

# 성덕대왕신종의 명동과 간극의 공명조건

## Resonance Condition of the Resonance Cavity and Air Gap in the Sacred Bell of the Great King Seongdeok

김 석 현\*, 정 원 태\*\*, 강 연 준\*\*

(Seockhyun Kim\*, Won-Tae Jeong\*\*, Yun-June Kang\*\*)

\*강원대학교 기계메카트로닉스공학과, \*\*서울대학교 기계항공공학부

(접수일자: 2011년 2월 7일; 채택일자: 2011년 3월 22일)

한국종은 지면으로부터 일정한 간극을 두고 매달리며, 종 아래에 명동이라고 불리는 독특한 음향학적 요소를 갖고 있다. 간극과 명동의 적절한 설계는 공명효과에 의하여 종소리를 극적으로 증폭시킨다. 종체의 내부공동과 간극, 그리고 명동으로 구성된 음향공동체는 공명주파수와 모드를 갖는데, 공명주파수가 종체의 고유진동수에 일치하게 되면, 그 주파수성분이 크게 증폭된다. 이 연구는 성덕대왕신종을 대상으로 간극효과를 고려한 명동의 공명조건을 처음으로 제시한다. 공명조건을 구하기 위하여 신종의 실제 치수를 사용하여 SYSNOISE를 이용한 경계요소해석을 수행하였다. 또한, 계절에 따른 기온의 차이가 공명조건에 어떠한 영향을 미치는가를 규명하고, 가변형 명동의 개념을 제시함으로써, 현장에서 온도차를 보정하여 정확한 공명조건을 구현시킬 수 있는 방안을 제공한다.

**핵심용어:** 성덕대왕신종, 공명, 명동, 간극, 경계요소해석

**투고분야:** 구조음향 및 진동분야 (11.1)

Korean bell is hung with some air gap between the bell bottom and the ground. In addition, it has a peculiar acoustic element, so called resonance cavity below the bell. A proper design of the air gap and cavity size dramatically amplifies the bell sound by resonance effect. Bell interior cavity, air gap and resonance cavity consist of an acoustic cavity system. When the acoustic cavity frequency coincides with the natural frequency of the bell body, the frequency component is significantly amplified. On the Sacred Bell of the Great King Seongdeok, this study proposes a resonance condition of the cavity system considering air gap effect for the first time. With the exact dimension of the bell, boundary element analysis is performed using SYSNOISE. Finally, this study reveals how the temperature in season influences the resonance condition and proposes a concept of variable type resonance cavity. By using the variable type resonance cavity, the cavity size is controlled on site and exact resonance is available regardless of temperature difference in season.

**Keywords:** Sacred Bell of the Great King Seongdeok, Acoustic Resonance, Resonance Cavity, Air Gap, Boundary Element Analysis

**ASK subject classification:** Structural Acoustics and Vibration (11.1)

### I. 서론

한국의 범종은 그림 1에서와 같이 단단한 바닥으로부터 수십 센티미터 간극을 두고 매달리며, 종 아래 바닥에 우묵한 웅덩이를 파거나, 항아리 또는 독을 묻어 소리의 울림을 크게 만드는 독특한 구조로 설치된다. 그 결과 종체 외부의 방사를 뿐만 아니라, 공동 내부음도 반사되고 간섭하면서 간극을 통하여 외부로 전달된다. 이 때 종 하

부의 울림통은 명동 또는 움통으로 불리며, 종소리의 특정 주파수 성분을 공명시켜 크게 울리게 하려는 목적으로 설치된 것으로 추정된다 [1-3]. 공명 효과는 범종 소리를 웅장하게 만들 뿐만 아니라, 더욱 멀리 전할 수 있으며, 훨씬 더 오래 지속되는 여음을 들을 수 있게 만든다.

이러한 명동은 서양종이나 다른 동양종에서는 볼 수 없는 한국 범종만의 독창적인 요소로, 우리 선조 장인들의 창의성과 과학적 수준을 반영한다. 그러나 명동은 공명에 의하여 그 효과를 발휘하기 때문에 정확한 공명조건을 찾아 설치하여야 한다. 옛날 명동을 만든 장인은 시행 오차와 경험에 의하여 공명조건을 찾았을 것으로 추정

된다. 오늘날 명동을 재현시키려는 노력의 일환으로, 공명 조건에 대한 학술적 연구가 한국을 대표하는 성덕대왕신종을 대상으로 수행되었다.

이병호는 명동의 공명 조건에 대하여 신종의 종 내부 공동과 명동으로 이루어진 전체 공간의 정재파 (standing waves)를 검토하였다 [2]. 종 하단과 바닥 사이의 간극을 45 cm로 할 때, 길이 94 cm의 원통형 명동이 신종의 기본 음 주파수 (168 Hz)에 일치하는 공명 주파수를 가질 것으로 예측하였다. 그러나 이 수치는 간극을 밀폐 공동으로 가정하여 그 효과를 무시하였고, 종 내부 공동도 원통으로 단순화시킨 결과이다. 김양한 등은 성덕대왕신종의 내부 음장 및 명동이 신종의 소리에 미치는 영향을 검토하고 새로운 울림통 크기를 제안한 바 있다 [4]. 경주박물관에 설치된 성덕대왕신종을 대상으로, 다수의 공명 모드와 주파수를 측정하였다. 특히 신종의 1차 진동음 (64 Hz)에 가까운 67 Hz의 공명모드를 확인하였고, 이를 64 Hz에 일치시키기 위한 명동의 깊이를 이론적으로 검토하였다. 그러나 유효 반경 및 유효 깊이를 사용한 원통형 단순 모델을 사용함으로써, 이 1차 진동음을 정확하게 공명시키는 명동의 구체적인 제원을 주는 데에는 한계가 있었다. 최근 정원태 등은 원통형 종 내부 공동, 명동, 그리고 간극으로 구성된 음향공동을 대상으로 주파수 전달특성을 해석적으로 검토하였다 [5]. 명동과 간극이 종 내부 공동과 서로 연성되어 공명주파수를 결정한다는 사실을 이론적으로 밝히고, 원통형 공동계를 대상으로 목표 주파수를 가장 잘 증폭시키는 명동과 간극의 조합 값을 제시하였다. 특히, 간극은 명동과 연성되어 공명효과에 상당한 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 정원태 등은 소형 범종을 대상으로 명동 없이 종 내부 공동과 간극만으로도 특정 주파수 성분을 공명시킬 수 있으며, 공명음에 의하여 외부 음장에서 소리가 어느 정도 증폭되는가를 실험적으로 확인하였다 [6].

