편종의 음색 분석 연구

조희영⁺, 김 준⁺⁺

요 약

편종의 소리합성을 위한 연구의 첫 단계로 FFT 분석을 통하여 그 음색을 분석하였다. 현대 편종 음계의 음고는 서양의 12평균율의 음고와 큰 차이가 없었다. 편종의 음색은 시간의 흐름에 따라 변화한다. 타격 시 모든 주파수 대역에 걸쳐 생성된 노이즈들은 단시간에 사라지고, 고유 배음만이 남는다. 그 후 높은 주파수 성분의 배음부터 차례로 소멸되고 여음부에는 두개의 배음만이 남는데, 이 때 남은 배음의 주파수에 의하여 맥놀이 현상인 발견된다. 본 연구에서 사용된 편종은 비교적 최근에 제작된 편종으로 추후 고대 편종의 음색에 관한 연구가 병행된다면 편종 원형의 소리 합성이 가능할 것이다.

A Study on Timbre Analysis of Pyunjong

Hee Young Cho⁺, Jun Kim⁺⁺

ABSTRACT

As the first step in research for sound synthesis of Pyunjong, timbre was analyzed by FFT analysis. There was no significant difference in the pitch of scale between modern Pyunjong and western twelve-tone equal temperament scale. The timbre of Pyunjong changes over time. When striking Pyunjong, the noises to be generated across all frequencies will disappear in a short period of time, and a unique partial only is left. Then it disappear from the partial of high frequency components in order, and two partials remain at release time. At this time, the beating is occurring by the frequency of the remaining partial. Pyunjong used in this study is relatively a recently manufactured Pyunjong, and for original sound synthesis of Pyunjong, a study of ancient Pyunjong's timbre should be additionally conducted later.

Key words: Pyunjong(편종), Timbre Analysis(음색분석), FFT Analysis(FFT 분석), Beating(맥놀이 현상)

1. 서 론

편종은 고려시대에 송나라로부터 수입하여 편경과 함께 아악¹⁾에 편성되어 연주되는 쇠붙이로 만들어진 유물타악기이다. 서양 평균율의 C4에서 D#5에 해당되는 12율 4청성의 음고를 가진 16개의 종으로 구성되어 있으며[1], 두 개의 단에 각각 8개씩의 종이

매달려 있다. 연주자는 쇠뿔로 된 망치로 종의 앞면에 표시된 수(隧) 부분을 쳐서 연주한다[2]. 편종에 사용되는 16개의 종의 크기는 같고, 종의 두께에 의하여 음고가 결정되는데, 종이 얇을수록 음고(pitch)가 높다. 이는 함께 연주되는 편경이 경석의 두께에 의하여 음고가 결정되는 것과 동일하다[3]. 편종은 상하가 곡선을 이루고 있고, 겉면에 마유(馬乳)라고

※ 교신저자(Corresponding Author): 김준, 주소: 서울특별시 중구 필동로 1길 30 (필동3가 26) 영상대학원 멀티미디어학과(100-715), 전화: 02)2260-3264, FAX: 02)2260-3764, E-mail: music@dongguk.edu
접수일: 2011년 10월 10일, 수정일: 2011년 11월 10일
완료일: 2011년 11월 28일

⁺ 준회원, 동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과
(E-mail: hy37@dongguk.edu)

⁺⁺ 정회원, 동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과

※ 본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2011-0000064)

하는 원형의 돌출 부분들이 있는데, 이는 종의 울림을 아름답게 하되, 그 여운이 너무 길지 않도록 하는 기능을 한다[4]. 그림 1은 국립국악원에서 실측한 편종의 정면도이다[5].

그림 1. 편종의 실측도(국립국악원)

종의 음색(tonality)을 결정하는 요소는 최저주파수인 1차 진동음(hum), 2차 진동음(fundamental)과 함께 5~6차 저주파수 배음(partial tones)들에 의하여 결정된다[6]. 종은 음향신호가 총체적으로 동일한 패턴을 유지하는 것이 아니며 시간의 흐름에 따라 단계적으로 변화하고[7], 한국의 종은 타격 순간의 타격음만을 중시하는 서양종에 비하여 시간대별로 타격음, 중간음, 여운의 세 부분을 고루 중요시한다[8].

