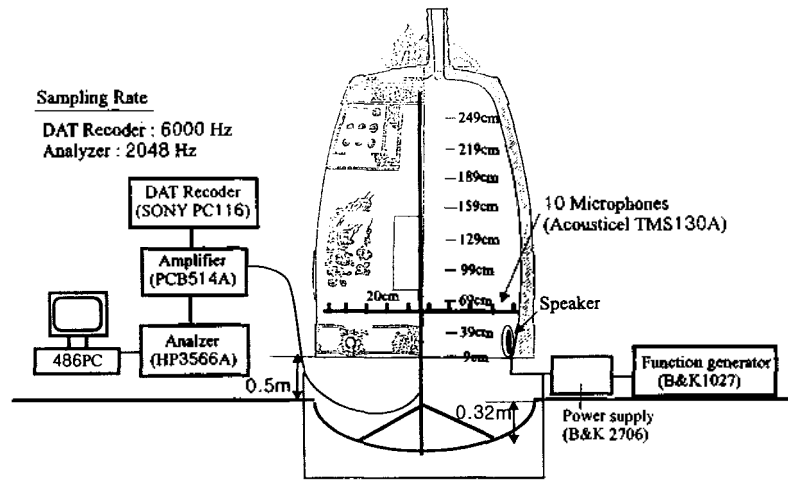
#### II. 실험 장치 및 측정 방법

성덕 대왕 신종의 내부 음장을 파악하기 위해서는 Fig. 1과 같이 종 내부에 스피커를 설치하고 이를 백색 잡음(white noise)으로 가진 후 마이크로폰 어레이를 이용하여 내부 음장의 측정을 수행하였다. 측정 위치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 원주 방향으로 45도의 간격, 종의 길이 방향으로는 30cm간격으로 총 9개의 위치에서 측정하였다.

\* 한국과학기술원 기계공학과  
접수일자: 1997년 4월 1일

음장의 측정을 위해 이용한 마이크로폰은 10개의 PCB 130A를 이용하였는데(자세한 특성은 Fig. 1 참조), 길이 방향으로 종의 반경이 변하는 점을 고려하여 Fig. 2와 같이 2가지의 마이크로폰 어레이용 지그(jig)를 제작하여 사용하였다. 종 길이 방향의 처음 6점은 한쪽 봉의 길이가 90cm인 지그를 이용하였으며 그 이상의 높이에 있는 3점은 한쪽 봉의 길이가 60cm인 지그를 이용하여 측정하였다. 이때 종의 길이 방향과 반경 방향의 마이크로폰 사이 간격은 각각 30cm와 20cm가 된다. 따라서, 길이 방향의 마이크로폰 간격에 의하여 측정 가능한 최대 주파수는 약 560Hz인 셈이며, 반경 방향은 약 850Hz가 이 측정 시스템으로 측정 가능한 내부 음장 모우드의 한계값인 셈이다. 이것은 참고 문헌[2]에서 밝히고 있듯이 주된 신종 소리의 주파수 범위를 충분히 포함하고 있다. 한편, 스피커는 음향 모우드의 절점(node)을 피하기 위해 종의 아랫단에 설치하였으며 이로부터 100도 떨어진 위치에 B&K type 4134 마이크로폰을 두어 기준 마이크로폰으로 하였다. (Fig. 1 참조) 기준 마이크로폰의 위치는 가능한 측정하고자 하는 모든 음향 모우드의 절점에 위치하여서는 안된다는 위치에 대한 고려와, 음향 모우드의 정밀한 계

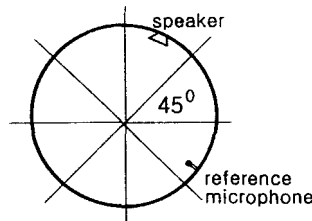
산(예측)을 위하여 위상의 기준이 되는 점이라는 것이 고려되어야 한다. 따라서 사용되는 마이크로폰은 동적 범위(dynamic range)가 클 뿐 아니라, 주변 환경 조건에 강건하여야 한다. 모우드 해석을 위한 각 측정점간 주파수 응답함수는 HP3566A 32채널 신호 분석기(32채널 동시 샘플링, 동적 범위 72dB, 최대 32768Hz 샘플링, 최대 측정 주파수 범위 0Hz~12.8kHz, 최대 입력 전압 10V)를 이용하였으며 주파수 범위는 신종 소리의 주파수 범위[2]를 고려하여 0~800Hz로 정하였다. 주파수 분해도는 1Hz가 선택되었다. 사실 참고 문헌[2]에서 상세히 논술하고 있는 맥놀이 주파수(1차 맥놀이 주파수: 약 0.3Hz, 2차 맥놀이 주파수: 약 0.1Hz)의 분해도를 보장하는 측정이 필요하다는 관점이 있을 수 있으나, 사실 종 내부 음장 자체가 어떠한 비대칭성에 의한 맥놀이 현상을 낼 가능성은 없으므로 분해도 선택에 문제는 없다고 판단하였다. 내부 음장의 가전을 위해서는 신호 발생기(B&K type 1207 sine random generator, frequency range 2Hz~200kHz, signal: sine, random, pink, band noise)를 이용하여 2Hz~2kHz의 백색 잡음을 발생시켰으며 파워 증폭기(B&K type 2706 power amplifier, Max.output: 75VA



