

## 성덕대왕 신종의 3차원 진동신호 측정 및 분석 결과

### 3-Dimensional Vibration Measurement and Analysis of King Song-Dok Bell

김 양 한\*, 박 연 규\*, 김 영 기\*  
(Yang-Hann Kim\*, Yon-Kyu Park\*, Young-Key Kim\*)

#### 요 약

성덕대왕 신종에 대한 연구 초점 중의 하나로 2개의 근접한 주파수에 의해 발생하는 맥놀이 현상을 들 수 있다. 본 논문은 이러한 맥놀이 현상이 종의 어떠한 진동형태로부터 기인하는지를 실험데이터를 이용해 살펴보고 있다. 진동신호의 측정은 종 표면에 고르게 분포된 108개의 지점에서 가속도계를 이용해 측정하였다. 시간 영역과 주파수 영역에서 각각 신호를 분석하였으며, 800Hz 이내에 존재하는 12개의 측정된 모드 형태를 그림으로 나타내었다.

#### ABSTRACT

Beating phenomenon which is generated by two closely located natural frequencies is one of the research tenet for King Song-Dok bell. In this paper, we investigate the vibration shape of these natural frequencies using very extensive experimental data. Vibration signals are sampled at 108 points around the bell using accelerometers. Measured signals are analyzed in time and frequency domain. Twelve natural mode shapes under 800Hz are plotted.

#### I. 서 론

일명 애민레종 또는 봉덕사종으로 불리우는 성덕대왕 신종의 음향특성은 그 독특한 울림으로 인하여 문화재적, 예술적 관심뿐만 아니라 학문적으로도 많은 관심의 대상이 되어왔다.<sup>1)</sup> 특히 음향학적 측면에서는 신라, 고려 시대 주조된 범종이 가지고 있는 독특한 종의 요소, 즉 명동(울림동) 및 음통(音筒)등이 종소리에 미치는 영향에 대한 구체적인 규명 등, 많은 관심이 있어 왔다.

신종 소리의 특성은 평가하는 사람에 따라 그 표현이 다를 수 있으나 대체적으로 공통된 부분은 맥놀이 현상(heating), 즉 근접한 2개의 주파수가 존재함으로써 발생하는 현상으로 이해할 수 있다. 따라서 신종에 대한 연구 초점 중의 하나는 이러한 맥놀이 현상의 구체적인 규명에 있을 것이다. 본 논문은 이러한 맥놀이 현상이 종의 어떠한 진동형태로부터 기인하는지를 구체적으로 살펴 보고 있다.

맥놀이 현상의 원인은 참고문헌<sup>2), 3)</sup>에서 밝히고 있듯이 종의 기하학적, 혹은 역학적 비대칭성에 의하여 발생된다. 참고문헌<sup>3), 4)</sup>에서는 이러한 현상 규명을 위해 종의 모델을 제작하고 이를 기본으로 한 실험 및 유한 요소법을 이용한 해석을 통하여 맥놀이 현상에 미치는 영향을 체

계적으로 분석하고 있다. 성덕대왕 신종의 소리가 가지고 있는 맥놀이 현상도 이러한 원주 방향의 비대칭성에 기인함은 자명한 사실일 것이다, 과연 이러한 비대칭성에 의한 종의 진동 모양(달림 모양)이 구체적으로 어떤 모습이며, 종의 각 부위, 즉 방좌, 비천상, 유곽 등과는 어떠한 관계가 있는지를 알 수 있는 자료는 불행히도 찾아 볼 수 없다. 이러한 자료는 종의 진동을 정밀하게, 필요한 종 표면의 위치들에서 측정한 실험데이터의 형태이거나, 종의 정교한 역학적, 기하학적 정보를 기반으로 한 수치적 해석 데이터의 형태가 되어야 할 것이다. 후자의 경우는 불성치 자체의 측정을 위해서 필수적인 시편 채취가 신종이 가지고 있는 문화재적 가치면에서 허용될 수 없는 사항이다. 결국 가능한 방법은 정밀한 계측에 의한 신종의 진동 모양 규명이 연구의 방향이 될 수 밖에 없다.

참고문헌<sup>5)</sup>에서 상세히 밝히고 있듯이 이러한 귀중한 신종에 대한 현상 실험이 1997년 9월 13일에 이루어졌으며, 이 실험에서 얻어진 진동 데이터를 기본으로 한 상세한 분석결과를 2장의 측정 방법, 3장의 실험 및 고찰에서 정리하고 있다.

