

가야금의 소리합성을 위한 FFT 음색분석 연구

김혜지, 김준

동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과

A Study on the FFT Analysis for the Sound Synthesis of Kayagum

Hye-je Kim, Jun Kim

Department of Multimedia, Graduate School of Digital Image & Contents, Dongguk University

요약

본 연구는 국악기 가야금의 소리합성을 위한 기초 단계로, 가야금 음색 특징을 분석하였다. 분석은 두 가지로 나누어 첫째, 가야금의 음색 특징을 FFT 스펙트럼 분석을 통하여 기타와 비교하였고, 둘째, 가야금 음고에 따른 소리 발생과정에서, 시작 부분인 어택(attack)부분의 시간대별 분석과 고주파수를 분석하였다. 그 결과 가야금 음색은 기타와는 달리 1배음 보다 2, 3배음들의 음량이 높게 나타났고, 소리발생 초기단계(어택 부분)에서 고음역(6현에서 12현)에서는 어택의 시작부분에서 뚜렷한 배음이 나타난 것에 반하여 저음역(1현에서 5현)은 시간이 경과 후 배음들이 명확하게 형성되었다. 또한 고주파수의 노이즈는 고음역보다 저음역에서 더 오랜 시간동안 나타난 것을 알 수 있었다. 이렇게 배음에 따른 음색 특징과 음고에 따른 소리 발생과정에서 어택부분의 음색변화, 고주파수의 노이즈 변화는 가야금만의 독특한 음색을 잘 나타내주는 특징으로써 가야금 소리합성에 있어서 반드시 적용되어야 할 것이다.

I. 서론

현재 컴퓨터의 급속한 발전으로, 악기의 소리를 합성음으로 재현하는 여러 방법이 연구되어지고 있다. 이미 많은 서양악기들이 여러 소리 합성 방법을 통하여 전자악기로 재현되었고, 최근에는 실제 악기 자체의 소리 발생 과정을 재현한 물리적 모델링 합성(Physical Modeling Synthesis)방식의 연구가 다양하게 진행되고 있다. 이는 스펙트럼을 통한 배음 및 음색 중심의 합성방식에서 확장되어, 물리적인 악기의 구조와 소리발생과정을 분석 재현하여 실제 악기소리와 가장 흡사한 소리를 만드는 방식이다. 한국의 국악기는 소리발생과정과 그 음색의 독특한 특징이 서양악기와는 달리 복잡한 구조를 가지고 있어서, 물리적 모델링 합성방식은 국악기 음색 합성에 있어 가장 적합한 방식이라 생각된다. 이에 본 연구는 한국 국악기 중 가야금을 선택하여 소리합성을 위한 첫 번째 단계인 음색 분석을 아래와 같이 두 가지로 나누어 연구해 보았다.

첫째, 악기 음색의 근본적 요소인 배음들(harmonics)의 FFT(Fast Fourier Transform)¹⁾스펙트럼 분석을 통하여

가야금과 유사한 서양악기인 기타와의 음색 차이를 비교 분석 하였고,

둘째, 가야금 음고에 따른 소리 발생과정에서, 시작 부분인 어택(attack)부분의 시간대별 분석과 고주파수의 분석을 통하여 가야금만의 독특한 음색을 연구하였다.

본 연구의 FFT 스펙트럼 분석에 사용된 윈도우 사이즈(window size)는 1024이고 윈도우 타입(window type)은 해밍(Hamming)이다.

II. 본론

1. 가야금의 특징

가야금은 국악기 중 대표 현악기로 정악 가야금, 산조 가야금, 개량 가야금으로 구분된다. 이 중 산조 가야금은 정악 가야금보다 줄이 가늘며 몸체의 폭이 좁고 길이도 짧아 빠른 선율의 연주에 편리하며 여러 다른 연주주법으로 다양한 소리를 낸다. 따라서 기악 독주곡인 산조를

본 연구는 2005년도 서울시 산학연 협력사업의 지원으로 수행되었음.

1) FFT(Fast Fourier Transform) : 짧은 시간동안의 신호에 대하여 주파수 성분을 분석하기 위한 방법

비롯해서 민요 반주, 시나위 반주, 병창, 창작곡 등 많은 연주곡에 사용되어 본 연구는 산조 가야금을 분석대상으로 하였다.

