

개선된 발현악기의 루프 필터 설계 방법

Development of Loop Filter Design of Plucked String Instruments

조 상 진*
(Sangjin Cho*)

*울산대학교 전기공학부
(접수일자: 2011년 1월 19일; 채택일자: 2011년 2월 15일)

본 논문에서는 발현악기 물리적 모델링에서의 개선된 루프필터 설계 방법을 제안한다. Välimäki가 제안한 기존의 루프필터 설계 방법은 악기의 음이 오래 지속되는 경우에는 타당하지만, 그렇지 못한 경우에는 악기 음의 주파수 의존 감쇠를 표현하지 못하는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 녹음된 악기의 단위음에 대해 감쇠구간을 선택, 배음의 개수를 최소 5개부터 20개까지 변경하며 루프필터의 파라미터를 추정하고 이를 이용한 합성음과 원 신호 간 주파수 영역에서의 신호 대 잡음비가 가장 좋은 파라미터를 선택한다. 제안한 방법의 성능 검증을 위해 몸통의 구조와 현의 재질이 각각 다른 기타, 가야금, 거문고를 대상악기로 선정하였다. 제안한 방법은 배음의 지속시간에 상관없이 악기 음의 주파수 의존 감쇠를 잘 표현하는 루프필터 파라미터를 추정해 낼 수 있었다.

핵심용어: 루프필터, 발현악기, 음 합성, 물리적 모델링

투고분야: 음악음향 및 음향심리 분야 (8.6)

This paper describes a development of a loop filter design in a physical modeling of the plucked string instrument. The conventional method proposed by Välimäki cannot estimate right parameters if a sound has either very short sustain or no sustain. In order to overcome this drawback, we propose the use of the decay region and 5 to 20 harmonics of the sound in the estimation of loop filter parameters. The most appropriate filter coefficient is chosen by frequency signal to noise ratio. To verify the performance of the proposed method, the guitar, gayageum and geomungo were selected as the target because they have different shape, structure, and material of strings. Regardless of the duration of harmonics, the proposed method was able to estimate the loop filter parameters representing frequency-dependent damping of harmonics.

Keywords: Loop filter, Plucked string instrument, Sound synthesis, Physical modeling

ASK subject classification: Musical Acoustics and Psychoacoustics (8.6)

I. 서론

전기, 전자 및 컴퓨터 산업의 발전으로 디지털 신호 처리 기술은 산업 전 분야에서 사용하게 되었다. 기존의 아날로그 기술은 고성능의 저렴한 프로세서의 등장으로 많은 부분이 디지털 기술로 전환되었는데, 음악 및 악기의 신호처리 분야에서도 예외는 아니었다. 악기 음을 자기 테이프에 녹음하여 편집하던 방식은 디지털 샘플러(sampler)와 소프트웨어를 이용하여 편집하는 방식으로

바뀌었고, 아날로그 신디사이저의 발진기(oscillator) 및 필터 또한 디지털 발진기와 디지털 필터로 바뀌어 디지털 신디사이저가 탄생하게 되었다.

악기의 음 합성 방식은 샘플링(sampling), 다중 웨이브 테이블(multiple wave table), 가산(additive), 감산(subtractive), 포먼트(formant) 합성방식과 변조(modulation), 물리적 모델링(physical modeling) 등으로 나눌 수 있다 [1]. 이 중 물리적 모델링은 악기의 음 발생 원리를 분석하여 음을 합성하는 방식으로 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 분야이다. 물리적 모델링의 역사는 1960년대로 거슬러 올라간다. Kelly와 Lochbaum은 1961년 세계적으로 유명한 'Bicycle built for two'라는 작

품을 발표했는데, 여기에 사용된 목소리는 사람의 성도를 물리적 모델링한 것으로 Gunnar Fant의 음성-모음 (speech-vowel) 데이터를 이용하여 IBM707컴퓨터로 합성한 것이다 [2-5]. 이 후 일리노이 대학교의 Hiller와 Beauchamp, Ruiz는 최초로 악기 음 합성에 물리적 모델링을 적용하였고, 현 (string), 막대 (bar), 판 (plate)과 같은 진동하는 물체의 소리 합성에 초점을 맞추었다 [6-8]. 1970년대 초반에는 Hiller와 Ruiz가 진동하는 현에 대한 파동방정식을 차분법 (finite difference)을 이용하여 근사화하였다 [8]. 1970년대 후반과 80년대 초반에는 McIntyre와 Woodhouse, Schumacher가 찰현악기 (bowed strings), 클라리넷, 플룻을 모델링하였고, Karplus와 Strong는 발현악기 (plucked string)와 드럼 음색을 합성할 수 있는 간단한 알고리즘을 소개하였다 [9-12]. Smith와 Jaffe는 진동하는 현에 대한 Karplus와 Strong의 아이디어를 일반화하였고 [13-14], 이 후 Smith는 이를 디지털 도파관 이론으로 발전시켰다 [5, 15]. 디지털 도파관은 발현악기뿐만 아니라 다양한 음향 시스템에 대해서도 물리적으로 적절한 개념이고 계산상으로도 효율적이다 [16-18]. 이에 대한 많은 연구가 진행되면서 더욱 자세한 합성 원리와 구현법이 발표되었고, 그 결과 고음질의 발현악기 음을 합성할 수 있게 되었다 [19-23].