#### II. 측정방법

종의 경우 가진력이 타봉에 의한 충격(impact)의 형태로 가해지므로, 타종시의 응답이 곧 종의 고유특성을 나타낼 수 있는 충격응답(impulse response)이 된다. 따라서

\*한국과학기술원 기계공학과  
접수일자: 1997년 4월 1일

진동신호의 측정을 위해서 별도의 기준신호는 사용하지 않았으며, 실제 타종시의 진동신호를 종의 전표면에 고르게 분포시킨 108개의 지점에서 측정하였다. 종의 타점(당좌)이 고정되어 있으므로, 가진 되지 않는 모우드(mode)가 발생할 수 있는 가능성을 완전히 배제할 수 없으나, 관심의 대상이 타종시 방사되는 진동 모양, 즉 진동 모우드이므로 이 부분에 대한 상세한 검증은 제외하였다. 종의 응답 특성의 정확한 파악을 위하여는, 매 타종시 타종에 의한 충격력의 측정이 필수적이라고 할 수 있으나, 이는 현실적으로 불가능하였다. 따라서, 본 연구에서는 종 표면에 기준 신호 측정용 가속도계를 부착하여 측정된 기준 진동신호에 대한 다른 지점에서 측정된 신호의 상대적 크기 및 위상차를 고려하여 진동 모우드를 측정하는 방법을 사용하였다. 이것은 매 타종시 가진되는 진동의 고유진동수 및 진동 모양은 같을 것이라는 비교적 받아들일 수 있는 가정위에 실험을 수행한 것이다.

Fig. 1에 종의 형상과 종 표면에서의 진동 측정지점 및 실험 장치를 나타내었다. 타종 시간의 제약(3시간<sup>11)</sup>)으로 인해 12방향의 각도에서 측정하였으며, 길이(종의 높이 방향)방향으로는 원주방향의 센서사이의 간격을 고려해 30cm 간격으로 9개의 측정위치를 선정하였다. 일회 타종시 9개의 가속도계(PCB 353B16)를 장착하여 동시에 신호를 수집함으로써, 총 12번의 타종을 통해 108 지점에서의 가속도 신호를 수집할 수 있었다. 기준신호는 타점의 반대 방향에서 측정하였으며, 그 위치는 Fig. 1의 좌표계를 사용하였을 경우 (180°, 0.43m)에 해당한다. 신호의 취득은 DAT(Digital Audio Tape, Sony PC116, sampling rate: 6kHz/Channel)를 이용해 기록하였으며, 추후 해석을 위해 2048Hz의 샘플링 주파수로 60초의 신호를 다시 샘플링하였다. 샘플링 주파수는 진동의 진동 데이터가 대체적으로 800Hz미만에 주요 성분이 있는 점을 감안하였으며, 데이터의 길이 60초는 가능한 높은 주파수 분해능(resolution)을 얻기 위하여 채택하였다.

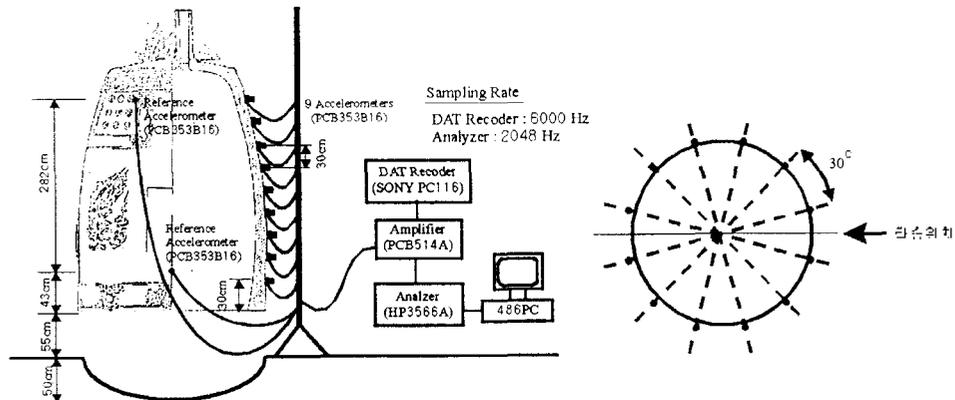


Fig. 1. 종의 진동측정을 위한 실험장치 (9개의 가속도계로 이루어진 가속도계 어레이를 종의 둘레방향으로 30도씩 돌아가면서 측정하였고, DAT Recorder에 저장함과 동시에 주파수 분석기로 진동신호 분석)

### III. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 시간에 따른 신호관찰

Fig. 2는 대표적인 시간신호의 한 예로서 1회 타종시의 기준신호를 나타낸 것이다. 일반적인 구조물의 충격응답 함수와 비교하여, 특징적으로 관찰되고 있는 현상은 약 5초후부터 관찰되는 맥놀이 현상이라 할 수 있다. 맥놀이 현상은 근접한 두개의 주파수성분이 상호 보강 및 상쇄 현상을 반복함에 의해 나타나는 현상으로, 우리나라 범종의 음향학적 특징을 결정짓는 주요 인자로 알려져 있다.<sup>12)</sup> Fig. 2에서 관찰되는 맥놀이의 대략적 주기는 약 3초임을 알 수 있으며, 이것은 주파수 영역에서 약 0.3 Hz의 차이를 갖는 두 성분에 의한 것임을 알 수 있다.

