

간략화된 유체 표면모델을 이용한 강체와 유체의 상호작용 시뮬레이션

김 은 주[†]

요 약

게임이나 가상현실 등에서 사용자들에게 사실성과 몰입 감을 주기 위해서 자연 현상들을 시뮬레이션하고 있다. 게임이나 가상현실에서 물이나 바다와 같은 유체를 3차원으로 시뮬레이션 하는데 있어서 중요한 요소는 실시간 처리와 사실성이다. 유체 모델은 특정 상황에 따른 다양한 방정식과 많은 파라미터 값에 의해 제어되기 때문에 시뮬레이션 하는데 많은 어려움이 따른다. 또한 복잡한 물리 수식을 기반으로 하기 때문에 유체 모델을 시뮬레이션하기 위해서는 많은 수행 시간이 소요된다. 본 논문에서는 실시간 유체와 강체(rigid body) 사이의 상호작용을 표현하기 위해 간략화 된 유체 표면 모델(Fluid-Surface Model)을 제안하고, 개선된 계산과정을 통해 보다 빠르게 시뮬레이션 하도록 한다. 또한 본 논문에서는 유체의 표면과 강체의 상호작용을 표현하는데 있어서 유체의 항력에 의해서 강체와 충돌 시 발생하는 유체 표면의 움직임을 나타낸다. 본 논문에서 제안하는 자연스러운 유체 표면 모델은 유체역학적 방법을 사용하여 실시간에 사실적으로 표현된다. 그리고 이러한 유체 표면 모델을 PC 환경에서 사용자와 상호작용 가능하도록 재현하여, 게임이나 애니메이션에서의 유체 모델들에도 적용할 수 있다.

Interactive Simulation between Rigid body and Fluid using Simplified Fluid-Surface Model

Eun Ju Kim[†]

ABSTRACT

Natural Phenomena are simulated to make computer users feel verisimilitude and be immersed in games or virtual reality. The important factor in simulating fluid such as water or sea using 3D rendering technology in games or virtual reality is real-time interaction and reality. There are many difficulties in simulating fluid models because it is controlled by many equations of each specific situation and many parameter values. In addition, it needs a lot of time in processing physically-based simulation. In this paper, I suggest simplified fluid-surface model in order to represent interaction between rigid body and fluid, and it can make faster simulation by improved processing. Also, I show movement of fluid surface which is come from collision of rigid body caused by reaction of fluid in representing interaction between rigid body and fluid surface. This natural fluid-surface model suggested in this paper is represented realistically in real-time using fluid dynamics verisimilarly. And the fluid-surface model will be applicable in games or animation by realizing it for PC environment to interact with this.

Key words: Fluid-surface Model(유체 표면 모델), Fluid and Rigid body(유체와 강체), fluid dynamics(유체 역학), 3D rendering(3차원 표현)

※ 교신저자(Corresponding Author): 김은주, 주소: 부산광역시 남구 신선로 179번지(608-177), 전화: 051)626-1154, E-mail: ejkim@tu.ac.kr

접수일: 2008년 10월 29일, 완료일: 2008년 12월 1일
[†] 정회원, 동명대학교 정보통신대학 정보통신공학과 전임강사

1. 서 론

컴퓨터 그래픽스 분야에서 물, 불, 폭발, 연기, 가스 등과 같은 자연 현상의 사실적인 표현은 오랜 기간 동안 연구되어온 주제 중의 하나이다. 이런 유체에 관련된 초기 연구에서는 매개함수(parametric functions)를 사용하여 단순히 물의 모습을 외형상 비슷하게 나타내는 기법을 사용하거나, 여러 가지 사인 곡선의 합성을 통한 웨이브 곡면을 이용한 기법들을 사용하였다[1,2]. 하지만 이러한 기법들은 종종 유체의 표현에 유용하게 사용되었지만, 그 사용 범위가 제한적인 단점을 가지고 있다.