그러나 이러한 노력에도 불구하고, 최근 주목되는 범종은 물론, 성덕대왕신종과 같은 한국을 대표하는 국보급 범종에서 조차 공명조건을 최적화시키기 위한 명동과 간극의 구체적인 조건을 연구한 사례는 찾아볼 수 없다. 이는 음향 해석을 위하여 공동계의 형상과 경계조건을 단순화시킬 수밖에 없는 데에 그 이유가 있다.

이러한 한계를 감안하여 본 연구에서는 성덕대왕신종의 실제 제원을 사용하여 내부공동, 간극, 명동, 그리고 외부 음장으로 구성된 전체 음향계를 대상으로 경계요소해석을 수행하였다. 경계요소해석에는 상용 코드인 SYSNOISE를 사용하였다 [7]. 본 연구는 상용 코드를 사

용하는 수치해석적 연구의 한계를 가지나, 최초로 실제의 범종을 대상으로 현장에 적용 가능한 공명조건을 밝히는 데에 의미를 두었다.

이를 위하여 첫째, 현재의 간극과 명동을 대상으로 성덕대왕신종의 1차 (64 Hz) 및 2차 (168 Hz) 고유진동수의 공명 여부를 검토하고, 현재의 간극으로 공명시키기 위한 명동 깊이를 산출하였다. 둘째, 공명효과를 높이기 위하여 간극을 좁히고 이에 맞는 명동 깊이를 제시하였으며, 공명음이 내부로부터 외부로 어느 정도 전달되는가를 검토하였다. 마지막으로, 계절에 따른 기온의 변화가 공명조건에 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였고, 현장에서 기온 차이를 보정하는 가변형 명동의 개념을 제안함으로써, 계절에 무관하게 공명효과를 극대화시킬 수 있는 방안을 제시하였다.

## II. 공동계의 경계요소해석 모델

그림 1과 Table 1은 성덕대왕신종의 형상 및 간극과 명동에 대한 변수를 정의하며, Fig. 2는 성덕대왕신종의 경

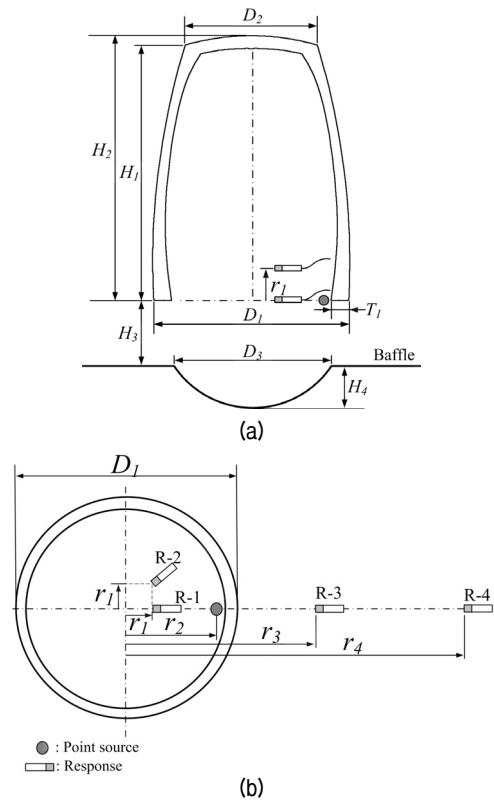


그림 1. 선덕대왕신종의 형상 개략도  
(a) 측면도, (b) 평면도  
Fig. 1. Schematic configuration of the Sacred Bell of the Great King Seongdeok.  
(a) Side view, (b) Top view

계요소해석 모델이다. 간극은 측정치 [4]와의 비교를 위하여 0.50 m로 주었으며, 명동 표면 형상은 구면으로 모델링 하였다. 다른 상세한 제원은 경주박물관에서 발행한 참고문헌 [8]에 근거하였다. 하대 안쪽에 그림과 같이 점음원을 위치시켰고, R-1, R-2는 내부의 응답점이고, R-3, R-4는 외부 응답점이다. 내부 응답점들은 길이 방향 축과 반경 방향 축 상에 존재하는 모드의 절선에 동시에 있지 않게 배치하여 공명모드가 누락되지 않도록 하였다.

음장의 경계면 구성시, 종체의 두께를 모델링에 고려하였고, 내부 음장은 종 하단과 바닥 사이의 간극을 통하여 외부 음장과 연결시켰다. 종체 표면 및 명동 표면, 그리고 석재 바닥은 강체 경계로 처리하였다. 지면을 구성하는 석재 바닥은 반경 5 m의 원형 배플로 설정하였다. 배플의 크기에 관련해서, 주요 저차 공명 주파수를 포함하는 해석 주파수대역에서 5 m 이상의 배플 반경에서는 주파수 응답의 차이가 거의 없음을 확인하였다. Table 2는 해석에 사용한 데이터를 보인다.

