

개선된 산조 가야금의 물리적 모델링을 이용한 오른손 주법의 음 합성

Sound Synthesis of Right-Hand Playing Styles Using Improved Physical Modeling of Sanjo Gayageum

조 상 진*, 정 의 필*
(Sangjin Cho*, Uipil Chong*)

*울산대학교 컴퓨터 정보통신 공학부

(접수일자: 2006년 10월 12일; 수정일자: 2006년 11월 16일; 채택일자: 2006년 11월 25일)

본 논문에서는 기존의 산조 가야금의 물리적 모델링을 개선하여 오른손 주법에 따른 음을 합성하였다. 가야금 현의 모델에 사용된 루프 필터의 파라미터를 녹음된 단위음의 감쇠 영역으로부터 추정하여 정확도를 향상시키고 계산량을 줄였다. 몸통은 임펄스 응답으로부터 주 공명 주파수를 추출하여 설계한 공명기로 대체되었으며, 주 공명 주파수가 제거된 임펄스 응답은 크기가 줄어든 여기신호로 사용되었다. 안쪽의 주파수 응답은 15차 all-pole 필터로 근사화 하였다. 가야금의 오른손 연주법 중 연통기기는 피드포워드 콦 필터로 구현하였으며 필터의 파라미터는 녹음된 단위음으로부터 추출하였다. 개선된 산조 가야금의 물리적 모델을 이용한 뜯기와 튕기기, 연통기기의 합성음은 원래 음과 매우 유사하였다.

핵심용어: 산조 가야금, 물리적 모델링, 루프 필터, 오른손 연주법, 연통기기

투고분야: 음악음향 및 음향심리분야 (8.6)

In this paper, we improve a physical modeling of sanjo gayageum and synthesize sounds by right-hand playing styles. Parameters of loop filter are estimated from decay region of recorded sound. That results in improved accuracy and reduction of computational costs. Body is implemented to a resonator which has characteristics of main resonances extracted from impulse response. Residual signal with main resonances removed is used as excitation signal of proposed model. Anjok filter is approximated to frequency response of anjok and is implemented to the 15th order all-pole digital filter. Beating (by middle and index finger) among the right-hand playing styles is represented by feedforward comb filter. Parameters of this filter are extracted from recorded sound. The synthesized sounds using improved physical model of sanjo gayageum, plucking and beating, are pretty similar to original sounds.

Key words: Sanjo gayageum, Physical modeling, Loop filter, Right-hand playing style, Beating.

ASK subject classification: Musical Acoustics and Psychoacoustics (8.6)

I. 서론

악기 음 합성에 대한 연구는 샘플링, 변조, 필터링, 모델링 등의 방식으로 꾸준히 연구되어왔다 [1]. 샘플링과 필터링은 가장 전통적인 방법으로 악기 본래의 음을 녹음하여 사용하거나 필터를 이용하여 원하는 형태의 파형이나 스펙트럼을 만드는 방식이다. 샘플링은 악기 본래

의 음색이 가장 잘 표현되는 자연스러운 소리를 합성할 수 있으나, 단일 형태의 연주 방식에 적합하다. 만약 연주 형태가 바뀌면 다시 샘플링을 해야 하는 단점이 있다. 변조 방식은 자연의 소리가 아닌 전자음과 같은 새로운 소리를 창조한다는 장점이 있지만 인위적인 느낌이 강하여 다양한 악기의 자연스러운 소리를 합성하지 못하는 단점이 있다. 반면에 모델링 방식은 악기의 구조적, 음향적 특성을 분석하여 설계한 디지털 필터로 음을 합성하는 방식이다. 따라서 디지털 필터의 파라미터를 바꿈으로써 음색을 조절하고 특정 필터를 추가, 제거함으로써

책임저자: 조 상 진 (sjcho75@ulsan.ac.kr)
680-749 울산광역시 남구 무거 2동 산 29 울산대학교
컴퓨터 정보통신 공학부
(전화: 052-259-1650; 팩스: 052-259-1687)

써 연주방식을 표현할 수 있다. 물리적 모델링 (physical modeling)은 악기의 소리 발생 원리를 분석하고 그에 적합한 모델을 만들어 음을 합성하는 방식으로 디지털 도파관 (digital waveguide)을 이용한 방식이 음 합성 분야에서 많이 사용되고 있다.

물리적 모델링을 이용한 전통 악기의 음 합성에 대한 연구는 세계적으로 꾸준히 연구되고 있다. Vesa Välimäki와 Matti Karjalainen의 다수는 칸텔레 (kantele)라는 핀란드 전통악기를 모델링하였고 [2][3], Alvin W. Y. Su와 다수가 중국의 구친 (Gu-Chin)이라는 현악기에 대해 연구하였다 [4]. 국내에서는 편성에 대한 진동모드 분석 [5]과 산조 가야금의 물리적 모델링 [6]에 대한 연구가 있다.

