

원통형 음향 홀로그래피를 이용한 성덕대왕 신종의 방사음장 특성 분석

An analysis of the Sound Radiation Characteristics of the King Song-Dok Bell Using Cylindrical Acoustic Holography

김 양 한*, 김 시 문*
(Yang-Hann Kim*, Sea-Moon Kim*)

요 약

성덕대왕 신종의 방사 음장 특성을 분석하기 위하여 30개의 마이크로폰으로 구성된 어레이를 이용하여 360개의 위치에
서 음압을 측정 한 후 원통형 음향 홀로그래피 방법을 적용하여 시간, 주파수별로 음장 해석을 행하였다.

타종 직후, 신종에서 방사되는 음장은 넓은 주파수 영역(800Hz까지 해석)에 걸쳐 고른 분포를 가지나 시간이 지남에 따
라 고주파 성분은 급격히 감쇠하여 약 10초 이후에는 저주파 성분만이 존재한다. 마찬가지로 시간에 따른 음압 신호를 살
펴보면 초기에 여러 성분의 모우드들이 중첩되어 복잡한 모양을 하고 있으나 10초 이후에는 한쌍의 저주파 성분(64.06Hz,
64.38Hz)에 의한 백놀이 현상이 나타남을 확인할 수 있다. 이 백놀이에 의한 여음이 초기의 화려하면서 장엄한 소리와 어
우러져 신종만의 독특한 소리를 나타낸다. 백놀이 현상은 종의 축에 대한 비대칭 현상에 의해 근접한 고유진동수를 가지
기 때문에 발생하며 다른 고주파 성분에서도 쌍으로 존재하는 고유진동수를 관찰할 수 있다. 저주파 모우드의 경우 쌍으
로 존재하는 방사 음장 형태는 길이 방향 절선 간격의 반에 해당되는 각도만큼 회전되어 나타난 것을 제외하고는 동일함
을 알 수 있으며 고주파 모우드의 경우는 이보다 복잡한 모양을 이루고 있다.

ABSTRACT

In order to investigate the radiation of sound from the King Song-Dok bell, we measured the sound pressure around the
bell at every 30° using a microphone line array which was composed of 30 microphones separated by 15cm; total number of
measurement points was 360. The sound field was estimated by using cylindrical acoustic holography.

The spectrum of measured sound pressure demonstrates that it is almost like white noise in the very beginning, but in 10
seconds two close frequency components(64.06Hz, 64.38Hz) remain and make a famous beating. This beating sound is
often believed to make unique sound of the King Song-Dok bell. The mode shapes of that frequency components are the
same except that one is rotated by 45° from the other. This phenomenon occurs at the other pairs of components except
ones in very high frequency range where the mode shapes are rather complex.

I. 서 론

종은 동서양을 막론하고 종교적인 목적 등에 의해서 오
래전부터 제작되어 왔으며 그 기하학적 형태 및 진동 음
향 특성은 다양하기 이를데 없다. 이러한 종의 특성에 대
한 연구는 국내외적으로 많은 연구가 이루어져 왔으나¹⁾
그 해석 방법이 고유 진동수 및 진동 모우드를 관찰하는
방법에 그치고 있으며, 비교적 단순한 소리의 측정에 기
초하여 종의 주파수 특성 및 음의 감쇠 효과 등을 중점적
으로 다루고 있다.

여러가지 종 중에서도 우리나라 국보 제 29호로 지정

되어 있는 성덕대왕 신종(聖德大王 神鐘, 일명 에밀레종
또는 봉덕사종)은 온전한 소리를 내는 종 중에서 세계 최
고(最古)로서 역사학적으로 중요한 의미를 가지고 있을
뿐만 아니라 규모면에서도 세계적이라고 할 수 있다. 특
히 장중하면서도 맑은 소리를 지니고 있는 것으로 많은
사람들에게 관심과 사랑을 받고 있다.

신종의 소리는 '꿰어질듯 끊어질듯 이어지는 소리'로
표현되는 제3구간음, 즉 여음으로 널리 알려져 있듯이 저
주파 백놀이 현상에 의한, 즉 진동 모우드 중에서 가장 감
쇠 효과가 적은 근접한 두 기본 주파수 성분이 상호 작용
을 하여 얻어지는 소리로 대표된다 할 수 있다²⁾. 그러나
이 백놀이 현상이 가지고 있는 여음은 타종 후에 울려 퍼
지는 제 1구간음과 제 2구간음의 화려하면서도 장엄함-
즉 음의 크기가 크면서도 주파수 범위가 넓은-없이, 즉

* 한국과학기술원 기계공학과

접수일자: 1997년 4월 1일

기다림 소리의 전제 조건 없이는 그 의미가 있을 수 없다. 이 맥놀이 현상의 원인은 종의 물리적인 특성이 원주 방향으로 완벽한 원의 형상이 아닌 미세한 비대칭에 의해 발생한다¹⁶⁾.

