성덕대왕신종을 위한 가변형 명동의 설계

Design of a Variable Resonator for the Sacred Bell of the Great King Seongdeok

김석현 · 정원태* · 강연준*

(Seockhyun Kim, Won-tae Jeong*, and Yun-June Kang*)

강원대학교 기계메카트로닉스공학과, *서울대학교 기계항공공학부
(접수일자: 2012년 2월 9일; 수정일자: 2012년 4월 19일; 채택일자: 2012년 5월 23일)

초 록: 본 연구는 성덕대왕신종의 공명효과를 극대화시키기 위하여 계절에 따른 기온의 차이를 보정할 수 있는 가변형 명동의 설계 모델을 제시한다. 성덕대왕신종의 종소리에서는 64 Hz의 1차 고유진동수와 168 Hz의 2차 고유진동수가 가장 중요한 성분이다. 두 주파수 성분을 대상으로 종체 공동, 간극, 명동으로 구성된 내부 음향공동계의 공명조건을 구한다. 이를 위하여 SYSNOISE를 이용한 경계요소해석을 통하여 내부공동의 음향 주파수 응답 특성을 구한다. 외적 요소로, 계절에 따른 기온 차이는 공명 조건에 크게 영향을 미친다. 그 결과 공명효과를 극대화시키는 명동의 길이는 계절에 따라 달라져야 한다. 이를 고려하여 본 연구에서는 기온 변화에 맞추어 명동의 길이를 종의 설치 현장에서 쉽게 조절할 수 있는 가변형 명동의 설계 모델을 제시한다.

핵심용어: 성덕대왕신종, 음향공명, 가변형 명동

투고분야: 구조음향 및 진동 분야(11)

ABSTRACT: This study proposes a design model of the variable type resonator which corrects the temperature variance according to the season, in order to maximize the resonance effect in the Sacred bell of the Great King Seongdeok. In the bell, the 1st natural frequency (64 Hz) and the 2nd natural frequency (168 Hz) are the most important partial tones. Resonance conditions of the two components are determined for the internal acoustic cavity system, which consists of bell body cavity, gap and the resonator. Acoustic frequency response characteristics of the internal cavity are determined by the boundary element analysis using SYSNOISE. As an external factor, temperature variance according to the season largely influences the resonance condition and the length of the resonator should be controlled to maximize the resonance effect. As a measure, this study proposes a design model of the variable type resonator for the Sacred Bell of the Great King Seongdeok, which can control the length at the belfry according to the season.

Key words: Sacred bell of the great king seongdeok, Acoustic resonance, Variable type resonator

ASK subject classification: Structural Acoustics and Vibration (11)

1. 서 론

성덕대왕신종으로 대표되는 한국의 대형 범종은 그림 1과 같이 바닥으로부터 수십 센티미터 간극을 두고 매달린다. 경우에 따라서는 종 밑의 바닥에 소리의 울림을 좋게 할 목적으로 옹덩이를 파거나, 항아리를 묻기도 하는데, 이를 명동 또는 옹통이라고

그림 1. 한국종의 내부 공동계
Fig. 1. Internal cavity of a Korean bell.

*Corresponding author: 김석현 (seock@kangwon.ac.kr)
200-701 강원도 춘천시 강원대학교길 1, 강원대학교 기계메카트로닉스공학과
(전화: 033-250-6372; 팩스: 033-257-4190)

부른다^[1]. 종체가 진동하면 내 표면의 진동이 음원이 되어 종체 공동과 명동 내부로 음을 방사하고 내부 경계면에서의 반사파와 간섭하면서 간극을 통하여 외부로 전달된다. 이 때 종체 공동과 명동으로 구성된 내부 음향계의 공명주파수가 종체의 특정 고유진동수를 공명시키게 되면 그 진동음은 크게 증폭되어 더욱 멀리 전파될 수 있으며, 훨씬 더 오래 지속되는 여음을 만들 수 있을 것이다.

