

공간 기준 디지털 도파관 모델의 지연 특성과 합성음의 음질

Delay Characteristics and Sound Quality of Space Based Digital Waveguide Model

강 명 수*, 김 규 년*
(Myung-Soo Kang*, Kyoo-Nyun Kim*)

*울산대학교 컴퓨터 정보통신공학부

(접수일자: 2003년 7월 7일; 수정일자: 2003년 10월 6일; 채택일자: 2003년 10월 20일)

디지털 도파관 모델은 악기의 물리적 모델링에 사용되는 일반적인 방법이다. 디지털 도파관 모델에서 파동의 움직임은 시간 또는 공간을 기준으로 해석 가능하다. 음의 샘플링이 시간을 기준으로 이루어지므로 악기 모델은 시간에 의한 파동의 움직임으로 묘사되는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 현에 대한 공간 기준의 디지털 도파관 모델에 악기 몸체 모델을 추가해 악기 음을 합성하였다. 그렇게 함으로써 합성 음의 음질을 향상시키고 악기 모델의 음색 조절 변수들을 효과적으로 처리할 수 있었다. 공간 기준 샘플링에서 현 및 몸체에서 발생하는 미소 지연 오차에 대해 설명하고 FD (Fractional Delay) 필터를 이용해 미소 지연을 처리하는 방법을 보였다. 그리고 지연에 수에 따른 합성음의 변화를 설명하고 그 결과를 시간 기준 디지털 도파관 모델과 비교하였다.

핵심용어: 물리적 모델링, 공간기준 샘플링, 악기 몸체 모델링, 지연 에러, 미소지연, 디지털 도파관

주요분야: 음악음향 및 심리음향 분야 (8.6)

Digital waveguide model is a general method that is used in physical modeling of musical instruments. Wave motion is analyzed by time or by space in digital waveguide model. Because sampling is made via time, it is general that musical instrument model is described by wave motion of time. In this paper, we synthesized the musical instrument sound by adding instrument body model to the spatial based string model. In this way, we could improve sound quality and process musical instrument model's tone control variables effectively. We explained about delay error that happens in string and body in space based sampling and showed method to process fractional delay using FD (Fractional Delay) filter. Finally, we explained the relation between tone quality and number of delays. And we also compared the result with time base digital waveguide model.

Keywords: Physical modeling, Spatial sampling, Body modeling, Delay error, Fractional delay filter, Digital waveguides

ASK subject classification: Musical acoustics and psychoacoustics (8.6)

1. 서론

악기의 물리적 모델링은 전자음악에 사용되는 악기 음 합성 방법의 하나이고 다른 음 합성 방법에 비해 실제 악기 음에 가까운 합성 음을 만들어 내고 음색을 표현하는 여러 가지 특성 값들을 적용시킬 수 있는 장점이 있다. 이것은 악기의 물리적 모델링 방법이 실제 악기의 구조 및 동작 방법을 그대로 묘사하는 가상 악기 모델을 이용해 음을 합성 하기 때문이다. 현재 악기의 물리적 모델링

방법에서 기본으로 사용되는 디지털 도파관 모델은 현악기, 관악기, 타악기 등 모든 종류의 악기에 적용할 수 있다. 디지털 도파관 모델에서는 악기내부에서 이동하는 파동을 묘사할 수 있으며 각 샘플링 시점마다 파동의 크기 및 모양을 추적해 악기 음을 합성한다. 일반적으로는 시간 기준의 디지털 도파관 모델이 사용되고, 이 모델에서 각 샘플들은 샘플링 시간 간격을 기준으로 만들어진다[1].

본 논문에서는 공간 기준의 디지털 도파관 모델[2]에서 고려해야 하는 1보다 작은 미소 지연의 문제점을 해결하기 위해 FD (Fractional Delay) 필터[5]를 적용시키고 이것이 음질에 미치는 영향을 연구하였다. 그리고 지연

책임저자: 강명수 (Myung-Soo Kang)
680-749 울산광역시 남구 무거2동 산29
울산대학교 컴퓨터 정보통신공학부
(전화: 052-259-2217; 팩스: 052-259-1687)

의 수를 변화시키면서 악기음색의 변화를 관찰하였다. 이를 위하여 스틸 기타 (steel guitar)에 대한 디지털 도파관 모델을 사용하였다.

