

# 실험적 분석을 통하여 본 성덕 대왕(聖德大王) 신종(神鐘) 음통(音筒)의 음향학적 특성

## Experimental Analysis on Acoustic Characteristics of the Sound-Pipe of King Song-Dok Bell

윤 두 병\*, 김 양 한\*\*  
(Doo-Byung Yoon\*, Yang-Hann Kim\*\*)

### 요 약

성덕 대왕 신종 상단부에 위치한 음통의 음향학적 역할을 규명하기 위하여 현장 실험을 수행하고 관찰된 현상을 설명하기 위한 모델을 제안하였다. 실험을 통하여 음통의 음향학적 특성을 대표하는 음통 출구단의 반사 계수, 방사 임피던스를 측정된 결과, 음통이 저주파(이 경우 300Hz 이하)에서는 거의 모든 소리를 종 내부로 되돌리는 특성을 보이며, 그 이상의 고주파 성분은 효과적으로 종 밖으로 방사하는 특성을 갖고 있음을 확인하였다. 또한 음통에 대한 음향학적 모델링 및 이를 바탕으로 한 수치적 분석을 수행하였으며 실험결과와 대체적으로 경향이 일치하는 결과를 보여주고 있다.

### ABSTRACT

The acoustic characteristics of the sound-pipe of King Song-Dok bell, which is located on the top, are investigated by experiment and simulation. The experimental results; reflection coefficient, and radiation impedance, demonstrate that the sound-pipe is capable of radiating high frequency(above 300Hz) sound; it behaves as damper. It is also found that a waveguide model well presents the acoustic characteristics of the sound-pipe.

### I. 서 론

한국 범종에는 다른 나라의 종에서는 볼 수 없는 음통(혹은 음관)이 종의 상단부(鐘頂部)에 단두용(單頭龍)과 함께 아름답고도 힘찬 모습으로 주조(그림 1)되어 있다. 오래전부터 이 음통(音筒)에 대한 관심은 문양의 아름다움 뿐만 아니라, 종소리와 관련지어 있을 수 있는 구체적인 역할에 관하여 많은 연구<sup>1-3)</sup>가 진행되어 왔다.

종 상단부에 위치한 이 음통의 기원에 대해서는 여러 가지 학설이 있으나 대체적으로 이 음통이 신라 시대의 만파식적(萬波息笛)에서 유래<sup>1)</sup>한 것으로 생각하는 다분히 설화적(說話的)인 견해와 음통이 범종 소리를 원거리까지 은은하게 전파시켜 주는 역할을 한다는 음향학적 관점이 비교적 강조된 견해<sup>2)</sup>가 있다. 성덕 대왕 신종도 예외는 아니다.

음통의 음향학적 특성, 혹은 좀더 일반적인 관심사항인 음통의 종소리에 미치는 영향에 대한 연구가 비교적 풍부하지 못한 이유는 여러가지가 있을 수 있으나, 근본

적인 이유는 음통의 음향학적 분석에 반드시 필요한 데이터, 즉 실험적 데이터가 참고문헌<sup>4)</sup>에서 기술하고 있듯이 최근까지는 존재하지 않았다는 것이다.

참고문헌<sup>4)</sup>에서는 음통의 역할이, 그 음향학적 특성, 즉 반사 계수와 방사 임피던스 특성을 통하여 분석하여 보면 고주파 음을 효과적으로 방사시키는 역할, 즉 기계적 요소로 보면 감쇠기의 역할일 것이라 추론하고 있다. 본 고에서는 이러한 추론의 근거가 되는 관련 실험, 즉 실험 장치 및 실험방법, 실험결과에 대하여 좀 더 상세히 살펴 보고자 한다.

