

징의 타격 위치와 강도에 따른 음향 분석

Acoustic Analysis of a Jing Based on Drive Point and Blow Strength

조상진[†]

(Sangjin Cho[†])

울산대학교 전기공학부

(Received October 14, 2014; revised June 23, 2015; accepted July 7, 2015)

초 록: 본 논문은 다양한 타격 강도와 위치에 따른 징의 음향 차이를 소프닝과 맥놀이 분석을 통해 살펴본다. 타격 강도는 아주 강하게, 강하게, 약하게로 구분하였고 타격 위치는 가운데, 위, 오른쪽으로 구분하였으며 분석에는 스펙트로그램을 사용하였다. 소프닝은 징의 가운데를 강하게 타격할수록 명확하게 관측되었고 주파수 이동 폭은 타격 강도와 주파수에 비례하였다. 이러한 현상은 배음에서 두드러졌으며 다른 부분음에서는 불규칙적으로 발생하였다. 맥놀이는 초기 맥놀이와 후기 맥놀이를 분류할 수 있었으며 가운데를 타격할 때보다 측면을 타격할 때 더 넓은 주파수 대역에서 더 많은 맥놀이가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 또한 가운데를 타격한 경우 초기 맥놀이에 영향을 주는 배음 주변 성분들이 있음을 밝혔다.

핵심용어: 징, 소프닝, 맥놀이, 음향분석, 스펙트로그램

ABSTRACT: This paper describes an acoustic analysis of a Jing, Korean percussion instrument, according to different drive point and blow strength, and this analysis is focused on the softening and beat phenomena. Three kinds of blow strength (very strong, strong, and weak) and three locations of drive point (center, up, and right) are applied, and the spectrogram function built in Matlab is utilized to analyzing the softening and beat of target sounds. The stronger blow you drive to the center of the Jing, the more clearly softening is observed. Frequency shifting is increased proportionally to the blow strength and frequency and it is stand out on the harmonics in contrast with that of other partials. Beat of the Jing can be classified into the early beat and late beat. The beats by the outside driven Jing are distributed in wider frequency band than the beats by the center driven Jing. In addition, it is observed that the early beat is affected by few specific partials developed around harmonics for the center driven Jing.

Keywords: Jing, Softening, Beat, Acoustic analysis, Spectrogram

PACS numbers: 43.75.Kk, 43.75.Zz

1. 서 론

우리나라는 국악기 연구를 주로 국립국악원을 중심으로 진행하였다. 국립국악원은 이미 1965년부터 국악기 개량과 관련하여 부분적으로나마 국악기 음향 연구를 실시하였고 1991년부터는 국악기 음향 연구 사업을 본격적으로 진행하였다.^[1] 1991년부터 2004년까지는 금속 타악기 제작 과학화 및 기계화를 목표로 국악기 기초 연구를 수행하였는데 1999년에는

징과 팽과리에 대한 연구 결과를 단행본으로 발간하기도 하였다.^[2] 2005년도에는 가야금을 대상으로 국악기 음향학 연구 사업을 수행하였고, 2006년부터 현재까지는 국악기 음향정보 구축, 국악기 구조 및 물성 연구를 목표로 국악기 연구 사업을 진행 중이다. 이 사업을 통해 매년 국악기 연구 보고서를 국립국악원 홈페이지^[3]에 공개하고 있는데, 2013년까지의 국악기 연구 보고서에 의하면 대상악기들이 대금, 태평소, 가야금, 거문고, 해금 등 관현악기에 집중되어있다.

