

안죽과 몸통의 임펄스 응답을 이용한 가야금 사운드 합성

Sound Synthesis of Gayageum by Impulse Responses of Body and Anjok

조 상 진*, 최 진 규**, 정 의 필*

Sang-jin Cho*, Gin-kyu Choi**, Ui-pil Chong*

요 약

본 논문에서는 가야금의 안죽과 몸통의 임펄스 응답을 이용하여 가야금의 사운드를 합성하였다. 디지털 도파관을 이용한 물리적 모델링에서 가야금의 소리를 제어하는 부분은 현과 몸통, 안죽의 세 가지 시스템으로 구성되며, 이 시스템은 직렬 선형적으로 결합된다. 가야금 현의 모델은 지연라인만으로 구현되었고, 몸통과 안죽은 각각의 임펄스 응답으로부터 추정하였다. 몸통의 임펄스 응답으로부터 3개의 공명 주파수를 찾아 이를 공명기로 구현하여 몸통으로 대체하고, 안죽은 기본 주파수 대역에 대하여 고역통과필터 특성을 갖는 시스템으로 구현하였다. 합성된 가야금 사운드의 오차(RMSE)는 주로 0.01-0.03의 아주 작은 값의 분포를 보였다.

Abstract

In this paper, we propose a method of a sound synthesis of Korean plucked string instrument, gayageum, by physical modeling which use impulse responses of body and Anjok. Gayageum consists of three kinds of systems: string, body, and Anjok. These are a serial combination of linear time invariant systems. String can be modeled by digital delay line. Body and Anjok can be estimated by their impulse responses. We found three resonance frequencies in the body impulse response, and implemented resonator as body. Anjok was implemented as high pass filter in fundamental frequency band of gayageum. RMSEs of synthesized sounds are distributed from 0.01 to 0.03. It was difficult to distinguish the resulting synthesized sounds from the originals sound by ear.

Keywords : Sound synthesis, Gayageum, Anojk, Body, Impulse response, Physical modeling,

I. 서론

신디사이저에 사용되는 악기 음 합성 방식은 샘플링, 변조, 필터링, 모델링 방식으로 크게 나눌 수 있다[1]. 모델링 방식을 제외한 나머지 합성방식은 악기 본래 사운드를 그대로 사용하거나 필터링을 해서 원하는 형태의 파형이나 스펙트럼을 만드는 방식이다. 샘플링 계통은

악기 본래의 음색이 가장 잘 표현되는 자연스러운 소리를 합성하나 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 이용하여 설계한 디지털 필터에 의해 사운드를 합성하는 방식이다. 따라서 디지털 필터의 파라미터를 바꿈으로서 사운드의 음색과 연주방식을 조절할 수 있다. 물리적 모델링(physical modeling)은 악기의 소리 발생 원리를 분석하고 그에 적합한 모델을 만들어 사운드를 합성하는 방식으로 KS알고리즘[2]을

*울산대학교 컴퓨터정보통신공학부 **홍익대학교 전자전기 공학과

논문 번호 : 2006-3-4 접수 일자 : 2006. 5. 22

심사 완료 : 2006. 7. 11

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

시초로 디지털 도파관(digital waveguide)을 이용한 방식이 음 합성 분야에서 많이 사용되고 있다.

전통 악기의 물리적 모델링을 이용한 사운드 합성에 대한 연구는 세계적으로 꾸준히 연구되고 있다. Vesa Välimäki 와 Matti Karjalainen의 다수는 칸텔레(kantele)라는 핀란드 전통악기를 물리적 모델링하였고[3][4], Alvin W. Y. Su의 다수가 중국의 구친(Gu-Chin)이라는 현악기에 대해 연구하였다[5]. 국내에서는 편경에 대한 진동모드 분석[6]과 산조 가야금의 물리적 모델링[7]에 대한 연구가 있다.