가야금 몸통은 오동나무로 만들어지며 소리를 내는 제작 재료에 의한 분류 8음²⁾ 중 사(絲)에 속한다. 12줄 명주실을 사용하며 제일 짧은 줄(제 1현)은 80가닥 정도이고, 제일가는 줄(제 12현)은 30가닥 정도이다. 엄지나 검지 손가락을 줄에 걸쳤다가 뜯는 주법으로 소리가 발생하는데, 힘을 주는 세기와 연주주법에 따라 강하고 맑은 음색과 부드럽고 온화한 음색을 지닌다. 이와 유사한 주법으로 연주되는 서양악기인 어쿠스틱 기타 또한 손가락을 사용하여 줄을 뜯어 소리를 내는데, 이 두 악기의 음색을 비교해 봄으로써 가야금만의 특징을 연구해본다.

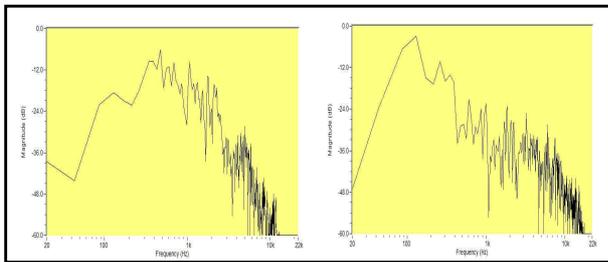
2. 가야금과 기타의 배음 스펙트럼 비교 분석

산조 가야금은 제 1현에서 제12현에 따라 각각 줄 이름을 지니며, 각 실제 음을 서양 음으로 표기하면 아래 <악보 1>과 같다.

<악보 1> 산조 가야금 음역

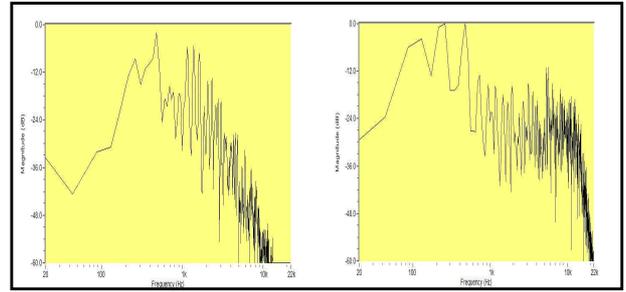
위 <악보 1>의 12개 음과 기타는 이와 같은 음고를 FFT 스펙트럼 비교분석 해보았다.

<그림 1>은 12개 음 중 Bb 음이 여러 음역에 걸쳐 분포하는 것을 착안하여 Bb2, Bb3, Bb4음을 선택하여 음의 지속부분(sustain)을 분석하였다. 가로축은 주파수(Hz)로서 0에서 22000Hz이고, 세로축의 음량 크기(dB)는 0에서 -60dB이다. 본 연구의 FFT 스펙트럼 분석에 사용된 윈도우 사이즈(window size)는 1024이고 윈도우 타입(window type)은 해밍(Hamming)이다.

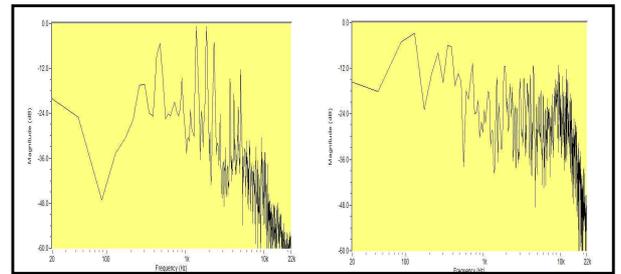


(a) 가야금 Bb2(제 2현) (b)기타 Bb2
<그림 1> 가야금 제 2현과 기타 Bb2 스펙트럼

2) 8음 : 금(金), 석(石), 사(絲), 죽(竹), 포(匏), 토(土), 혁(革), 목(木)을 말한다.