종 내부의 음향특성 파악을 위한 실험장치 (신호발생기에서 만들어진 백색잡음을 기준신호로 하여 스피커를 가진시키고, 10개의 측정용 마이크로폰으로 구성된 마이크로폰 어레이를 이용하여 종의 길이방향으로 9지점의 평면상에서 측정하였음)

마이크로폰의 Specifications

| Acoustical TMS130A     |             |
|------------------------|-------------|
| Response               | Free-field  |
| Sensitivity            | 125 mV/Pa   |
| Frequency Range (+1dB) | 10Hz ~10kHz |
| Dynamic Range          | < 140dB     |



종 내부에서 20cm 간격으로 배열된 마이크로폰 어레이를 45도 간격으로 회전시키면서 측정하였음

Fig. 1. 종의 내부 음장 측정을 위한 실험 장치(스피커를 이용하여 종 내부에 백색잡음을 발생시킨 후 10개의 마이크로폰으로 이루어진 마이크로폰 어레이를 종 내부에서 45도 간격으로 회전시키면서 높이 방향으로 9개의 평면상의 음압분포를 측정하여 DAT Recorder에 저장함과 동시에 Analyzer로 음향 신호를 분석하였음.)

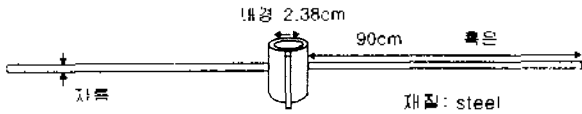


Fig. 2 내부 음장 측정을 위한 마이크로폰 어레이 지그(jig). 길이 방향으로 종의 반경이 변하는 점을 고려하여 처음 6 점은 한쪽 봉의 길이가 90cm인 지그를 이용하였으며 그 이상의 높이에 있는 3점은 한쪽 봉의 길이가 60cm인 지그를 이용하였다.

(15volt, 5ampere))와 지름 14cm의 저주파용 스피커(GS-FOSTER, Max.output 30W, resistance 8ohm, 14cm diameter)를 이용하였다.

### III. 실험 결과

실험을 통해 얻은 주파수 응답 함수에서 상관 함수(coherence function) 값이 1에 가까운 6개의 주파수 성분에 대해 종 내부의 3차원 음장을 그림으로 나타내고 이를 해석하였다. 기준 마이크로폰에서 측정된 파워스펙트럼으로부터 주파수들을 선정하고 그 상관 함수 값을 Table 1에 나타내었다. 1보다 작은 상관 함수를 갖는 데이터는 모우드의 해당 고유 절점에 1개 이상의 마이크로폰이 위치하였을 경우로 생각할 수 있다. 선택한 주파수는 1에 가까운 상관 함수를 가지는 주파수들로 24Hz, 67Hz, 199Hz, 223Hz, 380Hz, 478Hz의 성분이고 이에 대해 각 측정 평면을 종의 길이 방향으로 배열하여 음장 분포를 나타내었고 또한 이해를 돕기 위해 종의 아랫단에서 0.99m 위치(z=0.99m 평면)의 원형 평면에서의 음장 분포와 타종 위치를 포함하는 길이 방향의 평면에서의 음장 분포(y=0m 평면)도 아울러 나타내었다.

Table 1. 성덕 대왕 신종의 내부 음장 측정; 측정 고유 진동수 분포와 기준 마이크로폰과의 상관 함수(coherence function)

| 측정 고유 진동수 (Hz) | 상관함수값 | 측정 고유 진동수 (Hz) | 상관함수값 |
|----------------|-------|----------------|-------|
| 24             | 0.99  | 245            | 0.45  |
| 67             | 0.95  | 284            | 0.39  |
| 114            | 0.49  | 305            | 0.15  |
| 180            | 0.15  | 350            | 0.30  |
| 199            | 0.96  | 358            | 0.74  |
| 209            | 0.67  | 364            | 0.59  |
| 223            | 0.93  | 380            | 0.94  |
| 235            | 0.49  | 478            | 0.89  |

Fig. 3은 24Hz에서의 음장 분포를 나타내는데, 종 내부의 음장이 모두 동일 위상으로 진동함을 알 수 있다. 가상적으로 종 내부를 한쪽 끝단이 막히고, 다른쪽 끝단이 열린 원통형 공동으로 생각하고 모우드의 표현을 (길이 방

향의 모우드 순서, 원주 방향의 모우드 순서, 반경 방향의 모우드의 순서)로 표현한다면 이는 (1, 0, 0) 모우드에 해당된다. 여기에서 길이 방향의 모우드 순서는 0, 1, 3, 5,...의 값으로 표시하기로 한다. 그리고, 원주 방향의 모우드 순서는 절지름(nodal diameter), 반경 방향의 모우드 순서는 절원(nodal circle)의 수를 나타낸다. 이 주파수는 가청 영역의 주파수는 아니나, 성덕 대왕 신종의 타종시뮬로 느낄 수 있는 종 내부 음장의 첫번째 공진 주파수이다. Fig. 4는 67Hz에서의 종 내부의 음장 분포를 나타낸다. 길이 방향으로는 하나의 절점(node)이 생기며 원주 방향과 반경 방향으로는 절점이 없으므로 (3, 0, 0) 모우드임을 알 수 있다. Fig. 5는 199Hz에서의 종 내부 음장 분포인데 길이 방향으로 세 개의 절점이 생기는 것을 살펴볼 수 있다. 따라서 (7, 0, 0) 모우드임을 알 수 있다. (5, 0, 0) 모우드는 관측하지 못하였다. Fig. 6은 233Hz에서의 종 내부의 음장 분포를 나타내는데, 길이 방향과 원주 방향은 절점이 없고 모두 동일 위상이나 반경 방향으로 하나의 절점이 나타나므로 (1, 0, 1) 모우드임을 알 수 있다. Fig. 7은 380Hz에서의 종 내부 음장 분포를 나타내는데, 길이 방향으로는 절점이 없으나 원주 방향으로 2개의 절점이 나타나며, 반경 방향으로는 1개의 절점이 나타남을 보여준다. 즉 (1, 2, 1) 모우드임을 알 수 있다. Fig. 8에서는 478Hz에서의 종 내부의 음장 분포를 나타내는데, 길이 방향으로 2개의 절점, 원주 방향으로 3개의 절점이 나타나고 있다. 그러나, 반경 방향으로는 절점이 없는 것