최근에는 보다 다양한 형태에서의 보다 자연스러운 유체의 움직임을 표현하기 위해 계산유체역학(Computational fluid dynamics(CFD))에 기초한 물리 기반 모델을 통해서 물의 동작을 표현하는데 많은 연구들이 진행되고 있으며, 보다 자연에 가까운 물의 동작을 만들어 낸다[3-8]. CFD는 물리적인 수식을 사용해서 물의 움직임을 계산함으로써 더욱 자연에 가까운 물의 움직임을 만들어 낼 수 있다. 그러나 유체를 물리 기반모델로 표현할 경우 계산 량이 많아서 실시간 애니메이션이나 게임에 적용하기 어렵다. 본 논문에서는 임의의 강체(rigid body)가 유체(fluid)인 물에 충돌하면서 일어나는 힘의 작용들에 대한 해석을 통해 자연스러운 유체 모델을 실시간에 나타낸다. 이 때 고려해야 할 점은 강체는 모션(motion)이 변해도 각 부분의 속도(velocity)와 형상(shape)이 일정하지만, 유체는 각 부분의 형체가 변화되고, 속도도 달라진다는 점이다.

강체와 유체 사이의 상호작용은 유체 표면과의 충돌 시에 발생한 항력으로 간주하여 계산하고, 유체 표면모델은 O'Brien[4]의 방법을 기본 아이디어로 이를 개선한 모델을 이용한다. 물 시뮬레이션에 있어서 대표적인 O'Brien의 연구는 물을 부피 모델(volume model), 표면모델(surface model) 그리고 스프레이 모델(spray model)로 나누어 물 표면을 시뮬레이션 하였다. 이것은 질량 보존의 법칙을 흐르는 유체에 적용하여 얻어진 연속 방정식을 기본으로 하며 계산 량이 많고 복잡한 수식을 사용해야 하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 간략화 된 수식을 사용하여 유체 모델과 강체 모델 사이의 상호작용을 시뮬레이션 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 관련연구를 살펴보고, 3절에서는 강체와 유체간의 충돌 반응을 어떻게 처리할 지를 기술한다. 4절에서 본 논문에서 제안한 모델의 실험 결과를 분석하고 5절에서 결론을 내린다.

2. 관련 연구

컴퓨터 그래픽스 분야에서 가장 정의하기 어려운 현상중의 하나는 물의 사실적인 움직임에 대한 시뮬레이션이다.

Kass 와 Miller는 나비에 스톡스 방정식(Navier-Stokes Equation)을 사용하여 2D 얇은 물을 위한 수식을 만들었다. 단순화된 수식을 사용해서 물 표면의 높이필드(Height field)를 계산하는 방법이다[5]. O'Brien은 튀기는 물(splashing fluid)의 동적인 시뮬레이션 방법을 도입하여 외부의 물체와 상호 작용하는 물의 동작을 모델링 하였다[4]. 이 방법은 Kass 와 Miller가 제안한 방법을 확장했다고 볼 수 있다.

Foster는 3차원 나비에 스톡스 방정식의 이산화를 통해서 3차원(three dimensions) 시뮬레이터를 개발 하였다[6]. 이 논문에서는 3D 환경에서 움직이는 점성 액체를 조작할 수 있고 액체와 물체와의 상호작용이 많이 개선되었으며, 액체의 동작을 컨트롤 커브(control curve)를 통해서 제어할 수 있다. 최근 CFD(Computational fluid dynamics)방법이 물 관련 시뮬레이션에서 많이 사용되고 있다. 이 방법은 물리적인 수식을 사용해서 물의 움직임을 계산함으로써 더욱 자연에 가까운 물의 움직임을 만들어 낼 수 있다.

나비에 스톡스 방정식을 푸는 방법 중 파티클에 기반을 둔 라그랑주 방식을 이용한 연구들도 있다. 라그랑주 방식은 계산 노드가 유체를 따라 이동하며, 유체를 입자의 집합으로 표현한다. 라그랑주 기법을 이용한 유체 시뮬레이션 기법 중에서 대표적인 연구들은 [7,8]이다. 이 방법은 이웃 입자 찾기에 많은 시간을 소비해야 하며, 비압축성을 보장하기 위해 복잡한 코드를 작성해야 한다.