II. 현악기에 대한 공간 기준 도파관 모델 (Digital Waveguides Model)

2.1. 현 모델

디지털 도파관 모델은 파동 방정식에 대한 D'Alembert's solution에서 유도된다. 일반적으로 디지털 도파관 모델에 적용되는 시간 기준 현 모델은 식 (1)로 표현된다[1].

$$y(t_n, x_m) = y^+(n-m) + y^-(n+m) \quad (1)$$

식 (1)에서 n, m은 각각 시간, 공간상의 인덱스를 의미한다. 그리고 y^+ 는 오른쪽으로 움직이는 파동을, y^- 는 왼쪽으로 움직이는 파동을 나타낸다. 즉, $y^+(n-m)$ 은 특정 시간의 신호 $y^+(m)$ 에 대해서 m만큼 지연된 신호를 나타낸다. 식 (1)이 시간 기준 모델이므로 공간상에서의 파동의 움직임은 시간에 의해 해석되고 현 모델에 충분히 반영되지 않는다[2].

공간 변수를 기준으로 한 디지털 도파관 모델에서 디지털 도파관의 각 지연은 현에서의 물리적 거리를 나타낸다. 공간 변수의 샘플링 간격을 나타내는 상수를 X, 샘플링 시간 간격을 τ 라고 했을 때 다음의 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned} X &= k\tau \\ \tau &= X/k \end{aligned} \quad (2)$$

이때 k는 공간상의 특정 거리 X를 이동하는데 걸리는

시간과 샘플링 주기 T의 비율을 나타내는 변수이고 샘플링 시간 τ 는 X, k에 의해 결정된다.

식 (2)를 파동 방정식의 해에 적용해 식 (3)의 공간기준 모델을 유도할 수 있다.

$$y(x_m, t_{nk/c}) = y^+(m-n) + y^-(m+n) \quad (3)$$

단, c는 파동의 속도, m, n은 0보다 큰 정수

식 (3)의 공간 기준 현 모델은 그림 1로 나타낼 수 있다.

식 (3)에서 파동의 움직임은 공간 인덱스 m을 기준으로 묘사되므로 시간 인덱스 n이 변한다는 것은 시간의 변화에 따라 공간상에서 파동이 움직인다는 것을 의미한다. 하지만 식 (3)의 공간 기준 현 모델은 샘플링 시점을 정확히 표현하는데 어려움이 있다. 예를 들어 $y^+(m-n)$ 은 공간상의 특정 위치 m에서 n만큼의 지연이 발생했음을 의미하는데 이때 nk/c 의 시간이 소요된다. 그러나 샘플링 시점은 샘플링 간격 T의 배수이어야 하는데 nk/c 는 T의 배수가 된다는 보장이 없다. nk/c 가 T의 배수가 아닐 때 nk/c 에 가장 가까운 T배수와와의 차이만큼의 미소 지연이 발생하고 이를 보상해 주어야 한다.

어떤 순간의 현의 특정 위치에서 nk/c 보다 작으면서 nk/c 에 가장 가까운 T의 배수를 αT 라고 했을 때 미소 지연 값 δ 는 식 (4)에 의해서 구해진다. 단, α 는 정수이다.

$$\delta = \frac{nk}{c} - \alpha T \quad (4)$$

$X=cT$ 및 $X=k\tau$ 를 위 식에 적용시키면 식 (5)가 얻어진다.