본 논문에서는 산조 가야금의 물리적 모델 [6]에서 안쪽과 몸통에 대한 모델을 개선하고 연주법이 추가된 형태의 가야금 모델을 제안한다. 가야금은 다른 현악기와 마찬가지로 현, 브리지, 몸통으로 이루어져 있으며 손으로 현을 뜯거나 튕겨서 연주를 한다. 가야금에는 안 (雁足, Anjok)이라는 독특한 브리지가 있는데, 연주자는 이를 움직여 조율을 한다. 안쪽은 몸통 전체에 걸쳐 있는 현을 받치고 있어 실제 진동하는 현의 길이를 조절할 뿐만 아니라, 현의 진동을 몸통으로 전달하는 기능도 한다. 이러한 안쪽의 진동 전달 특성은 임펄스 응답으로부터 근사화된 디지털 필터로 구현하였다. 몸통은 현의 진동을 안쪽으로부터 전달받아 공명시키는 역할을 한다. 몸통의 공명 특성은 몸통의 임펄스 응답으로부터 추출하였으며, 이는 몸통의 공명 특성을 대체할 공명기 (resonator)의 파라미터로 사용된다. 가야금의 오른손 주법은 뜯기, 튕기기, 연통기기를 기본으로 하여 다양하게 응용된다. 이 중 연통기기는 독립된 필터로 구현되며, 이 필터의 파라미터는 녹음된 소리로부터 추출한다.

II. 산조 가야금 모델링

2.1. 산조 가야금

가야금은 12줄의 명주 현이 몸통 전체에 걸쳐 놓여있고 안쪽이 현을 각각 받치고 있는 형상의 악기로서 범금이라고도 하는 풍류 가야금과 산조 가야금으로 나뉜다. 이 두 종류의 가야금은 각각 다른 장르의 음악에 사용되었는데, 풍류 가야금은 궁중음악 (정악)에, 산조 가야금은 민속악에 주로 사용되었다. 산조 가야금은 크기와 구

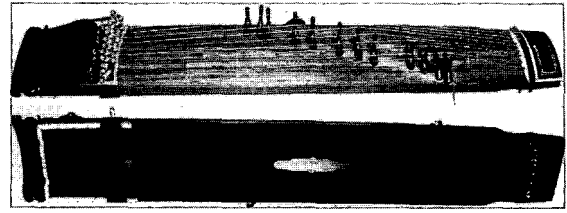


그림 1. 산조 가야금의 앞면 (위)과 뒷면 (아래)
Fig. 1. Front (top) and back (bottom) of sanjo gayageum.

조면에서 풍류 가야금과 차이가 있다. 풍류 가야금은 산조 가야금보다 약간 더 크고 뒤판이 파인 오동나무를 몸통으로 쓴다. 산조 가야금은 오동나무에 밤나무를 덧대어 몸통을 만들며 세 개의 공명구가 있다 (그림 1).

2.2. 현

디지털 영역에서 진동하는 현은 디지털 도파관 이론에 의해 지연라인만으로 묘사가 가능하다 [7][8]. 지연라인의 길이는 샘플링 주파수와 기본 주파수의 비로 나타나며, 실수 (소수점 이하) 부분에 해당하는 지연을 처리하기 위한 미소지연 필터로는 라그랑주 보간기 (Lagrange interpolator)를 사용한다 [9]. 실제 현은 산란하는 파동의 전파로 인한 주파수 의존 감쇠를 갖는데, 이러한 현상을 묘사하기 위해 1차 all-pole 루프 필터를 사용하였다.

$$H_1(z) = \frac{g(1+a_1)}{1+a_1z^{-1}} \quad (1)$$

여기서, g 는 0Hz에서의 필터 이득을, a_1 은 필터의 차단 주파수를 결정하는 계수이다. 시스템의 안정성을 위해 각각은 $-1 < a_1 < 0$ 과 $|g| \leq 1$ 의 범위를 갖는다 [3]. 그림 2는 완성된 현의 모델 $S(z)$ 이다.

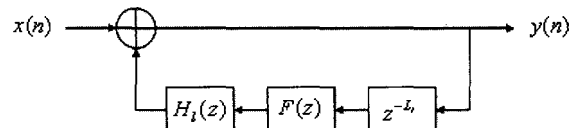


그림 2. 현의 모델, $S(z)$
Fig. 2. String model, $S(z)$.

2.2.1. 루프 필터 파라미터 추정

Välimäki는 STFT를 이용하여 각 배음의 크기 변화를 찾아내었고, 가중 최소 자승법 (weighted least-square)을 이용하여 식 (1)의 계수와 이득을 추정하였다 [3]. Välimäki의 루프 필터 설계는 STFT분석에 녹음된 소리의 전 영역을 사용하나, 본 논문에서는 음의 감

쇠 (decay) 영역만을 검출, 배음의 감쇠를 조사하여 계수와 이득을 추정하였다. 이는 녹음환경에 의한 노이즈의 영향을 최소화하여 정확도를 높이고 계산량도 줄이기 위함이다.