표 1. 종의 치수와 응답위치  
Table 1. Bell dimensions and response position.

Symbol	Value [mm]	Symbol	Value [mm]
$D_1$	2,227	$H_3$	500
$H_1$	2,925	$H_4$	320
$H_2$	3,030	$r_1$	200
$D_2$	1,510	$r_2$	850
$T_1$	203	$r_3$	2000
$D_3$	1,821	$r_4$	5000

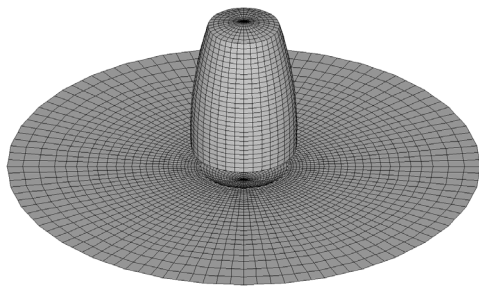


그림 2. 경계요소 해석 모델  
Fig. 2. Boundary element analysis model.

표 2. 해석 데이터  
Table 2. Analysis data.

Description	Value
Wave speed in air	340 [m/s]
Density of air	1.2250 [kg/m <sup>3</sup> ]
Source strength	1×10 <sup>-3</sup> [m <sup>3</sup> /s]
Radius of baffle	5 [m]

### III. 공명 주파수 및 모드

Fig. 3은 두 내부 응답점에서의 주파수응답이고, Fig. 4는 각 피크 주파수에서의 음압 분포를 보인다. 이전에 수행되었던 연구결과에 따라, 이후 피크가 표시하는 주파수를 공명주파수, 그리고 그 음압분포를 공명모드로 표기하였다. Fig. 3에서 1차 피크는 24 Hz에서 발생하며, 그 음압분포는 Fig. 4 (a)와 같이 공동내에서 위상 변화가 없는 헬름홀츠 모드를 보인다. 67 Hz의 2차 피크는 Fig. 4 (b)처럼 z축 (길이방향 축) 상에서 1개의 절점을 갖는 (0,0,1) 모드의 음압 분포를 보인다. 여기서 공명모드는 (r,θ,z) 좌표축 상에서의 절점 수로 표기하였다. (0,0,1) 모드는 성덕대왕신종의 1차 진동음인 64 Hz에 가까우므로, 공명 조건을 찾을 때 매우 중요하다. 168 Hz 부근에서는 공명모드가 잘 보이지 않으며, 다른 고차의 공명 모드는 어느 정도 예상되는 순서로 발생하고 있다.

해석결과와 신뢰도를 검증하기 위하여 이전에 보고되었던 실험치 [4]와 비교한 결과를 Table 3에 보인다. Table 2의 데이터를 실제 측정 현장의 조건에 최대한 맞추었지만, 음향모드별 공명주파수가 소수점 이상에서 거의 일치하는 점은 매우 고무적이다. 또한, 공명모드 측면에서도 해석 결과는 측정결과와 동일한 것으로 확인되었다. 한 가지 눈에 띄는 차이로, 해석에서 나타나는 Fig. 4 (d)의 (0,1,1) 모드는 실험에서는 누락되었는데, 이는 실험에서 마이크로폰이 이 모드의 절면 가까이에 위치한 때문인 것으로 추정된다. 이러한 상황은 해석에서도 발생하는데, Fig. 3에서 (0,2,0) 모드의 피크가 R-1에서는 보이나 R-2에서는 잘 보이지 않는다. R-2가 (0,2,0) 모드의 절면에 가깝기 때문이다. 한편, SYSNOISE에 의

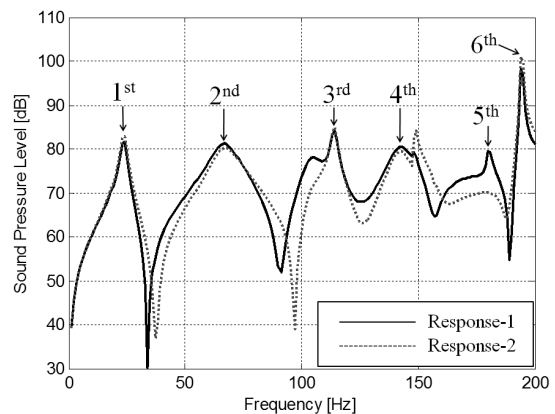


그림 3. 종의 주파수응답 특성  
Fig. 3. Frequency response characteristics of the bell.

