

2018 평창동계올림픽 대종의 제작과 음향 평가

Manufacturing and Sound Estimation of the Great Bell of 2018 Pyeongchang Winter Olympics

김석현^{a*}, 변준호^a

Seockhyun Kim^{a*}, Jun-Ho Byeon^a

^a (24341) Dept. of Mechatronics, KNU, Kangwon Univ. road 1, Chooncheon, Kangwon-do

Received 14 September 2018; Revised 19 October 2018; Accepted 22 October 2018

Abstract

This paper introduces the design, casting, and sound evaluation results of the Great Bell of 2018 Pyeongchang Winter Olympics. The Olympic Bell was manufactured to announce the opening of the successful Winter Olympics in the world with a grand sound. The bell was designed to the dynamic shape to give a grand and harmonious sound in consideration of the global sports festival. In this study, the performance of the beat making the sound magnificent and the harmony of the bell sound were quantitatively evaluated using acoustical factors. Beat maps were investigated to understand the directivity of the beating sound. The purpose of the research is to present the production technique of a traditional Korean bell that has a dynamic shape and a grand and harmonious sound.

Keywords: The Great bell of 2018 Pyeongchang Winter Olympics, Casting of bell, Natural frequency, Harmony of bell sound, Beat map

1. 서론

2018평창올림픽대종(이하 올림픽대종)은 2018년 2월 강원도 평창에서 개최된 동계올림픽의 개막식에서 웅장한 소리로 대회의 성공적 개최를 전 세계에 알리기 위하여 제작되었다. 이 종은 국제올림픽기구의 심의를 거쳐 ‘2018 평창올림픽대종’이란 공식 명칭을 인정받았다. 올림픽대종은 올림픽이 세계인의 스포츠 축제임을 감안하여 현대에 제작된 한국중 가운데에서 가장 역동적인 형상으로, 또 웅장하고 조화로운 소리를 내도록 설계되었다. 올림픽 개최 연도를 상징하도록 무게는 2018관(7.6톤)으로 결정되었다. 2015년 11월 강원대학교 산학협력단에서 기본구조설계를 시작하였고, 2017년 8월 주조 및 음향감리 용역을 통해 (주)성종사가 주조하였다. 오늘날 제작되는 많은 대형 범종은 외관과 문양이 수려한 성덕

대왕신종을 모델로 제작되고 있다^[1, 2]. 그러나 올림픽대종은 상원사종을 모델로 설계되었다. 몸통의 배 부분이 볼록하게 튀어나온 항아리 모양으로 힘찬 느낌을 주므로, 스포츠 축제의 역동성을 부각시키기에 적합한 형상이다. 성덕대왕신종(AD771년)에 앞서 주조된 상원사종(AD725년)은 국내에서 가장 오래된 전통 범종으로, 아름다운 형상과 웅장한 소리를 자랑한다. 올림픽 개최지인 평창군 상원사에 위치하는 점도 모델 선정에 고려되었다. 본 논문은 올림픽대종의 설계 및 주조 방법 그리고 음향평가 결과를 전반적으로 소개한다. 소리의 웅장함을 만드는 맥놀이 성능과 타격음의 조화로우음을 음향학적으로 정량화하고 그 우수성을 평가한다. 이를 통하여 역동적인 형상과 웅장하고 조화로운 소리를 내는 전통 한국 종의 제작 기술을 후대에 전하는 것이 연구의 목적이다.

* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6372
fax: +82-33-259-5548

E-mail address: seock@kangwon.ac.kr (Seockhyun Kim).

