

Physical Modeling 을 이용한 단소 음 합성

성덕현, 김규년
울산대학교 컴퓨터 정보통신공학부
e-mail : raivalor@yahoo.co.kr

Synthesizing the Dan-So sound using the Physical Modeling

Duk Hyun Seong, Kyoo Nyun Kim
School of Information and Communication Technology, University of Ulsan

요 약

본 논문에서는 Physical Modeling 을 이용해 단소의 음을 합성해 내는 방법에 대해 연구 하였다. 현재 관 악기의 음 합성 방법은, Julius O. Smith 가 제안한 digital waveguide 모델을 근간으로 하여 여러 악기들의 소리를 합성하는 방법에 대해 연구 되고 있다. 본 논문에서는 digital waveguide 모델을 사용하여 단소 관속의 움직임, two-port scattering model 을 이용한 관속과 음공 사이의 공기의 움직임에 대해 기술 하였고, reflection filter 를 사용하여 단소 끝부분에서의 신호의 변화에 대해 연구 하였으며, 끝으로 관 내벽과 공기의 마찰에 의한 신호 손실에 대한 연구를 기술 하였다.

위에서 언급한 내용들의 연구결과를 토대로 음을 합성한 결과 실제 단소의 소리와 유사한 소리를 얻어 낼 수 있었다.

1. 서론

최근 들어 거의 모든 음반작업에 있어 컴퓨터나 전자 악기의 비중은 무시할 수 없을 만큼 중요한 위치를 차지 하게 되었다. 이 때문에 컴퓨터나 전자악기에 대한 연구가 활발히 이루어 지고 있으며, 특히 실제 악기소리를 합성해 내는 방법에 연구가 활발히 이루어 지고 있는 실정이다.

하지만 기존의 음 합성에 대한 연구는 해외의 업체들에 의해 이루어 져 왔고 대부분 서양 악기에 대한 연구에 치중 되어 왔을 뿐, 국악기에 대한 연구는 그리 활발하게 이루어 지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 국악기중 단소의 음을 합성해 내는 방법에 대하여 연구 하였다.

음 합성 방법으로는 크게 Table look-up 방식과 physical modeling 방식으로 나눌 수 있다. 이 중 table look-up 방식은 음원의 sample 을 메모리에 저장해 두었다가 사용자가 이를 적절히 조작하여 원하는 음을 합성해 내는 방식으로, 장비 제작 비용에 비해 양질의 소리를 만들어낼 수 있기에 가장 일반적으로 사용되는 방식이다. 하지만 이 방식은 한정된 수의 음원 sample 만을 가지고 다양한 음을 출력해 내야 하기 때 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000283-0)지원으로 수행되었음

문에 원래 악기 소리를 왜곡시킬 수밖에 없다는 단점이 있다. 이에 반해 physical modeling 방식은 실제 악기의 물리적 움직임을 수학적으로 modeling 하기 때문에 table-lookup 방식에 비해 좀더 실제 악기 음에 가까운 음을 합성해 낼 수가 있다. 따라서 본 논문에서는 'Physical modeling' 을 이용한 단소 음 합성에 대하여 연구하였다.

2. 악기 모델

2.1 관 속에서의 파동의 움직임

단소의 내부에서의 공기의 움직임을 모델링 하기 위해서, 단소를 한쪽만 open 된 pipe 라 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 (식 2-1)으로 나타낼 수 있다.

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

(식 2-1)을 다시 d' Alembert' s traveling-wave

solution을 통해 (식 2-2)를 유도해 낼 수 있다.

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

이는 관 내부에서 좌우로 움직이는 공기의 파동을 나타낸다. 이를 디지털화 하기 위해서는 샘플링 시간 간격(T)와 샘플링 공간 간격(X)를 이용하면 된다. 즉 Sampling rate $f_s = 1/T$ 이고 공간상의 Sampling 간격 $X = cT$ 이다. 따라서 변수 t 와 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 표현 하면 (식 2-2)는 (식 2-3)과 같은 디지털 도메인의 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} p(t_n, x_m) &= f(t_n - x_m/c) + g(t_n + x_m/c) \\ &= f(nT - mX/c) + g(nT + mX/c) \\ &= f[(n-m)T] + g[(n+m)T] \quad \text{---(식 2-3)} \end{aligned}$$

여기서 T 는 샘플링 간격을 의미하는 고정된 값이고, 모든 변수에서 공통으로 사용 되므로 샘플링 수식에서 제거 할 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 (식 2-3)은 (식 2-4)와 같고, 양 방향으로 각각 m 샘플만큼 delay 된 신호를 의미 한다.

$$p(t_n, x_m) = p^+(n-m) + p^-(n+m) \quad \text{---(식 2-4)}$$

위 (식 2-4)은 (그림 1)과 같이 구현할 수 있다.