현재까지 금속 타악기인 징에 대한 연구 중 음향

[†]Corresponding author: Sangjin Cho (sjcho75@ulsan.ac.kr)
School of Electrical Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-Ro, Nam-Gu, Ulsan 680-749, Republic of Korea
(Tel: 82-52-259-2724, Fax: 82-52-259-1686)

학적 특성, 물리적 특성, 재료 및 물성을 모두 고려한 연구는 1999년 국립국악원에서 발간한 금속 타악기 연구^[2]가 대표적이다. 이 단행본은 징과 팽과리의 진동 및 음향 분석에 대한 연구^[3]와 재료와 제조 공정에 의한 특성 분석에 대한 연구^[4]를 포함하고 있다. 국립국악원과는 별도로 이보다 몇 년 앞서 징의 음색을 결정하는 요소를 찾기 위한 연구가 수행되었는데 평면 음향 홀로그래피(planar acoustic holography)와 가속도계를 이용하여 징의 진동 모드(vibration mode)와 주요 주파수(dominant frequency)를 규명^[5]하였다. 그 후 전두리(rim) 깊이 변화에 따른 음향 분석^[6]과 징 소리의 배음 구조를 분석을 통한 음색 연구^[7]가 수행되었으며, 징 소리로부터 주요 주파수 성분을 검출하기 위하여 EMD(Empirical Mode Decomposition)을 이용한 알고리즘이 소개^[8]되기도 하였다.

지금까지의 연구는 주로 징의 물성 및 구조적 특성을 통해서 음향 및 진동 특성을 규명하는 것이었다. 그 결과, 소프트닝(softening)과 맥놀이(beat), 배음 특성을 규명하였다. 본 논문도 징의 음향 특성에 다룬다. 하지만 징의 타격 위치와 타격 강도에 따른 차이를 소프트닝과 맥놀이 관점에서 기술함으로써 징의 음향성 모델 개발 시 고려해야할 점에 초점을 맞춰 살펴볼 것이다.

II. 굴곡진 판의 비선형성

우리나라의 징과 매우 유사한 중국의 전통악기 공(gong)의 비선형적 주파수 이동 현상에 대한 연구는 Fletcher^[9]에 의해 발표되었으며 이 장의 모든 내용은 그 연구 논문을 인용한 것이다.

Fig. 1은 중국 공을 굴곡진 판(curved plate)으로 근사화한 모델의 단면도이다. 이 모델에 대해 초기 조건 및 복원력, 질량 등을 고려하고 운동 방정식을 적용, 해를 $x = A \cos \psi + B$, $\psi = \omega_0 t + \phi$ 로 가정하여 풀면 Fig. 2와 같은 결과를 얻을 수 있다.

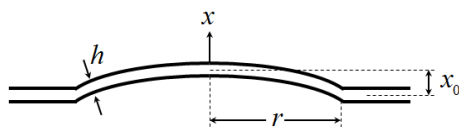


Fig. 1. The profile of an opera gong in cross section.

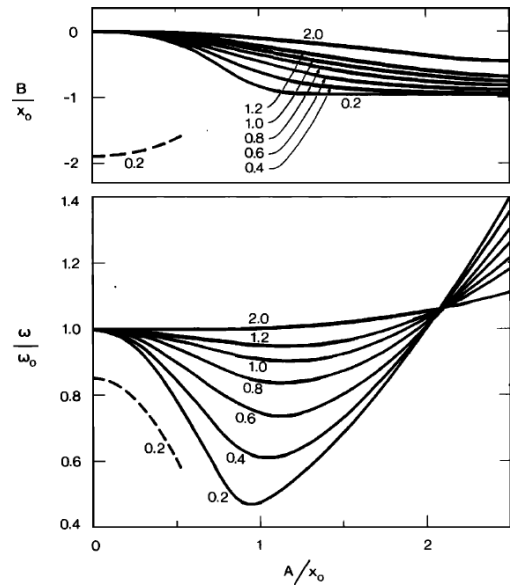


Fig. 2. Calculated motion center B and frequency ω for vibrations of amplitude A on the model shown in Fig. 1.^[9]

Fig. 2는 굴곡진 판의 두께를 h/x_0 로 정규화시켰을 때 A/x_0 에 대한 판의 중심부의 변위 B 와 주파수 ω 의 변화를 보인 것이다. 판의 두께가 $h/x_0 < 2$ 이면 진폭 A 가 증가함에 따라 주파수는 감소하고 $A/x_0 > 2$ 인 경우에는 주파수가 ω_0 보다 커짐을 알 수 있다.