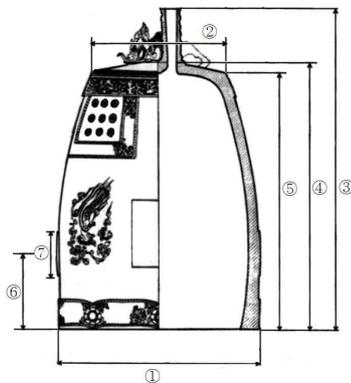
2. 올림픽대종의 설계

2.1 상원사종의 제원

Fig. 1과 Table 1은 상원사종의 형상과 주요 부분의 실측치다. 상원사종은 전통 범종 가운데에서도 배 부분이 가장 볼록하게 튀어나와 힘차고 역동적인 인상을 준다. 종신고 1.3m에 무게 1.2톤 정도의 크지 않은 규모로, 고음의 청아하면서도 웅장한 소리를 낸다. 2018 동계올림픽 개최지인 평창군의 상원사에 있어 올림픽대종의 기본 모델로 가장 적합한 종이다. 1976년 하대 부분에 균열이 발견된 이후 타종이 금지된 상태이다. 1,250여 년간 3,000만회 이상으로 추정되는 수많은 타종으로 피로 균열이 하단으로부터 수직으로 발생한 것이 관측 되었다^[3].



a) Photograph



b) Main design variables

Fig. 1 Sangwon Temple Bell

Table 1 Dimensions of Sangwon Temple Bell^[3]

①	903mm
②	645mm
③	1660mm
④	1355mm
⑤	1290mm
⑥	461mm
⑦	227mm
Weight	1,226kg

2.2 올림픽대종의 구조 설계

상원사종의 외관을 따르되 적절한 음높이와 조화로운 음색, 구조 안전성을 고려한 설계가 수행되었다. 원래의 상원사종과 가장 큰 차이는 무게가 1.2톤에서 7.6톤으로 크게 증가한 것과, 구조 안전성 측면에서 하단의 두께를 크게 증가시킨 점이다. 종 하부의 개방 구조 때문에 타종시 하단에서 매우 큰 응력이 발생하고 오랜 진동으로 피로가 누적된다. 상원사종의 하단의 구경 대비 두께 비는 5.2%로 성덕대왕신종의 두께 비 9.1%에 비해 매우 얇다. 이것이 균열의 원인이 될 수도 있으므로 두께 비를 대폭 증가시켰다. 두께 비의 최종치는 고유주파수 성분들의 화음도를 높이는 반복적인 해석 과정을 거쳐 9.4%로 결정되었다. 화음도는 기본음을 만드는 2차 고유주파수에 대한 다른 부분음들의 주파수 비를 취하여 부분음별로 결정된다. 이에 대해 뒤의 음향평가의 타격음 부분에서 상세히 설명한다. 하단 두께의 증가는 고유주파수를 전반적으로 상승시켜 소리가 더 힘차게 들리게 하는 효과도 있다. 고유주파수는 각각의 고유진동모드에 의해 발생한다. Fig. 2는 올림픽대종의 1차~4차의 고유진동모드를 보인다. 대부분의 모드에서 하단의 변형이 가장 크게 발생하므로 이 부분의 두께 증가는 내구성 향상 측면에서 필요함을 알 수 있다.

Fig. 3은 최종 설계도이다. 구경대비 종신고 비는 약 1.5, 최대 직경 대비 종신고 비는 1.4정도이다. 이는 아름다운 조형미를 갖는 건축물의 이상적인 가로 세로 비인 $\sqrt{2}$ 에 근접한다. 설계도에서 타격중심(Center of Percussion)은 이 지점을 타격할 때 종 걸이 부분의 반발력이 영이 되는 지점으로, 타격중심 이론^[4]으로 결정된다.

고유주파수와 타격중심의 해석에서는 상용유한요소해석 프로그램인 ANSYS 15.0을 사용하였다^[5]. 유한요소모델은 종 상단 일부에 Wed15 요소를, 몸체의 대부분에 Hex20 요소를 사용하였다.

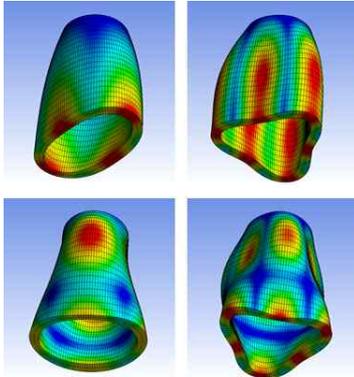


Fig. 2 Vibration modes of Olympic Bell
[1st~4th modes]