루프 필터의 계수, a_1 은 이득, g 와 함께 필터의 차단 주파수를 조절한다. 식 (1)의 차단 주파수는 다음과 같이 유도된다. 차단주파수를 필터의 최대성분 (DC)으로부터 3dB감소하는 지점의 주파수라고 정의하면,

$$|H(e^{j\omega})| = -3\text{dB} \tag{2}$$

이다. 이를 계수 a_1 에 대해서 정리하여 해를 구하면 식 (3)과 같다.

$$a_1 = \frac{-(2g^2 - \cos\omega_c) + \sqrt{(1 - \cos\omega_c)(4g^2 - \cos\omega_c - 1)}}{(2g^2 - 1)} \tag{3}$$

여기서 ω_c 는 필터의 차단 주파수이며, $-1 \leq \cos\omega_c \leq 1$ 의 범위를 갖는다. 만약 이득, g 의 값이 결정되면 계수 a_1 의 유효 범위를 구할 수 있다. 표 1은 산조 가야금의 2번, 5번, 8번, 11번현에 대해 계수와 이득을 녹음된 음의 감쇠 영역과 전체 영역으로 구분하여 추출한 결과이다. 가야금의 최대 기본주파수를 500Hz, 최대 배음수를 18개 정도로 가정할 때, 최대 차단주파수는 9kHz, a_1 은 -0.321 이 된다. 즉 가야금의 경우, 루프 필터의 계수는 $-1 < a_1 \leq -0.321$ 의 범위를 갖는다. 그림 3은 루프 필터의 계수를 추정하기 위해 녹음된 음의 감쇠 영역을 이용한 경우와 전체 영역을 이용한 경우에 따른 결과이다.

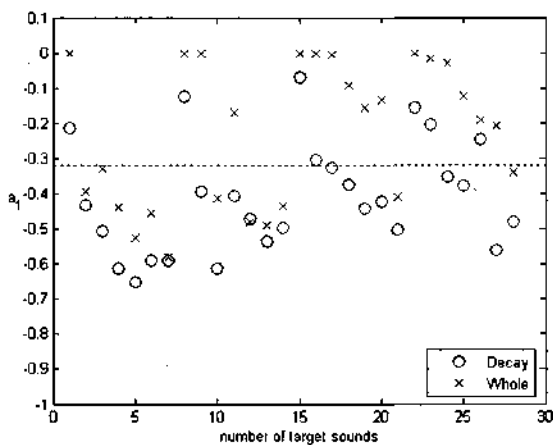


그림 3. 표 1의 루프 필터 계수, a_1 의 추정 결과 비교
Fig. 3. Comparison of estimation result of loop filter coefficient, a_1 shown in table 1.

표 1. 산조 가야금 2, 5, 8, 11번현의 인족의 위치에 따른 루프 필터 파라미터

Table 1. Loop filter parameters of the 2nd, 5th, 8th and 11th string corresponding to each bridge's position.

현	현침부터 안쪽까지의 거리(cm)	기본 주파수 (Hz)	음의 감쇠 영역		전체 영역	
			a_1	g	a_1	g
2	30	358.540	-0.215	0.984	-0.001	0.980
	40	253.450	-0.431	0.958	-0.394	0.980
	50	197.760	-0.506	0.970	-0.330	0.986
	60	162.730	-0.612	0.952	-0.440	0.986
	70	136.960	-0.652	0.960	-0.526	0.987
	80	120.160	-0.589	0.979	-0.455	0.987
	90	111.930	-0.591	0.970	-0.580	0.974
5	30	400.910	-0.122	0.978	-0.001	0.983
	40	277.360	-0.395	0.970	-0.001	0.984
	50	108.890	-0.614	0.962	-0.412	0.975
	60	178.540	-0.405	0.974	-0.167	0.978
	70	153.660	-0.471	0.967	-0.479	0.977
	80	135.280	-0.534	0.964	-0.489	0.975
	90	124.230	-0.496	0.976	-0.434	0.986
8	30	436.630	-0.068	0.955	-0.001	0.991
	40	312.770	-0.305	0.981	-0.001	0.991
	50	245.000	-0.327	0.981	-0.006	0.991
	60	202.290	-0.375	0.982	-0.092	0.991
	70	172.270	-0.442	0.972	-0.157	0.991
	80	150.510	-0.422	0.979	-0.133	0.990
	90	135.690	-0.502	0.985	-0.410	0.986
11	30	450.000	-0.155	0.979	-0.001	0.992
	40	326.670	-0.203	0.963	-0.016	0.988
	50	254.910	-0.351	0.975	-0.030	0.992
	60	211.000	-0.377	0.963	-0.123	0.988
	70	177.820	-0.245	0.959	-0.190	0.985
	80	155.280	-0.560	0.975	-0.207	0.981
	90	140.450	-0.480	0.966	-0.338	0.982

음의 감쇠 영역을 이용한 경우 전체를 이용한 것 보다 정확한 추정이 되었음을 알 수 있다.

2.3. 몸통

악기의 몸통은 그 악기의 음색을 결정하는 중요한 요소이다. 하지만 몸통의 비선형적인 특징 때문에 많은 계산이 필요한 필터 기반의 몸통 모델 구현이 어렵다 [3][10]. 따라서 물리적 모델링에서는 몸통의 임펄스 응답을 주로 사용한다. 몸통의 임펄스 응답은 몇 개의 고유한 공명 주파수 (resonant frequency)를 갖는데, 이들의 주파수와 대역폭을 이용하여 몸통의 대표 특성을 나타낼 공명기를 구현한다. 몸통의 공명기는 임펄스 응답에서 공명 주파수를 제거하기 위한 노치 (notch) 필터의 역 필터로 구현될 수 있다. 본 논문에서는 2차 IIR필터를 이용하였다.