본 논문에서는 [7]의 모델에서 안죽과 몸통에 대한 모델을 개선한 형태의 가야금 모델을 제안한다. 가야금은 다른 현악기와 마찬가지로 현, 브리지, 몸통으로 이루어져 있으며 손으로 현을 뜯거나 튕겨서 연주를 한다. 가야금에는 안죽(雁足, Anjok)이라는 독특한 움직일 수 있는 브리지가 있는데, 연주자는 이를 움직여 조율을 한다. 안죽은 몸통 전체에 걸쳐 있는 현을 받치고 있어 실제 진동하는 현의 길이를 조절할 뿐만 아니라, 현의 진동을 몸통으로 전달하는 기능도 한다. 이러한 안죽의 특성은 하나의 시스템으로 구현되어 물리적 모델링에서 가야금 모델의 일부로 사용된다. 몸통은 현의 진동을 안죽으로부터 전달받아 공명시키는 역할을 한다. 몸통의 공명 특성은 몸통의 임펄스 응답으로부터 추출할 수 있으며 이는 몸통의 공명 특성을 대체할 공명기(resonator)의 파라미터로 사용된다.

II. 가야금 모델

가야금 사운드의 음색을 위해서는 가야금의 구조적인 특징과 현의 재질, 연주 방법이 가야금 모델에 반영되어야 한다. 본 논문에서는 가야금의 구조적 특징 묘사를 위해 몸통의 임펄스 응답을 이용하였으며, 가야금의 현이 만드는 배음의 감쇠 특성을 위해 1-pole 디지털 필터를 사용하였다. 또한 가야금의 뜯는 연주법을 위해 KS알고리즘의 개선된 형태를 사용하였다.

2.1 가야금

가야금은 12줄의 명주 현이 몸통 전체에 걸쳐 놓여있고 안죽이 현을 각각 받치고 있는 형상의 악기이다. 가야금은 범금이라고도 하는 풍류가야금과 산조가야금으로 나뉜다(그림 1). 이 두 종류의 가야금은 각각 다른 장르의 음악에 사용되었는데, 풍류가야금은 궁중음악에, 산조가야금은 민속악에 주로 사용되었다. 산조가야금은 크기와 구조면에서 풍류가야금과 차이가 있다. 풍류가야금은 산조가야금보다 약간 더 크고 뒤판이 파인 오동나무를 몸통으로 쓴다. 산조가야금은 오동나무에 밤나무를 덧대어 몸통을 만든다.

가야금은 그림 2와 같이 3개의 블록으로 나뉜다. 가야금의 소리 발생원은 현이다. 현을 손가락으로 뜯으면 현의

진동은 브리지(bridge)인 안죽을 통해 몸통으로 전달되고 소리가 발생된다. 먼저 현에 대해서 살펴본다.

2.2 현

진동하는 현의 파동 방정식의 일반해는 서로 반대 방향으로 이동하는 두 개의 독립적인 횡파로 구성된다[8]. 도파관 모델에서는 이 진행파를 정확하게 묘사할 수 있는데, 무손실의 경우, 진행파는 현으로 묘사된 자연라인만으로 묘사가 가능하다[9].

자연라인의 길이는 출력 신호의 기본 주파수를 결정하며,

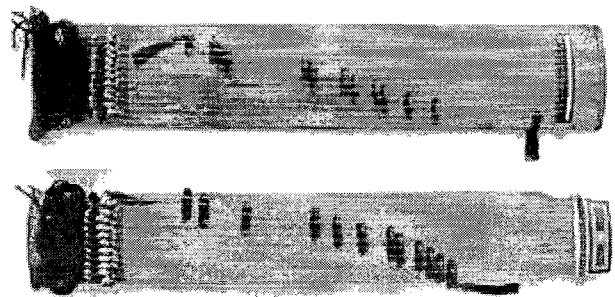


그림 1. 풍류가야금(위)과 산조가야금(아래).
Fig. 1. Pungyu gayageum(upper) and sanjo gayageum(lower).

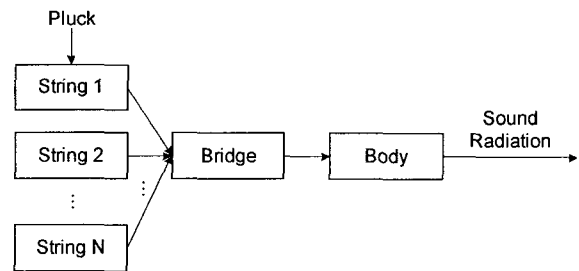


그림 2. 가야금의 블록다이어그램.
Fig. 2. Block diagram of gayageum.