발현악기에 대해 사실적이고 실시간으로 합성할 수 있는 모델은 Välimäki와 Huopaniemi, Karjalainen, Jánosy에 의해 소개되었는데 만돌린 (mandolin)과 핀란드 전통 현악기인 칸텔레 (kantele)를 포함하여 6가지 악기를 대상으로 하였다 [23]. 이 논문에서는 각 악기의 단위음을 STFT (short-time Fourier transform)로 각 배음의 시간에 따른 감쇠율을 조사하고 이를 바탕으로 루프필터 (loop filter) 파라미터를 추정하였다. 이러한 방법으로 설계된 루프필터는 KS알고리즘의 평균필터와는 달리 다양한 발현악기 음의 주파수 의존 감쇠 (frequency-dependent damping)를 표현할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 STFT 분석을 통한 배음 감쇠율 조사 과정에서 설정해야 할 파라미터에 따라 악기의 음색을 표현하는 루프필터의 파라미터가 바뀌게 되어 합성음의 음색 및 음질이 달라지는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 방법을 제시한다. II장에서는 기존의 루프필터 설계 방법과 그 문제점을 살펴보고, III장과 IV장에서 제안한 방법과 그 결과를 기술한 후 V장에서 결론을 맺는다.

II. 기존의 루프필터 설계 방법 및 문제점

Karplus와 Strong이 제안한 KS알고리즘에서는 기타의 음색을 표현하기 위해 1차 평균필터를 루프필터로 사용하였다 [12]. 이 필터는 간단하지만 음의 주파수 의존 감쇠를 나타내진 못했다. Smith와 Välimäki 등은 원하는 감쇠 특성을 얻기 위해 IIR 저역통과필터 (infinite impulse response low-pass filter)를 사용할 것을 제안하였고 [14, 23], Välimäki는 식 (1)과 같은 1차 all-pole 필터를 제안하였다.

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

여기서 g 는 이득, a_1 은 차단주파수를 결정하는 계수인데 필터의 안정성을 위해 각각은 $|g| \leq 1$ 과 $-1 < a_1 < 0$ 의 범위를 갖는다 [23]. 1차 all-pole 루프필터의 특성은 계수 a_1 에 의해 결정되므로 합성음의 주파수 의존 감쇠를 가장 잘 묘사할 수 있는 최적의 값을 찾는 것이 중요하다. 이를 위해서는 악기 음의 배음에 대한 손실 인자를 정확하게 추정하여야 하며 STFT를 이용하여 프레임별 각 배음의 크기를 추적함으로써 그 값을 추정할 수 있다. 이 값은 시간에 따른 주파수 의존 감쇠를 나타내는 것으로 식 (2)와 같다.

$$G_k = 10^{\beta_k L / 20H} \quad (2)$$

여기서 β_k 는 k 번째 배음의 크기 (dB)의 시간에 대한 포락선의 기울기이다 [23]. 루프필터의 계수는 추정된 각 배음의 크기 응답과 루프필터의 주파수 크기 응답간의 가중 최소 자승법 (weighted least squares)으로 오차를 최소화하여 찾는다. 따라서 각 배음의 크기 응답인 G_k 의 정확한 측정은 매우 중요하다. 오차 함수는 식 (3)과 같이 정의한다.

$$E = \sum_{k=0}^{N_h-1} W(G_k) [|H_1(\omega_k)| - G_k]^2 \quad (3)$$

여기서 N_h 는 사용한 배음의 개수, $\omega_k = k\omega_0$ 는 각 배음의 각주파수, $W(G_k)$ 는 오차 가중 함수로 $W(G_k) = 1/(1 - G_k)$ 이다. G_k 는 β_k 로부터 계산되므로 정확한 G_k 를 얻기 위해서는 배음의 크기 변화에 대한 기울기 근사화 과정이 정