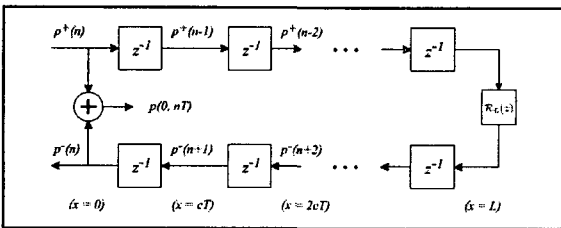


그림 1 관 속에서의 신호 이동

(그림 1)에서 위쪽 delay line 은 오른쪽으로 이동하는 파동을 나타내며, 아래쪽 delay line 은 왼쪽으로 이동하는 파동을 나타낸다. 위 delay line 에서 한번의 신호 지연은 $X=ct$ 만큼의 거리만큼 신호가 이동하는 것을 의미하며, 끝쪽의 filter 는 주파수와 관련된 약기 내부에서의 파동의 반향을 모델링 해 준다.

2.2 파동의 반향.

그림 2.1 에서와 같이 모든 관악기는 끝부분에서 파동의 반향이 발생한다. 이 반향으로 인해 파동의 방향이 바뀌게 된다. 이 때, 신호의 반향은 단지 신호의 방향만을 바꾸는 역할을 하는 것이 아니라 주파수에 종속적인 반향 값을 가지게 된다. 따라서 주파수에 종

속적으로 되 돌아가는 파동의 비율이 변하게 된다. Reflection filter 의 전달함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

관 내부에서의 파동의 움직임을 다음 (식 2.5) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(x, t) = [Ae^{-jkx} + Be^{jkx}]e^{j\Omega t} \quad \text{(식 2.5)}$$

그리고 뉴턴의 제 2 법칙을 사용하여 관 내부에서의 파동의 volume velocity(U)를 다음과 같은 (식 2.6)으로 나타낼 수 있다.

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

(식 2.6)

(식 2.6)에서 S는 관의 면적을, ρ 는 공기의 밀도를 나타낸다. 그리고 (식 2.5)와(식 2.6)에서 A 와 B 는 복소 amplitude 값을 의미 한다. 압력과 volume velocity 를 압력에 대한 volume velocity 의 비율로 나타낸 값을 wave impedance 라 하고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z = \frac{P}{U} = \frac{\rho l}{A} \quad \text{(식 2.7)}$$

(식 2.5)의 A 에 대한 B 의 비율에 의해 reflectance 값이 결정되고, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R(\Omega) = \frac{B}{A} = e^{-2jkL} \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} \quad \text{(식 2.8)}$$

(식 2.8)에서 Z_l, Z_0 은 각각 길이가 L인 관의 시작 부분과 끝 부분에서의 wave impedance 를 나타낸다.

2.3 음공의 모델링

음공이란 관악기의 옆면에 뚫려 있는 구멍을 의미하며 이 구멍의 막기 혹은 열기를 통해서 원하는 음을 낼 수 있다.

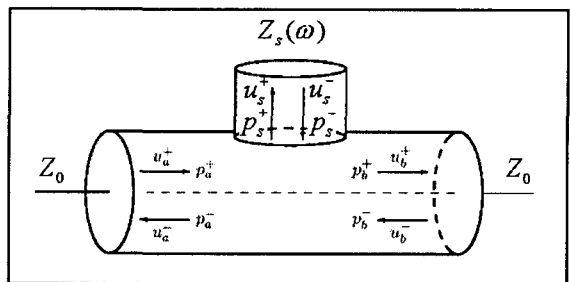


그림 2.2 음공에서의 신호 이동

음공에서 발생하는 wave impedance Z_s 에 대한

단순한 표현은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_s(\omega) = j\omega \frac{\rho l}{A_s} \quad (\text{식 2.9})$$

위 식에서 ρ 는 공기의 밀도를 나타내고, A_s 는 음공과 관이 교차하는 지점의 면적을 나타내며, l 은 음공의 높이를 나타낸다. 위 (식 2.12)를 디지털 도메인으로 다시 표현 하면 다음 (식 2.13)과 같이 된다.

$$Z_s(z) = \frac{\rho l}{A_s} H_D(z) \quad (\text{식 2.10})$$

위 식에서 $H_D(z)$ 는

$$H_D(z) = \frac{1}{T}(1-z^{-1}) \quad (\text{식 2.11})$$

이다

위 식을 이용해 (식 2.9)도 다음과 같이 디지털 도메인으로 나타낼 수 있다.

$$R(z) = -\frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_s(z)} \quad (\text{식 2.12})$$

그리고 (식 2.10)에 의해 (식 2.12)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R(z) = -\frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_s(z)} = -\frac{(\rho c/A_0)}{(\rho c/A_0) + (2\rho l/A_s)H_D(z)} \quad (\text{식 2.13})$$

다시 (식 2.13)은 다음 (식 2.14)과 같은 reflection filter 의 전달함수로 나타낼 수 있다.

$$R(z) = -\frac{1+a}{1+az^{-1}} \quad (\text{식 2.14})$$

위 (식 2.17)에서 filter coefficient a 는

$$a = -\frac{2A_0 l}{2A_0 l + A_s T c} \quad (\text{식 2.14})$$

로 정의 되어 진다.