$$H_r(z) = \frac{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}}{1 + a_1rz^{-1} + a_2r^2z^{-2}} \tag{4}$$

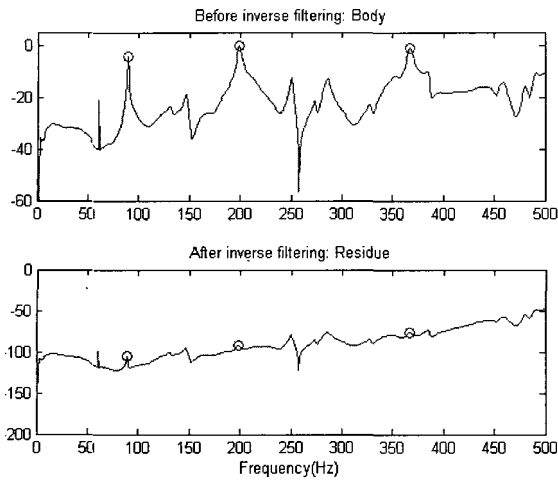


그림 4. 가야금 몸통의 임펄스 응답에 대한 역 필터링 전 (위), 후 (아래)의 스펙트럼
 Fig. 4. Spectrum of body before (top) and after (bottom) inverse filtering.

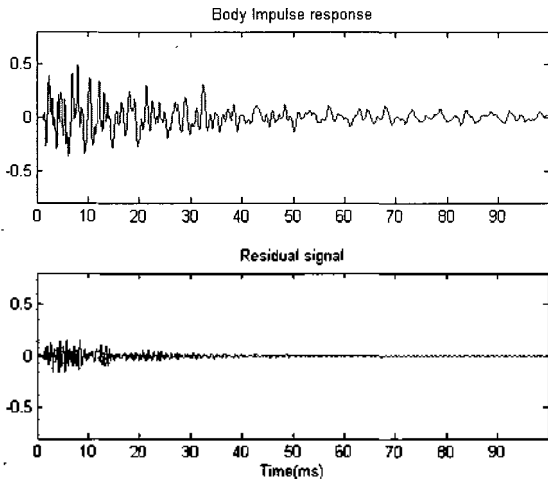


그림 5. 가야금 몸통의 임펄스 응답에 대한 역 필터링 전 (위), 후 (아래)의 파형
 Fig. 5. Waveform of body before (top) and after (bottom) inverse filtering.

여기서 a_1 과 a_2 는 필터 계수로서 공명 주파수에 의해 결정되고, r 은 대역폭과 관련된 파라미터로서 1에 가까운 값을 가진다 [10]. 본 논문에서 사용한 가야금은 89Hz, 199Hz, 367Hz의 주 공명 주파수를 갖는데, 그림 4-5는 가야금 몸통의 임펄스 응답에 대해 식 (4)에 의한 필터링 전과 후의 스펙트럼과 임펄스 응답을 보여준다. 역 필터링 후의 파형은 원래 파형에 비해 크기가 현저하게 줄어있어 가야금 모델의 여기신호 (excitation signal)로 사용될 때 메모리를 절약할 수 있다는 장점이 있다.

2.4. 브리지, 안족

가야금의 안족은 12개로 각각 현을 지지하고 있다. 안족은 몸통 전체에 걸쳐있는 현을 이등분하여 실제 진

동하는 현의 길이를 조절함으로써 조율의 기능을 하고, 현의 진동을 몸통의 위판에 전달하는 매개체로서의 역할도 한다. 따라서 안족의 전달 특성 또한 물리적 모델링의 대상이다. 본 논문에서는 임펄스 해머를 이용하여 안족의 주파수 응답을 측정하고 이를 바탕으로 식 (5)와 같은 15차 all-pole 안족 필터를 추정하였다 [11].

$$A(z) = \frac{G}{1 - \sum_{i=1}^{15} a_i z^{-i}} \tag{5}$$

여기서, G 는 필터의 이득을 조절하는 상수이고 a_i 는 안족 필터의 계수로서 표 2에 나타내었으며, 안족의 주파수 특성과 추정된 필터의 주파수 특성은 그림 6과 같다.

표 2. 안족 필터 계수

Table 2. Filter coefficients of Anjok.

i	1	2	3	4	5	6	7	
계수	1.194	-0.520	0.436	-0.420	0.237	-0.143	-0.021	
8	9	10	11	12	13	14	15	
	0.089	-0.145	-0.117	0.001	0.158	0.151	0.008	-0.177

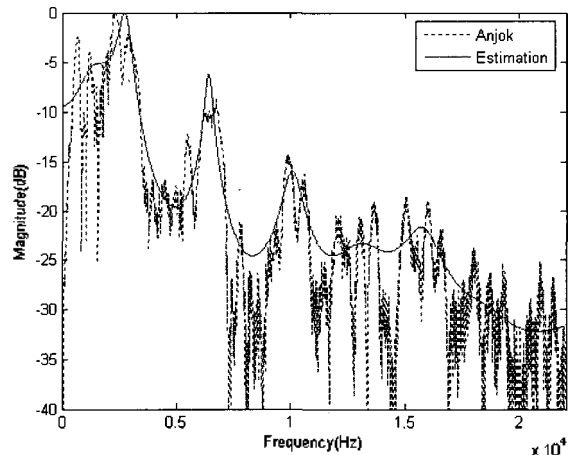


그림 6. 안족의 주파수 응답 (점선)과 추정된 필터의 주파수 응답 (실선)
 Fig. 6. Frequency response of Anjok (dotted line) and estimated filter (solid line).