$$\delta = \left(\frac{n}{\tau} - \alpha \right) T \quad (5)$$

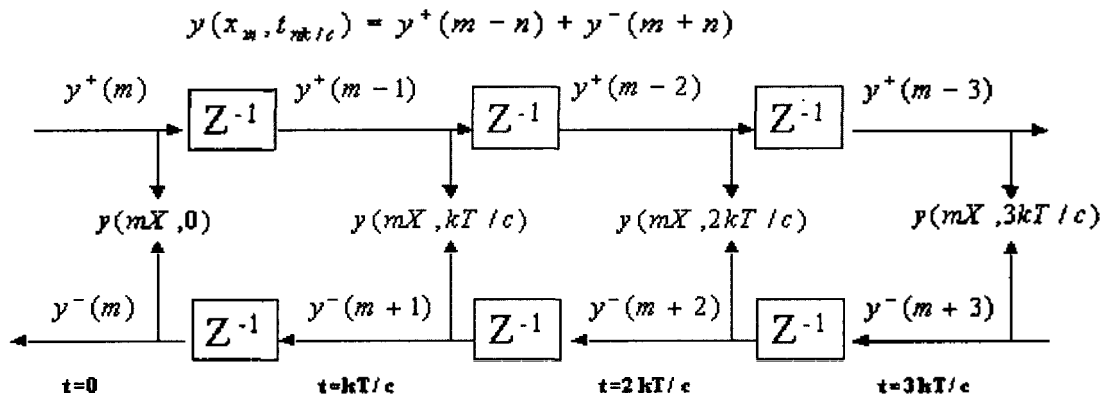


그림 1. 공간 변수를 기준으로 하는 현의 디지털 도파관 모델
Fig. 1. Digital waveguide of string from spatial variable.

식 (5)에서 τ 는 지연의 수와 샘플링 주기에 의해 결정되는 상수이고, a 는 n 의 값에 의해 결정된다. 또 T 가 상수이므로 δ 값은 n 에 의해 결정된다. 즉, δ 값은 $\frac{\pi}{\tau}$ 의 소수부의 값과 같다.

2.2. 몸체 모델

악기의 몸체 모델링에 대한 기본적인 아이디어는 악기 몸체의 임펄스 응답과 비슷한 디지털 필터를 이용하는 것이다. 현 모델에서 생성된 신호는 악기 몸체의 임펄스 응답과 유사한 주파수 특성을 가지는 필터를 거침으로서 악기 몸체의 공명이 합성 음에 첨가된다[3]. 이 방법은 정확한 주파수 반응을 묘사하기 위해 높은 필터 차수가 필요하기 때문에 실시간 음 합성이 어렵다. 그래서 현에 대한 입력 신호에 악기의 몸체 모델을 포함시킴으로써 실시간 음 합성이 가능하도록 하는 방법[4]을 사용한다.

시간 기준의 도파관 모델에서 악기 몸체는 임펄스 응답을 묘사하는 디지털 필터로 구현되므로 시간 영역의 지연과 무관하다. 그러므로 악기의 몸체 모델은 시간 기준 도파관 모델에서와 같은 방법을 사용할 수 있다. 본 논문에서 사용하는 기타의 악기 모델은 식 (6)처럼 나타내어지며 이 식은 출력신호 $y(n)$ 이 $x(n)$ 과 $h(n)$ 과 $f(n)$ 의 콘볼루션(convolution) 연산에 의해 구해질 수 있음을 보여준다.

$$y(n) = x(n) * h(n) * f(n) \quad (6)$$

그림 2는 식 (6)에 대한 블록도이다. 그림에서 $x(n)$ 은 $x(n)=e(n)*b(n)$ 으로 표현되는 입력신호이다. 이때 $e(n)$ 은 현의 튕김을 표현하는 excitation 필터이고 $b(n)$ 은 악기 몸체에 대한 임펄스 응답을 나타내는 필터이다. $f(n)$ 은 미소지연을 나타내는 FD 필터이고 $h(n)$ 은 앞에서 설명한 현 모델이다.

2.3. 구현 방법

기타의 악기 음 합성 모델을 구현하기 위해서 그림 2의 각 요소들에 대해서 알고 있어야 한다. 그림 2에서 “string loop”로 설명된 $h(n)$ 은 그림 1에서 제시한 “현의 공간기준 디지털 도파관 모델[2]”을 사용하였다. 그리고 “FD

filter” $f(n)$ 은 2차 Lagrange 내삽을 적용한 디지털 필터이며 “3.2 미소지연의 보상”의 식 (7)로 표현된다.