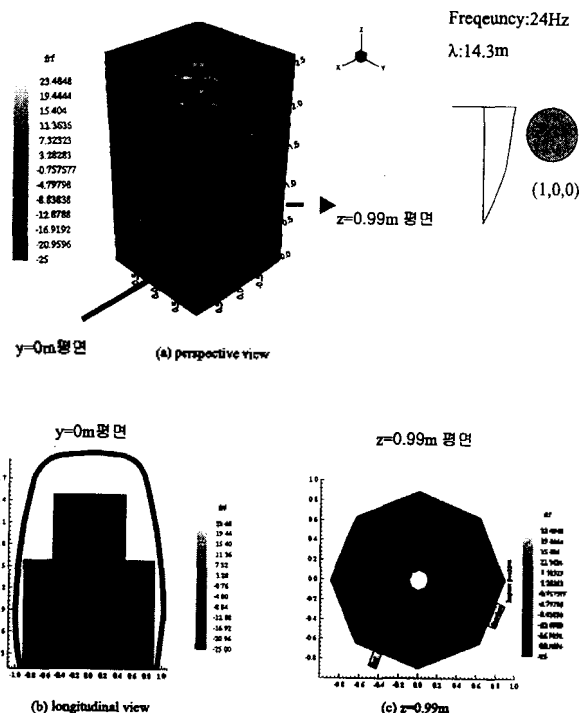


Fig. 3 24Hz에서의 내부 음장의 3차원 음장 분포도. 기준 마이크로폰에 대한 주파수 응답함수(FRF)를 나타내었으며 값 자체는 의미가 없음.

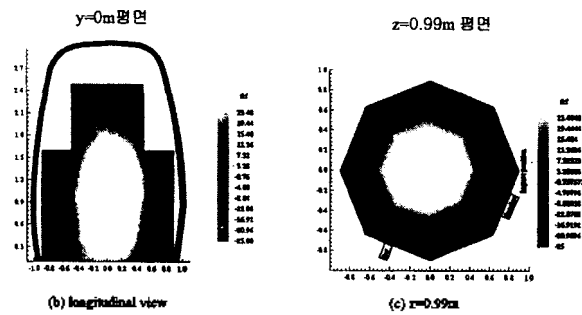
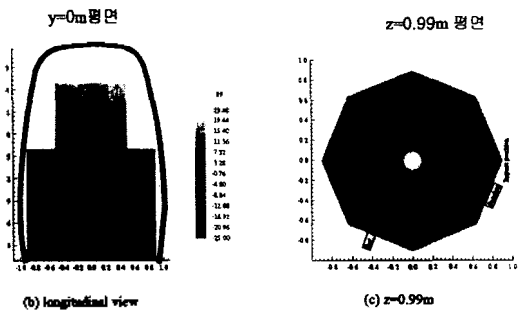
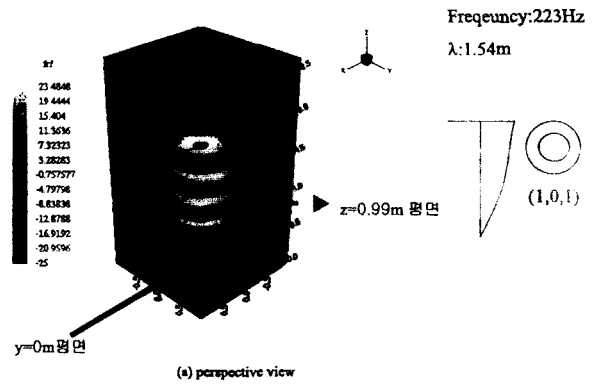
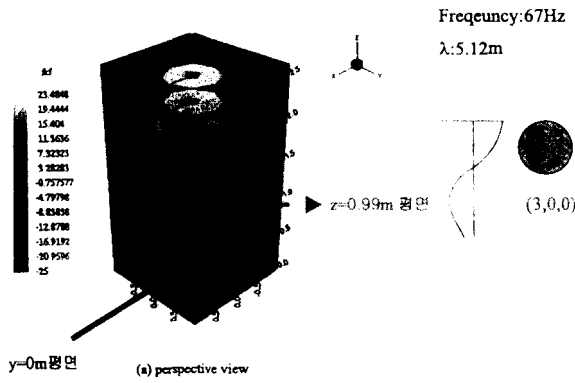


Fig. 4 67Hz에서의 내부 음장의 3차원 음장 분포도. 기준 마이크로폰에 대한 주파수 응답함수(FRF)를 나타내었으며 값 자체는 의미가 없음.