(a) 가야금 Bb3(제 6현) (b)기타 Bb3
<그림 2> 가야금 제 6현과 기타 Bb3 스펙트럼



(a) 가야금 Bb4(제 11현) (b)기타 Bb4
<그림 3> 가야금 제 11현과 기타 Bb4 스펙트럼

<그림 1(b)>와 <그림 2(b)>, <그림 3(b)> 기타 스펙트럼은 1번째 배음이 각각 -2.95dB, -0.01dB, -6.09dB로 비교적 큰 음량을 지니며 2 배음은 각각 -10.38dB, -0.14dB, -10.75dB로 1배음과 약 -4 ~ 7dB의 음량차이를 보이며 4배음부터 음량이 감소하는 스펙트럼이 나타난다. 반면 <그림 1(a)>와 <그림 2(a)>, <그림 3(a)> 가야금 스펙트럼은 1배음이 각각 -18.62dB, -8.67dB, -5.50dB이며 2배음은 -9.54dB, -2.06dB, -0.91로 각각 +9.08dB, +6.61dB, +4.59의 음량차이를 나타냈다. 이는 일반적인 서양악기가 제 1배음 즉 기본음 이후 2, 3배음으로 갈수록 음량이 작아지는 반면 가야금은 기본음보다 뒤의 배음 즉 2, 3배음의 음량이 약 4 ~ 9dB 크게 나타났다. 또한 가야금 스펙트럼<그림 1(a)>와 <그림 2(a)>, <그림 3(a)>에서 보면 약 10 ~ 11배음 이후부터는 급격히 음량이 줄어들어 각기 -19.94dB에서 -31.66dB, -20.34dB에서 -35.78dB, -12.28dB에서 -31.31dB로 약 -11dB ~ -19dB의 음량차이를 나타내며 선형의 곡선으로 스펙트럼이 나타나는 반면 기타 스펙트럼 <그림 1(b)>와 <그림 2(b)>, <그림 3(b)>는 약 4배음에서 18배음까지는 각각 -21.27 dB에서 -28.56dB, -13.12dB에서 -19.15dB, -11.55dB에서 -12.31dB로 약 4 ~ 7dB의 일정한 음량을 유지하다 그 이후 음량이 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 기타는 1번째 배음이 가장 큰 음량을 지니며 약 4배음 이후부터 음량이 서서히 감소하여 약 18배음까지는 일정한 음량을 유지하다 감소하는 일반적인 서양악기의 스펙트럼으로 나타났으며, 가야금은 1배음보다는 2, 3배음으로, 뒷 배음의 음량이 크며 약 10 ~ 11배음 이후부터는 급격히 음량이 감소하는 선형의 곡선 형태로 나타났다.

이러한 현상은 가야금만이 가진 음색특징으로 전 음역대에 걸쳐 동일하게 나타나고 있으며 이것은 국악기 가야금만이 가진 독특한 음색의 특징을 결정짓는 요소라 볼 수 있다. 이를 정리하면 아래의 <표 1>과 같다.