### II. 음통의 음향학적 모델링

성덕 대왕 신종 음통은 그림 1에 나타나 있듯이 종의 안쪽 지름이 82mm이고 바깥 방향의 지름이 이보다 큰 184mm로, 직선형 나팔관과 같은 형상을 갖고 있다. 이것은 음통이 신종 전체 면적에서 차지하고 있는 비중이 지극히 작은 것을 의미(전체 면적에 대하여 약  $10^{-3}$  정도로 작은 면적)함과 아울러 형태가 직관(일자형 관)보다 효율적인 음의 방사, 즉 종의 내부 에너지를 종 밖으로 뿜어낼 수 있는 형태임을 알 수 있다. 성덕 대왕 신종의 소리틀

\*한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\*한국과학기술원 기계공학과

접수일자: 1996년 4월 1일

체계적으로 분석하기 위하여 실시한 정교한 실험결과를 분석한 참고문헌<sup>4)</sup>에 의하면 타종 후 약 4~5초 이후에는 주로 64Hz부근의 약 3초 간격의 맥놀이 현상과 168Hz 부근의 약 9초 간격의 맥놀이 현상이 주요 소리 특성을 지배하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 주파수 영역과 그 이상 주파수 영역, 즉 보다 빨리 감쇠되는 주파수 영역의 종소리와 음통의 특성을 검토할 필요가 있다.

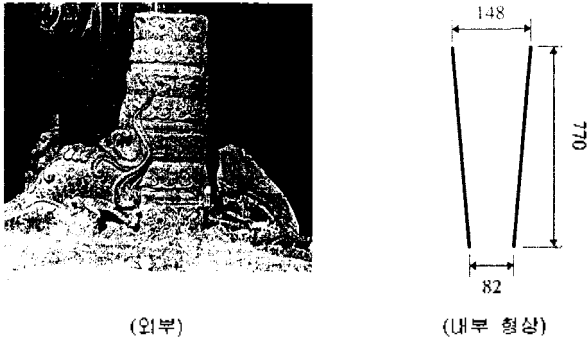


그림 1. 음통의 외부 및 내부의 형상(단위: mm)

일반적으로 관내의 파동 현상은 도파관 이론<sup>5)</sup>으로 잘 설명할 수 있다. 이 이론의 물리적인 설명은 다음과 같이 시도될 수 있다.

관내의 유체 입자가 움직일 수 있는 방향은 관의 길이 방향, 즉 주된 전파 방향과 관의 단면 방향이라 볼 수 있으며, 유체 입자는 가진 주파수에 따라 움직이는 방향을 선택하게 된다. 만일 가진 주파수가 단면 형상이 가진 고유 모드에 해당하는 고유 주파수와 같거나 혹은 큰 경우에는 유체 입자는 단면 방향의 운동, 즉 고차 모드 성분을 표현하는 운동을 하게 될 것이고 따라서 단면에 대하여 평면파 성질을 잃게 될 것이다. 이러한 도파관 이론을 음통에 적용하면 음통 내부에 전파하는 음파가 평면파인 경우는, 가진 주파수가 식(1)로 표현되는 차단 주파수(cutoff frequency;  $f_{cutoff}$ )보다 작은 주파수인 경우일 것이다.

$$f_{cutoff} = \frac{1.84c}{\pi D} \quad (1)$$

여기서 식(1)의  $c$ 는 음속(m/s),  $D$ 는 음통의 지름(m)을 나타낸다. 음통의 출구 부분의 직경(0.148m)을 기준으로 차단 주파수를 계산하여 보면 약 1350Hz이며, 신종의 주된 소리 성분, 즉 오래 지속되는 소리 성분은 모두 이 차단 주파수보다 훨씬 작은 주파수 영역임을 알 수 있다.

차단 주파수가 관내 평면파 전파 주파수 범위를 정하는 주파수 측정량이라면 실제로 관내로 유입된 음파가 얼마나 종의 외부로 유출, 즉 방사되는가 하는 것은 관의 끝이 가지고 있는 성질, 즉 방사 임피던스 혹은 관 끝의 반사 계수(입사파에 대한 반사파의 비) 등으로 표현될 수 있을 것이다. 3절에서는 이러한 음통의 음향학적 특성을

대표하는 물리량을 측정하기 위한 실험장치 및 실험방법에 대해 알아보기로 한다.

### III. 실험장치 및 실험방법

성덕 대왕 신종의 대부분의 소리 및 진동 특성은 800Hz 이하의 주파수 영역에 있다는 점을 감안하고 2절에서 살펴본 바와 같이 이 주파수 영역에서는 평면파 성분만이 전파하므로 그림 2와 같이 음통 내부 음장의 측정을 위한 실험장치를 구성하고 실험을 수행하였다. 종 본체 내부에 기준음원을 설치하고 음원을 800Hz이하의 백색 잡음(random noise) 성분으로 가진하여 종 본체 내부에 음장을 형성시킨 상태에서 2개 마이크로폰 방법(Two Microphone Method)<sup>6-8)</sup>을 이용하여 음통내의 두지점  $x_1, x_2$  (그림 2)의 음압을 측정하였다.