III. 징의 규격

본 논문에서 사용한 징은 경기도 무형문화재 10호 김문의 방짜 유기장이 구리와 주석을 72:28의 비율로 합금한 전통 방짜 유기 기술을 이용하여 제작한 것이다. Table 1은 여러 문헌에서 사용한 징을 본 논문에서 사용한 것과 비교한 것이다. 징은 수제품으로 생산되기 때문에 그 크기가 동일하진 않지만

Table 1. Measurement of the Jing.

| | This paper | Ref.[2] | Ref.[5] | Ref.[10] |
|---------------------|------------|----------|---------|----------|
| Outer Diameter (mm) | 382 | 390-400 | 400 | 385 |
| Inner Diameter (mm) | 359 | 364-376* | 350 | 342 |
| Length of Rim (mm) | 93 | 70-75 | 75 | 87.4 |
| Angle of Rim (°) | 83 | 80 | 71 | 76 |

*Calculated value, not reported in Reference [2]

Table 1을 보면 대략적인 규격을 가늠할 수 있다. 참고로 Reference [2]의 경우 중요무형문화재 제 77호 유기장 기능 보유자가 제작한 것 10개를 측정하고 있고, Reference [10]의 경우는 국립국악원이 소장하고 있는 것에 대한 측정치이다. Reference [5]에는 제작자에 대한 정보가 없다.

IV. 음향 분석

4.1 실험 및 분석 방법

징과 마이크의 거리는 1 m로 하였고 마이크의 높이와 징의 중앙 높이를 일치시켜 징을 크레인에 매달았으며 마이크와 디지털 레코더는 각각 AKG의 c1000 s와 TASCAM의 DA-PI(샘플링 44.1 kHz, 노이즈레벨 -60 dB)을 사용하여 Fig. 3과 같이 무향실에서 녹음하였다.

징의 타격 위치와 강도에 대한 정보와 각 경우에 대해 본 논문에서 사용할 이름은 Table 2와 같으며, 징 소리 분석에는 시간과 주파수에 대한 해상도를 자유롭게 조절할 수 있는 Matlab의 스펙트로그램(spectrogram) 함수를 이용하였다. 주파수 분석 범위는 최대 1.5 kHz까지 하였는데, 이는 1.5 kHz 이상의 성분들이 타격 이후 그 크기가 급격히 감소하는 경



Fig. 3. Experimental environment in anechoic chamber.

Table 2. Information on target.

| | | Symbol | Power |
|----------------|-------------|--------|--------|
| Blow strength* | Very strong | VS | 9 dB |
| | Strong | ST | 0 dB |
| | Weak | WK | -10 dB |
| Drive point** | Right | RT | -4 dB |
| | Up | UP | -4 dB |

*Drive point: Center, **Blow strength: ~Strong

향을 보였기 때문이다.

4.2 소프닝

소프닝은 굴곡진 판의 형태를 한 타악기에서 관측되는 비선형성으로, 진동의 크기가 커질수록 주파수가 감소하는 현상^{9,11)}이다. 다시 말하면, 타격 이후 소리가 감쇠하는 동안 주파수가 상승하는 현상을 뜻한다. 예를 들어, 기본 주파수가 100 Hz이고 10 Hz 상승했다면, 최초 90 Hz에서 시작하여 100 Hz로 이동한 경우이다. 이 주파수 이동 폭은 진동의 크기 즉, 타격의 강도와 악기의 구조적 특성에 따라 달라진다.⁹⁾

실험에 사용된 징의 기본 주파수는 114 Hz로 측정되었고, 대상 소리에서 관측된 모든 배음은 정확하게 정수비를 유지하였다. 각 소리의 소프닝 현상과 스펙트로그램의 예는 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 2는 기본 진동 모드에 대한 소프닝만을 보였지만 Fig. 4에서 알 수 있듯이 배음에서도 소프닝은 나타나며 그 비율이 일정하다는 것을 알 수 있다.