III. 가야금 오른손 연주법

산조 가야금과 풍류 가야금의 오른손 주법은 서로 약간의 차이가 있으나, 두 가야금 모두 뜯고, 통기고, 연통기는 주법을 사용한다 [12]. 동일 현에 대해서 뜯거나 통기는 연주법은 손가락과 현이 점접촉을 한다는 가정 아

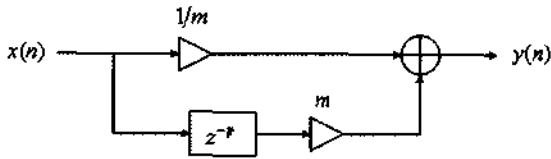


그림 7. 연통기 주법을 묘사한 디지털 필터.
Fig. 7. Digital filter depicting beating by middle and index finger.

래 서로 거의 동일한 특성을 갖는 소리를 만든다. 하지만 연통기 주법은 검지와 중지가 짧은 시간을 두고 동일한 현을 연달아 튕기기 때문에 뜰거나 뜰겨 만든 소리와 확연한 차이를 보인다. 시간 영역에서 비교할 때 연통기 주법은 각기 다른 세기의 힘에 의한 두 개의 음 발생 영역 (attack)과 감쇠 영역을 갖는다. 즉, 동일한 시스템에 스케일링된 두 신호가 일정한 시간 간격을 두고 입력되는 것과 같다. 이는 그림 7과 같은 시스템으로 구현될 수 있으며 이 시스템의 전달 함수는 식 (6)과 같다.

$$H_s(z) = \frac{1}{m} + mz^{-p} \tag{6}$$

여기서 m 은 첫 번째 음 발생 영역과 두 번째 음 발생 영역의 크기의 비를 나타내고, 지연 p 는 샘플링 주파수와 두 음 발생 영역사이의 시간 (N 샘플)의 비로 식 (7)과 같다.

$$p = \left\lfloor \frac{f_s}{N} \right\rfloor \tag{7}$$

IV. 가야금 음 합성

4.1. 실험 환경

합성에 사용한 가야금 음과 몸통 및 안족의 임펄스 응답은 모두 무향실에서 녹음, 측정하였다. 가야금 녹음에 사용된 마이크는 AKG C411로서 가야금의 몸통 뒷면 공명구 옆에 부착하였고, 디지털 데이터 레코더 TASCAM DA-P1을 노이즈레벨 -60dB로 녹음, 사운드 포지 5.0을 이용하여 각각의 단위음으로 편집하였다 (그림 8). 임펄스 응답 측정에 사용된 헤머는 ENDEVCO 2302로서 8kHz까지 평탄한 크기응답 특성을 갖으며, 가속도계는 DeltaTron Type 4508로서 0.3Hz-8kHz에서 평탄한 크기응답 ($\pm 10\%$)을 갖는다. 그림 9는 몸통과 안족의 임

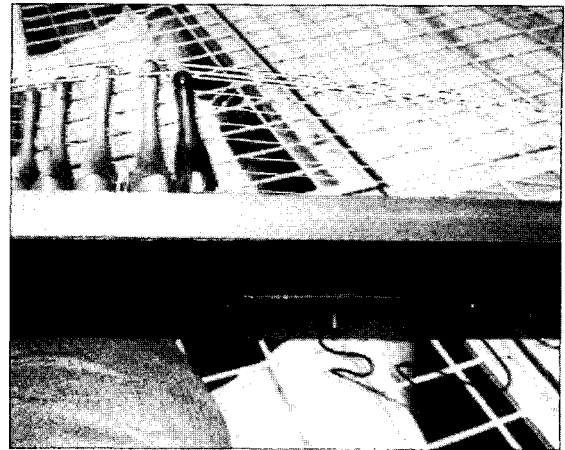


그림 8. 가야금 단위음 녹음
Fig. 8. Recording environment for gayageum.



그림 9. 가야금 몸통 (왼쪽)과 안족 (오른쪽)의 임펄스 응답 측정
Fig. 9. Measure of impulse responses of body (left) and Anjuk (right).

펄스 응답을 측정 환경을 보인다. 몸통은 봉미 (鳳尾)끝을 매달아 고정시킨 후 측정하였고, 안족 바닥은 딱딱한 표면으로, 안족의 움직임을 방지하기 위해 현을 얹어놓았으나 현의 영향을 최소화하기 위해 현의 양 끝단에 현의 진동을 흡수할 수 있는 충격완화 재질로 현을 감싸 놓았다.

4.2. 실험 결과

본 논문에서는 현, 브리지, 몸통으로 이루어진 산조 가야금의 물리적 모델에 오른손 연주법을 묘사한 디지털 필터를 추가하여 음을 합성하였다. 사용된 가야금의 모델은 그림 10과 같으며, 합성 과정은 다음과 같다.

- (1) 루프 필터 설계: 녹음된 음의 감쇠 영역으로부터 이득, g 와 계수, a_1 을 추정.