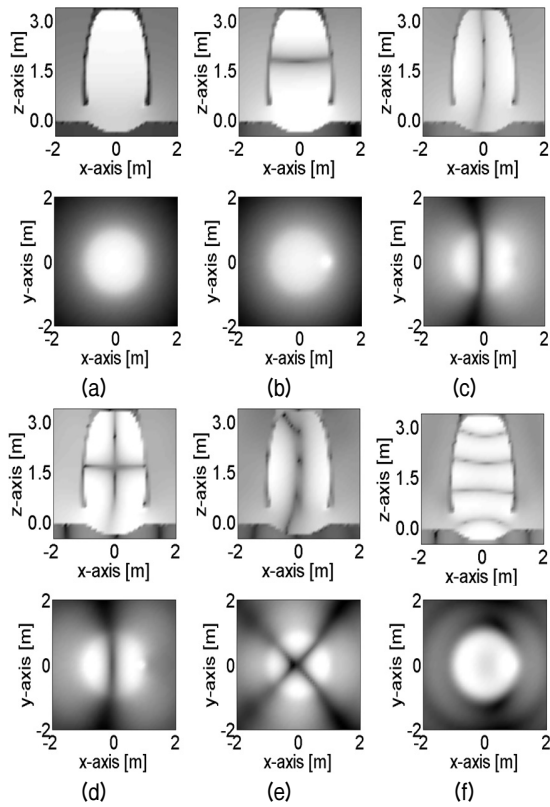


그림 4. 음향모드 : 음압  
 (a) 헬름홀츠 모드, (b) (0,0,1) 모드, (c) (0,1,0) 모드,  
 (d) (0,1,1) 모드, (e) (0,2,0) 모드, (f) (0,0,4) 모드  
 Fig. 4. Acoustic modes : pressure 0 ~ 1 .  
 (a) Helmholtz mode, (b) (0,0,1) mode, (c) (0,1,0)  
 mode, (d) (0,1,1) mode, (e) (0,2,0) mode, (f) (0,0,4)  
 mode

표 3. 공명주파수와 모드  
 Table 3. Resonance frequencies and modes.

Sequence	Mode (r,θ,z)	Frequency [Hz]	
		SYSNOISE	Measured <sup>(4)</sup>
1 <sup>st</sup>	Helmholtz	24	24
2 <sup>nd</sup>	(0,0,1)	67	67
3 <sup>rd</sup>	(0,1,0)	114	114
4 <sup>th</sup>	(0,1,1)	143	-
5 <sup>th</sup>	(0,2,0)	180	180
6 <sup>th</sup>	(0,0,4)	194	199

한 주파수 응답 특성은 소형 범종을 대상으로 한 선행연구에서도 매우 잘 맞는 것으로 검증된 바 있다 [6].

이상의 비교 분석에서 SYSNOISE를 사용한 경계요소 해석은 공명주파수나 공명모드의 예측을 가능케 하며, 보다 유리한 명동-간극의 공명 조건을 찾는 데에도 활용이 가능하다고 판단된다.

## IV. 공명 조건

### 4.1. 공명 조건의 설정

성덕대왕신종에서 종체의 가장 중요한 주파수 성분은 64 Hz의 1차 진동음과 168 Hz의 2차 진동음이다. 64 Hz 성분은 가장 오래 가는 여음의 주파수성분으로, 64.07 Hz와 64.42 Hz의 주파수쌍으로 구성되어 3초 주기의 맥놀이 발생시킨다 [9]. 이 성분을 잘 공명시킨다면 허~억 허~억 살아 숨을 쉬는 듯 한 낮은 여음의 맥놀이를 오래 들을 수 있을 것이다. 168 Hz의 2차 진동음은 신종의 타격음을 웅장하게 만들고, 타격시 가장 크게 들리는 성분으로, 168.52 Hz와 168.63 Hz의 주파수쌍이 9초 주기의 맥놀이를 만든다. 이 음을 잘 공명시킨다면 신종 소리의 웅장함은 더욱 커질 것이다. 따라서 64 Hz와 168 Hz의 두 고유진동수를 공명시키려는 목표 하에 간극과 명동 깊이를 변화시키면서 공명조건을 검토하였다.

### 4.2. 간극 효과

종체 내부 공동은 정해져 있으므로, 공명주파수는 간극과 명동으로 조절이 가능하다. 먼저 현재의 명동 깊이 ( $H_0 = 0.32$  m)에서, 간극을 변화시킬 때의 주파수 응답 및 공명주파수의 변화를 Fig. 5에서 검토한다. Fig. 5 (a)의 주파수 응답에서 간극이 작아지면서 공명 피크의 레벨이 높아지는 점이 흥미롭다. 간극을 현재의 절반인 25 cm로 줄이면 (0,0,1) 모드의 피크레벨은 5 dB 정도 높아진다. 반대로 간극을 75 cm로 늘리면 피크레벨은 훨씬 낮아져 공명효과가 감소한다. 따라서 현재의 명동을 그대로 두고 간극을 줄이면 (0,0,1) 모드가 정확히 공명되지는 않지만 그 증폭 효과는 높아진다.

한편, 공명주파수는 간극이 커지면서 조금씩 감소한다. 이는 (0,0,1) 모드 특성상 간극이 커지면 z축 방향의 유효길이가 증가하기 때문이다. 따라서 현재보다 간극을 더 늘리면, 67 Hz의 공명주파수는 64 Hz에 가까워진다. 그러나 공명주파수가 64 Hz에 접근하더라도 간극의 증가는 공명 증폭효과를 감소시키므로 득보다는 실이 크다. 또한, Fig. 5 (a)를 보면, 168 Hz에서는 현재의 간극과 명동 조건으로 공명을 일으킬 만한 모드가 보이지 않는다.

Fig. 5의 (b)는 간극의 변화에 따른 공명주파수의 변화를 해석한 결과인데, 흥미로운 현상으로 간극이 감소하여 25 cm 보다 작아지면 (0,0,3)과 (0,1,2) 형태의 모드가 168 Hz를 전후하여 출현한다. 따라서 현재보다 간극을 줄

여분다면 168 Hz 성분의 공명 가능성이 높아진다. 그러나 간극만으로 64 Hz 및 168 Hz의 공명 조건을 찾는 데에는 한계가 있으므로, 명동에 대한 검토가 반드시 필요하다.