VS의 경우, 총 5개의 배음이 관측되었고 소프닝도 명확하게 관측되었다. 소프닝에 의한 주파수 이동 폭은 Fig. 4(a)와 같이 배음의 경우 일정한 증가율을 보였고, 배음 이외의 성분은 일정해진 않지만 대체로 주파수에 비례하여 증가하는 패턴을 보였다.

ST[Fig. 4(b)]는 VS와 거의 같은 특성을 보였다. 다만, 소프닝을 보이는 배음 이외의 성분과 주파수 이동 폭이 VS와 다르고, 배음에서도 VS의 경우보다 증가율이 작게 나타났다.

WT의 경우, 5개의 배음이 관측되었고 그들의 주파수 이동 폭도 비교적 일정한 증가율을 보였다. 하지만 Fig. 4(c)에서 알 수 있듯이 배음 이외의 성분에서는 일정한 패턴의 소프닝이 관측되지 않았다.

Fig. 4(d)와 (e)는 RT와 UP의 경우를 나타낸 것이다. 이들의 타격 강도는 ST와 같지만 배음은 3개만 관측되었고 이들의 주파수 이동 폭도 모두 4 Hz 미만으로 나타났다. 게다가 UP의 경우에는 배음 이외의 성분에서 소프닝을 관측할 수도 없었다.

지금까지의 결과를 바탕으로 타격 강도와 위치에 따른 소프닝 특성을 다음과 같이 요약할 수 있을 것이다.

