

Physical 모델을 이용한 단소 음 합성¹⁾

성덕현⁰ 김규년
울 산 대 학 교 컴퓨터 정보통신 공학과
raivalor@yahoo.co.kr knkim@uou.ulsan.ac.kr

Synthesizing the 'Dan-So' sound using the Physical Model

Duk-Hyun Seong⁰ Kyoo-Nyun Kim
School of Computer Engineering Information Technology, University of Ulsan

요 약

본 논문에서는 Physical Model을 이용해 단소의 음을 합성해 내는 방법에 대해 연구 하였다. 이러한 모델을 이용한다면 별도의 음원 데이터를 사용하지 않고도 일반적으로 사용되고 있는 table-lookup 방식보다 더 효율적으로 악기 음을 합성 할 수가 있다. 먼저 파동방정식을 이용하여 단소 내부 공기의 움직임을 나타내고 Physical Model을 제시 하였다. Physical Model을 구현하기 위해서 두개의 delay line이 사용 되었으며, 그 양쪽 끝에는 각각 파동의 reflectance를 모델링 하기 위해 Reflectance filter가, 입력 신호를 모델링 하기 위한 input function이 사용 되었다. 합성된 음을 평가 하기 위하여 실제 녹음된 음과 주파수 및 시간 도메인 상에서의 비교가 이루어 졌고 실제 악기와 유사한 음을 합성해 내었음을 확인 할 수 있었다.

1. 서론

우리주위에서 음악에 대한 비중은 날로 높아져가고 있고, 그에 따라 컴퓨터나 전자 기기를 이용해 어떻게 하면 더 효율적으로 실제 악기 원음과 비슷한 소리를 만들어 낼 수 있는가에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 이러한 연구들의 대부분은 서양 악기에 한정되어 있고, 우리 국악기에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 우리 국악기 중 단소 음을 Physical Model을 사용하여 합성해 내는 방법에 대하여 연구하였다.

일반적으로 악기의 소리를 만들어 내는 방법으로는 음원 모델을 이용해 사용자가 원하는 소리를 만들어 내는 'Table look-up' 방식과 실제 악기의 특성을 물리적으로 modeling해서 원하는 소리를 만들어 내는 'Physical Modeling' 방식이 있다. 일반적으로 'Table look-up' 방식을 이용한 기기가 많이 사용되고 있으나, 한정된 수의 음원 모델만을 이용해 새로운 음을 만들어 내기 때문에 실제 악기 소리를 왜곡시킬 수밖에 없다는 단점이 있다. 이에 반해 'Physical Modeling' 방식은 악기 자체의 움직임을 modeling 하기 때문에 'table-lookup' 방법에 의해 합성되는 음들보다 좀더 실제 악기 소리에 가까운 소리를 합성해낼 수 있다는 장점이 있다[6]. 물론 악기의 움직임을 modeling하기 위한 많은 계산이 필요하지만 컴퓨터

성능의 향상으로 인해 이러한 점은 앞으로 더욱더 개선 되어 나갈 것이다.

따라서 본 논문에서는 'Physical modeling'을 이용한 단소 음 합성에 대해 연구하였다. 2절에서는 단소의 구체적인 물리적 모델과 신호의 변형을 설명하고 3절에서는 연구 결과를, 4절에서는 결론과 앞으로의 연구방향을 제시 하였다.

2. 악기 모델

2.1 용체(pipe 내부)에서의 파동의 움직임
단소의 내부에서의 공기의 움직임을 모델링 하기 위해서, 단소를 한쪽만 open된 pipe라 가정할 수 있다. 그리고 관 내부에서의 공기의 파동을 x-축을 따라 이동하는 평면파라고 가정 한다면 파동 방정식을 통해 이를 모델링 할 수 있다. 공기의 압력(p), 속도(c), 시간(t), 위치(x)의 관계를 (식2-1)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \text{ -----(식2-1)}$$

(식2-1)을 다시 d' Alembert's traveling-wave solution을 통해 (식2-2)를 유도해 낼 수 있다.

$$p(t, x) = f(t - x/c) + g(t + x/c) \text{ ---(식2-2)}$$

이는 관 내부에서 좌우로 움직이는 공기의 파동을 나타낸다. 이를 디지털화 하기 위해서는 샘플링 시간 간격(T)와 샘플링 공간 간격(X)을 이용하면 된다. 즉 Sampling rate $f_s = 1/T$ 이고 공간상의 Sampling 간격 $X = cT$ 이다. 따라서 변수 t와 x는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x \rightarrow x_m = mX$$

$$t \rightarrow t_n = nT$$

따라서 x, t 대신 mX 와 nT 를 사용해 표현하면 (식2-2)는 (식2-3)과 같은 디지털 도메인의 식으로 표현할 수 있다.