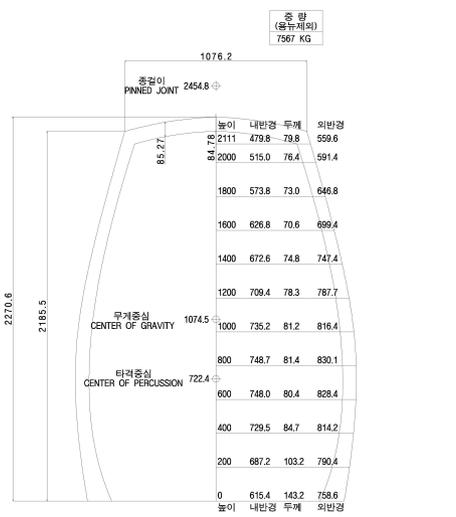


Fig. 3 Final drawing of Olympic Bell

3. 올림픽대종의 주조

Fig. 4는 올림픽대종을 주조하기 위하여 제작된 주형틀을 보인다. 내형은 건조사형으로 조형하고 외형의 문양은 밀납법^[6]으로 정밀하게 음각 조형하였다. 우측의 수직 통로를 통하여 위에서 아래로 용탕을 주입하게 되는데, 이를 하주식 주조법^[6]이라 한다. 옛날에는 위에서 바로 용탕을 주입하는 상주식으로 주조하였다. 하주식에서는 통로를 따라 내려온 용탕이 주형틀의 빈 공간을 채우면서 위로 차오른다. 이 방식은 섭씨 1,050°C의 뜨겁고 무거운 용탕이 위에서 바로 떨어지면서 주물사를 훼손시키는 것을 막을 수 있다. 또 아래로부터 위로 용탕이 천천히 차오르면서 가스와 불순물을 외부로 분출시키므로 우수한 재질을 얻을 수 있다.

화학적 조성은 Cu 82.0 %, Sn 16.8 %, Zn 0.02 %, Pb 0.01 %, Si 0.02 %, P 0.01 %이며, 인장강도는 273 MPa로 나왔다^[6]. 이러한 값은 전통 한국종의 주물청동제의 물성치이다.

Fig. 5는 주조후의 올림픽대종이며 주요 부분의 치수를 Table 2에 보인다. 주요 부분의 치수는 설계치 기준 3% 이내의 오차로 주조되었다. 주형틀의 제작오차, 무겁고 뜨거운 용탕의 주입에 따른 주형의 변형, 냉각 응축 등 제어하기 어려운 주조 오차를 감안할 때, 매우 정밀하게 주조된 것으로 평가된다.

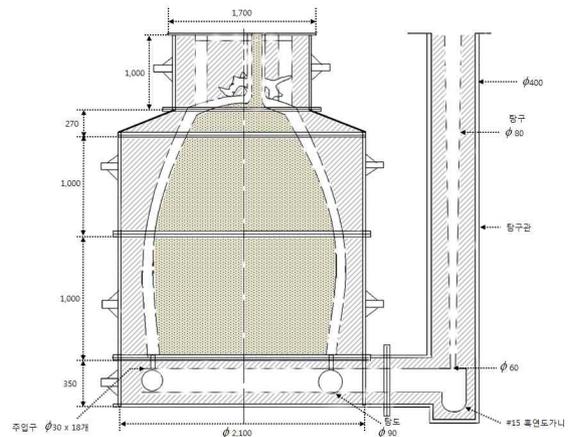


Fig. 4 Casting mold for Olympic Bell ^[6]



Fig. 5 Olympic Bell after casting

Table 2 Dimensions of Olympic Bell

Variables	Design	Measured	Deviation (%)
H_b	2,271	2,340	3.06
H_s	2,186	2,241	2.54
D_o	1,517	1,539	1.45
D_u	1,076	1,089	1.19
t_{av}	143.1	142.5	-0.43