그림 2의 입력 신호 $x(n)$ 은 현의 튕김과 악기 몸체의 임펄스 응답을 포함하는 신호이다. 그런데 사람이 악기에 가하는 현의 튕김 및 악기의 몸체의 임펄스 응답을 정확한 데이터로 표현하는 것은 쉬운 작업이 아니다. 그리고 이러한 두 가지 신호에 대해 분리해서 처리하는 것은 합성모델에서의 처리 시간에 대한 효율성에도 악영향을 미친다. 그렇기 때문에 녹음된 악기 음으로부터 입력 신호 $x(n)$ 얻어내는 방법을 사용하는 것이 일반적이다. $x(n)$ 은 녹음된 악기 음에 대해 “string loop” $h(n)$ 의 역변환 필터를 적용하여 얻을 수 있으며 $h(n)$ 의 역변환 필터를 Z 영역으로 표현하면 식 (7)과 같다[4].

$$H^{-1}(z) = \frac{1 + az^{-1} - g(1+a)z^{-L}F(z)}{1 + az^{-1}} \quad (7)$$

식 (7)에서 L 은 현 모델에서 지연의 수를 나타내는 정수이며, 변수 a, g 에 대해 $a = -0.01, g = 0.99$ 를 사용하였다.

III. 미소지연

3.1. 미소 지연이 음질에 미치는 영향

그림 3은 녹음된 기타 음에 대한 주파수 스펙트럼이다. 녹음시 스틸 기타를 사용했다. 기타의 몸통을 구성하는 목재와 현 특성에 따라 기타 음의 주파수 특성은 달라지지만 그림에서 보는 것처럼 실제 기타 음은 음의 높이에 대한 배음들이 주요 주파수 성분을 이루는 특성이 있다.

그림 4는 미소 지연에 대해 처리하지 않았을 경우 합성음의 주파수 스펙트럼이다. 미소지연을 고려하지 않은 합성음은 그림 2에서 보는 것처럼 거의 모든 주파수 영역에서 잡음이 섞여 있는 것을 알 수 있다. 특히 고음역의 잡음(그림 4의 A영역)은 사람이 청취했을 때 구별할 수 있을 정도로 많은 양이다.

3.2. 미소 지연의 보상

식 (5)에서 미소 지연 값 δ 는 $\frac{\pi}{\tau}$ 에 의해 결정되며

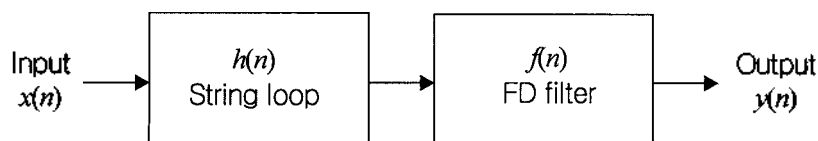


그림 2. 기타 음 합성 모델
Fig. 2. Sound synthesis model of guitar.

$0 < \delta < 1$ 의 조건을 만족한다. 미소 지연 δ 가 발행한 후의 샘플 값을 구하기 위해서는 출력 신호 $y(n)$ 에서 $y(n - \delta)$ 신호를 복원해 내야 한다. 주파수 대역이 제한된 디지털 신호에 대해서 sinc 함수에 의한 전대역통과 (allpass) 필터를 이용해 완벽하게 복원할 수 있다. 하지만 신호 복원의 시간적인 측면을 고려하여 필터의 차수를 적당하게 조절해야 한다.