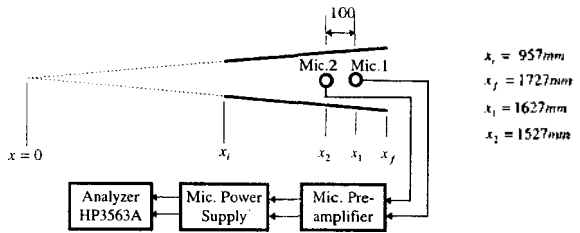


그림 2. 음통 내부 음장 측정을 위한 실험장치도 (사용된 계측기 및 센서의 구체적인 사양은 표1 참조)

여기서 사용된 스피커는 지름이 14cm인 저주파용(woofer, GS-FOSTER)이었으며 파워 증폭기는 B&K type 2706을 사용하였고 신호 발생기(B&K type 1027 sine random generator)를 이용하여 2Hz~2kHz 사이의 백색 잡음을 발생시키는 방법을 사용하였다. 전술한 2개 마이크로폰 방법(그림 2)은 음통 끝부분에서 입사되는 음파와 반사되는 음파의 양을 주파수 별로 구할 수 있으므로 2절에서 언급한 음통의 음향학적 특성을 대표하는 반사 계수, 임피던스 등을 그림 2에 나타난 방법을 이용하여 측정하였다. 측정에 사용된 이론적인 배경(2개 마이크로폰 방법)을 간단히 설명하면 다음과 같다.

음통 내부의 음압과 속도를 각각  $p(x, f)$ 와  $u(x, f)$ 라 하면 음압과 속도는 식(2), 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$p(x, f) = \frac{1}{x} [A(f)e^{-jks} + B(f)e^{-jks}] \quad (2)$$

$$u(x, f) = \frac{1}{\rho cx} [A(f)(1 - \frac{j}{kx})e^{-jks} + B(f)(1 + \frac{j}{kx})e^{-jks}] \quad (3)$$

위식들은 음통 내부에 전파하는 음파의 주파수가 차단 주파수보다 작아서 음파가 평면파의 형태로 전파할 것이라는 가정과, 양끝의 임피던스 부정합(impedance mismatch)에 의하여 음통내의 음파는 오른쪽으로 진행하는 파(식

(2)의 첫번째 항)와 왼쪽으로 진행하는 파(식(2)의 두번째 항)로 구성될 것이라는 가정을 하고 있다. 또한 음통의 형상이 거리에 따라 직선적으로 변하는 점을 감안하여 음통의 단면적( $S(x)$ )을  $S(x) = \alpha x^2$ 와 같이 변화한다고 생각할 수 있다. (그림 3) 위식에서  $f$ 는 음파의 주파수(frequency)를,  $k$ 는 음파의 파수(wavenumber)를 나타낸다. 이때 각각의 주파수에서 음통을 전파하는 음파의 크기  $A(f)$ ,  $B(f)$ 를 알면 음통 내부의 음장 제한이 가능하며 음통의 입구( $x = x_i$ ) 및 출구( $x = x_j$ )에서의 임피던스 및 반사 계수 등을 구할 수 있다. 즉 임피던스( $z$ )와 반사 계수( $r$ )는 각각 식(4), 식(5)로 표현할 수 있다.

$$z(x, f) = \frac{p(x, f)}{u(x, f)} \quad (4)$$

$$r(f) = \frac{B(f)}{A(f)} \quad (5)$$

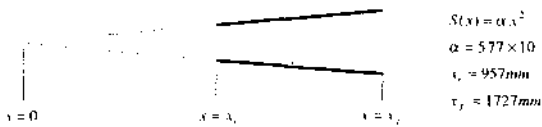


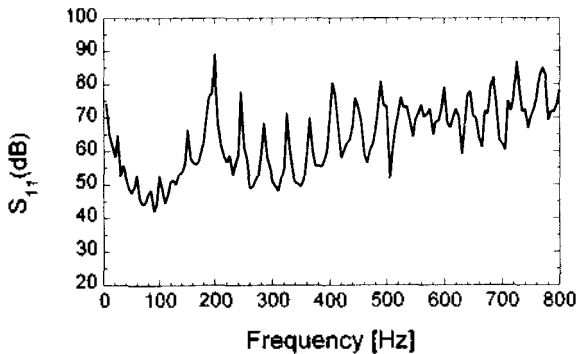
그림 3 음통의 모델링( $S$ 는 음통의 단면적을 표시함)