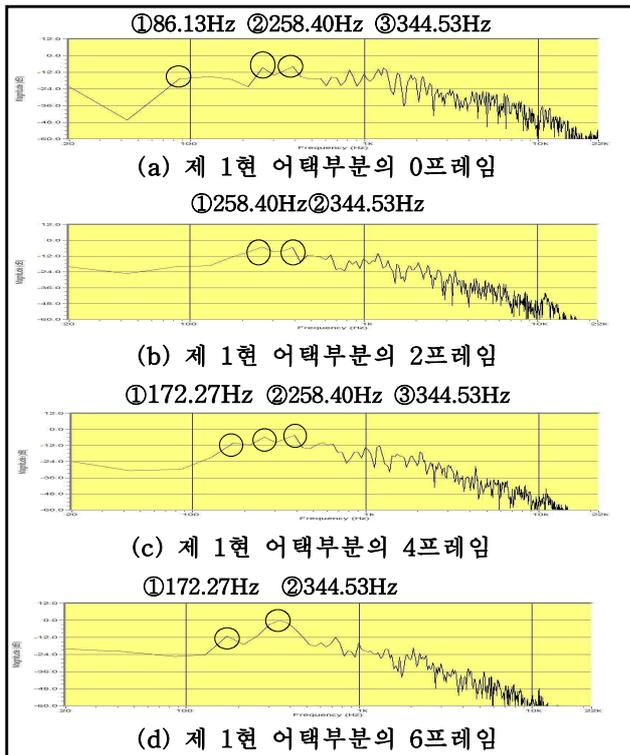
<표 1> 가야금과 기타의 배음 스펙트럼 비교 분석

	배음의 특징	배음들의 음량 차
가야금	1배음 이후 2, 3 배음의 음량이 크게 나타남	1과 2배음 음량 차 약 +4dB ~ 9dB
	약 10 ~11번째 배음 이후 급격히 음량 감소.	10, 11배음과 이후배음 음량 차 약 -11dB ~ -19dB
기타	1배음 이후 2, 3배음의 음량이 작게 나타남	1과 2배음 음량 차 약 -4dB ~ 7dB
	약4배음에서 18배음까지 일정한 음량 유지	18배음과 이후배음 음량 차 약 -4dB ~ 7dB

3. 가야금 음고에 따른 음색 특징

1) 어택(attack)부분의 시간에 따른 음색 특징

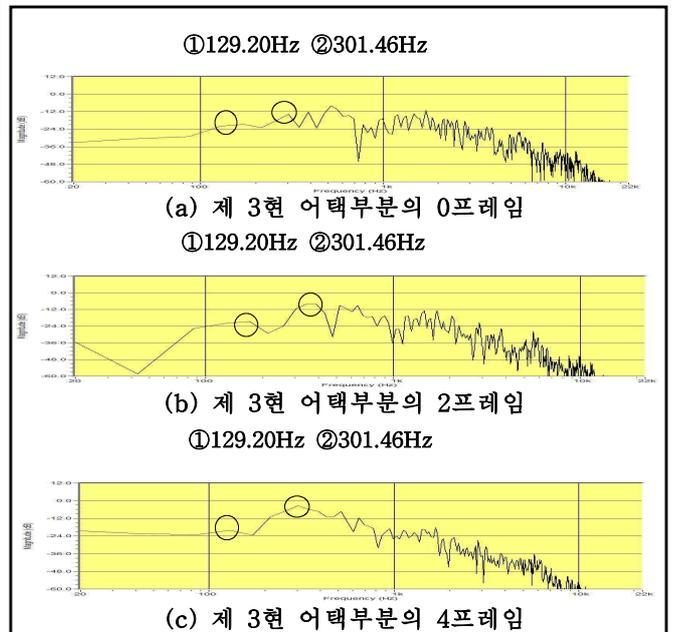
가야금 연주 시 소리발생 과정 중 시작부분의 음색변화를 알아보기 위해 어택 부분의 FFT 스펙트럼을 분석하였다.



<그림 4> 제 1현 어택부분의 프레임별 스펙트럼

<그림 4>는 제 1현의 어택 부분에서 0.2초까지를 분석한 것 중 0초에서 0.03초의 부분을 6프레임으로 나타내고 있으며 1프레임(frame)당 길이는 0.005초로 이다. 가로축은 20Hz부터 22000Hz이고 세로축은 위로부터 12에서 -60dB이다.

가야금 1현은 F2의 음고로 약 87Hz의 음역에서 1배음을 나타내야 하지만 <그림 4>의 (a), (b), (c) 제 1현 어택부분의 0, 2, 4프레임에서는 거의 1배음의 스펙트럼이 나타나지 않고 (d) 6프레임에 와서 약 172Hz의 음고의 스펙트럼으로 배음열 구조를 형성한다. 즉 가야금 제 1현의 어택부분은 저음의 1배음은 소실되고 시간경과에 따라 두 번째 배음의 음고가 6프레임(0.03sec) 후 명확한 형태로 나타났다. 이와 같은 현상은 가야금 2현에서도 같은 현상을 나타냈으며 <그림 5>는 제 3현 어택부분의 프레임별 스펙트럼이다.