4. 올림픽대종의 음향평가

4.1 타격음

타격직후 3초 ~ 4초 간 발생하는 타격음은 많은 수의 고유주파수 성분들이 합성된 결과다. 맑고 웅장하면서도 조화로운 소리가 우수한 타격음의 조건이다. 이 조건은 고유주파수의 분포 특성에 지배된다. Fig. 6은 타격음의 주파수 스펙트럼이다. 피크에서의 주파수가 고유주파수이다. 종소리를 지배하는 주요 주파수대역인 600 Hz 범위에서 10여개의 고유주파수 성분이 발생한다. 92.5 Hz의 1차음은 가장 오래 들리는 여음을 만들고, 242.5 Hz의 2차음은 기본음으로 타격음의 음높이를 지배한다. 이 두 성분이 종소리에서 가장 중요하다. 또 2차의 기본음과 고차 성분들이 얼마나 조화롭게 잘 어울리는가에 따라 타격음의 조화로우미 결정된다. Table 3은 타격음이 얼마나 조화로운가를 가늠하는 화음도 평가 결과이다. 화음도 평가 결과는 Malmberg [7]의 화음도 평점 기준에 따랐다. 음높이를 지배하는 기본음(2차 242.5Hz)에 대한 부분음들의 주파수 비 f_i/nf_o 를 구한 후, 조화롭게 어울리는 정도에 따른 화음도 평점 m_i 를 부여하였다. 화음도 평점은 완벽하게 조화로운 11점 만점 이하로 부여된다. 계산된 부분음별 평점에 이병호의 [8] 총평점 방법을 적용하였다. 그는 부분음별 화음도 평점 m_i 에 각 성분들의 음향파위 측정치 P_i 를 곱하여 가중화음도 m_iP_i 를 구하고, 각 성분들의 가중 화음도를 식 (1)과 같이 평균한 화음도 총평점을 제안하였다. 계산 결과를 100점 만점으로 환산한 결과, 올림픽대종의 화음도 총 평점은 88점이 나왔다. 이는 한국 전통 범종 가운데에서 가장 우수한 성덕대왕 신종의 화음도 총평점 90점 대등한 수준이다.

$$m = \frac{\sum m_i P_i}{\sum P_i} \quad (1)$$

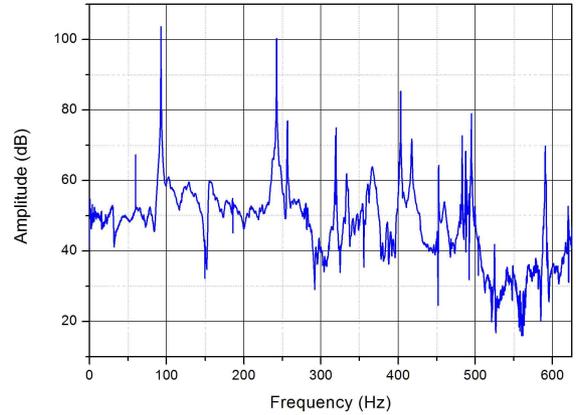


Fig. 6 Frequency spectrum of striking sound

Table 3 Harmonic grade of Olympic Bell

Mode	f_i	f_i/nf_o	m_i	$(dB)_i$	P_i	m_iP_i
1	92.5	1.526	9.6	107.4	4.688	45.009
2	242.5	1	11	107.6	4.798	52.774
3	256.25	1.057	1.2	85.6	0.381	0.457
4	320	1.320	7.3	80.3	0.207	1.511
5	403.75	1.665	8	90.8	0.693	5.548
6	452.5	1.866	2.2	70.5	0.067	0.147

4.2 여음

여음에서 가장 중요한 음향 특성은 끊어질듯 이어지는 맥놀이의 선명함과 그 길이다. 주조직후 올림픽대종의 맥놀이는 Fig.7처럼 선명하나 그 주기가 16초로 지나치게 길어서 거의 들리지 않는 정도였다. 맥놀이의 선명도나 주기는 종 구조의 미세한 비대칭성이 결정한다^{9, 10}. 현실적으로 주조과정에서 발생하는 미세한 비대칭성을 예측하거나 제어하는 것은 불가능하다. 따라서 설계단계에서 맥놀이 특성을 파악하는 것은 불가능하다. 옛날에는 종을 깨고 다시 만들었다는 설도 있으나, 오늘날에는 주조 후 종 내부를 연삭해서 비대칭성을 인위적으로 만들어줌으로써 맥놀이 특성을 교정할 수 있다¹¹⁻¹³.

올림픽대종의 맥놀이를 만드는 진동모드를 실험적으로 파악하고, 당좌 위치와의 상관성을 검토하여 종 내부의 적합한 지점을 연삭하는 교정 작업을 수행하였다. 교정방법의 상세한 내용은 선행 연구에서 서술하였다¹⁴. 교정 작업을 통해 가장 적합한 것으로 알려진 성덕대왕 신종의 맥놀이 주기 3초에 가깝게 교정하였다. Fig.8은 교정 후의 맥놀이 파형을 보인다.

