

내부 공동과 간극이 종 음향에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Influence of the Internal Cavity and Gap on the Bell Acoustics

정 원 태* · 강 연 준** · 김 석 현†

Won Tae Jeong, Yeon June Kang and Seock Hyun Kim

(2010년 6월 30일 접수 ; 2010년 8월 4일 심사완료)

Key Words : Bell Acoustics(종 음향), Internal Cavity(내부공동), Gap(간극), Acoustic Resonance(공명)

ABSTRACT

In this study, it is experimentally investigated how bell acoustics are influenced by the internal cavity of the bell and the gap between the bell bottom and the floor. Acoustic transmission function and natural frequency of a test bell are measured and analysed. Experimental study is conducted to evaluate how the resonance effect influences the bell sound and how the bell sound is different according to the striking condition and the measurement direction. Acoustic resonance frequency of the cavity-gap system is predicted by boundary element analysis using SYSNOIS and the validity of the predicted result is verified by experiment. The result of the study could be applied to determine the optimal gap size which makes the bell sound strong and long.

1. 서 론

한국의 범종은 일반적으로 종 하단과 바닥 사이에 간극을 두고 매달리게 된다. 이 경우 종체의 내부 공동과 바닥, 그리고 간극으로 이루어진 음향계가 종소리에 영향을 준다. 특히, 바닥을 파서 명동을 적절하게 만든다면, 내부 공동, 명동, 간극의 음향계가 종체의 특정 고유진동수를 공명시킴으로써, 내부음의 전달을 극대화시키는 효과를 낼 수 있다는 사실이 밝혀졌다^(1,2). 그러나 공명음을 전달하는 간극의 면적보다는 종체의 음 방사 면적이 훨씬 크므로, 실제로 외부로 방사되는 소리가 어느 정도 증폭될 수 있는가는 아직 규명되지 못한 매우 궁금한 문제이다.

이 연구에서는 실제의 종을 대상으로 바닥과 종 하단 사이의 간극의 크기에 따라 종소리가 어떻게 변하는지를 실험적으로 검토하였다. 나아가, 선행 연구 결과를 바탕으로 방사음을 최대화시키는 간극 조건을 수치 해석적으로 구하고 이를 실험적으로 확인하였다. 연구결과는 범종의 가장 중요한 주파수 성분을 공명시켜 크게 울리는 간극 조건으로 범종을 설치하는 데에 적용될 수 있을 것이다.

2. 범종의 제원 및 진동특성

Fig. 1(a)는 실험에 사용한 소형 범종이고, (b)는 실험 구성도이다. Table 1은 시험 종의 주요 치수와 측정 위치를 보인다.

Table 2는 종소리를 지배하는 1~3차 고유진동수 측정치이며, Fig. 2는 유한요소해석으로 구한 진동모드이다. Table 2의 n 은 원주 상에서 반경방향 변위가 $\cos n\theta$ 형태로 변하는 진동 모드의 모드차수를 의미하며, 각 모드는 원주 상에서 $2n$ 개의 절점을

† 교신저자; 정희원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부
E-mail : seock@kangwon.ac.kr
Tel : (033)250-6372, Fax : (033)257-4190

* 서울대학교 기계항공공학부

** 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

갖는다⁽³⁾. 또한, 범종은 미세한 비대칭성 구조이므로, 각각의 모드에서 고유진동수는 쌍(doublet)을 형성한다⁽⁴⁾. 이 논문에서는 고유진동수 쌍에서 미세하게 낮은 진동수를 f_{low} , 높은 값의 진동수를 f_{high} 로 표기한다.

3. 공동계의 음향특성

3.1 공명주파수의 측정

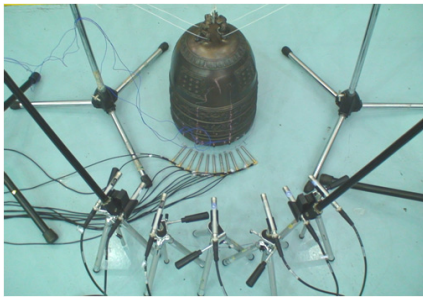
선행연구에 의하면, 내부공동의 공명주파수와 종체의 음원 주파수가 일치할 때 큰 공명음이 간극을 통하여 외부로 전달되었다. 공명주파수를 구하기 위하여 공동계의 음향전달특성을 먼저 검토한다. 간극 2.0 cm에서 Fig. 1(b)에서와 같이 외부에 음원을 두고 공동 내부의 반경 R1 지점의 마이크로폰 응답을 출력으로 하여 전달함수를 측정된 후, 음향 상반성 원리(principle of acoustic reciprocity)⁽⁵⁾를 이용하여 공동 내부에서 외부로의 음 전달특성을 구하였다.