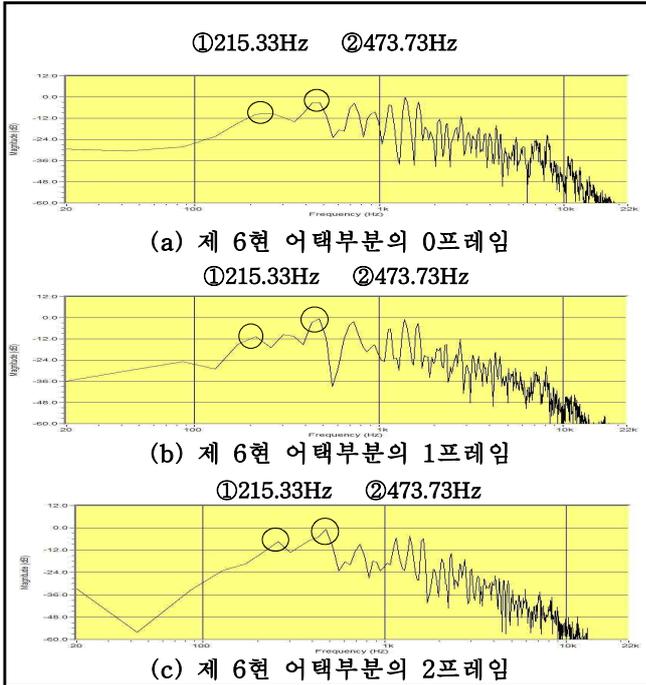


<그림 5> 제 3현 어택부분의 프레임별 스펙트럼

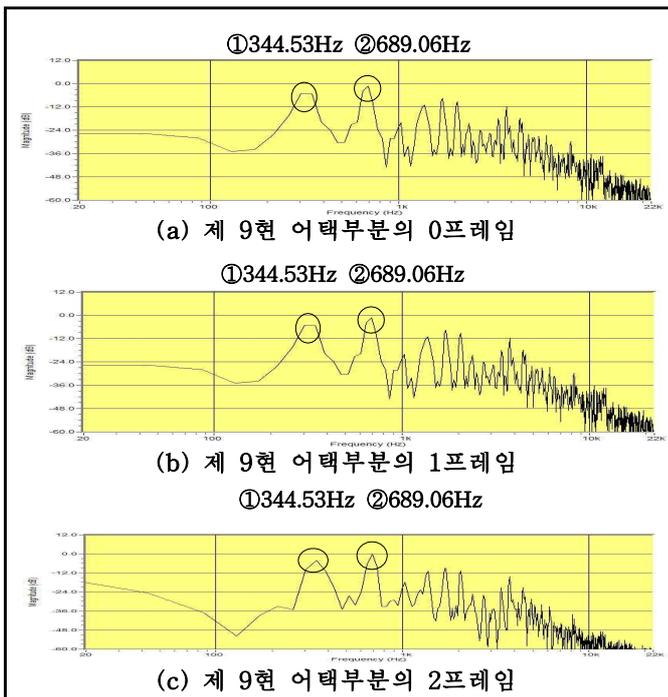
가야금 3현은 C3와 같은 음고로 약 130Hz의 음역에서 1배음을 갖는다. <그림 5> (a) (b)의 0, 2프레임에서 보면 129.20Hz가 1배음으로 추정되는데, 뚜렷한 스펙트럼의 모습이 나타나지 않고 (c) 4프레임(0.02sec)에서 스펙트럼 모습이 나타난다. 하지만 정확한 배음은 두 번째 배음인 301.46Hz의 스펙트럼이 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같이 4프레임 이후 두 번째 배음이 첫 번째 배음보다 뚜렷한 스펙트럼의 모습을 보이는 가야금은 3현 뿐만 아니라 4, 5현에서도 동일하게 나타나는 것을 살펴볼 수 있었다.

<그림 6>과 <그림 7>은 가야금 6현, 9현의 어택부분의 프레임별 스펙트럼이다. 6현은 Bb3 음고로 약 230Hz에서 1배음을 갖는데, (a) 0프레임 스펙트럼에서와 같이 215.33Hz의 1배음이 나타나며 (b) 1프레임 경과 후, (c)

2프레임에서는 215.33Hz와 473.73Hz에서 각각 1, 2배음의 보다 뚜렷한 배음열 구조가 나타난다. 또한 9현도 <그림 7> (a)에서와 같이 344.53Hz 689.06Hz의 1, 2배음이 0프레임서부터 명확히 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같이 가야금 6현부터 12현에서는 0프레임에서 1배음이 뚜렷히 나타나는 동일한 현상이 일어난다.