초기 약 50초까지의 특성을 좀더 자세히 살펴보기 위하여 시간에 따른 주파수 성분의 변화를 살펴보면 Fig. 3과 같이 정리할 수 있다. Fig. 3은 1회 타종시 기준 신호

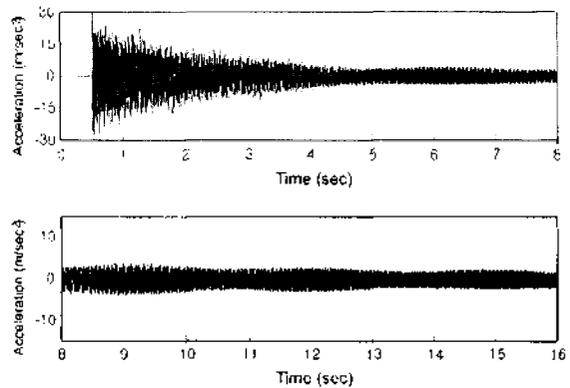


Fig 2. 시간에 따른 진동신호: 종의 밑에서 43cm 위쪽에 위치한 기준용 가속도계 신호(Sampling rate: 2048Hz, 종의 타격 순간에는 큰 신호가 나타나다가 시간이 지나면서 점차 줄어들고 있으며 맥놀이가 발생함을 알 수 있음)

로 사용된 위치(Fig. 1)에서 측정된 가속도 신호의 스펙트로그램(spectrogram)이다. 초기진동에 많이 참여하였던 고주파 성분들이 시간이 지나면서 급격히 감소하는 반면 64Hz 근방의 주파수 성분은 상대적으로 긴 시간동안 유지되고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이 성분은 Fig. 2에서 관찰되었던 맥놀이 성분의 두 주파수에 해당하지만 Fig. 3에서는 주파수 분해능의 제한으로 인해 하나의 피크(peak)로 나타나고 있다. 진동의 중요한 성분들이 감소하는 정도를 살펴보기 위하여 각 피크들의 크기가 시간에 대하여 감소하는 정도를 실험 데이터를 이용하여 구하고 이를 Table. 1에 정리하였다. 가장 높은 주파수 성분이 가장 많은 감소를 하고 있는 것을 명쾌하게 알 수 있으며, 이로부터 신호의 음이 타종 후 시간이 지남에 따라 소리 특성이 변화하는 보다 구체적인 원인을 알 수 있다.

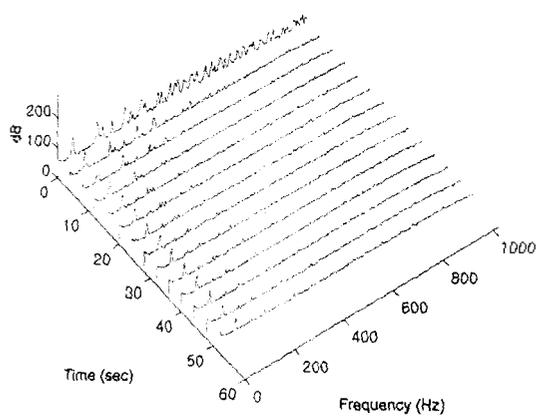


Fig. 3. 시간-주파수에 따른 진동 및 음향신호의 분포(Spectrogram): 60초 동안의 신호를 4초씩 분할하여 주파수 해석을 한 것으로, 타종 초기에는 고주파수까지 고루 가진되었으나 시간이 지나면서 점차로 중-고주파수 대역의 신호는 사라지고 저주파수의 대략 64Hz와 168Hz 성분은 오래 지속됨을 알 수 있음

Table. 1 시간에 따른 각 고유주파수의 레벨 감소(Window length: 2sec)

Time(sec)	8Hz	16Hz	32Hz	64Hz
0-2	194.4dB	110.6dB	111.5dB	109.6dB
2-4	109.2	102.0	94.7	89.8
4-6	102.6	87.9	85.7	79.3
6-8	101.4	88.4	76.8	68.7
8-10	101.3	88.6	67.6	58.4
Decay(0-10)	3.1	25.0	36%	52.2

3.2 기준 신호의 파워 스펙트럼(power spectrum)

측정된 신호는 충격가진에 의한 신호이므로 비정상상태(non-stationary)신호에 해당한다. 따라서 파워 스펙트럼은 여러번의 실험에 의한 푸리에 변환의 기대값을 취하여 얻을 수 있을 것이다. 그러나, 본 실험의 경우 하나의 측정지점에 대해, 타종회수가 한번으로 제한되는 상

황이므로 이러한 방법을 사용할 수 없다. 본 실험에서는 스펙트럼을 정상상태(stationary)신호에 대해 수행하는 방법인 구간별 푸리에 변환의 기대값을 통하여 추정하는 방법(Battlet's procedure<sup>[4]</sup>)을 사용하였다. 이 경우 스펙트럼의 절대적 크기는 평균 통의 계산에 의해 의미를 상실하지만, 각 지점간의 상대 위상 및 크기에는 영향이 없다. 파워 스펙트럼의 계산에 있어, 근접한 두 주파수 성분을 구별해 내기 위한 고려로 창문 함수(window function)의 크기는 16초로 하였으며, 이 경우 주파수 영역에서의 분해능은 0.0625Hz로 0.3Hz의 맥놀이 주파수를 해석하는데 충분한 양이 된다.

