입자완화법을 이용한 플루 악기 소리 발생 시뮬레이터

유진우, 윤희용, 이도영, 이승규, *최지웅, *김민수
대구경북과학기술원 기초학부, *대구경북과학기술원 정보통신융합공학전공
{ gisikbaksa, sunrise2575, ksl_995, lsk21kr, jwchoi, mskim } @dgist.ac.kr

Sound Generating Simulator for Flue Instrument using Smoothed Particle Hydrodynamics

Jinwoo Yu, Heeyong Yoon, Doyoung Lee, Seungkyu Lee, *Jiwoong Choi, *Minsoo Kim
School of Basic Science, DGIST
* Department of Information & Communication Engineering, DGIST

요 약

플루 악기에서의 소리 발생은 매질의 물리적 특성에 의해 생기는 소용돌이가 원인이다. 그러나 기존의 음향학 연구는 소리의 파동적 특성을 이용하기 때문에 플루 악기에 대해 정확한 분석을 하지 못한다. 본 연구는 이를 해결하기 위하여 전산 유체 역학의 입자완화법(Smoothed Particle Dynamics)을 사용하여 플루 악기에서의 소리 발생을 계산하는 시뮬레이터를 제작하였다. 본 시뮬레이터는 CUDA 를 접목하여 시뮬레이션의 정확도와 연산 속도를 확보하였고, 이를 통해 플루 악기에서의 소리 발생과 전달을 분석할 수 있다. 또한 이를 활용하여 음향학적 디자인에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서 론

소리는 매질을 통해 파동 에너지가 퍼져 나가는 현상으로 정의할 수 있다. 소리의 물리학적 특성인 높낮이, 세기, 위상, 음색 등은 파동의 특성에 의해 나타나고 푸리에 해석으로 분석이 가능하다.

그러나 소리의 전달과는 달리 소리의 발생은 예측 및 분석을 하기 어렵다. 예를 들어, 플루 악기(flue instrument)에서 소리 발생은 공기의 소용돌이(vertex)에 원리를 둔다 [1]. 플루 악기 내부의 공기는 좁은 취구를 지난 후 라비움(labium)을 만나 위아래로 나뉘어진다. 이때 소용돌이가 위아래에 번갈아 나타나며 소리를 생성한다. 그런데 파동성만으로 소리의 공간적 발생 원리를 분석하기 어려우므로 기존 플루 악기 연구는 정확도가 떨어지는 문제가 있었다. 때문에 플루 악기의 정확한 소리 분석을 위해서는 실제 모델을 제작할 필요가 있었고 이 과정에서 추가적인 비용과 시간이 발생하였다.

본 연구는 전산 유체 역학의 입자완화법(Smoothed Particle Hydrodynamics; SPH)을 이용하여 플루 악기의 소리 발생을 계산할 수 있는 시뮬레이션을 목표로 한다. 전산 유체 역학은 SPH 이외에 개별요소법(Discrete Element Method; DEM) 혹은 격자 볼츠만 방법(Lattice Boltzmann Equation; LBM)을 사용한다 [2]. DEM 은 개별적인 과립 모형을 공간에 배치하여 과립 간의 상호작용을 계산한다. 서로 접촉한 과립에 대해서만 상호작용을 계산하므로 연산양이 적지만 기체를 분석할 수 없다는 단점이 존재한다. LBM 은 공간에 격자를 배치하여 격자 사이의 상호작용을 선형 방정식을 사용하여 계산한다. LBM 은 기체 내부의 흐름을 분석하기 편하지만 격자 간격에 의해 정확도가 제한된다는 단점을 가진다. 또한 입자와 물체의 경계가 변하는 경우 격자를 다시 설정해야 하기 때문에 범용성이 떨어진다. 따라서 본 시뮬레이터는 유체의 경계를 따로 계산할 필요가 없으며, 컴퓨터 연산에 유리한 선형 방정식을 사용하는 SPH 를 사용한다. 한편, SPH 는 연산 속도의 문제 때문에 주로 액체 시뮬레이션에 사용된다. 따라서 고체 및 기체에 대해 사용할 수 있도록 CUDA 를 이용하여 총 연산 시간을 단축하였다.