<그림 6> 제 6현 어택부분의 프레임별 스펙트럼



<그림 7> 제 9현 어택부분의 프레임별 스펙트럼

가야금 음고에 따른 어택부분의 음색 특징은 1, 2현에서는 6프레임(0.03sec) 이후부터 1배음은 소실되고 2배음의 스펙트럼이 나타났으며, 3, 4, 5현은 4프레임(0.02sec) 경과 후, 역시 1배음 보다는 2배음의 스펙트럼 모습이 더 명확히 나타났다. 하지만 6현부터 12현까지는 어택부분의 시작인 0프레임에서부터 1배음의 모습이 뚜렷한 형태로 나타났다.

2) 고주파수의 시간에 따른 음색 특징

<그림 4> (a) 제 1현의 어택부분의 0프레임을 살펴보면 약 4000Hz에서 22000Hz에서 고주파수 배음들이 분포하는 것을 볼 수 있는데, (d) 6프레임 이후 12000Hz 이상의 고주파수는 소멸한 것을 알 수 있다. 또한 (a)의 0프레임에서 10000Hz의 음량은 -36.58dB이 6프레임 경과 후 -59.12dB로 나타난 것으로 보아 고주파수 배음들이 6프레임 후 소실된 것을 알 수 있다. <그림 5>에서도 (a) 제 3현 어택부분의 0프레임에서는 5500Hz에서 16000Hz 음역에 고주파수 배음들이 분포되어있고 (c)의 4프레임 경과 후 10000Hz 이상의 고주파수 배음들이 소실되었다. 또한 (a)의 0프레임에서는 9000Hz의 음량이 -39.58dB이 4프레임 후는 -66.51dB로 26.93dB이 감소한 것을 알 수 있다. 이와 같이 가야금 12현의 고주파수 배음 분포 음역 대와 시간에 따른 고주파수 감소는 아래 <표 2>와 같다.

<표 2> 어택부분의 고주파수 시간에 따른 분석표

가야금 현	고주파수 배음 분포음역대	시간 경과에 따른 고주파수 소멸	소멸된 고주파수 음역대
1현	약 4000 - 22000(Hz)	6프레임 후	12000Hz
2현	약 5000 - 18000(Hz)	6프레임 후	11700Hz
3현	약 5000 - 16000(Hz)	4프레임 후	10000Hz
4현	약 5000 - 22000(Hz)	6프레임 후	12000Hz
5현	약 6000 - 16000(Hz)	6프레임 후	10000Hz
6현	약 7000 - 18000(Hz)	6프레임 후	13000Hz
7현	약 7000 - 18000(Hz)	3프레임 후	11400Hz
8현	약 5000 - 20000(Hz)	3프레임 후	11000Hz
9현	약 7000 - 22000(Hz)	4프레임 후	15000Hz
10현	약 7000 - 22000(Hz)	3프레임 후	13000Hz
11현	약 7000 - 22000(Hz)	3프레임 후	12000Hz
12현	약 7000 - 22000(Hz)	3프레임 후	13000Hz

<표 2>와 같이 1현에서 6현은 대략 6프레임 이후 고주파수 배음들이 소멸되었고 7현에서 12현은 3, 4프레임이 경과 후 고주파수 배음들이 소멸된 것을 알 수 있었다. 또한 전체 가야금에서 살펴보면 시간이 경과됨에 따라 약 12000 Hz 이상의 고주파수 배음들이 소멸된 것을 알 수 있었다.

가야금 음고에 따른 음색 특징은 크게 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 어택부분의 시간에 따른 음색 특징은 1현에서 5현의 저음역에서는 약 6 ~ 4프레임이 경과 후 1배음 보다는 2배음의 스펙트럼이 뚜렷이 나타났으며, 6현에서 12현으로 점차 고음역의 가야금에서는 어택부분의 시작지점인 0프레임에서 명확한 1배음의 스펙트럼이 나타났다. 둘째, 고주파수의 시간에 따른 음색특징은 1현에서 6현의 저음역에서는 6프레임이 경과 후 고주파수 배음들이 소멸되었으며, 7현에서 12현의 고음역에서는 3프레임 후 고주파수 배음들이 소멸되었고, 대략 12000Hz의 고주파수음역이 시간이 경과됨에 따라 소실된 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 1현에서 6현의 저음역이 고음역보다 뚜렷한 배음의 형태를 보이지 않는 노이즈를 더 많이 함유하고 있다는 것으로 볼 수 있으며, 이는 가야금 연주 시 어택부분에 나타나는 소리가 둔탁하고 강렬한 가야금만의 음색이 이러한 특성에 기인한다는 것을 알 수 있었다.