편종은 음계의 연주가 가능한 종 형태의 국악기로 오늘날에도 아악 연주에 많이 사용되고 있다. 시간을 알려거나 제행사의 신호로 사용되는 범종과는 달리 편종은 음악을 연주하기 위한 악기로 맑은 소리를 내되 여운이 너무 길어서는 안 된다. 하지만 다방면에서 활발히 연구되고 있는 한국의 범종들과는 달리 편종은 음향학적 특징에 관한 연구만이 시작되고 있는 단계로, 음색 자체에 관한 연구는 전무한 실정이다. 또한 컴퓨터를 이용한 음악이 보편화되고 있는 현대 음악계에서 많은 한국악기들의 음원의 합성과

개발에 관한 연구가 다양하게 이루어지고 있는 가운데 국악 타악기, 특히 음계를 가지고 있는 편종의 음색을 분석하고 합성하여 음원으로 사용할 수 있다면 향후 다양한 분야에서 활용 가능할 것이다.

본 연구는 편종의 소리 합성을 위한 기초단계로 진행되었으며, FFT(Fast Fourier Transform) 스펙트럼 분석을 통하여 음색을 분석하였다. 편종의 소리를 시간에 따라 크게 타격부(attack), 중간부(sustain), 여음부(release)의 세 부분으로 나누어 진행되는 음색의 변화를 분석하였다. 본 연구의 분석에 사용된 편종은 근래에 제작된 한국예술종합학교의 편종으로, 16개의 종소리는 종으로부터 1m 떨어진 곳에 마이크를 설치하여 녹음하여 채취하였다. 분석에 사용된 샘플의 샘플링 레이트(sampling rate)는 44,100 Hz, 비트심도(bit depth)는 16bit이며, 정밀한 분석을 위하여 노말라이징(normalizing)하였다. FFT 분석에 사용된 윈도우 타입(window type)은 해닝(hanning)이며 윈도우 사이즈(window size)는 2084이다.

2. 음색 분석을 위한 기초연구

2.1 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)

푸리에 변환(Fourier Transform, FT)은 시간영역상의 함수로 관측된 연속적인 신호를 주파수영역상의 함수로 변환하는 것으로, 다음과 같이 계산된다[9].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (1)$$

입력신호가 이산(discrete)적인 디지털 신호는 일정 간격으로 샘플링된 함수를 푸리에 변환하는 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT)을 사용하며, 다음과 같이 계산된다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{nk} \quad (2)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad W_N = e^{-j(2\pi/N)})$$

DFT를 계산할 때 시간이 오래 걸리는 단점을 보완하기 위하여 연산회수를 줄여 계산 속도를 빠르게 한 것이 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)이다. 이를 이용하여 소리의 파형을 기본음(fundamental)과 배음(partials)들의 주파수 성분으로 분석할 수 있는데, 이는 음색의 특징을 나타내는 중요한 요소이다.

2.2 한국의 12율(律)과 서양의 평균율

12율은 한국 고유의 음계로 한 옥타브를 12개의 음으로 나누었으며, 이는 저음부터 황종(黃鐘), 대려(大呂), 태주(太簇), 협종(夾鍾), 고선(姑洗), 중려(仲呂), 유빈(蕤賓), 임종(林鍾), 이척(夷則), 남려(南呂), 무역(無射), 응종(應鍾)으로 이루어져 있다. 악보에 기보할 때는 첫 자만 떼어서 표기한다.

12율의 음체계는 삼분손익법(三分損益法)에 의하여 만들어 지는데, 이는 대나무 율관의 길이에 의하여 산정된다. 기본이 되는 황종을 구한 후 이를 삼등분한 뒤, 그 1/3을 빼 나머지인 2/3의 길이로 율을 산출하는 삼분손일법(三分損一法)과 1/3을 더하여 율을 산출하는 삼분익일법(三分益一法)을 교대로 반복하여 율을 산출하는 방법이다. 삼분손일시 5도 높은 음이, 삼분익일시 4도 낮은 음이 산출된다.