이러한 명동은 서양종이나 다른 동양종에서는 볼 수 없는 한국 범종만의 독창적인 요소로, 우리 선조 장인들의 창의성과 과학적 우수성을 보여준다. 명동에서 가장 중요한 요소는 종체의 중요한 고유진동수를 위한 최적의 공명 조건을 만족시키는 것인데, 간극 효과와 기온 변화 때문에 설계 단계에서 공명조건을 정확하게 예측하여 명동을 설치하는 것은 매우 어려운 문제이다. 오랜 옛날에는 시행오차와 반복평가를 통하여 명동을 설치하였을 것으로 추정되며, 근래에는 음향학적 관점에서 성덕대왕신종을 대상으로 명동의 효과에 대한 연구가 수행되고 있다.

이병호^[2]는 신종의 하단과 바닥 사이의 간극이 밀폐되었다고 가정하고, 내부 공동을 원통으로 단순화시킨 상태에서 공명주파수를 구하고 공명을 위한 명동의 깊이를 산출하였다. 김양한 등^[3]은 경주박물관에 설치된 성덕대왕신종을 대상으로, 다수의 공명모드와 주파수를 측정하였다. 처음으로 신종의 1차진동음(64 Hz)에 가까운 67 Hz의 공명모드가 존재함을 확인하였고, 이를 64 Hz에 일치시키기 위한 명동의 깊이를 이론적으로 검토하였다. 최근 간극이 공명조건에 미치는 영향에 관해서, 정원태 등은 간극을 갖는 원통형 음향 공동내의 음이 외부로 전달될 때의 주파수 전달 해석 모델을 제시하였다^[4]. 또한 이들은 원통형 명동을 대상으로 명동과 간극이 종 내부 공동과 서로 연성되어 공명주파수를 결정한다는 사실을 이론적으로 규명하고 실험으로 검증하였다^[5]. 또한 실물 종을 대상으로 명동 없이 간극만 조절함으로써 특정 주파수 성분을 공명시킬 수 있음을 실험적으로 확인하였다^[6].

최근 김석현 등^[7]은, 경계요소해석을 통하여 성덕대왕신종의 공명조건을 구하고 공명효과를 높이기 위한 간극과 명동의 깊이를 제시하였다. 이 과정에

서 계절에 따른 기온의 변화가 공명조건을 바꿀 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 그 후속 연구로, 계절에 따른 기온의 변화를 고려하여 성덕대왕신종의 공명효과를 극대화시킬 수 있는 명동을 설계하고자 한다. 제시된 명동을 대상으로, 경계요소해석을 통하여 내부 공동의 주파수응답 특성을 구하여 공명조건을 찾았다. 최종적으로 기온 차이가 설계 모델의 공명 조건을 어느 정도 변화시키는 지를 밝히고, 공명극대화를 위해서 필요한 명동 깊이의 조절 범위를 구하였다. 이를 근거로 종의 설치 현장에서 계절에 따른 기온 차이를 쉽게 보정할 수 있는 가변형 명동의 설계 모델을 제시하였다. 국보급 문화재의 보존과 관리 차원에서 성덕대왕신종의 설치 현장에 바로 적용하지 못하는 아쉬움이 있으나, 본 연구결과를 향후 유사한 한국종에 적용한다면 소리의 웅장함을 높이고 지속시간을 길게 하는데 기여할 것이다.

II. 신종의 제원 및 해석 조건

2.1 신종의 제원

그림 2와 표 1은 성덕대왕신종 종체의 주요 제원을 보인다. 경계요소해석을 위하여 주요 치수 및 기타 데이터는 참고문헌^[8]에서 제공하는 값을 사용하였다. 공명조건을 설정하기에 앞서 종체의 고유진동수에 대한 검토가 필요하다. 표 2는 선행연구^[9]에서 파악된 신종의 고유진동수 측정 데이터로, 진동 모드(m,n)에서 m은 종체의 수직축 상에 위치하는 절선의 수를 의미하며, n은 원주 상에서 반경방향 변위가 $\cos n\theta$ 형태로 변하는 진동 모드를 표시한다. 진동형에 대한 상세한 언급은 선행 연구^[9]에서 하고 있으므로 여기서는 생략한다. 범종 진동모드의 중요한 특징으로 각 모드는 원주 상에서 $2n$ 개의 절점을 가지며, 종이 갖는 미소 비대칭성에 의하여 동일한(m,n) 모드에서 고유진동수는 2개의 값 즉, 쌍(doublet)으로 나오고 있다. 선행연구에 따르면, Table 2에서 (0,2)와 (0,3) 모드를 제외한 고차 모드들은 타격 직후 곧 사라지므로, 오래 지속되는 (0,2)와 (0,3) 모드 진동음을 공명시키는 것이 현실적이다. 본 연구에서는 이 두 모드 진동음의 공명효과를 극대화시키는 명동을 설계하는 것을 목표로 하였다.