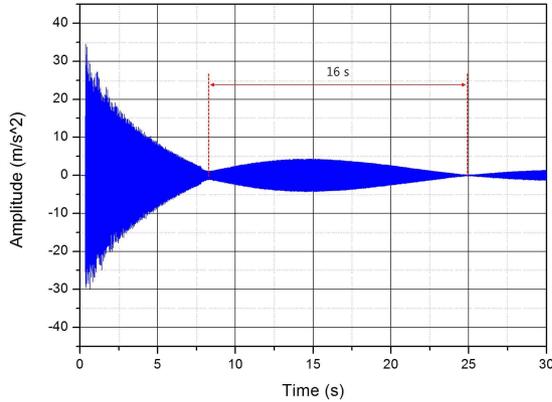


Fig. 7 1st beat before tuning

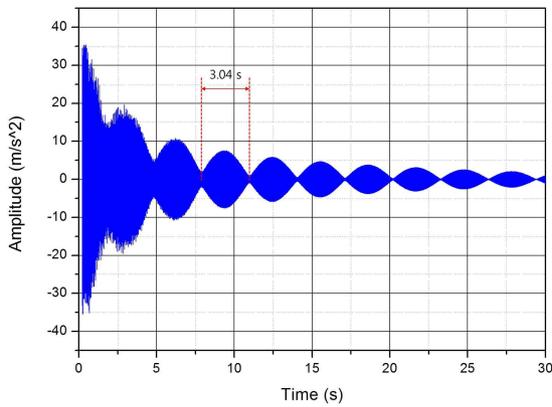


Fig. 8 1st beat after tuning

4.3 감쇠

웅장한 타격음과 끊어질 듯 이어지는 여음은 길게 지속될수록 좋다. 종소리의 지속 시간은 종의 고유한 진동특성뿐만 아니라, 타종하는 당목의 재질, 타격력, 타격 위치 등 외부의 타격 조건에 따라 다르다. 이러한 타격조건에 무관하게 종소리의 지속시간을 평가하는 인자가 감쇠비(Damping ratio)이다. 종처럼 감쇠가 매우 작은 진동계의 경우에는 보통 대수감소법(Logarithmic decrement method)^[15]을 사용하여 등가점성감쇠비를 구한다. 여음과 기본음을 각각 필터링해서 추출한 후 대수감소법으로 감쇠비를 구한 결과, 각각 1.08×10^{-4} 과 2.48×10^{-4} 으로 측정되었다. 이는 성덕대왕신종의 여음 감쇠비 1.3×10^{-4} 과, 기본음 감쇠비 3.0×10^{-4} 보다 약간 작다. 감쇠비가 작다는 것은 동일한 타격조건 하에서 그만큼 소리가 더 오래 지속될 수 있음을 의미한다.

4.4 소리의 방향성

종소리는 여러 고유주파수 성분들의 합이다. 고유주파수는 각각의 고유진동모드가 만든다. 모든 고유진동모드는 원주상에서 주기적인 변위를 보인다. 따라서 소리의 방향성을 파악하려면, 각각의 진동모드가 원주상의 방향에 따라 어떻게 소리를 방사하는가를 살펴야 한다. 저자는 각각의 진동모드가 원주상에서 어떻게 진동하고 소리를 발생시키는가에 대한 이론 모델을 제시한 바 있다^[16]. 이에 따르면 원주상에서 각각의 모드별 가속도 응답은 식 (2)로 결정된다.

$$\ddot{w}_n(\theta, t) = C_n e^{-\zeta_{na}\omega_{na}t} [\cos n(\theta^* - \psi_{nL}) \cos n(\theta - \psi_{nL}) \sin(\omega_{nL}t) + \cos n(\theta^* - \psi_{nH}) \cos n(\theta - \psi_{nH}) \sin(\omega_{nH}t)] \quad (2)$$

