

진동과 음향을 고려한 신라대종의 구조설계

Structural Design of a Large Silla Bell Considering Vibration and Sound

김석현† · 이중혁‡ · 변준호*

Seock Hyun Kim, Joong Hyeok Lee and Jun Ho Byeon

Key Words : Bell structural design(범종구조설계), King Seongdeok Divine Bell(성덕대왕 신종)

ABSTRACT

The Seongdeok Divine Bell(nicknamed "Emile Bell") represents the bell of the Silla dynasty. However, ringing it was stopped since 2003 for the safety of the bell. Currently, Kyungju city is performing a project casting a new great bell(tentatively named "Great Bell of Silla") that inherits the beautiful appearance and the sound of the Seongdeok Divine Bell in order to ring a new coming millenium. The new bell is designed to be almost same as the Seongdeok Divine Bell in terms of size, weight and shape as well as its sound. In this study, we investigate the problems occurring in the design of the bell structure and propose the design strategy for the reconstruction of the traditional large bells.

1. 신라대종의 제작 배경

한국의 전통 범종은 그 수려한 외관과 아름답고 웅장한 소리로 세계적으로 자랑할 만한 문화유산이다. 다른 전통 문화재가 갖는 역사적 배경과 수려한 외관 이외에, 범종은 소리라는 심리물리학적 특성을 보이기에 진동 및 음향 분야의 흥미로운 연구대상이 되고 있다. 그러나 범종은 국내외적으로 큰 시장을 형성하지 못하는 관계로, 그 제작은 소수의 중소 전문 제작업체가 담당하여 왔으며 전문적인 연구가 이루어지기 어려웠다. 그러나 국내 지자체나 사찰의 요청으로 20ton이 넘는 대형종이 국내 전문 업체에 의하여 많이 주조되고 있으며, 최근에는 30ton이 넘는 초대형 종을 수출하기에 이르렀다.

성덕대왕신종은 신라범종을 대표하는 범종이다.

현재까지 백제나 고구려 종의 존재가 확인되지 않은 관계로 신종은 한국을 대표하는 종으로 세계적으로 알려져 있다. 수려한 외관과 웅장한 소리는 많은 국민들과 외국인들의 관심을 끈다. 그러나 많은 이들이 실제 타종하지 못하고 외관만 보는 데에 아쉬움을 표한다. 이러한 문제를 해소하기 위하여 경주시에서는 신종을 계승하는 전통 신라종을 주조하여 타종하는 계획을 세우고, 새 종 건립 사업을 추진중이다. 지금까지 주조된 그 어떤 종보다 성덕대왕신종에 접근하도록 주조함으로써, 신종의 전통을 계승하여 향후 새 천년을 올리려는 것이 건립 사업의 중요한 목적이다. 이를 위하여 성덕대왕신종의 체원과 음향에 최대한 가깝게 새 종의 기본 구조와 문양을 만드는 작업이 추진되고 있다.

2. 본 론

2.1 성덕대왕신종의 체원

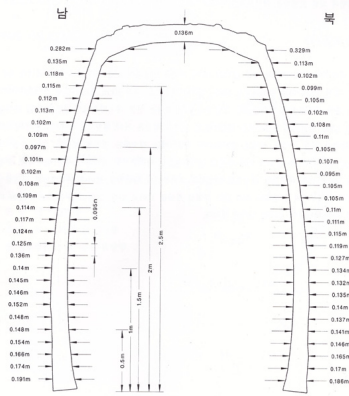
새 종 설계의 기초가 되는 성덕대왕신종의 외형 실측 자료는 두 가지이다. 1982년 측정결과⁽¹⁾와, 1997년 경주박물관 종합학술조사⁽²⁾의 실측 결과가

† 정회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 교수
E-mail : seock@kangwon.ac.kr

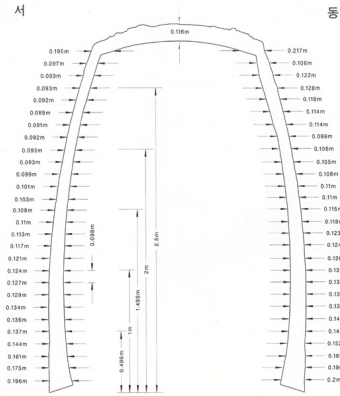
Tel : (033)250-6372 , Fax : (033)257-4190