Fig. 4는 1회 타종시 기준 진동신호에 대한 파워 스펙트럼을 나타낸다. 또한 Fig. 5는 주요 피크값 주변에 대한

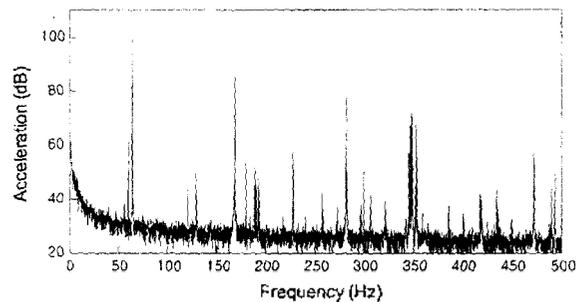


Fig. 4. 주파수에 따른 진동-음향 신호 분포: 진동신호의 파워스펙트럼(종의 밑에서 43cm 위에 위치한 기준용 가속도계 신호, sampling rate: 2048Hz, 분해능: 1/16Hz)

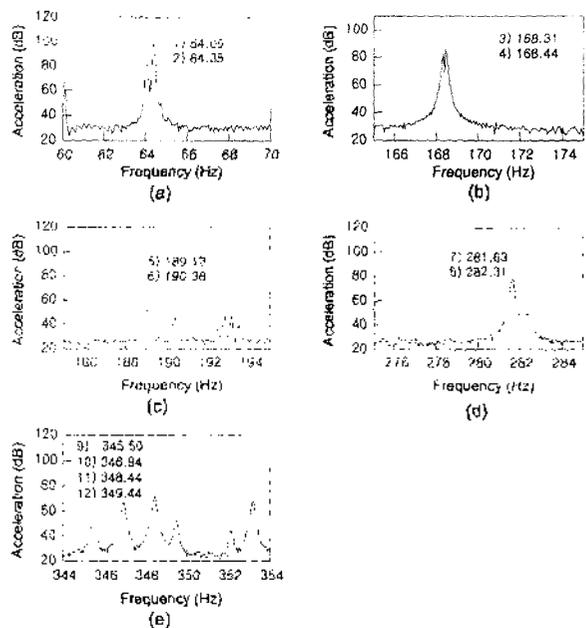
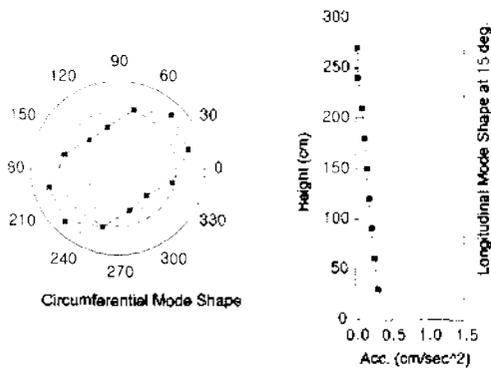
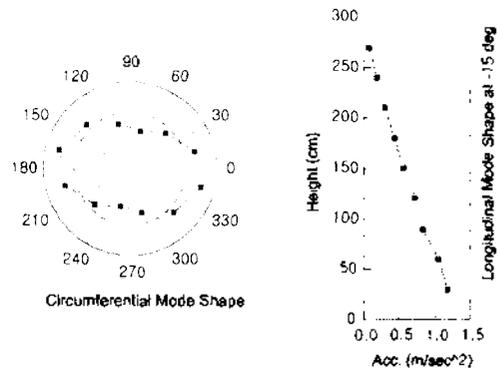


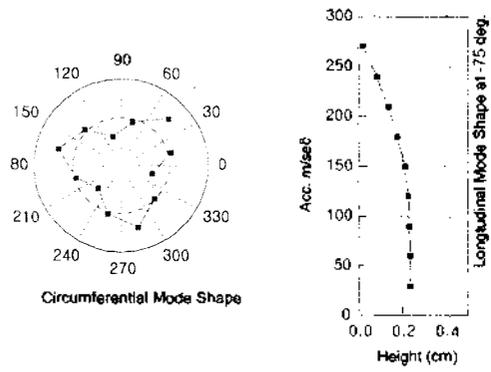
Fig. 5. 주요 고유주파수 주변에서의 진동신호의 파워스펙트럼 (진동신호의 파워스펙트럼(종의 밑에서 43cm 위에 위치한 기준용 가속도계 신호, sampling rate: 2048Hz, 분해능: 1/16Hz, 공명주파수가 두개 혹은 그 이상의 갯수로 서로 매우 근접하게 분포해 있는 특이한 형태임)



