

주석 함량과 형상의 변화에 따른 모형종의 소리 특성에 관한 실험적 분석

김 소 회*, 조 성 호*, 최 영 철*, 김 양 한*, 박 응 규**

한국과학기술원 기계공학과, 소음 및 진동제어 연구센터*
태백기계공업고등학교**

Experimental Investigations on the Effect of Tin Composition and Bell's Shape on the Sound Characteristics of Bell

So-Hee Kim*, Sung-Ho Cho*, Young-Chul Choi*, Yang-Hann Kim*, Ung-Kyu Park**

Center for Noise and Vibration Control, Department of Mechanical Engineering, KAIST*
Tae-Baek Mechanical High School**

요 약

성덕대왕 신종을 비롯한 한국범종의 독특한 특성으로 맥놀이 현상을 들 수 있는데, 이것은 한국범종의 독창적인 형상과 재질에서 기인한다. 본 논문에서는 종의 형상과 재질을 달리하였을 때 종소리의 특성이 어떻게 달라지는가를 확인하고, 이로부터 가장 좋은 소리를 내는 종의 조건을 찾아보고자 한다. 이를 위해 주석 함량, 형상, 두께가 다른 열다섯 개의 모형종에 대해서 고유 주파수의 변화와 맥놀이 현상을 알아보았다. 그리고 한국범종과 외국종과의 차이점을 알아보기 위해, 일본종과 중국종의 대표적인 형상을 갖는 모형종을 한국범종을 모델로 한 모형종과 비교해 보았다. 또한, 울림통을 종의 아래에 설치하여, 울림통의 크기와 울림통과 종 사이의 거리에 따른 종소리의 변화도 분석하였다.

알아보기 위하여, 총 열다섯 개의 모형종과 두 개의 울림통을 이용한 실험을 수행하였다. 종의 성분, 형상, 두께를 변화시키면서 각 경우에 따른 주파수의 변화와 시간 응답의 변화를 살펴보고, 또 울림통과 종과의 상관관계를 알아보기 위한 실험도 실시하였다. 본 논문에서는 이러한 다각적인 실험적 분석을 통하여, 가장 좋은 소리를 내는 종의 특성을 다양한 관점에서 규명해 보고자 한다.

II. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 모형종 중 열 개는 성덕대왕 신종을 모델로 제작된 것이며, 그 치수는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 전체 높이가 190mm, 밑단의 바깥지름이 118mm으로 실제 성덕대왕 신종의 약 1/30 배이다. 각 종에 따라 주석의 함량과 두께가 다르므로, 질량은 모두 다른 값을 가지나, 대략적인 질량은 1.4kg에서

I. 서 론

성덕대왕 신종은 그 독특한 울림과 음향 특성으로 인하여 많은 학문적 관심의 대상이 되어 왔다. 그 중 가장 대표적인 특성은 이미 여러 연구에서 밝혀졌듯이, 맥놀이 현상 즉 근접한 두 개의 주파수 성분이 상호 보강, 상쇄되면서 끊어질 듯 다시 이어지는 고유한 소리를 내는 현상이라고 할 수 있다^[1]. 이렇듯 성덕대왕 신종을 비롯한 한국범종에서 발견되는 특징인 맥놀이 현상은 종이 완벽한 원의 형상을 하고 있지 않다는 기하학적 비대칭성에서 기인한다. 그러나 한국범종의 독특한 소리의 원인은 종의 기하학적 비대칭성 외에도, 종의 성분, 종의 형상, 종의 두께, 종과 울림통과의 거리, 울림통의 크기 등 여러 요인들이 복합적으로 작용한 결과라고 생각된다. 본 논문에서는 이러한 여러 요인들이 실제로 종의 소리에 어떠한 영향을 미치는지를