평균율은 근사치의 음정을 평균하여 균등하게 나눈 음률이며, 현재 서양음악의 표준 음체계로 사용되고 있다. 옥타브를 평균한 음정으로 12등분하여 1단위를 반음, 2단위를 온음으로 하는 12평균율이 가장 많이 사용되고 있다. 12평균율의 옥타브의 주파수 비(frequency ratio)는 1:2이며 인접한 두 음간의 주파수 비의 간격은 $\sqrt[12]{2}$ 이다. 조율할 때 기본음은 440Hz인 A4이다.

그림 2. 편종의 음역

표 1. 편종 근음주파수와 평균율 주파수 비교

음명 (평균율)	편종 제1배음의 주파수(Hz)	해당 평균율의 주파수(Hz)	차이 (cent)	음명 (평균율)	편종 제1배음의 주파수(Hz)	해당 평균율의 주파수(Hz)	차이 (cent)
黃 (C4)	260.9	261.6	4.6	夷 (G#4)	417.5	415.3	9
大 (C#4)	276.8	277.2	2.5	南 (A4)	441.0	440.0	4
太 (D4)	293.7	293.7	0	無 (A#4)	465.2	466.2	3.7
俠 (D#4)	311.8	311.1	3.9	應 (B4)	496.4	499.9	12
故 (E4)	329.1	329.6	2.6	潢 (C5)	525.3	523.3	6.6
仲 (F4)	349.6	349.2	2	汰 (C#5)	556.1	554.4	5.3
蕤 (F#4)	374.4	370.0	20	汰 (D5)	589.8	587.3	7.4
林 (G4)	391.6	392.0	1.8	浹 (D#5)	624.1	622.3	5

3. 편종의 음색 분석

3.1 음고의 분석

편종은 황종(黃)에서 청협종(淸狹鍾)까지 12율 4청성의 음고를 내는데, 이는 평균율의 C4에서 D#5의 음고에 해당한다[1]. 그림 2는 편종의 실질적인 음역을 평균율로 나타낸 것이다.

편종의 배음구조를 분석하기 위하여 먼저 각 종의 음고를 측정하였다. 편종은 제1모드의 진동수가 기명진동수를 나타내므로[1] 제1배음의 주파수를 측정하였다. 표 1은 각 종의 음고와 그에 해당하는 평균율의 주파수를 비교한 것이다. 그 결과 차이가 가장 적게 나는 음은 태종(太)으로 평균율 D4의 음고와 완전히 동일하였으며, 가장 많은 차이가 나는 음은 유빈(蕤)으로 평균율 F#4의 음고와 20cent의 차이가 있었고, 평균 차이는 5.65cent이었다. 이로써 현대 편종의 음계가 서양 평균율의 음계와 비교하여 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

3.2 시간에 따른 FFT 분석

좋은 소리가 생성되어서 사라질 때까지 동일한 음색이 지속되는 것이 아니라 시간이 흐름에 따라 변화한다. 따라서 본 연구에서는 그림 3과 같이 편종의

음색을 타격부, 지속부, 여음부의 3부분으로 구분하여 분석하였다.

그림 3. 시간에 따른 파형의 변화

3.2.1 타격부

타격부는 타격 후 종의 고유 음색이 드러나기 전까지의 부분으로, 종에 따라 타격 직후부터 0.4~0.6초까지의 부분으로 설정하였다. 그림 4는 황종(黃)의 음색을 타격 직후부터 0.5초까지 0.1초 간격으로 분석한 FFT 스펙트럼의 변화이다. 타격 순간(그림 [4]-(a)) 배음과 함께 전 주파수 대역에 걸쳐 노이즈가 발생한다. 그 후 고주파수 대역의 노이즈부터 차츰 감소하고(그림[4]-(b)~(e)) 종의 고유 배음만이 남게 된다(그림[4]-(f)). 이러한 현상은 모든 종에서 동일하게 나타난다.

그림 4. 타격부의 FFT 스펙트럼 변화 (黃)

3.2.2 지속부

타격부의 노이즈가 사라지면서 각 종의 고유 배음이 드러나고 지속되는 부분이다. 먼저 지속부가 시작되는 부분의 배음열을 분석하였다. 선행연구에 따르면 종의 음색은 저음의 다섯 개의 배음에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다[6]. 본 연구에서는 최저진동수인 제1배음에서 7번째 배음인 제7배음까지 모두 7개의 배음을 분석하였다. 표 2는 각 종 소리의 배음과 그 배음의 음량(sound pressure level)이다.