신종의 소리를 결정짓는 또 다른 요소로는 우리나라 신라 고려 종에서만 발견되는 음관¹⁶⁾과 종과의 공명을 위한 울림통(공동)¹⁷⁾ 등을 들 수 있다.

본 논문은 참고 문헌 [8]에서 밝히고 있는 신종의 방사음장에 관한 보다 상세한 음장 실험 결과를 다루고 있다. 참고 문헌 [8]에서 밝히고 있듯이 보다 정밀한 측정을 위하여 방사음장은 타종시에 30개의 마이크로폰으로 구성된 어레이를 이용하여 측정하였으며 방사음장 특성을 가장 잘 표현할 수 있도록 원통형 음향 홀로그래피(cylindrical acoustic holography) 방법¹⁸⁾을 적용하여 시간별 주파수별 특성을 살펴보았다.

무엇보다도 신종의 음향 방사 특성에 관해서는 처음으로 연구되어졌다는데 본 연구의 의의가 있겠으며 이를 통한 신종의 진동, 내부 음장 및 울림통과의 공명 현상의 설명 등에 보탬이 되었으면 한다.

II. 실험 장치 및 방법

2.1 성덕대왕 신종과 종각의 형상 및 주변 환경

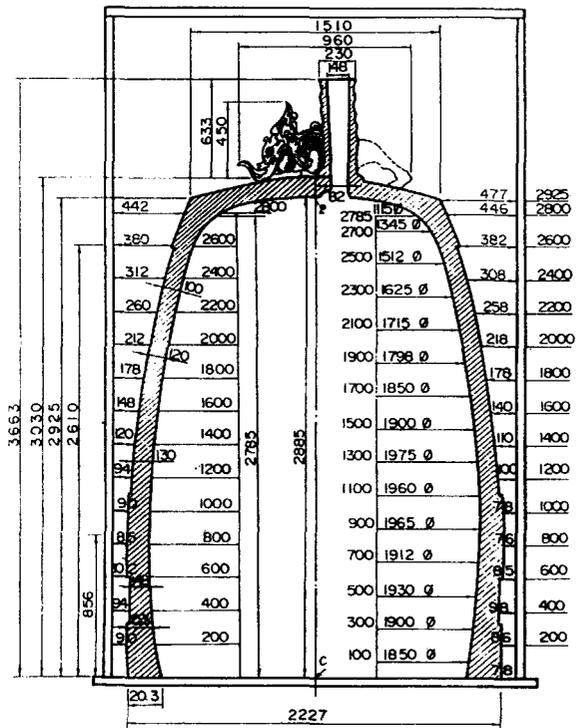
현재 성덕대왕 신종은 경주의 국립 박물관에 소장되어 있으며 야외의 종각에 설치되어 있다(Fig. 1(a) 참조). 종의 형상 및 치수는 Fig. 1(b)에 나타나 있는 바와 같이 그 높이가 3.663m, 바깥지름이 2.227m이며 질량은 대략 20~25톤에 이른다고¹⁹⁾ 한다. 종을 가진사키는 타봉은 그 지름이 약 30cm 가까이 이르며 그 중심이 바닥에서 143cm, 종의 바닥선으로부터는 약 90cm 떨어진 당좌에 충격이 가해질 수 있도록 설치되어 있다. 종을 고정시키는 종각은 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 바닥과 지붕 및 4개의 기둥으로 이루어져 있다. 종각의 바닥은 타일로 되어 있어 음향학적인 관점에서 보았을 때는 강체벽이라고 생각할 수 있다. 천정의 높이는 4.3m이며 미지의 임피던스(impedance)를 갖는 물질(종의 바로 윗 부분에 해당하는 일부 천정은 일종의 4각형 형태의 격자 구조를 한 각재로 구성되어 있으며 나머지 부분은 철근 콘크리트임)로 이루어져 있다. 천정 부분의 음향학적 조건은 사실 원통형 음향 홀로그래피를 구현하는데 중요한 영향을 끼치므로 주의할 요하는 부분이다. 그러나 측정 위치가 종과 아주 근접한 위치 인점(20cm)을 감안하면 상대적으로 그 반사 영향이 작다고 무리없이 가정할 수 있을 것으로 판단할 수 있고 따라서 자유음장 조건을 만족한다는 가정 또한 자연스럽다 볼 수 있다. 기둥 및 울타리에 의한 영향도 같은 이유에서 고려하지 않았다.