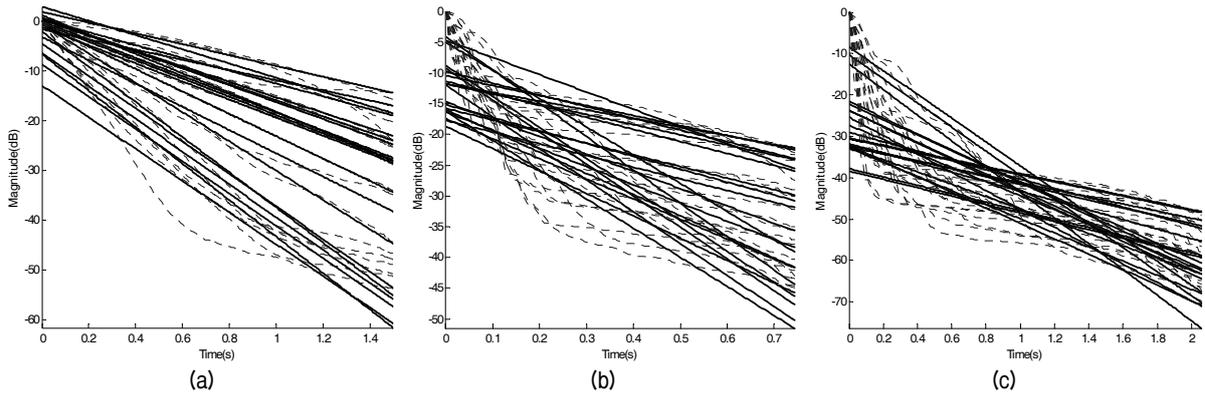


그림 1. (a) 기타, (b) 가야금, (c) 거문고의 단위음에 대한 배음의 크기 변화를 슈뢰더 역 적분법 (점선)과 선분 근사법을 이용하여 β_k 를 추정한 결과 (실선)
 Fig. 1. Results of Schroeder back-integration (dotted line) and β_k by line fitting (solid line) for the (a) guitar, (b) gayageum and (c) geomungo sound.

확해야 한다. Välimäki는 $N_h=20$ 으로, STFT는 음의 시작 구간 (attack)부터 1초에서 2초 정도의 길이로 음을 선택 하였다 [23]. 그림 1은 기타, 가야금, 거문고의 단위음에 대한 배음의 크기 변화를 슈뢰더 역 적분법 [24]과 선분 근사법을 이용하여 β_k 를 추정한 결과를 나타낸 것이다. 그림 1에서 점선은 슈뢰더 역 적분법을 이용하여 각 배음의 크기변화를 나타낸 것이고 실선은 선분 근사법을 이용하여 해당 배음의 β_k 를 나타낸 것이다.

기타 (그림 1 (a))의 경우 거의 모든 배음이 전 구간에 걸쳐 직선의 형태로 크기가 감소하여 점선이 실선과 잘 일치하는 형태를 보이는 반면, 가야금 (그림 1 (b))과 거문고 (그림 1 (c))의 경우 몇몇 배음을 제외한 대부분의 배음이 대략 0.2초에서 0.5초 이후에는 노이즈와 구별이 불가능할 정도로 크기가 매우 작아져 점선과 실선의 감소형태가 완전히 다른 형태를 보임을 알 수 있다. 기타는 1-2개의 배음을 제외한 대부분이 배음의 크기 감소와 그 감쇠를 추정한 직선이 거의 일치하여 β_k 가 잘 추정되었으나, 가야금과 거문고에 대해서는 대략 5개 정도만이 직선과 감쇠곡선이 일치하고, 나머지는 노이즈 레벨에서의 크기 변화로 인하여 β_k 가 실제 배음의 감쇠를 표현하지 못하고 있다. 이러한 현상은 기타와 가야금, 거문고의 물리적 특징이 다르기 때문에 발생한 것인데, 기타는 강선 현 (steel string)과 울림 특성이 좋은 몸통 (body)이 있어 현의 진동을 잘 증폭시켜 음이 오래 지속되고 가야금과 거문고는 명주 현 (silk string)과 울림 특성이 상대적으로 나쁜 길고 좁은 몸통으로 되어있어 음이 빨리 소멸하기 때문이다. 이러한 차이로 인해 기타에는 [23]의 조건이 적용될 수 있지만, 가야금과 거문고의 경우에는 불가능하다.