### 4.3. 명동 효과

Fig. 6은 현재의 간극 (0.5 m)을 유지하고 명동 깊이를 변화시키면서 공동의 주파수 응답 특성을 해석한 결과이다. (0,0,1) 모드의 경우, 명동이 깊어지면 z축 상 유효길이가 증가하므로 공명주파수는 감소하며, 이는 이전에 발표된 연구결과 [4,5]와 일치한다. Fig. 6 (b)는 명동 깊이에 따른 (0,0,1) 모드의 공명주파수 변화를 해석한 결과이다. 간극에 의한 변화보다 명동 깊이에 따른 변화가 크므로, 64 Hz의 공명을 위해서는 명동 깊이를 조절하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 0.64 m 부근에서 64 Hz의 공명주파수로 신종의 1차 진동음을 공명시킨다. 그러나 간극이 큰 관계로, Fig. 6 (a)의 주파수 응답에서 피크 레벨은 그리 높지 않아 증폭효과는 작을 것으로 판단된다.

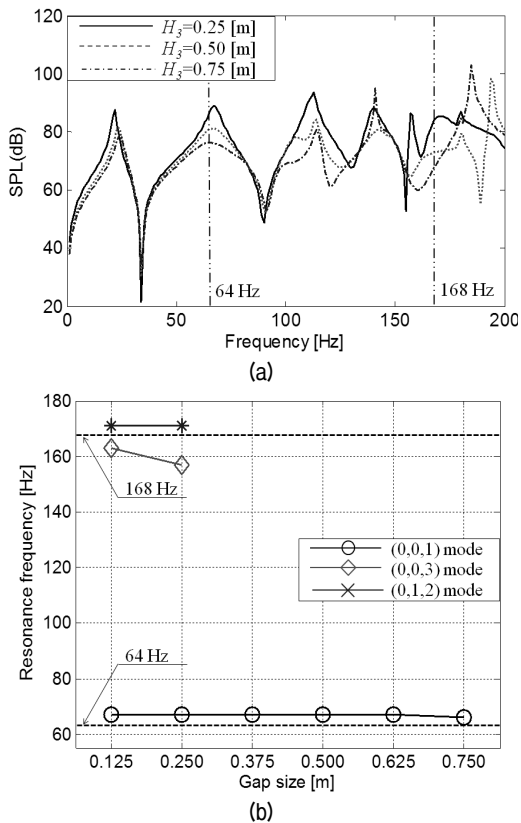


그림 5. 간극의 크기에 따른 주파수 응답 특성 (명동의 깊이 : 0.32 m)  
 (a) 주파수 응답, (b) 간극 크기에 따른 공명 주파수  
 Fig. 5. Frequency response characteristics with the gap size (cavity depth : 0.32 m).  
 (a) Frequency response, (b) Resonance frequency with gap size

또한, 간극이 큰 관계로, 168 Hz를 공명시킬만한 음향모드는 보이지 않는다. 다만, 깊이 96 cm의 명동은 현재보다 5 dB 정도의 증폭효과를 보인다. 이전의 연구 [2]에서는 45 cm의 간극과 94 cm의 명동으로 168 Hz를 공명시키는 것으로 보고한 바 있다. 따라서 168 Hz의 공명효과를 크게 만들기 위해서는 간극을 좁히고 동시에 명동 깊이를 조절할 필요가 있으며, 이 경우 64 Hz의 증폭효과도 높이는 이점이 있다.

### 4.4. 명동과 간극의 연성효과

앞에서의 해석결과로부터 공명조건은 명동과 간극을 함께 고려하여야 찾을 수 있음을 알 수 있다. 여기서는 명동 깊이로 공명주파수를 조절하고, 동시에 간극을 줄임으로써, 공명에 의한 증폭률을 높이는 방안을 찾고자 한다. 간극이 좁아지면 공명효과를 높일 수는 있으나, 타격 지점인 당좌가 타종에 불편하지 않을 정도의 높이에 와야 하고, 타종시 종체가 흔들리더라도 하단이 지면에 닿지 않는 범위에서 설정되어야 한다. 성덕대왕신종의

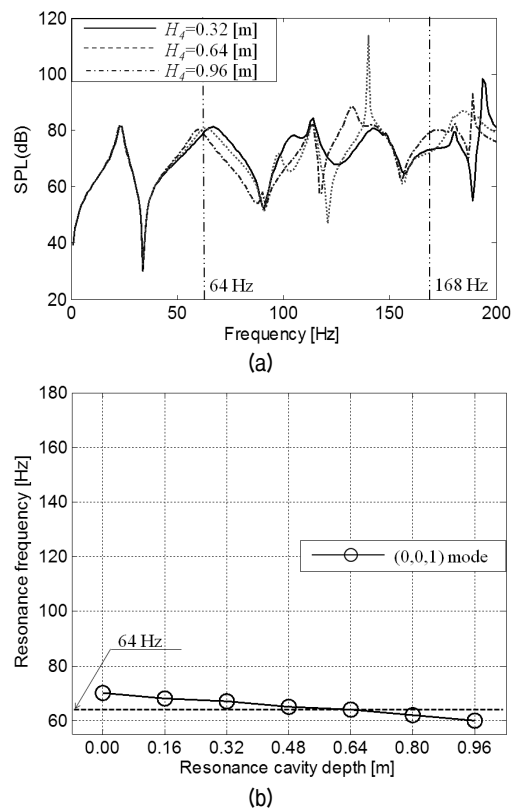


그림 6. 명동의 깊이에 따른 주파수 응답 특성 (간극 : 0.50 m)  
 (a) 주파수 응답, (b) 명동 깊이에 따른 공명 주파수  
 Fig. 6. Frequency response characteristics with the cavity size (air gap : 0.50 m).  
 (a) Frequency response, (b) Resonance frequency with cavity depth

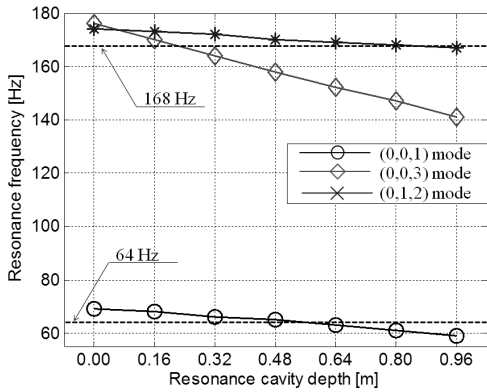


그림 7. 명동 깊이에 따른 공명 주파수 (air gap : 0.1 m)  
 Fig. 7. Resonance frequency with resonator depth (air gap : 0.1 m).