본 시뮬레이터를 통하여 플루 악기를 만드는데 필요한 비용과 시간을 줄일 수 있다. 또한, 매질의 움직임을 시각적으로 나타내어 시간 영역에서 소리의 전달 과정을 분석할 수 있다.

II. 시뮬레이터 설계

본 시뮬레이터는 기체를 입자단으로 나누어 각 입자단을 점으로 가정하고 매 시간 단계마다 각 입자단의 밀도와 압력을 poly6 커널 함수(식 (1))를 사용하여 갱신한다. Poly6 커널 함수는 SPH 에서 사용하는 커널 함수 중의 하나로 주변 입자단의 밀도와 압력이 해당 입자단의 밀도와 압력에 얼마나 영향을 주는 지를 나타낸다 [3]. 밀도와 압력을 식 (2)에 대입하여 두 입자단 사이에 작용하는 힘의 크기를 구한다 [4].

$$W_{poly6}(r,h) = \frac{315}{64\pi h^9}(h^2 - r^2)^3 \quad for \;\; 0 \le r \le h \qquad (1)$$

$$\vec{f_{ij}} = \frac{m_j}{\pi h^4 \rho_j}(1 - q_{ij})\left[15k(\rho_i + \rho_j)\frac{1 - q_{ij}}{q_{ij}}\vec{r_{ij}} - 40\mu\vec{v_{ij}}\right] \qquad (2)$$

식 (2)의 ρ_i, m_j, v_i, r_i는 i 번 입자단의 밀도, 질량, 속도, 위치를 의미한다.

$r_{ij} = r_i - r_j, v_{ij} = v_i - v_j,\ q_{ij} = \|r_{ij}\|/h$ 의 관계를 가진다. μ 는 대기의 점성인 1.81×10^{-5} kg/m·s 을 사용하였다. k는 부피 탄성 계수로 물체의 부피 변화에 저항하는 성질을 나타낸다. 본 연구에서는 섭씨

15° 에서의 k 값인 1.01×10^5 $kg/m \cdot s^2$ 를 사용하였다. h 는 커널 반경으로 각 입자단이 다른 입자단에 영향을 주는 최대 거리를 나타낸다. 커널 반경은 필요에 따라 변경하며 사용하였다.

시뮬레이터의 연산 속도를 높이기 위한 GPU 상의 범용 계산은 그림 1 의 순서도를 따라 이루어진다. GPU 는 입자단이 추가 혹은 삭제될 것인가에 따라 입자단의 정보가 담긴 배열의 정보를 정리한다.

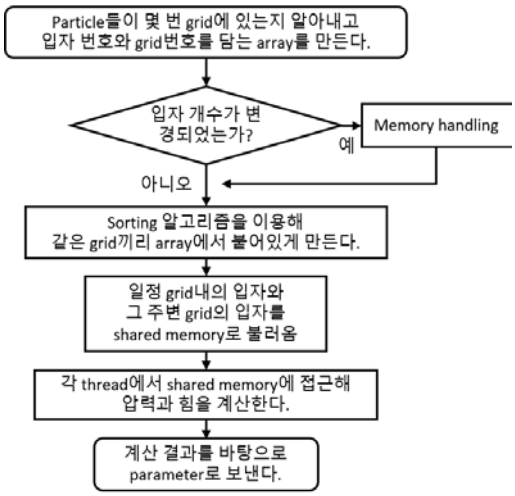

그림 1. GPU 상의 범용 계산 연산 과정 다이어그램

GPU 는 하드웨어 적인 특징 때문에 배열에서 인접한 값을 처리하는 것이 그렇지 않은 경우에 비해 빠른 연산을 한다. 본 시뮬레이터에서 연산이 필요한 경우는 두 입자단이 인접한 경우이므로 연산 속도를 빠르게 하기 위해서는 인접한 입자단의 정보가 배열에서 인접해야 한다. 따라서 sorting 알고리즘을 이용하여 같은 공간 격자 안의 입자단의 정보가 인접하도록 정렬하였다. 이후 GPU 가 접근할 수 있는 shared memory 로 입자단의 정보를 복사하면 GPU 의 연산 단위인 thread 가 shared memory 에 접근하여 연산을 한다.