$$p(t_n, x_m) = f(t_n - x_m/c) + g(t_n + x_m/c)$$

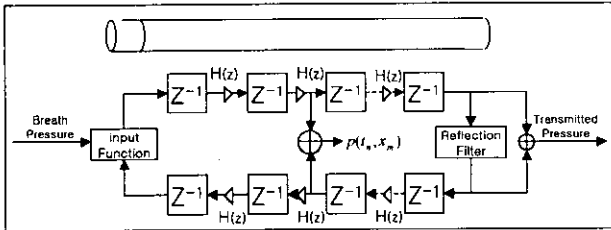
$$= f(nT - mX/c) + g(nT + mX/c)$$

$$= f[(n-m)T] + g[(n+m)T] \quad \text{---(식2-3)}$$

여기서 T는 샘플링 간격을 의미하는 고정된 값이고, 모든 변수에서 공통으로 사용 되므로 샘플링 수식에서 제거할 수 있다. $p^+ = f(nT), p^- = g(nT)$ 로 정의하여 +는 관을 따라 오른쪽으로 이동하는 파동이며, -는 관을 따라 왼쪽으로 이동 하는 파동이 된다. 다시 말해 (식2-3)은 (식2-4)와 같고, 양 방향으로 각각 m 샘플만큼 delay된 신호를 의미 한다.

$$p(t_n, x_m) = p^+(n-m) + p^-(n+m) \quad \text{---(식2-4)}$$

위 (식2-4)은 (그림 1)과 같이 구현할 수 있다.



[그림1] 관 약기의 Physical Model

(그림1)에서 위쪽 delay line은 오른쪽으로 이동하는 파동을 나타내며, 아래쪽 delay line은 왼쪽으로 이동하는 파동을 나타낸다. 위 delay line에서 한번의 신호 지연은 $X=ct$ 만큼의 거리만큼 신호가 이동 하는 것을 의미하며 각 신호 지연 마다 $H(z)$ 에 의해 신호 변형이 발생한다. 또한 양끝의 filter는 각각 취구에 입력되는 압력 값과, 주파수와 관련된 약기 내부에서의 파동의 반향을 모델링해 준다.

2.3 신호의 변형

불연속 적인 파이프 내부에서는 주파수에 종속적으로 소리의 파동에 대한 반향 계수가 결정 되게 되며 [1], 다음과 같은 과정을 거쳐 reflection filter가 유도 되어진다. 먼저 Helmholtz equation에 의해 (식2-5)가 유도되어질 수 있다.

| | |
|----------|----------------------------|
| ρ | 공기의 밀도 |
| c | 공기 중 소리의 속도 |
| Ω | Continuous-time의 frequency |
| j | $j = \sqrt{-1}$ |
| k | $k = \Omega/c$ |
| t | Continuous time variable |
| z | z-transform variable |
| S | 평면파의 면적 |
| Z_0 | Wave impedance |
| U | Volume velocity |

[표1] 모델에 사용되는 기호

$$p(x, t) = [Ae^{-jkx} + Be^{jkx}]e^{j\Omega t} \quad \text{---(식2-5)}$$

where A,B are complex amplitudes

또한 Newton's second law에 의해 pipe 속에서의 volume velocity를 나타내는 (식2-6)을 유도해 낼 수 있는데, 이는 (식2-7)과 같은 표현이다. [1]

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad \text{---(식2-6)}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\rho \partial U}{S \partial t} \quad \text{---(식2-7)}$$

그리고 (식2-5)와 (식2-7)을 통해 다음 식을 유도해 낼 수 있다.

$$U(x, t) = \left(\frac{S}{\rho c}\right) [Ae^{-jkx} + Be^{jkx}]e^{j\Omega t}$$

$$= \frac{1}{Z_0} [Ae^{-jkx} + Be^{jkx}]e^{j\Omega t} \quad \text{---(식2-8)}$$

where Z_0 are wave impedance

마지막으로 위 식들로부터 길이가 L인 tube의 reflectance R 를 구해낼 수 있고, 특정 주파수에 대한 reflectance $R(\Omega)$ (식2-9)를 유도할 수 있다.

$$R = \frac{B}{A} = e^{-2jkl} \left[\frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} \right]$$

$$R(\Omega) = e^{-2jkl} \left[\frac{Z_l(\Omega) - Z_0}{Z_l(\Omega) + Z_0} \right] \quad \text{---(식2-9)}$$

(그림1)에서 한 신호가 한번 지연될 때 마다 filter $H(z)$ 에 의해 신호가 변형 되게 된다. 여기서 $H(z)$ 는 주파수, 속도, 온도등에 따른 신호 변형을 의미하며, $H(z)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