Fig. 3은 체적속도 대비 음압의 주파수응답 특성을 측정된 결과와 SYSNOISE⁽⁶⁾를 이용한 해석결과를 비교한다. 두 결과는 음원 스피커가 불안정한

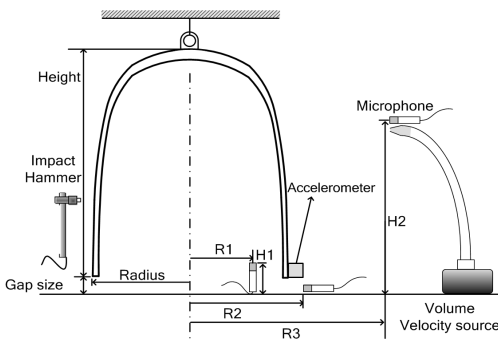
100 Hz 아래의 저주파수 대역을 제외하고는 거의 일치한다. 1000 Hz 아래에서 3개의 피크주파수가 발생하며, Table 3에서처럼 해석 및 측정 결과는 거의 일치한다. 이러한 피크는 내부 공동과 간극으로 이루어진 음향계의 공명주파수로, 각각의 공명주파수에서 음압 분포를 구한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4의 음압분포에서 어두운 부분은 음압의 절선을 의미한다. 1차 공명모드는 공동내에서 절면을 갖지 않는 헬름홀츠 모드이고, 2차 및 3차 모드는 각각 z축 및 x축 상에서 1개씩의 절면을 갖는 공명모드이다. Table 2와 Table 3을 비교하면, 종체의 $n=2$ 모드 진동수와 공동의 헬름홀츠 공명주파수가 가장 근접해 있음을 알 수 있다. 따라서 간극을 변화시켜 헬름홀츠 공명주파수를 $n=2$ 모드의 진동수에 근접시킨다면 이 진동음을 크게 만들 수 있을 것이다.

Table 1 Bell dimensions and experimental parameters

Variable	Value[mm]	Variable	Value[mm]
Radius	133	R2	143
Height	325	R3	433
Gap size	20	H1	70
R1	98	H2	300



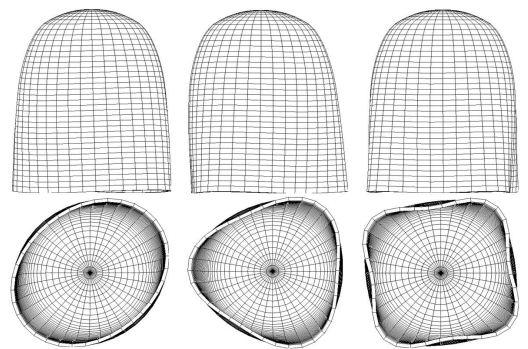
(a) Test bell



(b) Experimental set up

Table 2 Natural frequencies and modes

Mode	Frequencies[Hz]	
	f_{low}	f_{high}
$n=2$	186.4	191.9
$n=3$	519.4	523.8
$n=4$	973.6	993.2



(a) $n=2$ mode (b) $n=3$ mode (c) $n=4$ mode

Fig. 1 Test bell and experimental set up

Fig. 2 Vibration modes of the bell

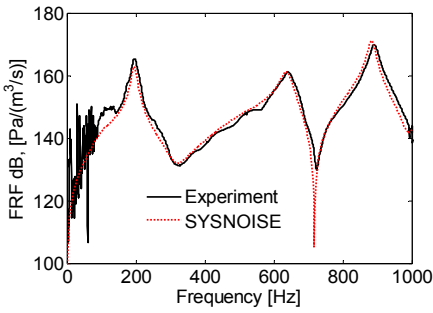
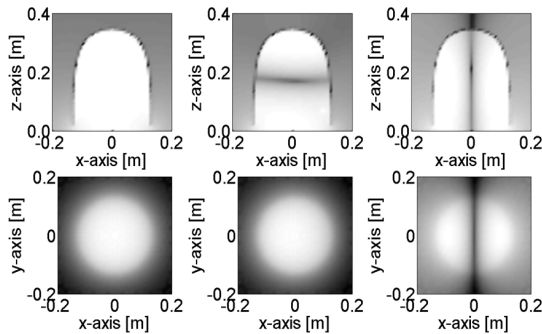