그림 2. 명동의 설계변수

Fig. 2. Design variables of the resonator.

표 1. 신종의 치수와 응답위치

Table 1. Dimensions of the Sacred Bell and response positions.

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

2.2 경계요소해석

경계요소해석은 상용프로그램인 SYSNOISE^[11]를 이용하여 수행하였다. 표 3은 해석에 사용한 데이터이고, 그림 3은 경계요소해석 모델을 보인다. 종체 원주상에서 36등분 하였고, 높이 방향으로는 10 cm 간격으로 등분하였다. 간극 주변에서는 하나의 요소

표 2. 성덕대왕신종의 고유진동수^[9]Table 2. Natural frequencies of the Sacred Bell of the Great King Seongdeok^[9].

Sequence	Mode (m, n)	Frequencies (Hz)
1	(0, 2)	64.07
	(0, 2)	64.42
2	(0, 3)	168.52
	(0, 3)	168.63
3	(1, 2)	189.34
	(1, 2)	190.55
4	(1, 3)	227.99
	(1, 3)	228.34
5	(0, 4)	281.93
	(0, 4)	282.61
6	(1, 4)	349.40
	(1, 4)	350.12

표 3. 해석 데이터

Table 3. Analysis data.

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

를 다시 가로 세로 3등분하여 보다 세밀하게 요소를 구성하였다. 종체의 두께를 모델링에 고려하였고, 내부 음장은 종 하단과 바닥 사이의 간극을 통하여 외부 음장과 연결시켰다. 총 요소수는 6756개~6828 개 범위로 가변형 명동의 구조 및 깊이에 따라 차이가 있다. 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.

그림 2에서 점음원은 바닥면으로부터 10 cm 높이 (종 하단 높이)에, 종체 중심축으로부터의 거리 $r_2=85$ cm에 위치시켰다. 점음원의 가진 조건으로 반경 1 cm 구면체의 체적 속도를 1 m³/s 되도록 주었다. 0~200 Hz의 범위에서 동일한 체적속도로 가진하고 공동 내 응답 점에서 주파수별 응답 특성을 구하였다.

그림 3. 경계요소 해석 모델
Fig. 3. Boundary element analysis model.

응답점은 공명 모드의 절면상에 오지 않도록 하기 위하여 2개의 다른 위치를 선정하였다. 응답점 R-1은 점음원과 동일하게 종 하단 높이에 중심축으로부터의 거리는 $r_1=20$ cm로 하였다. 그림 2에서 응답점 R-2는 R-1보다 20 cm 더 높고 원주상에서 45° 떨어지게 위치시켰다.

III. 공명 주파수 및 공명 모드

3.1 공명조건

그림 4에서 1차 공명 피크는 24 Hz에서 발생하며, 그 음압분포는 공동내에서 음압의 위상 변화가 없는 헬몰츠 모드를 보인다. 흥미로운 점으로 신종의 1차 고유진동수인 64 Hz 부근에서 2차 공명 피크가 나타나고 있다. 즉, 현재의 0.50 m 간극 및 0.32 m 깊이의 구면형 명동에서 67 Hz의 2차 공명주파수가 발생한다. 그림 5는 2차 공명주파수의 공명모드를 보이는데, (r, θ, z) 좌표축 상에서의 절점 수로 공명모드를 표기하였다. 그림 5(a)는 종체 중립면상에서의 음압 분포로, z축(길이 방향 축) 상에서 1개의 절면을 보이며, (b)는 $z=5$ cm에 위치하는 수평 절단면상의 음압 분포로 축대칭 음압 분포를 보인다.

그림 4. 신종 공동의 주파수응답 특성
Fig. 4. Frequency response characteristics of the Sacred Bell cavity.