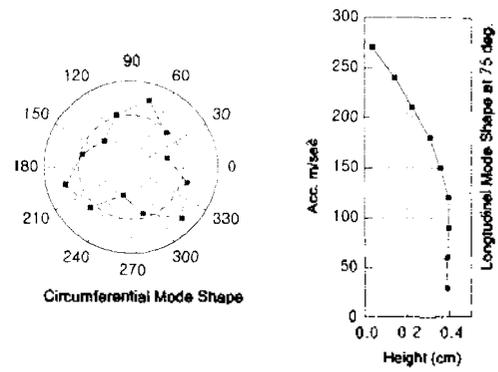
(a) Frequency = 64.06Hz



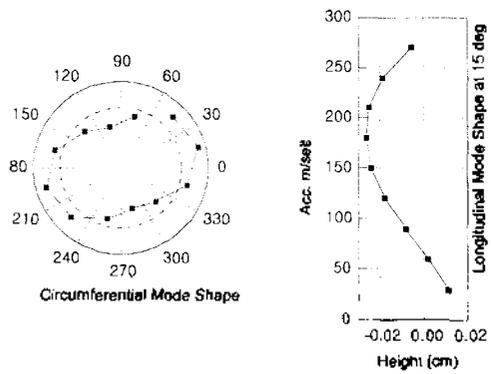
(b) Frequency = 64.38Hz



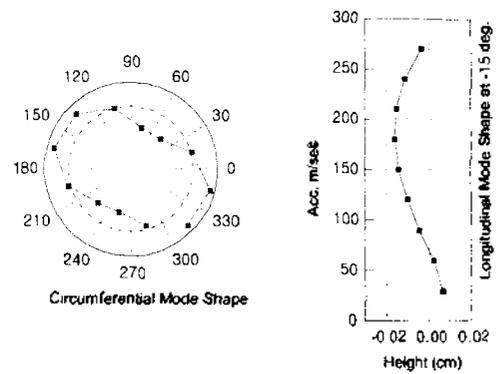
(c) Frequency = 168.31Hz



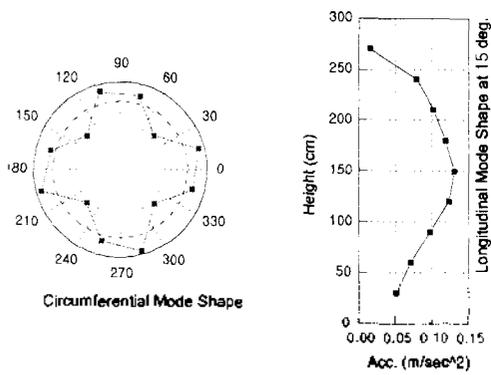
(d) Frequency = 168.44Hz



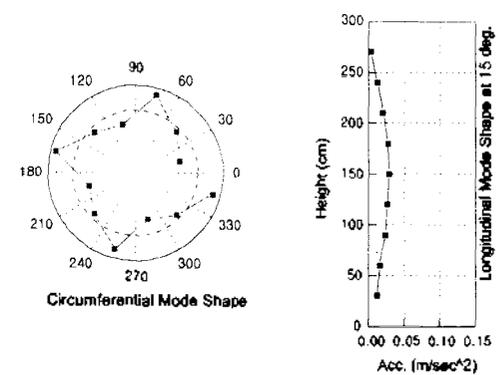
(e) Frequency = 189.13Hz



(f) Frequency = 190.38Hz



(g) Frequency = 281.63Hz



(h) Frequency = 282.31Hz

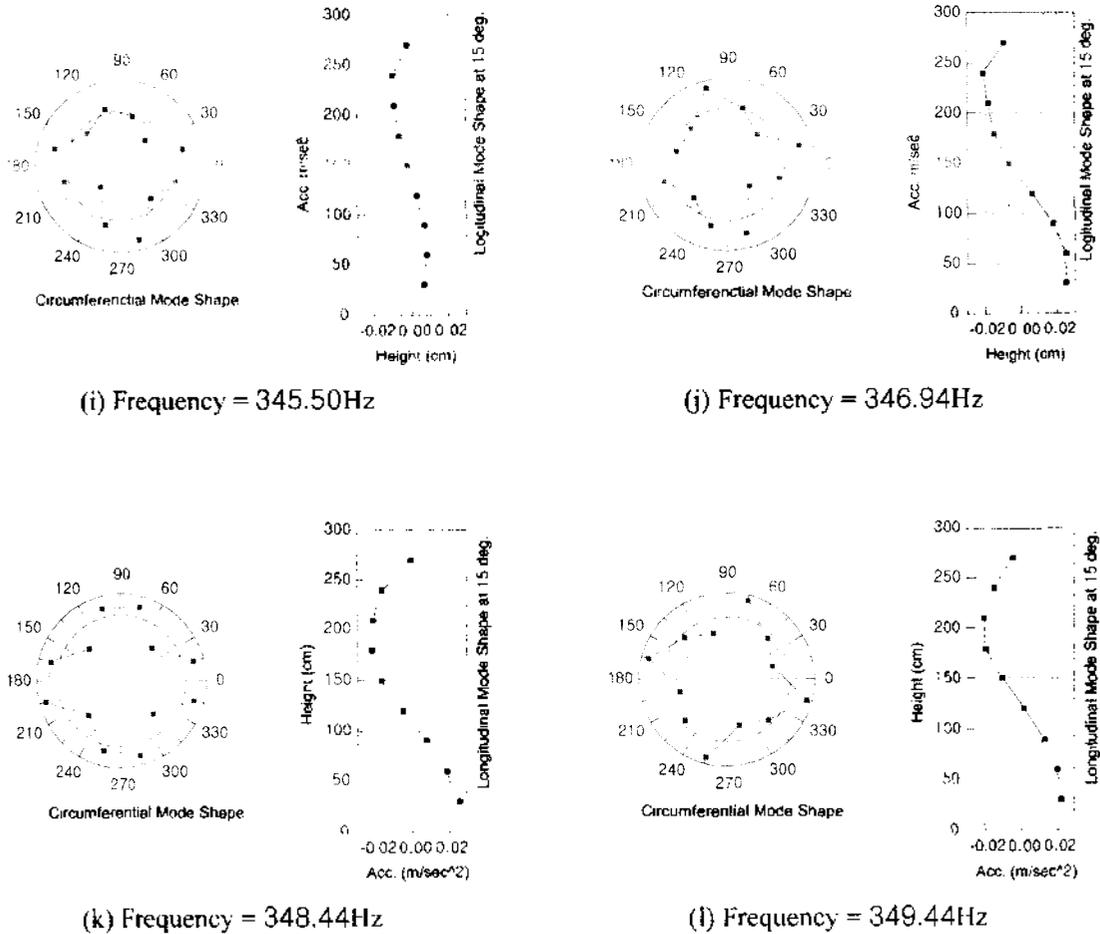


Fig 6. 운동 형상(operational deflection shape)을 통해 살펴본 주요 고유모우드 형상. 좌우 그림은 각각 원주 방향과 길이방향의 모우드 형상을 나타낸다. (a)64.06 (b)64.38 (c) 168.32 (d)168.44 (e)189.13 (f)190.38 (g)281.63 (h)282.31 (i) 345.50 (j) 346.94 (k) 348.44 (l) 349.44

확대그림이다. 그림에서 살펴볼 수 있는 것은 앞서 Fig. 2에 표현된 시간 신호의 맥놀이 현상에서 예측되었던, 64Hz 부근의 근접한 두 주파수 성분을 포함하여, 거의 대부분의 성분이 근접한 두 주파수의 쌍으로 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 실제 초기 진동에 각 주파수 성분에 의한 맥놀이 현상이 포함되어 있음을 나타낸다.