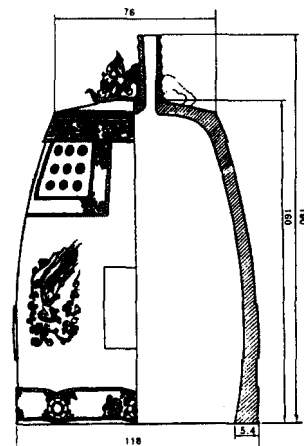


Fig. 1 성덕대왕 신종을 모델로 한 모형종의 형상 및 치수

1.7kg 내외이다. 이 열 개의 모형종 외에 한국범종과 외국종과의 차이점을 비교하기 위해, 일본종의 대표적인 형상을 갖는 네 개의 모형종과 중국종의 대표적인 형상을 갖는 한 개의 모형종이 사용되었다. 각각의 형상은 Fig. 2 와 같다. 타종시 방사되는 음향이 종 주변의 벽을 비롯한 구조물에 반사되어 나타나는 효과를 배제하기 위해서 실험은 무향실 내에서 행해졌으며, 실험장치는 Fig. 3 과 같다. 무향실 내에 종과 울림통을 설치하고, 근접장(near field)에서의 복잡한 응답을 피하기 위해서 타종 위치에서 50cm 떨어진 곳에 마이크로폰(microphone, B&K type 4134)을 설치하였다. 마이크로폰으로 입력받은 신호는 무향실 밖에 설치된 신호분석기(analyzer, HP 3563A)로 입력된다.

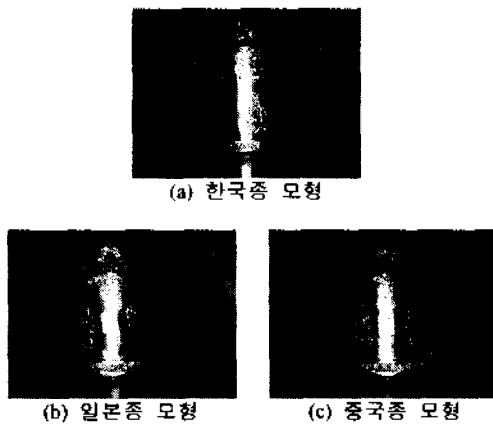


Fig. 2 모형종의 형상

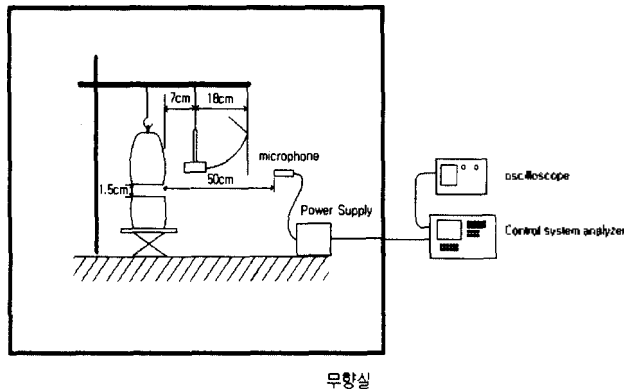


Fig. 3 실험장치의 구성

종의 고유 진동수의 범위가 어느 정도인지를 알아보기 위해 세 개의 종에 대한 예비실험을 수행하였다. 주석 함량이 3%, 13%인 한국종과 주석 함량이 13%인 일본종에 대해서, 종을 가진 후 신호분석기로 0Hz 에서 5kHz 까지의 파워 스펙트럼을 받아본 결과, 타종 후 시간이 어느 정도 지난 후에까지 남아있는 주파수 성분은 세 경우 모두 3kHz 이내에서 속함을 확인하였다. 따라서 0Hz 에서 3kHz 까지의 주파수 성분에 대한 파워 스펙트럼을 보는 것으로, 종의 주파수 성분은 충분히 설명된다. 이를 위해 주파수 분해능은 3.9Hz 로 하였고, 그에 따라 1.65 초 동안의 시간 응답을 얻을 수 있다. 그러나 타종 후 1.65 초의 시간 응답으로는 초기

가간에 의한 충격음만을 볼 수 있고, 시간이 어느 정도 지나서 초기 충격음이 사라진 후에 나타나는 맥놀이 현상은 관찰하기 힘들다. 그러므로 충분한 맥놀이 현상을 관찰하기 위해서는 타종 3초 후부터 신호를, 적어도 3초 이상의 시간 간격에 대해서 받기로 한다. 이를 위해서는 필수적으로 주파수 분해능의 향상이 수반되어야 한다.