#### IV. 실험결과 및 토의

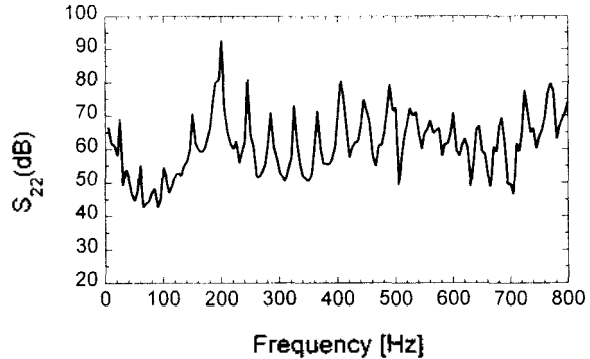
그림 4는 음통 내부에 설치된 두개의 마이크로폰에서 측정된 음압의 파워 스펙트럼(power spectrum)(각각  $S_{11}$ 과  $S_{22}$ )과 두개 마이크로폰 방법을 이용하여 측정된 음압 파워 스펙트럼을 입사파 성분( $S_{aa}$ )과 반사파 성분( $S_{bb}$ )으로 분리한 결과를 보여주고 있다.

그림 4(a)와 그림 4(b)는 각각 마이크로폰 1 ( $x = x_1$ )의 위치와 마이크로폰 2 ( $x = x_2$ )에서 측정된 음압의 주파수 특성을 보여주고 있다. 측정된 결과에서 피크(peak) 성분들은 종 본체 내부의 공진 주파수(resonance frequency)에 해당하는 성분들로 추측할 수 있다. 그림 4(c)와 그림 4(d)는 각각 음통으로 입사된 음파의 파워 스펙트럼과 음통 출구에서의 임피던스 부정합에 의해 입구단 쪽으로 반사되는 음파의 파워 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림 4(c)와 그림 4(d)를 비교해 보면 저주파 성분은 거의 모두 반사가 되며 고주파 성분으로 갈수록 반사되는 음압 파워 스펙트럼이 약간씩 작아지는 것을 어렵게 관찰할 수 있다. 따라서 단순한 입사파와 반사파의 스펙트럼 비교는 충분히 이해할만한 물리적 인식을 주지 못함을 알 수 있다.

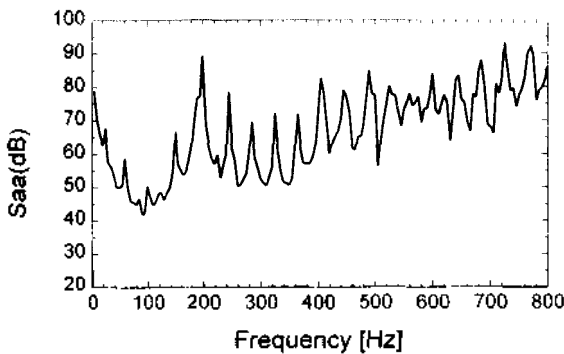
그림 5는 이 경우 음통 입구단에서의 입력 임피던스( $x = x_i$ ) 및 출력 임피던스( $x = x_j$ )와 이때의 반사 계수, 입