식(1)로 계산할 수 있다.

$$L = \frac{f_s}{f_0} \quad (1)$$

자연라인 길이의 소수점 이하를 다루는 미소지연 필터로(fractional delay filter)는 라그랑주 보간기(Lagrange interpolator)를 사용하였으며 필터 계수는 식(2)로 계산된다[10].

$$h(n) = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq n}}^N \frac{D-k}{n-k}, \quad n=0, 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

여기서 N 은 FIR필터의 차수이고, D 는 원하는 지연이다. 실제 현은 산란하는 파동의 전파로 인한 주파수 의존

감쇠를 갖는다. 이러한 현상을 묘사하기위해 1차 all-pole 루프필터(loop filter)를 사용하였다.

$$H_l(z) = \frac{g(1+a_1)}{1+a_1z^{-1}} \quad (3)$$

여기서, g 는 0Hz에서의 필터 이득을, a_1 은 필터의 차단

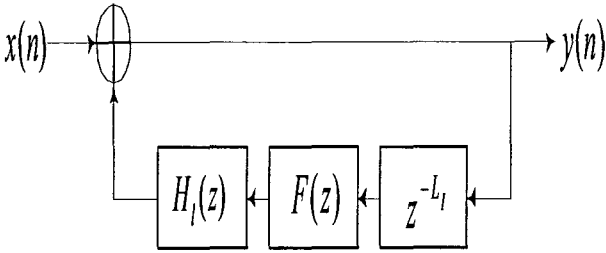


그림 3. 현의 모델 $S(z)$ 의 블록다이어그램.

$F(z)$ -미소지연필터; $H_l(z)$ -루프필터.

Fig. 3. Block diagram of string model, $S(z)$.

$F(z)$ -fractional delay filter; $H_l(z)$ -loop filter.

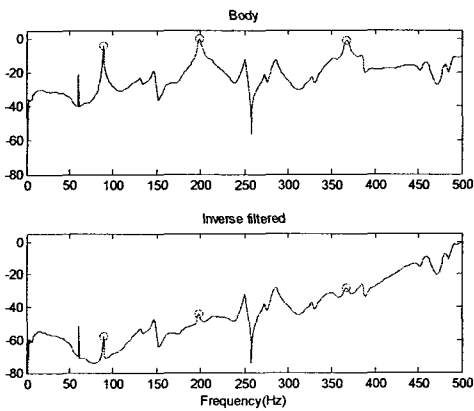


그림 61. 몸통의 임펄스 응답에서 공명 주파수를 제거하기 전(상)과 후(하)의 크기 응답.

Fig. 4. Amplitude response of gayageum body before(upper) and after(lower) removing the resonances.

주파수를 결정하는 계수이며, 시스템의 안정성을 위해 각각은 $-1 < a_1 < 0$ 과 $|g| \leq 1$ 의 범위를 갖는다[4]. 그림 3은 완성된 현의 모델, $S(z)$ 를 보여준다.

2.3 몸통

악기의 몸통은 악기의 음색을 결정하는 중요한 요소 중 하나이다. 그러나 몸통의 비선형적인 특징 때문에 많은 계산이 필요한 필터 기반의 몸통 모델 구현이 어렵다. 따라서 몸통의 임펄스 응답을 주로 사용한다. 몸통의 임펄스

응답은 몇 개의 고유한 공명 주파수를 갖는데, 몸통의 특징 중 필터로 구현할 수 있는 유일한 부분이다.

물리적 모델링을 위한 가야금의 몸통 구현은 몸통의 공명기를 구현하는 것으로 대체된다. 몸통의 공명기는 임펄스 응답에서 공명 주파수(resonance frequency)를 제거하기위한 노치(notch) 필터의 역 필터로 구현될 수 있다. 본 논문에서는 2차 IIR필터를 이용하였다.

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

여기서 a_1 과 a_2 는 필터 계수로서 공명 주파수에 의해 결정되고, r 은 대역폭과 관련된 파라미터로서 1에 가까운 값을 가진다[11]. 그림 4와 5는 노치 필터링 전과 후의 스펙트럼과 임펄스 응답을 보여준다.