음압 측정 실험은 주변 도로 및 기차 등에 의한 소음의 영향을 최소화하기 위하여 1997년 9월 13일 밤11에서 새벽2시 사이에 걸쳐 수행되어졌다. 바람은 잠잠하여 바람

에 의해 생성되는 잡음은 무시할 수 있었으며 그 외의 폴빌레 등의 의한 잡음도 종소리에 비해서 현저히 작았다.



(a)



(b)

Fig. 1 성덕대왕 신종의 (a)사진 (b)단면 형상 및 치수, 단위: mm (염영희¹⁹⁾)

2.2 실험 장치 및 방법

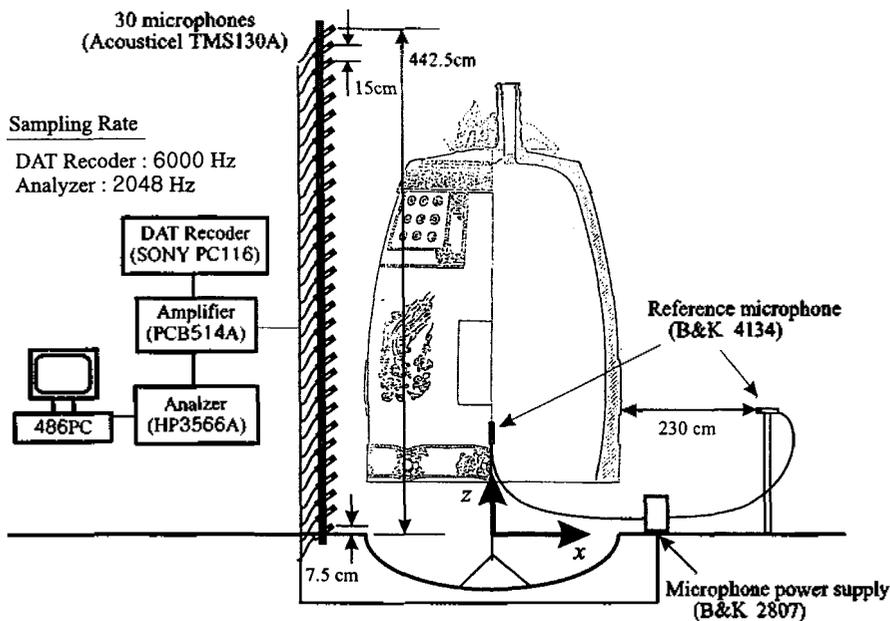
원통형 유량 홀로그래피를 이용한 음장 예측을 하기 위한 실험 장치를 Fig. 2와 같이 구성하였다.

신종의 원음을 얻기 위하여 충격 망치(impact hammer)나 가진기 등에 의해 가진하는 방법을 피하고 타봉으로 당좌의 위치에 충격을 가하여 생성되는 음압신호를 측정하였다. 실제로 한 점(여기에서는 당좌)만 가진하게 되면 가진점을 지나 절선(nodal line)을 형성하는 모우드는 가진이 되지 않는 등 신종의 모든 특성을 파악하지 못하는 경우가 생길 수 있으나 가진의 형태 자체가 결국 신종의 특성이므로 이러한 사항은 고려하지 않았다.

음압은 마이크로폰(Modal Shop 130A Acoustical) 30개를 15cm간격으로 설치한 어레이(array)를 종의 길이 방향으로 세우고 원주 방향으로 30°간격으로 12점의 위치에 옮겨가며 측정하여 총 360개의 측정점을 갖도록 하였다. 따라서 길이 방향으로서는 적어도 1kHz 미만에서 앨리어

싱(aliasing)에 의한 오차가 발생되지 않으며 원주 방향으로서는 $\cos(n\theta)$ 혹은 $\sin(n\theta)$ 모우드 중 $n=6$ 일때까지의 모우드를 측정할 수 있다. 각 측정 신호간의 상대적인 크기 및 위상 차이를 고려하기 위하여 2개의 기준 마이크로폰(B&K type 4134)을 종의 내부 한가운데 및 외부(종 표면으로부터 2.32m, 당좌의 반대 위치)에 설치하였다. 따라서 한번의 타종에 총 32개의 마이크로폰으로부터 음압신호를 받게된 셈이다. 마이크로폰의 동적 범위(dynamic range)는 100dB이상으로서 초기 충격음과 여음을 충분히 측정할 수 있었다.