본 논문에서는 음 합성 과정에서 발생하는 미소 지연은 Lagrange 내삽 (interpolation) 기법을 이용하는 FD 필터를 이용해 처리하였다. 음 합성시 지연의 수와 합성음의 주파수가 고정되었더라도 각각의 샘플들은 서로 다른 양

의 미소지연 값 δ 를 요구하므로 FD 필터는 시간에 따른 지연 변수의 변화를 수용할 수 있는 시변 (time-varying) 시스템이어야 한다. 식 (8)은 본 논문에서 사용한 2차 Lagrange 내삽을 나타내는 수식이며 그림 2의 "FD filter"에 해당한다.

$$y(n - \delta) = \sum_{k=0}^2 h(k)x(n - k)$$

$$h(0) = \frac{(\delta - 1)(\delta - 2)}{2}, \quad h(1) = -\delta(\delta - 2), \quad h(2) = \frac{\delta(\delta - 1)}{2} \quad (8)$$

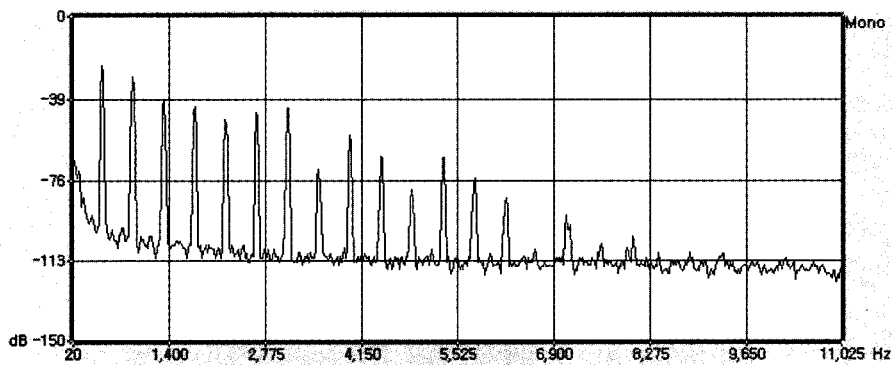


그림 3. 녹음된 기타 음 - A4
Fig. 3. Recorded guitar sound - A4.

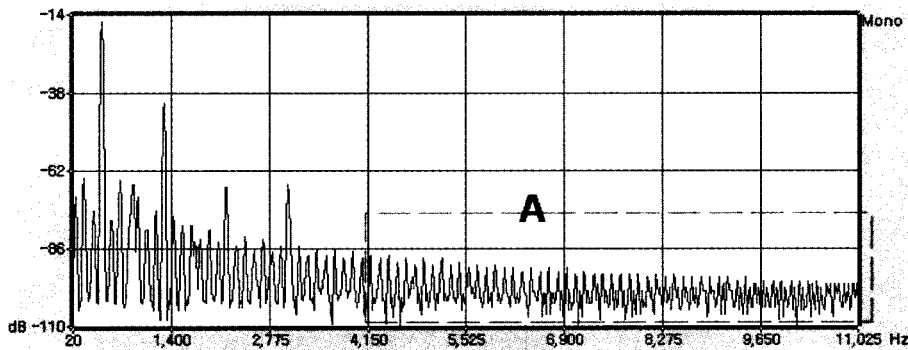


그림 4. 기타 합성 음 - A4
Fig. 4. Synthesized guitar sound - A4.

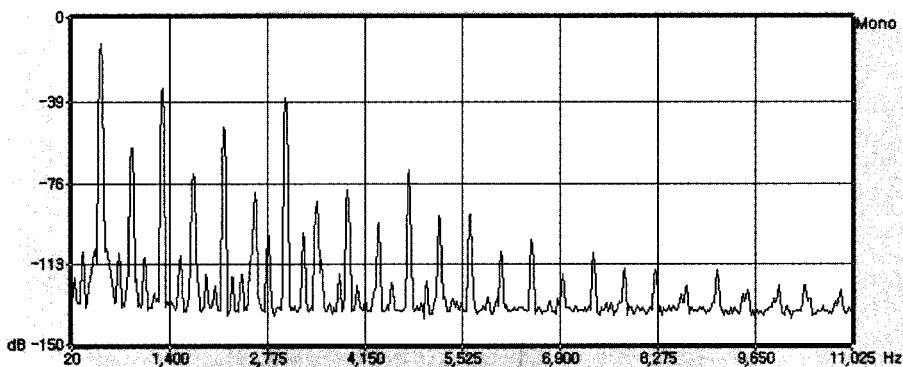


그림 5. FD 필터에 의한 미소 지연 보상
Fig. 5. Fractional delay compensation by FD filter.