Fig. 6 223Hz에서의 내부 음장의 3차원 음장 분포도. 기준 마이크로폰에 대한 주파수 응답함수(FRF)를 나타내었으며 값 자체는 의미가 없음.

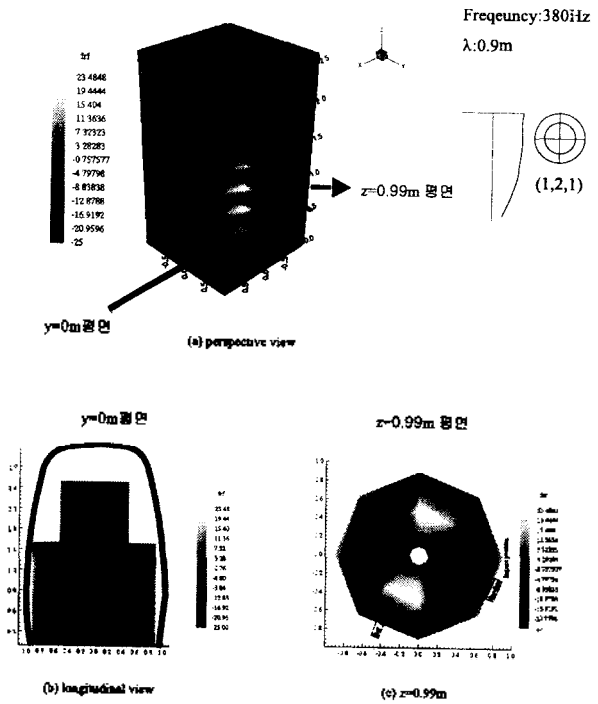
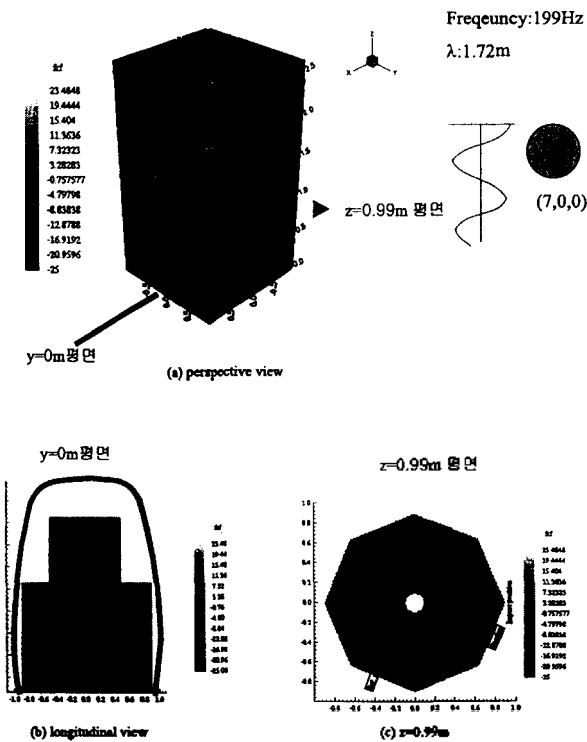


Fig. 5 199Hz에서의 내부 음장의 3차원 음장 분포도. 기준 마이크로폰에 대한 주파수 응답함수(FRF)를 나타내었으며 값 자체는 의미가 없음.

Fig. 7 380Hz에서의 내부 음장의 3차원 음장 분포도. 기준 마이크로폰에 대한 주파수 응답함수(FRF)를 나타내었으며 값 자체는 의미가 없음.

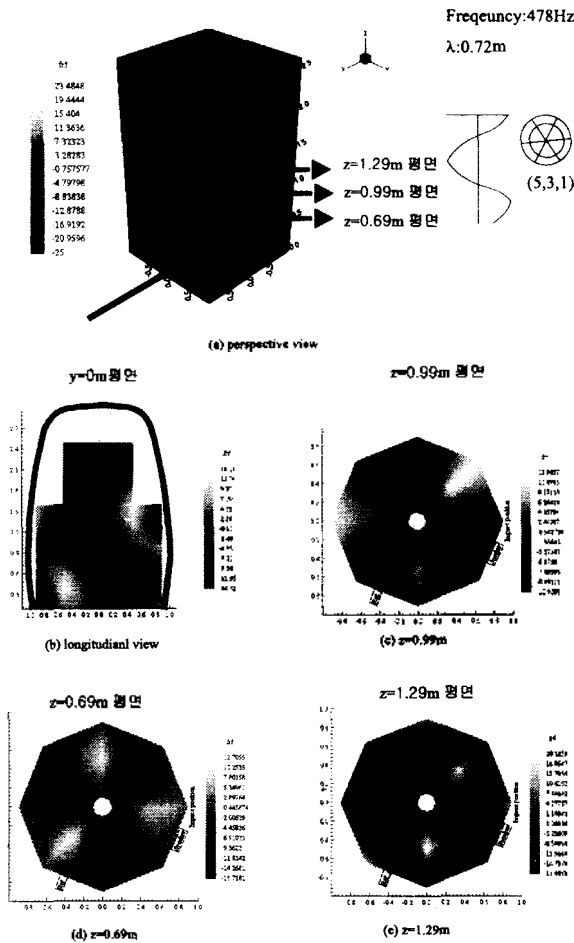


Fig. 8 478Hz에서의 내부 음장의 3차원 음장 분포도. 기준 마이크로폰에 대한 주파수 응답함수(FRF)를 나타내었으며 값 자체는 의미가 없음.