음압 신호는 2개의 16채널 증폭기(PCB 514A, conditioning amplifier)를 통한 후 32채널 동시 샘플링이 가능한 신호분석기(HP3566A multi channel analyzer)를 이용하여 90초 동안 받았다. 800Hz까지의 성분을 보기 위하여 2048Hz로 샘플링하여 하드디스크에 저장하였으며 만일의 사태에 대비하기 위하여 외부의 기준 마이크로폰 신호를 포함



고정된 2개의 기준용 마이크로폰과 종의 길이방향으로 30개의 측정용 마이크로폰을 이용하여 측정하였음

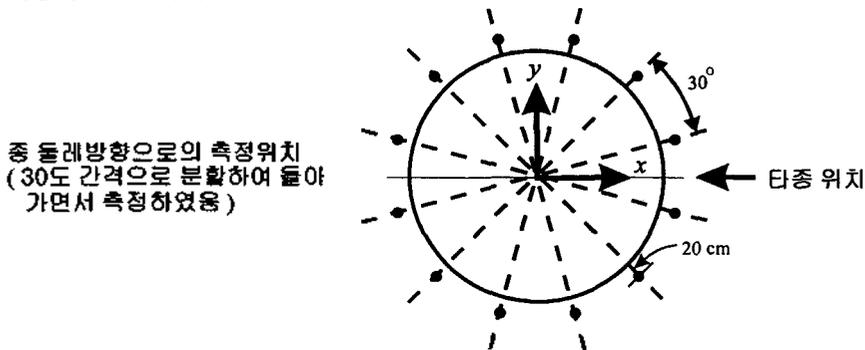


Fig. 2 실험 장치

한 16개의 신호는 16채널 DAT(Digital Audio Tape, SONY)에 함께 저장하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

실험 결과의 효과적인 표현을 위해서 좌표계는 종의 형상 및 음향 홀로그래피 방법을 잘 표현해 줄 수 있는 원동형 좌표계를 사용하였다. 바닥을 $z=0$ 평면으로 하였으며 당좌의 위치를 $\phi=0^\circ$ 로 하였다(Fig. 2).

3.1 시간에 따른 음압 신호

Fig. 3(a)는 타중 직후 0~8초 사이에서 15° 위치의 첫번째 마이크론($z=7.5\text{cm}$)으로부터 얻은 음압신호를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 타중 직후에는 큰 음압이 형성되나(충격음) 시간이 갈수록 그 크기가 감소하는 것을 볼 수 있으며(감쇠음) 이는 마이크론의 위치에 관계없이 비슷한 모양을 갖는다. 그러나 8~16초 사이의 신호를 나타내는 Fig. 3(b)와 같이 타중 직후의 복잡한 신호는 시간이 얼마 지나면 그 특성이 바뀌어 주기가 약 3초인 맥놀이 현상이 일어나는(여음) 것을 잘 관찰할 수 있다. 바로 이 세가지-초기의 충격음, 감쇠음, 후반부의 여음이 신호의 소리를 구성하고 있다.

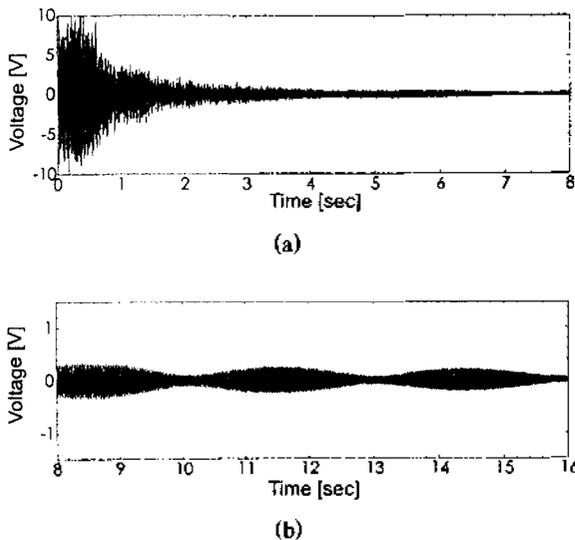


Fig. 3 15° 위치의 첫번째 마이크론($z=7.5\text{cm}$) 음압 신호 (a)0~8초 (b)8~16초

3.2 시간에 따른 주파수 특성 변화

Fig. 4는 시간에 따른 주파수 특성을 보여준다. 각각의 그림은 앞의 음압 신호를 4초 간격으로 잘라서 Hanning 창문함수를 적용하여 푸리에 변환(FFT)한 결과이며 이때의 주파수 영역에서의 해상도는 $1/4\text{ Hz}$ 이다. 0~4초 사이에는 주파수 전 영역에 걸쳐서 고른 에너지를 가진 피크(peak)들이 나타나(충격음) 시간이 지날수록 고주파

성분이 빠른 속도로 감쇠되고 저주파 성분이 주된 성분이 되며(감쇠음) 최종적으로는 64Hz 근방의 기본 주파수 성분만이 남게 되는(여음) 것을 관찰할 수 있다.