큰 레벨을 갖는 고유주파수의 주파수영역에서의 분포를 살펴보면 처음 세 쌍(64Hz 부근, 168Hz 부근, 281Hz 부근)은 비교적 균일한 간격으로 분포함을 알 수 있다. 즉 64Hz에서 나타나는 한 쌍을 기본으로 할 때, 약 3배(2.63)와 5배(4.39)에 위치하는 것을 알 수 있다. 또한 350Hz 부근은 비교적 많은 모우드가 좁은 영역에 분포하고 있음을 알 수 있다.

3.3 운동 형상에 통해 살펴본 주요 고유모우드 현상

기준 진동신호(reference signal)에 대한 각 지점 신호의 주파수 응답함수로부터 각 고유모우드의 형상을 계산할

수 있다. 또한 각 모우드 형상에 기준 진동신호(1회 타종)의 파워 스펙트럼값을 곱하여, 각 모우드의 크기를 비교할 수 있다. 이것은 넓은 의미에서 구조물의 진동 형상을 가시화하기 위하여 사용되는 운동 형상(operational deflection shape: ODS)에 해당한다. j지점의 운동 형상(ODS)는 기준 신호와 j지점에서 측정된 신호의 스펙트럼으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$ODS_j = \frac{S_{jR,1}}{S_{RR,1}} \sqrt{S_{RR,1}} = H_j \sqrt{S_{RR,1}} \quad (1)$$

여기서,  $S_{RR,1}$ : i번째 타종시 측정된 기준 진동신호의 자기 스펙트럼(auto spectrum)

$S_{jR,1}$ : i번째 타종시 측정된 j 지점의 진동신호와 기준 진동신호와의 상호 스펙트럼

$H_j$ : j 지점의 진동신호의 기준 진동신호에 대한 전달함수

Fig. 6은 전 측정지점에서 대체로 큰 진동 레벨을 나타내는 12개의 고유 주파수에 대한 운동 형상을 나타낸다. 각 그림에서 원주방향의 모우드는 상대적인 형상만을 표시하였으며, 길이방향(높이방향)의 운동 형상은 운동 형상의 크기로 표시하였다.