그림 5. (0,0,1) 공명 모드
Fig. 5. Cavity resonance mode (0,0,1) 0 1

이러한 해석결과의 신뢰도에 관련해서, 선행 연구^[3,7]는 공명주파수의 해석치와 측정치가 잘 일치함을 밝힌 바 있다. 67 Hz의 (0,0,1) 모드는 성덕대왕신종의 1차 진동음인 64 Hz에 가까우므로, 조금만 조절하면 신종의 1차 진동음을 정확하게 공명시킬 수 있다. 이 경우 숨을 쉬는 듯한 낮은 여음을 오래 들리게 할 수 있다. 그러나 신종에서 보다 중요한 진동음은 168 Hz의 2차 진동음으로 확인된 바 있다^[9,10]. 1차 진동음에 비해서 높은 주파수로 상대적으로 잘 들리고 끊어질 듯 이어지는 뚜렷한 맥놀이를 보이면서 신종의 소리를 지배한다. 이 2차 진동음을 공명시킨다면 현재보다 더욱 크게 들리게 만들 수 있을 것이나, 그림 4의 주파수응답을 보면 현재의 간극 및 명동으로는 이 진동음의 공명을 전혀 기대할 수 없음을 알 수 있다. 선행 연구에서^[7]에 따르면, 그림 6(a)와 같이 간극을 0.10 m로 좁히는 경우, 64 Hz 1차 진동음의 공명효과를 크게 증가시킬 뿐만 아니라, (b)와 (c)와 같이 (0,0,3) 모드와 (0,1,2) 모드로 168 Hz의 2차 진동음을

그림 6. 10 cm 간극의 수정된 명동에 의한 공명효과
(a) (0,0,1) 모드에 의한 64 Hz의 공명
(b) (0,0,3) 모드에 의한 168 Hz의 공명
(c) (0,1,2) 모드에 의한 168 Hz의 공명

Fig. 6. Resonance effect under 10cm gap and modified resonator.

- (a) Resonance of 64 Hz by (0,0,1) mode
(b) Resonance of 168 Hz by (0,0,3) mode
(c) Resonance of 168 Hz by (0,1,2) mode

공명시키는 것이 가능함을 확인 한 바 있다. 이하 본 연구에서는 간극을 0.10 m로 줄이는 조건하에서 공명효과를 극대화하기는 가변형 명동을 설계하였다.

3.2 기온의 영향

계절에 따른 기온의 차이는 아래 식 (1)과 같이 음

속을 변화시킨다.

$$c = 20 \sqrt{273.2 + T} \quad (1)$$

여기서 c 는 음속(m/s)이고, T 는 온도($^{\circ}\text{C}$)이다. 국내 겨울과 여름의 기온을 $-10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 범위로 하면, 음속은 $326 \text{ m/s} \sim 348 \text{ m/s}$ 범위에서 변한다. 이에 비해서 종체 재료인 청동의 탄성계수나 밀도의 변화는 이 정도의 온도 범위에서 무시할 정도이다^[12]. 따라서 음속에 비례하는 공명주파수의 속성상, 한 겨울에 공명주파수를 종체의 고유진동수에 맞추어 명동을 설치하더라도 여름에는 공명 조건을 만족시키지 못하게 된다. 이러한 문제점을 검토하기 위하여 국내 겨울 온도를 -10°C 로, 봄과 가을의 기온을 15°C 로, 그리고 여름 온도를 30°C 로 하여 공명주파수를 경계요소 해석을 통하여 구하였다. 그림 7은 현재와 같이 명동의 바닥면이 구면형인 명동을 대상으로, 명동 깊이를 변화시킬 때, 계절별 공명주파수의 변화를 보인다. 그림 7(a)는 64 Hz의 1차 진동음의 공명조건을 표시한다. -10°C 의 겨울에는 깊이 0.26 m에서 1차 진동음이 공명된다. 그러나 봄가을에는 0.54 m에서 공명되고, 30°C 의 여름에는 0.72 m로 깊어져야 공명이 발생한다. 이는 1차 진동음의 공명을 위해서는 명동의 깊이가 0.26 m에서 0.72 m까지 최소한 0.46 m만큼 변화되어야 함을 의미한다.