본 논문에서 제시한 물리 기반 시뮬레이션 모델링 기법은 기하학적 속성만을 사용하여 모델링 한 다른 시뮬레이션과는 달리 뉴턴의 제2법칙과 같은 물리 법칙을 사용하여 현실 세계를 시뮬레이션 하였다. 그리고 유체의 표면과 강체의 상호작용을 표

현하는데 있어서 유체의 항력에 의해서 강체와 충돌 시 발생하는 유체 표면의 움직임을 게임이나 애니메이션 등에 이용하기 위해 간략화 시킨 실시간 모델을 제시하였다.

3. 유체 시뮬레이션

3.1 유체 모델

유체의 물리 기반 시뮬레이션은 복잡한 수식으로 인해 전체 시뮬레이션 수행시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 본 논문에서는 유체와 강체 사이의 상호작용을 보다 간단한 유체 표면 모델을 통해 시스템의 성능을 향상시켰다. 유체를 부피를 가지는 사각격자(rectilinear grid)들의 집합으로 정의하여 모델링하고, 각 격자의 부피의 변화량을 계산하여 유체 표면의 높이 값을 제어할 수 있도록 하였다. 시스템 초기에 외부압력과 대기압력, 중력, 그리고 강체 모델의 무게와 위치를 입력으로 한다.

본 논문에서는 첫째, 물리 기반 유체 모델을 실시간 애니메이션이나 게임 등과 같은 곳에서 적용이 가능하도록 계산 과정을 개선하여 간략화 된 물 모델을 제안한다[4]. 유체의 부피를 보존하기 위해서 반복 계산되는 부분을 단일 수행할 수 있도록 함으로써 계산량을 줄였다. 둘째, 강체와 유체의 상호작용은 에너지 보존법칙을 만족시키고, 전체적인 시뮬레이션은 물리법칙을 따른다.

질량 보존의 법칙을 흐르는 유체에 적용하여 얻어진 방정식을 연속방정식이라고 한다. 그림 1에서 관(tube)과 수직하는 단면 1, 2를 잡고 흐름은 단면 1에서 단면 2로 흐른다고 가정하면 단면 1로 단위시간에 유입하는 질량과 단면 2로 유출하는 질량은 물리학에서의 질량보존의 법칙에 의해 같아야 한다.

단면 1과 2의 단면적을 A_1, A_2 라 하고 그 면에서 속도와 밀도를 각각 V_1, V_2, ρ_1, ρ_2 라 하면 단위시간 동안 A_1 을 통과하여 이동하는 유체의 질량 $\rho_1 A_1 V_1$

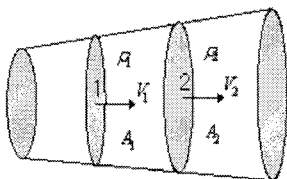


그림 1. 관을 통과하는 정상유동

과 A_2 를 통과하는 질량 $\rho_2 A_2 V_2$ 는 질량 보존의 법칙에 의하여 같아야 한다.

$$\text{질량유량} = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (1)$$

위의 식을 연속방정식이라고 한다. 비압축성 유체에서는 밀도가 항상 일정하므로 $\rho_1 = \rho_2$ 가 되고 이것을 위의 수식에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2)$$

여기서 Q는 일반적으로 유량(flow rate)이라고 한다. 따라서 단면 1에서 2로의 유량과 단면 2에서 1로의 유량은 방향은 반대이고 흐르는 유량은 같다. 미소 입방체 내에서 연속방정식은 수식 (3)과 같다.

$$\nabla \cdot (\rho V) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k \quad (4)$$

$$V = ui + vj + wk \quad (5)$$

$$\nabla \cdot V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6)$$

위의 수식 (3)에서 비압축성 유체에 대해서는 밀도가 항상 일정(상수)하기 때문에 ρ 를 t 에 대해서 미분하게 되면 0이 된다. 따라서 비압축성 유체에 대한 연속방정식은 수식 (7)로 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

유체 모델은 그림 2에서처럼 부피를 가지는 사각격자(rectilinear grid)로 나누어진 칼럼(column)으로 연결되어 있고 각 칼럼 사이의 흐름(flow)은 인접한 칼럼을 연결하는 가상의 파이프를 통해서 이루어진다.