2.4 Boundary Layer Effect

그림 2.1 에서는 신호의 변화를 delay line 을 통한 한번의 unit delay 만을 기술 하고 있다. 하지만 단소 내벽과 공기의 마찰이 발생하기 때

문에 실제의 모델링에서도 이를 적용해 주어야 한다. 여기서 'Boundary Layer Effect'란 단소 내벽과 공기의 마찰로 인해 발생하는 신호의 손실을 의미 한다. 따라서 그림 2.1 의 각 unit delay 대신 적절한 filter 를 적용하여 Boundary Layer Effect 를 신호 이동에 적용해 주어야 한다. Boundary Layer Effect 를 적용하기 위한 filter 의 전달 함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H(\Omega) = e^{-\alpha c T} e^{-j\Omega c T / v_p} \quad (\text{식 2.19})$$

이며 이를 다시 digital domain 으로 나타내면 다음과 같다.

$$H(Z) = e^{-\alpha c T} z^{-c/v_p} \quad (\text{식 2.20})$$

이를 적용해 그림 2.1 을 다시 그리면 다음과 같다.

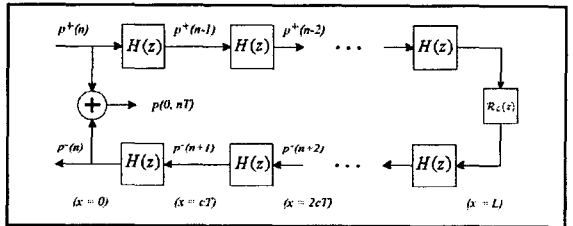


그림 2.3 신호 이동시 발생하는 손실을 적용한 모델

3. 합성결과

그림 3.1 은 본 논문에서 제시한 방법으로 합성한 C5 음의 주파수 분포이다. 그림 3.2 의 녹음된 음과 비교했을 때 거의 유사한 주파수 분포를 확인 할 수 있었다.

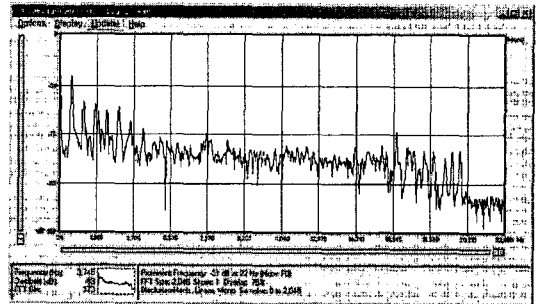


그림 3.1 합성된 음의 주파수 분포

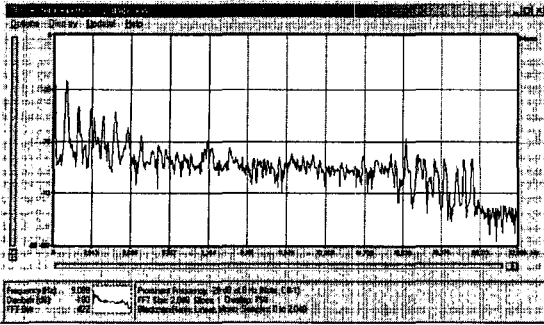


그림 3.2 녹음된 음의 주파수 분포

4. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 단소 음 합성을 위한 Physical Modeling에 대해 연구 하였다. 단소의 내부에서의 공기의 파동을 modeling 하기 위해서 delay line 을 사용 하였으며, delay line 의 끝에는 파동의 reflectance 를 모델링 하기 위한 Reflectance filter 가 사용 되었고, 음공의 모델링을 위해 음공에서의 신호이동을 구현 하였다. 또한 Boundary Layer Effect 를 실제 구현에서 적용하기 위해 filter 를 사용해 신호 손실을 구현 하였다.

이번 연구에서는 입력 값, 즉 취구에 가해지는 압력 값이 일정한데, 실제 연주에서는 이 입력 값의 변화를 통해 연주의 기교를 부릴수가 있다. 따라서 좀 더 유연한 연주 음을 모델링 하기 위해서는 입력 값의 변화에 따른 합성음의 변화에 대하여 연구할 필요가 있다. 또한 단소의 끝에서 발생하는 신호의 반향을 구현해 주는 reflection filter 에 대한 연구가 좀 더 필요 하다.

참고문헌

[1] Gary Paul Scavone. "An Acoustic analysis of single-reed woodwind instruments with an emphasis on design and performance issues and digital waveguide modeling techniques", Stanford university, 1997

[2] Vesa Valimaki. "Discrete-time Modeling of Acoustic Tubes Using Fractional Delay Filter", Helsinki University, 1995

[3] J.O.Smith, "Physical Modeling Using Digital Waveguides", Computer Music Journal, special issue: Physical Modeling of Musical Instruments, Part I, vol.16, pp.74-91, Winter, 1992

[4] Oppenheim.;Willisky. "Signals & Systems", 2nd Ed. Prentice Hall, 1997

[5] Donald E. Hall. "Musical Acoustics", 2nd Ed. B/C Publishing Company, 1991