몸통의 임펄스 응답은 녹음된 소리로부터 간접적으로 얻을 수 있다. 그림 6(a)의 가야금 모델을 고려해보자. 이 시스템의 출력신호 $y(n)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

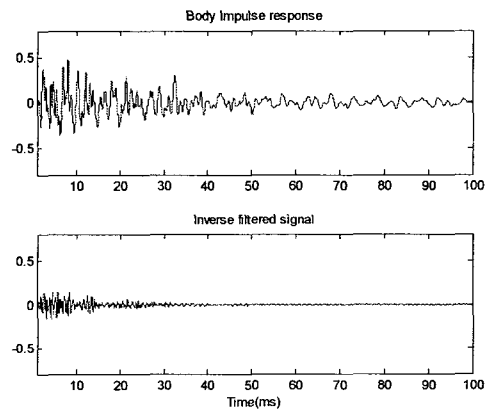


그림 62. 노치 필터링 전(상)과 후(하)의 가야금 몸통의 임펄스 응답.

Fig. 5. Impulse response of gayageum body before(upper) and after(lower) notch filtering.

$$y(n) = e(n) * s(n) * a(n) * b(n) \quad (5)$$

여기서, *은 컨볼루션을 의미하고 $e(n)$ 은 여기신호(excitation signal), $s(n)$, $a(n)$, $b(n)$ 은 각각 현과 안죽, 몸통의 임펄스 응답을 의미한다. 식(5)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$y(n) = x(n) * s(n) * a(n) \quad (6)$$

여기서 $x(n)$ 은 식(7)과 같이 정의한다.

$$x(n) = e(n) * b(n) \quad (7)$$

$x(n)$ 은 여기신호와 몸통의 임펄스 응답이 합쳐진 것이다. 만약 가야금 모델에서 안죽을 고정된 브리지라고 가정한다면, 현의 역 모델, $S^{-1}(z)$ 로 역 필터링(inverse filtering)하여 얻을 수 있다[4].

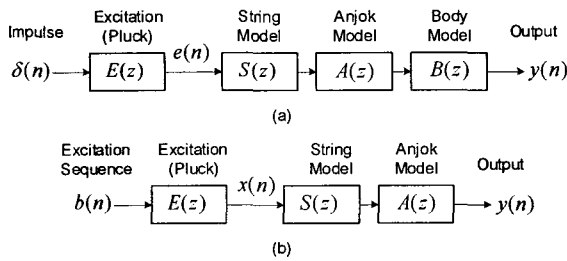


그림 63. (a)가야금 모델의 블록다이어그램. (b)간략화한 가야금 모델.

Fig. 6. (a)Block diagram of gayageum model.

(b)Simplified gayageum model obtained by commuting.

2.4 안죽

가야금의 안죽은 12개로 각각 현을 지지하고 있다.

안죽은 몸통 전체에 걸쳐있는 현을 이등분하여 실제진동

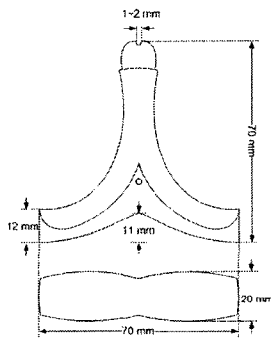


그림 64. 안죽.

Fig. 7. Anjuk.

하는 현의 길이를 조절함으로써 조율을 하고, 현의 진동을 몸통의 위판에 전달하는 역할도 한다. 따라서 안죽의 전달 특성은 가야금 소리의 주파수 특성에 영향을 준다. 본 논문에서는 그림 7의 안죽에 대하여 임펄스 해머 (impulse hammer)를 이용한 주파수 응답을 측정하였다.

실험에 사용된 해머는 ENDEVCO2302로서 8kHz까지 평탄한 크기 응답을 갖으며, 가속도계(accelerometer)는 DeltaTron Type4508로서 0.3Hz-8kHz의 크기응답(±10%)을 갖는다. 가야금의 기본 주파수가 100-500Hz의 범위를 갖고 제 5배음 정도를 고려한다면 최대 2.5kHz까지를 유효 대역이라고 할 수 있다. 안죽의 주파수 특성은 전체적으로는 저역통과필터(low pass filter)의 특성을, 기본 주파수 대역에서는 약 10dB/octave의 특성을 갖는 고역통과필터(high pass filter)의 특성을 보였다(그림 8). 이를 위해 본 논문에서는 15차 all-pole 필터로 안죽 필터를 구현하였다(그림9).