파이프 안의 유체의 흐름을 결정하는 방정식은 유체역학의 물리 법칙으로부터 유도된다. 일반적으로 단위 면적에 작용하는 압력으로부터 각각의 칼럼에 작용하는 정적 압력을 수식 (8)로 계산할 수 있다[6].

$$P_{ij} = \frac{g\rho V_{ij}}{d_x d_y} = \frac{g\rho d_x d_y h_{ij}}{d_x d_y} = h_{ij} g\rho \quad (8)$$

칼럼[i, j]에서 d_x, d_y 는 x와 y 방향으로 칼럼 사이의 거리를, h_{ij} 는 높이를, V_{ij} 는 부피를, ρ 는 유체의 밀도를 나타낸다. 격자 안 칼럼의 정적 압력 계산에서

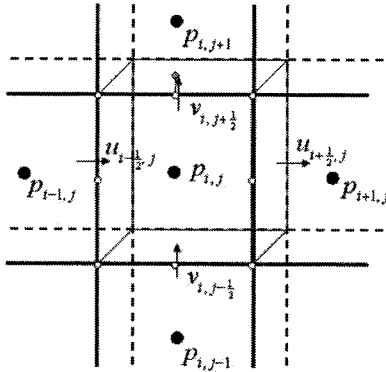


그림 2. 사각 격자로 나누어진 유체 모델

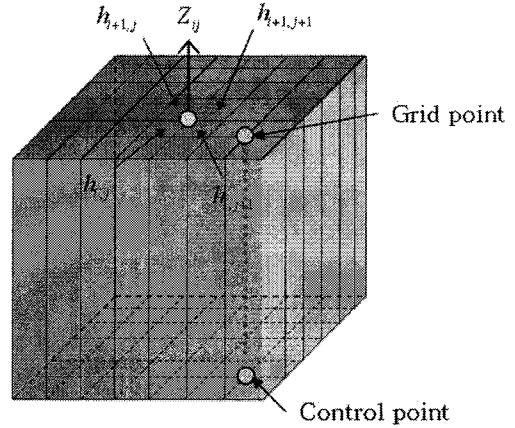


그림 3. 유체 모델의 격자점(grid point)과 제어점(control point)

중력에 의한 압력뿐만 아니라, 외부의 물체에 의한 충격을 시뮬레이션 하기 위해 외부압력에 관한 요소가 추가되어서, 칼럼 $[i, j]$ 에서의 전체 총 압력은 수식 (9)로 쓸 수 있다.

$$P_{ij} = h_{ij}g\rho + P_0 + E_{ij} \tag{9}$$

위의 수식에서 g 는 중력가속도이고, P_0 는 대기 압력이다. 칼럼의 높이는 수식 (10)으로 그 칼럼의 볼륨 V_{ij} 와 관련된다[4]. 아래 수식에서 $S = d_x \cdot d_y$ 는 칼럼의 가로 세로 길이를 의미한다.

$$h_{ij} = \frac{V_{ij}}{S} \tag{10}$$

유체의 흐르는 속도는 시스템 안에 있는 각 파이프를 통해서 이루어진다. 각 시간 간격에서 힘(force)이 파이프 안의 유체의 흐름을 가속시킨다.