‡ 학생회원 ; 강원대학교 대학원 융합시스템공학과

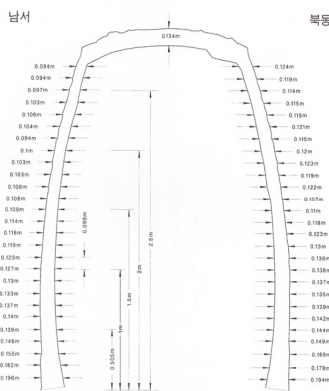
* 학생회원 ; 강원대학교 대학원 융합시스템공학과



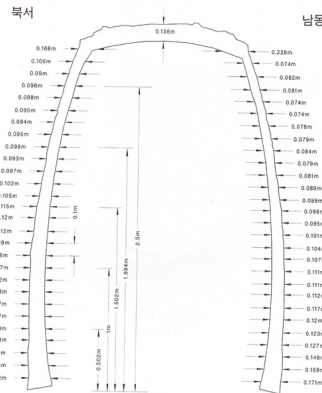
(a) South-north direction



(b) East-west direction



(c) Southwest-northeast direction



(d) Northwest-southeast direction

Figure 1. Cross sectional dimension of the bell body⁽²⁾

있는데, 두 측정치 사이에는 약간의 차이가 있다. 본 사업에서는 보다 최근에 영상 촬영 방식으로 측정된 두 번째 자료에 근거하여 새 종을 설계한다. 종합학술보고서⁽²⁾의 성분 분석결과에 따르면 부위별로 약간의 차이가 있으나, 종체의 평균 밀도는 $8,693\text{kg/m}^3$ 으로 산출되었다. 이 결과는 주물 청동의 밀도인 $8,700\text{kg/m}^3$ 에 거의 일치한다.

성덕대왕신종의 두 당좌를 남, 북 방향으로 하고 반경방향 45° 간격으로 높이별 두께를 측정한 결과를 Fig. 1에 보인다. 밀도 $8,700\text{kg/m}^3$ 을 적용하고 4 방향 단면 치수의 평균값으로 구조를 모델링하여 계산하면, 종체 중량은 Table 1에서와 같이 $20,779\text{kgf}$

로 산정되어, 측정치 $18,577\text{kgf}$ ($\pm 2\text{kgf}$)보다 약 $2,200\text{kgf}$ 이나 크다. 중량 측정치의 신뢰도가 치수 측정치보다 상대적으로 높으므로, 이는 치수가 실제보다 두껍게 측정되었을 가능성을 시사한다.

2.2 고유진동수해석

종의 소리는 1차적으로 종체의 고유진동수에 지배된다. 성덕대왕신종의 고유진동수에 최대한 접근하도록 새 종의 구조를 설계하고자 한다. 실측도면의 치수에 근거하여 고유진동수 해석을 수행하였다. 탄성계수는 주물 청동의 96GPa 을 적용하였고, 종체

Table 1 Dimension and natural frequency of the King Seongdeok Divine Bell

Dimensions		Yeom's measurement		KNM report
Height of body (mm)		3030		3015.5
Diameter of bottom circumference (mm)		2227		2233
Thickness of bottom circumference (mm)		203		203
Weight(calculated)($\rho:8,693 \text{ kg/m}^3$)		22,555kgf		20,779kgf
Weight(measured)		18,908kgf		
Natural frequency (Hz)				
Mode number	(m, n)	Measurement ⁽³⁾	Yeom's measurement	KNM report
1	(0, 2)	64.07	67.17	67.83
		64.42		
2	(0, 3)	168.52	178.57	177.44
		168.63		
3	(1, 2)	189.34	196.86	203.61
		190.55		
4	(1, 3)	227.99	243.91	240.81
		228.34		
5	(0, 4)	281.93	310.38	296.10
		282.61		

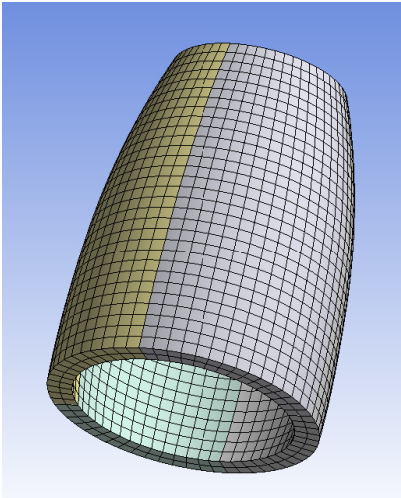


Figure 2. Finite element model of the bell body

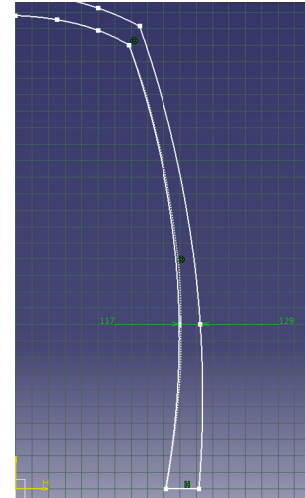


Figure 3. Thickness decrement of the middle body (dotted line : thickness decreased model)