· 소프닝은 징의 가운데를 타격할 때 발생하고 소프

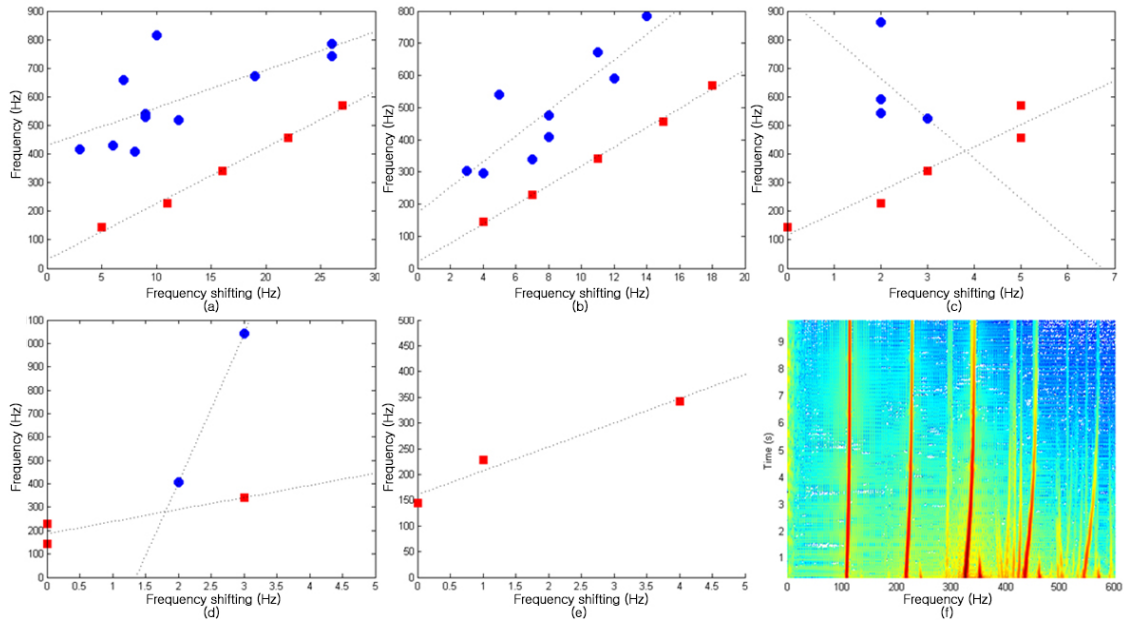


Fig. 4 Frequency shifting according to softening and example of spectrogram. The rectangle and circle are harmonics and nonharmonics, respectively. Dotted lines show their trend. (a) VS sound, (b) ST sound, (c) WK sound, (d) RT sound, (e) UP sound, and (f) spectrogram of VS sound.

닝에 의한 주파수 이동 폭은 타격의 강도에 비례한다.

- 소프닝은 배음에서 가장 두드러지게 나타나고 이들의 주파수 이동 폭은 주파수에 비례하여 일정한 증가율을 보인다.
- 배음 이외의 성분이 보이는 주파수 이동 폭은 대체로 주파수의 증가에 따라 비례해서 커지는 경향을 보이지만, 이는 강한 타격에서만 보이는 현상이다.

4.3 맥놀이

맥놀이를 분석하기 위해 스펙트로그램의 윈도우 크기를 0.05 s, 오버랩은 90%로 설정하였다.

징의 맥놀이는 Fig. 5에서 보듯이 타격과 동시에 나타나서 소리가 소멸할 때까지 존재한다. 본 논문에서는 타격과 동시에 나타났다가 급격히 사라지는 맥놀이를 초기 맥놀이로, 소리의 중반 이후부터 소멸할 때 까지 나타나는 맥놀이를 후기 맥놀이로 구분하여 설명한다.

Fig. 5(a)의 VS 경우, 초기 맥놀이는 주파수 전대역에서 발생하였고 대부분 3 s 이전에 사라졌다. 후기 맥놀이는 세 번째, 네 번째 배음 주변에서 나타났는데 세 번째 배음 부근에는 6 Hz, 네 번째 배음 부근에는 3 Hz ~ 4 Hz의 맥놀이 주파수가 관측되었다. 이보

다 고주파 영역의 맥놀이는 초기 맥놀이에 해당되며 6 Hz ~ 12 Hz의 맥놀이가 관측되었다.

소프닝의 경우에서처럼 ST의 맥놀이[Fig. 5(b)]도 VS의 맥놀이와 매우 비슷하게 나타났다. Fig. 4(f)의 VS 스펙트로그램에는 1 s 가량 아주 짧고 강하게 나타나는 주파수 성분이 보이는데 ST에도 동일한 성분이 관측되었다. 240 Hz, 351 Hz, 460 Hz, 572 Hz가 그 성분들인데, 이들은 두 번째 배음부터 다섯 번째 배음과 어울려 다음과 같은 초기 맥놀이를 보였다.

- 두 번째 배음의 221 Hz와 240 Hz 간 19 Hz
- 세 번째 배음의 331 Hz와 351 Hz 간 20 Hz
- 네 번째 배음의 441 Hz와 460 Hz 간 19 Hz
- 다섯 번째 배음의 552 Hz와 572 Hz 간 20 Hz

이들은 타격 직후 19 Hz - 20 Hz의 맥놀이를 보였지만 이후 이 성분들이 소멸할 때까지 소프닝에 의한 영향으로 맥놀이 주파수가 점점 감소하였다.

ST의 후기 맥놀이도 VS와 마찬가지로 세 번째, 네 번째 배음 부근에서 나타났는데 338 Hz와 342 Hz의 4 Hz가 가장 강하게 유지되었고 408 Hz와 416 Hz의 8 Hz도 소리가 소멸할 때 까지 유지되었다. 고주파 대역의 맥놀이는 초기 맥놀이로써 5 Hz - 11 Hz까지 다양하게 나타났으나 대부분 3 s 이내에 소멸하였다.