칼럼 $[i, j]$ 에서의 힘은 8개의 이웃 중($[k, l] \in \eta_{ij}$) 하나의 파이프와의 압력차이 $\Delta P_{ij \rightarrow kl}$ 를 통해서 결정된다. 뉴턴의 제 2 법칙의 공식을 사용하여 파이프 안의 물의 가속도 $a_{ij \rightarrow kl}$ 는 뉴턴의 제 2 법칙의 공식을 이용하여 유도 할 수 있다.

$$a_{ij \rightarrow kl} = \frac{c(\Delta P_{ij \rightarrow kl})}{m} \tag{11}$$

여기서 c 는 파이프의 단면적을 나타내고, m 은 파이프 안의 물의 질량을 의미한다. 여기서 $\Delta P_{ij \rightarrow kl}$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta P_{ij \rightarrow kl} = \rho g(h_{ij} - h_{kl}) + E_{ij} - E_{kl} \tag{12}$$

유체의 표면에 충돌하거나 떠 있는 물체는 유체표면에 힘을 가하게 된다. 이와 같은 외부압력이 유체의 볼륨에 전달되면 유체 표면의 격자점(grid point)은 유체의 부피모델의 제어점(control point)을 통해 상호작용을 시뮬레이션 할 수 있다. 즉, 표면 모델(surface model)에서 외부의 물체인 강체가 유체와 상호 작용하는 격자점(grid point)의 수직위치(Z_{ij})는 격자점을 둘러싼 4개의 칼럼의 높이에 의해서 결정되며 그림 3과 같다.

격자점의 수직 위치(Z_{ij})는 격자점을 둘러싼 4개의 칼럼 높이의 평균으로써 아래의 수식 (13)으로 계산할 수 있다.

$$Z_{ij} = \frac{h_{ij} + h_{i,j+1} + h_{i+1,j} + h_{i+1,j+1}}{4} \tag{13}$$

각 제어 점(control point)에 작용하는 힘은 외부 압력으로 변환된다. 따라서 외부압력은 그 제어 점과 연결된 칼럼에 적용되어 수식 (14)로 쓸 수 있다.

$$E_{ij} = -\frac{f_e}{4S} \tag{14}$$

3.2 유체의 수력학적 항력과 충돌 반응

유체의 표면과 강체의 상호작용을 표현하는데 있어서 유체의 항력에 의해서 강체와 충돌 시 발생하는 유체 표면의 움직임을 처리하기 위해서는 유체 모델의 수력학적 항력을 계산해야 한다.

유체에서 물은 물 분자들로 이루어진 불연속체가

다. 물 분자들은 상당히 높은 분자 자유도를 가지고 있기 때문에 일정한 형태를 가지지 않고, 용기에 따라 형태가 바뀐다. 물 분자는 개체 하나 하나가 높은 자유도를 가지기 때문에 상호간의 움직임에 높은 영향을 미친다. 다시 말해서 물 속이나 물 표면을 유동하는 고형물의 상대적인 운동과 이웃하는 다른 분자의 상대적인 운동을 방해하려는 경향이 있다. 방해하려는 힘은 전단응력(shear stress)과 수직응력(normal stress)으로 나타난다. 전단응력으로 인한 마찰력 성분을 마찰항력(friction drag)라 부르고, 수직응력에 의한 양력 성분은 형태항력(form drag)라 부른다.

수력학적 항력에 관련된 표본 유동이 그림 4에 나타나 있다. 이는 속도 u 로 접근하는 유체흐름에 의하여 덮쳐지는 정지상태의 원통 또는 정지되어 있는 유체 안에서 속도 u 로 평행하게 이동하는 원통으로 나타날 수 있다. 실제, 이 두 상황은 모든 경우에 원통의 위치에 있는 관측자에 대하여 서로 같다. 전자의 경우에, 항력과 반대방향인 외부 힘이 원통을 제자리에 고정하기에 필요하다. 이에 반하여, 후자의 경우, 외부 힘은 정상적인 이동을 유지하기 위해 필요하다.