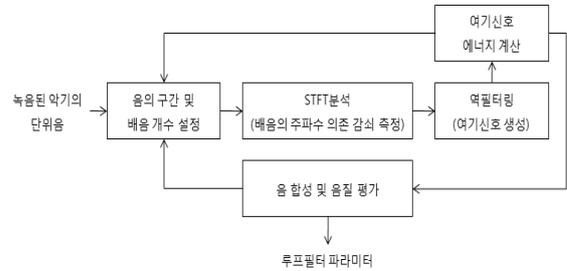


그림 2. 제안한 루프필터 파라미터 추정 블록도
 Fig. 2. Block diagram of proposed system for good estimation of loop filter parameters.

III. 개선된 루프필터 설계 방법

Välimäki가 제안한 루프필터 설계 방법은 악기의 음이 오래 지속되는 경우에는 타당하지만, 그렇지 못한 경우에는 악기 음의 주파수 의존 감쇠를 표현하지 못하는 문제점이 있다. 이는 너무 많은 배음 개수 설정과 적절하지 못한 음의 길이를 선택하기 때문인데, 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 배음 개수별, 음의 영역 선택 별로 필터 파라미터를 추정한 후 합성음의 음질을 기준으로 필터의 파라미터를 결정한다. 그림 2는 본 논문에서 제안한 루프필터 파라미터를 추정하기 위한 전체 블록도이다.

녹음된 악기의 단위음에 대해 음의 시작 구간부터 소멸 구간 중 일부를 선택, 배음의 개수를 최소 5개부터 20개 까지 변경해가며 각 배음의 주파수 의존 감쇠를 측정하여 루프필터의 파라미터를 추정한다. 추정된 파라미터로 현의 모델의 역필터를 구성하여 여기신호를 생성한다. 만약 추정이 잘된 경우라면 여기신호에는 배음 성분이 거의

남아있지 않아 원 신호에 비해 월등히 낮은 에너지를 갖게 된다. 이러한 판단 기준에 의해 일차적으로 걸러진 후보 파라미터는 음 합성에 사용되며 합성음과 원 신호 간 주파수 영역에서의 신호 대 잡음 비 (frequency signal to noise ratio, FSNR)가 가장 좋은 파라미터를 선택한다.

IV. 실험 및 결과

본 논문에서는 제한한 루프필터 설계 방법의 성능 검증을 위해 몸통의 구조와 현의 재질이 각각 다른 기타, 가야금, 거문고를 대상악기로 선정하였다. 사용된 가야금과 기타의 단위음은 모두 무향실에서 녹음하였다. 가야금의 단위음은 AKG C411 마이크를 가야금 몸통 뒷면 울림 구멍 옆에 부착하고 디지털 레코더 TASCAM DA-P1을 노이즈레벨 -60 dB로 설정하여 녹음하였고, 기타는 AKG C1000s를 기타 울림 구멍 앞에 위치시키고 동일한 레코더, 동일한 설정으로 녹음하였다. 거문고의 단위음은 '한국 전통악기 음원샘플 ((주)웨이브 엔터테인먼트)'의 Vol 1 (현악기 Audio CD), 14번과 15번 트랙의 거문고 소리를 사운드포지 8.0으로 44100 Hz, 16 bit 웨이브파일로 변환하여 사용하였다. 표 1에 본 논문의 실험에 사용된 각 악기별 단위음의 구체적인 정보를 나타내었다. 가야금의 경우 [25]에서 사용한 것과 동일한 것으로 2, 5, 8, 11번 현에 대해 안쪽의 위치를 변경시켜가며 녹음한 것이다. 안쪽의 위치는 현침으로부터의 거리를 나타낸 것이다.

각 악기별 단위음에 대해 음의 분석 구간은 전체구간과 감쇠구간 (decay)으로 나누었다. 그림 1에서 가야금과 거

문고의 배음은 음의 발생 후 아주 짧은 시간 안에 사라지는 것을 볼 수 있는데 이는 음의 유지 (sustain)단계가 없이 발생 → 감쇠 → 소멸 (release)의 단계를 거침을 보여주는 증거이다. 따라서 본 논문에서는 음의 분석구간을 전체구간인 음의 발생부터 소멸까지 구간과 감쇠구간으로 나누어 실험하였다. 배음의 개수는 앞 절에서 설명하였듯이 5개부터 20개까지를 고려하였다.