각 종의 배음열은 모두 동일하지 않고 차이가 있지만 크게 두 가지의 공통점을 발견할 수 있다. 먼저 제2배음의 음고는 제1배음의 주파수의 약 3배에 해당하는 주파수보다 조금 낮거나 높은 음고를 가지고 있다. 그리고 제1배음을 제외하고 가장 음량이 큰 배음은 제 1배음의 음고의 3배 또는 5배의 주파수를 조금 벗어난 주파수의 음고를 가진 배음이다. 이렇게 음량이 큰 배음성분들은 지속부가 끝난 후에도 지속되어 제1배음과 함께 여음부의 음색을 구성한다.

지속부에서 각 배음성분들은 지속시간이 달라 배음열이 일정하게 유지되지 않고, 시간의 흐름에 따라 소멸되는 배음이 생기면서 배음관계가 달라진다. 시간

이 경과하면서 고주파수 대역의 배음들은 차차 사라지며 마지막에는 최저진동수인 제1배음과 또 다른 하나의 배음으로 이루어진 소리가 일정시간동안 지속된다.

그림 5는 시간의 흐름에 따른 황종의 배음 구성의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 타격 노이즈가 사라진 0.6초에서 3초까지의 배음열을 0.1초 간격으로 분석하였다. 시간이 지나면서 높은 주파수 대역의 배음부터 순차적으로 사라지고, 제1배음과 그 음고보다 3.08배 높은 주파수를 가진 제2배음, 두 개의 배음만이 남아 일정시간 지속된다. 지속부의 마지막에 제1배음과 제2배음이 남아 여음부를 구성하는 패턴은 편종에서 가장 많이 드러나는 양상으로 황종을 포함하여 총 10개의 종에서 나타났다.

그림 6은 시간에 따른 협종의 배음 구성의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 시간에 경과함에 따라 고주파수 대역의 배음들이 차차 소실되는 점은 황종과 동일하나, 그 후 제1배음과 제1배음 주파수보다 4.89배 높은 주파수를 가진 제3배음이 남는다는 차이가 있다. 이렇게 지속부의 마지막에 제1배음과 제2배음이 남아 여음부를 구성하는 패턴은 협종을 포함한 총 4개의 종에서 나타났다.

표 2. 편종의 배음열

	黃		大		太		夾		故		仲		蕤		林	
	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)
제1배음	1.00	29.6	1.00	43.1	1.00	31.5	1.00	36.9	1.00	43.5	1.00	34.2	1.00	39.4	1.00	43.4
제2배음	3.08	21.7	3.04	39.3	3.12	9.3	3.17	3.6	3.00	40.1	3.15	34.0	2.92	36.5	3.01	46.7
제3배음	4.82	31.5	4.80	39.3	5.23	40.4	4.89	36.2	4.88	40.8	5.09	42.8	4.76	35.8	4.77	47.9
제4배음	6.35	27.3	6.16	21.1	6.26	11.8	5.91	30.0	5.30	28.4	5.52	15.8	5.45	18.4	5.37	9.0
제5배음	7.46	25.2	6.95	27.3	7.44	16.5	7.59	35.2	5.89	20.5	7.67	18.9	5.72	16.7	7.36	23.8
제5배음	10.89	16.9	9.82	27.1	8.18	32.8	9.86	27.0	7.50	28.0	8.09	32.5	7.34	37.7	7.52	24.7
제7배음	12.46	18.3	12.18	22.0	11.20	10.8	14.76	4.8	10.33	5.8	11.05	2.7	9.84	8.3	9.71	21.2
	夷		南		無		應		黃		沃		沃		泐	
	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)	배음 열	음량 (SPL)
제1배음	1.00	39.9	1.00	32.4	1.00	33.2	1.00	25.3	1.00	29.1	1.00	34.2	1.00	31.6	1.00	34.1
제2배음	2.68	31.6	2.87	40.1	2.90	40.4	2.78	51.3	2.82	46.2	2.81	46.2	2.72	32.5	2.81	29.7
제3배음	4.47	30.6	4.32	20.3	4.32	23.3	4.47	28.2	3.89	38.3	3.63	37.3	3.00	40.8	3.07	32.7
제4배음	4.76	40.6	4.53	22.6	4.89	32.6	4.72	33.4	4.40	29.3	4.30	20.6	3.60	25.8	3.33	36.1
제5배음	6.94	25.4	5.04	29.7	7.11	22.0	4.92	20.6	4.80	38.1	4.95	21.1	4.44	13.6	4.18	7.5
제5배음	7.17	27.9	6.95	16.2	7.55	19.8	7.37	31.1	6.68	12.8	6.76	5.6	4.94	30.3	5.15	14.9
제7배음	10.49	17.5	7.82	24.4	8.29	1.9	9.83	17.7	7.55	28.6	7.27	20.4	5.27	25.7	5.57	20.6