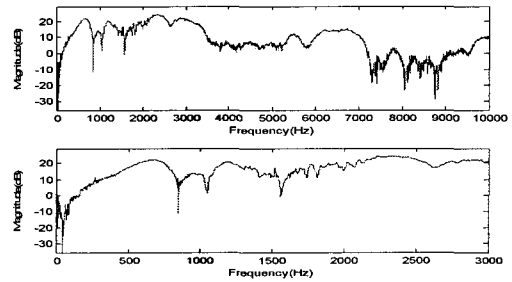


그림 65. 안죽의 크기 응답. 10kHz까지의 크기응답(상)과 3kHz까지의 크기응답(하).

Fig. 8. Amplitude response of Anjuk which is zoomed in 0Hz to 10kHz(upper) and 0Hz to 3kHz(lower).

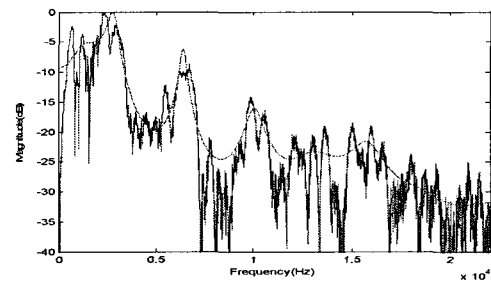


그림 66. 안죽 필터 추정.

Fig. 9. Estimation of Anjuk filter.

III. 가야금 사운드 합성

가야금의 사운드 합성을 위해 그림 6(b)의 간략화 된 모델을 사용하였다. 손가락과 현의 접촉면은 무시함으로써 $E(z)$ 를 생략하였고, 몸통의 임펄스 응답과 역 필터링의 잔여신호(residual signal)를 현의 모델의 입력으로 사용하였다. 역 필터링을 이용한 여기신호를 얻기 위해 현침으로부터 90cm떨어진 곳에 안죽을 위치시킨 5번현의 소리를 녹음하여 사용하였다(그림 10).

그림 11은 합성 결과를 보여준다. 합성된 신호의 감쇠가 녹음된 신호의 감쇠 보다 약간 빠르다. 이는 안죽의 크기 응답으로부터 추정된 안죽의 모델이 실제 모델을 정확히 추정하지 못하였기 때문으로 판단된다. 그림 12는 가야금의 2번, 5번, 8번, 11번의 각 현에 대해 안죽을 현침으로부터 30cm-90cm까지 10cm씩 옮겨가며, 각 위치에서 3번씩 녹음한 사운드 84개에 대해서 합성 사운드의 RMSE(root mean-square error)를 나타낸 것이다. RMSE 값의 대부분은 0.01-0.03의 아주 작은 값의 분포를 갖는다. 이는 Matlab 프로그램에서 웨이브 파일을 -1에서 1까지의 값으로 양자화 시켰다 하더라도 아주 작

은 값을 알 수 있다.

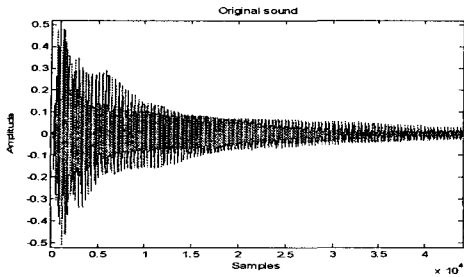


그림 10. 녹음된 가야금 사운드의 파형.(5번현, 기본주파수 124Hz)

Fig. 10. Waveform of recorded gayageum sound. (Fifth string, fundamental frequency 124Hz.)