III. 결론

국악기 가야금의 소리 합성을 위해 가야금 음색특징을 밝히고자 본 연구가 진행되었으며, 분석은 두 가지 방향으로 이루어졌다. 첫째, 가야금의 음색 특징을 FFT 스펙트럼 분석을 통하여 기타와 비교하였고, 둘째, 가야금 음고에 따른 소리 발생과정에서, 시작 부분인 어택(attack) 부분의 시간대별 분석과 고주파수를 분석하였고 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 가야금의 FFT 스펙트럼을 분석한 결과 1번째 배음이 다른 배음보다는 음량이 크게 나타난 기타와는 달리 가야금은 1배음은 보다 2, 3배음의 음량이 크게 나타났으며, 기타는 18번째 배음까지 일정한 음량 값을 유지하는 반면 가야금은 약 10 ~ 11번째 배음 이후부터는 급격히 음량이 감소하는 선형의 곡선 형태로 나타났다.

둘째, 가야금 음고에 따라 어택 부분과 고주파수의 스펙트럼을 시간대별로 분석한 결과, 6현에서 12현의 고음역에서는 소리 시작부분인 0프레임에서 뚜렷한 배음이 나타났고, 12000Hz 이상인 고주파수의 노이즈 분포량이 빠르게 감소하였으며, 1현에서 5현의 저음역에서는 4에서 6프레임 이후 배음들이 명확하게 나타났고, 노이즈는 일정 시간동안 유지된 후 소멸되었다. 이 같은 결과는 가야금 연주 시 손과 줄이 접촉하는 순간 만들어지는 둔탁하고 강렬한 소리가 저음역의 시작부분에서 더욱 강하게 나타나는 것을 알 수 있었고, 이러한 음색은 어택부분 스펙트럼에 나타난 배음과 고주파수 배음들의 노이즈 특성과 관련이 있음을 나타내고 있다.

위의 분석 결과와 같이, 가야금 스펙트럼 분석에서 나타난 1, 2번째 배음 음량의 특징, 소리발생 과정에서 어택 부분과 고주파수의 노이즈를 포함한 음색변화는 가야금

음색특징의 중요한 요소들로서 가야금의 물리적 모델링 합성에서 최우선적으로 고려되어야 할 특성이다.

IV. 참고문헌

- [1] 문성옥, “녹음/확성을 위한 가야금의 음향적 특성 연구”, 수원대학교 음악테크놀로지대학원, 음악공학과, 2002.
- [2] 박홍수, “국악의 기본음의 절대고도에 관한 연구”, 성대 논문집, 제 12권. 1967.
- [3] 송혜진, 강운구, 『한국악기』, 열화당, 2001.
- [4] 장원희, “가야금 레코딩에 적절한 마이킹을 위한 연구”, 이화여자대학교 대학원, 한국음악학과, 2005.
- [5] 하경희, “Computer Synthesizer Digital Sampling Program을 사용한 가야금과 해금음색 연구”, 경성대학교 대학원, 음악학과, 1995.
- [6] 장사훈, 『국악대사전』, 세광음악출판사, 1991.
- [7] Pierce, John R. 『The Science of Musical Sound, Scientific American Books』, New York : W. H. Freeman Company 1983, 1992.
- [8] Roads, Curtis. 『Computer Music Tutorial』, The MIT Press, 1996.
- [9] Serra, Xavier. “Music Sound Modeling With Sinusoids Plus Noise”, 1997.
(<http://www.iaa.upf.es/~xserra/articles/msn/>)
- [10] Sethares, William A. 『Tuning Timbre Spectrum Scale』, Springer, 2004.
- [11] Vaelimaeki, V. 『Physical Modeling of Plucked String Instruments with Application to Real-Time』, Journal of the Audio Engineering Society, p.331-353, 1996.
- [12] Woodhouse, J. 『Plucked Guitar Transients : Comparison of Measurements and Synthesis』, Acustica united with acta acustica, p.945-965, 2004.