Table. 2에 Fig. 6에 나타난 각 모우드 형상의 고유주파수, 원주 및 길이방향의 모우드수, 운동 형상크기 및 원주방향의 비틀림 각을 정리하였다. 원주 방향의 모우드수는 삼각함수( $\cos n\theta$ ,  $\sin n\theta$ )의 형태로 표시되는 원통형 쉘의 경우를 기준으로 하여 표시하였으며, 길이방향의 모우드수는 반절점(antinode)의 수를 기준으로 하였다. 운동 형상의 크기는 측정된 지점의 레벨중 최대 레벨을 나타낸 것으로서 엄밀한 최대값을 의미하지는 않으나, Fig. 6의 모우드 형상에서 알 수 있듯이 대체적으로 각 모우드의 크기를 나타내는 지표로 볼 수 있다.

Table. 2와 Fig. 6을 통해서 확인할 수 있듯이 근접한 주파수에서 쌍으로 존재하는 주파수의 경우는 원주 및 길이방향의 모우드가 모두 동일하며, 단지 그 형상이 비틀려진 형태임을 알 수 있다. 또한 상대 비틀림 각이 원주 방향 모우드 수 2, 3, 4에 대해 각각  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $22.5^\circ$ 로 서로 직교(orthogonal)하는 특성을 보임을 알 수 있다. 이론적으로, 완벽한 축대칭 형상의 경우  $\cos n\theta$ ,  $\sin n\theta$  형태의 두 직교하는 모우드의 임의의 조합으로 표현될 수 있는 모든 모우드 형상이 존재할 수 있으나, 비대칭성의 발생은 특정 방향으로의 고유진동을 갖게한다.

Table. 2 각 고유주파수의 각 방향의 모우드수 및 크기

번호	고유주파수 (Hz)	길이방향 모우드수 : m	원주방향 모우드수 : n	운동 형상의 크기 (m/sec <sup>2</sup> )
1	64.06	0	2	0.32
2	64.38	0	2	1.18
3	168.31	0	3	0.24
4	168.44	0	3	0.39
5	189.13	1	2	0.03
6	190.38	1	2	0.02
7	281.63	0	4	0.13
8	282.31	0	4	0.29
9	345.50	1	?	0.01
10	346.94	1	?	0.02
11	348.44	1	4	0.03
12	349.44	1	4	0.02

비대칭성에 의해 나타나는 모우드의 비틀림각은 당좌의 위치와 연관되어, 타종시 가진되는 각 모우드의 크기를 결정짓게 된다. Fig. 6(a), (b)의 64Hz의 경우를 보면, Fig. 6(a)의 경우 당좌 부근에 절점(node)이 존재하는 반면, Fig. 6(b)는 반절점(anti-node)이 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 6(b)의 모우드가 상대적으로 더 크게 가진됨을 알 수 있다. 이러한 진동 크기의 차이는 음향 방향으로 이어져 맥놀이 현상에서의 형태, 즉 최소크기와 최

대크기를 결정하게 될 것임을 알 수 있다. 거의 모든 모우드의 경우 이러한 비틀림각의 비대칭성이 존재하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 6의 (e), (f)에 표현된 모우드의 형상을 볼 때, 이전 주파수에서는 관찰되지 않았던 길이방향에서의 절점이 발생함을 알 수 있다. 이 절점의 대략적인 위치는 종의 밑면으로부터 약 70cm이며, 이는 가진점인 당좌의 위치(약 85cm)와 근접하므로 Fig. 4의 파워 스펙트럼에서 알 수 있는 바와 같이 상대적으로 낮은 수준의 진동이 발생한 것으로 생각할 수 있다.

진동의 레벨이 같은 경우에도 모우드의 공간적인 형상에 따라 먼 곳까지 방사되는 음압의 크기는 달라질 수 있다. 이것은 방사효율(radiation efficiency)로 정량적으로 나타내 질 수 있으며, 정성적으로는 진동 형상에서의 파장과 같은 주파수에서의 공기중에서의 파장(acoustic wavelength)의 비에 따라 결정된다. 본 실험에서는 진동 형상의 파장을 길이 방향과 원주방향의 모우드수를 이용해 근사하고, 이를 공기중에서의 파장과 비교하여 Table. 3에 정리하였다. 길이방향의 경우 모든 고유주파수에서 진동 형상의 파장이 공기중에서의 파장보다 큰 경우 (supersonic)로 원거리까지 방사가 잘 일어나는 특성을 지니고 있음을 알 수 있다.