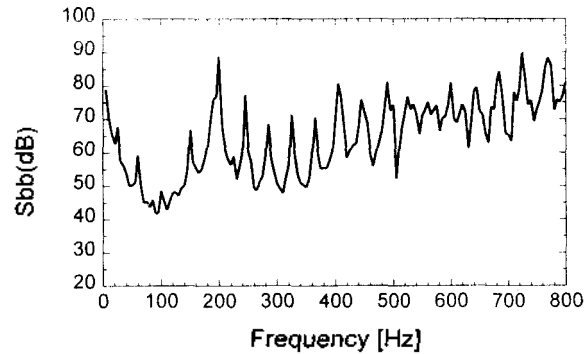
(a) 마이크로폰 1에서의 음압 스펙트럼



(b) 마이크로폰 2에서의 음압 스펙트럼



(c) 입사 스펙트럼



(d) 반사 스펙트럼

그림 4 마이크로폰에서 측정된 음압 스펙트럼과 입사 스펙트럼 및 반사 스펙트럼

사되는 음파의 파워에 대한 방사되는 파워의 비를 나타내고 있다. 그림 5(b), (c), (d)를 관찰해보면 음통의 출력 임피던스의 실수항, 허수항이 0보다 작아지고 반사 계수가 1보다 크며, 입사되는 음파의 파워에 대한 방사되는 파워의 비가 0보다 작아지는 주파수들이 존재하는 물리적으로 쉽게 받아들이기 어려운 결과가 관찰되는데, 이는 음통 위에 설치된 벽면(지붕)에 의한 반사파와 외부 잡음에 의한 실험 오차로 판단된다. 보다 주목할만한 사실은 출구의 임피던스의 실수항이 약 300Hz이상부터 확연히 증가하는 현상을 관찰할 수 있으며 이것은, 반사 계수가 같은 주파수 영역에서 1.0이하로 감소하는 현상과 일치하고 있다. 즉 그림 5(d)에서 보여주고 있듯이 음통 외부로 방사되는 음파는 주로 300Hz이상이며 주파수가 높을수록 방사 효율이 높아짐을 알 수 있다. 이러한 주파수 특성은 음통이 비록 작지만 종 내부음 중 고주파 성분을 효과적으로 감쇠시키는 역할을 하고 있음을 이야기하고 있다.

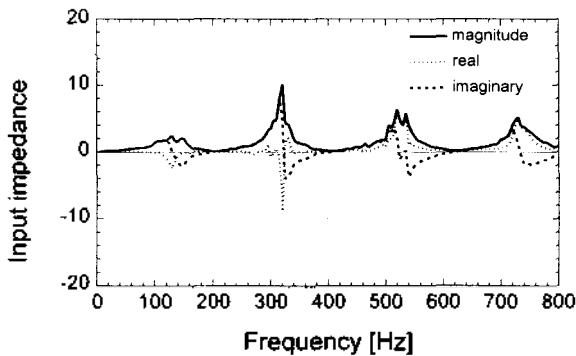
다음으로 실험으로 관찰된 이러한 현상을 과연 이론적으로 뒷받침할 수 있을까 알아보기 위하여, 직선적으로 변화하는 음통(그림 3) 형태의 모델을 이용한 수치적 분석을 시도하였고, 결과가 그림 6에 종합되어 있다. 이 결과를 보면 대체적으로 경향이 일치함을 볼 수 있다.

또한 그림 5(a)에서 음통 입구에서의 입력 임피던스를 살펴보면 종 내부의 음파가 음통을 잘 통과하는 조건, 즉 입력 임피던스의 크기가 작고 허수항이 0이 되는 공진 주파수는 210Hz, 406Hz정도임을 알 수 있다. 이는 종의 주요 방사 성분인 64Hz, 168Hz 등<sup>14)</sup>과는 많은 차이가 있으며 음통이 성덕 대왕 신종 타종시 주로 방사되는 주파수 성분들, 즉 64Hz, 168Hz 성분들을 음통을 통해 외부로 방사하기에는 부적절함을 다시 확인할 수 있다.

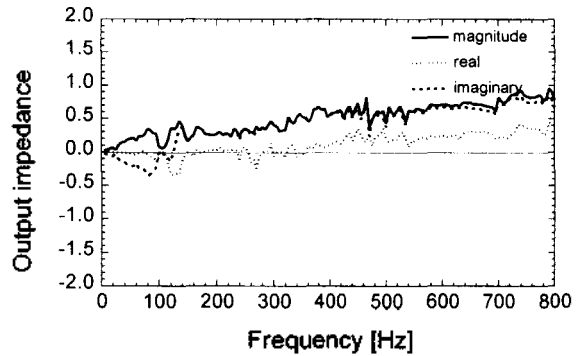
그림 7은 음통을 음통 입구 지름(0.082m)을 갖는 직관의 형태로 설계했을 때의 음통 입구 및 출구에서의 임피던스와 반사 계수, 입사되는 음파의 파워에 대한 방사되는 파워의 비를 모의실험을 통해 구한 결과이다.