처럼 보이거나 이 평면이 내부 반경이 가장 큰 평면이므로 측정 위치 외부에 절점이 있을 가능성도 무시할 수 없다. 즉 Fig. 8(d), (e)에서 나타난 바와 같이 종 아랫단에서 0.69m의 위치( $z=0.69m$  평면)와 1.29m의 위치( $z=1.29m$  평면)에서 측정한 음압 분포를 살펴보면 반경 방향으로 하나의 절점이 있는 것을 확인할 수 있으며 (5, 3, 1) 모드임을 알 수 있다. 각 모드들의 고유 진동수 분포를 보면 비교적 균일한 분포 즉, 모드 밀도를 갖고 있음을 알 수 있으며, 이들의 비율이 종의 음색과 밀접한 관련이 있음을 짐작할 수도 있다. 그러나, 참고 문헌[4, 5]에서 밝히고 있는 신종의 진동 음향 모우드의 해당 주파수 즉 고유 진동수와는 많은 차이가 있는 점에 주목할 필요가 있다.

IV. 극한 경우의 설정을 통한 울림통 해석

일반적으로 일치하고 있지 않으나 종 내부 및 울림통에 의한 고유 진동수 중, 종의 음향 및 진동 측정시 나타나는 가장 두드러진 고유 진동수(64Hz)[1, 2]에 근접한 진동수는 67Hz이다. 이상적으로 내부 공간의 고유 진동수

와 종의 고유 진동수가 일치하는 경우에 종의 진동과 종 내부의 공기가 공명 되어 좋은 울림, 즉 긴 여음을 낼 것임을 생각 할 수 있다. 이것은 현재 종 내부의 고유 진동수인 67Hz가 종 자체의 고유 진동수인 64Hz(사실은 64.06Hz와 64.37Hz 두개의 쌍을 이루고 있는 고유 진동수 [2])로 변화되어야 함을 의미하고 있다. 이러한 내부 음장의 변화, 즉 고유 진동수의 변화를 가져올 수 있는 유일한 방법은 종의 하대 부근의 임피던스 변화에 의한 종 내부 공기의 유효 길이(effective length)의 변화를 이용하는 것이다. 이 유효 길이 변화는 종과 지면 사이의 거리, 울림통의 크기, 주파수 등에 관계할 수 있음은 자명한 사실이다. 사실 방사 음장의 초기 여음을 형성하고 있는 또 다른 주파수, 즉 168.31Hz와 168.43Hz[2, 4, 5]의 경우도 내부 음장의 3번째 고유 진동수 199Hz보다 낮은 값이다.

이와 관련된 연구를 살펴보면 1966년에 종과 울림통 및 그 사이의 공간을 양 끝이 막힌 원주형 공동으로 가정하고 제 1 고조파 성분인 171Hz-본 실험과 함께 수행된 음향, 진동 실험에서는 168Hz로 측정되었다. [2]-를 갖기 위한 울림통의 크기를 계산한 연구가 있다. [3] 이 방법은 종과 울림통 사이의 공간으로 음파가 거의 빠져나가지 않는다는 가정하에 그 치수가 산출되었는데, 이는 종과 울림통 사이의 공간 및 울림통을 동시에 고려했을 때 이들이 종에 대해 가지는 유효 길이(effective length)가 울림통의 길이와 종과 울림통 사이의 거리의 합으로 표현됨을 의미한다. 이러한 가정은 대체적으로 신종의 소리 중 관심의 대상이 되는 주파수가 상당히 저주파인 점을 감안하면 무리 없는 접근 방법이라 할 수 있다. 그러나, 엄밀하게는 이러한 상태에서의 유효 길이는 그 구체적인 임피던스의 측정이 이루어지지 않고는 그 가정의 실효성을 검증하기는 어렵다. 특히 상당히 미세한 주파수의 변화(이 경우는 67Hz에서 64Hz로의 변화)를 울림통과의 관계에서 고려하는 상황에서는 보다 엄밀한 접근 방법이 필요할 수 있다.

4.1 기본 가정 및 극한 경우의 설정을 통한 울림통에 대한 정성적 고찰

현재의 성덕 대왕 신종은 지표에서 약 0.5m 떨어져 매 달려 있으며, 그 아래 부분에 깊이 0.32m의 구의 일부 형태를 지닌 울림통을 가지고 있다(Fig. 1). 울림통과 연결하여 관심 있는 고유 진동수는 67Hz이고, 이 주파수에 해당되는 내부 음장 모우드는 측정 결과(Fig. 4)로부터 쉽게 알 수 있듯이 길이 방향으로 하나의 절점을 가지는 형태이다. 이는 종과 울림통 사이의 공간과 울림통에 의해 실제 종의 내부의 길이에 더해지는 유효 길이를 고려했을 때 갖는 가상적 관내의 정재파(standing wave)로 생각할 수 있다. 결국 울림통 및 울림통과 종 사이의 빈 공간으로 인한 유효 길이의 변화가 생기고 이를 고려한 종의 길이 방향 모우드가 결정되는 셈이다. 울림통의 치수 변화는

따라서 종 내부 음장의 변화, 고유 진동수의 변화를 주는 주된 인자임을 알 수 있다.