Table. 3 진동 크기에 대한 진동 형상의 상대적 특성 변화 및 공기중에서 음파의 파장(L: 종의 길이, D: 종의 지름, m: 길이방향의 모우드수, n: 원주방향의 모우드수)

번호	주파수 (Hz)	공기중의 파장 $\lambda$ (m)	$2L/m$	$2D/n$
1	64.06	5.4	$\infty$	3.5
2	64.38	5.3	$\infty$	3.5
3	168.31	2.0	$\infty$	2.3
4	168.44	2.0	$\infty$	2.3
5	189.13	1.8	6	3.5
6	190.38	1.8	6	3.5
7	281.63	1.2	$\infty$	1.8
8	282.31	1.2	$\infty$	1.8
9	345.50	1.0	6	?
10	346.94	1.0	6	?
11	348.44	1.0	6	1.8
12	349.44	1.0	6	1.8

#### IV. 결 론

성덕대왕 산종의 진동특성을 파악하기 위하여 종 표면에서 분포된 108(12x9)지점에서의 실제 타종시의 진동신호를 측정하여 종의 고유진동 모우드 형상 및 진동 형상을 가시화한 운동 형상을 살펴보았다. 고주파 성분들은 상대적으로 작은 크기와 큰 감쇠특성으로 수초 이내에 감쇠됨을 알 수 있었으며, 저주파 성분(64Hz)이 오랫동안 유지되어 종 소리의 특성을 결정짓게 됨을 알 수 있었다. 한국 범종의 중요한 음향학적 특성의 하나인 맥놀이 현

상을 발생시키는 고유 모드들을 확인하였으며 이를 그림으로 나타내었다. 맥놀이 현상은 약 64Hz 근처에 2개의 인접한 성분(0.3Hz 차)이 주된 원인이었으며, 직교하는 모드 형상으로부터 종의 비대칭성에 의하여 발생하는 진동 특성임을 확인할 수 있었다. 두 모드 모두 원주 방향으로 4개의 절점을 갖는 형태를 갖고 있음을 알 수 있었으며, 당좌를 중심으로 약 30도, 15도의 비틀림 각을 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 고차 모드의 경우에도 원주 방향의 모드가 서로 직교하는 쌍으로 나타남을 확인할 수 있었으며 각각의 경우 모드의 형태를 분석하였다. 방사특성을 간접적으로 확인하기 위하여 모드수를 이용해 계산한 종에서의 파장과 음파의 파장을 비교하였다. 모든 모드에 대해 종에서의 파장이 상대적으로 길어 먼거리까지의 음향 방사가 가능함을 확인할 수 있었다.

#### 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 감사드립니다. 무엇보다도 이러한 귀중한 실험을 위하여 면밀히 실험계획을 세우고, 예비실험을 수행하고, 현장에서 애쓴 실험실의 대학원생들, 윤두병, 김시문, 박순홍, 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. 김양한, "음향·진동 측정을 성덕대왕 신종의 소리 특성 탐구," 한국음향학회 논문집, 부고 1997. 3.
2. Y.-H. Yum, "Study on Korean Bell," Acad. Korean studies, Seoul, 1988.
3. T.D.Rossing and A. Perrier, "Modal analysis of a Korean bell," *J. Acoust. Soc. Am.*, 94(4), pp. 2431-2433, 1993.
4. A. V. Oppenheim and R. W. Shafer, *Discrete-Time signal processing*. Prentice-hall, Englewood Cliffs, pp. 739-742, 1989.
5. O. Dossing, "Structural stroboscopy-Measurement of operational deflection shapes," *Sound and Vib.*, August, pp. 18-26, 1988.
6. Y.-H. Yum, J. M. Lee, and S. H. Kim, "A study on the vibration and sound of bells with slight asymmetry," *Proceedings 4<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference*, L. A., U. S. A., pp. 75-80, 1986.
7. 이장무, 전성하, 김석현, 염영하, "한국종의 진동특성에 관한 연구(1)," *대한기계학회논문집*, 제13권, 제3호, pp. 397-403, 1989.

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

▲박 연 규(Yon-Kyu Park) 1969년 2월 10일생  
1991년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학사)  
1993년 2월: 한국과학기술원 기계공학과(석사과정)  
현재: 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

▲김 영 기(Young-Key Kim) 1972년 4월 22일생  
1993년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학사)  
1995년 2월: 한국과학기술원 기계공학과(석사과정)  
현재: 한국과학기술원 기계공학과 박사과정