식 (8)에서 미소지연 δ 값은 식 (5)에 의해 구해지며 각각의 샘플마다 다른 값을 가진다.

그림 5는 FD 필터에 의해 미소 지연이 보상된 후의 합성음에 대한 주파수 스펙트럼이다. 앞의 그림 4에 비해 잡음이 감소했음을 알 수 있다.

IV. 지연의 수와 합성 음의 음질

4.1. 지연의 수와 합성음

공간 기준의 디지털 도파관 모델에서 각 지연들은 특정 단위의 물리적 거리를 의미한다. 예를 들어 기타 현의 길이를 64 cm로 가정하고 지연의 수를 100개로 했을 때 각 지연은 공간상에서 0.64 cm에 해당하므로 하나의 지연이 발행했다는 것은 파동이 현을 따라 0.64 cm만큼 이동함을 의미한다. 공간 기준 디지털 도파관 모델에서는 지연의 수를 변경하지 않고 파동의 속도를 변화시켜 주파수가

다른 음들을 합성할 수 있다. 실험 결과 지연의 수는 음색과 밀접한 연관성을 가진다는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 지연의 수에 따른 음색 및 음질의 변화를 측정하고 각각의 음을 합성할 때 음 높이에 적합한 지연의 개수를 사용하는 것이 바람직하다.

그림 6은 악기 모델에서 다른 모든 조건들을 동일하게 한 후 지연의 수만을 변화시키면서 합성한 880 Hz 기타 음의 주파수 스펙트럼이다. 지연의 수가 적을 때는 둔탁한 소리를 내고 수가 많아질수록 맑은 금속성 음으로 변한다. 현이 굵어지면 다른 현들에 비해 현에 걸려있는 장력이 작다. 그렇기 때문에 현이 굵어지면 현에서의 파동의 속도가 늦어지고 고음을 연주하기 위해서 현의 중간을 눌러줘 현의 길이를 짧게 해줘야 한다. 그러므로 지연의 수가 적을 때의 둔탁한 소리는 굵은 현을 짧게 잡아 연주했을 때라고 해석할 수 있고 금속성이 많이 혼합된 음은 팽팽하게 당겨진 가는 현을 튕기는 것이라고 해석할 수 있다. 즉 지연의 수는 현의 특성을 표현하는 변수 중의

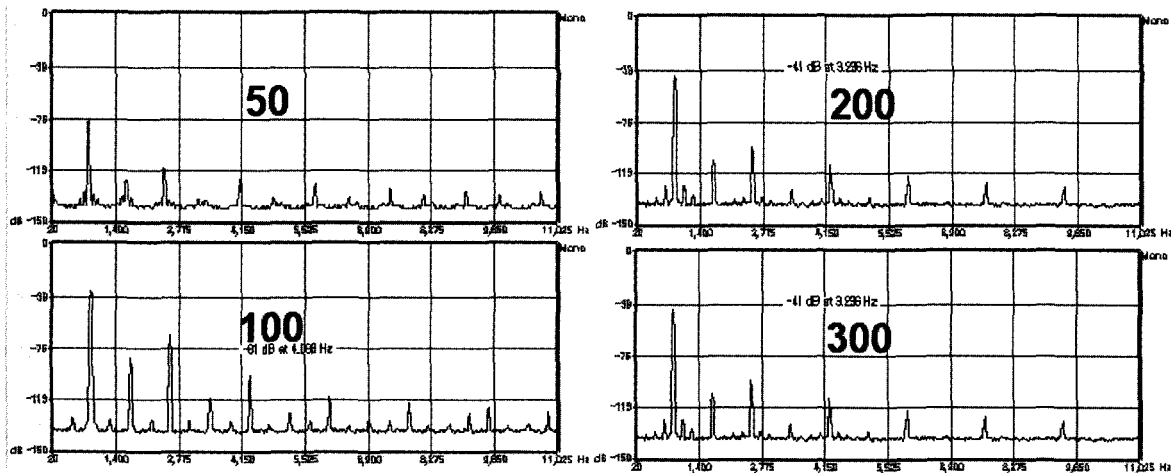


그림 6. 지연의 수에 따른 음색의 변화 (주파수 영역)
Fig. 6. Number of delay and tone color (frequency domain).