그림 3은 음의 구간을 전체구간으로 설정한 후 각 단위음 별 루프필터 파라미터를 추정한 결과이다. 세가지 악기 모두 기본 주파수가 높아질수록 계수가 커지는 경향을 보인다. 이는 일반적인 특징으로 기본주파수가 높을수록 배음이 고주파까지 분포하게 되고, 이들의 주파수 의존 감쇠를 고려하는 식 (1)의 차단 주파수가 높아지기 때문이다. 그런데 그림 3에서 특이한 것은 배음의 개수가 기타보다 작은 거문고가 100 Hz에서 200 Hz사이에서는 기

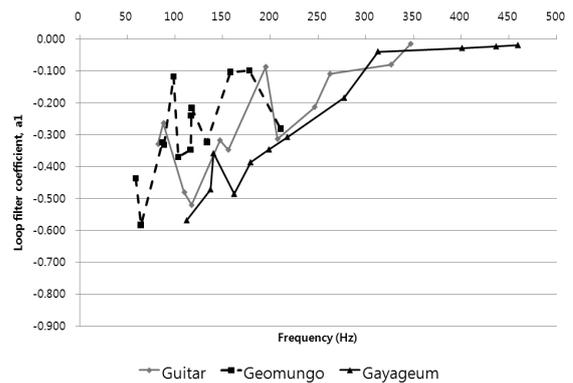


그림 3. 전체 구간에 대한 루프 필터 계수 추정 결과
Fig. 3. Results of estimation of loop filter parameters for whole region.

표 1. 실험에 사용된 각 악기별 단위음 정보
Table 1. Information on sounds used in the experiment.

단위음 순번	기타		가야금		거문고	
	기본주파수 (Hz)	현 / 프렛	기본주파수 (Hz)	현/안쪽위치 (cm)	기본주파수 (Hz)	트랙 / 순번
1	82.280	6번 / 개방	112.500	2번 / 90	58.960	14 / 1
2	88.020	6번 / 1	137.380	2번 / 70	64.190	14 / 4
3	109.700	5번 / 개방	140.450	11번 / 90	86.810	14 / 6
4	117.290	5번 / 1	162.130	2번 / 60	88.550	15 / 1
5	147.000	4번 / 개방	179.270	5번 / 60	98.660	14 / 5
6	155.830	4번 / 1	198.650	2번 / 50	103.520	15 / 2
7	195.130	3번 / 개방	217.780	5번 / 50	116.360	14 / 3
8	207.530	3번 / 1	277.360	5번 / 40	116.980	14 / 2
9	246.370	2번 / 개방	312.770	8번 / 40	117.600	15 / 3
10	262.500	2번 / 1	400.910	5번 / 30	133.640	15 / 4
11	326.670	1번 / 개방	436.630	8번 / 30	158.060	15 / 5
12	347.240	1번 / 1	459.380	11번 / 30	177.820	15 / 6
13					211.000	15 / 7

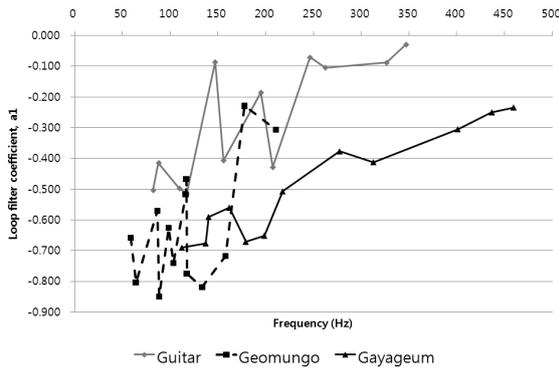


그림 4. 감쇠 구간에 대한 루프 필터 계수 추정 결과
 Fig. 4. Results of estimation of loop filter parameters for decay region.