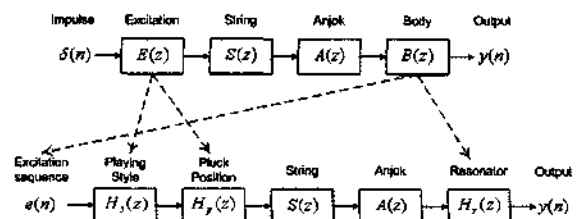


그림 10. 산조 가야금의 개선된 모델
Fig. 10. Improved physical model of sanjo gayageum.

- (2) 몸통의 임펄스 응답으로부터 공명 주파수 제거: 3개의 주 공명 주파수 제거.
- (3) 안쪽 필터 설계: 안쪽의 주파수 특성을 15차 all-pole 필터로 근사화.
- (4) 연주법 필터 설계: 녹음된 소리로부터 지연, p 와 계수, m 을 추정.
- (5) 개선된 산조 가야금 모델 실행

그림 11은 산조 가야금의 연주법에 따른 파형이다. 그림 11에서 보듯이 뜯기와 통기는 연주법에 의한 파형의 차이를 구별하기 힘들다. 따라서 뜯기와 통기에는 기존의 방식을, 연통기기에 대해서는 식 (6)의 디지털 필터를 구현하여 적용하였다. 뜯기 및 통기기에 대해서

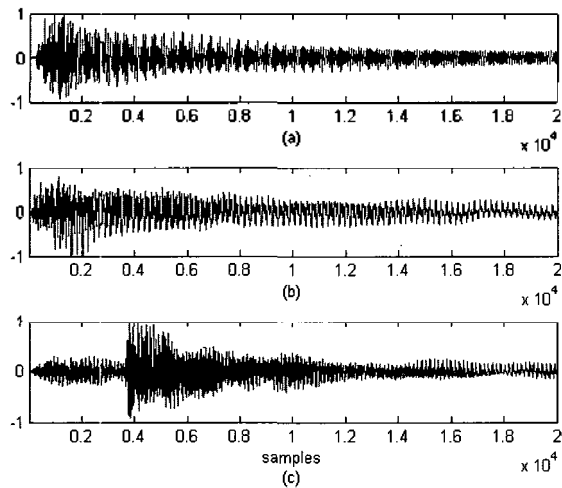


그림 11. 산조 가야금의 연주법에 따른 파형 — (a)뜯기, (b)통기, (c)연통기
 Fig. 11. Waveform corresponding to right-hand playing style of sanjo gayageum. — (a)plucked by thumb, (b)beaten by index finger, (c)beaten by middle and index finger.

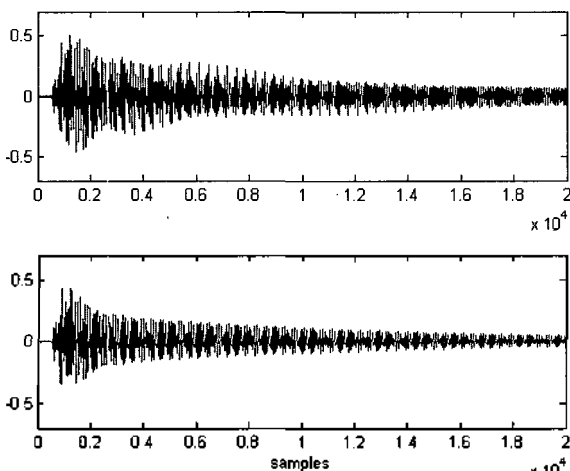


그림 12. 뜯기 및 통기기에 대한 원래 파형 (위)과 합성 파형 (아래) — 루프 필터 파라미터: $\alpha_1 = -0.496, g = 0.976$
 Fig. 12. Waveform of original sound (top) and synthesized sound (bottom) by plucking. — Parameters of loop filter: $\alpha_1 = -0.496, g = 0.976$.

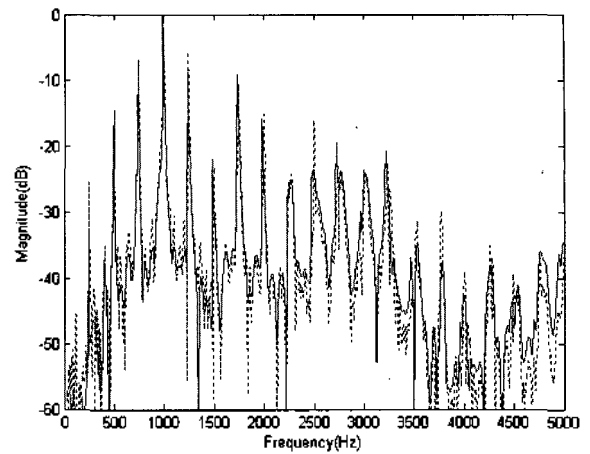


그림 13. 뜯기 및 통기기에 대한 원음 (점선)과 합성음 (실선)의 주파수 응답 비교
 Fig. 13. Comparison of original sound (dotted line) with synthesized sound (solid line) by plucking.