열다섯 개의 모형종에 대해서 앞서 언급한 방법으로 얻은 파워 스펙트럼을 살펴보면, 모든 경우 500Hz 부근과 1400Hz 부근에서 두 개의 고유 진동수가 인접하여 쌍으로 나타나고 그 이상의 주파수 범위에서는 파크가 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 그리고 한 쌍의 고유 주파수가 가장 인접하여 나타나는 경우는 주석 함량이 13%와 15%인 한국종에서 관찰되는데, 이 때의 맥놀이 주파수는 7.5Hz 이다. 위의 실험 결과로부터, 모든 종의 고유 주파수는 400Hz 에서 1600Hz 까지의 범위에 속한다고 볼 수 있고, 이로부터 400Hz 에서 1600Hz 까지의 주파수 성분에 대해 주파수 분해능을 1.5Hz 로 하고, 타종 3초 후부터 6.4 초 동안의 시간 응답을 보기로 한다. 이 때의 주파수 분해능 1.5Hz 는 최소 맥놀이 주파수(7.5Hz)를 나타내기엔 충분한 값이다.

III. 실험장치의 타당성 검토

Fig. 3 에 나타난 스탠드는 종과 울림통의 위치를 고정시키기 위해 사용되었는데, 이 장치 자체의 진동이 종의 응답에 어느 정도의 영향을 미치는가, 즉 실험장치가 타당인가에 대한 사전 확인 작업이 필요하다. 이를 위해, 종을 매달 상태에서 스탠드를 가진하고 신호 분석기를 이용하여 0Hz 에서 3kHz 의 주파수 범위에 대한 파워 스펙트럼을 받은 결과가 Fig. 4 이다. VI 절의 실험결과에서 언급하고 있듯이, 종의 고유 주파수는 대부분 500Hz, 1500Hz 근방에서 두 개의 주파수가 인접하여 쌍으로 나타난다. Fig. 4 로부터 종의 고유 주파수와 유사한 주파수 영역에 존재하는 스탠드의 고유 주파수는 412Hz, 1362Hz 임을 알 수 있고, 이를 VI 절의 실험결과와 비교해 보면 타종에 의해 스탠드가 가진되더라도, 실제로 종의 파워 스펙트럼에는 스탠드의 고유 진동수가 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 이로부터 타종으로 인한 스탠드의 가진 효과는 거의 무시할 만하고, 그로 인한 응답도 역시 무시할 만하다는 결론을 얻을 수 있다.

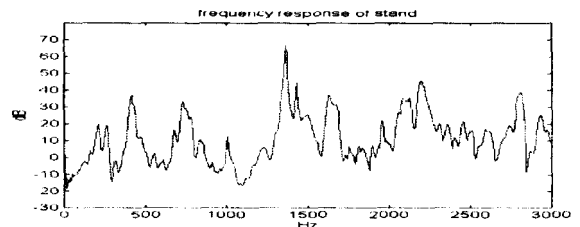


Fig. 4 스탠드를 가진하였을 때의 파워 스펙트럼

다음으로 종을 가진시키는 데 사용한 망치에 대한 타당성을 검토하였다. 실제로 성덕대왕 신종을 비롯한 많은 종은 타종을 위한 가진기를 함께 가지고 있다. 그러나 이 실험에 사용된 모형종은 가진기를 함께 가

지고 있지 않으므로, 타격 부분의 지름이 약 4cm 인 나무망치를 사용하였다. 이 때 사용된 나무망치가 종의 주요 고유 진동수를 모두 가진시킬 수 있는지를 확인해 볼 필요성이 제기된다. 이를 위해서 나무망치보다 큰 값의 강성(stiffness)을 갖는 쇠망치를 사용하여, 두 종류의 서로 다른 가진기로 주석 함량이 13%인 한국종을 가진하고 신호분석기로 0Hz에서 5kHz 범위의 주파수에 대한 파워 스펙트럼을 얻은 결과, 두 경우 모두 3kHz를 넘는 주파수 범위에서는 종의 고유 진동수가 나타나지 않음이 관찰되었다. 즉, 나무망치로 가진하는 것은 우리가 관심을 가지고 있는 주파수 영역에 대해서 종을 충분히 가진한다고 볼 수 있다.