그림 5. 시간에 따른 黃의 배음성분의 변화

그림 6. 시간에 따른 夾의 배음성분의 변화

3.2.3 여음부

지속부에서 소리를 구성하는 대부분의 배음성분들이 없어지고 음량이 가장 큰 두 개의 배음만이 남아 소리가 완전히 소멸할 때까지의 구간이다. 표 3은 각 종의 여음부 배음의 주파수와 그 주파수간 비율을 나타낸다. 이칙(夷則)을 제외한 모든 음들이 제1배음과 그 음의 주파수보다 3배 또는 5배 높은 주파수에서 조금 벗어난 음고를 가진 배음으로 구성되어 있다. 각 음을 구성하는 두 개의 주파수 성분은 정수배에서

미세하게 벗어나 있기 때문에 맥놀이(beatting)²⁾ 현상이 일어난다. 이러한 맥놀이 현상은 여음부에서 갑자기 형성되는 것이 아니라, 다른 타격부와 지속부에서 다른 주파수 성분들에 의해 마스킹(masking)³⁾되었던 것이 여음부에서 비로소 드러나는 것이다.

2) 주파수가 비슷한 두 개의 파동이 간섭을 일으켜서 새로운 합성파가 만들어지는 현상

3) 두 가지 이상의 음이 존재할 때 어느 한 쪽 때문에 다른 쪽 음이 들리지 않게 되는 현상

표 3. 여음부의 배음구성

음명	배음1 (Hz)	배음2 (Hz)	배음2/배음1
黃	261	808	3.10
大	278	841	3.04
太	294	1532	5.21
夾	311	1526	4.91
故	329	1607	4.88
仲	349	1778	5.09
蕤	373	1080	2.90
林	391	1183	3.03
夷	417	446	1.07
南	441	1265	2.87
無	465	1344	2.89
應	496	1404	2.83
潢	525	1490	2.84
汰	556	1563	2.81
汰	589	1605	2.72
挾	624	1912	3.06

맥놀이 현상은 근접한 두 개의 주파수가 간섭을 일으켜 발생하는데, 종형 구조물에서 나타나는 맥놀이 현상은 종 표면의 미세한 비대칭에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다[10]. 편종 여음부의 맥놀이 현상은 남아있는 두 배음의 주파수와 그 비율에 의하여 그 형태가 결정된다.

그림 7은 맥놀이 현상의 정밀한 관찰을 위하여 대

려(大, (a))와 청태종(汰, (b))의 파형의 여음부를 노말라이즈한 것이다. 청태종에서는 맥놀이 현상이 거의 관찰되지 않는 것에 반하여, 대려에서는 뚜렷하게 나타나고 있다. 이는 청태종의 여음부를 구성하는 배음의 주파수가 589Hz와 1605Hz로 2.72배의 비율인 것에 반하여 대려의 여음부를 구성하는 배음의 주파수가 278Hz와 841Hz로 3.04배의 비율로 근접 주파수 간 간섭이 생겨 나타난 현상으로 볼 수 있다.

그림 8은 대려와 청태종의 여음부를 표 3에서 분석된 주파수를 기반으로 사인파 두 개를 이용하여 합성하여 재현한 파형이다. 그림 7의 원형과 비교하여 보면 두 개의 주파수 성분만으로 거의 동일하게 재현되고 있음을 알 수 있다. 이는 여음부의 맥놀이 현상이 두 개의 배음 성분에 의하여 발생하고 있다는 것을 보여준다.