그림 5, 6의 (a), (b)와 그림 7의 (a), (b)를 비교해 보면 단면적이 점차로 증가하는 형태를 가지는 성덕 대왕 신종 음통의 입력 임피던스의 크기가 직관의 경우보다 작은 것을 알 수 있으며 음통 외부로 방사되는 음향 파워와 비례하는 출력 임피던스의 실수항은 직관의 경우보다 큰 것을 관찰할 수 있다.

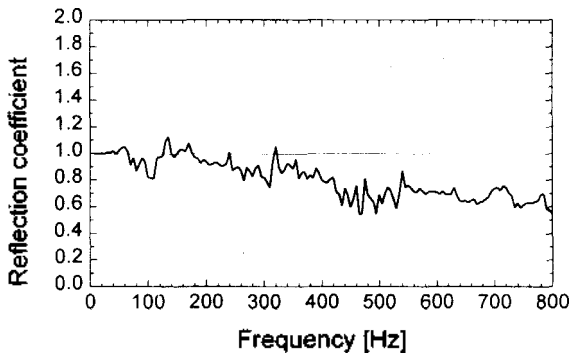
또한 그림 5, 6의 (c), (d)와 그림 7의 (c), (d)를 비교해 보면 현재 성덕 대왕 신종에 설치된 음통의 경우 반사 계수가 직관의 경우보다 작으며 음통으로 입사되는 음향 파워에 대한 방사 파워의 비가 직관의 경우보다 더 큰 것



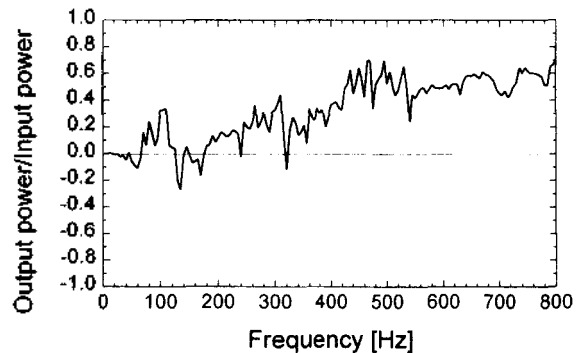
(a) 음통 입구의 임피던스



(b) 음통 출구의 임피던스

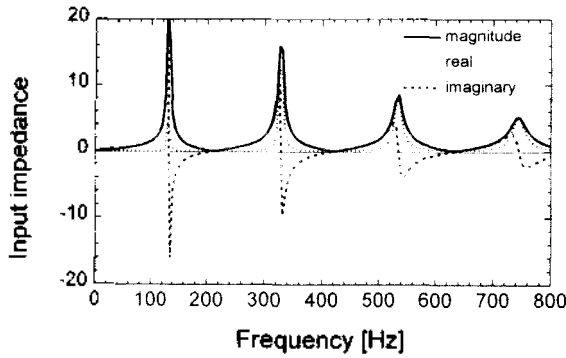


(c) 반사 계수

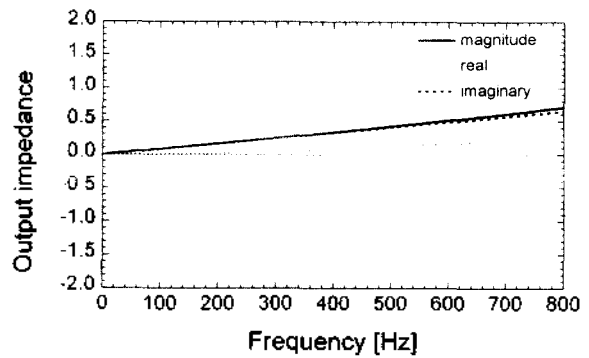


(d) 입사되는 음파의 파워에 대한 방사 파워의 비

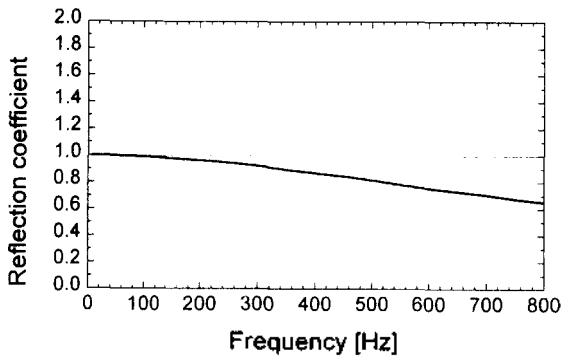
그림 5 음통 입구 및 출구에서의 임피던스와 반사 계수, 입사되는 음파의 파워에 대한 방사 파워의 비(실험)