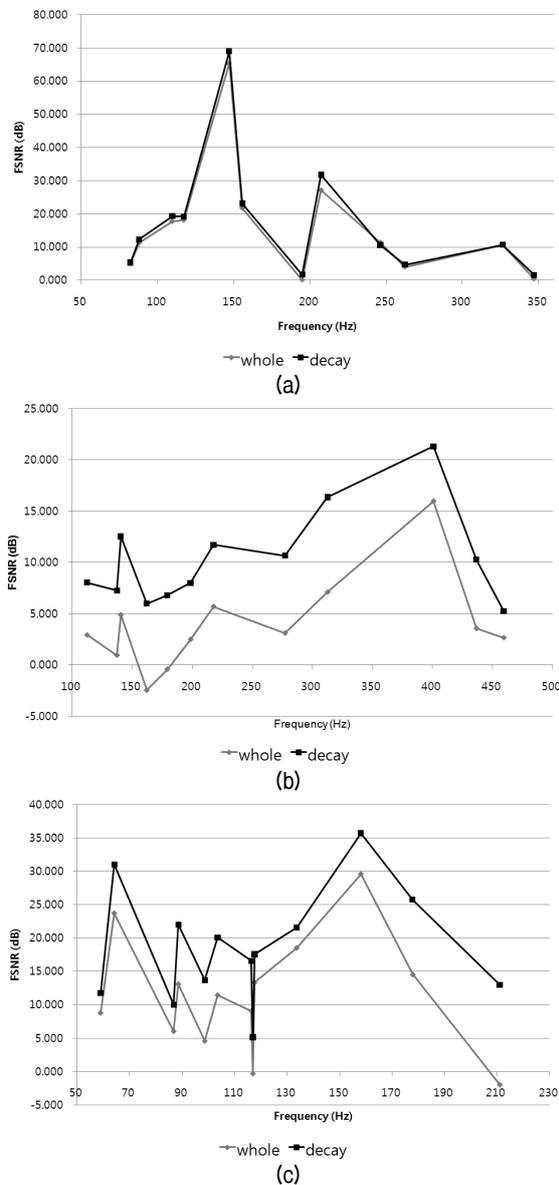


그림 5. (a) 기타, (b) 가야금, (c) 거문고에 대한 음의 구간 별 주파수 신호 대 잡음비
 Fig. 5. FSNR of (a) guitar (b) gayageum and (c) geomungo.

타보다 계수가 더 크게 나타난다는 것이다. 이는 거문고 배음이 기타보다 더 오래 지속된다는 것으로 해석할 수 있으며, 사실과는 다른 결과이다. 이 대역의 거문고 단위 음에 대한 여기신호를 살펴 본 결과 배음성분이 많이 포함되어 있어 루프필터 파라미터의 추정 결과가 좋지 못하였음을 확인할 수 있었다.

그림 4는 음의 구간을 감쇠구간으로 설정한 후 각 단위 음 별 파라미터를 추정한 결과이다. 기타는 -0.5이상, 가야금은 -0.7에서 -0.25, 거문고는 -0.85에서 -0.5의 계수 분포를 보인다. 가야금과 거문고는 계수의 분포가 겹치는 것은 두 악기의 유사성 때문인 것으로 판단되며, 기타가 그림 3과 4에서 모두 비슷한 분포를 보인 것은 음의 구간 선택이 파라미터 추정에 크게 영향을 주지 않은 것으로 판단된다. 가야금과 거문고는 그림 3과 비교하여 대략 0.2이상의 차이를 보인다. 여기신호의 분석으로 그림 3의 결과가 거문고에 대해서는 좋지 않음을 확인 하였기에, 그림 4의 결과에 대한 타당성을 FSNR로 검증하였다. 그림 5는 대상 악기의 단위음에 대해 음의 구간별 추정 파라미터로 합성한 결과를 FSNR로 비교하였다.

음의 구간별 추정 결과가 크게 차이가 없었던 기타는 그림 5에서도 감쇠구간의 FSNR이 약간 좋긴 하지만 거의 차이가 나지 않는다. 이는 음이 소멸할 때 까지 배음이 남아있어 β_k 를 잘 추정할 수 있었기 때문이다. 가야금과 거문고의 경우는 감쇠구간에서의 결과가 전체구간에서 보다 모든 단위음에 대해서 월등히 좋게 나타나며, 최대 15 dB정도의 차이를 보이는 곳도 있다. 이는 배음의 지속 시간이 짧아 감쇠구간 이후에는 거의 모든 배음이 사라져 버리기 때문에 전체구간에서는 β_k 를 잘 추정할 수 없었기 때문이다. 따라서 정확한 루프필터의 파라미터를 추정하기 위해서는 음의 감쇠구간을 선택하는 것이 타당함을 알 수 있다.

표 2는 루프필터 파라미터 추정에 사용된 배음의 개수를 음의 구간별로 보여준다. 본 논문에서는 배음의 개수를 5개에서 20개까지 사용하였는데, 최적의 추정 결과는 평균 6개에서 7개의 배음을 사용하였을 때 나타났다. 구간별로 비교해보면 전체구간에서 사용한 배음의 개수보다 오히려 감쇠구간에서 사용한 배음의 개수가 더 많은 경향을 보인다. 이는 배음의 주파수 의존 감쇠 측정시 전체구간에 많은 배음을 사용하면 이미 소멸된 배음의 크기가 계산과정에 사용되어 오차를 발생시키기 때문에 이러한 배음을 제외한 결과이다.

표 2. 음의 구간별 추정에 사용된 배음의 개수와 루프필터 파라미터
 Table 2. Number of harmonics and loop filter parameters of each instrument.