우선 현재 관심의 대상이 되는 고유 진동수 67Hz의 파장은 약 5.12m임에 주목할 필요가 있다. 이 길이는 종의 단면 치수들과 울림통의 치수보다 훨씬 크다. 즉 종의 단면 변화에 해당 주파수 부근의 주파수는 크게 영향 받지 않을 것이라는 추측을 할 수 있다. 따라서 Fig. 9와 같이 종과 울림통을 일종의 등가 원통형 공동(cylindrical cavity) 형태로 생각하여 볼 수 있을 것이다. 종 내부 및 울림통의 체적은 등가계에서 보존되도록 생각하는 것이 타당할 것이다. 도면(1)을 참고로 계산된 종 내부 체적( $V_1$ )은  $7.60m^3$ 이며, 울림통의 체적( $V_2$ )은  $1.15m^3$ 이다. 종과 울림통의 반경은 역시 해당 주파수가 반경 방향에 대한 영향보다는 전체 체적에 대하여 민감한 점을 고려하면 동일한 것으로 생각할 수 있다.

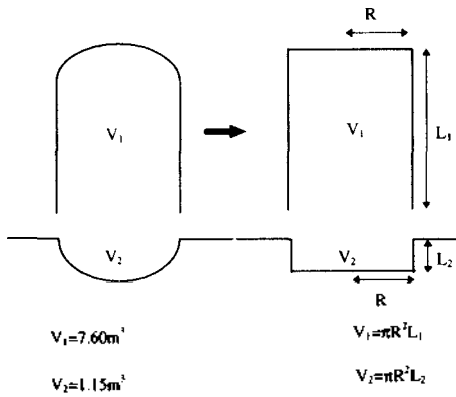


Fig. 9 종 내부 및 울림통을 체적이 동일한 등가계(원통형 공동)로의 변환

종과 울림통을 이상과 같은 물리적 상황을 고려한 접근, 즉 보다 단순한 등가계로의 치환과 아울러 고려해야 할 사항은 종의 유효 길이에 영향을 미치는 또 하나의 요인, 즉 종과 울림통 사이의 거리이다. 이 거리의 효과는 사실 종의 진동, 내부 음장 등과의 연성 관계에 의하여 나타날 것이고 따라서 정확한 계산이 용이하지 않다. 그러나 분명한 사실은 현재의 혹은 조정될 종과 울림통 사이의 간격은 두개의 극한적 경우의 사이에 있을 것임은 명백하다(Fig. 10). 즉, 첫번째 극한 경우로는 종과 울림통 사이의 공간이 없을 경우를 생각할 수 있으며, 두 번째는 정반대로 종과 울림통 사이의 거리가 무한히 먼 경우를 가상할 수 있다. 첫번째 경우에서 절점이 하나 생기는 모우드의 고유 진동수를  $f_{high}$ , 두 번째 경우에서 절점이 하나 생기는 고유 진동수를  $f_{low}$ 라 하면 실제 상황에서 나타나는 고유 진동수  $f$ 와는 다음의 관계가 성립한다고 가정할 수 있다.

$$f_{high} > f > f_{low} \quad (1)$$

물론 이 가정은 등가 원통형 공동(체적이 보존되는)으로 변환된 종 내부 및 울림통의 유효 반경( $R$ )과 변환된 종 내부 유효 길이( $L_1$ ), 변환된 울림통의 유효 길이( $L_2$ )에 따라 성립하지 않는 경우가 있음을 알 수 있다. 예를 들어 종 내부 및 울림통의 유효 반경을 종 내부의 최대 반경과 최소 반경의 평균치(0.822m)로 선택한 경우에는  $f_{high} = 83.3Hz$ ,  $f_{low} = 63.2Hz$ ,  $f = 67Hz$ 로 식(1)을 만족한다. 그러나,  $L_1$ 을 실제 종 내부 길이로 선택하고 계산하면  $f_{high} = 101.8Hz$ ,  $f_{low} = 74.1Hz$ ,  $f = 67Hz$ 로 식(1)을 만족하지 않는다. 만일 식(1)의 가정이 성립하는 범위 내에서 원하는 고유 진동수를 가지게 하는  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $R$ 을 구하면 이것이 울림통의 크기를 정하여 주는 1차 척도가 될 것임을 알 수 있다. 고유 진동수( $f$ )는 또한

$$f_{high} = f > f_{low} \quad (2)$$

$$f_{high} > f = f_{low} \quad (3)$$

과 같은 2가지 극한 경우를 가질 수 있을 것이며 이 두개의 부등식이 등가 원통형 공동의 추정을 위한 정성적인 방향을 제시할 수 있을 것임을 상상할 수 있다.

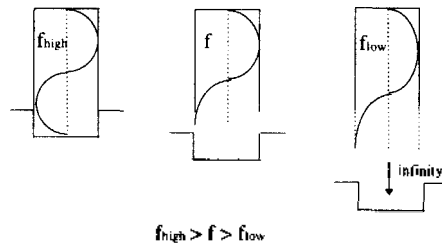


Fig. 10 종과 울림통 사이의 간격이 가질 수 있는 두 가지 극한적인 경우. 현재 혹은 조정될 종과 울림통 사이의 간격은 이 두 가지 극한적 경우의 사이에 존재함.