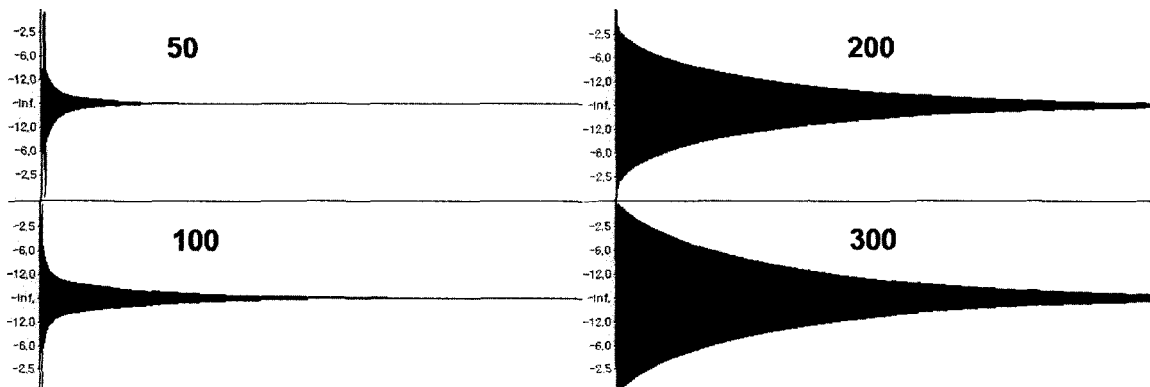


그림 7. 지연의 수에 따른 음색의 변화 (시간 영역)
Fig. 7. Number of delay and tone color (time domain).

표 1. 공간 기준 모델과 시간 기준 모델의 비교
Table 1. Space Based Model vs. Time Based Model.

| | Time Based Model | Space Based Model |
|------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Number of Delay | Depend on Frequency | Fixed |
| Wave Speed | Always 1 | Depend on Frequency |
| Fractional Delay | Fixed | Varying |
| String Characteristic | X | O |
| Extra Computation Time | For Tone Control Filter | For FD Filter |
| Vibrato | Δ (By Effect Filter) | By Wave Speed |
| Portamento | X | By Wave Speed |

하나라고 할 수 있다. 현의 길이가 길면 현에서 신호의 감쇄가 많아지므로 지연의 수에 따라 현 양 끝 반사 필터의 감쇄특성을 조절해 주어야 한다.

그림 7은 그림 6과 같은 조건의 합성음을 시간 영역으로 표시한 것이다. 지연의 수가 적어지면 음의 감쇄 속도가 빠른 것도 실제 악기 연주시의 특성과 같다고 할 수 있다. 시간 기준 디지털 도파관 모델에서 합성음에 따른 음의 감쇄 특성을 표현하는 필터를 따로 구현해 주어야 하는데 반해 공간 기준 모델에서는 음의 감쇄 특성이 지연의 수에 의해 자동으로 묘사되고 합성음도 자연스러운 결과를 보였다. 그림 6과 그림 7의 합성음은 지연의 수를 각각 50, 100, 200, 300으로 준 경우이다. 실험 결과 지연의 수에 따른 음색의 변화도 로그 스케일에 따른다는 사실이 관찰되었다.