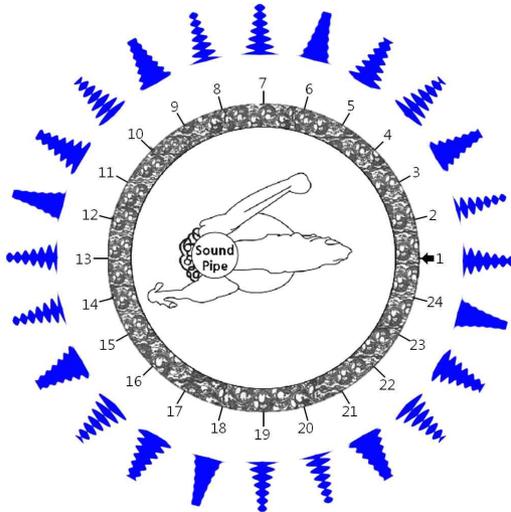
여기서 θ^* 는 타격지점이고 C_n 은 모드의 기여도 상수이다. 맥놀이를 만드는 주파수 쌍에서 낮은 주파수가 ω_{nL} 이고 높은 주파수가 ω_{nH} 다. ψ_{nL} 은 낮은 주파수 모드의 배(Anti-node) 위상이고, ψ_{nH} 는 높은 주파수 모드의 배다. 각 모드의 주파수 쌍과 감쇠비 쌍의 평균치는 식 (3), (4)의 산술 평균치를 의미한다.

$$\omega_{na} = (\omega_{nL} + \omega_{nH})/2 \quad (3)$$

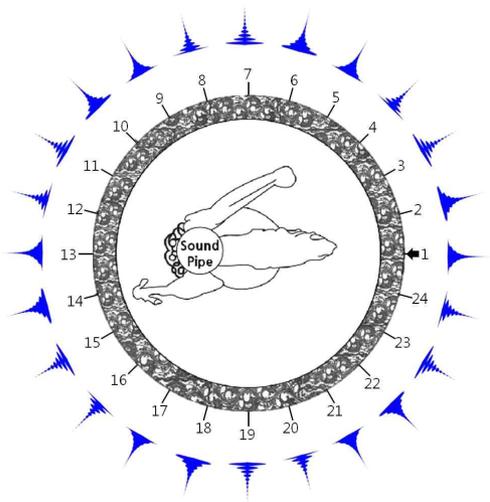
$$\zeta_{na} = (\zeta_{nL} + \zeta_{nH})/2 \quad (4)$$

실험을 통하여 모드별로 고유주파수, 감쇠비, 배의 위상을 측정하면 식 (2)를 사용하여 원주상의 위치에 따라 진동 파형을 그릴 수 있다. 또 진동의 파형과 진동으로부터 발생하는 음향파형은 동일하다는 것이 밝혀졌다^[17]. 이와 같이 식 (2)를 사용하면 원주상에서의 방향에 따라 진동모드별 맥놀이 파동이 어떻게 분포하는지를 알 수 있다. 맥놀이 파동의 분포를 Fig. 9처럼 그린 결과가 맥놀이 지도다. 이전의 연구에서 이론식 (3)을 사용하여 그린 맥놀이 지도는 실험을 통해서도 구한 맥놀이 지도와 동일하다는 것이 확인되었다^[15]. 맥놀이는 진동모드별로 그 분포가 다르므로 각각의 모드별로 맥놀이 지도를 그린다. Fig. 9 (a)는 올림픽대종의 여음의 맥놀이 지도이고, (b)는 기본음의 맥놀이 지도이다.

(a)에서 여음은 타격지점인 1번 위치와 이로부터 45도 간격으로 선명한 맥놀이를 들을 수 있다. 이 방향에서 은은한 여음이 선명하게 강약을 반복하면서 끊어질 듯 다시 살아나는 맥놀이를 들려준다. (b)에서 기본음의 맥놀이는 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 16, 19, 20, 23, 24의 방향에서 선명하게 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 방향에서 가장 역동적인 타격음을 들을 수 있다. 이와 같이 선명한 맥놀이를 들을 수 있는 방향은 주기적으로 분포한다.



(a) 1st mode sound



(b) 2nd mode sound

Fig. 9 Directivity of beating sound

5. 결론

2018평창동계올림픽의 성공적인 개최를 알리는 목적으로 2018 평창올림픽대종을 제작하였다. 스포츠 축제의 역동성을 강조하기 위하여 향아리 모양의 상원사종을 모델로 하여 7.5톤(2018판)으로 제작하였다.