Fig. 3 Frequency response functions of acoustic cavity system

Table 3 Peak frequencies and modes of the cavity

Mode(p,q,r)	Frequencies[Hz]	
	Experiment	SYSNOISE
Helmholtz	195	195
(0,0,1)	640	637
(0,1,0)	889	883

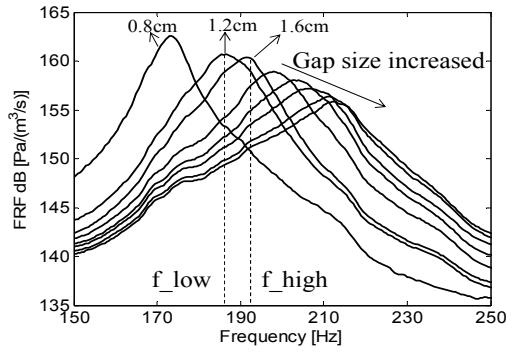


(a) Helmholtz mode (b) (0,0,1)mode (c) (0,1,0)mode

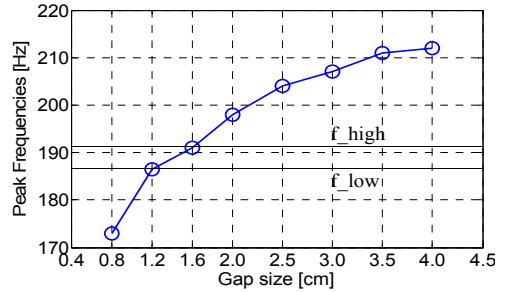
Fig. 4 Acoustic modes : 0  1

3.2 간극에 따른 공명주파수의 변화

간극의 크기를 변화시키면서 주파수 응답을 측정 한 결과를 Fig. 5(a)에 보인다. 간극이 커지면서 공명을 일으키는 피크주파수는 증가하고 피크의 레벨은 낮아지는데, 이는 선행연구의 이론해석 결과에도 부합된다⁽²⁾. 피크주파수가 $n=2$ 모드의 진동수에 일치하도록 간극의 크기를 조절한 결과, 1.2 cm 간극에서 피크주파수는 $n=2$ 모드의 f_{low} 고유 진동수에 일치하였고, 1.6 cm 간극에서는 $n=2$ 모드의 f_{high} 에 일치하였다. Fig. 5(b)는 간극에 따른 공명주파수의 변화 추세를 보인다. 시험종의 경우



(a) Frequency response functions of pressure



(b) Peak frequencies of Helmholtz mode

Fig. 5 Variation of the acoustic cavity characteristics with the gap size increment

f_{low} 와 f_{high} 가 다소 차이를 보임에 따라 두 개의 간극에서 공명효과를 기대할 수 있다.

4. 내부 공동계가 종 음향에 미치는 영향

4.1 측정방법

실제 타종 시에 공명효과가 종소리를 어느 정도 크게 만드는가는 흥미로운 관심 사안이다. 이를 평가하기 위하여, 충격 해머로 타종하고 간극의 변화에 따른 종소리 크기를 측정하였다. 그런데, 종소리는 타격지점과 모드 쌍의 상대적인 배치에 따라 발생하는 주파수 성분이 다르고, 측정 방향에도 영향을 받는다. 따라서 타격 조건과 측정 방향을 고려한 검토가 필요하다.

먼저 충격시험을 통하여 $n=2$ 모드 쌍의 배치상태를 확인하였다. Fig. 6에서와 같이 f_{low} 와 f_{high} 의 주파수를 갖는 L, H 모드 쌍은 원주 방향으로 약 45° 위상차를 갖고 위치한다. 원주 상 어느 지점을 타종하는가에 따라 두 주파수의 발생 정도가 달라지고, 그 결과 맥놀이 특성도 달라진다. 모드 쌍의

배치 상태를 고려하여 1,2,3의 3개 타격지점을 선정하였다. 1번 타격은 $n=2H$ 모드의 배 부근이므로 f_{high} 성분을 주로 가진한다. 2번 타격은 저차와 고차 성분을 비슷한 크기로 가진하고, 3번 타격은 $n=2L$ 모드의 배 부근이므로 f_{low} 주파수 성분을 크게 가진하게 된다. 측정 위치도 가진 조건과 동일한 측면에서 선정하였으며, 방향성과 거리에 따른 차이를 보기 위하여 Fig. 6에 표시된 여러 방향과 2개의 거리에서 측정하였다. 또한, 동일한 타격력에 대한 음압 크기를 비교하기 위하여 충격력에 대한 음압의 전달함수를 측정하였다.