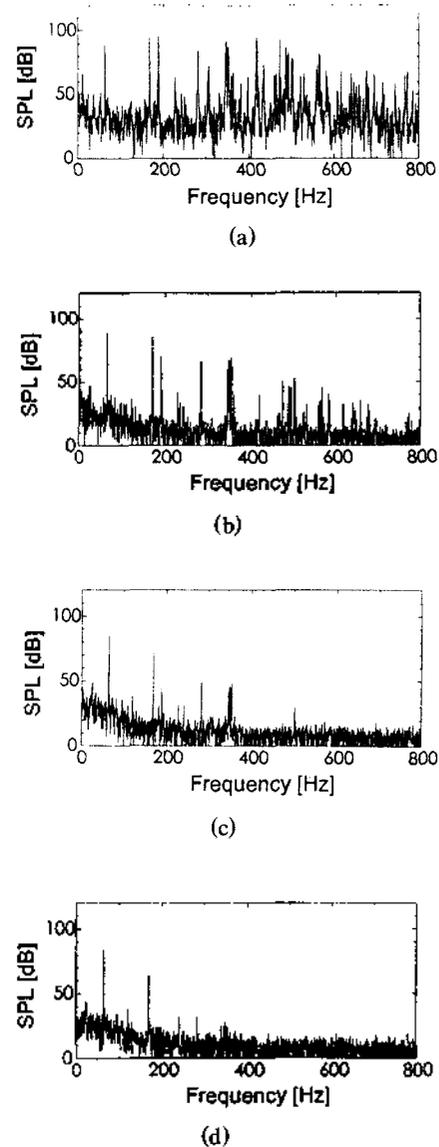


Fig. 4 시간에 따른 주파수 특성 변화 (a)0~4초 (b)4~8초 (c)8~12초 (d)12~16초

3.3 각 주파수별 감쇠율

Fig. 5와 Fig. 6은 각 주파수별 시간에 따른 음압 레벨 및 감쇠율을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 두개의 저주파 성분을 제외하고는 빠른 속도로 감쇠하고 있다. 고주파 성분의 경우 약 10~20초 이후에는 신호가 거의 사라지는 것을 관찰할 수 있으며 따라서 그 이후의 음압은 주변 잡음에 의한 것이라 생각할 수 있다. 최종적으로는 두 성분이 큰 영향을 미치리라는 것을 확인할 수 있다.

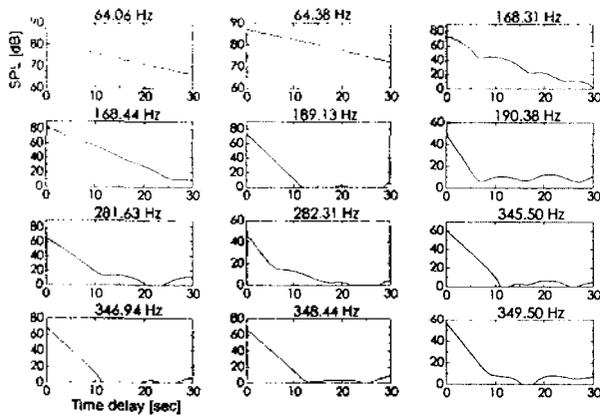


Fig. 5 주파수별 시간에 따른 음압 레벨

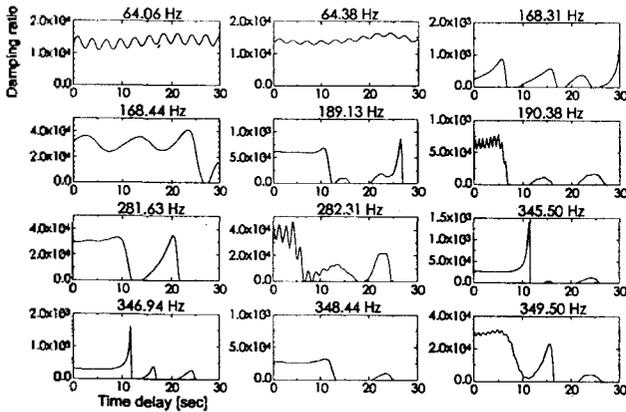


Fig. 6 주파수별 시간에 따른 감쇠율

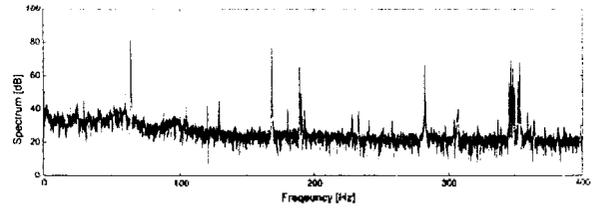
3.4 평균 파워 스펙트럼

약 3초 주기의 맥놀이 현상은 주파수 영역에서 약 0.3Hz의 간격을 가지는 두개의 주파수 성분에 의한 것을 알 수 있으며 이를 해석하기 위하여 1/16Hz의 해상도로 스펙트럼을 구하였다. 타종 직후 56초 동안의 기준 마이크로폰 신호를 16초 간격으로 50%의 겹침(overlap)으로 Hanning 창분함수를 적용하여 6번 평균한 결과이다(Fig. 7 참조). 56초 동안의 신호 전체가 계산되어 있으므로 고주파 성분도 저주파 성분과 함께 있는 것을 관찰할 수 있으며 그 중 기본 주파수 성분이 가장 큰 것을 알 수 있다.