단위음 순번	기타				가야금				거문고			
	전체구간		감쇠구간		전체구간		감쇠구간		전체구간		감쇠구간	
	배음개수	배음개수	계수	이득	배음개수	배음개수	계수	이득	배음개수	배음개수	계수	이득
1	8	9	-0.503	0.994	6	5	-0.690	0.917	8	9	-0.658	0.939
2	5	13	-0.414	0.993	5	6	-0.676	0.950	5	6	-0.804	0.893
3	5	7	-0.497	0.981	5	5	-0.590	0.958	5	9	-0.571	0.953
4	5	5	-0.514	0.988	5	12	-0.560	0.919	6	5	-0.849	0.941
5	5	12	-0.086	0.994	6	6	-0.671	0.966	5	5	-0.626	0.933
6	5	5	-0.406	0.988	5	5	-0.651	0.953	5	5	-0.741	0.929
7	10	5	-0.185	0.994	5	6	-0.507	0.956	7	5	-0.517	0.958
8	5	5	-0.428	0.994	5	6	-0.377	0.959	5	11	-0.467	0.959
9	5	6	-0.071	0.994	5	6	-0.412	0.972	5	5	-0.775	0.954
10	5	5	-0.104	0.993	8	5	-0.305	0.980	5	5	-0.819	0.975
11	5	5	-0.088	0.996	5	5	-0.250	0.983	10	5	-0.717	0.951
12	5	14	-0.029	0.994	5	6	-0.234	0.982	5	5	-0.229	0.946
13									5	7	-0.307	0.908

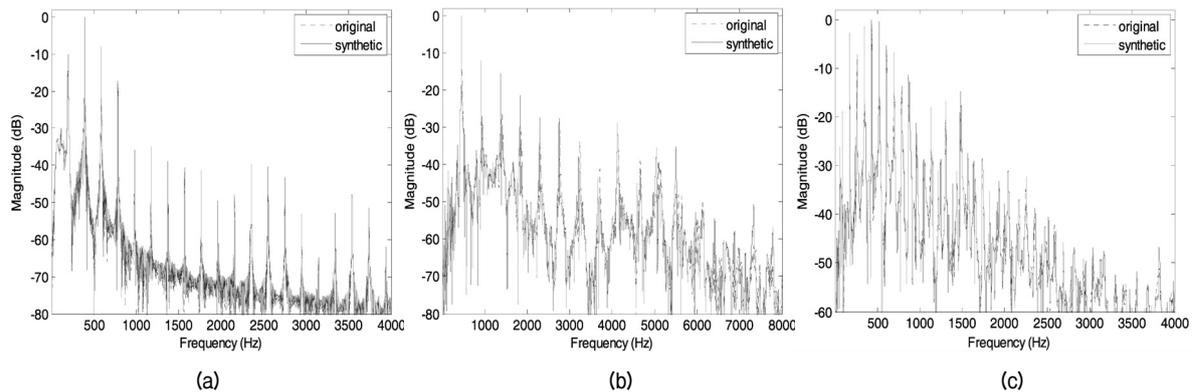


그림 6. (a) 기타, (b) 가야금, (c) 거문고의 합성음과 원음의 스펙트럼 비교
 Fig. 6. Spectra of original and synthesized sound of (a) guitar (b) gayageum and (c) geomungo.

그림 6은 표 1의 단위음 순번 기타 7번, 가야금 12번, 거문고 3번에 대해서 원음과 합성음의 스펙트럼을 비교한 것이다. 이들은 FSNR이 가장 낮은 것들로 합성에 사용된 파라미터는 표 2의 감쇠구간에 해당하는 계수와 이득을 사용하였다. 세가지 모두 원음과 아주 유사한 결과를 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 개선된 발현악기의 루프필터 설계 방법을 제안하였다. 기존의 루프필터 설계 방법은 악기의 음이 오래 지속되는 경우에는 타당하지만, 그렇지 못한 경우에는 악기 음의 주파수 의존 감쇠를 표현하지 못하는

문제점이 있었다. 이를 해결하기 위해 녹음된 악기의 단위음에 대해 감쇠구간을 선택, 배음의 개수를 최소 5개부터 20개까지 변경해가며 루프필터의 파라미터를 추정하고 이를 이용한 합성음과 원 신호 간 주파수 영역에서의 신호 대 잡음비가 가장 좋은 파라미터를 선택하였다. 제안한 방법은 배음의 지속시간에 상관없이 적절한 루프필터 파라미터를 추정해 낼 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 0000년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2010-0005092).