4.2. 미소지연과 합성음

공간기준 도파관 모델에서 미소지연이 발생하는 단점은 그에 상응하는 장점에 의해 감수할 수 있다. 첫 번째는 이미 설명한 현의 특성 표현이다. 지연의 수를 늘리거나 줄임으로 해서 현의 굽기, 장력 등을 표현할 수 있다. 두 번째는 파동의 속도를 이용해 합성음에 효과를 줄 수 있다는 것이다. 예를 들어 파동의 속도를 특정 값까지 지속적으로 증가시키거나 감소시켜 연음을 합성하거나 약간의 떨림을 주어 비브라토 효과를 만들어 낼 수도 있다. 시간 기준 모델에서는 비브라토 효과를 내기 위해 특별한 사면 필터가 필요하지만 공간기준 모델에서는 단지 파동의 속도만 변경시켜주면 된다. 그리고 연음의 합성은 시간 기준 모델에서는 불가능하다. 표 1은 두 가지 모델간의 특징을 비교한 것이다. 시간 기준 모델과 공간 기준 모델 사이에는 표 1에서 비교한 것 이외의 다른 차이점이 있을 수 있다. 그런 차이점들은 공간 기준 디지털 도파관 모델을 기타 이외의 다른 악기의 물리적 모델링에 적용 시켜 봄으로써 발견될 것이다.

V. 결론

음 합성에 있어 공간기준 디지털 도파관 모델은 시간 기준 모델과 달리 특정 단위의 거리를 하나의 지연으로 표현하는 것이다. 공간기준 모델에서 발생하는 미소 지연은 잡음을 발생시키는 원인이다. 본 논문에서는 미소 지연의 문제를 해결하기 위해서 사면 2차 FD 필터를 적용하였다. 음 합성 모델에서 지연의 수는 현의 특성 값을 나타내므로 음색과 밀접한 연관성을 가진다. 공간기준 악기 모델에 필요한 FD 필터는 모델의 복잡도를 높여 더 많은 계산 시간을 필요하도록 한다. 하지만 음의 감쇄에 대한 별도의 처리 없이 자연스럽게 묘사할 수 있으므로 전체적인 면에서의 복잡도가 증가하는 것은 아니다.

공간기준 모델의 가장 큰 장점은 파동의 속도를 별도의 변수로 사용 가능하다는 것이다. 현의 다른 특성을 그대로 두고 현의 장력에 따른 속도 변화를 줌으로서 한 음에서 다른 음으로 부드럽게 옮겨가는 연음의 구현의 가능하고 차후 이에 대한 연구가 이루어질 것이다. 그리고 공간 기준 모델을 다른 악기에 적용시켜 보고 관악기나 타악기에서 발생하는 현상들을 연구할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2000-000-00283-0) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

1. J. O. Smith, "Physical modeling using digital waveguides," *Computer Music Journal*, 16 (4), 74-91, 1992.
2. 강명수, 김규년, "고정된 공간 축 샘플링 간격을 적용한 울는 현

악기의 현에 관한 물리적 모델링,” 한국음향학회지, 20 (1), 3-12, 2001.

3. M. Karjalainen, and J. O. Smith, “Body modeling techniques for string instrument synthesis,” *Proc. ICMC*, 232-239, 1996.

4. V. Valimaki, J. Huopaniemi, M. Karjalainen, and Z. Janosy, “Physical modeling of plucked string instruments with application to real-time sound synthesis,” *98th AES Convention*, Preprint 3956, 1996.

5. V. Valimaki, T. Tolonen, and M. Karjalainen, “Signal-dependent nonlinearities for physical models using time-varying fractional delay filters,” *Proc. International Computer Music Conference*, 264-267, 1998.

저자 약력

• 강 명 수 (Myung-Soo Kang)



1997년: 울산대학교 전자계산학과 졸업 (학사)
 2000년: 울산대학교 전자계산학과 대학원 졸업 (석사)
 2000년~현재: 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부 박사 과정
 ※ 주관심분야: 컴퓨터 음악, 멀티미디어

• 김 규 년 (Kyo-Nyun Kim)



1983년: 서울대학교 계산통계학과 졸업 (학사)
 1985년: 서울대학교 대학원 계산통계학과 졸업 (석사)
 1992년: 서울대학교 대학원 계산통계학과 졸업 (박사)
 1986년~현재: 울산대학교 전임강사, 교수
 1995년: 톨스크 공과대학 (러시아) 교환 연구원
 1996년~1997년: 노보시비르스크 공과대학 (러시아) 방문 연구원
 ※ 주관심분야: 소프트웨어공학, 컴퓨터 음악