현재의 간극으로 공명이 어려운 2차 진동음은 간극을 0.10 m로 줄인다면 2개의 공명모드로 공명이 가능하다. 그림 7(b)는 (0,0,3) 공동 모드로 168 Hz를 공명시키는 조건을 보인다. 겨울에는 0.04 m의 깊이, 여름에는 0.32 m의 깊이에서 공명된다. 따라서 최소한 0.28 m의 변화가 필요하다. 그림 7(c)는 (0,1,2) 모드에 의한 공명조건을 표시한다. 봄가을에는 0.80 m의 깊이에서 공명이 가능하나, 겨울과 여름에는 깊이를 조절하여도 공명이 발생하지 않는다. 이러한 결과는 계절에 따른 기온의 변화가 공명조건에 크게 영향을 미치며, 공명조건을 만족시키려면 기온에 맞추어 명동의 깊이를 조절하여야 함을 시사한다. 선행연구에서^[3,7] 성덕대왕신종이나 소형 범종에서 공명주파수의 측정결과와 경계요소 해석치가 잘 일치하였으므로, 해석결과의 신뢰도는 높다고 볼 수 있다. 그러나

종 설치 현장의 기온변화를 정확히 보정하기 위해서는 명동의 깊이를 조절하여 공명주파수를 종의 특정 주파수에 정확히 일치하도록 만드는 장치가 필요하다.

그림 7. 현재 명동의 깊이에 따른 공명주파수 변화
(a) (0, 0, 1) 모드, (b) (0, 0, 3) 모드,
(c) (0, 1, 2) 모드

Fig. 7. Resonance frequency v.s. the depth of the present resonator.

(a) (0, 0, 1) mode, (b) (0, 0, 3) mode,
(c) (0, 1, 2) mode

IV. 가변형 명동의 설계 및 사용 방법

4.1 원통형 명동

가변형 명동의 1차 모델로, 그림 8과 같이 명동 바닥을 평면으로 하는 원통형 명동을 구성하고, 피스톤 상하운동으로 바닥면의 깊이를 조절하는 원통형 명동을 제시한다. 이때 공명조건을 만족시키는 명동의 길이는 경계요소해석을 통하여 구하였다. 그림 9(a)는 종체의 1차 고유진동음의 공명조건 해석결과이다. 64 Hz를 (0,0,1) 모드로 공명시키기 위한 명동 깊이는 겨울에 0.13 m, 여름에 0.40 m이다. 따라서, 바닥면은 이 범위에서 상하 이동이 가능하여야 한다.

그림 9(b)는 2차 진동음을 (0,0,3) 모드로 공명시키는 조건을 표시한다. 겨울에 0.03 m 깊이로부터 여름의 0.23 m 범위에서 깊이를 조절하여야 한다. 그림 9(c)의 (0,1,2) 모드 공명조건에서는 -10°C 정도에서는 공명이 어렵고, 다른 계절에는 0.30 m 이내 깊이에서 공명이 가능함을 보인다. 이 결과는 그림 6(c)의 현명동의 공명조건(봄가을 0.80 m)과는 큰 차이를 보인다. 그림 10(a)는 (0,0,3) 공명모드이고, (b)는 (0,1,2) 공명모드를 보인다. 두 모드 모두 공동의 수직축 상에서 절점을 갖는 모드로, 명동 깊이에 따라 민감하게 공명주파수가 변한다. 이러한 모드 특성이 가변형 명동의 적용을 가능케 한다.

4.2 원통-구면 혼합형 명동

바닥면을 현재의 구면으로 하여 상하 이동시키면, 그림 11과 같이 측면은 원통면이고 바닥은 구면인 혼합형 명동이 된다. 그림 12는 깊이의 변화에 따른

그림 8. 원통형 명동

Fig. 8. A cylindrical resonator.

그림 9. 원통형 명동의 깊이에 따른 모드별 공명주파수
(a) (0, 0, 1) 모드, (b) (0, 0, 3) 모드,
(c) (0, 1, 2) 모드

Fig. 9. Resonance frequency of each mode with the depth of the cylindrical resonator.
(a) (0, 0, 1) mode, (b) (0, 0, 3) mode,
(c) (0, 1, 2) mode

혼합형 명동의 공명조건 해석결과이다. 여기서 표시된 깊이는 원래의 구면 공동에 추가되는 깊이를 의미한다. 64 Hz의 1차 진동음은 0.10 m의 간격 하에서

그림 10. 원통형 명동의 공명모드

(a) (0,0,3) 모드, (b) (0,1,2) 모드

Fig. 10. Cavity resonance modes of the cylindrical resonator; pressure 0 to 1.
(a) (0,0,3) mode, (b) (0,1,2) mode

그림 11. 원통-구면 합성형 명동

Fig. 11. A cylinder-spherical hybrid type resonator.