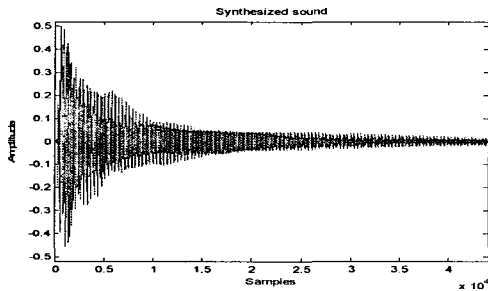


그림 11. 합성된 가야금 사운드의 파형(루프필터 파라미터: $g=0.9727$, $a_1=-0.4710$)

Fig. 11. Waveform of synthesized gayageum sound.(Loop filter parameters: $g=0.9727$, $a_1=-0.4710$)

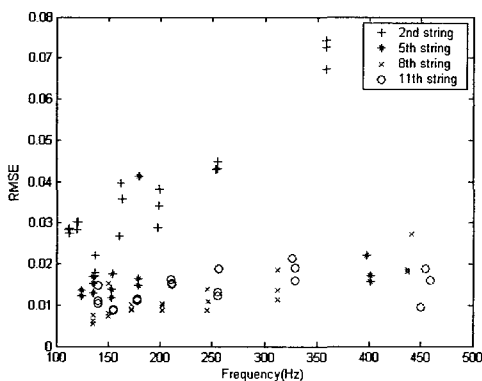


그림 12. 각 현의 합성신호에 대한 RMSE

Fig. 12. RMSEs of synthesized sounds

IV. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 가야금 사운드를 합성하기 위해 물리적 모델링을 이용하였다. 가야금은 현과 몸통 안죽의 모델로 나누어 각각 독립적으로 구현되었으며, 이들 시스템은 선형적이라고 가정하였다. 가야금의 현은 지연라인만으로 구현이 가능하였고, 몸통과 안죽은 각각 임펄스 응답으로부터 모델을 추정하였다. 가야금의 몸통은 3개의 공명기로 대체되었으며 안죽은 기본주파수 대역에 대하여 고역통과필터로 대체하였다. 합성된 사운드는 실제 사운드와 매우 유사한 파형을 갖고, 청각적으로도 매우 유사한 결과를 얻었지만 더욱 정확한 안죽의 모델 추정이 필요하였다. 따라서 향후 안죽 모델의 정확한 추정을 위한 연구와 가야금의 현과 손가락의 마찰이 끼치는 영향에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Curtis Roads, *The Computer Music Tutorial*, The MIT press, London (1996).
- [2] K. Karplus and A. Strong, "Digital Synthesis of Plucked String and Drum Timbres," *Computer Music Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 43-55 (1983).
- [3] 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), vol. 1, pp.229-232.
- [4] 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* vol 44, no. 5, pp. 331-353 (1996).
- [5] 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* vol 50, no. 5, pp. 351-362 (2002).
- [6] 유준희, "편경의 진동모드 분석", 한국음향학회, 제25권, 제3호, pp.121-128 (2006).
- [7] 조상진, 정의필, "산조 가야금의 물리적 모델링", 한국음향학회, 제23권, 제7호, pp.521-531 (2004).

- [8] N. H. Fletcher and T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, Springer, New York (1991).
- [9] J. O. Smith, "Physical Modeling using Digital Waveguides," *Computer Music Journal* vol. 16, no. 4, pp. 74-87 (1992).
- [10] 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* vol 13, pp. 30-60 (1996).
- [11] M. Karjalainen and J. O. Smith, "Body Modeling Techniques for String Instrument Synthesis," *ICMC proceedings*, pp.232-239 (1996).



조 상 진(Sang-jin Cho)

1997년 울산대학교 전자공학과 졸업
 2002년 울산대학교 전자공학과 졸업(공학 석사)
 현 재 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부(박사수료)



최 진 규(Gin-kyu Choi)

1983년 성균관대학교 전자공학과 졸업
 1990년 미국 Polytechnic University 전자 전기공학과(석사)

1994년 미국 Polytechnic University 전산과학과(석사)
 1996년 미국 Polytechnic University 전자전기공학과(박사)
 1983년 - 1986년 : LG 전자, Motorola Korea 연구원
 1996년 - 2004년 : 삼성전자 수석연구원
 2004년 - 현재 : 홍익대학교 전자전기공학과 조교수
 관심분야 : 차세대이동통신, 통신신호처리



정 의 필(Ui-pil Chong)

1978년 울산대학교 전기공학과 졸업
 1980년 고려대학교 전기공학과(석사)
 1985년 미국 Oregon State University (공학석사)

1996년 미국 Polytechnic University(공학박사)
 1997년 - 현재 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수
 관심분야 : 신호처리, 멀티미디어, 컴퓨터음향