원통이 받는 항력을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$F_D = C_D \rho \frac{u^2}{2} A \tag{15}$$

여기서 F_D 는 유체에 대한 물체의 상대운동에 반하는 항력(drag force)이고, C_D 는 일반적으로 레이놀드(Reynolds)수에 의존하는 항력계수(drag coefficient)이다. 원통 주위의 유동을 해석하면 항력의 1/3은 구의 표면에 대한 수직응력으로부터 발생하는 형태항력(form drag)이고, 나머지 2/3는 구의 표면에 대한 전단 응력으로부터 나타나는 마찰항력(friction drag)이다. 형태항력과 마찰항력의 구성비는 물체의 형태에 따라 다르게 나타난다.

본 논문에서는 유체표면과 강체의 충돌로 수력학적 항력이 발생하고 항력의 크기에 따라 강체가 수면 위에서 가라앉도록 동작한다. 충돌 반응은 충돌시의 강체의 위치를 유체 모델에 이벤트로 전달함으로써 물 표면에 충돌에 따른 반작용이 일어나도록 한다. 물에 의한 항력을 받는 강체는 다수의 삼각형들로 이루어진 다면체이다. 면적과 수직 벡터를 이용하여 각 삼각형 면에 작용하는 수직 형태 항력(F_d)을 계산한다.

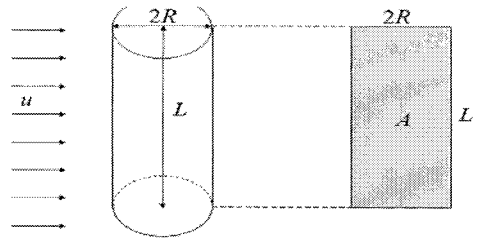


그림 4. 접근 속도 u 로 원통 주위를 유동하는 자유 흐름과 투영 면적 $A = 2RL$

$$F_a = \frac{1}{2} C_D \rho \left| \vec{V}_d \right| S \tag{16}$$

그리고 강체에 작용된 항력은 각 삼각형에 주어진 항력의 합과 같다. 유체와 강체의 삼각형이 충돌을 확인하고 면적을 구할 때에 수면 아래에 있는 점의 위치와 깊이 정보를 파라미터(parameter)로 넘겨준다. 유체 모델은 강체가 접촉하고 있는 부분에서의 깊이를 표면 모델에 적용하여 수면 접촉한 부분의 x, y 좌표에 따라 높이를 검사하고 충돌에 따른 물의 깊이를 처리하여 동심원 모양의 물결을 생성한다.

4. 실험 결과

본 논문의 유체 모델은 펜티엄4 2.0Ghz CPU, 1G

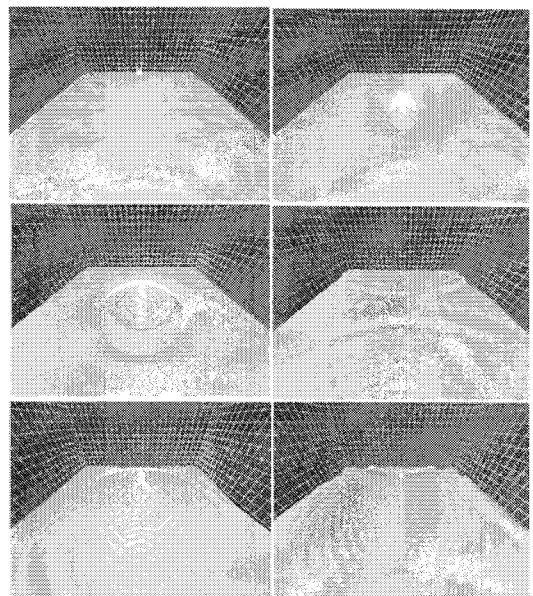


그림 5. 유체 모델의 시뮬레이션 결과

메모리 그리고 Gforce 7600GT 그래픽카드 환경에서 OpenGL 라이브러리와 C++를 이용하여 구현하였다. 유체 표면의 텍스처 렌더링(texture rendering)을 포함하여 실시간에 40 frames/sec의 애니메이션이 가능하였다. 시뮬레이션 시에 강체의 무게와 초기 위치를 설정함으로써 손쉽게 유체의 동작을 제어할 수 있다. 그리고 그림 5와 같은 보기에 좋은 결과가 수행된다.