4.2 간극 크기에 따른 음향 특성

종소리는 종체 표면의 진동으로부터 나오는 직접 방사음⁽⁷⁾과 간극을 통해 전달되는 내부 공명음이 합성된 결과이다. 간극에 근접할수록 내부 공명음의 효과가 클 것으로 예상하고, Fig. 6에서와 같이 간극에 근접한 ①~⑪ 지점과, 약간 떨어진 ⑫~⑳의 두 거리에서 측정하였다. 거리는 Fig. 1(b)와 Table 1에 반경 R2 및 R3로 표시하였다.

Fig. 7은 1번 지점 타격시의 응답이다. 1번 타격은 $n=2$ 모드의 f_{high} 성분을 주로 가진하므로 f_{high} 성분이 음압을 지배한다. (a)의 ③, ⑫ 지점은 f_{high} 모드의 배 방향이며, 따라서 직접 방사음이 가장 크게 나오는 방향이다. 이 때문에 1.6 cm 간극의 공명효과는 2 dB 정도로 작다. 반면에, Fig. 7(b)의 ⑨, ⑳는 f_{high} 의 절선 방향으로 직접 방사음이 가장 작은 방향이다. 따라서 공명효과가 상대적으로 뚜렷하다.

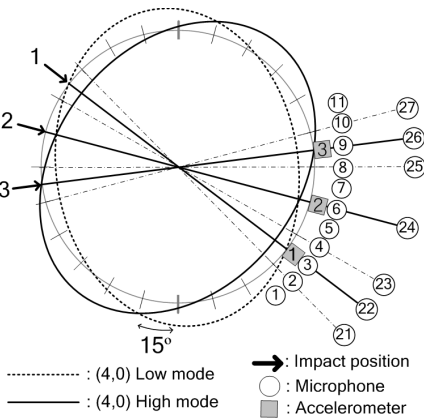
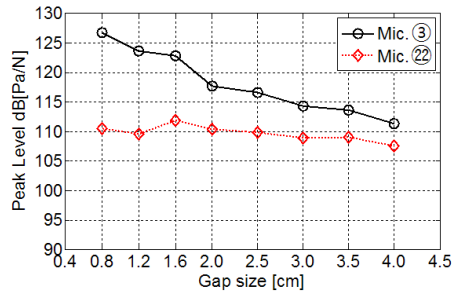


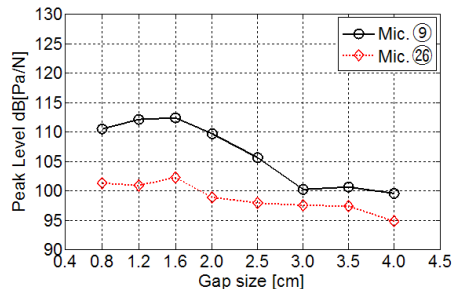
Fig. 6 Configuration of $n=2$ mode pair

Fig. 8은 두 주파수 쌍을 대등하게 가진하는 2번 타격 하에서의 응답이다. (a)는 f_{low} 모드의 절점 방향인 ③, ⑫ 지점에서 f_{low} 의 피크레벨을 구한 결과이다. 직접 방사음의 영향이 작기 때문에 1.2 cm의 간극에서 음압이 최대가 되는 공명효과를 볼 수 있다. (b)는 f_{high} 모드의 절점 방향인 ⑨, ⑳ 지점에서의 측정결과를 보인다. 예상대로 1.6 cm의 간극에서 뚜렷한 공명효과를 보인다. Fig. 8에서 f_{low} 성분이 f_{high} 성분 보다 훨씬 큰 음압레벨을 보이는 것을 볼 때, 실제로는 f_{low} 성분이 더 크게 가진되는 것으로 보인다. 이는 모드 쌍의 형태가 정확한 $\cos n\theta$ 함수가 아니고, 따라서 그 절점들도 45° 간격으로 위치하지 않는 데에 기인한다.