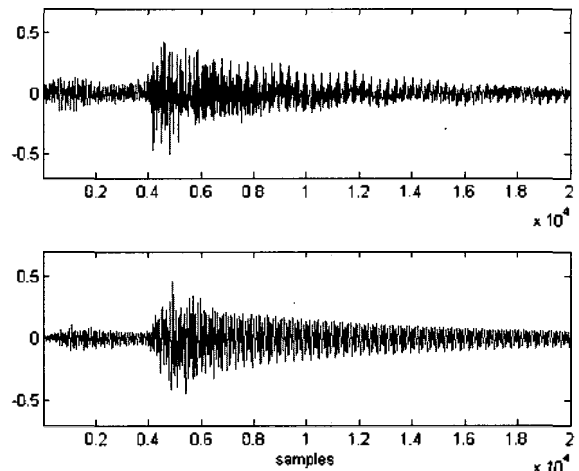


그림 14. 연통기기에 대한 원래 파형 (위)과 합성 파형 (아래) — 루프 필터 파라미터: $\alpha_1 = -0.663, g = 0.982$
 Fig. 14. Waveform of original sound (top) and synthesized sound (bottom) by beating. — Parameters of loop filter: $\alpha_1 = -0.663, g = 0.982$.

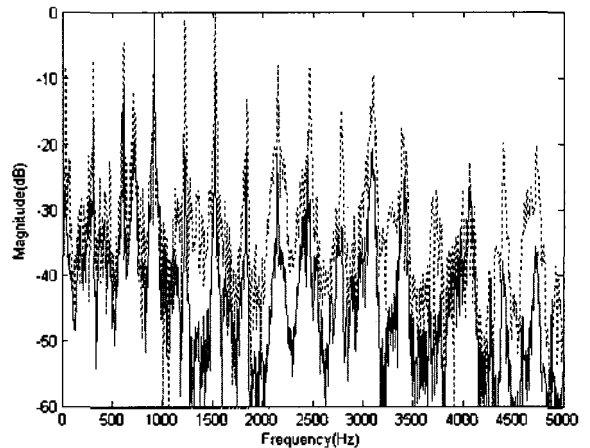


그림 15. 연통기기에 대한 원음 (점선)과 합성음 (실선)의 주파수 응답 비교
 Fig. 15. Comparison of original sound (dotted line) with synthesized sound (solid line) by beating.

는 표 1의 5번현 중, 현의 길이가 90cm인 경우의 데이터 ($a_1 = -0.496$, $g = 0.976$)를 사용하여 합성하였으며 (그림 12, 13), 연통기기에 대해서는 기본주파수가 152,866Hz 인 2번현에 대해 합성하였다 (그림 14, 15). 원래 음으로부터 추출한 p 와 m 은 각각 3528과 2.1이다.

V. 토 의

모든 음 합성 기술에는 각각의 장단점이 있는데, 이들은 상호 보완적인 형태로 발전되어왔다. 예를 들어 샘플링 방식은 악기의 원음을 녹음, 편집하여 사용하므로 가장 자연스러운 음을 합성해 내지만, 각각의 샘플을 저장할 많은 메모리가 필요했고, 변조 방식은 메모리는 적게 들지만 각각의 음을 합성하기 위해 많은 발진 (oscillator)가 필요했다. 요즘은 전자 산업의 발전으로 샘플을 저장할 메모리나 빠른 연산을 위한 프로세서에 대한 부담이 거의 없어 샘플링은 더 많은 악기와 다양한 연주 방식에 대해 가장 자연스러운 음을 합성할 수 있게 되었고, 변조 방식은 더 많은 발진기와 필터를 이용하여 더욱 다양한 음을 합성할 수 있게 되었다. 더불어 많은 연산이 필요한 물리적 모델링 합성 방식도 발전하게 되었다. 물리적 모델링은 악기의 특징을 디지털 필터로 구현하므로 다른 합성 기술에 비해 합성에 대한 자유도가 높다. 이는 필터의 파라미터를 조절함으로써 원 악기의 구조와는 다른 가상의 악기를 표현할 수 있다는 의미이기도 한데, 예를 들어 실제 기타의 몸통을 삼각형 또는 사각형으로 모델링하여 새로운 몸통을 가진 기타 음을 합성할 수 있다는 것이다. 이에 본 논문에서는 가야금을 대상으로 물리적 모델링을 수행하였고, 기 모델링된 가야금의 모델을 수정, 보완하여 개선된 가야금 모델을 제시하였다. 현의 모델의 일부인 루프 필터의 파라미터를 녹음된 음의 감쇠 영역에서 추출하여 정확도를 높이고 계산량을 줄였으며, 몸통은 주 공명주파수를 이용한 3개의 공명기로 대체하였다. 안쪽은 15차 all-pole 필터로 안쪽의 주파수 특성을 근사화하여 구현하였고, 가야금의 오른손 연주법의 연통기기에 대한 디지털 필터도 설계하였다. 제한한 모델을 이용하여 합성한 뜬기 및 통기 합성음은 원음과 비교하여 음 지속 구간 (sustain)의 길이가 다소 짧게 나타나는데, 이는 여기신호를 만드는 과정에 사용된 윈도우의 영향에 의한 것이다. 연통기기는 필터의 파라미터 p 와 m 은 원음으로부터 추출하였으며, p 는

동일 현에 대해 중지와 검지의 연통감 사이의 시간으로 평균 0.08초 (3528샘플)가 걸렸다. m 은 중지와 검지의 통감 때 가해지는 힘에 따라 변하게 되는데 본 논문에 사용된 연통기기의 원음에서는 2.1의 값으로 측정되었다. 원음과 합성음의 차이는 첫 번째 음 발생 영역에서 두 번째 음 발생 영역이 있기까지 0.08초라는 아주 짧은 시간에 나타나지만 두 번째 음 발생 영역의 크기가 첫 번째 음 발생 영역보다 2배 이상 커서, 마스킹 효과에 의해 그 차이를 인지할 수 없다.