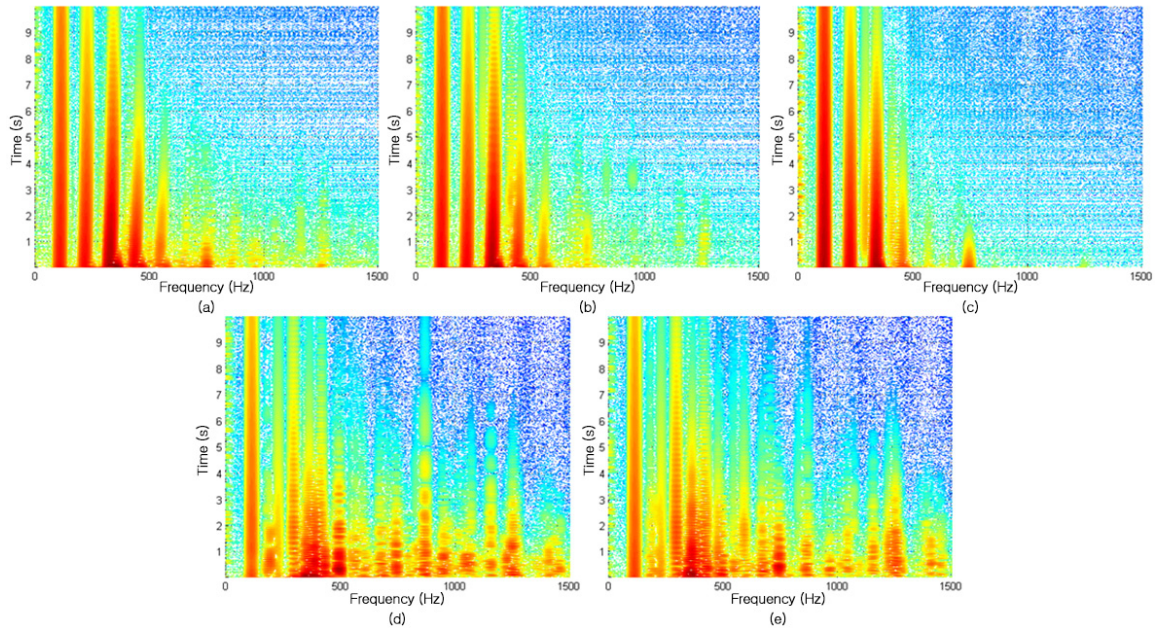


Fig. 5 Spectrogram of each sound: (a) VS sound, (b) ST sound, (c) WK sound, (d) RT sound, and (e) UP sound.

Fig. 5(c)의 WK는 VS와 ST에 비해 맥놀이 성분이 현저히 줄어들었지만 이들과 동일하게 300 Hz에서 400 Hz 사이의 맥놀이가 가장 오래 유지되었다. 주파수는 VS, ST 보다 큰 9 Hz가 관측되었다. 700 Hz 이후의 맥놀이는 거의 관측되지 않으며 관측된 것도 지속 시간이 1 s 미만인 초기 맥놀이에 해당하는 것들이었다.

Fig. 5(d)와 (e)에서 알 수 있듯이 징의 측면을 타격한 소리에서 가운데를 타격했을 때 보다 많은 맥놀이가 관측되었다. 이들은 대체로 타격 직후 2 s 가량 전 대역에서 혼재되어 나타나다가 급격히 소멸하고 몇몇 주요 성분들로만 유지되는 경향을 보였다. 이 주요 성분 중에는 351 Hz가 포함되는데, 이것은 가운데를 타격하였을 때 1 s 가량 강하게 나타났다 사라졌지만, 측면을 타격하였을 때는 7 s 가량 길게 유지되어 초기뿐만 아니라 후기 맥놀이에도 영향을 주었다. 700 Hz 이상의 고주파 성분에서도 후기 맥놀이에 영향을 주는 성분들이 보였는데, 가운데를 타격한 소리에서 700 Hz 이상의 고주파 성분들이 초기 맥놀이로 분류되어 빨리 사라진 것과는 대조적인 결과이다. 이뿐만 아니라, 두 개 이상의 맥놀이가 동일한 성분에서 관측되었다. 예를 들면, 1155 Hz와 1163 Hz에서 8 Hz의 맥놀이가 보였는데, 동시에 1155 Hz에서