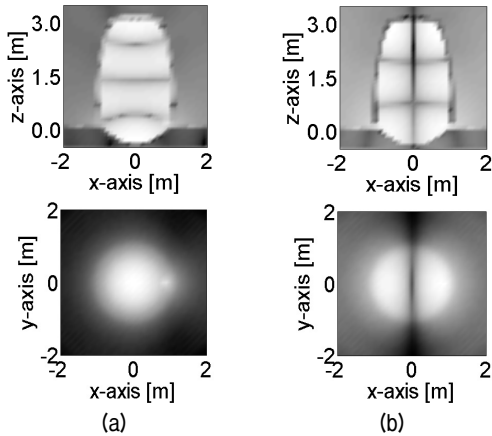


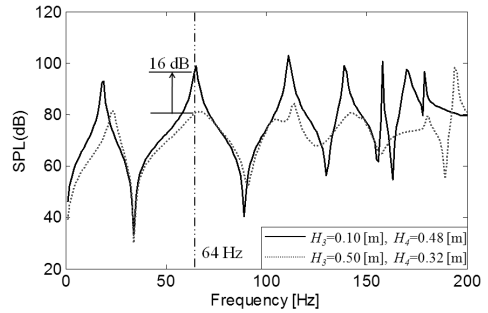
그림 8. 명동의 공명 모드  
 (a) (0,0,3) 모드, (b) (0,1,2) 모드

Fig. 8. Cavity resonant modes.  
 (a) (0,0,3) mode, (b) (0,1,2) mode

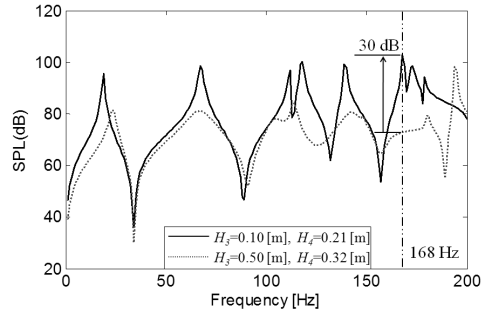
경우 당좌는 하단으로부터 0.856 m 위에 위치한다 [1]. 이를 감안하여 바닥과 중 하단 사이에 0.10 m의 간극 조건을 주고, 신종의 1차 및 2차 진동음을 공명시키는 명동 깊이를 산출해보았다. 물론 간극을 다르게 잡는 경우에도 이하 동일한 과정을 통해 공명을 위한 명동 조건을 찾을 수 있다.

먼저, 0.10 m의 간극에서 명동 깊이에 따른 공명주파수의 해석결과를 Fig. 7에 보인다. (0,0,1) 모드 경우, 명동 깊이 0.48 m에서 공명주파수는 65 Hz이고, 깊이 0.64 m에서 63 Hz의 공명주파수를 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 이 정도 범위의 명동 깊이로 공명이 가능할 것으로 판단되며, 정확한 명동 깊이를 명시하지 않는 이유는 뒤에서 언급한다.

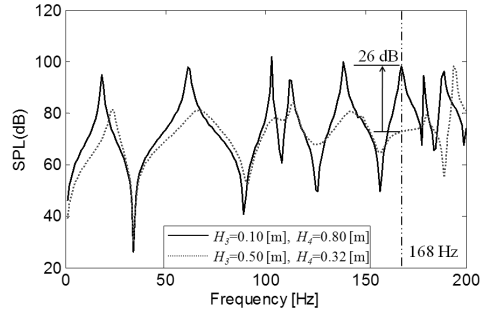
한편, 0.21 m의 명동 깊이에서는 (0,0,3) 모드가 168 Hz에 가까운 공명주파수를 갖고, 0.80 m 깊이에서는 (0,1,2) 모드의 공명주파수가 168 Hz로 나오는 것으로



(a)



(b)



(c)

그림 9. R-2 에서의 주파수 응답  
 (a) (0,0,1) 모드 공명, (b) (0,0,3) 모드 공명, (c) (0,1,2) 모드 공명

Fig. 9. Frequency responses at R-2.  
 (a) (0,0,1) mode resonance, (b) (0,0,3) mode resonance, (c) (0,1,2) mode resonance

확인되었다. 이 두 모드를 Fig. 8에 보인다. 두 모드는 현재의 넓은 간극에서는 168 Hz 부근에서 발생되지 않는다.

다음에는 0.1 m의 간극하에 새로이 제시하는 명동에 의한 공명효과를 현재 상태와 비교해 보았다. Fig. 9는 R-2 응답점에서의 공명효과를 보인다. Fig. 9 (a)에서 명동 깊이를 0.48 m로 하면, 64 Hz를 공명시켜 현재보다 음압이 16 dB 증가한다. (b)에서 명동 깊이를 0.21 m로 하면, (0,0,3) 모드가 168 Hz를 공명시켜 현재보다 30 dB 증폭시킨다. (c)에서 명동 깊이를 0.80 m로 하면, (0,1,2) 모드가 168 Hz를 공명시켜 현재보다 26 dB 증폭시킨다. 여기서 이러한 엄청난 증폭값은 총체 내부 응답점에서의 공명 효과임을 유의할 필요가 있다. 공명 모드의 속성상, 응답점이 각 모드의 배면 (anti-nodal plane)에 가까울수록

록 증폭효과가 커지고, 절면 (nodal plane) 부근에서는 매우 작아짐을 감안하여야 한다.