-10°C 에서는 추가적인 깊이의 증가 없이 현재의 명동으로 공명이 가능하다. 그러나 30°C 에서는 현재보다 0.25 m 더 바닥면을 깊게 하여야 (0,0,1) 모드로 공명된다.

그림 12(b)에서 168 Hz의 2차 진동음은 (0,0,3) 모드로는 가변형 명동으로도 공명시키기 어려운 상태를 알 수 있다. 한여름에는 현재의 명동으로 공명이 되나, 봄가을이나 겨울에는 정확한 공명이 어렵다. 그림 12(c)는 (0,1,2) 모드를 사용한 2차 진동음의 공명 가능성을 보인다. 겨울에는 공명이 어려우나, 봄가을과 여름에는 0.10 m ~ 0.25 m 범위에서 명동 깊이를 더하면 공명시킬 수가 있다. 그림 13은 혼합형 명

그림 12. 합성형 명동의 깊이에 따른 모드별 공명주파수
(a) (0, 0, 1) 모드, (b) (0, 0, 3) 모드,
(c) (0, 1, 2) 모드
Fig. 12. Resonance frequency of each mode with the depth of the hybrid type resonator.
(a) (0, 0, 1) mode, (b) (0, 0, 3) mode,
(c) (0, 1, 2) mode

동의 공명모드로, 역시 종체 길이상에서 절면을 가지므로 가변형 명동의 적용을 가능케 한다.

이상의 해석결과를 정리하면 다음과 같다. 명동 바

그림 13. 혼합형 명동의 공명모드

(a) (0,0,3) 모드, (b) (0,1,2) 모드

Fig. 13. Cavity resonance modes of the hybrid type resonator: pressure 0 ~ 1.
(a) (0,0,3) mode, (b) (0,1,2) mode

닥을 현재의 구면으로 하여 깊이를 조절하는 혼합형 명동은 64 Hz의 1차 진동음의 공명은 가능하나, 168 Hz의 2차 진동음의 공명이 계절에 따라 제한되는 한계가 있다. 반면에 바닥이 평면인 원통형 명동은 깊이를 0.13 m~0.40 m 범위에서 조절하면 1차 진동음을 공명시킬 수 있고, 0~0.30 m 범위에서 조절하면 2차 진동음을 공명시킬 수가 있다. 결과적으로 간극 0.10 m 하에서, 원통형 명동으로 0~0.40 m 범위에서 명동 깊이를 조절한다면, 계절에 맞게 두 모드를 모두 공명시킬 수 있음을 알 수 있다.

4.3 가변형 명동의 구조 및 적용

해석 오차를 고려하여 공명조건을 정확히 맞추기 위해서는 종의 설치 현장에서 정교한 공명조건 조정 작업이 필요하다. 즉, 해석결과를 근거로 명동 깊이의 조절 범위를 정하되, 최적의 공명효과를 내는 명동 깊이는 현장에서 실험적으로 결정해야 한다. 그림 14는 가변형 명동의 구조를 보인다. 외부 핸들로 회전봉 R1을 회전시키면 치차열 G1, G2, G3을 통하여 나사형 회전봉 R2를 회전시키고 명동 바닥을 구성하는 피스톤이 상하 운동을 하게 된다. 피스톤의 상하 운동은 수동식과 전동식 모두 가능하다. 무엇

그림 14. 가변형 명동의 구조

Fig. 14. Structure of the variable type resonator.

보다 중요한 점은 피스톤의 이동 구간이 공명 조건을 충분히 포함하도록 하는 것이다. 이를 감안하여 해석시 기온의 변화 구간을 실제보다 넓게 잡을 필요가 있다.