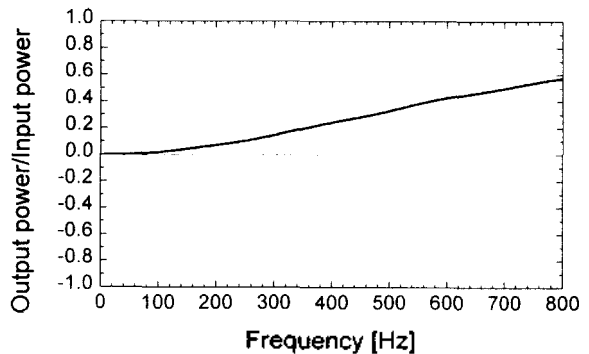
(a) 유통 입구의 임피던스



(b) 유통 출구의 임피던스

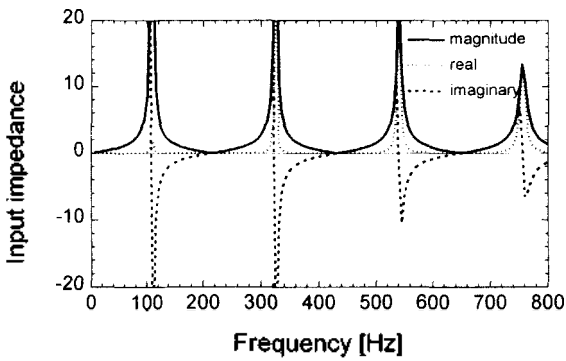


(c) 반사 계수

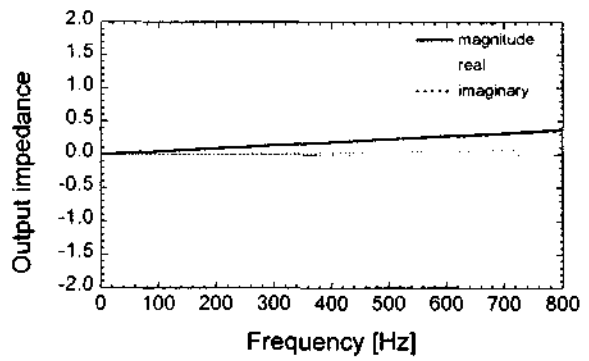


(d) 입사되는 음파의 파워에 대한 방사 파워의 비

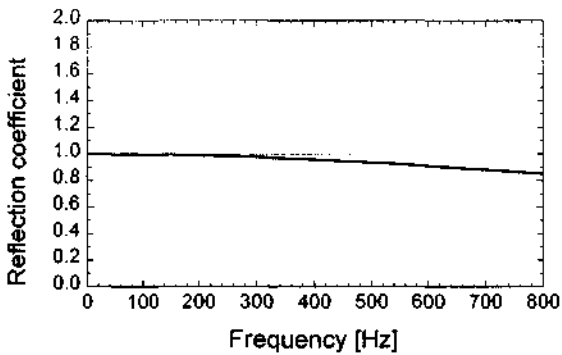
그림 6. 유통 입구 및 출구에서의 임피던스와 반사 계수, 입사되는 음파의 파워에 대한 방사 파워의 비(모의실험)