이러한 공명음이 간극을 통해 외부로 전달되면서 그 증폭 효과가 어느 정도 감소되는가를 보기 위하여 외부 음장의 응답을 검토하였다. Fig. 10은 외부 응답점 R-4에서의 주파수응답 해석한 결과이다. 64 Hz 성분은 약 6 dB 정도, 168 Hz에서는 (0,1,2) 모드의 공명이 (0,0,3) 모드 공명보다 높은 14 dB의 레벨 상승효과를 보여 유리하다. R-3에서의 주파수응답은 R-4에서와 유사하고 전반적인 레벨 차이만 있는 것으로 확인되었다.

이와 같은 공명효과는 점음원 하에서의 결과이므로, 중체의 진동모드로 가진될 때의 실제 공명 효과와는 차이가 있다. 또한, 최종 음압은 내부 공명음과 중체 외표면의

방사음이 합성되어 결정된다. 따라서, 현 단계에서 최종적으로 종소리를 어느 정도 증폭시키는가를 평가하는 것은 이르지만, 현재보다 상당한 공명 증폭의 가능성을 기대케 한다.

### 4.5. 온도효과 및 가변 명동 필요성

위의 해석결과는 15 °C에서의 음속값을 사용하여 수행되었다. 그러나 계절에 따른 기온의 차이는 음속을 변화시키고 따라서 공명조건을 변화시킨다. 음속은 다음 식 (1)과 같이 온도로 결정된다 [10].

$$c = 20 \sqrt{273.2 + T} \tag{1}$$

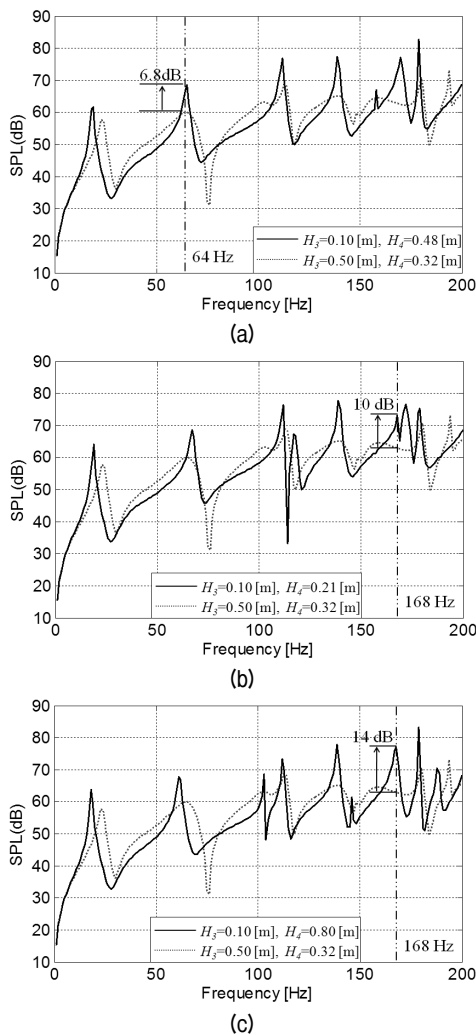


그림 10. R-4 에서의 주파수 응답  
(a) (0,0,1) 모드 공명, (b) (0,0,3) 모드 공명, (c) (0,1,2) 모드 공명

Fig. 10. Frequency response at R-4.  
(a) (0,0,1) mode resonance, (b) (0,0,3) mode resonance, (c) (0,1,2) mode resonance

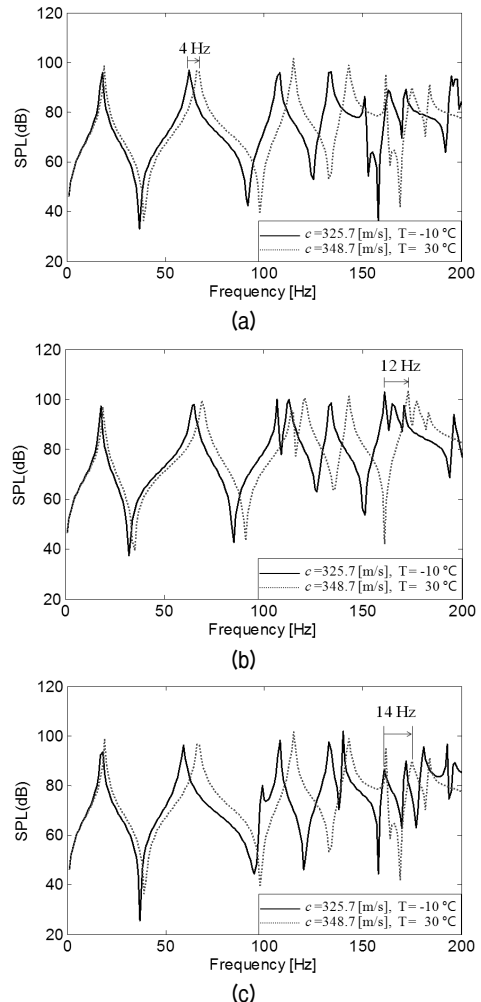


그림 11. R-2 에서의 온도에 따른 주파수 응답 특성  
(a) (0,0,1) 모드 공명, (b) (0,0,3) 모드 공명, (c) (0,1,2) 모드 공명

Fig. 11. Frequency response characteristics with temperature at R-2.  
(a) (0,0,1) mode resonance, (b) (0,0,3) mode resonance, (c) (0,1,2) mode resonance

여기서  $c$ 는 음속 (m/s)이고,  $T$ 는 온도 ( $^{\circ}\text{C}$ )이다.