가변형 명동이 종각에 설치되면 정밀 튜닝 작업이 수행된다. 종 내부에서 스피커로 종체의 1차 또는 2차 고유진동수로 가진하면서 피스톤의 높이를 조절하여 가장 큰 공명 효과를 내는 깊이를 찾는다. 온도와 피스톤 깊이를 기록하여 교정곡선을 작성한다면, 온도 변화에 따른 최적의 공명조건을 쉽게 맞출 수 있을 것이다.

V. 결 론

기온 변화를 고려하여 성덕대왕신종의 1차 및 2차 고유진동수 성분을 공명시키기 위한 명동 모델을 제시하였다. 간극을 현재보다 작은 0.10m로 하여, 종체 공동, 간극, 명동과 외부 음장으로 음향계를 구성하고, 경계요소해석을 통하여 내부 공동의 음향 주파수 응답특성을 구하여 공명조건을 찾았다. 공명주파수가 온도에 영향을 받는 점을 고려하여 국내 한겨울과 여름의 온도인 $-10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 범위에서 공명주파수의 변화를 구하였다. 이를 근거로 바닥면 깊이를 조절할 수 있는 가변형 명동의 구조를 제시하였다. 가변형 명동으로, 바닥이 평면인 원통형 명동과 바닥을 구면으로 하는 혼합형의 2 가지 모델을 제시하

고 현장에서의 적용 방법을 제시하였다. 국보급 문화재의 보존 측면에서 바로 성덕대왕신종의 설치 현장에 적용하지 못한 한계는 있으나, 향후 유사한 대형 범종에 적용한다면 종소리를 더욱 웅장하고 오래 가도록 하는 데에 큰 도움이 될 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No.2011-0014645)임.

참고문헌

1. 진용옥, *성덕대왕신종 종합학술조사보고서*, 3장 음향조사, 국립경주박물관, 1999.
2. 이병호, “한국 범종의 음관과 명동,” *한국음향학회지*, 2권, 1호, pp. 1-10, 1983.
3. 김양한, 박순홍, 김시문, “성덕대왕신종 내부 음장 및 울림통이 신종의 소리에 미치는 영향과 새로운 울림통 크기의 제안,” *한국음향학회지*, 16권, 5호, pp. 60-67, 1997.
4. 정원태, 강연준, 김석현, “보조공동과 간극을 갖는 원통형 공동의 음향전달특성,” *한국음향학회지*, 29권 3호, pp. 173-183, 2010.
5. 정원태, 강연준, 김석현, “내부 공동과 간극이 종음향에 미치는 영향에 대한 실험적 연구,” *한국소음진동공학회 논문집*, 20권, 9호, pp. 822-827, 2010.
6. W. T. Jeong, Y. J. Kang, S. H. Kim, “Acoustic

transmission analysis on cavity resonance sound in a cylindrical cavity system : Application to a Korean bell,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 131, no. 2, pp. 1547-1557, 2012.

7. 김석현, 정원태, 강연준, “성덕대왕신종의 명동과 간극의 공명조건,” *한국음향학회지*, 30권 4호, pp. 223-230, 2011.
8. 강준목, *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,” *J. Sound Vib.*, vol. 281, pp. 21-44, 2005.
10. 김석현, 김정현, 정지덕, 이장무, “성덕대왕신종의 진동 및 음향 특성,” *한국소음진동공학회논문집*, 12권, 7호, pp. 534-541, 2002.
11. LMS International, *SYSNOISE Users Manual, Revision*, 5.5, 2000.
12. ASTM B31.1-1995, http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_773.html

저자 약력

▶ 김 석 현 (Seockhyun Kim)

1980년: 서울대학교 기계설계학과 (학사)
1982년: 서울대학교 기계설계학과 (석사)
1987년: 서울대학교 기계설계학과 (박사)
1988년 ~ 현재: 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 교수
〈관심분야〉 구조음향 : 차량 소음진동, 범종 진동 음향

▶ 정 원 태 (Won-tae Jeong)

2004년: 고려대학교 기계공학과 (학사)
2012년: 서울대학교 기계항공공학부 (석박통합)
2012년 ~ 현재: 삼성종합기술원 책임연구원

▶ 강 연 준 (Yun-June Kang)

1984년: 서울대학교 기계설계학과 (학사)
1988년: 서울대학교 기계설계학과 (석사)
1990년: Purdue University (박사)
1990년~현재: 서울대학교 기계항공공학부 교수