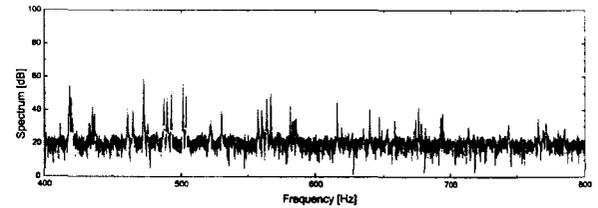
대부분의 성분이 근접한 주파수를 가진 쌍으로 나타나고 있으며 예로 기본주파수 쌍은 64.06(±0.03)Hz 및 64.38(±0.03)Hz로서 0.32(±0.06)Hz의 맥놀이를 유발시킴을 알 수 있다. 이는 종의 완벽하지 않은 측대칭 형상에 의한 것으로 생각할 수 있으며 다른 주파수 성분들도 이와 비슷한 현상을 보이고 있다¹⁰⁾.

3.5 주파수 별 모드

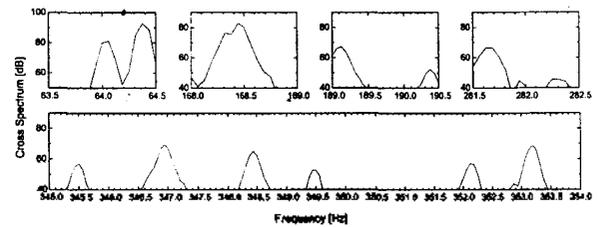
Fig. 8은 각 주파수별 음향방사 모우드를 나타내고 있다. 서로 근접하여 나타나는 주파수 쌍에 해당되는 모우드는 모양은 같으나 원주 방향의 n차 모우드의 경우 180/



(a) 0 ~ 400 Hz



(b) 400 ~ 800 Hz



(c) 주요 관심 주파수 영역

Fig. 7 56초간의 평균 파워 스펙트럼 (a)0~400Hz (b)400~800Hz (c)주요 관심 주파수 영역

n도만큼 회전되어 나타나고 있음을 관찰할 수 있다.

3.6 시간에 따른 방사 음장(동영상화 포함)

측정면에서 얻은 음압 분포로부터 후방 음장 예측을 하여 500Hz까지의 성분을 $\Delta t = 1/512$ 초 간격으로 종의 최외각 표면에 접하는 원통면에서의 음압 분포를 구하였다(0~2초, 10~12초). Fig. 9는 각각 5/512초 및 10 + 5/512초에서의 음압 분포를 나타내는데 초기에는 여러 주파수 성분의 모우드들이 중첩되어 복잡한 모양을 하고 있는 반면 10초 후에는 두개의 기본 주파수 성분만이 남아 그에 해당하는 모우드 형상을 보여주고 있다. 여기서 특이할만한 사항은 종과 바닥 사이의 공간에 형성되어 있는 음장의 모양이다. 이는 종 내부 모우드 및 울림통의 역할이 정성적으로 잘 나타난 것이라 보여진다.

3.7 주파수 별 방사음장(동영상화 포함)

각 피크(peak) 주파수에서 방사되는 음장 형태를 역시 후방 음장 예측하여 음압 분포를 구하였다. Fig. 10은 가장 낮은 4개의 주파수 성분이 방사되는 음장 분포를 나타내고 있다. 각각의 모우드가 공간상으로 어떤 모양을 갖고 신중의 소리를 전파하고 있는지 잘 보여 주고 있다.