겨울과 여름의 기온을  $-10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$  범위로 하면, 음속은  $326 \text{ m/s} \sim 348 \text{ m/s}$  범위이다. 따라서 음속에 비례하는 공명주파수의 속성상, 한 겨울에 공명주파수를 맞추어 명동을 설치하더라도 여름에는 공명되지 않는 상황이 발생한다. Fig. 11은 이에 대한 해석결과를 보인다. 겨울의  $-10^{\circ}\text{C}$  대비 여름의  $30^{\circ}\text{C}$ 에서 각 음향모드의 공명주파수의 변화를 검토하였다. Fig. 11 (a)의 (0,0,1) 공명모드는 겨울보다 여름에 4 Hz의 공명주파수 증가를 보인다. 따라서 겨울에 최적 공명효과를 내는 명동은 여름에는 공명주파수가 높아져 공명 증폭효과를 내지 못한다. Fig. 11 (b), (c)에서 168 Hz를 공명시키는 (0,0,3) 모드 및 (0,1,2) 모드도 여름에는 공명주파수가 더욱 증가하여 공명효과를 기대하기 어렵다.

계절에 따른 기온 차이 문제를 극복하기 위해서는 깊이를 쉽게 조절할 수 있는 가변형 명동의 설치가 필요하다. 즉, 여름에는 명동의 깊이를 감소시켜 공명주파수를 떨어뜨림으로써 겨울과 동일한 공명주파수를 유지할 수 있다. 봄, 가을의 기온인  $15^{\circ}\text{C}$ 의 해석결과를 근거로, 명동의 기준 깊이를 설정하고, 설치 현장에서 겨울과 여름에 약간씩 깊이를 가감시켜 최적 공명 조건을 찾으려 한다. 이를 위하여 명동 바닥면을 상하로 운동시키는 간단한 피스톤 기구를 사용할 수 있으며, 향후 이에 대한 구체적인 설계 및 제작 연구가 필요하다.

## V. 결론

성덕대왕신종의 종체 내부 공동, 간극, 명동 및 외부 음장으로 구성된 음향계를 대상으로 경계요소해석을 통하여 주파수응답해석을 수행하였다. 음향계의 공명주파수를 신종의 1, 2차 진동수에 일치시키는 공명조건 하에서 진동음의 증폭효과를 해석하여 다음의 결과를 얻었다.

- (1) 공명조건은 명동과 간극의 지배를 동시에 받는다. 공명주파수의 튜닝에는 명동 깊이가 지배적인 변수이나, 간극을 작게 하여야 공명에 의한 증폭 효과를 크게 만들 수 있다.

- (2) 0.1 m의 간극하에서 64 Hz의 1차 진동음과 168 Hz의 2차 진동음을 공명시키기 위한 명동의 제원을 제시하였으며, 외부음장에서 공명효과를 확인하였다. 흥미로운 결과로, 공명조건은 기온 차이에 따라 상당한 차이를 보였다.

- (3) 겨울과 여름의 기온을 감안할 때,  $-10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$  범위에서 64 Hz 공명주파수는 4 Hz, 168 Hz 공명주파수는 14 Hz까지 차이가 발생하였다. 계절에 따른 공명주파수의 변화를 보상하기 위하여 명동의 깊이를 조절할 수 있는 가변형 명동이 필요하다.

## 참고 문헌

1. 염영하, "한국종의 연구," *한국정신문화연구원 연구논총*, 84-14, 1984.
2. 이병호, "한국 범종의 음관과 명동," *한국음향학회지*, 2권, 1호, 1-10쪽, 1983.
3. 진용옥, *성덕대왕신종 종합학술조사보고서*, 3장 음향조사, 국립경주박물관, 1999.
4. 김양한, 박순홍, 김시문, "성덕대왕신종 내부 음장 및 울림통이 신종의 소리에 미치는 영향과 새로운 울림통 크기의 제안," *한국음향학회지*, 16권, 5호, 60-67쪽, 1997.
5. 정원태, 강연준, 김석현, "보조공동과 간극을 갖는 원통형 공동의 음향전달특성," *한국음향학회지*, 29권 3호, 173-183쪽, 2010.
6. 정원태, 강연준, 김석현, "내부 공동과 간극이 종 음향에 미치는 영향에 대한 실험적 연구," *한국소음진동공학회 논문집*, 20권, 9호 822-827쪽, 2010.
7. LMS international, *SYSNOISE Users Manual, Revision*, 5.5, 2000.
8. 강준묵, *성덕대왕신종 종합학술조사보고서*, 2장 실측조사, 국립경주박물관, 1999.
9. S.H. Kim, C.W. Lee, J.M. Lee, "Beat characteristics and beat maps of the King Seong-deok Divine Bell," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 281, pp. 21-44, 2005.
10. L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, 3rd ed. pp. 98-106, John Wiley & Sons, 1982.

## 저자 약력

- **김 석 현 (Seockhyun Kim)**  
한국음향학회지 제29권 제3호 참조
- **정 원 태 (Won-Tae Jeong)**  
한국음향학회지 제29권 제3호 참조
- **강 연 준 (Yun-June Kang)**  
한국음향학회지 제29권 제3호 참조