IV. 실험결과 및 고찰

4.1. 시간에 따른 주파수 특성 변화

Fig. 5는 시간에 따른 주파수의 특성 변화를 보여준다. Fig. 5(a)는 타종 직후의 신호에 대한 파워 스펙트럼을, Fig. 5(b)는 타종 후 3초가 지난 후의 신호에 대한 파워 스펙트럼을 나타낸다. 타종 직후에는 5kHz까지의 주파수 전 영역에서 고른 피크들이 나타나지만, 타종 3초 후에는 고주파 성분은 감소되고 3kHz 미만의 주파수 성분들만 남게 됨을 관찰할 수 있다. 이로부터 타종 직후에는 저주파 성분과 함께 고주파 성분의 소리가 들리지만, 고주파 성분의 감쇠가 더 빨리 일어나고, 따라서 시간이 어느 정도 지난 뒤 듣게 되는 맥놀이는 저주파 성분에 의한 것임을 알 수 있다.

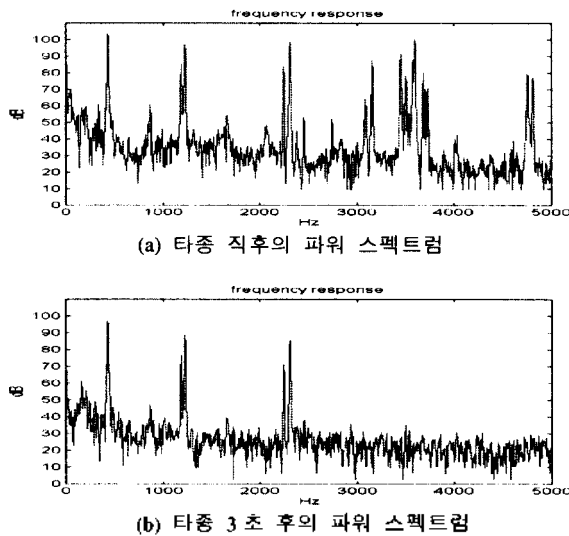


Fig. 5 시간에 따른 주파수 성분의 변화

4.2. 각각의 종에 대한 파워 스펙트럼(power Spectrum)과 시간응답(time Response)

종의 성분, 종의 형상, 종의 두께를 달리하며 실험한 각각의 경우에 대해서 고유 주파수와 그에 따른 인접한 두 주파수의 차를 Table 1에 나타내었다. Table 1로부터, 주석 함량이 13%인 한국종과 15%인 한국종이 가장 낮은 맥놀이 주파수(7.5Hz)를 나타내고, 그 중에

Table 1. 각각의 종에 대한 고유 주파수와 그에 따른 인접한 두 주파수의 차

종의 종류	주석 함량	결과			
		0 - 3 kHz 까지의 고유주파수(Hz)와 그에 따른 인접한 두 주파수의 차(Hz)			
한국종	3%	535.2	-	1492.2	1527.3
		-	-	35.1	
	5%	480.5	-	1344.0	1375.0
		-	-	31.0	
	7%	465.0	484.4	1250.0	1289.2
		19.4		39.2	
	9%	498.4	512.5	1406.2	1421.8
		14.1		15.6	
	11%	461.0	468.8	1269.5	1312.5
		7.8		43.0	
	13% (a)	433.8	441.3	1191.4	1226.6
		7.5		35.2	
13% (b)	538.7	552.5	1507.8	1523.4	
	13.8		15.6		
13% (c)	640.0	664.0	1820.0	1847.7	
	24.0		27.7		
15%	468.8	476.3	1273.4	1324.2	
	7.5		50.8		
17%	492.2	523.4	1402.3	1441.4	
	31.2		39.1		
일본종	5%	540.0	595.7	1578.2	1601.5
		55.7		23.3	
	7%	587.0	601.6	1543.8	1657.8
		14.6		114.0	
	13%	604.4	648.4	1664.0	1695.3
		44.0		31.3	
15%	507.8	550.8	1441.5	1496.0	
	43.0		54.5		
중국종	15%	500.0	526.0	1406.2	1425.7
		26.0		19.5	