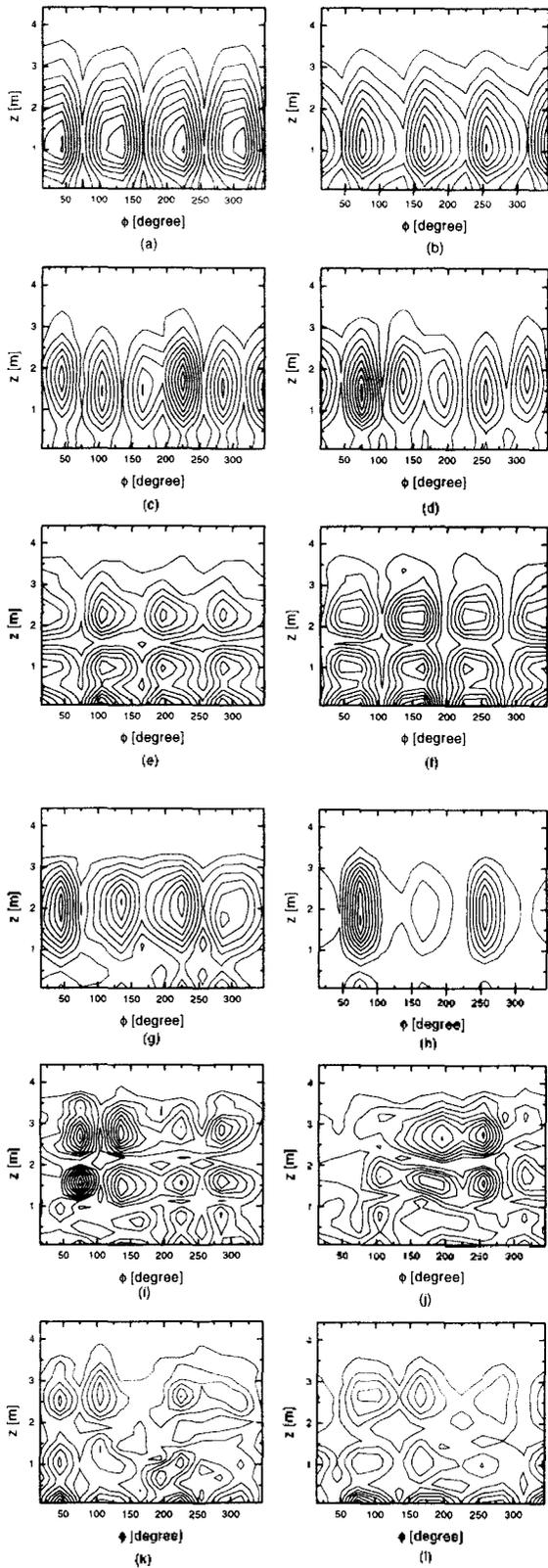


Fig. 8 주파수별 음향 방사 모드(오차: $\pm 0.03\text{Hz}$) (a)64.06Hz (b)64.38Hz (c)168.31Hz (d)168.44Hz (e)189.13Hz (f)38Hz (g)281.63Hz (h)282.31Hz (i)345.50Hz (j)346.94Hz (k)348.44Hz (l)349.50Hz

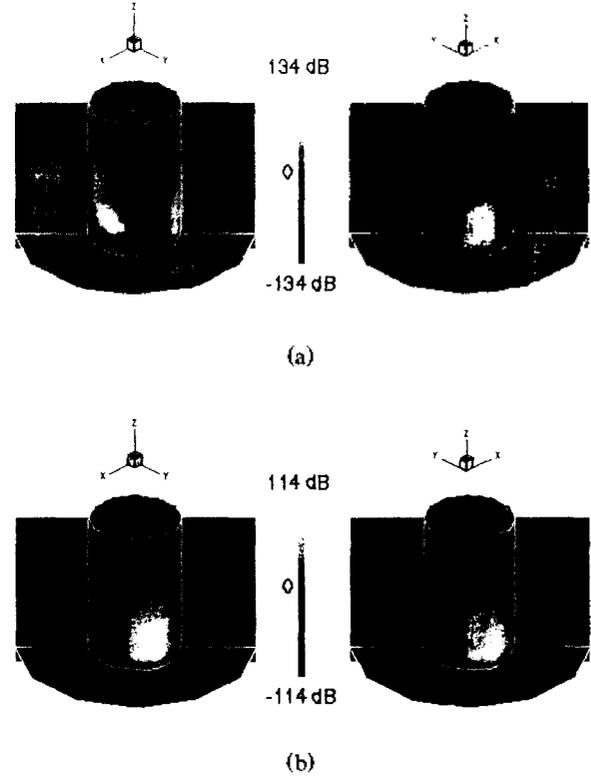


Fig. 9 시간에 따른 방사 음장 (a)타종 직후($t=5/512$ 초) (b)타종 10초후($t=10+5/512$ 초)