4. 결 론

편종의 소리 합성을 위한 첫 단계로 FFT 스펙트럼 분석을 통하여 편종의 음고와 음색을 분석하였다. 편종의 음고는 제 1배음의 주파수로 측정이 가능하며, 현대 편종의 음고는 서양의 평균율과 거의 동일하게 나타났다.

음색 스펙트럼은 시간에 따라 지속적으로 변화하였는데, 그 결과는 다음과 같다.

(a) 大

(b) 汰

그림 7. 여음부의 맥놀이 파형

그림 8. 여음부를 재현한 파형

1) 타격되는 순간 배음 성분들과 함께 전 주파수 대역에 걸쳐 노이즈가 발생하는데, 타격 직후 고주파수 대역의 노이즈 성분들부터 단시간 내에 점차 사라져 편종의 고유 배음 성분만이 남는다.

2) 고유 배음 성분들은 각 종마다 동일하지 않고 조금씩 차이가 있었으나, 시간이 경과함에 따라 고주파수 성분들부터 점차적으로 소멸하며 음색이 변화한다.

3) 주파수 성분들이 거의 소멸한 후 마지막 단계인 여음부에서는 두 개의 배음만이 남는데, 지속부에서 다른 배음 성분들에 감추어져 있던 두 배음의 주파수의 비율에 의하여 생성된 맥놀이 현상이 드러난다.

본 연구는 편종을 연주하여 발생하는 소리 자체에 관한 분석만을 하였으며, 그 결과 시간에 따른 음색의 변화의 세밀한 분석이 가능하였다. 그러나 소리 발생에 기여하는 물리적 특징과 함께 재료적 특성도 함께 연구된다면 스펙트럼에 의한 합성(spectral modeling synthesis)과 함께 물리적 합성(physical modeling synthesis)의 병행이 가능해져 실제 연주소리와 더욱 비슷한 편종 소리의 합성이 가능할 것이다. 또한 근래에 제작된 편종 만이 아닌 고대 편종에 관한 분석이 함께 병행된다면 편종 원형에 가까운 소리 합성에 관한 연구가 진행될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 유준희, “세종대왕기념관의 유물 편종과 현대 편종의 음향 스펙트럼 비교,” 한국음향학회지 제28권 제3호 pp. 222-228, 2009.
- [2] 장사훈, 최신국악총론, 세광음악출판사, 서울, 1985.
- [3] 윤지원, 김준, “국악 타악기 편종의 음색연구,” 멀티미디어학회 논문지 제13권 11호, pp. 1728-1738
- [4] 송혜진, 한국악기, 열화당, 경기도, 2001.
- [5] 국립국악원, 국악기 실측 자료집1, 국립국악원, 서울, 2008.
- [6] T. D. Rossing, *Science of Percussion Instruments*, World Scientific, Singapore, 2000.
- [7] 박석윤, 구본초, 김태호, 박봉서, 송인호, 심규복, 여영선, 윤영재, 이동, 이문희, 이인선, 이재성, 이정은, 이창진, 인민호, 임양호, 장영주, 장혜경, 최규선, “‘선덕대왕신종’의 음향특성에 관한 통계적 패턴분석,” Chungnam J. Sciences, 30, pp. 35-52, 2003.
- [8] 김석현, 김태형, 김윤희, 한영호, “춘천시민의 종의 진동 및 음향 특성,” 산업기술연구, 제26권 A호, 2006.
- [9] Curtis Roads, *The Computer Music Tutorial*, The MIT Press, MA, 1995.

- [10] J. W. S. Rayleigh and R. B. Lindsay, *The Theory of Sound*, Dover Publication, New York, 1945.

조 희 영

1999년 이화여자대학교 국악과 (학사)

2003년 이화여자대학교 실용음악 대학원 음악공학 전공 (음악석사)

2004년~현재 동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과 박사과정

관심분야: 컴퓨터음악, 소리합성, HCI

김 준

1989년 경희대학교 작곡과(학사)

1994년 미국 Boston대학교 작곡과(음악석사)

1999년 미국 Stanford대학교 작곡/컴퓨터음악 전공(음악박사)

2001년~현재 동국대학교 멀티미디어학과 교수

관심분야: 컴퓨터음악, 멀티미디어음악, 소리 합성, Sound Visualization