#### 4.2 등가 울림통의 크기의 계산

등가 울림통의 크기를 계산하는 방법을 찾기 위하여, 측정된 고유 진동수 67Hz를 가질 수 있는 울림통의 유효 길이를 산출해 보고 이것을 64Hz로 변화시키기 위해서 현재의 울림통에 비해 얼마나 그 크기가 변화되어야 하는지를 살펴보기로 한다.

먼저 실제 고유 진동수( $f$ )를 식(2)의 극한 경우에 대입하여 추측하는 경우는, Fig. 11에 표현된 바와 같이 양 끝단이 막힌 원통형 공동에 한 파장의 정제파가 형성될 때 해당하는 고유 진동수를 얻는 경우와 같다. 즉,

$$L_{1H} + L_{2H} = \lambda \quad (4)$$

여기서, 아래 첨자 H는 식(2)의 극한 경우를 적용할 때 나타나는 종 내부 및 울림통의 치수임을 표현한다. 한편 원통형 공동으로 가정하였으므로 종 내부 체적( $V_1$ ) 및 울림

통의 체적( $V_2$ )은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$L_{1H} = \frac{V_1}{\pi R_H^2} \tag{5}$$

$$L_{2H} = \frac{V_2}{\pi R_H^2} \tag{6}$$

여기서  $R_H$ 는 종 내부 공동 및 울림통의 변환 후 반경을 나타낸다.

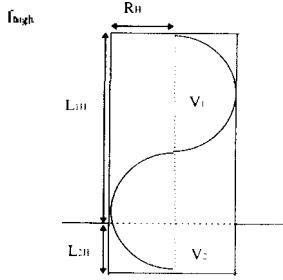


Fig. 11 첫번째 극한적 상황. 종과 울림통 사이의 공간이 없는 경우로 측정된 고유 진동수(67Hz)보다 큰 고유 진동수를 보여준다.

이제 식(4), (5), (6)을 이용하여 원통형 공동으로 표현된 종 내부 유효 길이( $L_{1H}$ ), 울림통의 유효 길이( $L_{2H}$ ), 반경( $R_H$ )을 종 내부 체적( $V_1$ )과 울림통의 체적( $V_2$ )으로 나타내고 이를 파장에 대해 정규화(normalization)하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{1H}/\lambda &= \frac{V_1}{V_1 + V_2} \\ L_{2H}/\lambda &= \frac{V_2}{V_1 + V_2} \\ R_H/\lambda &= \sqrt{\frac{V_1 + V_2}{\lambda^3 \pi}} \end{aligned} \tag{7}$$

한편 식(3)을 만족하는 극한 경우는 Fig. 12에 나타낸 것처럼 울림통의 효과는 무시할 수 있으며 종 내부를 한쪽 끝 닫은 막히고 다른 쪽 끝 닫은 열린 원통형 공동으로 생각하는 경우이다. 이 경우 끝 단에서의 길이 보정은 평면파의 경우 반경의 0.6배이므로[6] 보정된 종 내부의 유효 길이에 따라 3/4 파장의 정재파가 형성될 경우이다. 즉,

$$L_{1L} + 0.6R_L = 3\lambda/4 \tag{8}$$

를 만족한다. 이때 아래 첨자 L은 식(3)의 극한 경우임을 나타낸다. 체적이 보존되어야 하므로

$$L_{1L} = \frac{V_1}{\pi R_L^2} \tag{9}$$

이 성립되어야 하고, 따라서 식(8)을 식(9)에 대입하면

$$0.6\pi R_L^3 - \frac{3}{4}\lambda\pi R_L^2 + V_1 = 0 \tag{10}$$

과 같은  $R_L$ 에 관한 3차 방정식을 얻는다.

식(10)에서  $R_L$ 을 구하면  $L_{1L}$ 은 식(9)에서 얻을 수 있으며  $L_{2L}$ 은 체적이 보존된다는 가정에 의하여 식(11)로부터 얻을 수 있다.

$$L_{2L} = \frac{V_2}{\pi R_L^2} \tag{11}$$

따라서 식(9), (10), (11)과 식(7)으로부터  $L_1/\lambda$ ,  $L_2/\lambda$ ,  $R/\lambda$ 가 가질 수 있는 범위를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{V_1}{\pi\lambda R_L^2} < L_1/\lambda < \frac{V_1}{V_1 + V_2} \\ \frac{V_2}{\pi\lambda R_L^2} < L_2/\lambda < \frac{V_2}{V_1 + V_2} \\ \sqrt{\frac{V_1 + V_2}{\lambda^3 \pi}} < R/\lambda < R_L/\lambda \end{aligned} \tag{12}$$

이로부터 67Hz의 고유 진동수를 갖는 현 상황에서  $V_1 = 7.60m^3$ ,  $V_2 = 1.15m^3$ ,  $R_L = 0.85m$ 을 대입하면

$$\begin{aligned} 0.65 < L_1/\lambda < 0.87 \\ 0.10 < L_2/\lambda < 0.13 \\ 0.14 < R/\lambda < 0.17 \end{aligned} \tag{13}$$

을 얻을 수 있다. 즉, 현재의 울림통은 이를 원통형 공동으로 표현하였을 때 반경 0.74m~0.85m, 길이 0.51m~0.67m가 됨을 알 수 있다.