를 Fig. 2와 같이 원주방향 60등분, 높이방향을 30 등분하여 Hex20요소 4,560개로 모델링 하였다. 고유진동수 해석결과를 Table 1에 보인다. 고유진동수 해석치는 측정치보다 최대 6% 정도 높게 나온다. 수치 해석의 속성상 계산치가 실제보다 약간 높게 나오는 것이 일반적이나, 다른 대종의 경우보다 그 차이가 크다. 그 원인으로 다음의 가능성을 생각해 볼 수 있다. 총중량 측정치 18.9ton(중체만 18,577kgf)을 신뢰할만하다고 볼 때, 종합보고서의 도면 치수로는 밀도가 $7,770\text{kg/m}^3$ 으로 일반적인 주물 청동보다 낮게 나온다. 또한 이 밀도 값에 의

한 고유진동수는 더 높아져 오차는 더욱 증가한다. 현실적으로도 표면의 가장 돌출된 부분을 측정하게 되므로 실제보다 두껍게 측정된 것으로 보는 것이 타당할 것이다. 이와 같이 두께가 다소 두껍게 측정되었다고 보고, 중량 측정치에 맞추어 종체의 두께를 미세하게 감소시켜 설계 모델을 재구성하였다. Fig. 3에서와 같이 천판 및 중체 상/하단의 두께는 고정시키고 중앙부의 내경 두께를 감소시켰다. (높이 1000mm 지점에서 두께 129mm → 117mm

Table 2 Natural frequency of the design model of King Seongdeok Divine Bell

Mode number	(m, n)	Natural frequencies(Hz) (measured)	Natural frequencies(Hz) (analysis)
1	(0, 2)	64.07	65.92
2		64.42	
3	(0, 3)	168.52	170.66
4		168.63	
5	(1, 2)	189.34	204.20
6		190.55	
7	(1, 3)	227.99	232.96
8		228.34	
9	(0, 4)	281.93	274.49
10		282.61	

로 12mm 감소) 고유진동수 해석치와 측정치를 Table 2에서 비교한다. Table 1과 비교할 때, 해석치는 측정치에 훨씬 가까워졌다. 이러한 주파수 해석 결과도 종합보고서에서 제시하고 있는 성덕대왕신종의 두께가 실제보다 크게 다소 측정되었을 가능성이 높음을 뒷받침한다. 향후 주요 고유진동수를 신종의 고유진동수에 더 근접시키는 작업이 필요하다. 이를 위해서는 각각의 진동 모드를 고려하여 두께를 부분적으로 미세하게 조절할 필요가 있다.

3. 결 론

성덕대왕신종을 계승하는 신라대종을 주조하는 데에 있어, 신종에 대한 기존의 측정 결과가 보이는 문제점을 검토하고, 그 결과를 토대로 다음과 같이 신라대종의 설계 방향을 설정하였다.

- 1) 종합보고서에 따르면, 성덕대왕신종의 총중량은 18,908kgf(±2kgf)으로 측정되었다. 전체 체적 대비 용뉴 체적 비(1.75%)를 고려하면, 용뉴의 중량은 331kgf, 종체의 중량은 18,577kgf로 추정된다.
- 2) 종합보고서의 성분 분석결과표에 따라 종체의 평균 밀도를 계산하면, 8,693kg/m³으로 산출된다. 이 결과는 일반적인 주물청동의 밀도 8,700kg/m³에 거의 일치한다.
- 3) 종합보고서 치수의 평균값으로 구조를 모델링할 때, 종체 중량은 측정치보다 약 2,200kgf 크게

산정된다. 따라서 성덕대왕신종의 기존의 치수 측정치에서, 두께가 실제보다 크게 측정되었을 가능성이 매우 높다.

4) 주조된 범종은 표면이 매끄럽지 않으므로, 3차원 영상스캐닝 기술을 사용하더라도 측정 오차가 발생한다. 또한, 재료의 화학적 성분이 부위별로 다르므로 질량의 분포와 강성의 분포도 부위별로 편차를 보인다. 뿐만 아니라, 주형의 제작 및 주조과정에서도 불가피한 오차가 발생한다. 이러한 오차는 음향을 지배하는 고유진동수에도 영향을 미치며, 미세한 비대칭성에 지배되는 맥놀이 특성에도 영향을 미친다. 결론적으로 성덕대왕신종을 포함한 전통 범종 문화재를 동일하게 완전히 복제하는 것은 불가능하며, 위에 기술한 오차 가능성을 수용하는 범위에서의 복원이 현실적일 것이다.

후 기

본 연구는 경주시에서 지원하는 ‘신라대종 제작에 따른 기본구조 및 문양 설계, 주조 감리 및 음향평가 용역’의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Y. H. Yum , A Study on the Korean Bells, Research Institute of Korean Spirits and Culture Report 84-14, 1984.
- (2) Kyeongju National Museum, Comprehensive Research Reports on the King Songdok Divine Bell, 1999.
- (3) S. H. Kim, J. H. Kim, J. D. Jeong, J. M. Lee, 2002, Vibration and Sound Characteristics of King Song-Dok Bell, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 12, No. 7, pp. 534~541.