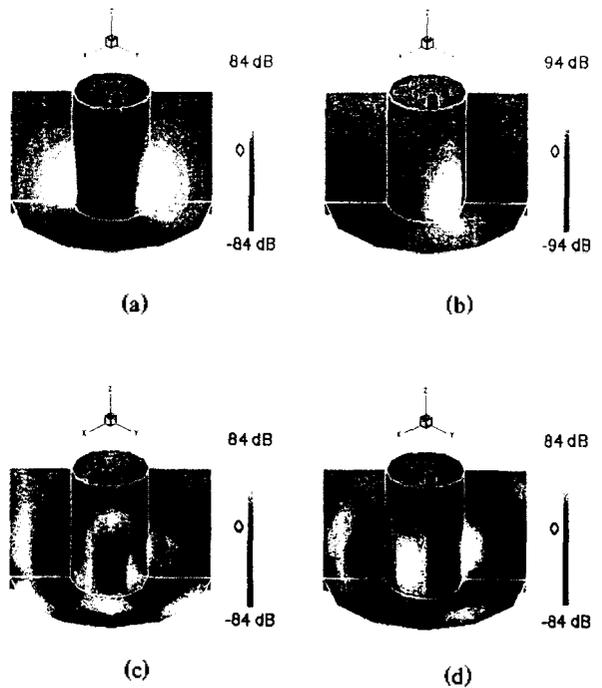


Fig. 10 주파수별 방사 음장(오차: $\pm 0.03\text{Hz}$) (a)64.06Hz (b)64.38Hz (c)168.31Hz (d)168.44Hz

IV. 결 론

성덕대왕 신종에서 울러 나오는 음향 특성은 여러 주파수 성분들이 중첩되어 나타나는 초기 영역(충격음), 고주파 성분이 급격히 감쇠하는 감쇠 영역(감쇠음), 64.06(± 0.03)Hz와 64.38(± 0.03)Hz의 두 성분에 의한 맥놀이로 대표되는 그 이후의 영역(여유)으로 구분된다. 이는 임펄스 가진과 같은 타종 직후에는 많은 주파수 성분이 나타나고 시간이 지남에 따라서 고주파 성분이 저주파 성분에 비해 빨리 감쇠하는 일반적인 현상에 의하여 0.32(± 0.06)Hz 간격을 가지는 두개의 저주파 성분만이 종의 소리를 구성하고 있음을 의미한다. 또한 음의 방사 형태를 보면 초기의 방사 형태는 모든 주파수 성분을 포함하는 복잡한 형상을 띄고 있지만 최종적으로 기본 주파수에 해당되는 2 ϕ 모우드 형태를 갖음을 알 수 있다.

감사의 글

귀중한 데이터를 취득할 수 있는 기회를 준 국립경주 박물관의 관장님 이하 여러분께 감사드립니다. 또한 이러한 조사에 협조를 아끼지 않은 (주)종근당과 기호기획에도 감사드립니다. 또한 이러한 실험에 참여할 수 있도록 하여 주신 경희대학교 진용옥 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그러나 무엇보다도 이러한 귀중한 실험을 위하여 면밀한 실험계획을 세우고, 예비실험을 수행하고, 또 현장에서 애쓴 실험실의 대학원생들, 박연규, 윤두병, 김영기, 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. Yung-Ha Yum, Jang-Moo Lee and Seock-Hyun Kim, "A Study on the Vibration and Sound of Bells with Slight Asymmetry," Proceedings 4th International Modal Analysis Conference, L.A., USA, pp. 75~80, 1986. 2.
2. Thomas D. Rossing and Alexis Perrier, "Modal analysis of a Korean bell," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 94, No. 4, pp. 2431~2433, 1993.
3. Thomas D. Rossing and H. John Sathoff, "Modes of Vibration and Sound Radiation from Tuned Handbells," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 68, No. 6, pp. 1600~1607, 1980.
4. T. Charnley and R. Perrin, "Studies with an Eccentric Bell," Journal of Sound and Vibration, Vol. 58, No. 4, pp. 517~525, 1978.
5. 염영하, "한국 범종에 관한 연구(제 7절 봉덕사종)," 한국법종연구회지(범종), No. 6, pp. 1~34, 1983.
6. 윤두병, 김양한, "실험적 분석을 통하여 본 성덕 대왕 신종 음통의 음향학적 특성," 한국음향학회 투고, 1997.
7. 김양한, 박순홍, 김시문, "성덕 대왕 신종 내부 음장 및 울림

8. 김양한, "음향·진동 측정을 통한 성덕대왕 신종의 소리 특성 탐구," 한국음향학회 투고, 1997.
9. 김시문, 권휴상, 김양한, "원통형 음향 홀로그래피를 이용한 음장 예측의 오차 해석 및 적용 방법," 한국소음진동공학회지, Vol. 5, No. 1, pp. 37~48, 1995.
10. 유홍준, "나의 문화유산답사기," 창작과 비평사, 서울, 1993, p. 180.

▲김 양 한(Yang-Hann Kim)

현재: 한국과학기술원 기계공학과 교수
음향학회지 7권 5호 참조

▲김 시 문(Sea-Moon Kim)



1992년 2월: 한국과학기술원 과학기술대학 기계공학과 졸업 (공학사)
1994년 8월: 한국과학기술원 기계공학과 공학석사
현재: 한국과학기술원 기계공학과 박사과정