본 논문은 유체의 표면과 강체의 상호작용을 표현하는데 있어서 유체의 항력에 의해서 강체와 충돌시 발생하는 유체 표면의 움직임은 게임이나 애니메이션 등에 이용하기 위해 간략화 시킨 모델이기 때문에 다른 시뮬레이션의 결과와의 수치적 비교는 큰 의미를 둘 수 없을 정도로 많은 차이가 난다. 따라서 본 논문에서는 현상적 수치 값의 비교는 추가하지 않았다.

5. 결 론

물리 기반 모델링 방법을 사용함으로써 실제계와 비슷한 유체의 현상을 컴퓨터의 가상 환경 상에서 사실적으로 표현 할 수 있다. 유체 시뮬레이션에서 물리 기반 방법은 계산 시간이 많이 소요되기 때문에 실시간에 물의 움직임을 만들어 내는데 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 실시간 유체와 강체 사이의 상호작용을 표현하기 위해 간략화 된 유체 표면 모델(Fluid-Surface Model)을 제안하고, 개선된 계산과정을 통해 보다 빠르게 시뮬레이션 하였다. 또한 유체의 표면과 강체의 상호작용을 표현하는데 있어서, 유체 표면의 움직임을 유체의 항력에 의해서 나타내었다.

본 논문에서 제안하는 자연스러운 유체 표면 모델은 유체역학적 방법을 사용하여 실시간에 사실적으로 표현되었다. 그리고 이러한 유체 표면 모델을 PC 환경에서 사용자와 상호작용 가능하도록 재현하여, 게임이나 애니메이션에서의 유체 모델들에도 적용할 수 있게 하였다.

향후 연구로서는 추가적으로 파티클(particle)처럼 부서지는 물의 동작이나, 3차원 유체 시뮬레이터 모델을 안정적으로 게임에 적용 할 수 있도록 유체 엔진 개발에 관한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Darwyn Peachey, "Modeling Waves and surf," *Proceedings of SIGGRAPH '86*, pp. 65-74, 1986.
- [2] Jerry Tessendorf, "Simulating Ocean Waves." SIGGRAPH '01 Course Notes. 2001.
- [3] Jos Stam, "Stable Fluids," *Proceedings of SIGGRAPH '99*, pp. 121-128, 1999.
- [4] James F. O'Brien and Jessica K. Hodgins. "Dynamic Simulation of Splashing Fluids," *Computer Animation '95*, pp. 198-205, 1995.
- [5] Michael Kass and Gavin Miller, "Rapid, Stable Fluid Dynamics for Computer Graphics," *Proceedings of SIGGRAPH '90*, in *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp. 49-57, 1990.
- [6] Nick Foster and Ronald Fedkiw, "Practical Animation of Liquids," *Proceedings of SIGGRAPH '01*, pp. 23-30, 2001.
- [7] Mathieu Desbrun and Marie-Paule Gascuel, "Smoothed particles: A new paradigm for animating highly deformable bodies," *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation (EGCAS)*, pp. 61-76. 1996.
- [8] Matthias Müller, David Charypar, and Markus Gross, "Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications," *Proceedings of ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation (SCA) 2003*, pp. 154-159, 2003.



김 은 주

1984년 경북대학교 전자공학과 (전산공학, 공학사)
 1986년 경북대학교 전자공학과 (전산공학, 공학석사)
 2002년 경북대학교 컴퓨터공학과(공학박사)
 2000년~현재 동명대학교 정보통신대학 정보통신공학과 전임강사

관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 멀티패러다임 프로그래밍, 병렬알고리즘 등