Fig. 9는 f_{low} 성분을 크게 가진하는 3번 지점 타격시의 응답이다. 그림 (a)는 f_{low} 성분의 직접 방사음이 작은 ③, ⑫ 지점에서 1.2 cm 간극의 공명효과를 뚜렷하게 보여준다. 그러나 그림 (b)의 ⑨, ⑳ 방향에서는 f_{low} 성분의 직접 방사음이 크므로, 근거리에서는 공명효과가 보이나, 거리가 약간만 멀어져도 공명효과는 잘 보이지 않는다. 결론적으로, 헬름홀츠 공명에 의한 공명효과는 종체의 직접 방사음의 음향파위가 작은 방향으로 그 효과가 뚜렷하게

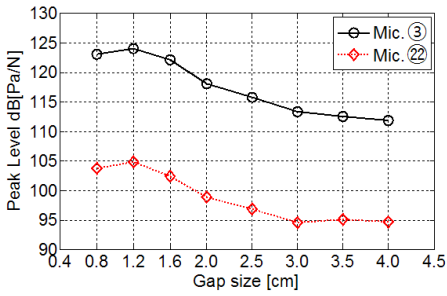


(a) f_{high} peak level at ③, ⑫ positions

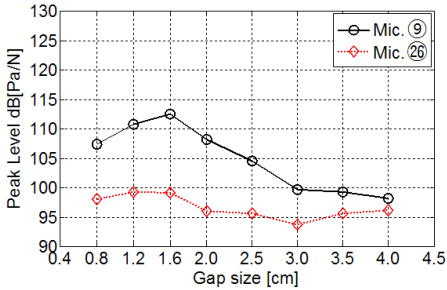


(b) f_{high} peak level at ⑨, ⑳ positions

Fig. 7 Peak level of $n=2$ mode vs. gap size(impact 1)

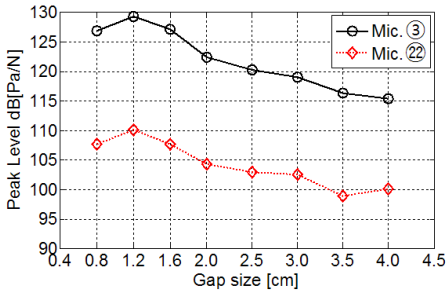


(a) f_{low} peak level at ③, ㉓ positions

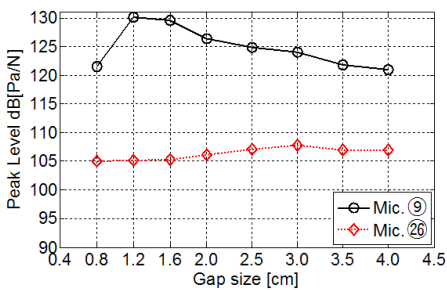


(b) f_{high} peak level at ⑨, ㉖ positions

Fig. 8 Peak level of $n=2$ mode vs. gap size(impact 2)



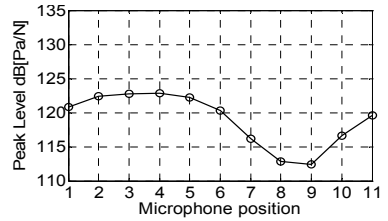
(a) f_{low} peak level at ③, ㉓ positions



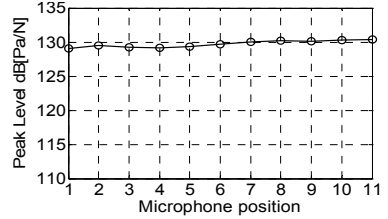
(b) f_{low} peak level at ⑨, ㉖ positions

Fig. 9 Peak level of $n=2$ mode vs. gap size(impact 3)

나타나나, 직접 방사음의 음향과위가 큰 방향으로는 그 효과가 작다.



(a) f_{high} peak level(gap size=1.6 cm, impact 1)



(b) f_{low} peak level(gap size=1.2 cm, impact 3)

Fig. 10 Peak level of $n=2$ mode vs. response positions

4.3 공명효과에 따른 지향 특성

앞에서 내부 공동의 공명 주파수와 종체의 고유 진동수가 일치하는 간극 조건에서 공명 현상으로 인하여 방사음압이 증가하는 것을 확인하였다. 여기서는 공명상태에서 원주 상 위치에 따른 음압의 변화를 검토한다. 공명조건인 1.2 cm의 간극에서 f_{low} 성분의 원주상 음압 변화와, 1.6 cm의 간극에서 f_{high} 성분의 음압 변화를 살펴보았다.