참고 문헌

1. C. Roads, *The computer music tutorial*, The MIT press, London, 1996.
2. G. Fant, *Acoustic theory of speech production*, The Hague, Mouton, 1960.
3. J. O. Smith, *Physical audio signal processing: Singing Kelly—Lochbaum Vocal Tract*, http://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Singing_Kelly_Lochbaum_Vocal_Tract.html, 2007.
4. J. Kelly, and C. Lochbaum "Speech synthesis," *Proc. 4th Intl. Congr. Acoustics*, pp. 1–4, 1962.
5. J. O. Smith, "Music applications of digital waveguides," Technical Report STAN-M-39, CCRMA, Dept. of Music, Stanford University, 1987.
6. L. Hiller and J. Beauchamp, "Review of completed and proposed research on analysis and synthesis of musical sounds by analog and digital techniques," Technical Report 19, Experimental Music Studio, University of Illinois, 1967.
7. P. Ruiz, "A technique for simulating the vibrations of strings with a digital computer," M. M. thesis, School of Music, University of Illinois, 1970.
8. L. Hiller and P. Ruiz, "Synthesizing sounds by solving the wave equation for vibrating objects," *J. Audio Eng. Soc.*, Part1: vol. 19, no. 6, pp. 462–470, Part 2: vol. 19, no. 7, pp. 542–550, 1971.
9. M. McIntyre, R. Schumacher and J. Woodhouse, "On the oscillations of musical instruments," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 74, no. 5, pp. 1325–1345, 1983.
10. M. McIntyre, and J. Woodhouse, "On the fundamentals of bowed string dynamics," *Acustica*, vol. 43, no. 2, pp. 93–108, 1979.
11. R. Schumacher "Ab initio calculations of the oscillations of a clarinet," *Acustica*, vol. 48, no. 2, pp. 72–85, 1981.
12. K. Karplus and A. Strong, "Digital synthesis of plucked string and drum timbres," *Comput. Music J.*, vol. 7, no. 2, pp. 43–55, 1983.
13. D. A. Jaffe and J. O. Smith, "Extensions of the Karplus–Strong plucked–string algorithm," *Comput. Music J.*, vol. 7, no. 2, pp. 56–69, 1983.
14. J. O. Smith, "Techniques for digital filter design and system identification with application to violin," Ph.D Thesis, Stanford University, 1983.
15. J. O. Smith, "Physical modeling using digital waveguides," *Comput. Music J.*, vol. 16, no. 4, pp. 74–91, 1992.
16. S. A. Van Duyne, J. R. Pierce, and J. O. Smith, "Traveling wave implementation of a lossless mode–coupling filter and the wave digital hammer," *Proc. Intl. Comput. Music Conf.*, pp. 411–418, 1994.
17. S. A. Van Duyne and J. O. Smith, "Physical modeling with the 2–D digital waveguide mesh," *Proc. Intl. Comput. Music Conf.*, pp. 40–47, 1993.
18. L. Savioja, T. J. Rinne, and T. Takala, "Simulation of room acoustics with a 3–D finite difference mesh," *Proc. Intl. Comput. Music Conf.*, pp. 463–466, 1994.
19. M. Karjalainen and U. K. Laine, "A model for real–time sound synthesis of guitar on a floating–point signal processor," *Proc. IEEE Intl. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 5, pp. 3653–3656, 1991.
20. M. Karjalainen, V. Välimäki, and Z. Jánosy, "Toward high–quality sound synthesis of the guitar and string instruments," *Proc. Intl. Comput. Music Conf.*, pp. 56–63, 1993.
21. J. O. Smith, "Efficient synthesis of stringed musical instruments," *Proc. Intl. Comput. Music Conf.*, pp. 64–71, 1993.
22. C. S. Sullivan, "Extending the Karplus–Strong algorithm to synthesize electric guitar timbres with distortion and feedback," *Comput. Music J.*, vol. 14, no. 3, pp. 26–37, 1990.
23. V. Välimäki, J. Huopaniemi, M. Karjalainen, and Z. Jánosy, "Physical modeling of plucked string instruments with application to real–time sound synthesis," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 44, no. 5, pp. 331–353, 1996.
24. M. R. Schroeder, "New Method for Measuring Reverberation Time," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 37, pp. 409–412, 1965.
25. 조상진, 정의필, "안족이 있는 악기의 개선된 현의 모델 개발", *한국음향학회지*, 26권, 7호, 328–333쪽, 2007.

 저자 약력

• 조 상 진 (Sangjin Cho)

한국음향학회지 제23권 제7호 참조