서도 주석 함량이 13%인 종이 더 낮은 주파수 영역에서 맥놀이 현상이 발생함을 알 수 있다. 이를 근거로 가장 좋은 주파수 특성을 보이는 종은 주석 함량이 13%인 한국종이라는 결론을 얻을 수 있고, 이 종의 파워 스펙트럼과 시간 응답은 Fig. 6에서 보이고 있다. Fig. 6에 나타난 파워 스펙트럼으로부터 인접한 고유 주파수는 433.8Hz와 441.3Hz, 1191.4Hz와 1226.6Hz의 두 쌍이고, 시간 응답에서 약 7Hz의 맥놀이가 나타나는 것은 433.8Hz와 441.3Hz 성분에 의한 것임을 알 수 있다. 즉 시간이 어느 정도 지난 후에 듣게 되는 맥놀이 현상은 서로 인접한 두 개의 저주파 성분에 의한 것이다.

4.3. 고찰

일반적으로 맥놀이라 함은 인접한 두 주파수의 차이가 10Hz 미만인 경우를 말한다¹²⁾. 성덕대왕 신종의 경우는 맥놀이 주파수가 약 0.3Hz로 매우 낮은 값을 가지며¹¹⁾, 이로 인해 웅장하고 여운이 긴 소리를 내게 된다. 그러나 본 실험에서 얻은 결과에서는, 최소 맥놀이 주파수가 약 7Hz로 실제 종에 비해 매우 큰 값을 갖는데, 이는 모형종의 크기가 작기 때문이다. 이러한 문제를 감안하여 본 실험에서는, 맥놀이 주파수를 두 주파수의 차이가 10Hz 미만인 것으로 보았다.

주석 함량, 형상, 두께를 달리 해 가며 열다섯 개의 모형종에 대한 파워 스펙트럼과 시간 응답을 살펴본 결과, 일본종이나 중국종의 형상을 본뜬 모형종에서는 맥놀이를 관찰할 수 없고 성덕대왕 신종을 모델로 한 모형종에서만 맥놀이를 관찰할 수 있었다. 성덕대왕 신종의 모형종에서 주석 함량의 변화에 따른 맥놀이 경향은 다음과 같이 요약할 수 있다. 주석 함량이 3% ~ 9%인 종에서는 기본주파수와 그에 바로 인접한 주파수 간의 차가 10Hz를 넘고 시간 응답에서도 맥놀이 현상이 관찰되지 않았다. 그러나 주석 함량이 11% ~ 15%인 종에서는 인접한 두 주파수의 차가 10Hz 미만으로, 시간 응답에서 맥놀이 현상이 관찰되었다. 여기서 다시 주석 함량을 증가시킨 17%와 19%의 종에서는, 맥놀이 현상이 발생하지 않았다. 이로부터 맥놀이를 발생시키는 모형종은 주석 함량이 11%, 13%, 15%인 성덕대왕 신종 모형임을 알 수 있고, 그 중에서도 특히 주석 함량이 13%인 모형종에서 맥놀이 주파수가 가장 낮고 또 맥놀이가 일어나는 주파수 영역도 가장 낮으므로, 이 종이 본 실험에서 사용된 종 중에서는 가장 온화하고 부드러운 느낌의 소리를 낸다고 할 수 있다.

한국 범종에서 발견되는 또다른 특징 중 하나는 종의 하단에 지면을 파서 만든 울림통이 있고 그 위에 종이 매달려 있다는 점이다¹⁾. 여기서는 이러한 울림통의 형상을 달리하였을 때, 또 종과 울림통과의 거리를 달리하였을 때 종의 소리가 어떻게 달라지는지 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 울림통은 일반 울림통(깊이 14mm)과 깊은 울림통(깊이 119mm)의 두 종류이다. 각각의 울림통에 대해서, 종과 울림통과의 거리가 1.5cm, 5.0cm인 두 가지 경우에 대해서 실험하였다.