Fig. 10은 거리 R2(중 하단 표면으로부터 1 cm 거리)에서 원주상 방향에 따른 음압 분포를 측정된 결과이다. (a)는 f_{high} 성분의 변화이다. f_{high} 진동 모드의 배 부근인 3번 지점에서 음압 레벨이 높고 절점인 9번 지점에서 음압이 최소화되는 것을 확인 할 수 있다. 이 결과는 원주상에서 비슷한 음압 분포를 갖는 헬름홀츠 공명음보다는 코사인 함수 형태로 방사되는 직접 방사음이 더 지배적임을 의미한다. 반면에 f_{low} 성분의 음압은 Fig. 10(b)에서와 같이, 원주상 모든 방향에서 유사한 음압 분포를 보인다. 이 결과는 종체의 직접 방사음보다는 헬름홀츠 공명음이 소리를 지배함을 의미한다. 이와 같이 동일한 공명 조건하에서 f_{low} , f_{high} 성분의 공명음의 크기가 다른 것은 두 가지 요인이 복합적으로 작용하는 것으로 분석된다. 하나는 선행연구에서 밝혀진 바와 같이 더 작은 간극에서의 공명음의 음압이 더 높게 형성되는 점이고, 두 번째 요인은 f_{low} 성분이 f_{high} 성분보다 상대적으로 크게 가

진 되는 것이다. 이는 코싸인 함수와 다른 모드 쌍 배치 형태를 검토하여야 하는 복잡한 문제로 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 결론적으로, 주파수 쌍의 차이가 어느정도 벌어질 때, 두 개의 간극 조건에서 공명효과로 인한 음압의 상승 효과가 가시적으로 나타나며, 그 효과는 직접 방사음이 작은 방향에서 뚜렷함을 알 수 있다.

4. 결 론

시험 종을 대상으로 종체 하단과 바닥 사이의 간극을 변화시키면서 내부 공동의 공명이 중 음향에 미치는 효과를 측정 한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

(1) 1.2 cm 간극에서 $n=2$ 모드의 f_{low} 성분을 크게 공명시켰다. 특히, 종체의 방사음이 작은 f_{low} 모드의 절선 방향에서 공명효과가 뚜렷하였고, 거리가 멀어지면서 공명효과는 감소하였다.

(2) 1.6 cm 간극에서는 f_{high} 성분을 크게 공명시켜 직접 방사음이 작은 f_{high} 모드의 절선 부근에서 공명음 효과가 뚜렷하게 발생하였다. 간극으로부터 멀어지면서 종체의 직접 방사 음에 묻혀 공명효과는 감소하였다.

(3) 공명효과를 극대화시키는 내부 공동 및 간극 조건은 경계요소해석을 통하여 예측 가능하므로, 이 연구 결과는 범종의 중요한 주파수 음을 크게 공명시키는 최적의 간극 조건을 정하는 데에 적용 가능하다.

후 기

이 연구는 교육부 두뇌한국21(Brain Korea 21)

사업의 지원으로 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Lee, B. H., 1983, "Acoustic Effects of the Sound and Resonance Cavity in Korean Brahman Bells," The Acoustical Society of Korea, Vol. 2, No. 1, pp. 1~10.

(2) Jeong, W. T., Kang, Y. J. and Kim, S. H., 2010, "Acoustic Transmission Characteristics of the Cylindrical Cavity with an Auxiliary Cavity and a Gap," The Acoustical Society of Korea, Vol. 29, No. 3, pp. 173~183.

(3) Park, H. G., Kang, Y. J. and Kim, S. H., 2008, "Dual Mode Tuning Strategy of a Slightly Asymmetric Ring," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 123, No. 3, pp. 1383~1391.

(4) Kim, S. H., 2003, "Beat Map Drawing Method of Bell Type Structures and Beat Maps of the King Seong-deok Divine Bell," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 8, pp. 626~636.

(5) Kinsler, L. E., et al., 2000, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., New York.

(6) LMS International, 2000, SYSNOISE Users Manual, Revision 5.5.

(7) Ahn, S. J., Kang, Y. J., Kim, S. H. and Park, S. Y., 2008, "Analysis on the Acoustic Beat of a Slightly Asymmetric Cylindrical Shell," The Acoustical Society of Korea, Vol. 27, No. 4, pp. 183~190.