한편, 시뮬레이터는 각 입자단이 서로 영향을 주는 범위 안에 있는지를 검사하고, 범위 안에 있는 경우에만 서로 간에 가해지는 힘을 계산한다. 그런데 두 입자가 상호작용하는 힘은 뉴턴의 제 3 운동 법칙에 따라 서로 크기가 같으므로 한 번만 계산하여 연산에 필요한 시간을 절반으로 줄일 수 있다.

Ⅲ. 시뮬레이터 구현 결과

시뮬레이터는 분석의 편의성을 위하여 openGL 을 사용하여 시뮬레이션을 시각적으로 구현하였다.

기체와 입자 벽은 프로그램 상으로 동일한 구조에서 변수 값을 변경하여 서로 다른 운동을 나타내도록 하였다. 그림 2 에서 공간에 고정된 초록색 점이 입자 벽을 나타낸다. 입자 벽은 임의로 설정하거나 obj 확장자 파일을 불러들여 공간에 배치할 수 있다.

시뮬레이션 과정 도중에는 색을 통하여 입자단의 밀도를 정성적으로 확인할 수 있다. 힘을 받은 기체 입자단이 모여 밀도가 높아지면 푸른 색에서 붉은 색으로 변한다. 그림 2 을 통하여 취구와 라비움 구조에서 고밀도의 충격파가 퍼지는 것을 확인할 수 있다.

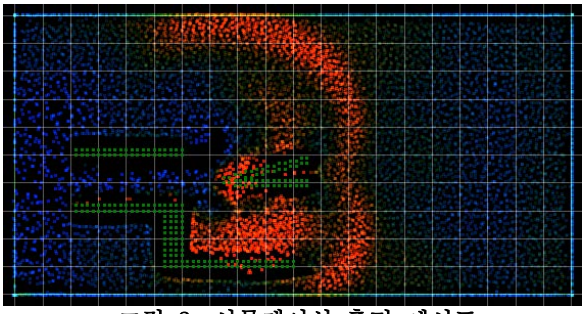

그림 2. 시뮬레이션 측면 예시도

한편, 단위 그리드에서 10 만개의 입자단을 시뮬레이션 할 때 GPU 상의 범용 계산을 사용하면 주변 입자단의 탐색에 걸리는 시간은 142 초에서 1.6 초로 줄어들어 약 88 배의 연산 속도 증가를 나타냈다.

Ⅳ. 결론

본 연구는 액체 분석에 사용되는 SPH 를 기체 분석으로 확장할 수 있으며 SPH 를 이용하여 기체를 통한 파동의 전달을 분석할 수 있음을 확인하였다. 시뮬레이터의 연산 속도에 있어, GPU 상의 범용 계산을 적용하여 유체에서 파동의 발생과 전달을 분석하는 목표에 부합하는 연산 속도를 달성할 수 있었다.

본 시뮬레이터는 구조적 수정 없이 입자단의 변수를 설정하는 것을 통해 서로 다른 물질의 운동을 재현할 수 있다. 또한 obj 파일을 이용하기 때문에 물체의 배치가 자유로운 점을 이용하여 플루 악기뿐 아니라 리드 악기 등의 다른 악기의 디자인 및 분석에 사용할 수 있다. 더 나아가 음향학적 분석이 필요한 공연장 등의 설계에 접목할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

UGRP 운영위원회의 지원을 받아 수행되었으며, 본 연구를 지도해주신 최지웅 교수님, 김민수 교수님, 임성호 박사과정, 오세연 석사과정에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Fabre, B. & Gilbert, J. & Hirschberg, A. & Pelorson, X. Aeroacoustics of musical instruments. Annual review of fluid mechanics. 44, 1-25 (2012)

[2] Blazek, J. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Sankt Augustin, DE: Butterworth-Heinemann. (2015)

[3] Charypar, D. & Gross, M. & Muller, M. Particle-based fluid simulation for interactive applications. Proceedings of 2003 ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation (2003)

[4] Bindel, D. Applications of parallel computers. http://www.cs.cornell.edu/~bindel/class/cs5220-f11/code/sph.pdf (2011)