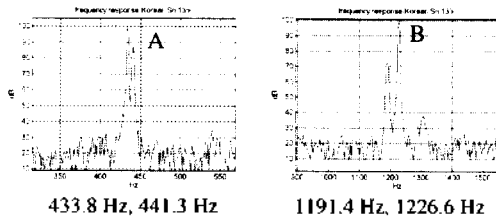
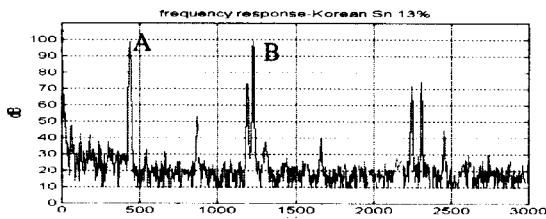
여기서 종과 울림통과의 거리 1.5cm는, 실제 성덕대왕 신종과 울림통과의 거리를 같은 비율로 축소하여 얻은 값이고, 5.0cm는 울림통과의 거리가 멀어졌을 때 나타나는 변화를 알아보기 위해 임의로 정한 값이다. 주석 함량이 15%인 한국종에 대해 일반 울림통을 사용한 실험에서 얻은 파워 스펙트럼을 살펴보면, 종과 울림통 사이의 거리의 변화가 종의 고유 주파수에는 아무런 영향을 미치지 못하나, 1000Hz 이상의 고주파에서는 인접한 두 고유 주파수 사이의 음압 레벨의 차가 현저히 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 깊은 울림통을 사용한 실험에서도 똑같이 관찰된다. 그러나 이 결과가 울림통의 역할에 대해서 충분한 설명을 한다고는 볼 수 없다.

V. 결론

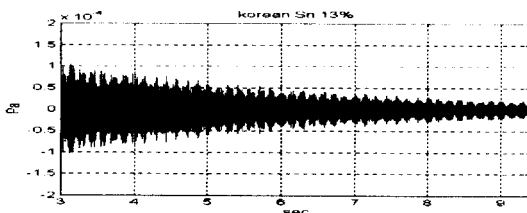
본 실험에서는, 종의 소리 특성에 영향을 미치는 요인으로 종의 기하학적 형상 외에도 종의 구조 성분, 모양, 두께 등이 될 수 있을 것이라 생각하고, 주석 함량, 형상, 두께를 달리 해 가며 열다섯 개의 모형종에 대한 파워 스펙트럼과 시간 응답을 살펴보았다. 그 결과, 맥놀이를 발생시키는 모형종은 주석 함량이 11%, 13%, 15%인 성덕대왕 신종 모형임을 알 수 있고, 그 중에서도 특히 주석 함량이 13%인 모형종의 주파수 특성이 가장 좋은 것을 관찰하였다. 울림통의 영향을 알아보는 실험에서는 뚜렷한 결과를 얻을 수 없었는데, 이는 종의 크기가 갖는 제한조건 때문이라고 추정된다. 본 실험은 종을 특징짓는 여러 요소들을 독립적으로 변화시켜가며, 각각의 요소가 실제로 종의 소리에 어떠한 영향을 미치는지를 실험적으로 분석해 본 데에 그 의의가 있다 하겠다.

참 고 문 헌

1. 김양한, 김시문, "원통형 음향 홀로그래피를 이용한 성덕대왕 신종의 방사음장 특성 분석", 한국음향학회논문집, 제 16 권, 제 4 호, pp. 94-100, 1997
2. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics(3rd ed.)", Wiley and Sons, New York, pp. 267-268, 1982
3. 김양한, 박연규, 김영기, "성덕대왕 신종의 3 차원 진동신호 측정 및 분석 결과", 한국음향학회논문집, 제 16 권, 제 6 호, pp. 41-47, 1997
4. 김양한, 박순홍, 김시문, "성덕대왕 신종 내부 음장 및 울림통이 신종의 소리에 미치는 영향과 새로운 울림통 크기의 제안", 한국음향학회논문집, 제 16 권, 제 5 호, pp. 60-67, 1997



(a) 0 ~ 3 kHz의 주파수 성분에 대한 파워 스펙트럼



(b) 타종 3 초 후의 시간 응답

Fig. 6 주석 함량 13%인 한국종에 대한 파워 스펙트럼과 시간 응답