하대 부분의 두께 비를 크게 증가시켜 구조 안전성을 높였으며, 구조해석을 통하여 고유주파수의 화음도가 높게 나오도록 두께 분포를 결정하였다.

종의 재질은 전통 한국종의 주물 청동재를 사용하였고 밀납주조법으로 정교한 문양을 정밀 조형하였다. 하주식으로 용탕을 주입하여 주형의 훼손을 막고, 재질내의 기포와 불순물 생성을 막았다. 주요 부분의 실측 결과 설계치 기준 3% 이내로 정밀 주조되었다.

음향평가 결과 타격음의 화음도 총평점은 88점으로 성덕대왕신종과 대등한 수준이었다. 가장 중요한 여음과 기본음에서 감쇠비는 기존의 전통 한국종보다 작게 나와 소리의 지속시간이 상대적으로 길었다.

맥놀이지도를 작성하여 여음과 기본음에서 선명한 맥놀이를 들을 수 있는 방향이 주기적으로 분포함을 확인하였다.

References

- [1] Yeom, Y. H., 1987, Report on New Bosingack Bell, SNU Precision Machine Design Institute, Korea.
- [2] Kim, S. H., Lee, J. H., Byeon, J. H., 2017, Vibration and sound of Silla Great Bell, J. Acoust. Soc. Kor., 36 186-193.
- [3] Yeom, Y. H., 1984, Korean Bell, Korea Institute of Spiritual Culture, Korea.
- [4] Higdon, A., Stiles, W. B., Davis, A. W., Evces, C. R., 1976, Engineering Mechanics, Vol.II, Prentice-Hall Inc., USA.
- [5] ANSYS Inc. 2013, PDF Documentation for Release 15.0, <<http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>>.
- [6] Kim, S. H., 2017, Report on casting and sound estimation of the Great Bell of 2018 Pyeongchang Winter Olympics, KNU University-Industry Cooperation Foundation, Korea.
- [7] Malmberg, 1918, Studies in Physics of Music Vol VII, Univ. of Iowa, USA.
- [8] Lee, B. H., 1982, A rating method for sound quality of brahman bells, J. Acoust. Soc. Kor., 1 6-18.

- [9] Lee, J. M., Cheon, S. H., Kim, S. H., Yum, Y. H., 1989, A Study on the vibrational characteristics of Korean bells(I), KSME Trans., 13:3 397-403.
- [10] Kim, S. H., Soedel, W., Lee, J. M., 1994, Analysis of the beating response of bell type structures, J. Sound Vib., 173:4 517-536.
- [11] Lee, J. M., Kim, S. H., Lee, S. J., Jeong, J. D., Choi, H. G., 2002, A Study on the vibration characteristics of a large size Korean bell, J. Sound Vib., 257:4 779-790.
- [12] Park, H. G., Kim, S. H., Kang, Y. J., 2007, Analytical method of beat tuning in a slightly asymmetric ring, J. Mech. Sci. Tech., 21 1226-1234.
- [13] Park, H. G., Kang, Y. J., Kim, S. H., 2008, Dual mode tuning strategy of a slightly asymmetric ring, J. Acoust. Soc. Am., 123:3 1383-1391.
- [14] Lee, J. H., Byeon, J. H., Kim, S. H., 2018, Beat tuning of Great Bell of 2018 Pyeongchang Winter Olympics, KSME Trans., A, 42:5 505-511.
- [15] Kim, S. H., Lee, C. W., Lee, J. M., 2005, Beat characteristics and beat maps of the King Seong-deok Divine Bell, J. Sound Vib., 281:(1-2) 21-44.
- [16] Kim, S. H., 2003, Beat map drawing method of bell type structures and beat maps of King Seongdeok Divine Bell, Trans. of Kor. Soc. Noise and Vib. Eng., 13:8 626-636.
- [17] An, H., Kang, Y. J., Kim, S. H., Park, S. Y., 2008, Analysis on the acoustic beat of a slightly asymmetric cylindrical shell, J. Acoust. Soc. Kor. 27:4 183-190.