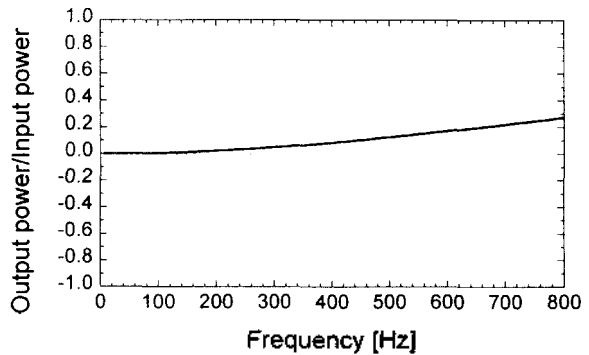
(a) 직관 입구의 임피던스



(b) 직관 출구의 임피던스



(c) 반사 계수



(d) 입사되는 음파의 파워에 대한 방사 파워의 비

그림 7. 유통 입구 지름과 같은 지름을 갖는 직관의 입구 및 출구에서의 임피던스와 반사 계수, 입사되는 음파의 파워에 대한 방사 파워의 비(모의실험)

표 1. 음통 내부 음장 측정을 위한 사용 장비 및 특성

사용 장비	장비 명	특성
Speaker	GS-FOSTER1	1ea Max. Output: 30W, Resistance: 8 Diameter: 140mm
Sine Random Generator	B&K 1027	1ea Frequency Range: 2~200kHz Signal: Sine, Random, Pink, Band Noise
Power Amplifier	B&K 2706	1ea Max. Output: 75VA (15Volt, 5Ampere)
Microphone	B&K 4135	2ea 1/4인치, Sensitivity: 4mV/Pa Dynamic Range: 39-164dB Frequency Range: 4~100kHz
Microphone Preamp.	B&K 2633	2ea Frequency Range: 2~200kHz Gain: -0.06dB
Microphone Power Supply	B&K 2807	1ea 2채널, 200V polarization
Analyzer	HP3563A	1ea 2채널 Frequency Range: 64μHz~100kHz

을 볼 수 있다.

위의 결과를 정리하면 단면적이 점차로 증가하는 구조로 설계된 성덕 대왕 신종의 음통은 종 내부의 음향 파워 중 고주파 성분(300Hz 이상)을 외부로 효율적으로 방사시킬 수 있는 구조를 가지고 있음을 알 수 있다.

## V. 결 론

성덕 대왕 신종 음통을 음향학적으로 모델링하고 분석한 결과, 음통이 출구단으로 갈수록 점차적으로 단면적이 증가하는 구조를 가지고 있으며, 음통 입구단에서와 같은 단면적을 가지는 직관의 경우보다는 타종시 종 내부에 형성되는 음향 파워를 음통을 통해 효율적으로 외부로 방사시킬 수 있는 구조를 가지고 있음을 확인하였다.

또한 실험 및 모의실험을 통하여 반사 계수, 입구 임피던스, 출구 임피던스를 구해보으로써 고주파 성분(300Hz 이상)의 내부음을 효율적으로 방사하는 음통의 음향학적 특성을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- 황수영, "신라종과 만파식적의 설화," 한국범종연구회 학술강연회, pp. 1-6, 1982.
- 연영하, 락재경, 유용호, "한국 범종의 음관의 기초연구," 범종 No.5, pp.7-20, 1982.
- 이병호, "한국 범종의 음향학적 연구(II)," 이병호교수 기념논문집(II), pp.79-87, 1989.
- 김양한, "음향 진동 측정을 통한 성덕 대왕 신종의 소리 특성 탐구," 한국음향학회논문집 투고, 1997. 3.
- L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics(Third Edition), Wiley and Sons, New York, pp. 200-213, 1982.

6. 강성우, 김양한, "두개의 음향탐촉자를 이용한 소음기의 투과손실 측정과 오차해석," 한국소음진동공학회지 제2권 제3호, pp.181-192, 1992.

7. A.F. Seybert and D.F. Ross, "Experimental Determination of Acoustic Properties Using a Two-Microphone Random Excitation Technique," J. Acoust. Soc. Am., Vol.61, pp. 1362-1370, 1977.

8. A. F. Seybert, "Two-Sensor Methods for the Measurements of Sound Intensity and Acoustic Properties in Duct," J. Acoust. Soc. Am., Vol.83, pp.2233-2239, 1988.

▲윤 두 병(Doo-Byung Yoon) 1969년 1월 15일생  
현재: 한국과학기술원 기계공학과 박사과정 5년  
(1995년 제14권 2호 참조)

▲김 양 한(Yang-Hann Kim) 1950년 8월 21일생  
현재: 한국과학기술원 기계공학과 교수  
(1988년 제7권 5호 참조)