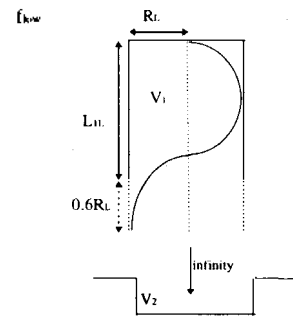


Fig. 12 두번째 극한적 상황. 종과 울림통 사이의 공간이 부한 이 면 경우로 측정된 고유 진동수(67Hz)보다 작은 고유 진동수를 보여준다.

이제 고유 진동수를 67Hz에서 64Hz로 변화시키는 경우는 종 내부의 체적은 변화 없이 울림통의 체적 변화가 있는 경우이므로 종 내부의 체적이 주어지면 구할 수 있는  $R_L$ ,  $L_{1L}$ 을 살펴보면 각각 0.83m, 3.53m임을 알 수 있다. 그러나, 다른 치수들은 울림통의 체적  $V_2$ 의 함수가

된다. 만약 식(12)의 상한과 하한을 점점 좁혀서 식(2)와 식(3)의 극한 경우를 동시에 만족하는 울림통의 크기를 선택한다면 이는 종이 울림통으로부터 떨어진 거리에 무관하게 고유 진동수가 정해지는 경우이며 이 경우 제시하고자 하는 울림통 체적의 한 값이 될 수 있을 것이다 즉  $L_1/\lambda$ ,  $L_2/\lambda$ ,  $R/\lambda$ 의 상한과 하한의 차이가 0이 되는  $V_2$ 는 세 식에서 모두  $3.96m^3$ 이며 이는 현재 울림통 체적의 3.46배에 해당한다. 이때 울림통의 유효 반경은 0.83m이고 유효 길이는 1.83m가 되며, 종 내부의 유효 길이는 3.53m이다. 한편 이는 앞서 예시한 67Hz의 고유 진동수를 가지는 경우에서 유효 반경을 종 내부의 최대 반경과 최소 반경의 평균으로 선택했을 때 얻은 종의 유효 길이 3.58m와 유효 반경 0.82m와 크게 다르지 않다. 즉 울림통의 체설계로 고유 진동수를 변화시키고자 하는 경우이므로 종 내부의 유효 반경과 길이는 크게 변화하지 않는 것이 타당하다고 볼 수 있으므로 계산된 울림통의 새로운 치수는 타당성을 지닌다고 볼 수 있다.

V. 결 론

성덕 대왕 신종의 내부 음장의 측정을 통하여 고유 주파수별 모우드를 가시화 할 수 있었고, 종의 진동 및 음향 실험에서 얻은 기본 고유 주파수와는 3Hz의 차이가 있음을 알 수 있었다. 이 차이를 없애기 위해 새로운 울림통의 크기를 제시할 수 있는 방법의 하나로써 극한 경우들의 설정을 이용한 접근을 시도하여 보았다. 이러한 결과는 추후에 이루어질 수 있는 새로운 종각 구조의 설계와 음향 특성에 미치는 영향을 평가하는데 중요한 기초가 될 것으로 기대한다.

감사의 글

귀중한 데이터를 취득할 수 있는 기회를 준 국립 경주 박물관의 관장님 이하 여러분께 감사드립니다. 또한 이러한 조사에 협조를 아끼지 않은 (주)종근당과 기호기획에도 감사드립니다. 또한 이러한 실험에 참여할 수 있도록 하여 주신 경희대학교 진용욱 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그러나 무엇보다도 이러한 귀중한 실험을 위하여 면밀한 실험 계획을 세우고, 예비 실험을 수행하고, 또 현장에서 애쓴 실험실의 대학원생들, 박연규, 윤두병, 김영기, 전영두 등 박사과정 학생과 남경욱, 임민홍 등 석사과정 학생, 그리고 금년 봄에 졸업한 권휴상 박사 그리고, 박수경, 김용조 이들에게 이 논문의 모든 것이 속함을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. 엄영하, "한국의 종," 서울대학교출판부, 1991.  
 2. 김양한, "음향 진동 측정을 통한 성덕 대왕 신종의 소리 특성 탐구," 한국음향학회 논문집 투고, 1997. 3.

3. 이병호, "한국 범종의 음향학적 연구(II)," 이병호 교수 기념 논문집(II), pp. 79-87, 한국과학기술원, 1989.  
 4. 김양한, 김시문, "원통형 음향 홀로그래프를 이용한 성덕 대왕 신종의 방사 음장 특성 분석," 한국음향학회 논문집 투고, 1997. 3.  
 5. 김양한, 박연규, 김영기, "성덕 대왕 신종의 3차원 진동 신호 측정과 분석 결과," 한국음향학회 논문집 투고, 1997. 3.  
 6. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics third edition*, chap. 9, John Wiley & Sons, 1982.

▲김 양 한(Yang-Hann Kim) 1950년 8월 21일생  
 현재:한국과학기술원 기계공학과 교수  
 (1988년 제7권 5호 참조)

▲박 순 홍(Soon-Hong Park) 1972년 8월 3일생  
 1994년 2월:한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학사)  
 1996년 8월:한국과학기술원 기계공학과(석사 과정)  
 현재:한국과학기술원 기계공학과 박사과정

▲김 시 문(Sea-Moon Kim) 1970년 9월 21일생  
 1992년 2월:한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학사)  
 1994년 8월:한국과학기술원 기계공학과(석사 과정)  
 현재:한국과학기술원 기계공학과 박사과정