VI. 결론

본 논문에서는 한국의 전통악기인 산조 가야금을 대상으로 물리적 모델링을 수행하였다. 가야금의 세부 모델들은 기존의 모델보다 성능과 정확도가 향상되었으며, 전체 모델은 연주법을 묘사할 수 있는 디지털 필터를 추가함으로써 보다 다양한 음을 합성할 수 있는 개선된 모델로 발전시켰다. 가야금은 명주현과 오동나무 몸통의 특성상 기타와 피아노 같은 다른 현악기와는 달리 음의 감쇠가 크고 음의 지속이 짧아 루프 필터 파라미터 추출시 녹음된 음의 전 영역을 사용할 경우 노이즈에 대한 영향을 많이 받게 된다. 따라서 녹음 환경에 따른 노이즈와 배음이 아닌 가야금 몸통의 고유 특성에 의한 영향을 최소화하기 위해 녹음된 음의 감쇠 부분만을 사용하였고, 그 결과 파라미터 추정의 정확도를 향상시키고 계산량도 줄일 수 있었다. 안쪽은 몸통과 마찬가지로 비선형성을 많이 포함하고 있어 선형 시뮬변의 시스템으로는 완벽하게 구현할 수 없어 안쪽의 주파수 특성을 근사화하여 디지털 필터로 구현하였다. 안쪽과 같이 움직이는 브리지에 대한 특성을 정확히 묘사할 수 있는 방법에 대한 연구는 차후 계속 되어야 할 것이다. 연주법에 있어 산조, 풍류 가야금은 모두 뜬기와 통기, 연통기기를 기본으로 한다. 뜬기와 통기기에 의한 음은 시간, 주파수 영역에서 차이가 거의 없다. 하지만 연통기기는 마치 서로 독립된 음이 짧은 시간차를 두고 합쳐진 형태로 나타나므로 피드포워드 콤 필터의 형태로 구현이 가능하다. 이 경우, 주파수 영역에서의 콤 영향은 불가피하나 계수를 조절함으로써 그 영향을 최소화 시킬 수 있었다. 향후 콤의 영향을 제거하기 위한 보다 효율적인 방법에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 과학재단 목적기초연구 (R01-2005-000-10671-0) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

1. Curtis Roads, *The Computer Music Tutorial*, The MIT press, London, 1996.
2. M. Karjalainen, J. Backman, and J. Pölkki, "Analysis, Modeling, and Real-Time Sound Synthesis of the Kantele, a Traditional Finnish String Instrument," in Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing (Minneapolis, MN, 1993 Apr. 27-30), 1 229-232.
3. V. Välimäki, J. Huopaniemi, M. Karjalainen, and Z. Jánosy, "Physical Modeling of Plucked string Instruments with Application to Real-Time Sound Synthesis," *Journal of Audio Engineering Society*, 44(5) 331-353, 1996.
4. Alvin W. Y. Su, Wei-Chen Chang, and Rei-Wen Wang, "IIR Synthesis Method for Plucked-String Instruments with Embedded Portamento," *Journal of Audio Engineering Society*, 50(5) 351-362, 2002.
5. 유준희, "편경의 진동모드 분석," *한국음향학회*, 25(3) 21-128, 2006.
6. 조상진, 정의필, "산조 가야금의 물리적 모델링," *한국음향학회*, 23(7) 521-531, 2004.
7. J. O. Smith, "Physical Modeling using Digital Waveguides," *Computer Music Journal*, 6(4) 74-91, 1992.
8. M. Karjalainen, V. Välimäki, and T. Tolonen, "Plucked-String Models: From the Kerplus-Strong Algorithm to Digital Waveguides and Beyond," *Computer Music Journal*, 22(3) 17-32, 1998.
9. T. I. Laakso, V. Välimäki, M. Karjalainen, and U. K. Laine, "Splitting the Unit Delay - Tools for Fractional Delay Filter Design," *IEEE Signal Processing Magazine*, 13 30-60, 1996.
10. M. Karjalainen and J. O. Smith, "Body Modeling Techniques for String Instrument Synthesis," *ICMC proceedings*, 232-239, 1996.
11. 조상진, 최진규, 정의필, "안축과 울통의 임펄스 응답을 이용한 가야금 사운드 합성," *한국산호처리및시스템학회*, 7(3) 102-107, 2006.
12. 황병주, *황병주 가야금교본*, 문하출판사, 1999.

저자 약력

• 조 상 진 (Sangjin Cho)

한국음향학회지 제 23권 7호 참조

• 정 의 필 (Uipil Chong)

한국음향학회지 제 23권 7호 참조