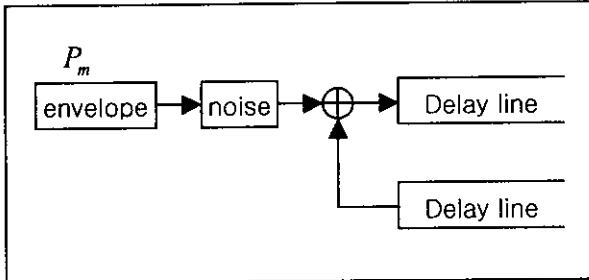
$$H(\Omega) = e^{-jkx} = e^{-\alpha T} e^{-j\Omega c T / v_p}$$

where v_p is phase velocity
and α is attenuation coefficient

위 식을 discret-time 영역으로 변환하면 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$H(z) = e^{-\alpha cT} z^{-c/v_p} \quad \text{---(식2-10)}$$

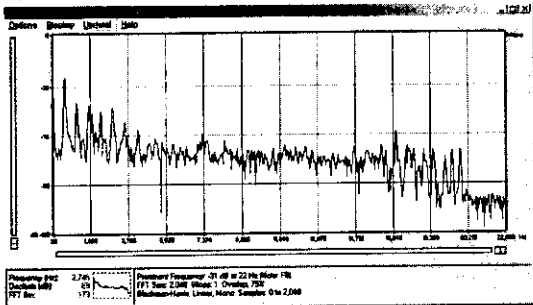
(그림1)의 input function은 delay line에 지속적으로 입력되어지는 입력 값을 생성하는 linear한 임의의 함수이며 (그림2)와 같이 나타낼 수 있다. (그림2)에서 Envelope는 breath pressure의 변화를 모델링 하며 noise에서는 랜덤한 값들을 생성해 breath pressure에 noise 성분을 합성하게 되고, 이 출력 값은 다시 delay line의 출력 값과 합성되어 delay line의 새로운 입력 값이 생성되게 된다.



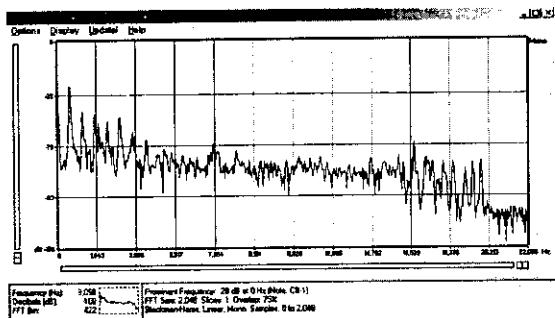
[그림 2] Input function

3. 합성 결과

(그림 3)은 본 논문에서 제시한 방법으로 합성한 C5 음의 주파수 분포이다. (그림 4)의 녹음된 음과 비교했을 때 거의 유사한 주파수 분포를 확인할 수 있었다.



[그림 3] 합성된 c5음



[그림4] 녹음된 c5음

4. 결론 및 향후 연구계획

본 논문에서는 단소 음 합성을 위한 Physical Modeling에 대해 연구 하였다. 단소의 내부에서의 공기의 파동을 modeling 하기 위해서 delay line을 사용 하였으며, delay line의 끝에는 파동의 reflectance를 모델링 하기위한 Reflectance filter가 사용 되었고, 다른 한쪽 끝은 입력신호를 발생하기 위한 input function이 사용 되었다.

본 논문에서는 단소 내부의 모든 움직임이 linear한 상태라고 가정하고 Physical Model을 구현하였다. 때문에 실제 악기를 modeling하기 위해서는 부족한 점이 있다. 앞으로의 연구에서는 단소 내부에서의 non-linear한 요소를 파악, 구현 하는 것에 대한 연구가 이루어 질것이다. 특히 입력 값을 생성해 내는 input function에 대한 non-linear한 성질에 대한 연구가 이루어 질것이다.

4. 참고 문헌

- [1] Gary Paul Scavone, " An Acoustic Analysis of Single Reed Woodwind Instruments with an Emphasis on design and Performance Issues and Digital Wave Modeling Techniques," 1997
- [2] Gary P. Scavone, " Modeling Wind Instrument Sound Radiation using Digital Waveguides"
- [3] J.O. Smith, " Physical Modeling Synthesis Update," 2000
- [4] J.O.Smith, " Physical Modeling Digital Waveguide," 1993
- [5] Gary P. Scavone, " Digital Waveguide Modeling of the Non-Linear Excitation of Single-Reed Woodwind Instruments," ICMC' 95, pp. 521-524
- [6] Donald E. Hall, " Musical Acoustics, Second edition," B/C Publishing Company, A Division of Wadworth, 1991
- [7] Vesa Valimaki, Matti Karjalainen, Zoltan Janosy and Unto K. Laine, " A real-time DSP implementation of a flute model"
- [8] Oppenheim, " Signals & Systems" Second edition, ' Prentice hall' 1997