1155 Hz와 1156.3 Hz의 1.3 Hz의 맥놀이가 나타났다. 이러한 현상은 저주파보다 고주파로 갈수록 더 많이 관측되었다.

V. 토 의

징의 대표적인 특징이라면 소프닝과 맥놀이, 그리고 타악기임에도 보이는 정확한 배음구조라고 할 수 있다. 본 논문에서는 다양한 타격 위치와 타격 강도에 따른 소프닝과 맥놀이 분석에 초점을 맞추었다.

소프닝은 징의 가운데를 세게 타격했을 때 잘 나타났지만 발현된 모든 주파수 성분에서 관측된 것은 아니었다. 배음에서는 강도가 약하거나 측면을 타격해도 명확한 소프닝을 보인 반면, 배음 이외의 성분에서는 타격 강도와 위치에 따라 소프닝이 나타나지 않거나 주파수 이동 폭도 배음과는 매우 다른 경향을 보였다. 이는 소프닝이 징의 가운데를 강하게 타격하였을 때 나타나는 비선형적 특징이기 때문이다. 다시 말하면 측면을 타격하였을 때는 일반적인 타악기처럼 많은 부분음이 발생하고 이들은 대부분 선형적인 특성을 보인다는 것이다. RT와 UP의 맥놀이가 고주파성분까지 다양하게 나타난 것도 이것이 하나의 원인이다.

음 합성 관점에서 징의 소프닝은 징의 음 합성 모델에서 반드시 고려되어야 할 사항이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 타격의 강도에 따른 배음의 주파수 이동 폭은 선형적으로 나타낼 수 있으며 부분음에 대해서는 대역 제한된 랜덤함수 또는 여기신호로 해결할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 징의 맥놀이를 초기 맥놀이와 후기 맥놀이를 분류하였는데 이는 맥놀이가 나타나고 사라지는 시간 때문이기도 하지만 초기에 나타나는 맥놀이의 특징 때문이기도 하다. VS와 ST의 초기 맥놀이에는 배음 성분과 어우러지는 고정된 성분이 있었다. 흥미로운 것은 각 배음의 주파수인데, 앞서 설명했듯이 본 논문에서 측정된 징의 배음은 정확하게 기본주파수인 114 Hz의 정수배로 나타났다. 그런데 4.3절에서 언급한 배음의 주파수는 기본주파수의 정수배가 아니다. 이는 소프닝 때문이다. 예를 들어 두 번째 배음의 경우 타격 직후 221 Hz의 성분이 관측되나 시간이 지나면 228 Hz로 주파수 이동이 된다. 이로 인해 징 소리 초기에는 시간이 지날수록 맥놀이 주파수가 낮아지는 현상이 나타난 것이다. 참고로 금속 타악기 연구^[2]에서는 221 Hz와 같은 주파수를 ‘비선형 진동 시 고유진동수’, 228 Hz와 같은 주파수를 ‘선형 진동 시 고유진동수’로 구분하였다.

국립국악원에서 발간한 금속 타악기 연구에는 10개의 징에 대한 스펙트로그램이 있다.^[2] 본 논문의 결과와 비교한 결과 몇 가지 공통점을 찾을 수 있었는데, 강하게 가운데를 타격하였을 때 나타나는 소프닝의 특징은 거의 유사하였고, 맥놀이에서 언급한 짧고 강하게 나타나는 성분도 배음 주변에서 관측할 수 있었다. 본 논문에서 이 비교 결과를 생략한 이유는 참고문헌에 나타난 스펙트로그램의 대역과 해상도가 본 논문과 다르고 인쇄물로부터 정확한 수치를 얻을 수는 없었기에 생략하였음을 밝혀둔다.

맥놀이 또한 음 합성 관점에서 고려되어야 할 사항이다. 초기 맥놀이에 영향을 주는 배음 주변의 4가지 성분은 그 크기와 지속시간이 거의 일정하여 간단히 구현할 수 있을 것이다. 다만 고주파대역의 맥놀이는 여기신호로 대체하는 것이 가장 자연스러운 음을 합성할 수 있을 것이다.

VI. 결 론

본 논문에서는 징의 음향적 특징을 다양한 타격 위치와 강도에 따른 소프닝과 맥놀이의 차이라는 관점에서 살펴보고 음 합성 모델 개발 시 고려해야할 점들에 대해 기술하였다. 맥놀이의 경우 초기 맥놀이와 후기 맥놀이를 구분하였고 초기 맥놀이에 영향을 주는 배음 주변의 4가지 성분에 대해 규명하였다. 소프닝의 경우에는 타격 강도에 따라 각각 다르긴 하지만 배음간 일정한 이동 비율을 보인다는 것을 밝혔다. 다만 타격 강도의 변화와 소프닝의 이동 폭에 대한 상관관계는 향후 연구가 더 진행되어야 할 부분이다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2012R1A1B6002600).

References

1. National Gugak Center, <http://www.gugak.go.kr/>, 2014.
2. National Gugak Center, *A study on metal percussion instrument: Jing and Kkwaenggwari(1991-1998)* (in Korean) (National Gugak Center, 1999), pp. 16-55.
3. K. Sung, “Characteristics of Korean metallic percussion instruments,” in Proc 5th Western Pac. Reg. Acoust. Conf., 46-54 (1994).
4. H.-J. Lee, H. Park, and D. N. Lee, “Manufacturing processes and acoustics of Jing and Kkwaenggwari” (in Korean), *Bul. Kor. Inst. Met. & Mater.* **12**, 10-18 (1999).
5. H.-S. Kwon, Y.-H. Kim, and M. Rim, “Acoustical characteristics of the Jing: An experimental observation using planar acoustic holography” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **16**, 3-13 (1997).
6. J.-H. Sohn and M.-J. Bae, “A study on the sound amplitude and decaying time of the Jing depending on the depth of rim” (in Korean), *J. Broadcast Eng.* **9**, 424-433 (2004).
7. W. J. Cho and J. Kim, “Timbral analysis of Jing by its harmonic structure” (in Korean), *J. Music and Theory* **16**, 30-47 (2011).
8. S. Cho and Y. Seo, “Extraction of significant features using empirical mode decomposition and its application,” in Proc. World Congr. Eng. Comput. Sci., 527-530 (2013).

9. N. H. Fletcher, "Nonlinear frequency shifts in quasispherical-cap shells: Pitch glide in Chinese gongs," *J. Acoust. Soc. Am.* **78**, 2069-2073 (1985).
10. National Gugak Center, National Gugak Center, *Korean Traditional Musical Instruments Measurement Series 1* (in Korean), (National Gugak Center, 2008), pp. 76-77.
11. T. D. Rossing and N. H. Fletcher, "Nonlinear vibrations in plates and gongs," *J. Acoust. Soc. Am.* **73**, 345-351 (1983).

저자 약력

▶ 조 상 진 (Sangjin Cho)



1997년 2월: 울산대학교 전자공학과 학사
 2002년 2월: 울산대학교 전자공학과 석사
 2007년 2월: 울산대학교 컴퓨터공학과 박사
 2008년 3월 ~ 현재: 울산대학교 전기공학부
 연구교수